

**UNIVERSIDAD ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO
GARAVITO**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**Comportamiento de taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas
volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense**

Tesis presentada por:

Yeison Rolando Pérez Aguirre

Bogotá, 6 de abril de 2022



**Comportamiento de taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas
volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense**

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, énfasis en
Geotecnia**

Director de la tesis:

José María Jaramillo Mejía, I.G., MA, PhD

Jurados:

Manuel García López, I.C., MSCE

José Vicente Amórtegui Gil, I.C.

**UNIVERSIDAD ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO
GARAVITO**

Bogotá, 6 de abril de 2022



La tesis de maestría titulada “Comportamiento de taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense”, presentada por Yeison Rolando Pérez Aguirre, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Fecha de Recepción: _____



**Director del Trabajo de Grado
José María Jaramillo Mejía**

**Jurado del Trabajo de Grado
Manuel García López**

**Jurado del Trabajo de Grado
José Vicente Amórtegui Gil**

Fecha de presentación: _____

Fecha de aceptación: _____

RESUMEN

El presente trabajo describe el comportamiento de taludes de corte y laderas del Altiplano Cundiboyacense por medio de la caracterización de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Inicialmente se verifica la composición mineral de suelos muestreados mediante análisis de difracción de rayos X (XRD) y fluorescencia de rayos X (XRF).

Se evalúan las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, con el fin de clasificarlos y determinar valores típicos de dichas propiedades. Para el caso de las propiedades mecánicas, se determina su variación con la humedad. Se verifica el potencial de colapso, expansión y erodabilidad.

Con los resultados obtenidos de dichas propiedades se analiza el comportamiento de taludes y laderas que caracterizan la topografía suave característica del Altiplano. Finalmente se establecen algunas relaciones entre los minerales característicos constituyentes de los suelos estudiados y sus propiedades físicas y mecánicas.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por guiarme en este camino, por darme el soporte y la determinación para continuar. A mis ángeles por el apoyo y ánimo que me brindaron.

Agradezco a mi familia, a mi madre María Elena y mi tía Edy Rubiela por su compañía incondicional; a ellas dedico este trabajo, porque sin su apoyo no lo habría logrado.

Expreso mi especial gratitud al profesor José María Jaramillo por la dedicación que tuvo en el desarrollo de esta investigación y sus orientaciones oportunas y valiosas. También agradezco equipo de GMAS SAS por la ayuda brindada y a los jurados, Ingenieros Manuel García López y José Vicente Amórtegui por la revisión del trabajo.

A la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito le doy gracias por la formación académica que me fue impartida en la Carrera de Ingeniería Civil y por la oportunidad que me dio para realizar el presente trabajo, que espero constituya un aporte a la Ingeniería Colombiana.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	22
2.	OBJETIVOS	29
2.1.	Objetivo general:	29
2.2.	Objetivos específicos	29
3.	MARCO TEÓRICO.....	30
3.1.	Origen de los suelos estudiados.....	30
3.2.	Mineralogía.....	35
3.3.	Propiedades físicas de los suelos	45
3.4.	Propiedades mecánicas de los suelos.....	49
3.5.	Estabilidad de taludes en depósitos de suelo	54
4.	METODOLOGÍA.....	56
4.1.	Revisión bibliográfica.....	57
4.2.	Revisión de mapas geológicos y de suelos	66
4.3.	Selección de la zona de estudio en el Altiplano Cundiboyacense	69
	Perfil Tunja 1: Talud de la variante Bogotá – Sogamoso, Tunja, Boyacá.....	77
	Perfil Tunja 2: Corte vertical en cercanías de la variante Bogotá – Sogamoso, Tunja, Boyacá ...	84
	Sector de Tierra Negra: Vía Bogotá – Sogamoso	86
	Sitios en Tunja y Ventaquemada, muestras suministradas por SIL.....	89

4.4.	Determinación de la mineralogía del suelo de la zona de estudio.....	91
4.4.1.	Fluorescencia de rayos X	92
4.4.2.	Difracción de rayos X	94
4.5.	Determinación de las propiedades índice del suelo de la zona de estudio.	96
4.6.	Determinación de las propiedades mecánicas del suelo.....	98
4.7.	Determinación de los índices de expansión y colapso.	99
4.8.	Determinación del potencial de erodabilidad.....	100
4.9.	Determinación del ángulo máximo de taludes.	100
5.	DESARROLLO METODOLÓGICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	104
5.1.	Mineralogía.....	104
5.1.1.	Resultados del método de fluorescencia de rayos X (XRF).....	104
5.1.2.	Resultados del método de difracción de rayos X (XRD).....	105
5.2.	Propiedades índice.....	109
5.2.1.	Granulometría.....	109
5.2.2.	Límites de Atterberg.....	112
5.2.3.	Otros ensayos de caracterización	117
5.3.	Propiedades mecánicas	133
5.3.1.	Corte directo CD a velocidades muy bajas	134
5.3.2.	Corte directo CD a velocidades mayores	141
5.3.3.	Ensayo triaxial UU.....	143

5.4.	Índices de expansión y colapso	148
	Expansión.....	148
	Colapso	149
5.5.	Potencial de erodabilidad.....	152
5.6.	Inclinación máxima de taludes	156
	5.6.1. Mecanismo de falla rotacional	157
	5.6.2. Mecanismo de falla traslacional.....	165
	5.6.3. Corte vertical	166
6.	RELACIÓN DE LA MINERALOGÍA CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS.....	167
	6.1. Meta halloysita y humedad natural.....	168
	6.2. Meta halloysita con la gravedad específica y la saturación.....	170
	6.3. Mineralogía y propiedades mecánicas.....	172
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	176
8.	BIBLIOGRAFÍA	184
9.	Anexos	190

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Composición mineralógica depósito de suelos derivados de cenizas volcánicas localizado en Manizales, cordillera central. Herrera (2006).</i>	40
<i>Tabla 2. Propiedades típicas de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia y distintas partes del mundo, tomada del trabajo de Lizcano et al. (2006). Las fuentes presentadas en la tabla también fueron tomadas de dicho trabajo.</i>	46
<i>Tabla 3. Variación de los límites de Atterberg con el secado para suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia y en distintas partes del mundo. Tomado del trabajo de Lizcano et al. (2006), al igual que las referencias.</i>	48
<i>Tabla 4. Contenido de elementos principales en óxidos (%), tomado del trabajo de Jaramillo, Rojas y Garver (2005).</i>	58
<i>Tabla 5. Registros sísmicos departamento de Boyacá, tomado de INGEOMINAS (2005).</i>	75
<i>Tabla 6. Descripción muestras perfil Tunja 1 (K6+200), durante visita No. 1, medidas desde nivel 0.00 (ver figura 24). Durante la visita No. 2 las muestras fueron tomadas en los mismos niveles.</i>	79
<i>Tabla 7. Descripción muestras perfil Tunja 1 (K6+100 a K6+200), durante visita No. 1, medidas desde nivel 0.00 (ver figura 24). Durante la visita No. 2 las muestras fueron tomadas en los mismos niveles.</i>	82
<i>Tabla 8. Descripción muestras perfil Tunja 2, medidas desde nivel 0.00.</i>	85
<i>Tabla 9. Descripción muestras Tierra Negra (TN) visita No. 2, alturas medidas desde la superficie del terreno.</i>	87
<i>Tabla 10. Resumen muestras suministradas por SIL extraídas en Tunja y Ventaquemada, departamento de Boyacá.</i>	91
<i>Tabla 11. Resumen de los ensayos realizados para la determinación de las propiedades físicas del material.</i>	97
<i>Tabla 12. Resumen de los ensayos realizados para la determinación de las propiedades mecánicas del material de estudio.</i>	98
<i>Tabla 13. Resumen ensayos realizados para la determinación de los índices de expansión y colapso del suelo.</i>	99
<i>Tabla 14. Clasificación del nivel de desempeño esperado de acuerdo con índices de confiabilidad objetivo asociados a una probabilidad de falla. Tomado de Hidalgo y Pacheco (2011) quienes citan en trabajo de USACE (2014).</i>	101

<i>Tabla 15. Resultados del análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF). Se observan mayores cantidades de óxidos de Aluminio, Hierro y Titanio, sobre óxidos de Calcio, Sodio y Potasio. Estos resultados también fueron usados para la calibración del ensayo de XRD. Fuente propia.</i>	105
<i>Tabla 16. Resultados del análisis de Difracción de Rayos X. Se resalta la presencia de Halloysita y Cristobalita como unos de los principales constituyentes de las muestras, ambos son indicadores de un suelo derivado de cenizas volcánicas. Fuente propia.</i>	106
<i>Tabla 17. Muestras para ensayos límites de consistencia de los suelos en distintas localidades del Altiplano Cundiboyacense y bajo distintas condiciones de humedad; ensayadas a humedad natural o afectada por ciclos de secado.</i>	114
<i>Tabla 18. Resultados ensayos límites de Atterberg sobre muestras tomadas en distintas localidades del Altiplano Cundiboyacense sobre la zona de estudio especificada, para distintos contenidos de humedad inicial. En la tabla wo es la humedad inicial del ensayo, LL es el límite líquido e IP es el índice de plasticidad.</i>	115
<i>Tabla 19. Contenidos de humedad natural perfil Tunja 1, visita 1.</i>	118
<i>Tabla 20. Contenidos de humedad natural perfil Tunja 2</i>	119
<i>Tabla 21. Contenidos de humedad perfil de suelo zona puente peatonal CRIB - Tunja</i>	120
<i>Tabla 22. Contenidos de humedad perfil de suelo zona Green Hills – Tunja</i>	122
<i>Tabla 23. Contenidos de humedad perfil de suelo Ventaquemada, Boyacá.</i>	123
<i>Tabla 24. Variación humedad por almacenamiento sobre muestras SIL</i>	124
<i>Tabla 25. Resultados ensayo gravedad específica con picnómetro muestras tomadas sobre el Altiplano Cundiboyacense</i>	126
<i>Tabla 26. Valores típicos de gravedad específica de las partículas sólidas del suelo para distintos tipos de suelo, los valores obtenidos en este estudio se encuentran en el rango típico. Tomado de valores reportados por Marcia (2017).</i>	127
<i>Tabla 27. Valores obtenidos correspondientes al peso unitario total sobre muestras inalteradas a partir de los dos métodos descritos en la norma INVIAS. Se excluyen datos de ensayos cuyo parafinado no fue adecuado y por lo tanto no son confiables.</i>	128

<i>Tabla 28. Resumen de las relaciones gravimétricas y volumétricas determinadas en este estudio para muestras de suelo derivadas de cenizas volcánicas. En la tabla w_n, humedad natural; G_s, gravedad específica; γ_t, peso unitario total; e, relación de vacíos; n, porosidad; S, saturación; γ_{sat}, peso unitario saturado; γ_{dry}, peso unitario seco.</i>	132
<i>Tabla 29. Resultados del ensayo de corte directo CD a bajas velocidades sobre muestras remoldeadas y compactadas.</i>	136
<i>Tabla 30. Resultados ensayo de corte directo CD sobre muestras remoldeadas y compactadas a una velocidad de corte mayor.</i>	141
<i>Tabla 31. Resistencia al corte en condición no consolidada - no drenada obtenida de ensayos triaxiales realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y proveniente de información entregada por SIL.</i>	145
<i>Tabla 32. Medida del potencial de expansión bajo distintos criterios de evaluación. Se genera contradicción en resultados de ensayos en consolidómetro y evaluación a partir de límites de consistencia. Tomada de NSR-10, título H.</i>	149
<i>Tabla 33. Grado de colapso de acuerdo con el índice de colapso determinado en los ensayos. Especímenes se encuentran en el rango moderado de grado de colapso, con valores cercanos a presentar moderadamente severo grado de colapso. Tabla tomada de Norma INV E – 157.</i>	151
<i>Tabla 34. Criterios de evaluación grado de dispersión de un suelo aplicando el ensayo de doble hidrómetro.</i>	154
<i>Tabla 35. Grado de dispersión suelos derivados de cenizas volcánicas en el Altiplano Cundiboyacense.</i>	155
<i>Tabla 36. Resumen de las inclinaciones máximas para distintas alturas de talud en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense, teniendo en cuenta una probabilidad de falla (P_f) de 0.02% y valores esperados del factor de seguridad [$E(FS)$] de 1.0 y 1.5.</i>	164

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Proceso de formación de suelos derivados de cenizas volcánicas. Tomado de Herrera (2006).</i>	32
<i>Figura 2. Fuentes volcánicas que dan origen a depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas en Colombia, según Lizcano et al. (2006). Notar que representan depósitos en la Cordillera Oriental, pero asignan su origen a erupciones volcánicas de la Cordillera Central.</i>	34
<i>Figura 3. Imágenes de vidrio volcánico provenientes de difracción de electrones por retro-difracción (BSE). Tomado de estudios de forma y dimensión fractal realizados en Hungría (Nemeth, 2010).</i>	37
<i>Figura 4. Perfil estratigráfico típico de suelos derivados de cenizas volcánicas en el eje cafetero, Colombia. Regla general: los suelos más profundos y antiguos son finos y arcillosos. Tomado de Herrera (2006).</i>	38
<i>Figura 5. Estructura determinada por Herrera (2006) de asociaciones de Alófana e Imogolita.</i>	42
<i>Figura 6. Representación esquemática alófana. Tomado de Herrera (2006).</i>	42
<i>Figura 7. Modelo de hidratación alófana. Tomado de Herrera (2006).</i>	43
<i>Figura 8. Halloysita (a) tubular y (b) esferoidal, imágenes de SEM. Tomado de Herrera (2006).</i>	45
<i>Figura 9. Afectación a los límites de consistencia en ensayos realizados sobre muestras con humedad natural y expuestas a un ciclo de secado al horno. Tomado de Lizcano et al. (2006).</i>	47
<i>Figura 10. Esquema porosidad dual suelos derivados de cenizas volcánicas con presencia de minerales de arcilla característicos, tomado de Herrera (2006).</i>	49
<i>Figura 11. Incidencia de la cementación en la envolvente de resistencia al corte de suelos derivados de cenizas volcánicas (Herrera, 2006).</i>	51
<i>Figura 12. Datación zona central de un afloramiento en el sector de Tierra Negra (Boyacá), tomado del trabajo de Jaramillo, Rojas y Garver (2005).</i>	58
<i>Figura 13. Esquema del desarrollo estructural y topográfico de la Cordillera Oriental de los Andes en Colombia entre el Cretáceo y el Cenozoico. a) Cretáceo tardío, b) Maastrichtiano – Paleoceno, c) Eoceno – Oligoceno y d) Mioceno – Cuaternario, se destaca el levantamiento principal de la Cordillera en este periodo. Tomado de Horton, Parra y Mora (2020).</i>	60

<i>Figura 14. Ubicación volcán de Paipa sobre la cordillera oriental, entre las longitudes 73°9'4" O a 73°3'39"O y latitudes 5°40'28"N a 5°45'20"N. Tomado del trabajo de Pardo, Cepeda y Jaramillo (2005).</i>	62
<i>Figura 15. Esquema explicativo de la relación depósitos post-andinos, sector Tunja - Oicatá. Tomado del trabajo de Reyes (1990), el autor no especifica escala.</i>	63
<i>Figura 16. Unidades cronoestratigráficas presentes en el Altiplano Cundiboyacense que comprende los municipios boyacenses de Ventaquemada, Tunja, Paipa, Duitama y Sogamoso. Se observan principalmente en esta zona formaciones desarrolladas durante los periodos Cretácico (k), Paleógeno (E), Neógeno (N) y Cuaternario (Q), relacionadas con las formaciones Tilatá, Tunja y otras formaciones cubiertas por cenizas volcánicas.</i>	68
<i>Figura 17. Extensión aproximada de suelos derivados de cenizas volcánicas sobre la Cordillera Oriental y el Altiplano Cundiboyacense. Imagen de fondo tomada y adaptada del trabajo de Herrera (2006).</i>	69
<i>Figura 18. Régimen de lluvias bimodal cuencas de los Ríos Lebrija, Sogamoso y Chicamocha. Tomado de Atlas Interactivo del IDEAM.</i>	71
<i>Figura 19. Régimen de lluvias bimodal de la ciudad de Tunja (tomado de Atlas Interactivo del IDEAM)</i>	72
<i>Figura 20. Pisos térmicos presentes en el departamento de Boyacá, tomado de IGAC (2005).</i>	73
<i>Figura 21. Fuentes sismogénicas identificadas. Tomado de IGAC (2005).</i>	74
<i>Figura 22. Mapa de amenaza por deslizamiento del departamento de Boyacá; IA, amenaza muy alta; IB, amenaza alta; II, amenaza media; y III, amenaza baja. La zona de estudio se encuentra en un nivel de amenaza alta por deslizamiento principalmente. Tomada y adaptada de INGEOMINAS (2000).</i>	76
<i>Figura 23. Ubicación toma de muestras perfil Tunja 1 para las visitas No.1 y No. 2. Tomada de Google Earth sobre la variante en Tunja, al oriente de esta es posible observar deslizamientos prolongados que involucran volúmenes considerables.</i>	78
<i>Figura 24. Esquema toma de muestras sobre perfil Tunja 1, dimensiones presentadas en metros.</i>	78
<i>Figura 25. Localización del corte vertical para la toma de muestras perfil Tunja 2, extraída de Google Earth. Se puede observar la erosión severa de la zona.</i>	84
<i>Figura 26. Localización talud de toma de muestras Tierra Negra para las visitas No. 1 y No. 2. Tomado de Google Earth.</i>	87

<i>Figura 27. Localización muestras suministradas por SIL, en A) zona puente peatonal CRIB (Tunja), B) Green Hills (Tunja) y C) Ventaquemada. Adaptado de Google Maps.</i>	90
<i>Figura 28. Representación esquemática de la técnica de Difracción de Rayos X para la identificación y cuantificación de estructuras minerales en las muestras, en esta ω representa el ángulo de incidencia, equivalente a $\frac{1}{2} 2\theta$. Tomado de Speakman (Basic of X-Ray Powder diffraction – MIT).</i>	94
<i>Figura 29. Distribución de probabilidad del factor de seguridad y relación con el índice de confiabilidad β, mayores valores de este representan menores probabilidades de falla.</i>	102
<i>Figura 30. Difractogramas obtenidos sobre las muestras 2, 3, 5 y 7 del perfil Tunja 1 (TJ1) y sobre muestras 12 y 14 del perfil Tunja 2 (TJ2) analizados por el método de Reitveld. Fuente Propia.</i>	106
<i>Figura 31. Estructura mineral de la halloysita; a) y b) estructura atómica de la halloysita; c) imágenes obtenidas de TEM de los nanotubos de halloysita; d) imágenes obtenidas de AFM (Microscopio de Fuerza Atómica) de nanotubos de halloysita; e) Imágenes obtenidas de microscopio electrónico de transmisión (TEM) que muestran la morfología correspondiente a nanotubos de meta halloysita colombiana (Mondoñedo, Cundinamarca, Colombia). a), b), c) y d) tomado de Massaro, Noto y Riel (2020), e) tomado de Carrillo et al. (2014).</i>	108
<i>Figura 32. Distribución granulométrica de las muestras tomadas en Tierra Negra, material derivado de cenizas volcánicas. Porcentaje que pasa el tamaño de partícula de 0.002 mm está entre el 80% y 100%, el material se puede considerar como franco arcilloso, asociado a un alto grado de meteorización.</i>	111
<i>Figura 33. Carta de plasticidad para la clasificación de muestras; material seco es representado con puntos y material inalterado con triángulos, se diferencian con colores las distintas zonas de exploración sobre el altiplano. Se observan cambios significativos en el comportamiento del material expuesto a ciclos de secado y humedecimiento; disminución promedio aproximada de 41% en el límite líquido y 43% en índice de plasticidad, por lo que pasa de un material de alta plasticidad a uno de media a baja.</i>	117
<i>Figura 34. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil Tunja 1.</i>	118
<i>Figura 35. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil Tunja 2</i>	119
<i>Figura 36. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil zona puente peatonal CRIB – Tunja, información suministrada por SIL (Tunja).</i>	121

<i>Figura 37. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil zona Green Hills – Tunja, información suministrada por SIL (Tunja).</i>	122
<i>Figura 38. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil zona Ventaquemada, Boyacá, información suministrada por SIL (Tunja).</i>	123
<i>Figura 39. Comparación de las humedades naturales obtenidas en este estudio con aquellas reportados en la literatura para suelos derivados de cenizas volcánicas.</i>	125
<i>Figura 40. Comparación gravedad específica de las partículas sólidas (Gs) obtenida en este estudio con valores en la literatura para suelos derivados de cenizas volcánicas.</i>	127
<i>Figura 41. Comparación valores obtenidos de pesos unitarios totales respecto a los reportados en la literatura sobre suelos derivados de cenizas volcánicas.</i>	129
<i>Figura 42. Comparación valores obtenidos para relación de vacíos, significativamente más bajos que los reportados por otros autores.</i>	130
<i>Figura 43. Comparación valores obtenidos para saturación (S, %) con otras investigaciones</i>	131
<i>Figura 44. Comparación valores obtenidos para peso unitario seco</i>	131
<i>Figura 45. Variación de los parámetros de resistencia al corte con la profundidad</i>	136
<i>Figura 46. Variación de los parámetros de resistencia al corte con la humedad inicial del ensayo, en este caso, la humedad natural del espécimen (wn).</i>	137
<i>Figura 47. Variación de los parámetros de resistencia al corte con la humedad final del ensayo.</i>	138
<i>Figura 48. Variación de los parámetros de resistencia al corte con el peso unitario total de los especímenes de ensayo.</i>	138
<i>Figura 49. Comportamiento esfuerzo cortante – deformación lateral obtenido de ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD) sobre muestras tomadas durante la visita No. 2 a las localidades de Tunja y Tierra Negra (Ventaquemada). El material exhibe las características de un material dúctil con tendencia a presentar endurecimiento por deformación.</i>	140
<i>Figura 50. Variación con la profundidad de los parámetros de resistencia al corte en condición consolidada y parcialmente drenada obtenidos de ensayos de corte directo CD a mayores velocidades sobre especímenes remoldeados.</i>	142

- Figura 51. Relación entre el contenido de agua del espécimen en la falla, el peso unitario al que es llevado el espécimen en el ensayo de CD sobre muestra remoldeada y la cohesión. En A) no se aprecian humedades en el rango de 0 a 30% aproximadamente debido a que para el proceso de compactación el material fue ligeramente humedecido en muestras secas, adicionalmente el ensayo de CD se realiza sumergiendo la caja de corte. _____ 143
- Figura 52. Cambio de la resistencia al corte S_u con la profundidad. _____ 146
- Figura 53. Comportamiento de la resistencia al corte en condición no consolidada – no drenada (S_u) con el cambio en el contenido de agua de las muestras, tanto en humedad final como inicial. Con la humedad final se presenta un mayor ajuste en la tendencia, condicionamiento asociado a la estructura mineral de este tipo de suelo. _____ 147
- Figura 54. Comportamiento identificado por Northey y Schafer (1974), en un suelo alofánico desarrollado en Nueva Zelanda, este relaciona el contenido de humedad y la resistencia a la compresión confinada, ensayo similar al triaxial UU. Tomado de Jacquet (1987). _____ 147
- Figura 55. Relación entre el peso unitario del espécimen ensayado en el triaxial UU y la resistencia al corte, S_u . 148
- Figura 56. Resultados ensayo índice de colapso, espécimen mostró grado del colapso moderado. _____ 150
- Figura 57. Disposición estructural de nanotubos de halloysita en distintas zonas del mundo, imágenes provenientes de microscopio electrónico de barrido (SEM); a), b) y c) arcilla de Siberia, oeste de Australia; d) Matuari Bay, Northland, Nueva Zelanda; e) Dragon Mine, Utah, Estados Unidos de América; y f) Latah County, Idaho, Estados Unidos de América. Tomado de Cavallaro et al. (2017). _____ 152
- Figura 58. Curvas de distribución granulométrica ensayo de doble hidrómetro para estimación potencial de erodabilidad se observa la variación del diámetro de las partículas con el porcentaje que pasa cada uno de los tamaños de estas. _____ 154
- Figura 59. Procedimiento llevado a cabo para la determinación de la inclinación máxima para una P_f igual a 0.02% y para $E(FS)$ iguales a 1.0 y a 1.5 en la superficie circular crítica, mediante análisis de equilibrio límite en software "Slide 2D". _____ 162
- Figura 60. Inclinación máxima de taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas para distintas alturas, en el rango de resistencia al corte determinado mediante ensayos de corte directo en condiciones CD. Sin tener en cuenta sobrecarga en la cresta del talud. _____ 163

<i>Figura 61. Variación de la altura máxima para un talud infinito con la resistencia, para un ángulo crítico de 45°, factor de seguridad de uno (1) y peso unitario igual a 16 kN/m³.</i>	166
<i>Figura 62. Corte vertical evaluado, para la determinación de la altura máxima con la variación de la resistencia al corte, Su.</i>	166
<i>Figura 63. Variación de la altura máxima para un talud de corte vertical con la resistencia, para un ángulo crítico de 45°, factor de seguridad de uno (1) y peso unitario igual a 16 kN/m³.</i>	167
<i>Figura 64. Relación entre el contenido de meta halloysita en los especímenes y el contenido de humedad.</i>	168
<i>Figura 65. Relación de proporcionalidad entre la humedad inicial del espécimen y su límite líquido.</i>	169
<i>Figura 66. Relación de proporcionalidad entre la humedad inicial del espécimen y su índice de plasticidad.</i>	170
<i>Figura 67. Variación de la gravedad específica de las partículas sólidas con el contenido de meta halloysita.</i>	171
<i>Figura 68. Variación de la saturación del suelo con el contenido de meta halloysita.</i>	171
<i>Figura 69. Variación de la cohesión con el contenido de meta halloysita.</i>	173
<i>Figura 70. Variación del ángulo de fricción con el contenido de halloysita.</i>	173
<i>Figura 71. Variación de la cohesión con el contenido de caolinita.</i>	174
<i>Figura 72. Variación del ángulo de fricción con el contenido de caolinita.</i>	175

ÍNDICE DE FLUJOGRAMAS

<i>Flujograma 1. Árbol del problema del estudio del comportamiento de taludes. Fuente propia.</i>	28
<i>Flujograma 2. Metodología trabajo de grado.</i>	56

ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>Imagen 1. Deslizamiento en suelos derivados de ceniza volcánica, sector de Tierra Negra, vía Tunja - Sogamoso (Boyacá). Fuente propia.</i>	25
<i>Imagen 2. Vista lateral de un deslizamiento en la vía en cercanías de Ventaquemada, carretera Tunja - Sogamoso (Boyacá). Fuente propia.</i>	26
<i>Imagen 3. Fotografía perfil Tunja 1 durante la visita No. 1; A) talud muestreado; B) excavación capa de suelo rojizo que cubre el talud de aproximadamente 50 cm de espesor; C) material franco arcilloso gris amarillento ubicado bajo la capa de suelo rojizo y; D) extracción de muestra con pala para análisis de mineralogía.</i>	80
<i>Imagen 4. Muestras embaladas provenientes de perfil Tunja 1 en visita No.1.</i>	81
<i>Imagen 5. Muestras embaladas provenientes de perfil Tunja 1 en visita No.2.</i>	82
<i>Imagen 6. Recolección de muestras en perfil TJ1-V2. A) Toma de muestras en el mismo perfil muestreado durante visita No.1 (K6+200), se presenta la recolección de estas sobre la pendiente de 26º del talud; B) Toma de muestras en la pendiente de 34º del talud ubicado en el K6+200, a la izquierda Yeison Pérez Aguirre; y C) Toma de muestras superficiales sobre talud situado en el K6+100, a la izquierda los profesores José María Jaramillo Mejía y Manuel García López.</i>	83
<i>Imagen 7. Corte vertical; perfil Tunja 2. En este se puede apreciar el desarrollo de cuatro distintos horizontes o paleosuelos, en el corte se aprecia un agrietamiento prolongado. En la fotografía el Dr. José María Jaramillo Mejía.</i>	85
<i>Imagen 8. Muestras embaladas provenientes de perfil Tunja 2.</i>	86
<i>Imagen 9. Apariencia típica muestras sector de Tierra Negra, Ventaquemada, Boyacá para la visita No. 1, en A) Embalaje de muestras para conservar sus propiedades, B) mecanismo para la extracción de muestras (de tubo</i>	

- Shelby), C) y D) muestras típicas encontradas en la localidad de Tierra Negra, arcilla gris amarillenta y arcilla gris rojiza respectivamente. _____ 88
- Imagen 10. Apariencia muestra en bloque tomada en visita No. 2 al sector de Tierra Negra, Ventaquemada, Boyacá. _____ 89
- Imagen 11. Preparación de muestras para análisis de fluorescencia de rayos X; A) muestra secada al horno para determinación de humedad y pulverización; B) equipo para pulverizar muestras; C) muestra pulverizada (muestra 7); D) separación de 1 gramo de muestra calcinada; E) mezcla homogénea de fundente y material; F) fusión de mezcla para producción de perlas; G), H) e I) perlas para análisis de fluorescencia de rayos X; y J) espectrómetro para XRF. Fuente: propia. _____ 93
- Imagen 12. Preparación muestras XRD; A) muestra secada y pulverizada; B) embalaje de muestras para XRD; C) y D) material agregado a probeta; E) probeta con agua y material agitado para dispersión y posterior sedimentación; F) colocación de mezcla sobre cristales para XRD; y G) proceso de secado de mezcla sobre cristales para análisis XRD. _____ 96
- Imagen 13. Muestras del sector de Tierra Negra para análisis granulométrico por hidrómetro. Estas se seleccionan debido a la presencia de un evidente agrietamiento que impide la ejecución de ensayos mecánicos. Se dejan secar al aire, su totalidad pasa el tamiz No. 10. _____ 109
- Imagen 14. Preparación de la muestra en agente dispersante (hexametáfosfato de sodio) durante un día. Para análisis granulométrico se toman las muestras M1 y M2. _____ 110
- Imagen 15. Proceso de sedimentación de las partículas en probetas, las muestra M1 y M2 presentan similitud en la sedimentación. _____ 110
- Imagen 16. Ensayo límite líquido sobre muestras alteradas e inalteradas: A1 y A2) Muestra 4 (Tierra Negra): hidratación y muestra seca límite líquido; B1 y B2) Muestra 4 (SIL): secada al aire y ejecución ensayo en cazuela Casagrande; C1 y C2) Muestra 6 (SIL): ejecución ensayo límite líquido y plástico e hidratación muestra. _____ 113
- Imagen 17. Procedimiento para la ejecución del ensayo de gravedad específica de las partículas sólidas (Gs); A) instrumentos necesarios para el desarrollo del ensayo; B) preparación de la lechada, se usa vaso de dispersión para homogeneizar la mezcla; C) lechada puesta en picnómetro previo a la extracción de aire; D) configuración bomba de vacío para la extracción de aire al interior de la mezcla dispuesta en el picnómetro de 500 mL; E) medición de masa

de picnómetro con suelo y agua; F) y G) medición de masa de suelo proveniente de mezcla en picnómetro, secada al horno a 110 °C durante aproximadamente 24 horas. _____ 126

Imagen 18. Peso unitario total mediante el parafinado de la muestra y aplicación del principio de Arquímedes. A) muestra sin parafinar, previa a ser pesada al aire; B) muestra parafinada, será pesada al aire y sumergida en agua; y C) configuración balanza para pesar muestras al aire y en agua. _____ 129

Imagen 19. Procedimiento del ensayo de corte directo CD sobre muestras remoldeadas provenientes de Tunja y Tierra Negra en visita No. 2 (TJ1-V2 y TN-V2); A) material pesado para lograr la densidad requerida en la caja de corte con dimensiones conocidas, se inicia proceso de compactación poniendo previamente la piedra porosa y el papel filtro; B) compactación por capas del material; C) muestra compactada a la densidad requerida (se presentan algunas variaciones debido a energía de compactación difícilmente controlada); D) colocación de papel filtro y piedra porosa sobre muestra compactada, previo a colocación de placa de transferencia y montaje en equipo de corte directo; E) configuración equipo de corte y proceso de consolidación de la muestra; F) procedimiento de corte sobre muestra compactada y consolidada; y G) muestra fallada, se puede observar el plano de falla y la deformación lateral generada por la máquina de corte directo. _____ 135

Imagen 20. Procedimiento realizado para la determinación de la resistencia al corte en condición UU mediante ensayo Triaxial UU. A) y B) proceso de tallaje de espécimen a las dimensiones requeridas; C) montaje espécimen en cámara de equipo triaxial; D) proceso de saturación a determinadas presiones de cámara y contrapresión; E) aplicación esfuerzo de compresión sobre muestra saturada hasta llevar a la falla; F) fallo de la muestra al interior de la cámara; y E) superficie de falla, aproximadamente a 45°. Fotografías tomadas en ensayo muestra SIL – 5 (GH).
_____ 145

Imagen 21. Fenómenos de inestabilidad de taludes ocasionados por la pérdida de cobertura vegetal y erosión superficial, casos observados en la zona de estudio. Imágenes A y B son fuente propia, imagen C extraída de Google Maps (Street View). En B y C se puede observar el desprendimiento superficial de material producto de la erosión.
_____ 156

Imagen 22. Deslizamientos rotacionales en la zona alta de un depósito de cenizas volcánicas en cercanías de Tierra Negra, se observa el escarpe principal de falla, al igual que los flancos del deslizamiento, en la fotografía de la

izquierda se observa la implementación de sistemas de estabilización (trinchos). Es posible ver estos grandes deslizamientos en la figura 26, en la sección 4.3, en esta la morfología se observa claramente. Fuente propia. 158

Imagen 23. Enorme deslizamiento cuyo movimiento más probable corresponde a un deslizamiento rotacional, su magnitud se aprecia en la figura 26 de la sección 4.3. Evidencia las grandes masas que involucra este tipo de depósitos. Fuente propia. 158

Imagen 24. Movimiento complejo correspondiente a un deslizamiento rotacional retrogresivo en el municipio de Ventaquemada, en la fotografía de la izquierda se puede identificar un escarpe de menor magnitud, al fondo se identifica el flanco derecho y escarpe principal del deslizamiento. La fotografía derecha fue tomada tiempo después, en el mismo lugar, mostrando el avance del deslizamiento; el material situado en la parte superior se transporta sobre el deslizamiento más antiguo, por tal razón, no es posible identificar el escarpe de menor magnitud. Fuente propia. 159

Imagen 25. Deslizamiento rotacional en el sector de Tierra Negra, se observa el escarpe principal en la zona media del talud, el deslizamiento podría evolucionar a un movimiento complejo retrogresivo. Fuente propia. 160

Imagen 26. deslizamiento en zona de Ventaquemada, se observa la corona del deslizamiento dentro de la calzada, también es posible apreciar el levantamiento del material debido al movimiento sobre la superficie circular de falla generada. Fotografía suministrada por Servicios de Ingeniería Ltda - SIL. 160

Imagen 27. Posible deslizamiento rotacional, podría convertirse en un movimiento complejo. En este se han aplicado algunas medidas de mitigación, como la instalación de un muro en gaviones y posteriormente un muro de contención. Fuente propia. 161

Imagen 28. Enorme zona inestable conformada por distintos deslizamientos de menor magnitud, en la figura 23 se aprecia la extensión de esta zona. 161

Imagen 29. Topografía suave exhibida en el paisaje del Altiplano Cundiboyacense, relacionada con los valores de resistencia al corte obtenidos en estos suelos; A) disposición natural suelo derivado de cenizas volcánicas en el contacto suelo roca, este se deposita formando un ángulo aproximado de 14° con la horizontal; B) y C) topografía suave presente en el altiplano, se observan colinas redondeadas y pendientes bajas en laderas naturales. 165

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia existe gran variedad de suelos que se forman por la sedimentación de materiales transportados por distintos medios. En este proceso, el tipo de material originalmente depositado y las condiciones ambientales que alteren su estructura original, condicionan las propiedades físicas y mecánicas que poseen actualmente. Algunos de estos se caracterizan por presentar problemas geotécnicos, como inestabilidad de taludes de corte y laderas, dificultades en la compactación, cambios volumétricos, entre otros. Este es el caso de los depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas, que en Colombia cubren cerca del 11% del territorio y presentan propiedades particulares asociadas directamente con la configuración de la estructura mineral resultado de la meteorización del material parental. De acuerdo con el trabajo de Herrera (2006), la mayoría de los estudios que se han realizado sobre estos suelos buscan explicar su origen, mineralogía, localización, técnicas más adecuadas para su caracterización y dificultades prácticas en aplicaciones de ingeniería.

Los depósitos de suelos provenientes de ceniza volcánica en Colombia son relacionados por lo general a la actividad volcánica en la Cordillera Central, sobre la cual existe más información, por lo tanto, resulta de gran utilidad caracterizar los suelos provenientes del transporte y depositación de cenizas volcánicas generadas por actividad volcánica del Altiplano Cundiboyacense (hipótesis que se pretende confirmar con el presente estudio). Por la extensión que presenta esta actividad y las diferentes secuencias de paleosuelos encontradas, asociadas con distintos eventos volcánicos (Jaramillo et al, 2005) surge la necesidad de comprender su comportamiento mecánico. Las características de estos suelos dependen de la fuente volcánica que los originó, la energía de emanación de dicha fuente, la secuencia de depositación y en gran medida de la meteorización física, química y biológica que ha sufrido el material depositado originalmente,

principalmente vidrio volcánico (Herrera, 2006), el cual es alterado fácilmente y como resultado se puede obtener material arcilloso con propiedades particulares para tener en cuenta en la construcción de estructuras de Ingeniería Civil. Este material arcilloso se encuentra en áreas apreciables del Altiplano Cundiboyacense y presenta una meteorización avanzada, prácticamente sin rastros del material sedimentado originalmente.

Los materiales arcillosos (en su mayoría) presentes en estos depósitos condicionan el comportamiento de los suelos; caracterizados por las siguientes propiedades (Herrera, 2006, Rendón et al, 2020, Betancur, Builes y Millán, 2013):

- Alta porosidad,
- Alta relación de vacíos,
- Presencia de minerales expansivos,
- Alta afectación por desecación y agrietamiento (relacionadas con ciclos de humedecimiento y secado),
- Dificultad en recuperar propiedades con el re-humedecimiento,
- Afectación de la resistencia al corte por cambios en la humedad (ablandamiento, alteración de la succión y de la cementación),
- Límites de consistencia elevados,
- Altos contenidos de humedad in situ y potencial riesgo de erodabilidad.

En estudios como los citados se establece que este material en estudio resulta provechoso para la agricultura y bastante problemático para la ingeniería, como se observa en la práctica al recorrer el Altiplano.

Los suelos de cenizas volcánicas se extienden en gran parte del Altiplano Cundiboyacense, con espesores considerables, algunos mayores de treinta metros, por lo que la determinación de sus propiedades particulares es de gran importancia. Se requieren análisis mineralógicos, geoquímicos, físicos y mecánicos, para evaluar cambios en la resistencia al corte, cementación, identificación de minerales arcillosos producto del proceso avanzado de meteorización y alteración de su estructura original y demás propiedades que puedan intervenir en el comportamiento de laderas y taludes de corte.

Entender el comportamiento de taludes y laderas es una de las tareas más complejas e importantes en la ingeniería geotécnica (Duncan, 2014), de manera que, las predicciones erróneas del comportamiento generan potenciales riesgos y amenazas sobre obras de infraestructura, edificaciones y otras, poniendo en peligro la integridad de sus usuarios. Existe una gran cantidad de deslizamientos que reflejan la incertidumbre que se tiene en el comportamiento de taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas en la región del Altiplano Cundiboyacense (ver la imagen 1 y la imagen 2); la topografía suave característica de esta zona sugiere pendientes bajas en los taludes, por consiguiente, caracterizar sus propiedades particulares se convierte en una tarea importante para disminuir costos de mantenimiento, generar estructuras más funcionales, estables y seguras.



Imagen 1. Deslizamiento en suelos derivados de ceniza volcánica, sector de Tierra Negra, vía Tunja - Sogamoso (Boyacá). Fuente propia.

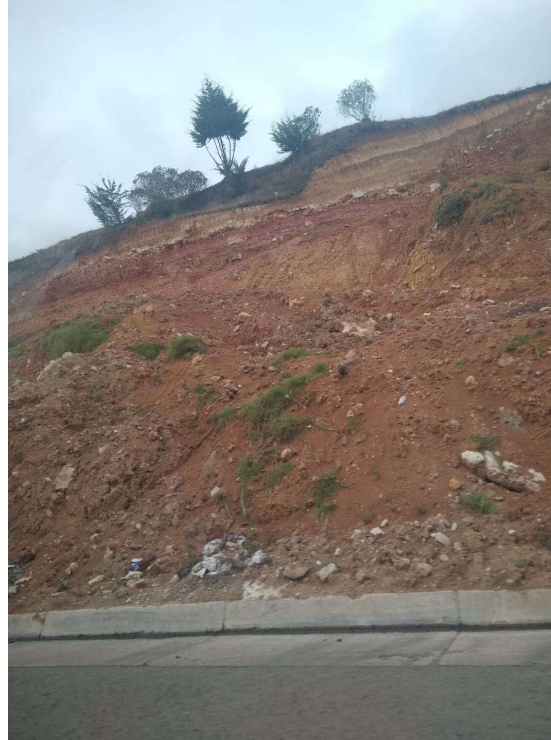


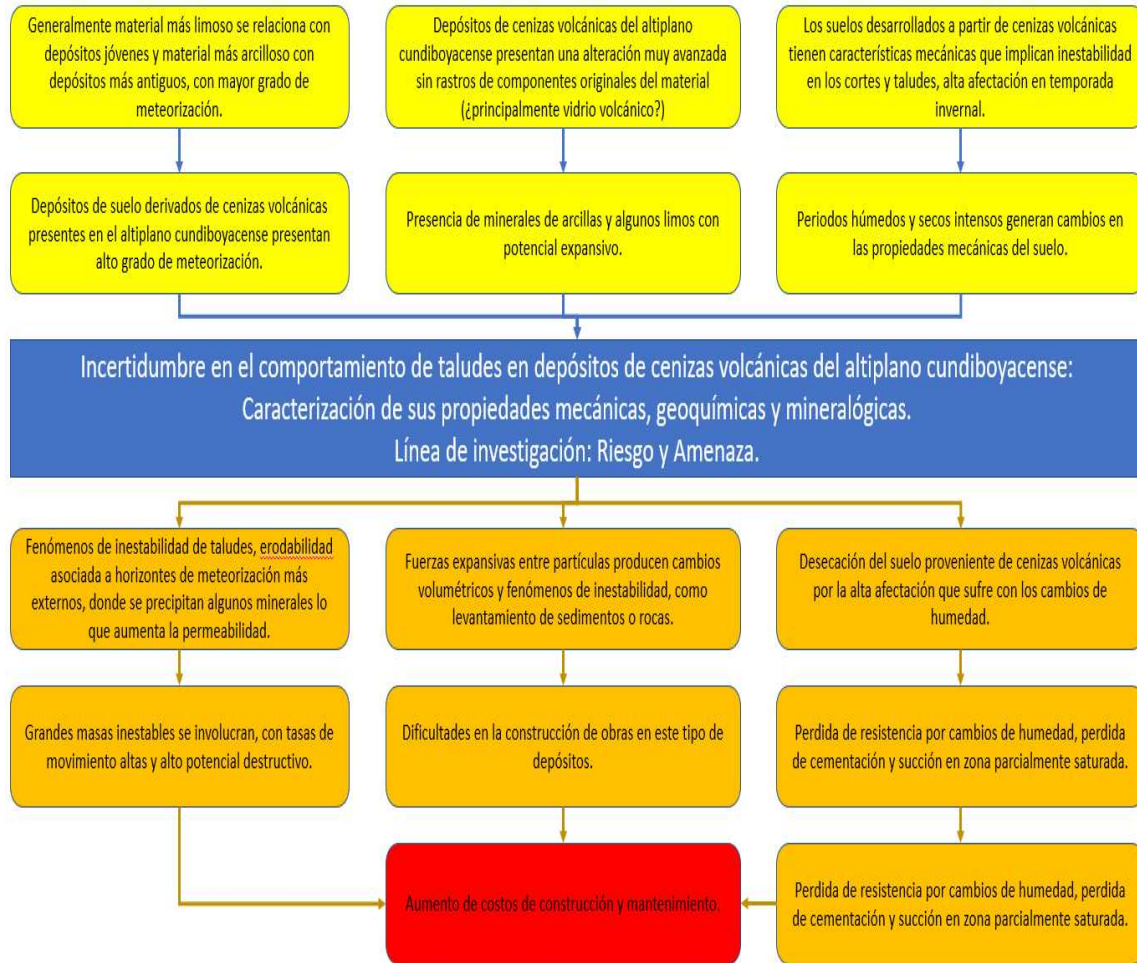
Imagen 2. Vista lateral de un deslizamiento en la vía en cercanías de Ventaquemada, carretera Tunja - Sogamoso (Boyacá). Fuente propia.

Esta región de importante actividad económica, con una población de alrededor de dos (2) millones de habitantes (DANE, 2005), sin tener en cuenta a Bogotá, aporta aproximadamente un 8.8% del PIB de la nación para el 2020; puntualmente un 2.7% en la parte correspondiente al departamento de Boyacá y un 6.1% en el departamento de Cundinamarca (DANE, 2021). Se destacan las actividades de agricultura, ganadería, minería, siderurgia, comercio y turismo; con principales centros de comercio en los municipios de Tunja, Paipa, Duitama, Sogamoso y Moniquirá (Desarrollo de la Fruticultura en Boyacá, MADR, 2006). Estas actividades demandan de infraestructura en la región para su aprovechamiento (vías de comunicación, servicios públicos y demás infraestructura), por lo que conocer el comportamiento de los taludes requeridos para la construcción de vías o edificaciones, en la etapa de diseño, es de gran importancia, con el fin de

asegurar el continuo funcionamiento de las carreteras que propician el crecimiento y la prosperidad económica de la región.

De acuerdo con lo descrito antes, es clara la importancia de conocer el comportamiento de los taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas, por lo cual surge la pregunta: **¿Cuál es el comportamiento de los taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas en el Altiplano Cundiboyacense?**. Mas adelante daremos respuesta a esta pregunta.

En la ingeniería geotécnica se presenta incertidumbre en muchos aspectos de diseño y construcción, y es deber del geotecnista disminuir dicha incertidumbre mediante el estudio minucioso de los materiales del sitio, en este caso, por medio de la caracterización detallada de los factores más importantes e inherentes de este tipo de suelos que afecten el comportamiento de los taludes y permitan mitigar **el riesgo y la amenaza** de procesos de remoción en masa. En el flujograma 1 se muestra el árbol del problema del estudio del comportamiento de taludes.



Flujograma 1. Árbol del problema del estudio del comportamiento de taludes. Fuente propia.

Este trabajo pertenece a la línea de investigación de Riesgo y Amenaza del grupo de investigación en Geotecnia de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general:

Determinar el comportamiento de taludes en depósitos de cenizas volcánicas del Altiplano Cundiboyacense por medio de la caracterización de sus propiedades mecánicas, geoquímicas y mineralógicas.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la mineralogía y la composición química de materiales existentes en depósitos de suelo provenientes de cenizas volcánicas, verificando su estructura mineral, la formación de agregaciones y la cementación.
- Determinar cambios en la resistencia al corte asociados con cambios en la humedad del suelo.
- Determinar el potencial de erodabilidad, los índices de colapso y expansión de acuerdo con las propiedades físicas y mecánicas.
- Determinar las afectaciones en taludes asociadas con propiedades particulares de los suelos derivados de cenizas volcánicas y con esto establecer la pendiente máxima recomendada para este tipo de material.

3. MARCO TEÓRICO

Se ha encontrado que el comportamiento de estructuras geotécnicas en suelos derivados de cenizas volcánicas está condicionado por los siguientes factores:

- El material parental depositado originalmente,
- El grado de meteorización,
- La mineralogía existente,
- La estructura mineral (tendencia a formar agregaciones asociada a disposición floculada o dispersa de las partículas), y
- El ambiente de depositación.

Estos parámetros gobiernan las propiedades físicas y mecánicas singulares de los suelos, los cuales, en este trabajo se relacionan con la estabilidad de taludes. Las características particulares de estos suelos difieren bastante de las características típicas de suelos sedimentarios depositados por otros medios, así como la forma en que deben caracterizarse, con el fin de disminuir la incertidumbre en su comportamiento.

3.1. Origen de los suelos estudiados

Los volcanes están relacionados comúnmente a las zonas de cordillera, para el caso de Colombia, los que están ubicados en las cordilleras de los Andes; los materiales emanados de dichas fuentes volcánicas cubren grandes extensiones del territorio y reciben el nombre de Tefras o Piroclastos; expulsados desde la chimenea en la columna eruptiva. Pueden estar compuestos por cenizas volcánicas, lapilli o bombas (Rendón et al., 2020). Son transportados por el viento, depositadas por gravedad y su meteorización produce **suelos derivados de cenizas volcánicas**.

Presentan propiedades físicas, mineralógicas y mecánicas bastante particulares, las cuales son favorables para la agricultura, pero bastante problemáticas para aplicaciones en ingeniería, como lo muestran estudios realizados en países como Indonesia, Nueva Zelanda, India, Dominica y Japón (Wesley, 1974, Rouse, 1986, Rao, 1995), estudios en los cuales, se encontró que la caracterización de este tipo de suelos difiere de la que se llevaría a cabo para suelos sedimentarios de origen distinto (Herrera, 2006 y Lizcano et al., 2006).

Los materiales piroclásticos provenientes de las erupciones volcánicas en Colombia en los últimos 25.000 años (Herrera, 2006) forman depósitos de cenizas volcánicas y por procesos de meteorización física y química, dan origen a los suelos derivados de estas. En la figura 1, se muestra el proceso de formación de dichos suelos, a partir de la erupción de un volcán que produce una nube de piroclastos de distintos tamaños producto de la fragmentación del magma y el arrastre de material de las paredes de la chimenea provocados durante el evento; los de diámetro menor de 2 mm, se conocen como **ceniza volcánica**. El viento la transporta, a distancias que pueden alcanzar centenares a miles de kilómetros, dependiendo de la energía de la erupción (condicionada por la altura y densidad de la nube), condiciones propias del material expulsado como su forma, esfericidad, rugosidad, superficie específica, composición química y carga electrostática (Riley et al., 2003) y la dinámica misma de los vientos.

Cabe resaltar que durante el transporte y depositación se genera un proceso de selección en el cual los materiales más finos alcanzan distancias mayores. Las nubes van perdiendo densidad a medida que el material se deposita, estas pueden permanecer suspendidas durante semanas o meses.

Los mecanismos atribuidos a la formación de cenizas volcánicas corresponden a tres tipos, de acuerdo con los estudios de Wohletz y Krinsley (1982), estos son:

- La ruptura del magma solidificado debido a la vesiculación; este proceso ocurre porque las burbujas de aire presentes en el magma se expanden rápidamente, explotando y fracturando el magma.
- La fragmentación del magma solidificado debido a los elevados esfuerzos térmicos y acústicos que se producen cuando el magma interactúa con el agua.
- La pulverización de la lava preexistente en las paredes de la chimenea del volcán durante la erupción.

Estos mecanismos pueden explicar la alta presencia de vidrio volcánico en las cenizas, como lo muestra el estudio general de suelos y zonificación de tierras del IGAC (2000).

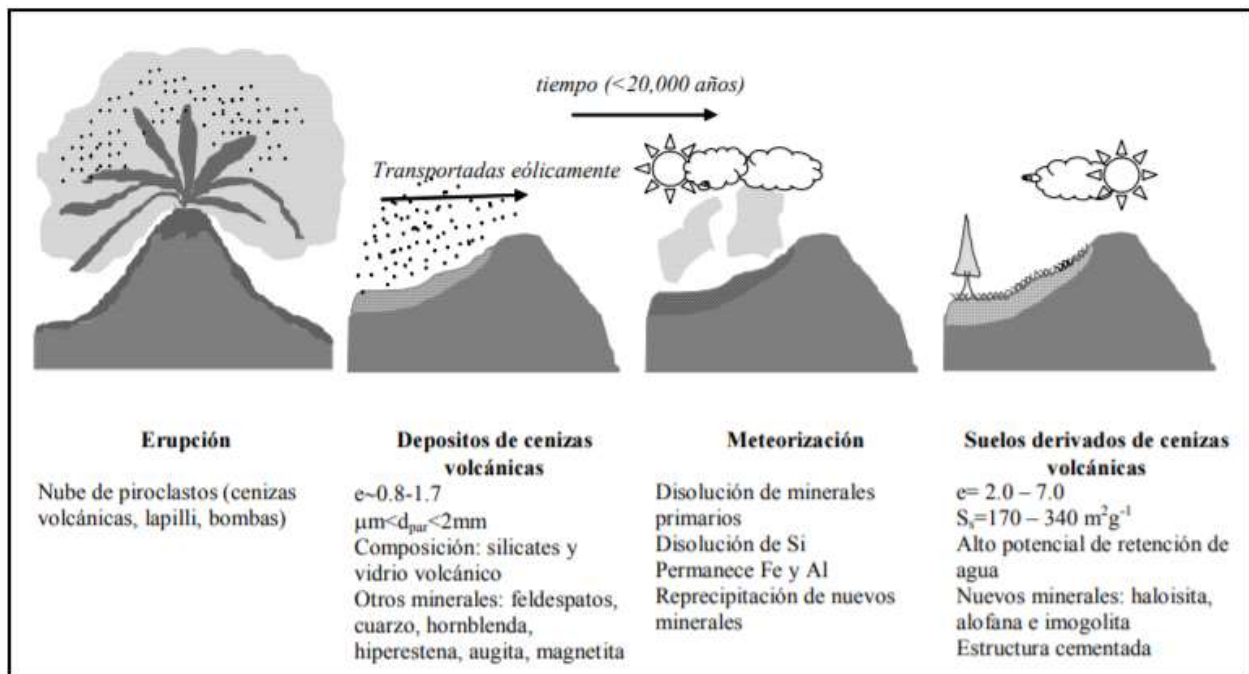


Figura 1. Proceso de formación de suelos derivados de cenizas volcánicas. Tomado de Herrera (2006).

Los depósitos de suelo provenientes de cenizas volcánicas cubren aproximadamente un 0.84% de la superficie del planeta, cercanos a zonas con actividad volcánica, un 60% de estos localizados en zonas tropicales (Rendón et al., 2006), como es el caso de Colombia. Puntualmente

en el territorio colombiano estos suelos provienen de las erupciones volcánicas que tuvieron lugar en las épocas del Pleistoceno y el Holoceno del periodo Cuaternario, material piroclástico que fue transportado y depositado en los últimos 5.000 a 20.000 años (Herrera, 2006).

En la figura 2, se muestran las principales fuentes volcánicas que dieron origen al material parental de los depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas en el territorio colombiano; adicionalmente se muestra la extensión aproximada de estos depósitos.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas representan un 11.6% de Colombia (Forero et al., 2000, Herrera, 2006, Lizcano et al., 2006). La presencia de estos suelos en el país tiende a reconocerse principalmente en las Cordilleras Central y Occidental, lo que puede asociarse a la cantidad de volcanes identificados en dichas zonas (figura 2), mientras que, sobre la Cordillera Oriental no se ha identificado claramente una fuente que diera origen al material parental de los suelos derivados de cenizas volcánicas que cubren grandes áreas, en el caso de este estudio, los localizados en el Altiplano Cundiboyacense. Sin embargo, el estudio realizado por Jaramillo, Linero y Garver (2005), aporta evidencias de depósitos derivados de tefras, puntualmente cenizas volcánicas, de espesores considerables, que oscilan entre 20 y 40 metros de profundidad, originados en fuentes volcánicas recientemente reconocidas en la región, como el volcán de Paipa, que pudo haber tenido una actividad importante durante el Neógeno y Cuaternario, de acuerdo con la datación de varios estratos encontrados en el sitio; estos representan distintas erupciones volcánicas. Los análisis realizados en este estudio pretenden también confirmar la alta actividad volcánica en esta región de la Cordillera Oriental.

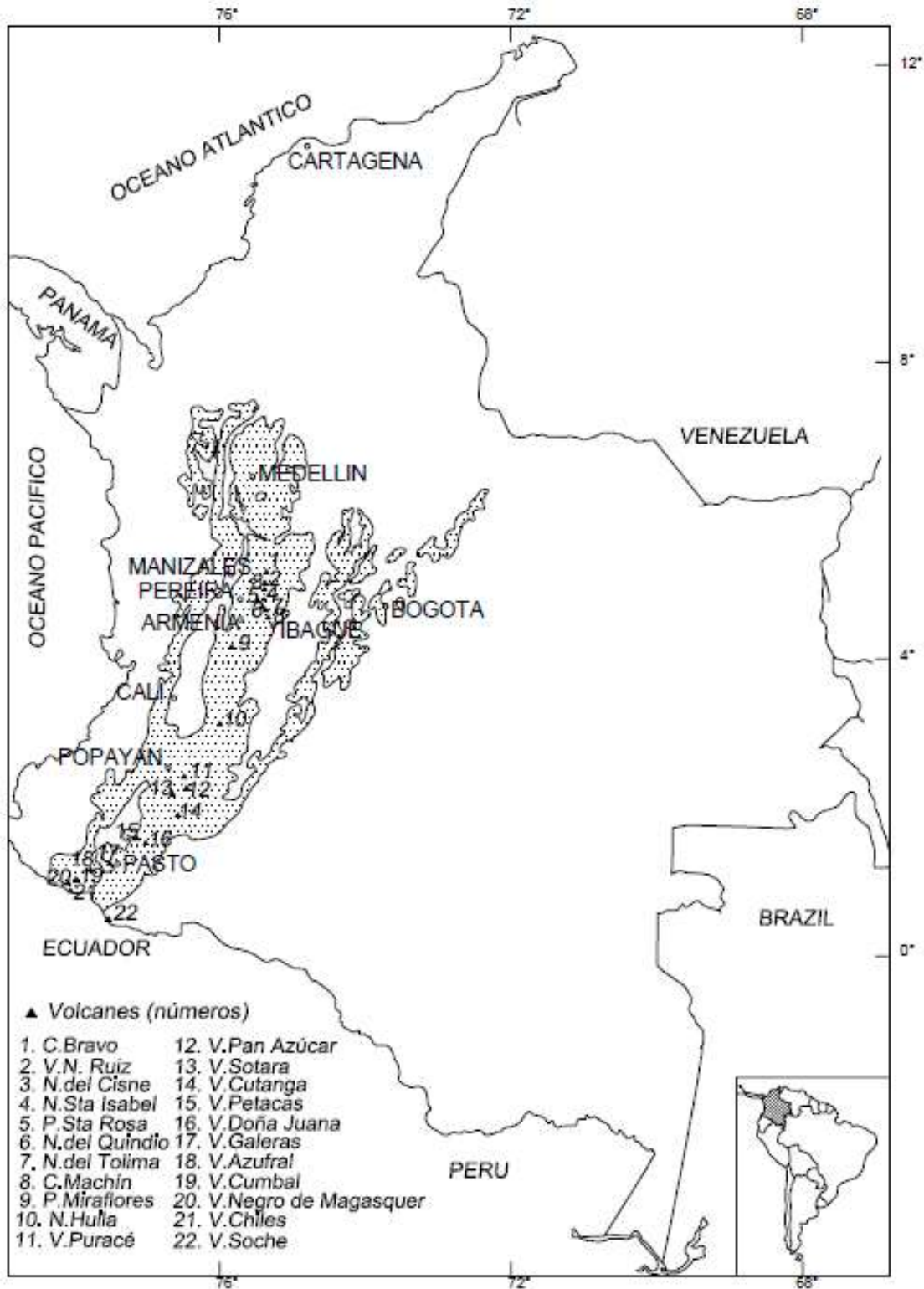


Figura 2. Fuentes volcánicas que dan origen a depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas en Colombia, según Lizcano et al. (2006). Notar que representan depósitos en la Cordillera Oriental, pero asignan su origen a erupciones volcánicas de la Cordillera Central.

El Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras realizado por la Dirección de Agronomía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2000) reconoce la existencia de depósitos piroclásticos y de cenizas volcánicas, que cubren relativamente amplios sectores, especialmente en los niveles altos de terraza y depósitos lacustres de la Sabana de Bogotá, zonas de cerros y zonas medias y altas de páramos pertenecientes al Altiplano Cundiboyacense. En los distintos paisajes se encuentran suelos con mineralogía y características particulares de las cenizas volcánicas.

Sobre las distintas formaciones geológicas presentes en el Altiplano Cundiboyacense (e.g. Formación Tilatá, Formación Tunja), existen depósitos de suelo conformados por una o varias capas de arcilla limosa compactada que van del substrato rocoso al Cuaternario, cubren dichas formaciones indistintamente de cuál sea, patrón característico en toda la región; además, los depósitos se ajustan siempre a la topografía (Reyes, 1990), lo que evidenciaría las pendientes bajas a las que se pueden mantener los taludes. Se resalta que la complejidad en la estabilidad de taludes es ampliamente reconocida y atribuida por los investigadores a suelos derivados de cenizas volcánicas (Bommer et al., 2002, Herrera, 2006, Lizcano et al., 2006).

3.2.Mineralogía

El material original transportado desde la fuente y depositado en los distintos ambientes sufre transformaciones generadas por la meteorización física y química. En la alteración el proceso más importante es la síntesis de minerales secundarios a partir de minerales primarios provenientes del material depositado originalmente (Herrera, 2006).

El proceso de meteorización tiene mayor influencia en etapas iniciales que en etapas avanzadas. Está controlado por factores como la precipitación, temperatura, humedad, vientos y la

presencia de rocas ácidas y básicas, puesto que, las primeras, contienen cuarzo, feldespatos, hornblenda y mica, grupos más resistentes a la alteración que los contenidos en las básicas, como olivinos y piroxenos (Townsend, 1984, Betancur, Builes y Millán, 2013).

La distribución de los tamaños de partículas en los suelos derivados de cenizas volcánicas está condicionada por el grado de meteorización que han sufrido los materiales originales; los depósitos más jóvenes, con poco grado de alteración, tienden a ser limosos y arenosos, propensos para la toma de nutrientes por parte de las plantas, debido a que no se han precipitado por completo elementos como Si, Ca y Na. En cambio, en depósitos con mayor grado de alteración predomina la fracción arcillosa, donde el Al entra a formar nuevos minerales, más estables y resistentes a la meteorización (IGAC, 2000, Nanzyo, 2004, Herrera, 2006).

En etapas de baja alteración predomina comúnmente el vidrio volcánico (figura 3), ya sea formando granos independientes o fragmentos vitreos, también como revestimiento sobre otros granos minerales como anfíboles o piroxenos, o conformando parte de la matriz de fragmentos líticos de origen volcánico (Herrera, 2006). A medida que la meteorización avanza en este material, siendo uno de los menos resistentes a la alteración comparado con cristales de cuarzo y feldespatos, también presentes en las cenizas volcánicas, el vidrio volcánico desaparece por completo. En parte del presente estudio se pretende identificar esta condición en los depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas del altiplano.

De acuerdo con estudios realizados en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas en la Cordillera Central, se encuentra un perfil típico en la región, el cual consta de una capa superficial de material meteorizado proveniente de cenizas volcánicas, que puede alcanzar los veinte (20) metros de espesor. Subyaciendo a esta capa se encuentra una de toba volcánica, con un espesor aproximado de veinte (20) metros, formada de la alteración de tefras y flujos volcánicos.

A mayor profundidad se encuentra un depósito de cien (100) metros de espesor formado de los materiales expulsados en las erupciones volcánicas del Terciario. Este depósito yace sobre roca intacta, anfíbolita y esquisto del periodo Cretáceo (Forero et al., 1999, Lizcano et al. 2006). La descripción del perfil se muestra en la figura 4. Cabe resaltar que los depósitos de mayor profundidad se presentan en zonas de clima frío a muy frío.

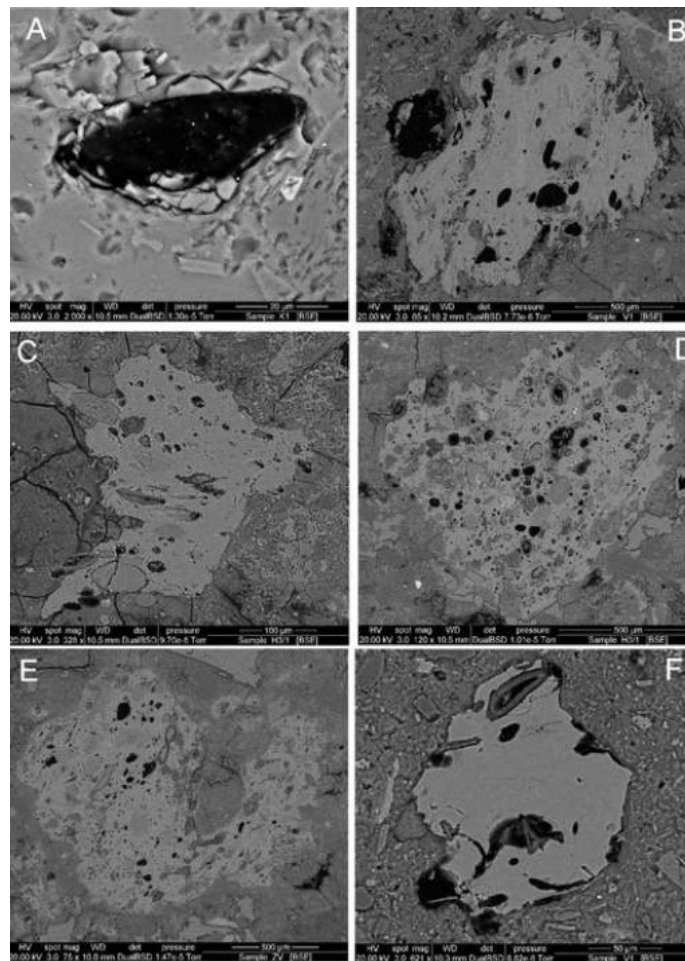


Figura 3. Imágenes de vidrio volcánico provenientes de difracción de electrones por retro-difracción (BSE). Tomado de estudios de forma y dimensión fractal realizados en Hungría (Nemeth, 2010).

El tipo de depositación y el grado de meteorización que tienen las cenizas volcánicas hacen que los depósitos de suelos derivados de estas presenten alta variabilidad espacial. Teniendo en

cuenta el estudio realizado por Jaramillo et al. (2005), en el cual se realiza la datación de la zona central de un corte expuesto en la localidad de Tierra Negra, Ventaquemada, Boyacá, perteneciente al Altiplano Cundiboyacense, se determinaron edades superiores a las mostradas en la figura 4, es decir, son suelos con un alto grado de meteorización, con minerales más estables. Se puede inferir que la variabilidad espacial en los depósitos ubicados en esta zona por lo tanto es baja.

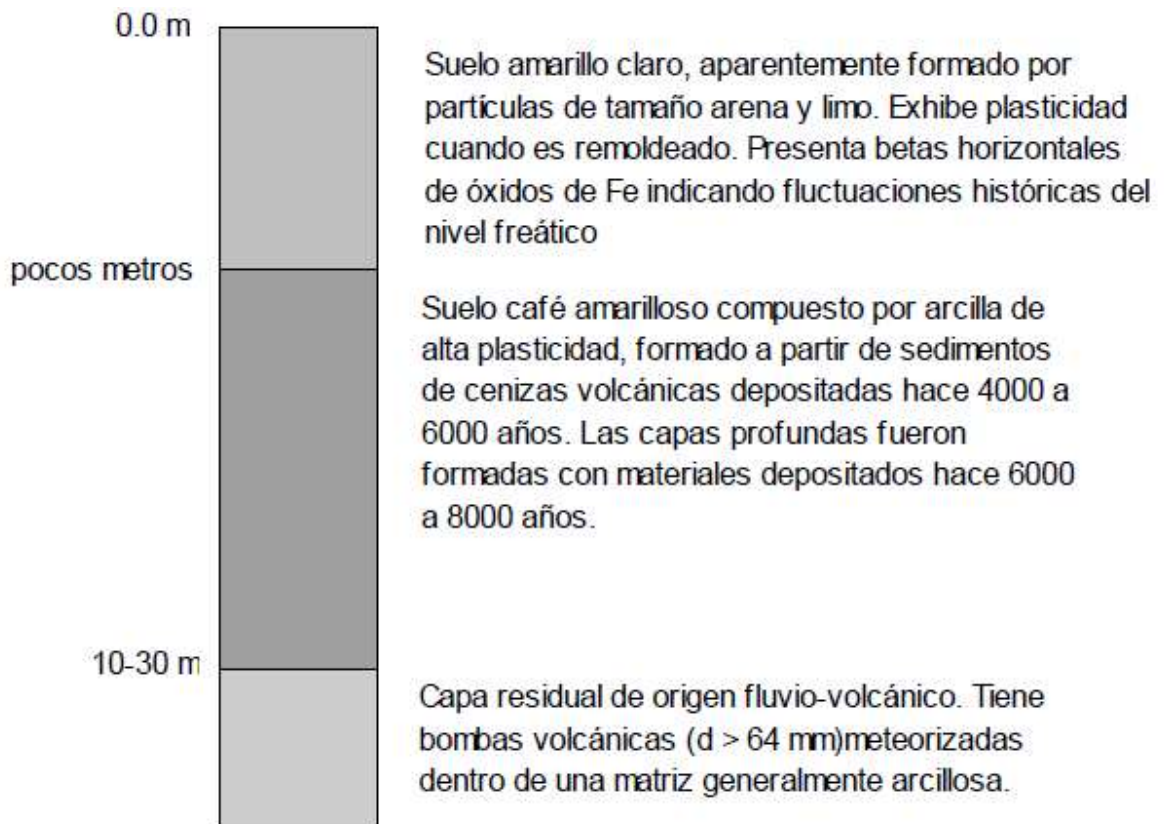


Figura 4. Perfil estratigráfico típico de suelos derivados de cenizas volcánicas en el eje cafetero, Colombia. Regla general: los suelos más profundos y antiguos son finos y arcillosos. Tomado de Herrera (2006).

La mineralogía actual producida por la alteración de las cenizas volcánicas que forman los suelos tiene gran influencia en las características fisicoquímicas y en su comportamiento mecánico. Los minerales más comunes encontrados en la fracción arcillosa (para grados de meteorización altos) son alófana, imogolita y halloysita, producidos por la alteración del vidrio volcánico,

principalmente. Estos tienen características particulares que los distinguen de los minerales presentes en suelos con origen distinto (Lizcano et al., 2006). El Estudio General de Suelos (IGAC, 2000 y 2005) muestra que para distintos paisajes estudiados existe una alta presencia de arcillas formadas por minerales de Alófana y Caolinita; predomina la Alófana. Estos minerales hacen que los suelos presenten alta capacidad de intercambio catiónico, alta retención de fósforo y baja densidad aparente.

El estudio de la composición mineralógica de este tipo de suelos se realiza mediante la técnica de difracción de rayos X sobre la fracción arcillosa (considerada como la más problemática para las aplicaciones en ingeniería y en la cual se centra este trabajo) y haciendo uso del microscopio petrográfico para la fracción de limo y arenas. En la tabla 1, se presenta la composición mineralógica hallada en un depósito de suelo derivado de cenizas volcánicas situado en Manizales, sobre la Cordillera Central de Colombia, para una columna de siete (7) metros de profundidad (Lizcano et al., 2006). Como se puede observar en la tabla 1, predomina la presencia Halloysita, derivada de la meteorización de la Alófana.

Algunas secuencias de meteorización han sido identificadas en los estudios realizados sobre depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas para las erupciones que han ocurrido en los últimos años (Forero, 1999). Estas se presentan a continuación; información tomada de la tesis doctoral de Herrera (2006).

- Cenizas de Antioquia: Alófanos → Meta halloysita y otros minerales
- Vidrio y feldespatos del Cauca: Alófanos → Halloysita y meta halloysita. Ocasionalmente gibsita.
- Cenizas de Nariño: Halloysita hidratada.

- Vidrio y Feldespatos de Nariño: Alófana → Meta halloysita → Halloysita hidratada.
- Formación Popayán Superior: Dos secuencias de meteorización a) Material rico en Si, Al y Fe → Alofana (Horizonte de meteorización B) → Alofana (Horizonte de meteorización A) → Halloysita hidratada (4H₂O) → Meta halloysita (2H₂O) → Caolinita → Latosol (Suelo rico en Si, Al y Fe desarrollado en regiones tropicales). b) Biotita → Hidromica → Vermiculita → Caolinita → Latosol.

Fracción	Ensayo	Mineral	z=1.5 m	z=5.5 m	z=7.0 m
Fracción tamaño arcilla (diámetro < 2 μm)	Difracción de rayos X	Haloisita – 10Å	> 50%	~ 74%	~ 65%
		Mica	-	~ 9%	~ 12%
		Cristobalita	15 – 30%	Trazas	~ 20%
		Feldespatos	Trazas	-	-
		Minerales 2:1, 2:2	-	~ 14%	Trazas
		Material no cuantificable por XRD	Present but non quantifiable	-	-
Fracción tamaño limo y arena (50 – 250 μm)	Microscopio petrográfico	Vidrio volcánico	18%	20%	22%
		Feldespato plagioclase	51%	45%	17%
		Hornblenda	21%	24%	8%
		Hiperestena	4%	4%	-
		Magnetita	Trazas	4%	49%
		Biotita	Trazas	2%	3%
		Lamprobolita	Trazas	Trazas	Trazas
		Fragmentos de toba	6%	-	-
		Fragmentos líticos	Trazas	-	-

Nota: Resultados similares reportados por Arango (1993).

Tabla 1. Composición mineralógica depósito de suelos derivados de cenizas volcánicas localizado en Manizales, cordillera central. Herrera (2006).

Los suelos con presencia de Alófana están relacionados con derivados de material volcánico, de acuerdo con estudios realizados alrededor del mundo. Lo cuales se producen por la alteración de los silicatos presentes en las cenizas, principalmente del vidrio volcánico, generado a partir de la expulsión de piroclastos a través de un volcán.

La Alófana es un grupo de aluminosilicatos hidratados, no cristalinos, con un amplio rango de variación química, que se desarrollan naturalmente en los suelos producto de la meteorización del vidrio volcánico (Van Olphen, 1971, Herrera, 2006). A mayores grados de meteorización la alófana pasa de estado no cristalino a uno cristalino, dando lugar a minerales de Halloysita y luego a Caolinita; particularmente el último, reconocido por su potencial poco expansivo.

La presencia de Alófana está relacionada con la existencia de Imogolita. La estructura del primero consiste en partículas huecas, irregularmente esféricas con un diámetro externo que varía entre 3.50 a 5.00 nm y un espesor de capa de 0.70 a 1.00 nm. Esta estructura permite la absorción y adherencia de agua a sus paredes exteriores; características que explican los altos valores de porosidad y humedad natural de estos depósitos. El agua alojada y adherida se conoce como “agua rígida”, que no hace parte del agua de poros, esta pertenece a la fase sólida del suelo (Wesley, 1974, Herrera, 2006). La estructura de la Imogolita corresponde a hilos que se tejen entre las esferas de alófana formando enlaces o puentes.

Las esferas de alófana pueden agruparse formando agregaciones primarias llamadas domains, con diámetros entre 0.01-1 micrómetros, estos se encuentran entrelazados fuertemente debido a las fuerzas de atracción de Coulomb, enlaces de hidrógeno y fuerzas atractivas de Van der Waals (Rao, 1995, Herrera, 2006), lo que explica su alta capacidad de intercambio catiónico. Las agregaciones primarias se agrupan débilmente en clusters, racimos de tamaños que varían entre 1 y 100 micrómetros, estas agregaciones secundarias son más susceptibles a la destrucción y permiten el flujo libre de agua de los poros cuando son remodeladas. En la figura 5, se muestra la estructura descrita y elaborada por Herrera (2006).

La descripción de la estructura mineral de Alófana corresponde a una unidad básica compuesta por una capa curva fragmentada formada por tetraedros con un átomo de aluminio (Al)

por cada tres de Silicio (Si). Esta forma curva, esférica, resulta de una capa de caolinita defectuosa. La representación de dicha estructura se muestra en la figura 6.

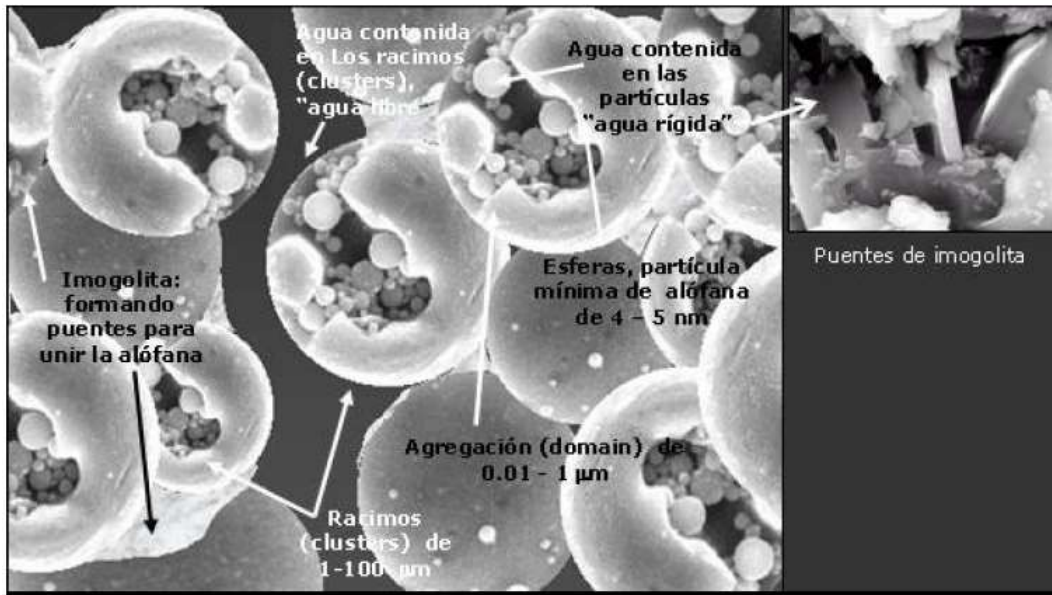


Figura 5. Estructura determinada por Herrera (2006) de asociaciones de Alúfana e Imogolita.

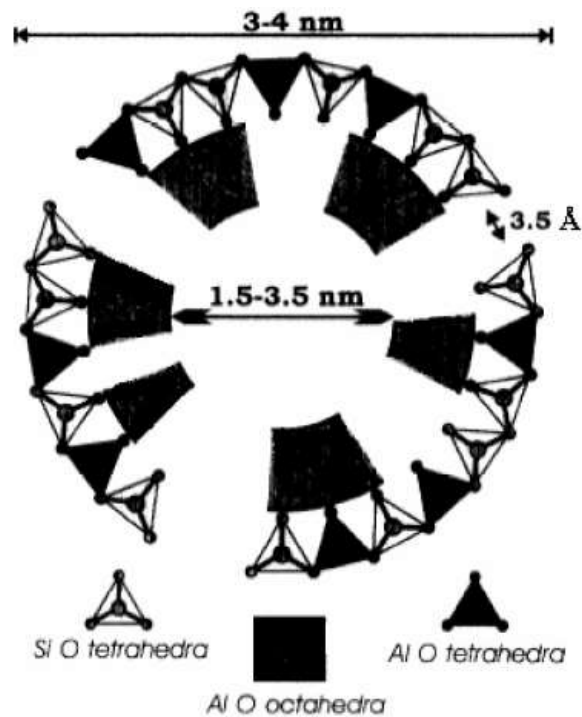


Figura 6. Representación esquemática alúfana. Tomado de Herrera (2006).

Por lo anterior, suelos con presencia de Alófana presentan alta porosidad, altos contenidos de humedad, tendencia a formar agregaciones, alta superficie específica, baja densidad, presencia de agua rígida en la fase sólida y límites de consistencia elevados. Estas características hacen el material se comporte plásticamente. El comportamiento mecánico también está relacionado con la presencia de alófana, puesto que en temporadas secas prolongadas el material puede secarse perdiendo agua incluso en su fase sólida, lo cual altera la resistencia al corte. El re-humedecimiento puede ser irreversible cuando se ha visto afectada el agua en la fase sólida del suelo.

La figura 7, muestra el modelo de estados de hidratación de la alófana, en este se observa hasta qué punto los cambios de humedad pueden ser irreversibles, es claro que cuando se afecta el agua rígida el proceso de hidratación es muy poco probable que ocurra.

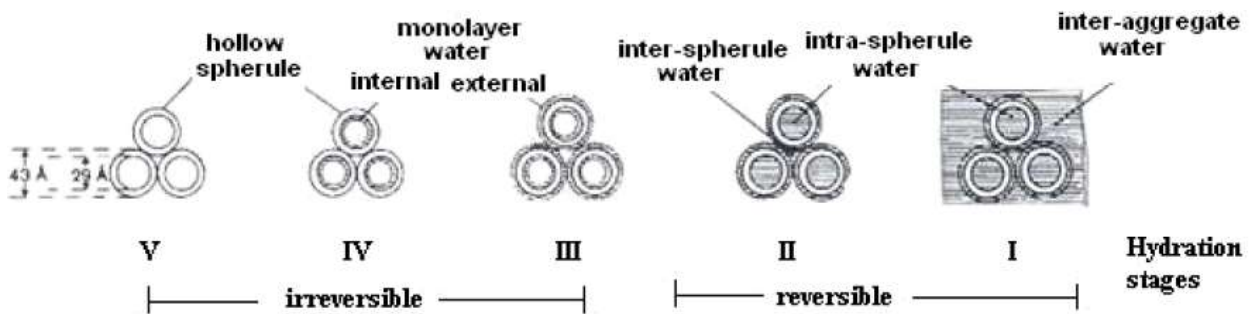


Figura 7. Modelo de hidratación alófana. Tomado de Herrera (2006).

La Halloysita es un mineral de arcilla producto de la meteorización y cristalización de la alófana, también está asociado a la meteorización de suelos con otros procesos de formación. Alrededor del mundo se ha encontrado producto de la alteración de distintas rocas graníticas, feldspatos y biotita. Superficialmente, ha mostrado provenir de la alteración de cenizas volcánicas (Herrera, 2006). Esto se evidencia en las secuencias de meteorización discutidas anteriormente, además, algunas investigaciones concluyen que la formación de alófana se da en las primeras etapas de la meteorización del vidrio volcánico y posteriormente por re-silicación se produce

halloysita (Arango, 1993, Shoji et al., 1993, Herrera, 2006). Esto ocurre con la alófana rica en Si, en la alófana rica en Al no es igual.

La estructura mineral de la halloysita consta de una capa tetraedral de iones de silicio y una octaedral de cationes, similar a la estructura de la caolinita, distinguiéndose por tener una capa inferior de moléculas de agua. Se han identificado también procesos mediante los cuales la caolinita produce halloysita.

La halloysita puede presentarse en formas de tubos huecos de longitud variable, como en formas esferoidales, en hojuelas, laminar y prismática (Bailey, 1990, Herrera, 2006). La morfología varía de acuerdo con el grado de meteorización y el tipo precursor. La halloysita tubular se desarrolla de la alteración de feldespatos de rocas graníticas, mientras que, las esferoidales provienen de alófana y vidrio volcánico (Kirkman, 1981). Investigaciones muestran que no presentan grandes diferencias en mineralogía, la halloysita esferoidal es ligeramente más rica en aluminio y hierro. En la figura 8 se muestran las estructuras de halloysita tubular y esferoidal.

Las propiedades de los suelos con presencia de halloysita son similares a los que contienen alófana, tienen valores altos de superficie específica, alta plasticidad; de acuerdo con sus condiciones de humedad (si está hidratada o no), límites de consistencia altos y también sus propiedades mecánicas están condicionadas por la configuración de su estructura interna.

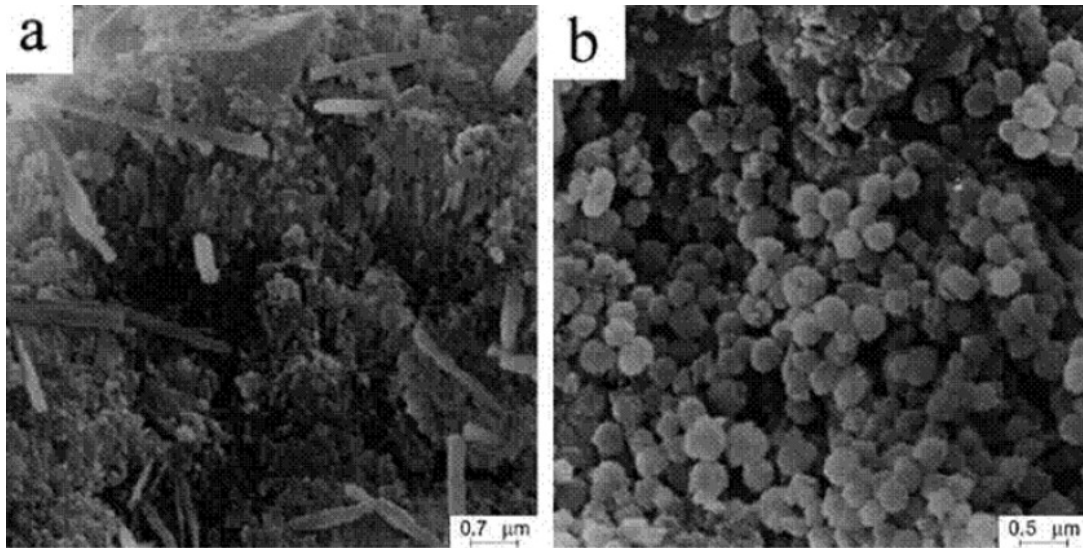


Figura 8. Halloysita (a) tubular y (b) esférica, imágenes de SEM. Tomado de Herrera (2006).

3.3. Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas están relacionadas con el grado de meteorización del material parental, principalmente en la fracción arcillosa de este tipo de material. La presencia de minerales como la alófana, imogolita y halloysita, cuya estructura fue descrita anteriormente, condicionan las propiedades particulares que presentan estos suelos.

En algunos estudios realizados sobre estos suelos se han presentado algunas de las propiedades características de este tipo de materiales, como altas humedades en estado natural, alta porosidad y relaciones de vacíos, densidades bajas (seca y saturada) y límites de Atterberg o consistencia elevados.

En Colombia se han encontrado relaciones de vacíos (e) que varían entre 2 y 7 (Forero et al., 1999, Lizcano et al., 2006), valores tan altos que claramente afectan el comportamiento mecánico del suelo. La tabla 2, tomada del trabajo de Lizcano et al. (2006), resume algunos valores reportados por distintos autores respecto a las propiedades mencionadas anteriormente; para suelos estudiados en Colombia y distintas partes del mundo.

Propiedades		Colombia	Otros países			
pH	4.5 – 6.2	[2]	6	India	[19]	
	6.1 – 6.3	[3]	4.6 – 5.2	USA	[5]	
	5.1 – 5.8	[4]	3.6 – 8	Japón	[18]	
			4.8 – 7.2	Nueva Zelandia	[14]	
			5.7 – 6.2	Java	[22]	
			5.8 – 6.7	Hawaii	[23]	
G _s	2.47 – 2.65	[4]	2.58 – 2.59	Ecuador	[13]	
	1.92 – 2.67	[1]	2.67 – 2.74	Japón	[11]	
	2.50 – 2.67	[28]	2.28 – 2.65	Fiji	[7]	
S _s [m ² g ⁻¹]	170 – 340	[28]	50 – 250	Japón	[18]	
			581 Alofana (adsorción de N ₂)	–	[17]	
E	2.0– 7.0	[3]	2.4 – 5.3, 1.5 – 8	Indonesia	[25, 27]	
	1.1 – 1.9	[21]	1.9 – 4.1 alofana predominante	India	[20]	
	2.0 – 2.7	[4]	3.0 – 5.7, 1.0 – 6.1	Japón	[6, 9]	
	0.88 – 3.62	[1]	1.8 – 6.6	Java	[22]	
	1.3 – 3.8	[28]				
w _o	80 – 200%	[3]	50 – 300%	Indonesia	[27]	
	16 – 90%	[1]	50 – 100%	India	[19]	
	29 – 119%	[28]	102 – 205%, 40 – 50%, 27 – 184%	Japón	[6, 11, 9]	
w _L	52 – 64%	[4]	70 – 110% haloisita predominante	Indonesia	[25]	
	60 – 70%	[12]	85 – 190% alofana predominante	Indonesia	[25]	
	120 – 250 %	[15]	95 – 107% haloisita predominante	Nueva Guinea	[10]	
	37 – 117%	[28]	156 – 165% alofana predominante	Nueva Guinea	[10]	
			179 – 187%	Indonesia	[26]	
			80 – 213%	India	[19]	
w _p	27 – 33%	[4]	72 – 159%, 31 – 40%	Japón	[18, 11]	
	45 – 50%	[12]	105 – 107%	Ecuador	[8]	
	70 – 150%	[15]	55 – 75% haloisita predominante	Indonesia	[25]	
	25 – 90%	[28]	65 – 150% alofana predominante	Indonesia	[25]	
			65 – 73% haloisita predominante	Nueva Guinea	[10]	
			119 – 129% alofana predominante	Nueva Guinea	[10]	
S _r	65 – 88%	[28]	139 – 149%	Indonesia	[26]	
			40 – 100%, 17 – 20%	Japón	[18, 11]	
			~ 60%	Ecuador	[8]	
γ _{dry} [kN/m ³]	8.70 (limo arenoso)	[21]	50 – 80%	India	[16]	
	10.7 (arena limosa)	[21]	> 95%	Japón	[6]	
	7.0 – 8.4	[4]	4.0 – 7.2, 3.8 – 12.7	Japón	[6, 9]	
	4.5 – 13.8	[1]	7.9 – 9.8	Fiji	[7]	
	5.7 – 13.8	[28]	4.3 – 7.6	Java	[22]	
γ _{sat} [kN/m ³]	15.1 (limo arenoso)	[21]	13.3 – 14.9	India	[19]	
	16.1 (arena limosa)	[21]	11 – 14	Ecuador	[13]	
	12.8 – 13.1	[28]	21.8 – 25.7	Japón	[9]	
Fracción	Arena	5 – 40%	0 – 30%*	25 – 59%**	* Nueva Zelandia	[20]
	Limo	55 – 70%	52 – 76%*	23 – 51%**	** West Indies	[24]
	Arcilla	5 – 25%	21 – 42%*	17 – 19%**	and Japón	

Referencias: [1] Arango, 1993. [2] Benavides, 1982. [3] Forero et al., 1999. [4] IGAC, 1996. [5] Johnson-Maynard et al., 1997. [6] Kitazono et al., 1987. [7] Knight, 1986. [8] Mendoza, 1985. [9] Miura, 2003. [10] Moore and Styles, 1988. [11] Moroto, 1991. [12] Olarte, 1984. [13] O'Rourke and Crespo, 1988. [14] Parfitt and Kimble, 1989. [15] Rivera J.D., 2003. [16] Rouse, 1986. [17] Shoji et al., 1993. [18] So, 1998. [19] Rao, 1995. [20] Rao, 1996. [21] Terlien, 1997. [22] Van Ranst et al., 2002. [23] Wada, 1990. [24] Warkentin and Maeda, 1974. [25] Wesley, 1977. [26] Wesley, 2001. [27] Wesley, 2003. [28] este estudio.

Tabla 2. Propiedades típicas de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia y distintas partes del mundo, tomada del trabajo de Lizcano et al. (2006). Las fuentes presentadas en la tabla también fueron tomadas de dicho trabajo.

La estructura de los minerales de arcilla presentes en suelos de cenizas volcánicas permite una alta absorción de agua, esto supone una incidencia en la consistencia del material. Durante ciclos de secado al aire libre o al horno, el material cambia sus condiciones de humedad y puede perder agua hasta un punto donde se hace irreversible el rehumedecimiento, en consecuencia, los límites de Atterberg cambian drásticamente. La figura 9 (Herrera, 2006, Lizcano et al., 2006) muestra los cambios que tienen algunos suelos muestreados y analizados en Armenia, Pereira y Manizales, bajo condiciones de humedad natural y alterando esta mediante ciclos de secados al horno.

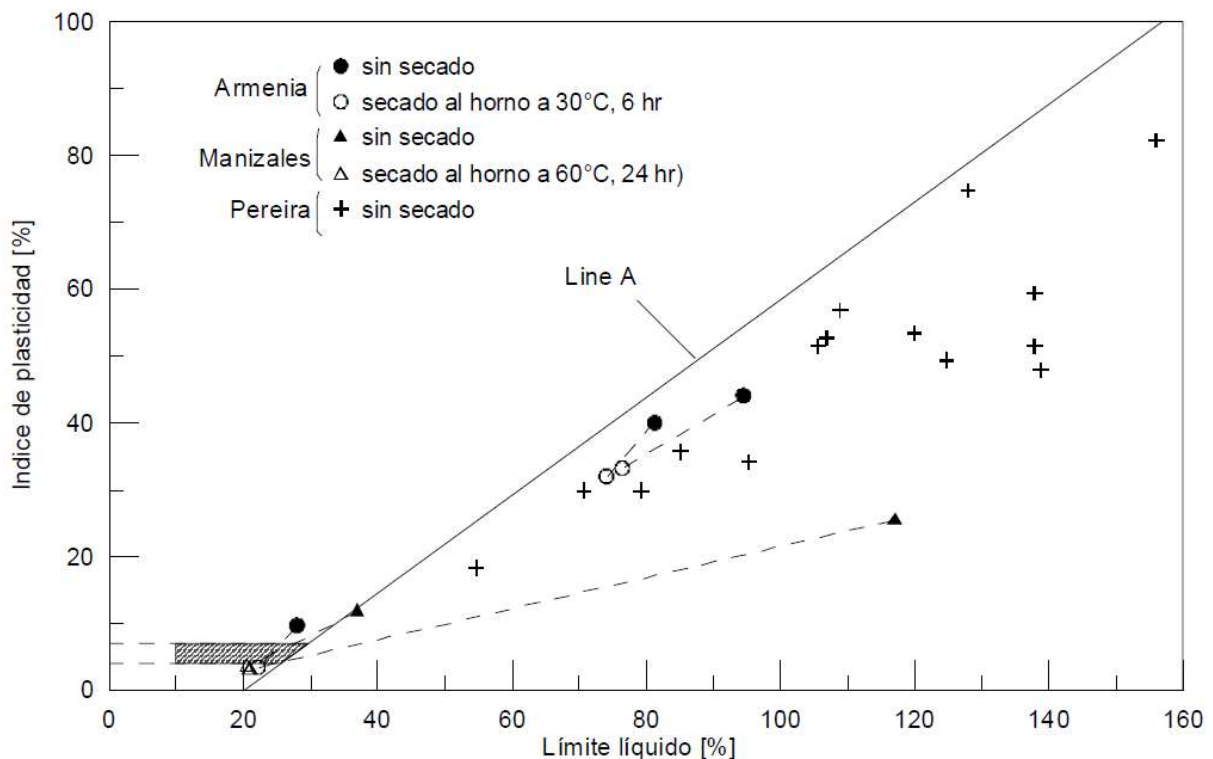


Figura 9. Afectación a los límites de consistencia en ensayos realizados sobre muestras con humedad natural y expuestas a un ciclo de secado al horno. Tomado de Lizcano et al. (2006).

En la tabla 3, extraída del trabajo de Lizcano et al. (2006), se realiza una comparación de la variación en los límites de Atterberg de suelos derivados de cenizas volcánicas ocasionadas por afectaciones en su humedad bajo procesos de secado.

Propiedades	Condición	Colombia	Ecuador ^[2]	Nueva Guinea ^[3]
w _L	Natural	117% [5] 81 – 94% [4] 112 – 183% [1] 104 – 200% [1] 97 – 111% [1]	105 – 107%	Haloisita predominante: 95 – 107% Alofana predominante: 156 – 165%
	Secado al horno	59% [5] 74 – 76% [4] 57 – 94% [1] 51 – 66% [1] 64 – 70% [1]	59%	Haloisita predominante: 61 – 65% Alofana predominante: 44%
w _p	Natural	90% [5] 45 – 50% [4] 82 – 113% [1] 57 – 98% [1] 73 – 76% [1]	~ 60%	Haloisita predominante: 65 – 73% Alofana predominante: 119 – 129%
	Secado al horno	46% [5] 42 – 45% [4] 46 – 80% [1] 49 – 64% [1] 56 – 58% [1]	46%	Haloisita predominante: 46 – 47% Alofana predominante: 42%

Referencias: [1] Arango, 1993, [2] Mendoza, 1985, [3] Moore and Styles, 1988, [4] Rivera, 2003, [5] Este estudio.

Tabla 3. Variación de los límites de Atterberg con el secado para suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia y en distintas partes del mundo. Tomado del trabajo de Lizcano et al. (2006), al igual que las referencias.

Otra característica para tener en cuenta es la tendencia de este tipo de suelos a presentar floculación; fenómeno que está determinado por la mineralogía presente y los fluidos disponibles. Como se mostró anteriormente las estructuras de alófana, imogolita y halloisita tienden a formar agregaciones, estas pueden generar un efecto de porosidad dual; una generada en las agregaciones primarias que forman racimos y otra generada por las agregaciones de estos. Esta porosidad dual es responsable del comportamiento mecánico de suelos derivados de cenizas volcánicas, en la figura 10 se muestra un esquema de dicha condición.

Los estudios realizados por Herrera (2006) y Lizcano (2006) muestran que en suelos con pH cercano al neutro y en condiciones ligeramente acidas se propicia la floculación (tabla 2), lo

cual está directamente relacionado con el grado de cementación y por lo tanto con la rigidez, compresibilidad y resistencia al corte de los suelos.

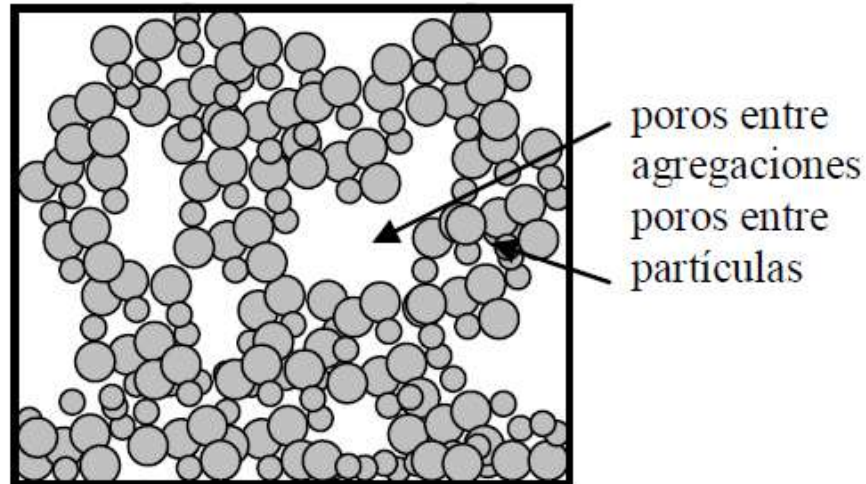


Figura 10. Esquema porosidad dual suelos derivados de cenizas volcánicas con presencia de minerales de arcilla característicos, tomado de Herrera (2006).

3.4. Propiedades mecánicas de los suelos

El grado de alteración de los suelos, su estructura, composición química y propiedades físicas condicionan el comportamiento mecánico de estos, así mismo, sus minerales constituyentes, es decir, la presencia de minerales de arcilla como alófana, imogolita y halloysita. Particularmente en este tipo de material, la historia de esfuerzos no tiene una relación cercana con su comportamiento (Herrera, 2006). La alta porosidad de estos suelos generada por la disposición de agregaciones muy abiertas muestra la existencia de cementación, originada por la meteorización química de cenizas volcánicas, en la cual, procesos de disolución y reprecipitación de algunos compuestos de los minerales otorgan esta propiedad.

La existencia de enlaces cementantes condiciona las propiedades mecánicas que presentan los suelos; rigidez, compresibilidad y resistencia. De acuerdo con estudios presentados por Lizcano

et al. (2006), se observó una baja compresibilidad en muestras inalteradas a pesar de su alto contenido de humedad, hasta esfuerzos verticales efectivos (σ_v') entre 200 y 300 kPa, con índices de compresión (C_c) de 0.19 a 0.35; parámetros controlados por la cementación. Cuando aumentan los esfuerzos verticales, pasando el esfuerzo de preconsolidación aparente, aumenta drásticamente la compresibilidad con índices (C_c) de 0.85 a 1.40, explicado por el deterioro o destrucción de la estructura cementada (Wesley, 2003). La descarga y recarga muestra trayectorias similares a otro tipo de suelos con valores de índice de recompresión (C_r) de 0.08 a 0.12.

La floculación anticipa la cementación, esta consiste en el mutuo enlace entre partículas floculadas por acción de distintos materiales cementantes como materia orgánica, partículas de arcilla, coloides inorgánicos (Al, Fe), carbonatos (comúnmente el carbonato de calcio, el cual no se presenta a menudo en este tipo de suelos) y óxidos (Herrera, 2006). Las características físicas y químicas de los cementantes están relacionadas con su formación, algunos pueden ser más susceptibles ante distintas condiciones ambientales que afecten su estado de humedad, temperatura, presión, etc. La estructura abierta de estos suelos propicia el flujo y la baja resistencia de los cementantes puede ocasionar fenómenos de lavado o erosión interna. Wesley (1977) mostró que los suelos derivados de cenizas volcánicas pueden ser más permeables de lo que se esperaría para suelos alterados con alto contenido de arcilla. Se espera que los suelos estudiados en este trabajo tengan una meteorización avanzada, por lo tanto, altos contenidos de arcilla.

El trabajo realizado por Herrera (2006) muestra que la cementación controla la resistencia al corte de suelos derivados de cenizas volcánicas para niveles de esfuerzo vertical efectivo cercanos a los 200 kPa, allí se desarrollan ángulos de fricción del orden de los 12°. Mientras que para esfuerzos mayores la envolvente de resistencia cambia a una mayor pendiente y por consiguiente aumenta la resistencia al corte con valores del ángulo de fricción interna entre 32° y

34°, este comportamiento se muestra en la figura 11. Lo anterior indica que la resistencia al corte es sensible al esfuerzo normal, como se expuso anteriormente; a niveles de esfuerzos efectivos verticales de ese orden se pierde la cementación. Esto confirma que los suelos remoldeados tienen propiedades mecánicas superiores que suelos en estado inalterado.

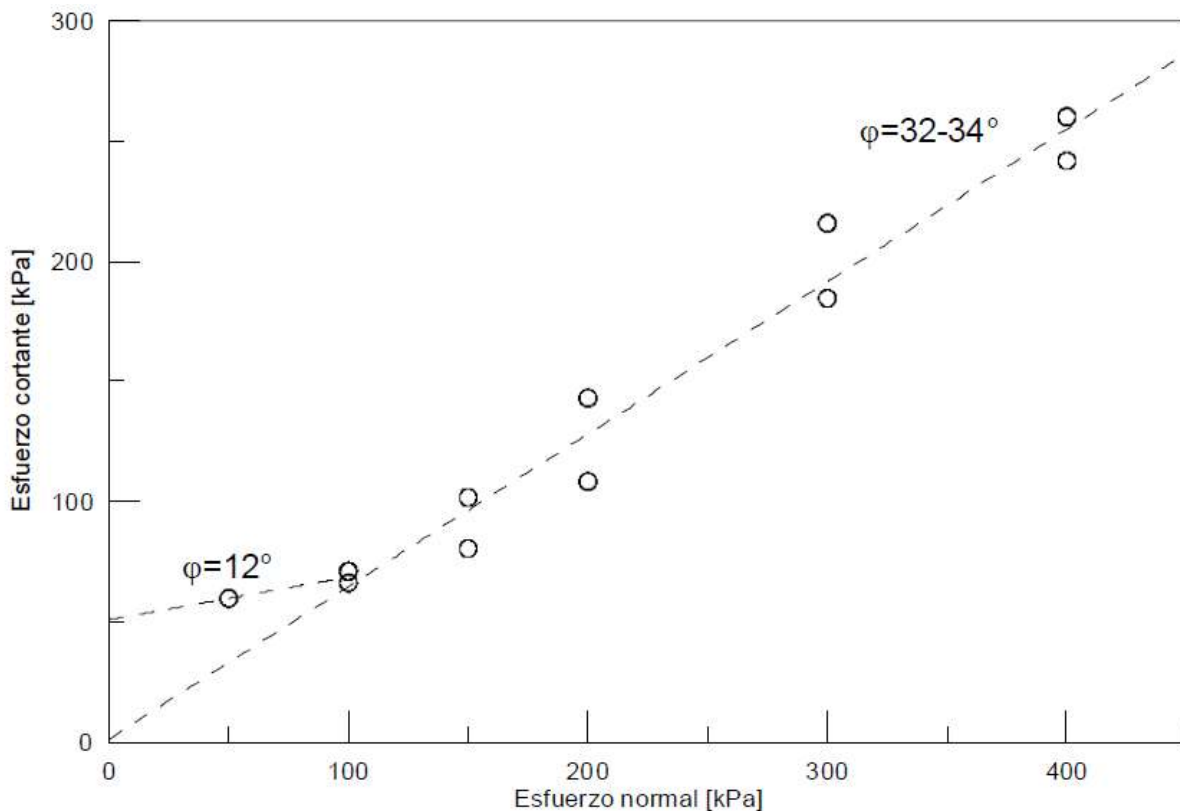


Figura 11. Incidencia de la cementación en la envolvente de resistencia al corte de suelos derivados de cenizas volcánicas (Herrera, 2006).

En suelos parcialmente saturados tiene lugar la succión por la interacción de las tres fases del suelo, lo que incide, al igual que la cementación, en la respuesta esfuerzo-deformación de los suelos. El aire que ocupan los poros puede estar en fase continua o discontinua, en esta última, disuelto en el agua.

La succión capilar se conoce como la diferencia en las presiones de agua y aire en el suelo, relacionadas con los efectos de capilaridad y adsorción. La presencia de solutos disueltos en agua

reduce el potencial de esta y por lo tanto aumenta la succión, este tipo de succión se conoce como succión osmótica. La succión total, que puede tener lugar bajo determinadas condiciones de humedad, temperatura y confinamiento, depende de la distribución y el arreglo de las partículas, así como de las condiciones de sus poros, superficie específica y componentes del suelo. Los valores de succión pueden ser del orden de 10^3 kPa, para suelos finos arcillosos, mientras que para arenas puede ser mucho más bajos, del orden de 10^{-1} kPa (Herrera, 2006).

Los cambios en la humedad afectan tanto a la succión como a la cementación. El humedecimiento también genera cambios volumétricos de contracción (deformación volumétrica negativa) y expansión (deformación volumétrica positiva), estos están asociados a suelos colapsables o expansivos.

Fenómenos de expansión o hinchamiento en suelos finos se relacionan con la presencia de minerales como montmorillonita, illita y caolinita, en estos es más susceptible el aumento de la doble capa difusa por la entrada de agua a la estructura mineral, por otro lado, suelos con densidades altas son más propensos a presentar hinchamiento.

El colapso se presenta por la falla en el contacto entre las partículas de suelo y con esto la incapacidad de soportar esfuerzos con el humedecimiento; la deformación volumétrica negativa generada en esta condición es irreversible. Los suelos con mayor potencial de colapso son aquellos que tienen una estructura tipo panal muy abierta, similar al caso de los suelos derivados de cenizas volcánicas, por su tendencia a flocular y formar agregaciones. Estos rasgos son característicos de suelos transportados por el viento o eólicos que presentan cementación. Suelos con una baja densidad y una estructura muy abierta tienden a presentar un mayor potencial de colapso.

Por lo anterior, cambios en las condiciones de humedad, temperatura y presión afectan las características mecánicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas. En el trabajo de Betancur, Builes y Millán (2013) se evaluó el cambio en los parámetros de resistencia al corte mediante ensayos de corte directo sobre muestras inalteradas y otras alteradas por cambios en sus condiciones de saturación, por lo tanto, también en su humedad. Identificaron una disminución en los parámetros de resistencia con el aumento de esta última, así como en la respuesta esfuerzo cortante con la deformación. Se aclara que las muestras usadas en el estudio mencionado anteriormente provienen de suelos volcánicos jóvenes localizados en Pereira y Armenia, sobre la Cordillera Central, estos no representan los depósitos presentes en el Altiplano Cundiboyacense.

Durante ciclos de escasa precipitación y alta temperatura ambiente ($>$ de 25°C), el agua de poros se evapora, en consecuencia, se genera desecación y agrietamiento del suelo, esto ocurre debido al cambio volumétrico negativo (contracción), entonces, aumenta la succión y los esfuerzos de tensión superan la resistencia a la tracción del suelo; un efecto contrario al fracturamiento hidráulico por exceso de presión de poros. El abatimiento o decaimiento del nivel freático, las actividades agropecuarias y el crecimiento de vegetación puede generar el mismo fenómeno de agrietamiento.

Los ciclos de humedecimiento y secado propios del ambiente tropical generan problemas de índole geotécnico, debido a que producen cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de cenizas volcánicas. Un fenómeno común es la aparición de grietas en periodos secos, posteriormente estas se cierran en periodos húmedos, ocasionando zonas especialmente débiles, críticas en la estabilidad de taludes; en futuros periodos secos estas grietas se pueden abrir fácilmente (Herrera, 2006).

El comportamiento contracto-expansivo que exhibe este tipo de suelos está influenciado por sus condiciones iniciales, en especial el contenido de humedad inicial; a menor contenido de humedad inicial, mayor será la expansión.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente es claro que los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan grandes desafíos en aplicaciones ingenieriles. Rendón et al. (2020) concluyen en su trabajo, que los suelos derivados de cenizas volcánicas son complicados para el diseño y construcción de obras civiles, debido a sus propiedades particulares. De acuerdo con estándares tradicionales, las propiedades físicas y mecánicas que presentan generan desventajas, sin embargo, muchas obras sobre estos suelos funcionan bastante bien; aquí radica la necesidad de mejorar el entendimiento geotécnico de este tipo de material. En contraste, se ha identificado que este tipo de suelos presenta ventajas para su aprovechamiento en la agricultura, concordante con el uso que se le da en distintas zonas del Altiplano Cundiboyacense (MADR, 2006).

3.5. Estabilidad de taludes en depósitos de suelo

Los suelos derivados de cenizas volcánicas son un grupo especial que presenta problemas particulares en la estabilidad de taludes asociados a los cambios en sus propiedades, la frágil cementación observada y el poco aporte de la succión a la resistencia. Por esto, mejorar en el estado del conocimiento de este tipo de materiales para aplicar las soluciones más efectivas en la estabilidad de taludes mediante una adecuada caracterización de sus propiedades se convierte en una tarea fundamental (Bommer et al., 2002).

En Colombia existen taludes de corte y laderas que alcanzan alturas de 10 a 20 metros con pendiente superiores a 60° (Forero et al., 1999, Redondo, 2003, Herrera 2006). Cabe aclarar que estos valores provienen de estudios realizados en suelos derivados de cenizas volcánicas en el eje

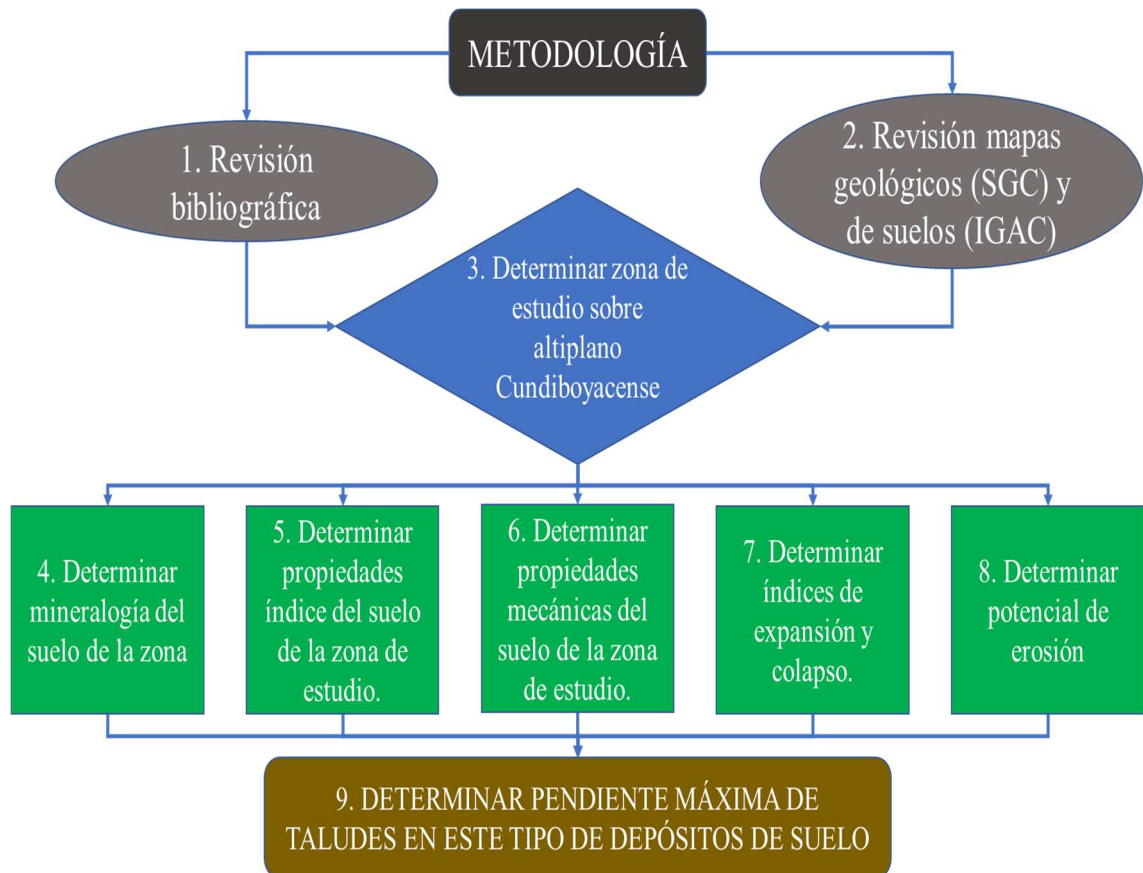
cafetero, correspondientes a depósitos jóvenes, mientras que, los depósitos del Altiplano Cundiboyacense presentan un grado de meteorización avanzado, teniendo en cuenta la mineralogía predominante descrita en el Estudio General de Suelos y los Mapas de Zonificación presentados por el IGAC (2000 y 2005). Dependiendo de las condiciones climáticas y la cobertura vegetal, los taludes son susceptibles a inestabilidad, erosión y agrietamiento; ocasionados por la alteración de sus condiciones iniciales, principalmente la variación en los contenidos de humedad por ciclos de humedecimiento y secado. Factores detonantes como lluvias intensas afectan la resistencia al corte en depósitos de suelos derivados de cenizas volcánicas y son la causa más común de falla de taludes en Colombia.

El perfil de meteorización que se genera por distintas capas provenientes de diferentes eventos volcánicos define las posibles superficies de falla. Esta es plana cuando la capa que subyace el depósito de suelo derivado de cenizas volcánicas está compuesta por material vulcanodetrítico ligeramente meteorizado. Por otro lado, como en el caso de otros suelos residuales, la diferencia de permeabilidades genera niveles freáticos colgados, que empeoran las condiciones de inestabilidad; reduce la resistencia y aumenta las fuerzas desestabilizantes.

Los eventos sísmicos son considerados también como una de las principales causas de falla de taludes en suelos derivados de cenizas volcánicas. Las cargas dinámicas generadas por sismos aumentan las presiones de poros, rompiendo enlaces cementantes y por consiguiente la resistencia al corte se ve afectada. En suelos del eje cafetero se han reportado pérdidas de resistencia hasta de un 80% durante eventos sísmicos.

4. METODOLOGÍA

Parte importante del desarrollo de este trabajo radica en el hecho de verificar la presencia de cenizas volcánicas a lo largo del Altiplano Cundiboyacense con el fin de muestrear distintas localidades de esta región para determinar sus propiedades mediante ensayos de laboratorio. Por tal razón, la definición de la zona de estudio se basó en la revisión bibliográfica de estudios y publicaciones referentes a la existencia de cenizas volcánicas en el Altiplano, la actividad volcánica en el mismo u otra información de utilidad. Así mismo, la información anterior fue confrontada con mapas geológicos y de suelos desarrollados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) respectivamente. La metodología que se llevó a cabo se resume en el flujograma 2.



Flujograma 2. Metodología trabajo de grado.

A continuación, se realiza una descripción más detallada de la metodología que siguió este estudio para dar respuesta a los objetivos planteados.

4.1. Revisión bibliográfica

Se recolectó, estudió y analizó la información existente referente al origen de los suelos derivados de cenizas volcánicas, sus características físicas y mineralógicas típicas, las formas más adecuadas para realizar su caracterización y las dificultades geotécnicas propias de este tipo particular de suelo en la estabilidad de taludes; gran parte de la información se encuentra expuesta en el capítulo 3.

Adicionalmente, se examinó la información existente enfocada en la región del Altiplano Cundiboyacense, esta fue guía para la definición de la zona de estudio. Se consideraron principalmente los siguientes trabajos.

- 4.1.1. “Neogene’s Volcanism in the Cordillera Oriental of the Andes” de Jaramillo, Rojas y Garver (2005).

Mediante análisis geoquímico, petrográfico y de datación geológica, los autores muestran la importante actividad volcánica que ha tenido lugar en esta región y que probablemente pueda presentarse en el futuro, generando consecuencias catastróficas. Los análisis se realizan sobre la parte central de un afloramiento en el sector de Tierra Negra, municipio de Ventaquemada, departamento de Boyacá. En este se reconoce la existencia de suelos derivados de cenizas volcánicas, de un espesor considerable y que se extienden ampliamente en el Altiplano. Estos fueron depositados en distintos eventos de acuerdo con las dataciones y el desarrollo de distintos horizontes de meteorización. Se estima que la depositación ocurrió en el Plioceno temprano. En la tabla 4 y la figura 12 se muestran algunos de los resultados obtenidos.

SAMPLE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL
TNA 21	58,27	22,82	4,47	0,36	0,06	0,01	0,34	0,73	0,04	12,74	99,84
TN-A13	50,57	17,64	15,83	0,16	0,04	0,06	0,11	1,17	0,05	12,59	98,22
TN-A7	50,79	24,84	5,83	0,24	0,07	0,05	0,13	0,89	0,05	12,59	98,50
POX-10A	68,52	17,03	1,98	0,32	0,98	6,42	3,71	0,20	0,02	0,49	99,72

Tabla 4. Contenido de elementos principales en óxidos (%), tomado del trabajo de Jaramillo, Rojas y Garver (2005).

En la tabla 4 se puede apreciar mayores contenidos de óxidos de aluminio (Al), hierro (Fe) y titanio (Ti) sobre óxidos de calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na), por esto, los autores clasifican el suelo proveniente de las muestras como oxisol, cuya formación se da en ambientes húmedos, con un buen drenaje y a altas temperaturas, condiciones que difieren del clima del Altiplano; caracterizado por ser frío y seco.

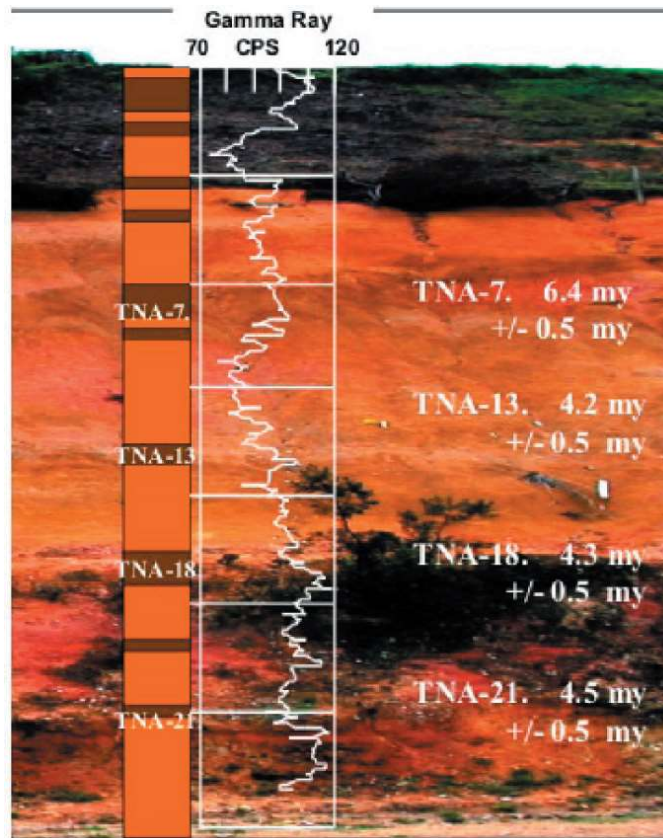


Figura 12. Datación zona central de un afloramiento en el sector de Tierra Negra (Boyacá), tomado del trabajo de Jaramillo, Rojas y Garver (2005).

En la figura 12 se presentan las dataciones obtenidas sobre el afloramiento estudiado en dicho trabajo, en este se pueden apreciar edades entre los 4 y 6 millones de años, en consecuencia, el grado de alteración del material parental es muy alto, mucho mayor al que se encuentra en zonas de la cordillera central. Cabe aclarar que para la muestra TNA-7 se obtuvo una edad mayor; que no concuerda con la secuencia estratigráfica, esto se debe a que probablemente el material vino de las paredes de la columna eruptiva del volcán que dio origen a estos suelos, por un fenómeno de arrastre durante un evento volcánico, este fue transportado por el viento y depositado sobre material más joven, como lo explican los autores.

Las dataciones presentadas coinciden con la principal época de levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia que pudo haberse dado hace 2.5 a 4 millones de años, con una duración aproximada de dos (2) millones de años, este levantamiento se detuvo antes del inicio del Pleistoceno (Van Der Hammen, Werner y Van Dommelen, 1973). Horton, Parra y Mora (2020) muestran el desarrollo estructural y topográfico de la Cordillera Oriental de los Andes en Colombia, desde el Cretácico al Cenozoico, en este documento también se destaca la importante incidencia en el levantamiento de la cordillera entre el Mioceno y el Cuaternario, como se puede observar en la figura 13.

Teniendo en cuenta los hallazgos de Van Der Hammen, Werner y Van Dommelen (1973), quienes tomaron muestras principalmente en el Altiplano de la Sabana de Bogotá y algunas cuantas en la zona de Tunja, ubicada en el Altiplano Cundiboyacense, detectaron la presencia de especies de plantas cuyo ambiente está asociado a zonas más cálidas, entonces, es posible inferir que estos sedimentos pudieron haberse formado en condiciones de mayor temperatura y humedad; esta última propiedad asociada al aumento de lluvias, debido a la inexistencia de la barrera topográfica

generada al oriente por el levantamiento de la Cordillera, la cual protege de vientos alisos (Consuegra, Gómez y Ochoa, 2015).

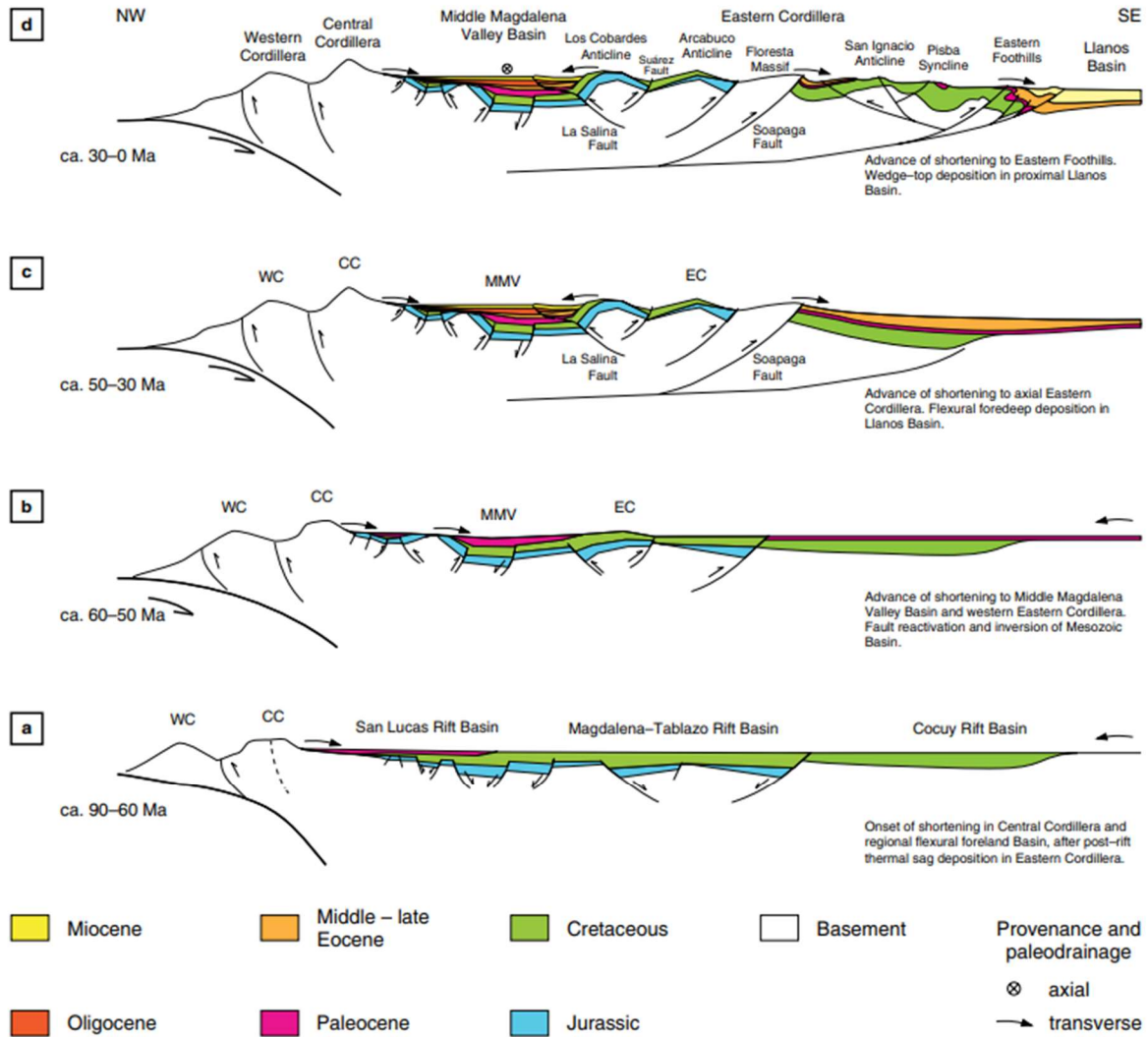


Figura 13. Esquema del desarrollo estructural y topográfico de la Cordillera Oriental de los Andes en Colombia entre el Cretáceo y el Cenozoico. a) Cretáceo tardío, b) Maastrichtiano – Paleoceno, c) Eoceno – Oligoceno y d) Mioceno – Cuaternario, se destaca el levantamiento principal de la Cordillera en este periodo. Tomado de Horton, Parra y Mora (2020).

En otras palabras, estos depósitos pudieron haberse formado a una altitud mucho menor y con el levantamiento de la Cordillera Oriental lograron llegar a la altura en que actualmente se encuentran. Las dataciones realizadas por Jaramillo, Rojas y Garver (2005) se enfocaron en la zona

central del afloramiento, por lo tanto, la parte superior tendría edades menores, siguiendo la secuencia estratigráfica. Asimismo, el hecho de que las dataciones, sobre una amplia cantidad de circones, obtenidas en dicho estudio estén en un rango pequeño evidencian que el material proviene de distintos eventos volcánicos, puesto que, si el origen del material fuera distinto, por ejemplo, proveniente del transporte por gravedad desde las zonas altas de la cuenca, las dataciones podrían comprender edades mucho mayores.

Lo anterior prueba que el origen del material está asociado a una fuente volcánica, ya sea del cuaternario (para la parte superior del perfil) o más antigua, cuya actividad podría relacionarse a la tectónica que dio origen a la propia Cordillera Oriental; hipótesis que podría ser tratada en posteriores trabajos. Mas adelante se confirma el origen volcánico de los depósitos de interés mediante el uso de técnicas para la identificación de las estructuras minerales.

4.1.2. “The Paipa Volcano, Eastern Cordillera of Colombia, South America: Volcanic Stratigraphy” de Pardo, Cepeda y Jaramillo (2005).

En este trabajo los autores reconocen la existencia del volcán de Paipa mediante el mapeo de campo e interpretación de la estratigrafía de la zona, asociándolo al periodo Cuaternario. Estiman dos épocas eruptivas importantes, las cuales dieron lugar a depósitos de bloques y cenizas volcánicas. Este estudio es un primer acercamiento a esta fuente volcánica, la cual, se cree dio origen a gran parte de las cenizas volcánicas que se localizan en el Altiplano Cundiboyacense.

En la figura 14 se presenta la georreferenciación aproximada del volcán de Paipa. Los autores concluyen en que hay necesidad de profundizar en el estudio de este volcán con algunos análisis que permitan resolver muchas de las incógnitas que aún persisten en la caracterización y descripción de su vulcanología.

La presencia de este volcán demuestra que hubo y probablemente habrá actividad volcánica en la zona, sin embargo, probablemente este no sea el único existente en la Cordillera Oriental, puesto que, como se mostró en el punto anterior, hay secuencias estratigráficas con edades superiores al periodo Cuaternario. También podría tratarse de un rejuvenecimiento del volcán de Paipa que tuvo actividad en dichos periodos, para comprobar lo mencionado anteriormente se requiere de un estudio detallado que no está contemplado en el presente trabajo de grado.

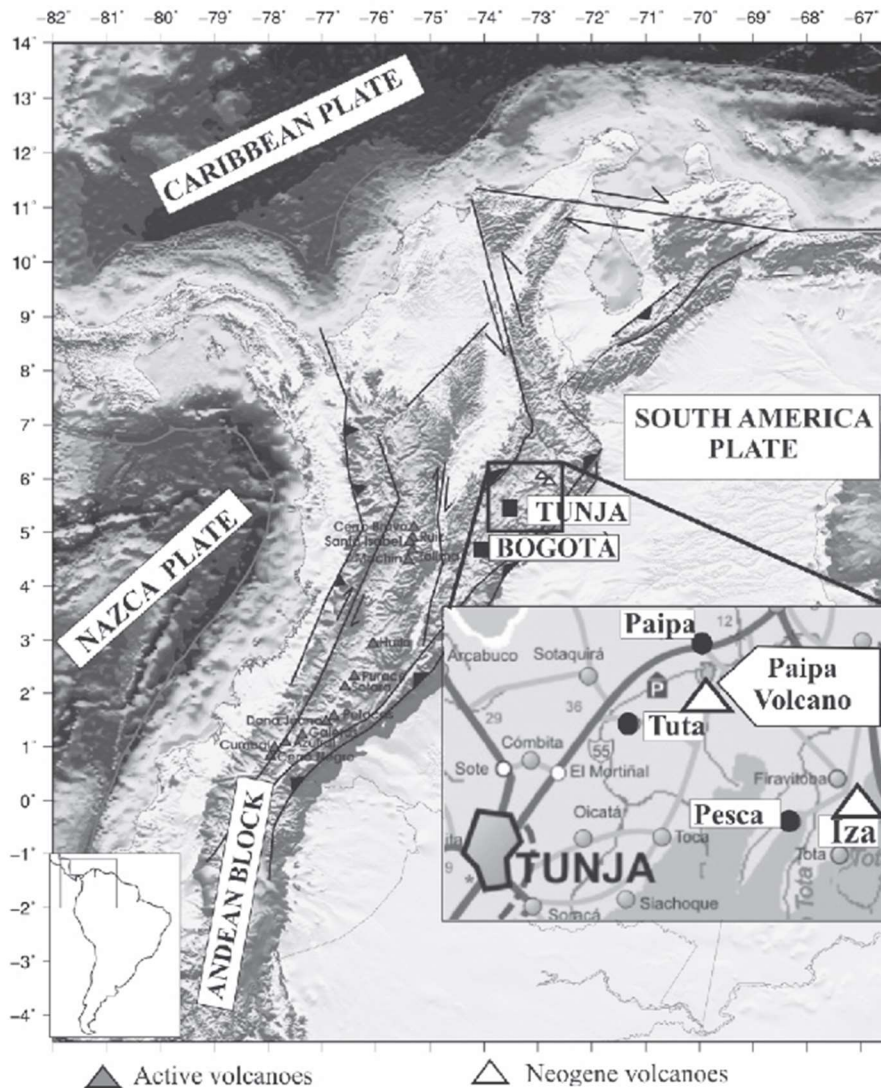


Figura 14. Ubicación volcán de Paipa sobre la cordillera oriental, entre las longitudes $73^{\circ}9'4''$ O a $73^{\circ}3'39''$ O y latitudes $5^{\circ}40'28''$ N a $5^{\circ}45'20''$ N. Tomado del trabajo de Pardo, Cepeda y Jaramillo (2005).

4.1.3. “Observaciones sobre el Cuaternario del Altiplano Tunja – Sogamoso” de Ítalo Reyes (1990).

El autor explica los procesos morfogénicos de las distintas formaciones presentes en el Altiplano comprendido entre Tunja y Sogamoso (departamento de Boyacá), así como su ordenamiento cronológico. En su trabajo identifica y describe las rocas ígneas situadas en los municipios de Paipa e Iza, adicionalmente reconoce la fuerte acción hidrotermal presente en la zona.

También muestra la presencia de suelos que cubren indistintamente las formaciones presentes en la región, desde el substrato rocoso hasta el cuaternario, correspondientes a capas de una arcilla limosa gris. Estos depósitos de suelo siguen la topografía generada por las unidades existentes en el Altiplano, tales como, las formaciones Tilatá y Tunja. En la figura 15, se muestra un esquema de los depósitos post-andinos en el sector de Tunja – Oicatá identificados por el autor, en esta se aprecia la capa de suelo cuyo origen no es establecido, estos pueden tratarse de suelos derivados de cenizas volcánicas, depositados entre el Neógeno y el Cuaternario.

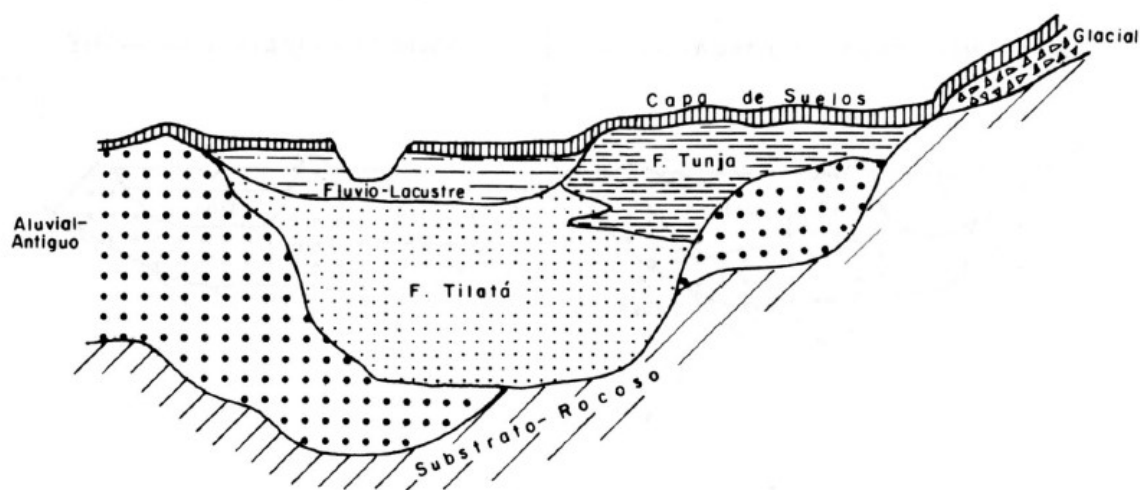


Figura 15. Esquema explicativo de la relación depósitos post-andinos, sector Tunja - Oicatá. Tomado del trabajo de Reyes (1990), el autor no especifica escala.

4.1.4. “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca” realizado por la subdirección de Agrología del IGAC (2000).

Además de describir las distintas formaciones geológicas del departamento, hidrología, climas de los distintos municipios y uso de las tierras, clasifica los suelos, describiendo su génesis y taxonomía. En el estudio se muestran las propiedades químicas, físicas y mineralógicas características de los suelos presentes en los distintos paisajes del departamento, ya sea, de montaña, lomerío, piedemonte, planicie y valle; para las fracciones de arena y arcilla.

Una propiedad química relevante es el pH, el cual, fue medido sobre muestras significativas en distintas zonas del departamento. Se encontró que el 69.3% de los suelos de Cundinamarca presenta un pH menor o igual a 5.5, 25.3% entre 5.6 y 7.0, y un 5.4% por encima de 7.0, por lo que su génesis se dio en un ambiente netamente ácido. En cuanto a las propiedades físicas, se tuvo en cuenta la consistencia de los suelos de la zona, mediante la determinación de los límites de consistencia (límites líquido y plástico), el estudio obtuvo que un 17% de los suelos de la zona tienen un IP menor a 10, un 37% entre 10 y 20 y un 46% mayor a 20. Estos valores servirán de referencia para resultados posteriores debido a que tienen implicaciones geotécnicas.

En cuanto a la mineralogía de las arenas y arcillas del paisaje de montaña (el cual representa un 83% del departamento) se presentan ampliamente el cuarzo, feldespatos y vidrio volcánico, minerales típicos de materiales provenientes de cenizas volcánicas. Para el caso de las arenas, se menciona la cobertura local de mantos de cenizas volcánicas. En las arcillas, la mineralogía de los suelos es esencialmente caolinita, alófana y halloysita. También se menciona ampliamente el recubrimiento de mantos de cenizas volcánicas sobre estos suelos. Cabe resaltar que en los otros paisajes también hay presencia de los minerales mencionados anteriormente, aunque en menor proporción, como el caso del paisaje de piedemonte, en donde predomina el Cuarzo.

4.1.5. “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá” realizado por el IGAC (2005).

Al igual que el estudio realizado en el departamento de Cundinamarca, predomina el pH ácido de los suelos, respecto a las propiedades químicas. En cuanto a las propiedades físicas relevantes en aplicaciones geotécnicas, este estudio no tiene en cuenta la consistencia de los suelos. La mineralogía, como en el caso anterior, está ampliamente condicionada por la presencia de cenizas volcánicas.

Para la fracción de arenas, en los distintos paisajes predomina el mineral de cuarzo, con menor frecuencia se pueden encontrar minerales alterados como feldespatos, vidrio volcánico y algunos otros; esto coincide con el alto grado de alteración de los suelos de la zona. En el paisaje de altiplanicie el material parental de los suelos se divide en dos grupos; sedimentos eólicos, puntualmente cenizas volcánicas; y aluviales y coluviales, provenientes de la erosión del material de montaña que circunda el altiplano.

Los minerales de arcilla que predominan son la caolinita, micas, material amorfo (alófana), cuarzo y algunos otros en menor proporción, lo que la estrecha relación entre la mineralogía de la arcilla y el material parental. En el paisaje de altiplanicie, el estudio muestra que los suelos se desarrollaron principalmente de material piroclástico; cenizas volcánicas, esto explica la predominancia de material no cristalino o amorfo, como la alófana, constituyente principal de la fracción de arcilla, también se puede encontrar cuarzo, feldespato, gibsita y algunos otros en menor proporción.

Por lo anterior, se puede concluir que el material parental predominante en el Altiplano Cundiboyacense son las cenizas volcánicas, ya sea en la fracción de arena como en la de arcilla,

además, la escasa presencia de vidrio volcánico, y, por el contrario, la abundante presencia de alófana muestra un alto grado de meteorización. Se estima que las propiedades físicas y mecánicas de estos depósitos de suelo van a estar condicionadas por la estructura mineral que tiene actualmente el material, de acuerdo con la información expuesta en el capítulo 3.

4.2.Revisión de mapas geológicos y de suelos

Teniendo en cuenta lo dicho en el punto anterior se realiza la revisión de los mapas geológicos y de suelos, presentados por el SGC y el IGAC respectivamente, con el objetivo de delimitar las zonas con presencia de suelos derivados de cenizas volcánicas, tanto en la Cordillera Oriental como en el Altiplano Cundiboyacense, cuyo material parental probablemente proviene de las erupciones del volcán de Paipa. Esta información es necesaria para establecer los puntos de exploración y muestreo.

Los estudios realizados por la subdirección de Agrología del IGAC en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá proporcionan mapas de suelos que relacionan el tipo de paisaje, el tipo de relieve, el material parental, el clima, entre otras características, clasificando así los departamentos en distintas categorías. Cada una de estas está representada con un símbolo en los mapas con el cual es posible identificar los suelos con presencia de cenizas volcánica en su génesis. Algunos de los símbolos que se pueden apreciar ampliamente en los mapas de zonificación de tierras desarrollados por el IGAC y que se relacionan con cenizas volcánicas en distintos paisajes son MEUe, MEUf, MENb, MENc, MGTc, MGTd, MLFe, MLFf, MQFe, MQFf, MVFe, MVFf, MLSg, MKCd, MKCe, MKCf, MLVd, MLVe, MLVe2, MLVf, MMVe, MMVe2, MMVe3, MMVf, MMVf2, MMVf3, MPVe, MPVf, MLTc, MLTd, MMTc, MMTd, MMTd2, MQTd, MLCc, MLCd, MLCe, MQCd, MQCdp, MQCe, MGIE, MGIf, MGIG, MLIE, MLIf, MLIG, MLKc,

MLKd, MLKdp, MPKc, MPKd, MQKc, MQKd, MQKdp, MRKd, MLJb, MLJc, MLJd, MGNa, MGNb, MGNc, RLOa, RMOa, RMOb, RLQa, RLQb, RMQa y RMQb. Lo anterior para el caso del departamento de Cundinamarca (del cuál se disponía de los mapas).

El Atlas Geológico de Colombia (2007) desarrollado por el SGC permitió identificar distintas formaciones que estarían cubiertas de cenizas volcánicas de acuerdo con la literatura consultada. La figura 16 muestra las unidades cronoestratigráficas existentes en la zona del Altiplano Cundiboyacense que incluye los municipios de Ventaquemada, Tunja, Tuta, Paipa, Duitama y Sogamoso, pertenecientes al departamento de Boyacá. Se observa que gran parte del área está cubierta por unidades desarrolladas durante los periodos Neógeno (N) y Cuaternario (Q), relacionadas con las formaciones Tilatá, Tunja y depósitos post-andinos mencionados por Reyes (1990). Estos periodos coinciden con las dataciones realizadas por Jaramillo, Rojas y Garver (2005). Se observa también la existencia de unidades desarrolladas durante el Cretácico (k) y Paleógeno (E), periodos en los que hubo actividad relacionada al levantamiento de la Cordillera Oriental de los Andes.

Una vez identificadas las zonas de interés sobre el Altiplano Cundiboyacense se compararon los mapas de suelos y los mapas geológicos, teniendo en cuenta las formaciones Tilatá y Tunja, encontrando que sobre estas se extienden ampliamente suelos derivados de cenizas volcánicas. En la figura 17, se muestra la extensión aproximada de estos suelos sobre la Cordillera Oriental (en naranja) y sobre el Altiplano Cundiboyacense (en azul), cuyo material parental, probablemente proviene del volcán de Paipa.

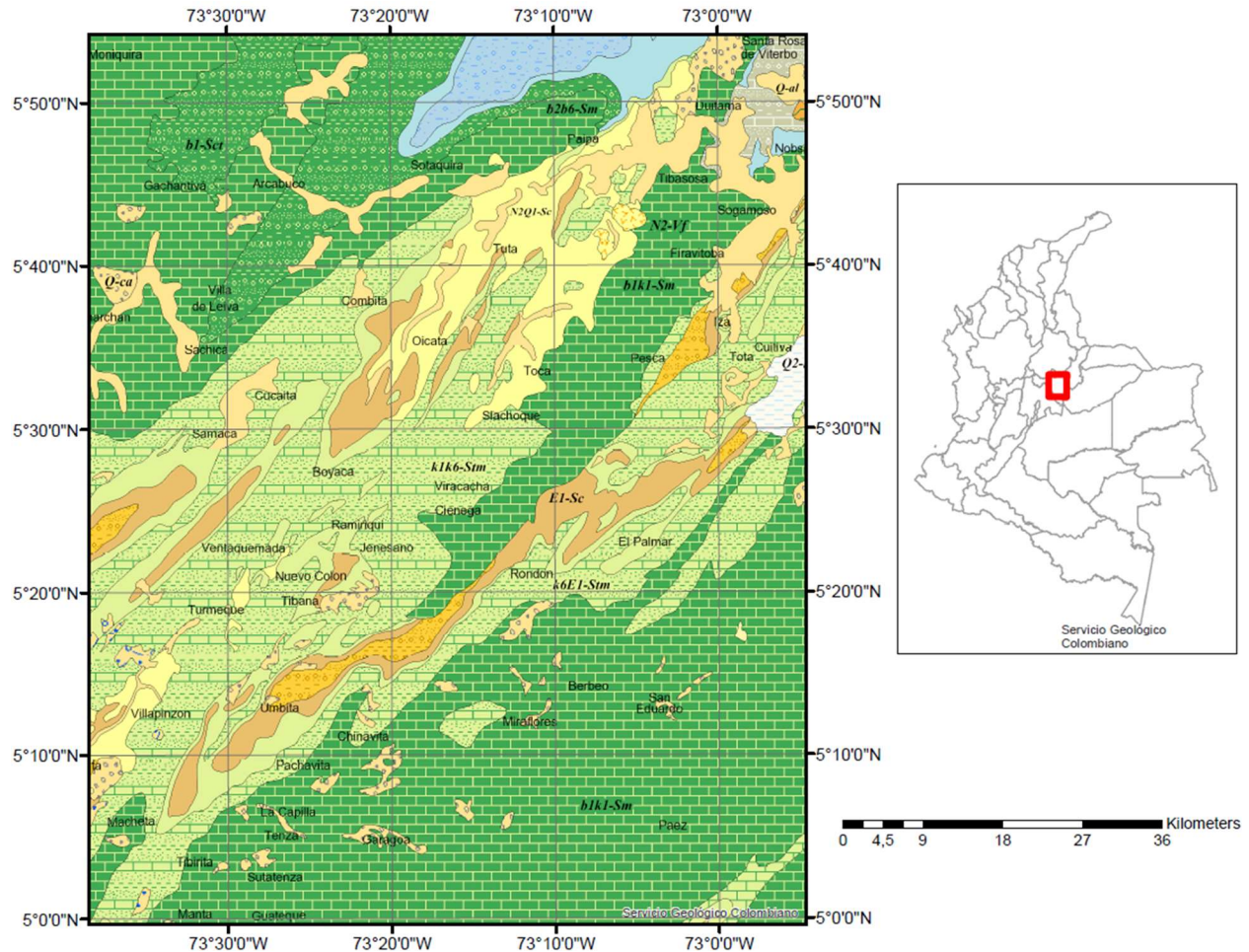


Figura 16. Unidades cronoestratigráficas presentes en el Altiplano Cundiboyacense que comprende los municipios boyacenses de Ventaquemada, Tunja, Paipa, Duitama y Sogamoso. Se observan principalmente en esta zona formaciones desarrolladas durante los periodos Cretácico (k), Paleógeno (E), Neógeno (N) y Cuaternario (Q), relacionadas con las formaciones Tilatá, Tunja y otras formaciones cubiertas por cenizas volcánicas.

Se aclara que la extensión de cenizas volcánicas en el Altiplano presentada en la figura 17 es aproximada, un análisis más detallado de este punto requiere de un estudio que contemple una exploración más amplia y se enfoque principalmente en la identificación de este tipo de material.

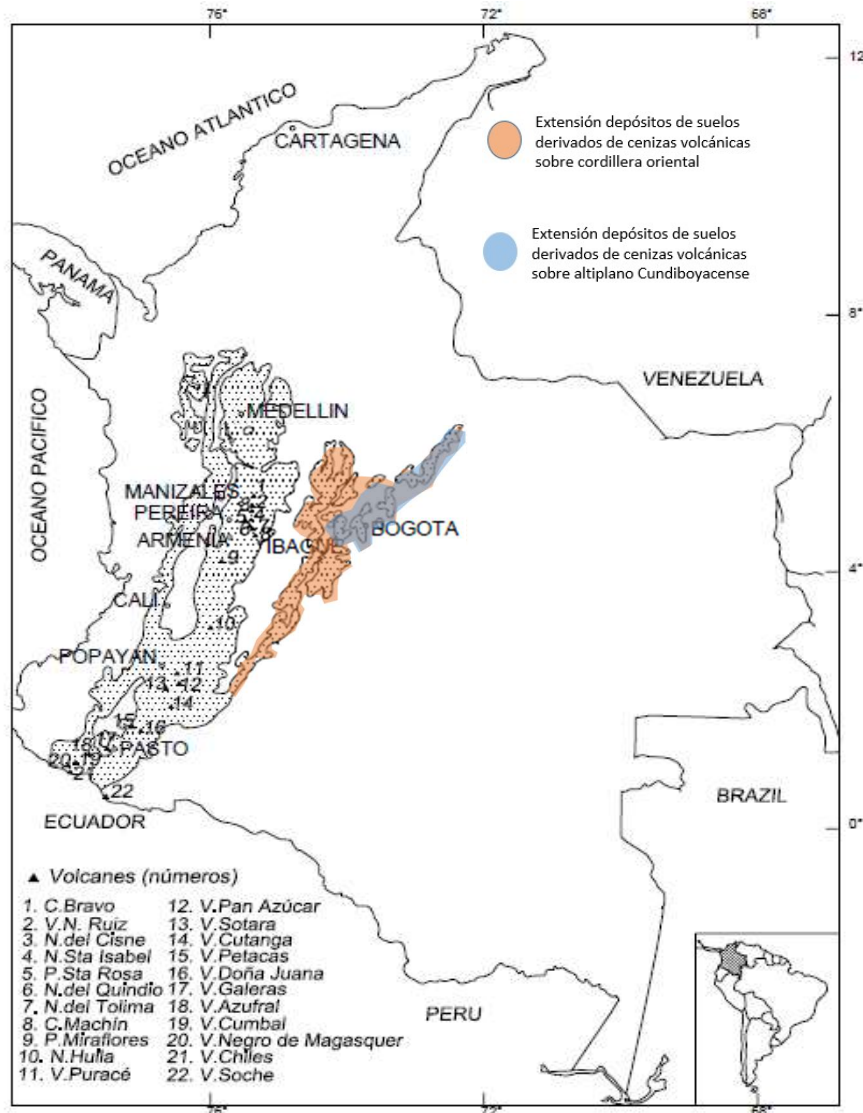


Figura 17. Extensión aproximada de suelos derivados de cenizas volcánicas sobre la Cordillera Oriental y el Altiplano Cundiboyacense. Imagen de fondo tomada y adaptada del trabajo de Herrera (2006).

4.3. Selección de la zona de estudio en el Altiplano Cundiboyacense

Con los resultados obtenidos en las revisiones bibliográficas y de los mapas geológicos y de suelos, se determinó la zona de estudio, en esta se seleccionaron algunos puntos de extracción de muestras para su posterior análisis. La zona seleccionada se localiza en el departamento de Boyacá, sobre los municipios de Ventaquemada y Tunja, situados en la posible área de afectación

del volcán de Paipa. Asimismo, estos lugares se localizan sobre o en cercanías a las formaciones Tunja y Tilatá. Para el caso del sector de Tierra Negra, Jaramillo et al. (2005) realizaron la datación de un afloramiento, esta información sirve como complemento de los análisis aquí realizados. Se resalta que, de acuerdo con los análisis mineralógicos efectuados por el IGAC, el origen de la mayor parte de los suelos que componen el Altiplano del departamento de Boyacá corresponde a la depositación de cenizas volcánicas.

A continuación, se realiza una breve descripción del ambiente de la zona seleccionada, a partir de datos tomados del IGAC, SGC y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); para el departamento de Boyacá y la ciudad de Tunja.

- Clima

El departamento de Boyacá cuenta con amplios pisos térmicos, distribuidos en su diversa topografía, por consiguiente, la temperatura tiene un amplio rango de variación, desde el valle Medio del Magdalena hasta los páramos que rodean el Altiplano y la Sierra Nevada de Güicán o Cocuy. Las precipitaciones se ven afectadas por la geomorfología del departamento y la circulación de vientos locales en el valle Medio del Magdalena; afectando al occidente de Boyacá, y vientos en el flanco oriental de la cordillera, los cuales, por la presencia de la Sierra Nevada de Güicán, no pueden transportar la masa húmeda hacia la zona central, generando un clima seco. En estas zonas de clima seco, las precipitaciones se presentan frecuentemente como lluvias de alta intensidad, estas constituyen factores detonantes de procesos erosivos. En estas zonas, los días de lluvia no están bien distribuidos en el tiempo, por lo tanto, las épocas secas constituyen verdaderos periodos secos (IGAC, 2005), contribuyendo a ciclos de humedecimiento y secado de los suelos, entonces, se producen planos de discontinuidad y se afectan las características del material.

La zona de estudio presenta un régimen de lluvias bimodal caracterizado por dos épocas secas y dos de lluvias mayores; la primera temporada seca es menos prolongada, aunque más deficitaria que la de mitad de año, las épocas de lluvias son de magnitud similar (Clasificación de los climas, IDEAM). En las figuras 18 y 19, se observa el régimen bimodal descrito anteriormente para las cuencas de los ríos Lebrija, Chicamocha y Sogamoso, y para la ciudad de Tunja respectivamente. También se puede contrastar la magnitud de las lluvias anuales en la zona respecto al resto del país, se observa que esta es una de las más secas, con precipitaciones cercanas a los 500 mm al año, característica atribuible a toda la zona del Altiplano.

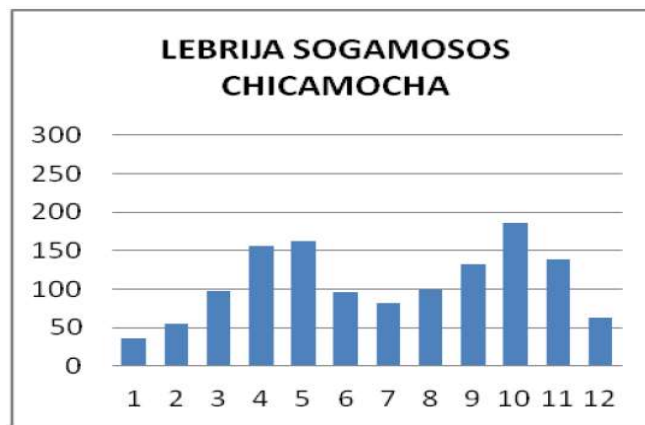


Figura 18. Régimen de lluvias bimodal cuencas de los Ríos Lebrija, Sogamoso y Chicamocha. Tomado de Atlas Interactivo del IDEAM.

La distribución de la temperatura asociada a la variación de la elevación a lo largo del región genera distintos pisos térmicos; cálido, hasta los 1000 m.s.n.m. y temperatura media superior a 24 °C; templado, entre 1000 y 2000 m.s.n.m. y temperatura media entre 18 y 24 °C; frío, entre 2000 y 3000 m.s.n.m. y temperatura media entre 12 y 18 °C; muy frío, entre 3000 y 3600 m.s.n.m. y temperatura media entre 8 y 12 °C; extremadamente frío entre 3600 y 4200 m.s.n.m. y temperatura media entre 4 y 8 °C; sub – nival entre 4200 y 4700 m.s.n.m. y temperatura media entre 1.5 y 4 °C; y el piso térmico nival, por encima de los 4700 m.s.n.m. y temperatura media

inferior a 1.5 °C (IGAC, 2005). La figura 20 muestra la distribución de pisos térmicos del departamento de Boyacá.

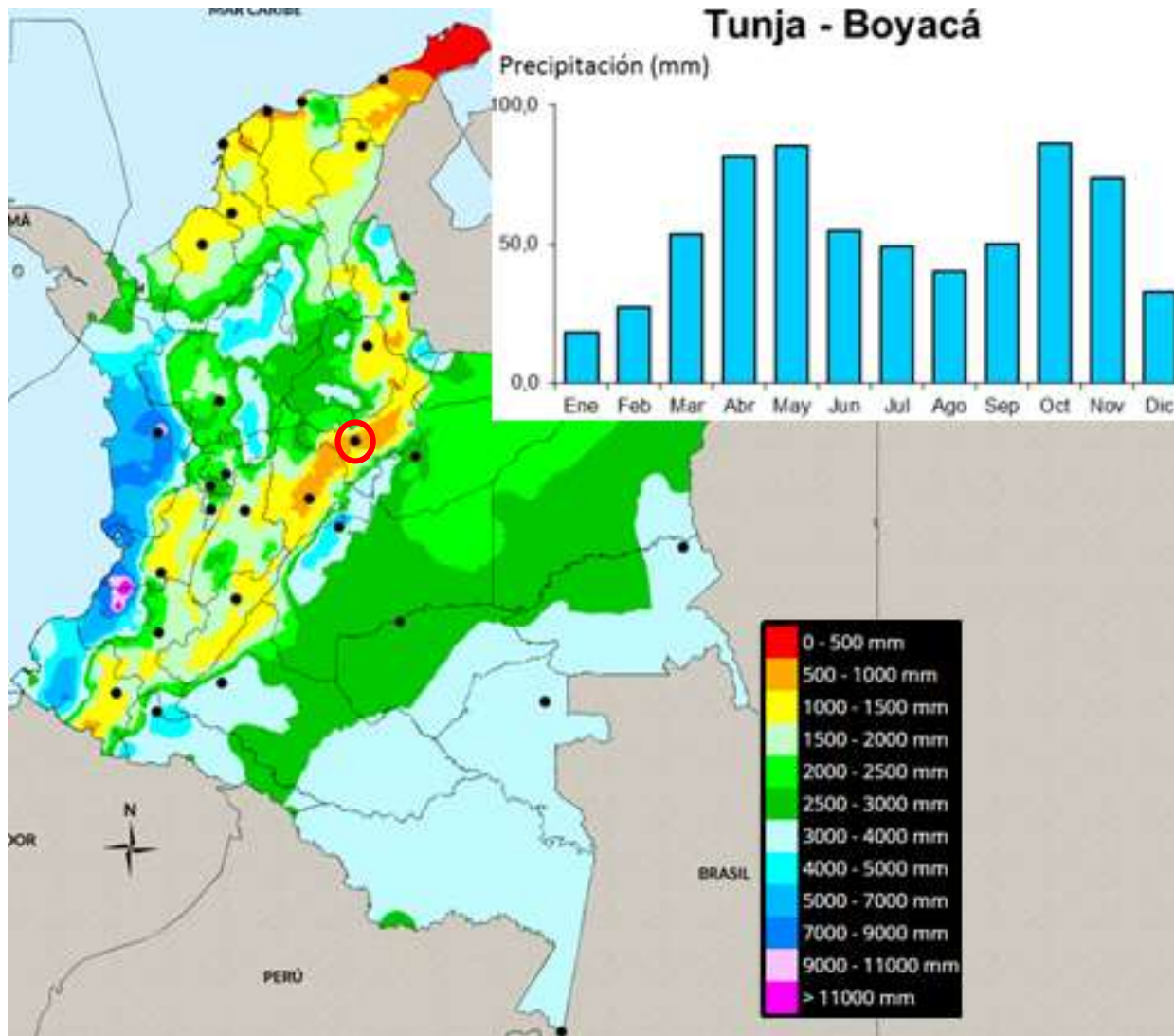


Figura 19. Régimen de lluvias bimodal de la ciudad de Tunja (tomado de Atlas Interactivo del IDEAM)

El Altiplano Cundiboyacense, orientado de suroccidente a nororiente a lo largo de un eje de 250 km y entre los 2000 y 3000 m.s.n.m. se ubica en el piso térmico frío, piso que representa el 38% del departamento (figura 20). Estas condiciones concuerdan con la formación de los suelos anteriormente mencionada.

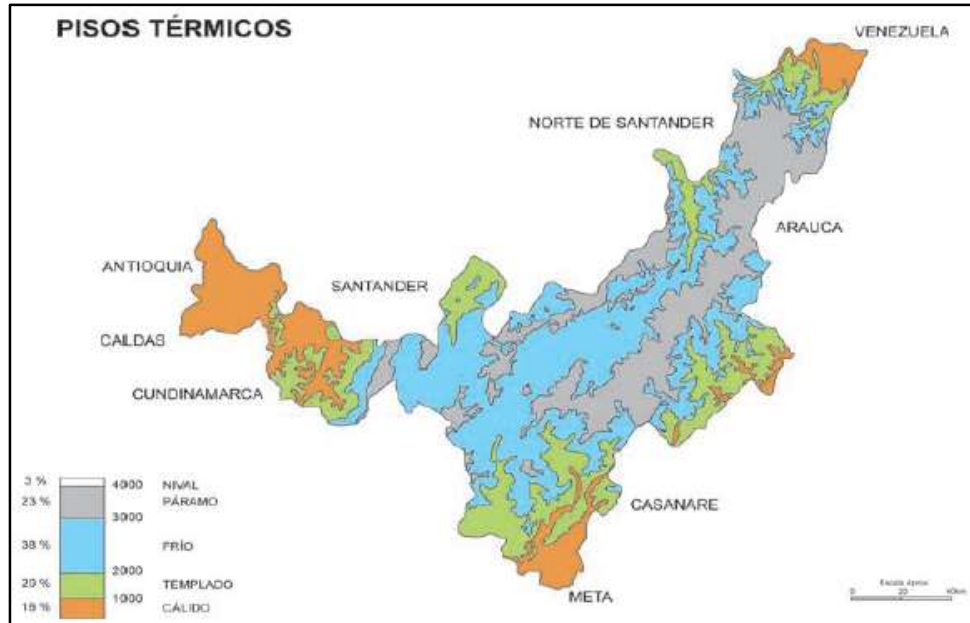


Figura 20. Pisos térmicos presentes en el departamento de Boyacá, tomado de IGAC (2005).

- Actividad sísmica

La actividad sísmica en el departamento varía entre media y alta, predominando la sismicidad alta, únicamente, se presenta sismicidad media en algunas provincias como Occidente y Ricaurte; al occidente del departamento, y provincias de Neira y La Libertad; situadas al oriente, en límites con el departamento del Casanare con una menor área. La ciudad de Tunja y gran parte del Altiplano se encuentra en la zona de amenaza sísmica alta (IGAC, 2005; citando a AIS et al., 1995). Este nivel de amenaza está asociado a las distintas fuentes sismogénicas identificadas en el departamento (figura 21); las fallas frontales del Piedemonte Llanero, fallas de Boconó, falla de Bucaramanga-Santa Marta, falla de Cambrás, falla de La Salina, falla de Boyacá, falla de Soapaga y falla de Tutasá, entre otras. Estas han producido una importante actividad tectónica en el departamento, por tal razón, han sido reconocidas como uno de los factores detonantes principales de deslizamientos. INGEOMINAS (2000) presenta un registro de los eventos sísmicos de mayor intensidad que han ocurrido en el departamento de Boyacá, algunos con magnitud considerable y

epicentro superficial, como el caso del sismo de 1995 (tabla 5). Históricamente se han presentado graves consecuencias por la sismicidad de la zona, como la reubicación del pueblo de Chita debido al sismo de 1724, así como, los graves daños y ruina generada en Santa Fe de Bogotá y Tunja por la ocurrencia del sismo de 1785.

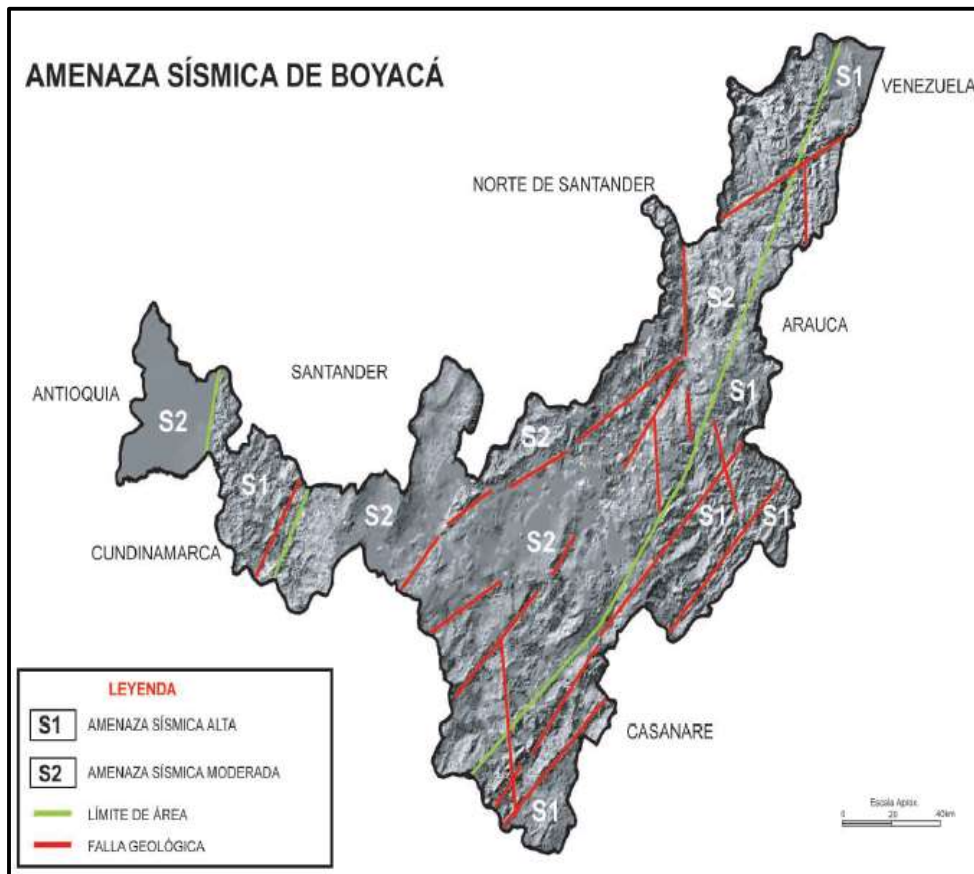


Figura 21. Fuentes sismogénicas identificadas. Tomado de IGAC (2005).

Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud (M*)	Intensidad epicentral
Marzo 16 de 1644	4.5 ° N	74.0 ° W	-	7.0	9K
Abril 3 de 1646	5.7 ° N	73.0 ° W	-	6.3	8K
Noviembre de 1724	6.2 ° N	72.5 ° W	-	7.7	8K
Julio 12 de 1785	4.7 ° N	73.8 ° W	-	7.0	8K
Junio 16 de 1805	5.3 ° N	74.5 ° W	-	7.0	9K
Junio 18 de 1826	4.8 ° N	73.9 ° W	-	6.3	8K
Enero 7 de 1924	4.7 ° N	73.5 ° W	-	6.3	8K
Mayo 29 de 1930	7.0 ° N	74.5 ° W	220.0 km	6.0	-
Abril 21 de 1957	6.9 ° N	72.3 ° W	-	6.6	8M

Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud (M*)	Intensidad epicentral
Julio 29 de 1967	6.8 ° N	73.1 ° W	160.0 km	6.0	8K
Enero 19 de 1995	5.0 ° N	72.9 ° W	15.0 km	6.6	10K

K = Escala MSK, M = Escala de Mercalli.

Tabla 5. Registros sísmicos departamento de Boyacá, tomado de INGEOMINAS (2005).

- Movimientos en masa y deslizamientos

Se identifican diversos deslizamientos, algunos involucran grandes cantidades de material ocasionados además de la actividad sísmica por factores como el agua, que satura el suelo, generando procesos de ablandamiento o pérdida de resistencia al corte, también ocasiona sobrecargas. Otro factor importante son los procesos erosivos, ligados en gran parte al uso del suelo, en los cuales, en muchos sitios de la zona como es el caso de Tunja y sus cercanías, existen procesos de erosión severa a muy severa, allí la cubierta vegetal ha sido eliminada por completo; factores antrópicos también afectan estas condiciones, ya sea por la necesidad de aprovechar el terreno para cultivo, la ganadería o la explotación de materiales. En consecuencia, existe una afectación de los materiales constituyentes de los taludes de corte y laderas, desencadenando movimientos de tierras. Fenómenos de reptación se han identificado, principalmente en zonas con presencia de ganadería, hacía el oriente de Boyacá.

De acuerdo con INGEOMINAS (2000), en el departamento de Boyacá existe alto riesgo de ocurrencia de deslizamientos, su clasificación se basa en las estructuras geológicas existentes, la pluviosidad, sismicidad y erosión de la zona. El departamento se divide en cuatro (4) zonas de amenaza por deslizamiento, estas se presentan en la figura 22. Como se puede observar, el área de estudio se encuentra en una zona de amenaza alta por deslizamiento.

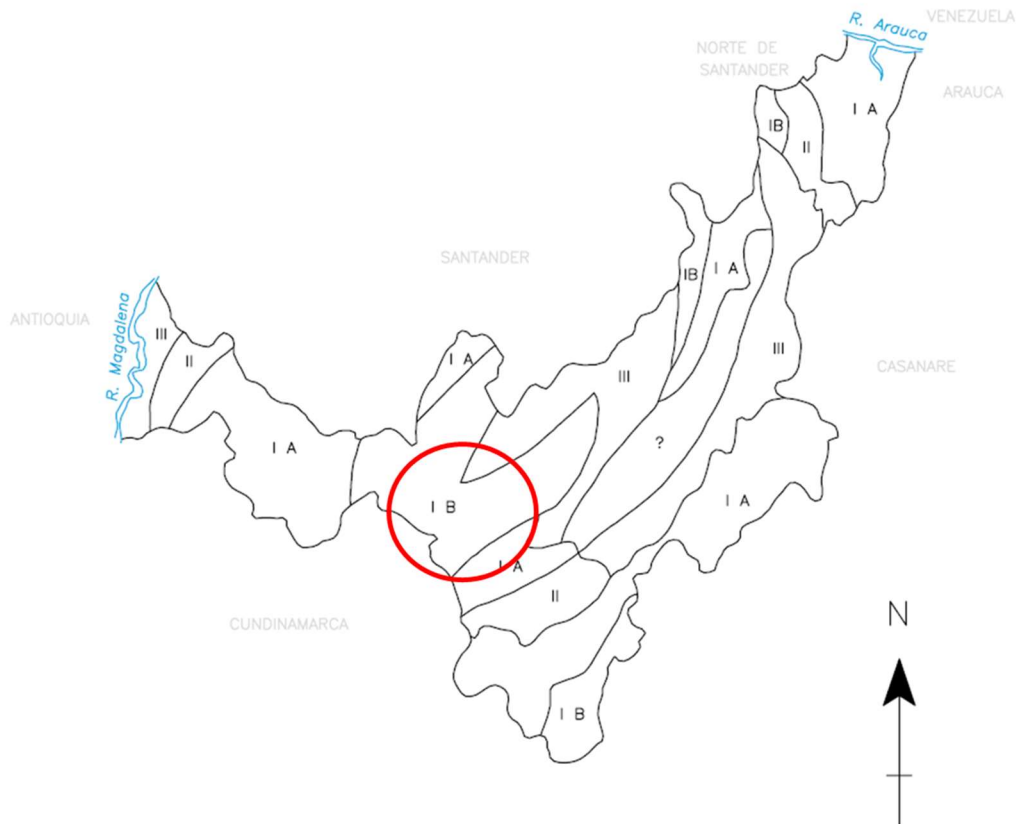


Figura 22. Mapa de amenaza por deslizamiento del departamento de Boyacá; IA, amenaza muy alta; IB, amenaza alta; II, amenaza media; y III, amenaza baja. La zona de estudio se encuentra en un nivel de amenaza alta por deslizamiento principalmente. Tomada y adaptada de INGEOMINAS (2000).

En la región del Altiplano Cundiboyacense uno de los factores más importantes para detonar un deslizamiento es la afectación por el agua. Durante temporadas de lluvias estos fenómenos ocurren o se aceleran, además, la pérdida de la cobertura vegetal aumenta la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento y es necesario controlar la erosión superficial.

- Muestras tomadas

Una vez seleccionada la zona se procede a tomar las muestras para el análisis y evaluación de sus características químicas, mineralógicas, físicas y mecánicas. Se realizan tres (3) salidas de campo encaminadas a conseguir dichas muestras, estas fueron tomadas en distintas localidades de

la región del Altiplano descrita anteriormente. Por otro lado, se contactó a la empresa Servicios de Ingeniería LTDA (SIL), con sede en Tunja, quienes amablemente suministraron algunas muestras en otros sectores de los municipios de Tunja y Ventaquemada; estas permitieron ampliar el área de estudio. A continuación, se muestra un resumen de las muestras tomadas.

Perfil Tunja 1: Talud de la variante Bogotá – Sogamoso, Tunja, Boyacá

El primer sitio seleccionado para la toma de muestras, destinadas a análisis mineralógico, caracterización y determinación de propiedades mecánicas, se encuentra en la vía de Bogotá a Sogamoso, sobre la variante construida en la ciudad de Tunja (suroriente), Boyacá, entre los kilómetros K6+100 y K6+200. En este lugar se realizan dos visitas; en la primera se toman diez (10) muestras en distintas zonas de un talud de corte, el perfil evaluado se muestra en la imagen 3 y en la figura 23 se presentan las localizaciones aproximadas de los sitios de toma de muestras con coordenadas latitud $5^{\circ}31'11.85''N$ y longitud $73^{\circ}21'3.07''O$ para el perfil anteriormente mencionado y coordenadas latitud $5^{\circ}31'8.39''N$ y longitud $73^{\circ}21'4.69''O$ para un corte cercano donde se tomaron muestras superficiales en la visita No. 2. En esta figura es posible observar deslizamientos prolongados ampliamente al oriente de la vía principal.

La tabla 6 resume algunas características de las muestras tomadas en la visita No. 1, la cuales fueron destinadas principalmente a determinar las propiedades mineralógicas del material. La segunda visita se enfocó en obtener muestras en bloque para determinar propiedades mecánicas del material.



Figura 23. Ubicación toma de muestras perfil Tunja 1 para las visitas No.1 y No. 2. Tomada de Google Earth sobre la variante en Tunja, al oriente de esta es posible observar deslizamientos prolongados que involucran volúmenes considerables.

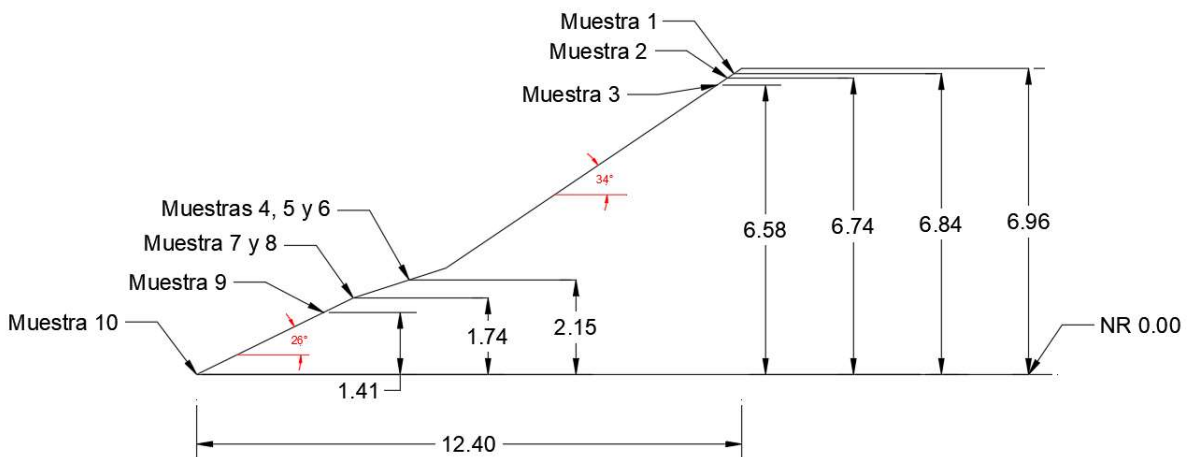


Figura 24. Esquema toma de muestras sobre perfil Tunja 1, dimensiones presentadas en metros.

El talud muestreado se presenta en la figura 24, tiene una altura total de 6.96 metros, longitud horizontal total de 12.40 metros y está conformado por tres pendientes, la inicial de 26°, la intermedia de 18° y la final de 34°, medidas desde el nivel 0.00 al nivel +6.96; estas inclinaciones son comunes en toda el área de estudio. El talud no presenta falla aparente en ninguna de las

inclinaciones, sin embargo, se observó que el material de las pendientes inferiores corresponde a material movilizado de zonas superiores. A continuación, se realiza una descripción de las muestras tomadas del perfil Tunja 1, visita 1 (TJ1-V1).

Muestra No.	Id. Inicial	H (m)	Descripción	Color
1	Tunja - 05 AO, Hz AO	6.84	Material limoso con alto contenido de raíces y materia orgánica, Turba, humedad baja	10 YR 3/4
2	Tunja - 06 AO2	6.74	Turba, con alto contenido de raíces, humedad media	10 YR 2/2
3	68 cm - 07 - Tunja - AOB Transición	6.58	Zona de transición horizonte A orgánico; turba con alta presencia de raíces, a horizonte B; arcilloso, color café con betas rojizas humedad media a alta	2.5 YR 3/3
4	Tunja - 01	2.15	Arcilla color gris claro con pintas rojizas provenientes del material que cubre el talud, humedad baja, presenta agrietamiento y foliación	5 Y 7/1
5	Tunja - 02	2.15	Arcilla color café rojizo, con vetas de arcilla color gris claro, material suelo que cubre el talud, humedad media	5 YR 3/4
6	Tunja - 03, Julio - 03/21	2.15	Arcilla color gris claro con trazas de arcilla color café rojizo, contenido de humedad de medio a alto	5 Y 7/1
7	Tunja - 08 - B	1.74	Arcilla color café rojizo con trazas de arcilla gris claro, humedad media a baja, alto contenido de raíces	5 YR 3/3
8	Tunja - 09, 3.96, B2	1.74	Arcilla color café claro con trazas amarillentas, contenido de humedad medio	7.5 YR 5/4
9	Tunja - 10, 3.20m - B	1.41	Arcilla color carmelito claro, contenido de humedad bajo, trazas rojizas de material que cubre el talud	10 YR 8/3
10	Tunja - 11 B Fondo	0	Arcilla color café rojizo con presencia de raíces pequeñas, humedad media	5 Y 7/1

Tabla 6. Descripción muestras perfil Tunja 1 (K6+200), durante visita No. 1, medidas desde nivel 0.00 (ver figura 24). Durante la visita No. 2 las muestras fueron tomadas en los mismos niveles.

El talud está cubierto por una capa de material rojizo, franco arcilloso, de espesor aproximado de 50 cm, como se puede apreciar en la imagen 3.

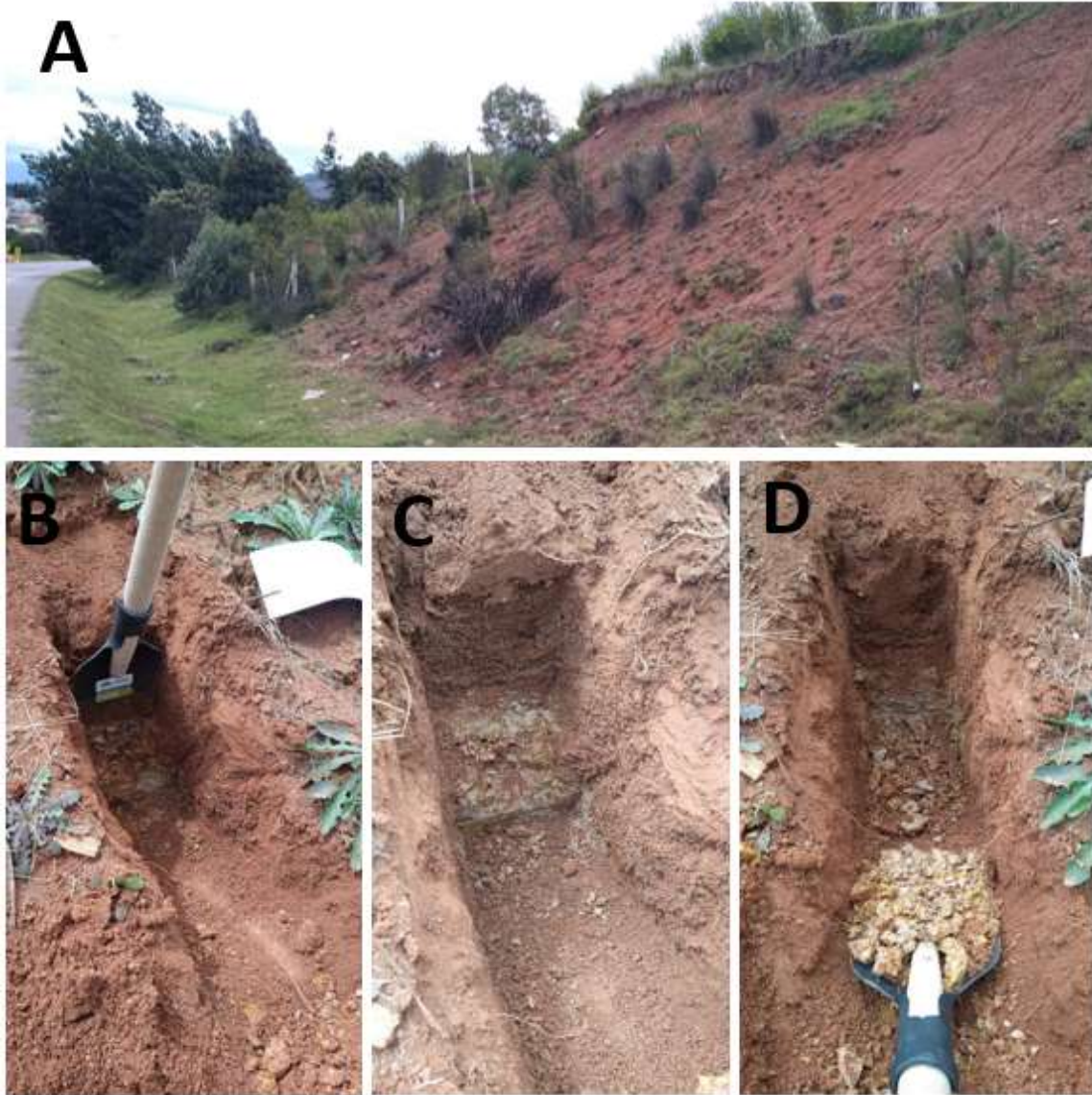


Imagen 3. Fotografía perfil Tunja 1 durante la visita No. 1; A) talud muestreado; B) excavación capa de suelo rojizo que cubre el talud de aproximadamente 50 cm de espesor; C) material franco arcilloso gris amarillento ubicado bajo la capa de suelo rojizo y; D) extracción de muestra con pala para análisis de mineralogía.

Las diez (10) muestras tomadas se empacan en bolsas con el fin de conservar su humedad (imagen 4), la cual será determinada posteriormente.



Imagen 4. Muestras embaladas provenientes de perfil Tunja 1 en visita No.1.

Como se mencionó anteriormente, en la segunda visita al perfil Tunja 1 (TJ1-V2) se tomaron muestras en bloque sobre el mismo talud y superficialmente sobre un talud cercano; estos se muestran en la imagen 6. En la tabla 7, se presenta la descripción de las 6 muestras tomadas en esta localidad, las cuales fueron marcadas y embaladas inmediatamente para procurar conservar de la mejor manera sus propiedades naturales, la imagen 5 presenta la apariencia de estas.

Muestra No.	Id.	H (m)	Descripción	Color
1	TJ1 - 1 - Visita2 (K6+100)	Superficial	Muestra en bolsa de material suelto de arcilla rojiza procedente del material que cubre el talud.	5 YR 3/4
2	TJ1 - 2 - Visita2 (K6+100)	Superficial	Muestra en bolsa de diversos bloques de arcilla color amarillo rojizo ubicado en la pata del talud, humedad baja.	10 YR 8/3
3	TJ1 - 3 - Visita2 (K6+200)	6.46	Muestra en bolsa de diversos bloques de material limo arcilloso color café rojizo proveniente de horizonte de transición orgánico, alta presencia de raíces.	2.5 YR 3/3
4	TJ1 - 4 - Visita2 (K6+200)	6.56	Muestra en bolsa de diversos bloques de material limo arcilloso proveniente de horizonte de transición orgánico, alta presencia de raíces. Material idéntico al anterior para efectos prácticos.	2.5 YR 3/3

Muestra No.	Id.	H (m)	Descripción	Color
5	TJ1 - 5 - Visita2 (K6+200)	2.20	Muestra en bolsa de diversos bloques de arcilla color gris rojizo, humedad media.	5 Y 7/1
6	TJ1 - 6 - Visita2 (K6+200)	1.50	Muestra en bolsa de diversos bloques de arcilla color gris claro amarillento, mínima presencia de raíces, humedad baja.	5 Y 7/1

Tabla 7. Descripción muestras perfil Tunja 1 (K6+100 a K6+200), durante visita No. 1, medidas desde nivel 0.00 (ver figura 24). Durante la visita No. 2 las muestras fueron tomadas en los mismos niveles.



Imagen 5. Muestras embaladas provenientes de perfil Tunja 1 en visita No.2.

Para su extracción, al igual que en la visita anterior, se procuró retirar por completo la cobertura superficial de arcilla rojiza del talud, con el fin de obtener bloques o muestras en bolsa con menor grado de contaminación la cuales representen de mejor manera el material constituyente del talud.

Se resalta que el material tomado en la segunda visita se dispuso para la evaluación de propiedades físicas como el peso unitario y humedad, y propiedades mecánicas como la resistencia al corte mediante ensayos de corte directo en condiciones consolidadas drenadas sobre muestras compactadas al peso unitario total del material en su estado natural.



Imagen 6. Recolección de muestras en perfil TJI-V2. A) Toma de muestras en el mismo perfil muestreado durante visita No.1 (K6+200), se presenta la recolección de estas sobre la pendiente de 26° del talud; B) Toma de muestras en la pendiente de 34° del talud ubicado en el K6+200, a la izquierda Yeison Pérez Aguirre; y C) Toma de muestras superficiales sobre talud situado en el K6+100, a la izquierda los profesores José María Jaramillo Mejía y Manuel García López.

Perfil Tunja 2: Corte vertical en cercanías de la variante Bogotá – Sogamoso, Tunja, Boyacá

Con el fin de ampliar el análisis mineralógico de la zona se toman muestras en un corte vertical de aproximadamente dos (2) metros de altura, localizado sobre una vía paralela a la variante. En este se aprecian cuatro (4) horizontes, lo que evidencia el desarrollo de distintos paleosuelos. En la figura 25, se presenta la ubicación del punto de muestreo con coordenadas latitud $5^{\circ}30'15.65''N$ y longitud $73^{\circ}22'0.53''O$, se puede evidenciar la erosión superficial severa característica en la zona. En la imagen 7, se presenta el corte vertical muestreado, se observa el desarrollo de los cuatro (4) distintos paleosuelos mencionados.



Figura 25. Localización del corte vertical para la toma de muestras perfil Tunja 2, extraída de Google Earth. Se puede observar la erosión severa de la zona.

El material muestreado en general exhibe una humedad baja, desecación y en consecuencia el corte presenta un agrietamiento prolongado que afecta los distintos horizontes. Sobre este material se realizan análisis para conocer su composición mineralógica y clasificarlo de acuerdo

con el USCS. La tabla 8 presenta una descripción de las muestras tomadas, su apariencia se observa en la imagen 8.

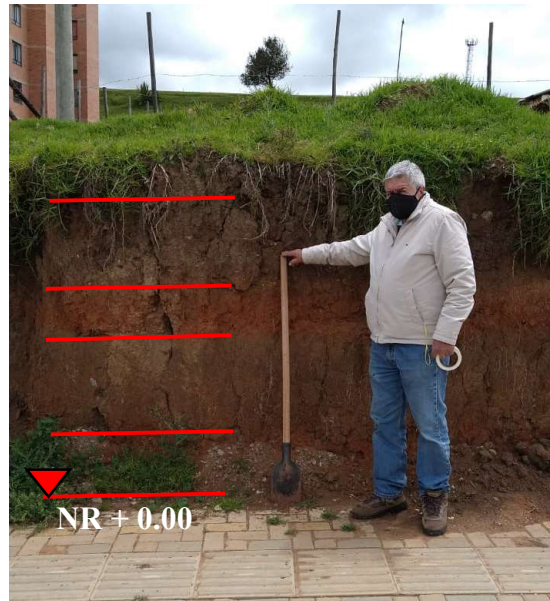


Imagen 7. Corte vertical; perfil Tunja 2. En este se puede apreciar el desarrollo de cuatro distintos horizontes o paleosuelos, en el corte se aprecia un agrietamiento prolongado. En la fotografía el Dr. José María Jaramillo Mejía.

Muestra No.	Id. Inicial	H (m)	Descripción	Color
11	Tunja perfil 2 AO1	1.8	Material limoso, con alto contenido de materia orgánica; turba, con alta presencia de raíces, humedad baja. Suelo superior.	10 YR 3/4
12	Tunja perfil 2 B1	1.35	Arcilla café rojizo con presencia de raíces, humedad baja.	5 YR 3/4
13	Tunja perfil 2 AO2	0.9	Paleosuelo color café, contenido de humedad bajo.	10 YR 3/4
14	Tunja perfil 2 B2	0.45	Arcilla café rojizo, contenido de humedad bajo, presencia superficial de raíces.	5 YR 4/6

Tabla 8. Descripción muestras perfil Tunja 2, medidas desde nivel 0.00.



Imagen 8. Muestras embaladas provenientes de perfil Tunja 2.

Sector de Tierra Negra: Vía Bogotá – Sogamoso

En el sector de Tierra Negra, municipio de Ventaquemada, Boyacá, también se realizaron dos visitas. En la visita No. 1, para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas se toman algunas muestras mediante un método de vibración sobre un talud cercano a la calzada principal de la vía Bogotá – Tunja (en este mismo sentido), en cercanías al lugar de estudio del trabajo realizado por Jaramillo et al. (2005). En la figura 26, se presenta la localización aproximada del punto de muestreo de la zona mencionada con coordenadas latitud $5^{\circ}25'48.13''N$ y longitud $73^{\circ}26'59.79''O$, en esta figura también es posible observar dos deslizamientos que envuelven volúmenes considerables. Estas muestras fueron tomadas a profundidades superficiales; aproximadamente 1.50 metros. Por el método de extracción y otros factores, como la lluvia, algunas muestras presentan un alto grado de alteración, por lo tanto, la ejecución de los ensayos se efectuó sobre las muestras que presentan la menor condición de alteración con el fin de aumentar la confiabilidad en los análisis.

En general las muestras extraídas son arcillas color gris rojizo a amarillento (típica de los materiales presentes en la zona), de humedad media a alta, no presentan agrietamiento prolongado y la mayoría presentó dificultades en su manipulación; principalmente para la realización del

ensayo triaxial UU, el tallaje de la muestra se dificultó por el desprendimiento de material. En la imagen 9, se puede apreciar parte de las características mencionadas anteriormente.

La visita No. 2 se enfocó en obtener muestras en bloque representativas del material de la zona para la ejecución de ensayos mecánicos (corte directo CD), el punto de muestreo fue el mismo elegido para la visita No. 1. En la imagen 10 se presenta una de las muestras en bloque obtenidas y en la tabla 9 la descripción general de las mismas.

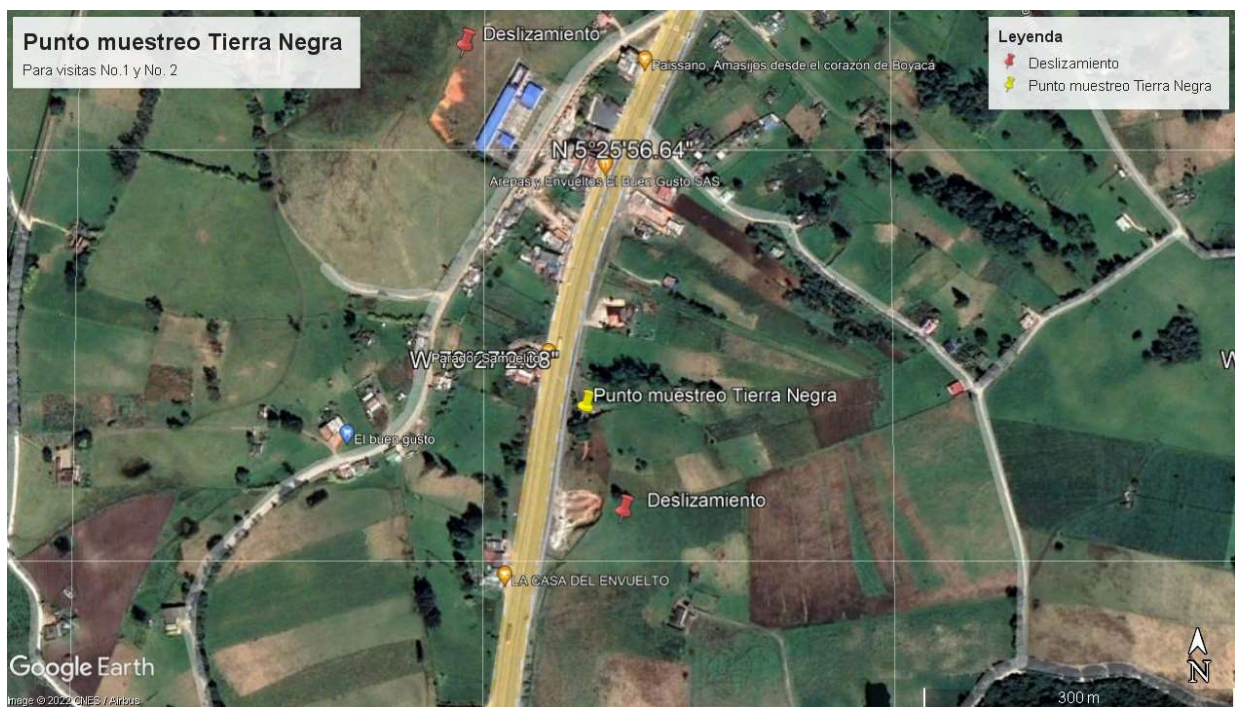


Figura 26. Localización talud de toma de muestras Tierra Negra para las visitas No. 1 y No. 2. Tomado de Google Earth.

Muestra No.	Id.	h (m)	Descripción	Color
7	TN - 7 - Visita2	-3.00	Muestra en bloque de arcilla color rojo, cercana a transición arcilla amarilla a arcilla roja. Humedad media.	5 YR 3/4

Tabla 9. Descripción muestras Tierra Negra (TN) visita No. 2, alturas medidas desde la superficie del terreno.



Imagen 9. Apariencia típica muestras sector de Tierra Negra, Ventaquemada, Boyacá para la visita No. 1, en A) Embalaje de muestras para conservar sus propiedades, B) mecanismo para la extracción de muestras (de tubo Shelby), C) y D) muestras típicas encontradas en la localidad de Tierra Negra, arcilla gris amarillenta y arcilla gris rojiza respectivamente.



Imagen 10. Apariencia muestra en bloque tomada en visita No. 2 al sector de Tierra Negra, Ventaquemada, Boyacá.

Sitios en Tunja y Ventaquemada, muestras suministradas por SIL

Con el fin de ampliar la zona de estudio y ejecutar un mayor número de ensayos se contacta a la empresa Servicios de Ingeniería LTDA (SIL) con sede en la ciudad de Tunja, la cual, amablemente suministra algunas muestras en localidades de interés para este estudio y a distintas profundidades. Además, proporciona algunos valores de las propiedades físicas y mecánicas determinadas en la ejecución de sus proyectos. Las localidades de las cuales fueron extraídas las muestras corresponden a cercanías del puente peatonal del CRIB (Tunja); SIL-CRIB, cercanías a

Green Hills (Tunja); SIL-GH, y a una zona del municipio de Ventaquemada; SIL-VQ, estas pueden observarse en la figura 27.



Figura 27. Localización muestras suministradas por SIL, en A) zona puente peatonal CRIB (Tunja), B) Green Hills (Tunja) y C) Ventaquemada. Adaptado de Google Maps.

En la tabla 10 se presenta una descripción de las muestras suministradas por SIL.

Muestra No.	Zona	Id. Inicial	Estado	Prof. (m)	Descripción
1	Cercanías Green Hills - Tunja	S3 - M10	Alterada	5.80 - 6.30	
2	Puente peatonal CRIB - Sur Tunja	S3 - M22	Alterada	19.00 - 20.00	Arcilla color gris, con trazas azules, la muestra presenta humedad alta (previamente alterada)
3	Ventaquemada	S1 - M9	Alterada	6.00 - 6.50	

Muestra No.	Zona	Id. Inicial	Estado	Prof. (m)	Descripción
4	Cercanías Green Hills - Tunja	S3 - M6	Inalterada	2.50 - 3.00	Arcilla color gris rojizo con presencia baja de arena fina, humedad media a baja
5	Cercanías Green Hills - Tunja	S3 - M11	Inalterada	6.50 - 7.00	Arcilla color gris rojizo con presencia considerable de arenas finas, humedad media a baja
6	Puente peatonal CRIB - Sur Tunja	S3 - M14	Inalterada	12.00 - 12.50	Limo gris amarillento, exterior rojizo, presencia de arena, muestra fragilidad y dificultad en manipulación, humedad media a baja
7	Ventaquemada	S4 - M2	Inalterada	1.00 - 1.50	Arcilla negra (similar a turba), humedad media a alta, presencia considerable de raíces, olor fuertemente orgánico
8	Ventaquemada	S3 - M3	Inalterada	1.80 - 2.30	Arcilla negra (similar a turba), humedad media a alta, presencia de raíces.

Tabla 10. Resumen muestras suministradas por SIL extraídas en Tunja y Ventaquemada, departamento de Boyacá.

4.4. Determinación de la mineralogía del suelo de la zona de estudio.

En el desarrollo de este estudio es fundamental verificar que el material objeto de análisis efectivamente corresponde a derivados de la meteorización de cenizas volcánicas. Teniendo en cuenta lo expuesto en el capítulo 3.2 (Mineralogía), existen minerales característicos que componen de la fracción arcillosa, los cuales, surgen de la alteración de vidrio volcánico y cristalización de los mineraloides alófana e imogolita, como es el caso de la meta halloysita y la caolinita; el primero es el indicador más claro.

La cristobalita también corresponde a un mineral indicador de la presencia de suelos derivados de cenizas volcánicas, este es reconocido en el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca, desarrollado por el IGAC (2000).

Se emplearon técnicas de fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (XRD) para determinar la composición química e identificar las estructuras cristalinas que componen el material. Inicialmente se contempló el uso de microscopía electrónica para observar claramente la disposición estructural de los minerales constituyentes, sin embargo, restricciones en la disponibilidad de los equipos asociadas a la situación de emergencia actual por la pandemia del covid-19 impidieron ejecutar estos ensayos sobre las muestras tomadas, por lo tanto, esta información fue obtenida a partir de estudios relacionados sobre estos suelos.

A continuación, se realiza una breve descripción de las técnicas usadas para la determinación de los minerales constituyentes de las muestras tomadas en TJ-1-V1, TJ-2, SIL-CRIB, SIL-GH y SIL-VQ.

4.4.1. Fluorescencia de rayos X

Mediante esta técnica se realiza el análisis cuantitativo de elementos mayores, correspondientes a valores superiores al 1% en peso, y elementos menores (en partes por millón, ppm). Para la determinación de estos, se emiten rayos X de alta energía con bajas longitudes de onda, los cuales generan la emisión de un fotón, generalmente de menor energía, produciendo rayos X de menor energía con mayor longitud de onda. Se aplica la ley de Bragg para el análisis, la cual relaciona la distancia entre los planos paralelos de la red cristalina (d), la longitud de onda de rayos X incidentes (λ) y el ángulo generado entre rayos incidente y dispersado con el plano cristalino (θ). La distancia d es conocida, representa el espesor del cristal monocromador, entonces, mediante el espectrómetro se realiza el barrido para determinar el ángulo de incidencia y por lo tanto se puede determinar la longitud de onda que permite identificar los elementos constituyentes de una muestra.

Ley de Bragg: $n\lambda = 2d\sin(\theta)$, siendo n un número entero

Preparación de la muestra (XRF)

Se separan aproximadamente treinta (30) gramos de material de cada una de las muestras a evaluar. El material separado se seca en el horno para determinar su humedad, en este estado se pulveriza de tal manera que este pase el tamiz No. 200, una parte de este material se separa para el ensayo de fluorescencia de rayos X y la otra para el de difracción de rayos X.

Habiendo secado y pulverizado cada muestra, la cantidad destinada a realizar XRF se lleva a la mufla a 1100 °C para que sea calcinada. Posteriormente, se realiza una mezcla, procurando homogenizarla de la mejor manera, de un (1) gramo de material calcinado por siete (7) gramos de fundente, luego, ésta se funde para la fabricación de los cristales o perlas, que serán analizados en el espectrómetro. El procedimiento descrito anteriormente se muestra en la imagen 11.



Imagen 11. Preparación de muestras para análisis de fluorescencia de rayos X; A) muestra secada al horno para determinación de humedad y pulverización; B) equipo para pulverizar muestras; C) muestra pulverizada (muestra 7); D) separación de 1 gramo de muestra calcinada; E) mezcla homogénea de fundente y material; F) fusión de mezcla para producción de perlas; G), H) e I) perlas para análisis de fluorescencia de rayos X; y J) espectrómetro para XRF. Fuente: propia.

4.4.2. Difracción de rayos X

Esta técnica permite identificar las estructuras cristalinas presentes en especímenes mediante la interacción de un haz de rayos X, con una única longitud de onda, que interactúa con la muestra, generando un fenómeno de difracción con un ángulo típico para las distintas estructuras cristalinas presentes en el material. Al igual que en el ensayo de XRF se hace uso de la ley de Bragg.

El difractograma, que representa la relación entre la intensidad de los rayos difractados y el ángulo 2θ ; correspondiente a la suma del ángulo de incidencia y el ángulo difractado, se determina haciendo uso del equipo esquematizado en la figura 28. Este varía tanto el ángulo de incidencia generado por la fuente como el ángulo difractado medido en el receptor, generando un espectro lo suficientemente amplio que permite la identificación de distintos picos en puntos donde ocurre el fenómeno de difracción. Mediante algunas reglas de determinación de estructura, que dependen de la distancia interplanar (d) calculada mediante la ley de Bragg es posible identificar y cuantificar los minerales presentes en determinado espécimen.

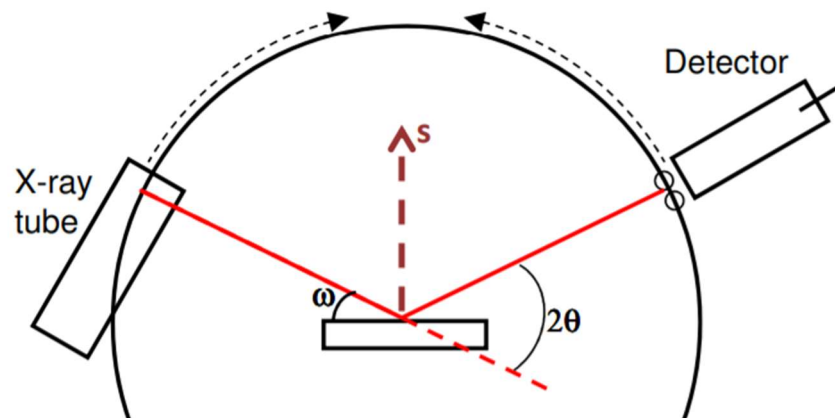


Figura 28. Representación esquemática de la técnica de Difracción de Rayos X para la identificación y cuantificación de estructuras minerales en las muestras, en esta ω representa el ángulo de incidencia, equivalente a $\frac{1}{2} 2\theta$. Tomado de Speakman (*Basic of X-Ray Powder diffraction – MIT*).

Preparación de la muestra (XRD)

De las muestras secadas al horno y pulverizadas, descritas en la preparación para XRF, se separó una cantidad suficiente para agregar a una probeta, que se llena con agua, posteriormente se agita firmemente, de tal manera que el material se disperse. Cuando se deja en reposo, ocurre un proceso de sedimentación y de esta manera se consigue la orientación adecuada de las partículas del suelo para el ensayo. Transcurrido un corto tiempo de dispersión y sedimentación, la mezcla contenida en la probeta se toma mediante una pipeta para llenar por completo el cristal circular donde será analizada la muestra, la cual, se seca sobre este, de tal forma que las partículas previamente orientadas arrojen resultados confiables. El procedimiento descrito se presenta en la imagen 12.

Los resultados obtenidos en mediante estas técnicas se presentan en secciones posteriores, al igual que el análisis de estos, con el fin de verificar su origen volcánico y estimar cualitativamente su grado de meteorización, asociado directamente con la presencia de minerales característicos.

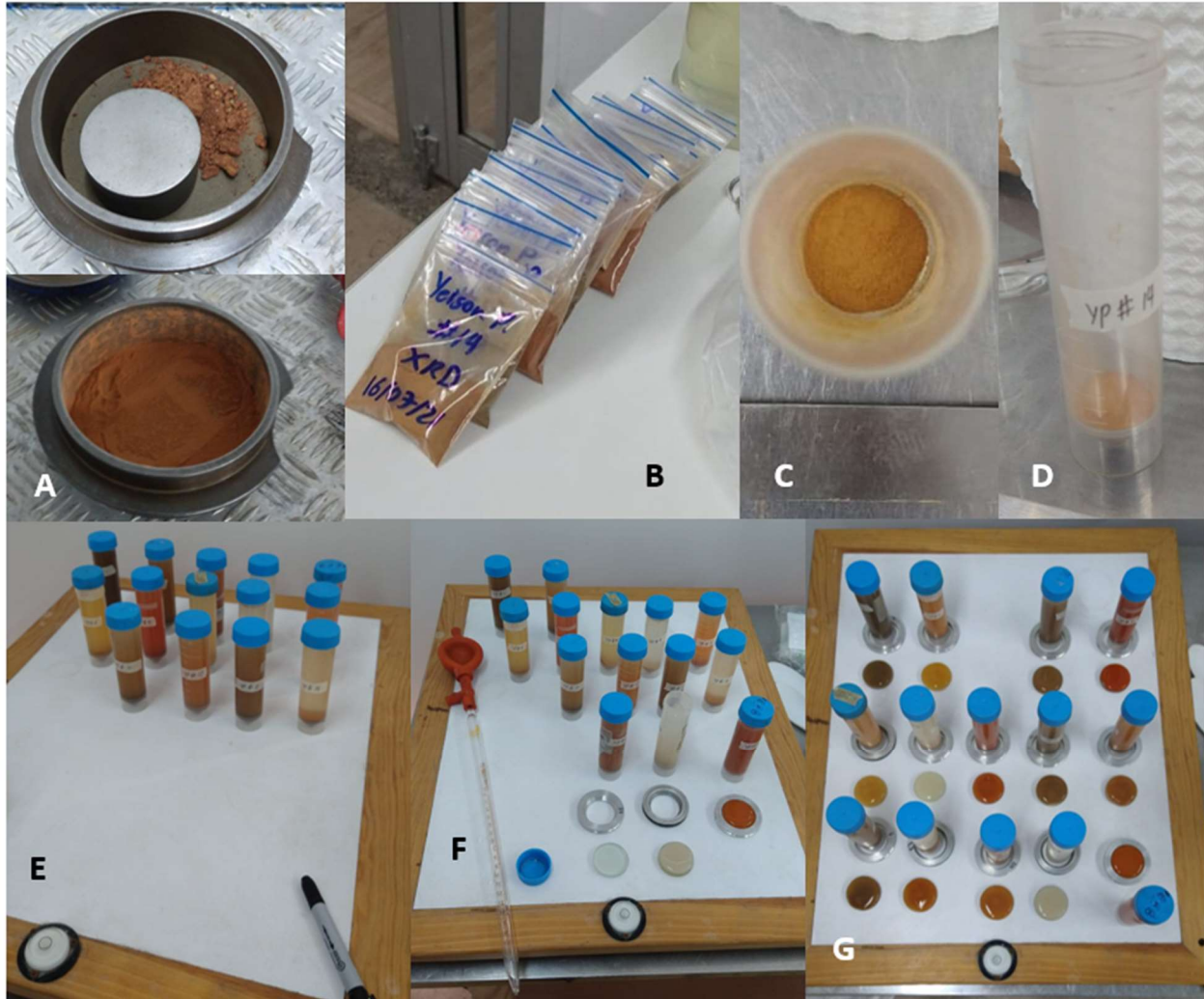


Imagen 12. Preparación muestras XRD; A) muestra secada y pulverizada; B) embalaje de muestras para XRD; C) y D) material agregado a probeta; E) probeta con agua y material agitado para dispersión y posterior sedimentación; F) colocación de mezcla sobre cristales para XRD; y G) proceso de secado de mezcla sobre cristales para análisis XRD.

4.5. Determinación de las propiedades índice del suelo de la zona de estudio.

Sobre las muestras tomadas en las distintas localidades y aquellas que fueron suministradas por SIL, se realizan los ensayos necesarios para determinar las propiedades físicas del material, acorde a los criterios de clasificación del USCS, puesto que, se reconoce este sistema de clasificación como el más adecuado para este tipo de suelos. Cabe resaltar que en algunos casos

no fue posible realizar más ensayos debido a disponibilidad de los equipos del laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

En la tabla 11 se resumen los ensayos realizados para la determinación de propiedades índice del suelo muestreado en la zona de estudio.

Ensayo	Norma	Observaciones
Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad)	INV E - 122 -13	
Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos	INV E - 123 -13	La totalidad del material pasa el tamiz No. 10, se empleó proceso de sedimentación empleando hidrómetro 151 H
Determinación del límite líquido de los suelos	INV E - 125 - 13	Se evaluó límite líquido sobre muestras en su humedad natural y sobre muestras sometidas a ciclos de secado.
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	INV E - 126 - 13	Se evaluó límite plástico sobre muestras en su humedad natural y sobre muestras sometidas a ciclos de secado.
Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando en picnómetro con agua	INV E - 128 - 13	Se realizaron ensayos por el método húmedo, de acuerdo con los minerales constituyentes, en este caso meta halloysita.
Determinación peso unitario	INV E - 129 - 13	Se empleó el método de parafinado para la determinación del peso unitario sobre muestras fundamentalmente arcillosas.

Tabla 11. Resumen de los ensayos realizados para la determinación de las propiedades físicas del material.

Los resultados obtenidos, así como su análisis se presentan más adelante, allí se establecen las relaciones gravimétricas y volumétricas típicas del material muestreado, las cuales son comparadas con los valores obtenidos por distintos autores en estudios sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia y alrededor del mundo.

4.6. Determinación de las propiedades mecánicas del suelo de la zona de estudio.

Dado que el objetivo general de este estudio es verificar el comportamiento de los taludes es fundamental determinar adecuadamente las propiedades mecánicas de los suelos, por esto, se contempló realizar ensayos que permitan evaluar las propiedades mecánicas a corto y largo plazo. Inicialmente, se pretendía realizar ensayos triaxiales en condiciones consolidadas no drenadas (CU), con el fin de obtener parámetros en términos de esfuerzos efectivos, sin embargo, por un daño en el sensor de medición de presión de poros no fue posible realizar estos ensayos. Por lo tanto, para determinar estos parámetros se optó por realizar ensayos de corte directo CD sobre muestras inalteradas y compactadas procurando llevar el material a su peso unitario total in situ.

Adicionalmente, se ejecutaron ensayos triaxiales en condición no consolidada no drenada (UU), con el fin de evaluar la resistencia al corte en términos de esfuerzos totales, condiciones asociadas a los niveles de saturación presentes en los especímenes y que serán discutidas más adelante. Este parámetro también es útil para clasificar el tipo de suelo y se relaciona con el mecanismo de falla más común.

En la tabla 12 se presenta el resumen de los ensayos realizados para determinar los parámetros anteriormente mencionados.

Ensayo	Norma	Observaciones
Ensayo de compresión triaxial sobre suelos cohesivos	INV E - 153 - 13	Se determinó la resistencia al corte en términos de esfuerzos totales para muestras saturadas extraídas con tubo Shelby y similar (SIL y TN)
Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD)	INV E - 154 - 13	Se determinó la resistencia al corte en términos de esfuerzos totales para muestras compactadas al peso unitario natural.

Tabla 12. Resumen de los ensayos realizados para la determinación de las propiedades mecánicas del material de estudio.

También se evalúa cuanto incide la humedad natural o inicial del ensayo con los parámetros de resistencia determinados mediante los ensayos anteriores.

4.7. Determinación de los índices de expansión y colapso.

La disposición estructural de los minerales incide en gran medida en el comportamiento del material, considerando la estructura cementada y abierta expuesta en el capítulo número tres (3). Por otro lado, la composición propia de cada mineral determina su interacción con las moléculas de agua; su facilidad para incorporarlas en su estructura. Por lo anterior, este estudio contempló la evaluación de la deformación volumétrica más probable, ya sea expansión o contracción.

Esta condición se evaluó tanto con las correlaciones existentes con los índices de consistencia del material como con ensayos en consolidómetro realizados en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. En la siguiente tabla (13) se resumen los ensayos realizados para la evaluación de los índices de expansión y colapso.

Ensayo	Norma	Observaciones
Determinación de los suelos expansivos	INV E - 132 - 13	Se realizaron ensayos en consolidómetro bajo una presión vertical de 7 kPa, adicionalmente se evalúa la expansión con límites de consistencia.
Medida del potencial de colapso de un suelo parcialmente saturado	INV E - 157 - 13	Se midió el índice de colapso sobre la muestra inundada a 200 kPa

Tabla 13. Resumen ensayos realizados para la determinación de los índices de expansión y colapso del suelo.

4.8. Determinación del potencial de erodabilidad.

La estructura abierta característica de este tipo de suelos puede condicionar el flujo interno del material, por lo tanto, su potencial de erosión interna. Inicialmente se estimó evaluar cuantitativa y cualitativamente la erodabilidad del material, sin embargo, no hubo disponibilidad del equipo para ejecutar el ensayo “Pinhole” que entregaría una evaluación cuantitativa de esta característica. En consecuencia, se ejecutaron ensayos de doble hidrómetro que brindan una evaluación cualitativa de suelos dispersivos propensos a presentar fenómenos de erosión interna, este ensayo fue realizado siguiendo el procedimiento y parámetros dispuestos en la norma ASTM D4221-90. Dicho ensayo tiene se relaciona muy bien con el ensayo “Pinhole”.

Los resultados obtenidos en este ensayo se comparan con observaciones realizadas durante las visitas a campo, como la presencia de agua turbia proveniente del lavado interno del material de los taludes, evidencia de canales o tubificaciones y algunos otros indicadores de la ocurrencia de este fenómeno que pone en claro riesgo la integridad de la estructura de los taludes.

Como se mencionó anteriormente, la erosión superficial en la zona de estudio es severa a muy severa, esta se observa claramente en la figura 25. En secciones posteriores se muestra la clara relación entre las fallas en taludes y la presencia de erosión superficial acompañada de la mínima presencia de cobertura vegetal.

4.9. Determinación del ángulo máximo de taludes en este tipo de depósitos de suelo.

Una vez determinadas las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, se procede a determinar la pendiente máxima recomendada sobre este tipo de suelos teniendo en cuenta la variabilidad de los datos obtenidos en los ensayos. Para esta tarea se consideró adecuado evaluar distintas configuraciones de taludes, variando el ángulo de inclinación para distintas alturas de

talud, mediante el método estadístico de muestreo de Monte-Carlo, el cual permite realizar un análisis basado en confiabilidad, puesto que, es posible evaluar distintas combinaciones de propiedades como el peso unitario total, el ángulo de fricción interna y la cohesión, para cada una de las configuraciones de talud consideradas.

Este método disminuye la incertidumbre, por lo tanto, brinda una perspectiva más acertada del comportamiento real de taludes y laderas presentes en suelos derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense.

El método se basa en definir un índice de confiabilidad (β) el cual está asociado a una probabilidad de falla, la definición de este valor depende del nivel de seguridad al que se pretenda llegar. Alrededor del mundo β varía en gran medida, Hidalgo y Pacheco (2011) citan el trabajo realizado por USACE (2014), el cual propone una clasificación del nivel de desempeño esperado para distintos valores de índices de confiabilidad y su probabilidad de falla asociada, la tabla 14 muestra lo anterior.

Nivel de desempeño esperado	b	P[r]
Alto	5	3×10^{-7}
Bueno	4	3×10^{-5}
Arriba del promedio	3	10^{-3}
Abajo del promedio	2.5	6×10^{-3}
Pobre	2.0	2.3×10^{-2}
Insatisfactorio	1.5	7×10^{-2}
Peligroso	1.0	1.6×10^{-1}

Tabla 14. Clasificación del nivel de desempeño esperado de acuerdo con índices de confiabilidad objetivo asociados a una probabilidad de falla. Tomado de Hidalgo y Pacheco (2011) quienes citan en trabajo de USACE (2014).

El Código Colombiano de Construcción de Puentes (CCP-14) recomienda un valor de β de 3.5, correspondiente a un nivel de desempeño por arriba del promedio de acuerdo con la tabla

anterior. Para los análisis realizados se toma este valor como el índice de confiabilidad objetivo, con una probabilidad de falla asociada del 0.02%. Cabe aclarar que el índice β representa el número de desviaciones estándar que separan la falla del factor de seguridad esperado (Escobar y Valencia, 2012), entendiendo que la falla ocurre cuando el factor de seguridad es menor a la unidad (figura 29). El índice de confiabilidad β se define como:

$$\beta = \frac{E(FS) - 1}{\sigma(FS)}$$

En donde:

$E(FS)$ Esperanza o valor esperado del factor de seguridad,

$\sigma(FS)$ Desviación estándar del factor de seguridad.

La expresión anterior muestra que existe una función de distribución de probabilidad para el factor de seguridad, así como, existen funciones de distribución de probabilidad para las propiedades mencionadas anteriormente; peso unitario total, ángulo de fricción interna y cohesión. Los análisis realizados asumen una función de distribución de probabilidad normal tanto para las propiedades, es decir, los insumos, como para el factor de seguridad, correspondiente al resultado.

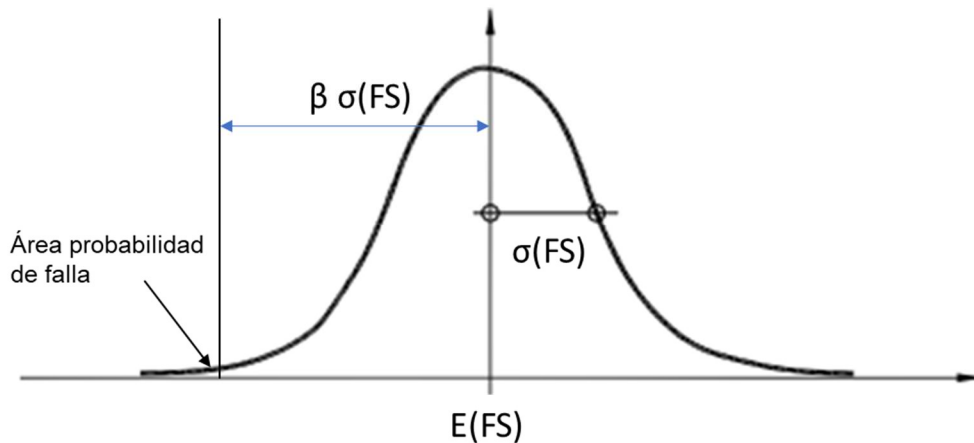


Figura 29. Distribución de probabilidad del factor de seguridad y relación con el índice de confiabilidad β , mayores valores de este representan menores probabilidades de falla.

En consecuencia, para la distribución del factor de seguridad, cuya área corresponde a la unidad, es posible determinar la probabilidad de falla, la cual, en este trabajo debe satisfacer como mínimo un valor de 0.02%.

El análisis de estabilidad de taludes sigue la metodología de equilibrio límite para el mecanismo de falla identificado en campo y el más común para el tipo de suelo de acuerdo con la literatura existente. Se aplican los métodos de “Bishop” simplificado, “Janbu” simplificado y “Janbu” corregido para cada una de las configuraciones de taludes considerada, siguiendo el principio de redundancia en Geotecnia. Esta evaluación fue realizada haciendo uso del software “Slide 2”, debido a que incluye el análisis estadístico o de confiabilidad, así como los métodos de equilibrio límite mencionados.

Adicionalmente, se realizó el análisis para un corte vertical y un talud infinito, en este caso teniendo en cuenta únicamente la variación de la resistencia al corte y manteniendo un valor promedio del peso unitario total. El método determinístico también se empleó para evaluar algunas condiciones, en este únicamente se buscó determinar el factor de seguridad promedio, sin tener en cuenta cual sería la probabilidad de falla asociada.

5. DESARROLLO METODOLÓGICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se desarrolla la metodología expuesta en el capítulo 4, mostrando para cada punto no tratado a profundidad en el capítulo anterior los procedimientos y resultados obtenidos. También se pretende establecer las relaciones de la mineralogía con las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de suelos, con el fin de establecer en qué medida la configuración estructural particular de estos minerales condiciona el comportamiento geotécnico del material.

5.1. Mineralogía

Sobre las muestras mencionadas en la sección (4.3) se aplican técnicas para la determinación de la composición mineralógica, con el objetivo de confirmar el origen de los suelos presentes en el Altiplano. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de Fluorescencia de Rayos X (XRF) y Difracción de Rayos X (XRD) ejecutados sobre 17 muestras pertenecientes a distintas localidades y profundidades; diez (10) correspondientes al perfil Tunja 1 (TJ1); cuatro (4) correspondientes al perfil Tunja 2 (TJ-2); una (1) a la zona del CRIB (Tunja); una (1) a la zona de Green Hills (Tunja); y una (1) a la zona de Ventaquemada.

5.1.1. Resultados del método de fluorescencia de rayos X (XRF)

En la tabla 15, se resumen los resultados obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X, en esta se muestran los mayores elementos constituyentes de las muestras (>1% en peso), se excluyen elementos menores y trazas debido a que no son de importancia para el desarrollo de este trabajo, estos se identifican con un ND (no detectable).

XRF (%)		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn	Ba	Cr	Cu	Ni	Sr	Y	Zr	S	Zn
Perfil 1 - Tunja	TJ1-1	64.67	20.90	9.90	0.100	0.877	0.160	0.650	1.960	0.180	0.086	0.210	0.022	0.010	0.003	0.124	0.002	0.098	0.017	ND
	TJ1-2	59.21	27.30	9.60	1.400	0.259	0.150	0.750	0.949	0.120	0.029	0.120	0.012	0.010	0.003	0.050	0.002	0.031	0.007	0.016
	TJ1-3	58.62	29.00	9.93	0.099	0.165	0.150	0.922	0.726	0.130	ND	0.130	0.016	0.010	0.003	0.057	0.002	0.022	0.007	0.009
	TJ1-4	58.92	28.00	10.70	0.099	0.133	0.150	0.930	0.763	0.120	ND	0.150	0.009	0.010	0.003	ND	0.002	0.028	0.012	0.013
	TJ1-5	64.00	26.40	5.67	0.099	0.065	0.150	1.680	1.480	0.110	ND	0.210	0.024	0.009	0.003	ND	0.002	0.073	0.017	0.025
	TJ1-6	59.17	26.90	9.78	0.099	0.084	2.300	1.030	0.398	0.092	ND	0.089	0.014	0.010	0.003	0.044	0.002	0.017	0.014	0.005
	TJ1-7	58.74	29.20	8.50	1.400	0.155	0.150	1.030	0.555	0.097	ND	0.098	0.008	0.010	0.003	0.045	0.002	0.020	0.009	0.004
	TJ1-8	59.12	30.80	7.90	0.077	0.071	0.150	0.983	0.556	0.095	0.024	0.100	0.009	0.009	0.003	0.048	0.002	0.006	0.011	0.008
	TJ1-9	59.16	33.50	4.75	0.100	0.032	0.160	0.313	1.730	0.076	ND	0.081	0.010	0.010	0.003	ND	0.002	0.030	0.007	ND
	TJ1-10	59.72	27.60	10.35	0.099	0.123	0.150	0.894	0.732	0.130	0.029	0.110	0.017	0.010	0.003	ND	0.002	0.024	0.008	0.009
Perfil 2 - Tunja	TJ2-11	63.50	25.00	8.54	0.099	0.221	0.150	0.441	1.430	0.190	0.113	0.190	0.014	0.010	0.003	ND	0.002	0.045	0.018	ND
	TJ2-12	61.77	27.30	8.37	0.099	0.128	0.150	0.271	1.460	0.130	0.066	0.150	0.011	0.009	0.003	ND	0.002	0.039	ND	0.014
	TJ2-13	61.61	27.20	8.56	0.100	0.136	0.160	0.306	1.450	0.140	0.098	0.140	0.018	0.010	0.003	ND	0.002	0.051	ND	0.015
	TJ2-14	61.84	27.40	8.49	0.099	0.069	0.150	0.208	1.430	0.110	0.054	ND	ND	0.009	0.003	0.084	0.002	0.057	ND	ND
CRIB - Tunja	SIL 2 (CRIB)	64.05	26.20	6.75	0.099	0.316	0.150	0.778	1.060	0.100	0.060	0.220	0.019	0.010	0.003	0.116	0.002	0.037	0.026	0.014
Green Hills - Tunja	SIL 5 (GH)	67.50	24.50	4.87	0.099	0.115	0.150	1.100	1.150	0.140	0.000	0.250	0.020	0.010	0.003	ND	0.002	0.043	0.020	ND
Ventaquemada	SIL 7 (VQ)	61.50	27.70	7.78	0.100	0.354	0.160	0.689	1.260	0.180	0.045	0.130	0.009	0.010	0.003	ND	0.004	0.027	0.010	0.015

ND - No detectable

Tabla 15. Resultados del análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF). Se observan mayores cantidades de óxidos de Aluminio, Hierro y Titanio, sobre óxidos de Calcio, Sodio y Potasio. Estos resultados también fueron usados para la calibración del ensayo de XRD. Fuente propia.

Los resultados muestran que predominan elementos mayores como óxidos de aluminio, hierro y titanio sobre óxidos de calcio, sodio y potasio, por lo tanto, y como lo menciona Jaramillo et al. (2005), se puede clasificar este tipo de suelos como oxisoles, cuyo ambiente de formación dista de las condiciones ambientales que presenta el altiplano, caracterizadas por un clima frío y seco. Por otro lado, estos resultados sirven para la calibración de la técnica de análisis de difracción de rayos X (XRD).

5.1.2. Resultados del método de difracción de rayos X (XRD)

Los difractogramas obtenidos se procesan a través de un software especializado el cual permite realizar la identificación de la mineralogía presente en los especímenes ensayados. En la tabla 16 se presenta el resumen de los resultados obtenidos y en la figura 30 se muestran algunos de los difractogramas pertenecientes a las muestras procesadas, en el documento de anexos se presenta la totalidad de los difractogramas para cada uno de los especímenes.

XRD (%)		Quarzo	Caolinita	Cristobalita	Anatasa	Meta-haloisita	Plagioclasa	Hematita	Montmorillonita	Muscovita 1M	Hornblenda	Feldespato potásico
Perfil 1 - Tunja	TJ1-1	58.77	25.88	1.84	1.55	8.84	3.13					
	TJ1-2	14.52	48.86	2.68	1.24	32.71						
	TJ1-3	4.67	48.39	3.04	1.56	41.10		1.24				
	TJ1-4	57.85	26.48	1.98	1.70	0.23			3.67	5.56		2.54
	TJ1-5	4.91	60.92	2.54	0.87	29.82		0.93				
	TJ1-6	7.25	65.53	3.06	0.10	17.55			6.50			
	TJ1-7	7.62	70.85	3.63	1.26	15.29		1.34				
	TJ1-8	6.83	74.20	3.31	1.15	14.51						
	TJ1-9	3.84	85.04	4.13	0.65	6.34						
	TJ1-10	14.85	65.93	2.90	1.31	14.01		1.00				
Perfil 2 - Tunja	TJ2-11	39.64	45.45	4.09	1.12	9.70						
	TJ2-12	36.53	48.08	3.45	1.43	9.95		0.54				
	TJ2-13	16.75	71.53	3.39	1.05	6.94		0.34				
	TJ2-14	17.81	70.73	2.49	1.58	6.94		0.45				
CRIB - Tunja	SIL 2 (CRIB)	29.51	33.21	3.79	0.86	27.96						4.67
Green Hills - Tunja	SIL 5 (GH)	57.07	26.72	2.01	1.67	0.09			1.63	10.81		
Ventaquemada	SIL 7 (VQ)	42.17	38.92	3.29	3.15	0.76	5.82				5.89	

Tabla 16. Resultados del análisis de Difracción de Rayos X. Se resalta la presencia de Halloysita y Cristobalita como unos de los principales constituyentes de las muestras, ambos son indicadores de un suelo derivado de cenizas volcánicas. Fuente propia.

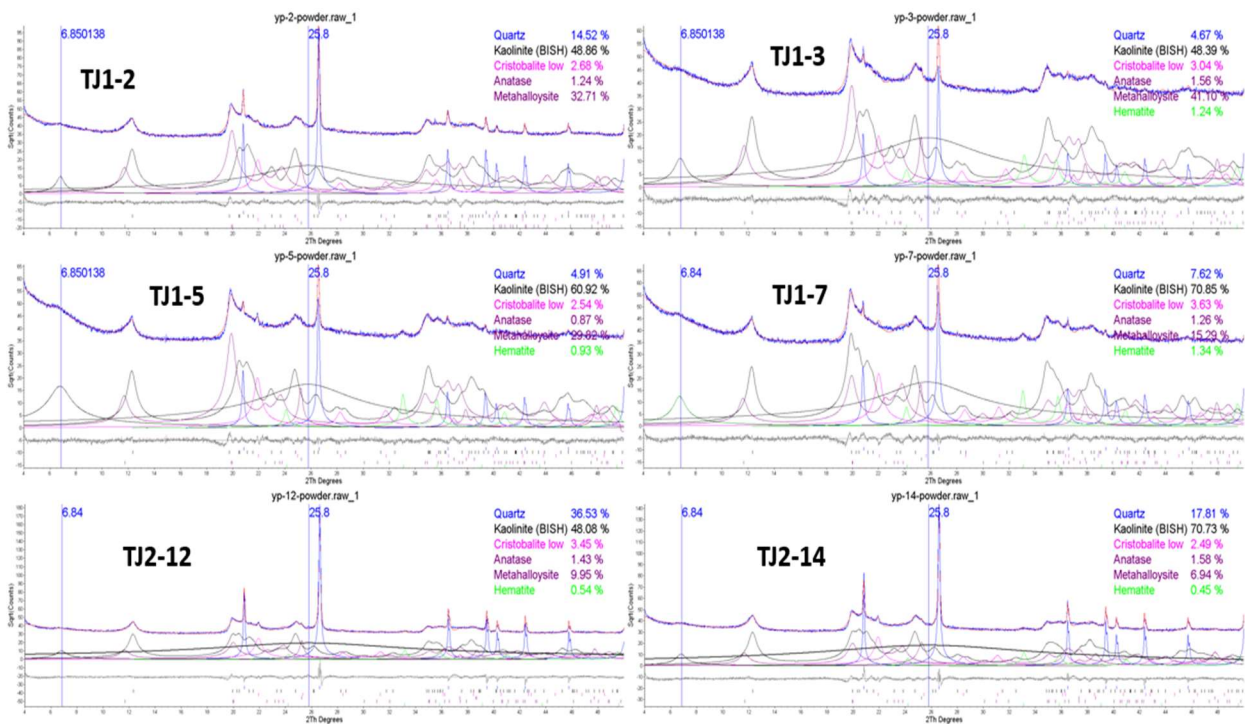


Figura 30. Difractogramas obtenidos sobre las muestras 2, 3, 5 y 7 del perfil Tunja 1 (TJ1) y sobre muestras 12 y 14 del perfil Tunja 2 (TJ2) analizados por el método de Reitveld. Fuente Propia.

Cabe anotar que el análisis de los difractogramas requiere de personal altamente capacitado, puesto que la composición mineralógica de la Caolinita es muy similar a la de la

Halloysita 7 Angstrom o Meta halloysita, por lo que es necesario aplicar metodologías específicas que permitan diferenciar el comportamiento de cada una, por esto, el análisis fue realizado por personal de GMAS SAS.

La Halloysita es considerada como un polimorfo hidratado de la Caolinita, en este, las láminas presentan una curvatura y el espacio interlamilar puede contener moléculas de agua o no. Un espaciado basal de 1 nm (10 Å) y de 0.72 nm (7 Å) corresponden a la halloysita hidratada y deshidratada respectivamente, conociéndose esta última como meta halloysita o halloysita 7 angstrom (Carrillo et al., 2014). Este mineral puede presentar morfologías muy diversas, ya sean, esferas, tubos o placas, sin embargo, la forma tubular alargada presenta una mejor cristalización, por lo tanto, es la morfología comúnmente encontrada. Carrillo et al. (2014) realizan una caracterización estructural de un mineral de arcilla tipo halloysita tomado en el sector de Mondoñedo, municipio de Mosquera, departamento de Cundinamarca, Colombia. Mediante imágenes de microscopía electrónica de transmisión (TEM) e identificación con análisis de XRF y XRD caracterizan la meta halloysita de Mondoñedo. Se espera que la morfología de la halloysita 7 Å analizada en este estudio corresponda a nanotubos, partiendo del hecho de que Mondoñedo se ubica sobre la Cordillera Oriental y hace parte del Altiplano Cundiboyacense, sin embargo, esto debe ser comprobado en estudios posteriores debido a que en el presente trabajo no hubo disponibilidad del equipo de TEM como se estimó en un principio.

La figura 31, expone la morfología y estructura atómica de la halloysita nano tubular, en el caso de meta halloysita no hay moléculas de agua en su estructura, adicionalmente se presentan las imágenes de TEM obtenidas de la halloysita de Mondoñedo mencionada anteriormente.

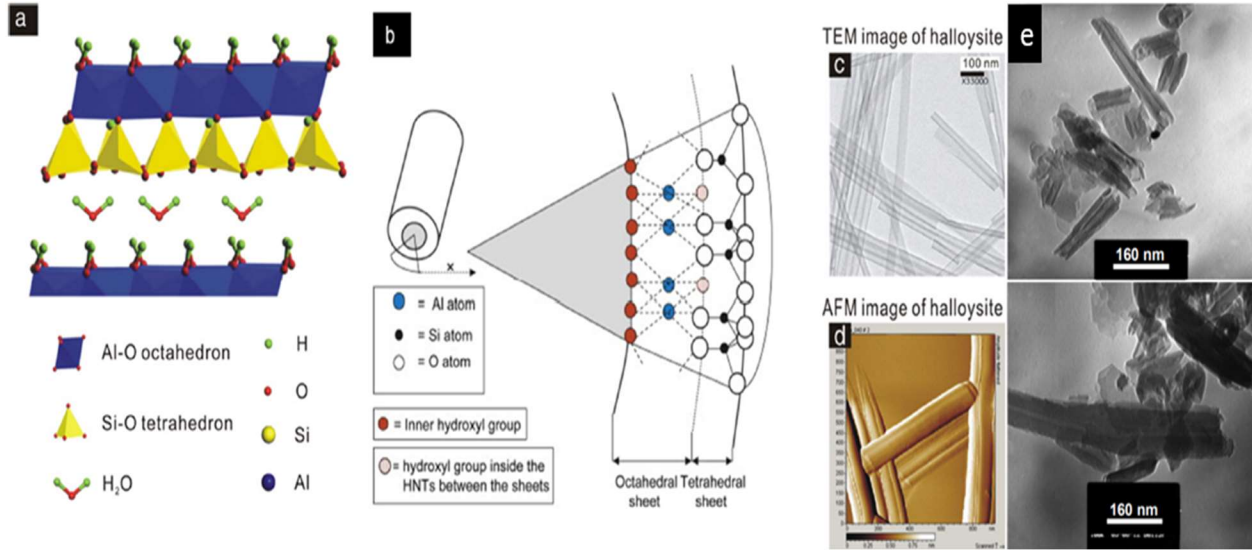


Figura 31. Estructura mineral de la halloysita; a) y b) estructura atómica de la halloysita; c) imágenes obtenidas de TEM de los nanotubos de halloysita; d) imágenes obtenidas de AFM (Microscopio de Fuerza Atómica) de nanotubos de halloysita; e) Imágenes obtenidas de microscopio electrónico de transmisión (TEM) que muestran la morfología correspondiente a nanotubos de meta halloysita colombiana (Mondoñedo, Cundinamarca, Colombia). a), b), c) y d) tomado de Massaro, Noto y Riela (2020), e) tomado de Carrillo et al. (2014).

En la totalidad de las muestras analizadas en este trabajo hay presencia de meta halloysita, mineral típico de suelos derivados de cenizas volcánicas, proveniente de la alteración inicial de vidrio volcánico y posteriormente de la alófana e imogolita. Además, se identificó Cristobalita, que, de acuerdo con el estudio general de suelos y zonificación de tierras elaborado por el IGAC (2005) es un indicador de cenizas volcánicas.

Conforme a los resultados obtenidos en los análisis de XRF y XRD es claro que los suelos depositados en el Altiplano Cundiboyacense son suelos derivados de cenizas volcánicas, con espesores considerables, teniendo en cuenta la profundidad de algunas de las muestras. Su origen se asocia a la importante actividad volcánica en la región y su fuente puede atribuirse tanto al volcán de Paipa, estudiado por Jaramillo et al. (2005), como a volcanes más antiguos no identificados aún.

5.2. Propiedades índice

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos que se consideró necesarios para determinar las propiedades físicas del material, de acuerdo con los criterios de clasificación del USCS, reconocido como el más adecuado para clasificar este tipo de suelos.

5.2.1. Granulometría

Sobre dos (2) muestras seleccionadas de la localidad de Tierra Negra (imagen 13) se realiza el ensayo de granulometría, la muestra se deja secar al aire, siguiendo lo especificado en las normas INV E – 123 e INV E – 106. Al realizar el tamizado se evidencia que el material en su totalidad pasa el tamiz No. 10 (2 mm), por lo tanto, se realiza análisis granulométrico mediante lecturas de hidrómetro (151 H).



Imagen 13. Muestras del sector de Tierra Negra para análisis granulométrico por hidrómetro. Estas se seleccionan debido a la presencia de un evidente agrietamiento que impide la ejecución de ensayos mecánicos. Se dejan secar al aire, su totalidad pasa el tamiz No. 10.

El agente dispersante utilizado para la preparación de la solución es hexametáfosfato de sodio en las proporciones indicadas por la norma INV E – 123, asimismo, debido a que el material es predominantemente arcilla, se disponen 50 g de muestra para cada ensayo. También se realizan

ensayos de hidrometría sin agente dispersante, con el fin de obtener cualitativamente el potencial de dispersión del material (ensayo de doble hidrómetro), tema que será tratado más adelante.

El proceso de preparación se presenta en las imágenes 14 y 15, se disponen cuatro muestras; M1, con agente dispersante y agitación mecánica; M2, con agente dispersante y agitación mecánica; M3, sin agente dispersante y sin agitación mecánica; M4, sin agente dispersante y con agitación mecánica. En consecuencia, las muestras M1 y M2 son de interés para la distribución granulométrica de las partículas considerada en este punto.

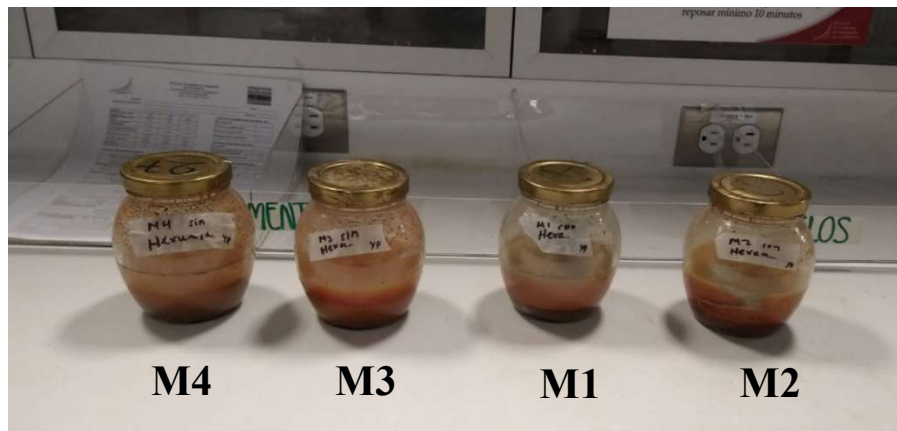


Imagen 14. Preparación de la muestra en agente dispersante (hexametáfosfato de sodio) durante un día. Para análisis granulométrico se toman las muestras M1 y M2.

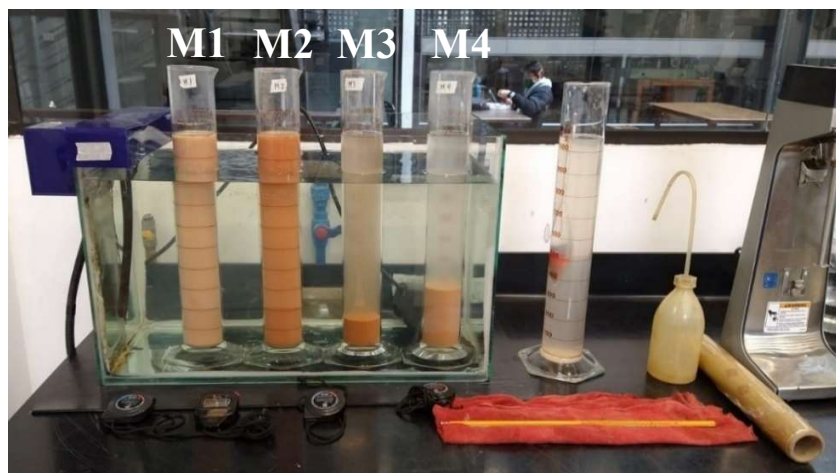


Imagen 15. Proceso de sedimentación de las partículas en probetas, las muestra M1 y M2 presentan similitud en la sedimentación.

Las curvas de distribución de tamaños de partículas para las muestras M1 y M2 (con agente dispersante) se presentan en la figura 32. Después de haber obtenido los datos para las 24 horas del proceso de sedimentación, se puede observar por las tendencias de las curvas que el porcentaje que pasa el tamaño de partículas de 0.002 mm (2 μm) está entre 80% y 100%, además, se puede evidenciar que el porcentaje que pasa el tamaño de partículas de 0.001 mm (1 μm) llegaría a ser superior al 50%, en consecuencia, el material es franco arcilloso, con gran cantidad de partículas de tamaño coloidal. Condición que lleva a una alta superficie específica, típica en suelos derivados de cenizas volcánicas con alto grado de alteración (halloysita puede llegar a valores tan altos como 400 m^2/g).

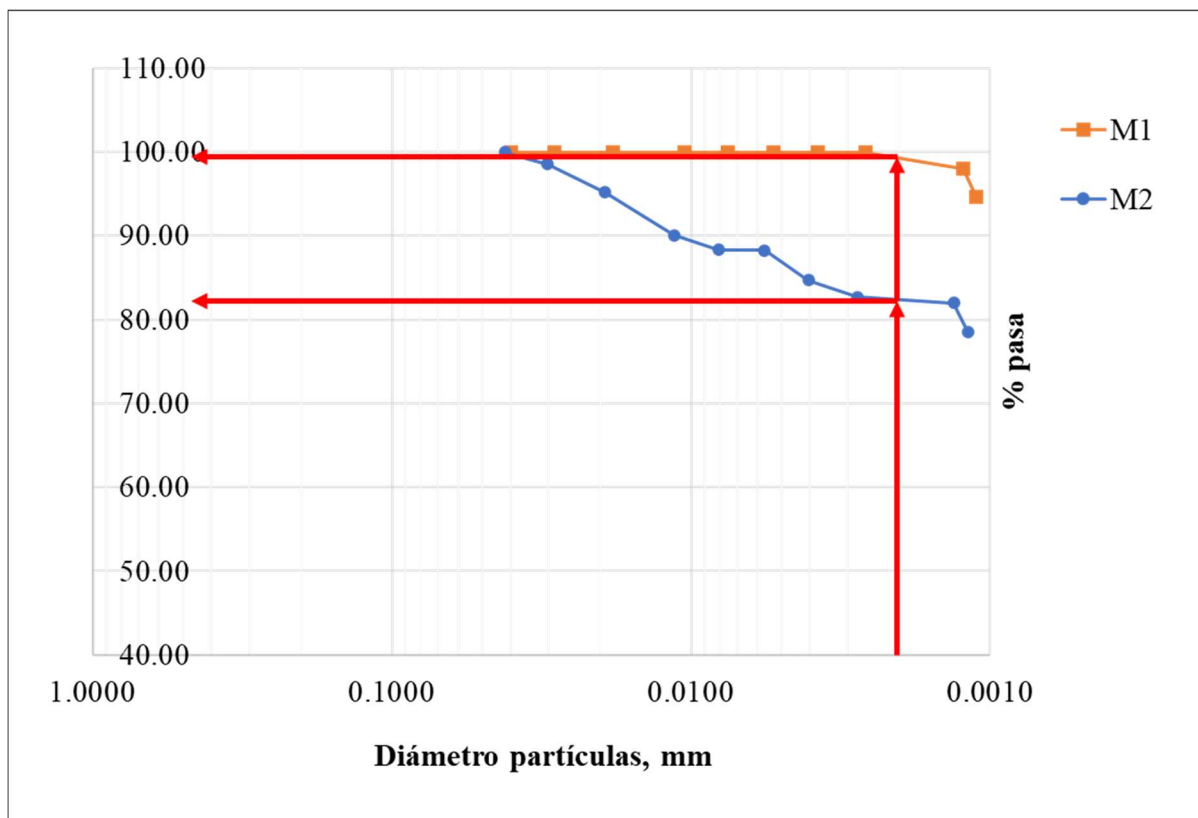


Figura 32. Distribución granulométrica de las muestras tomadas en Tierra Negra, material derivado de cenizas volcánicas. Porcentaje que pasa el tamaño de partícula de 0.002 mm está entre el 80% y 100%, el material se puede considerar como franco arcilloso, asociado a un alto grado de meteorización.

Las curvas granulométricas de las muestras M3 y M4 serán tratadas más adelante en la evaluación de la dispersividad de las partículas presente en el material mediante el ensayo de doble hidrómetro (ASTM D 4221-90).

5.2.2. Límites de Atterberg

La presencia de minerales de arcilla como la halloysita, cuya morfología típica corresponde a nanotubos alargados huecos, con tendencia a formar agregaciones y que pueden generar una porosidad dual (descrita en el capítulo 3), se ven afectadas por ciclos de humedecimiento y secado en el suelo. Con esto, la consistencia del material varía de acuerdo con las condiciones de humedad inicial, comportamiento estudiado por Nanzyo et al. (1993), Herrera (2006) y Lizcano et al. (2006). Los ensayos se realizan bajo las normas INV E – 125 para límite líquido e INV E – 126 para límite plástico e índice de plasticidad.

5.2.2.1. *Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad*

Para evaluar el comportamiento mostrado en la figura 9 (capítulo 3) se realizan ensayos de límites líquido y plástico sobre muestras en su humedad natural y sobre muestras cuya humedad inicial cambió mediante distintos ciclos de secado. Las muestras ensayadas y la descripción del procedimiento realizado previo al ensayo se presentan en la tabla 17.

En la imagen 16, se presenta parte del proceso llevado a cabo para la determinación del límite líquido, límite plástico y con estos el índice de plasticidad sobre las muestras tomadas en distintas localidades, algunas de ellas afectadas bajo ciclos de secado.



Imagen 16. Ensayo límite líquido sobre muestras alteradas e inalteradas: A1 y A2) Muestra 4 (Tierra Negra): hidratación y muestra seca límite líquido; B1 y B2) Muestra 4 (SIL): secada al aire y ejecución ensayo en cazuela Casagrande; C1 y C2) Muestra 6 (SIL): ejecución ensayo límite líquido y plástico e hidratación muestra.

Ensayo No.	Muestra No.	Descripción material
1	3 - Tierra Negra	Arcilla gris rojiza, material franco arcilloso, de humedad baja y consistencia media a blanda. Material con humedad inicial sin cambiar, es decir, ensayado con humedad natural.
2	3 - Tierra Negra	Ensayado con humedad natural, al secarse presenta coloración rojiza oscura, similar a laterita.
3	3 - Tierra Negra	Muestra con variación en la humedad inicial, permaneció en el horno a 110°C durante 4 horas. Presenta dificultad en la hidratación, resultados del ensayo no son concluyentes.
4	3 - Tierra Negra	Muestra con un cambio en la humedad inicial, permaneció en el horno durante 48 horas. Presenta dificultad en la hidratación.

Ensayo No.	Muestra No.	Descripción material
5	4 - Tierra Negra	Arcilla gris amarillento con trazas rojas, material franco arcilloso, se cambia la humedad inicial para el ensayo, secada al horno durante 24 horas, posteriormente secada al aire durante 1 semana. La humedad inicial fue de 5.82%.
6	5 - SIL (Green Hills)	Muestra secada al aire durante 3 días (72 horas), proveniente del tallaje de la muestra 4 para triaxial No. 2. Cambia la humedad inicial, $w_o = 8.12\%$.
7	6 - Tierra Negra	Muestra secada al horno durante 24 horas y posteriormente secada al aire durante 1 semana (168 h), la muestra corresponde al horizonte de transición orgánico, alta presencia de raíces. Presenta dificultades en la hidratación, color café amarillento, después del secado presenta tonalidad amarillo rojizo. Cambia la humedad inicial, $w_o = 21.62\%$.
8	4 - SIL (Green Hills)	Proveniente del tallaje de la muestra 4 (SIL - Green Hills, Tunja), se deja secando al aire durante (96 horas), inicialmente presenta color gris rojizo, posterior al secado, presenta tonalidad laterítica (rojizo), su dureza aumenta considerablemente con el secado al horno. Cambia la humedad inicial, $w_o = 9.22\%$.
9	6 - SIL (CRIB)	Humedad natural de la muestra sin cambiar, difícil manejo, color gris amarillento.
10	6 - SIL (CRIB)	Muestra con cambio en su humedad natural, secada al horno a 110 °C durante un día, muestra seca proveniente de ensayo 9.
11	8 - SIL (Ventaquemada)	Muestra sin cambiar humedad natural (59.82%), proveniente de muestra 8 (SIL), color negro (similar a turba). La muestra presenta una difícil hidratación.
12	8 - SIL (Ventaquemada)	Muestra sometida a cambio en la humedad inicial, secada al horno a 110° C completamente durante dos días, proveniente de muestra 8 (SIL), color negro (similar a turba). La muestra presenta una difícil hidratación.
13	2 - TJ1 - V2	Muestra ensayada a humedad natural, no se somete a ciclos de secado previo a la ejecución del ensayo.
14	3 - TJ1 - V2	Muestra ensayada a humedad natural, no se somete a ciclos de secado previo a la ejecución del ensayo.
15	7 - Tierra Negra - V2	Muestra ensayada a humedad natural, no se somete a ciclos de secado previo a la ejecución del ensayo.

Tabla 17. Muestras para ensayos límites de consistencia de los suelos en distintas localidades del Altiplano Cundiboyacense y bajo distintas condiciones de humedad; ensayadas a humedad natural o afectada por ciclos de secado.

La mayoría de las muestras que fueron sometidas a ciclos de secado, se presentó dificultad en la hidratación y manipulación, generando, como en el caso de la muestra tres (3) tomada en Tierra Negra, valores no concluyentes; de los 16 ensayos realizados, dos (2) de ellos presentaron este comportamiento, uno de estos no se incluye en los resultados acá presentados debido a la incoherencia en el resultado, en la tabla 18 se resumen los valores obtenidos.

Ensayo No.	Muestra No.	Estado	wo	LL	IP	USCS
1	3 - Tierra Negra	Wo NATURAL	73.84%	108	60	MH
2	3 - Tierra Negra	Wo NATURAL	71.87%	106	50	MH
3	3 - Tierra Negra	CAMBIO Wo	3.00%	101	44	MH
4	3 - Tierra Negra	CAMBIO Wo	0.00%	57	23	MH
5	4 - Tierra Negra	CAMBIO Wo	5.82%	63	24	MH
6	5 - SIL (Green Hills)	CAMBIO Wo	8.12%	45	31	CL
7	6 - Tierra Negra	CAMBIO Wo	21.62%	94	37	MH
8	4 - SIL (Green Hills)	CAMBIO Wo	9.22%	38	26	CL
9	6 - SIL (CRIB)	Wo NATURAL	35.09%	82	50	CH
10	6 - SIL (CRIB)	CAMBIO Wo	0.00%	55	26	CH
11	8 - SIL (Ventaquemada)	Wo NATURAL	59.82%	93	47	MH
12	8 - SIL (Ventaquemada)	CAMBIO Wo	0.00%	49	15	ML
13	2 - TJ1 - V2	Wo NATURAL	3.10%	29	7	CL
14	3 - TJ1 - V2	Wo NATURAL	23.00%	97	64	CH
15	7 - Tierra Negra - V2	Wo NATURAL	80.10%	126	90	CH

Tabla 18. Resultados ensayos límites de Atterberg sobre muestras tomadas en distintas localidades del Altiplano Cundiboyacense sobre la zona de estudio especificada, para distintos contenidos de humedad inicial. En la tabla wo es la humedad inicial del ensayo, LL es el límite líquido e IP es el índice de plasticidad.

En la figura 33, se observan evidentes cambios en el comportamiento del material ante ciclos de secado y humedecimiento; los marcadores triangulares corresponden a muestras ensayadas a humedad natural y los marcadores circulares a aquellas expuestas a procesos de secado, es decir, con un cambio en la humedad natural del espécimen. En general, las muestras en estado inalterado se clasifican como MH o CH (USCS), con límite líquido e índice de plasticidad promedio iguales a 92 y 49 respectivamente. Las muestras en estado alterado presentan

disminuciones considerables en sus límites de consistencia, con límite líquido e índice de plasticidad promedio de 57 y 26 respectivamente, lo que implica una disminución del 37% del límite líquido (equivalente a una variación de 34 puntos) y de 47% para índice de plasticidad (equivalente a una variación de 23 puntos). Por lo tanto, la clasificación general del material expuesto a secado (bajo diferentes modalidades) es ML o CL. Esto significa que pasa de un material de alta a uno de baja plasticidad; variación que condiciona en gran medida el comportamiento físico y mecánico del suelo en aplicaciones ingenieriles como la estabilidad de taludes (posible aumento en la resistencia al corte y disminución en la compresibilidad). Este comportamiento también se reporta en suelos presentes en Nueva Zelanda (Jacquet, 1987), cuyos principales minerales constituyentes son la halloysita, caolinita y alófana (no cristalino), muy similar al que muestran los resultados obtenidos en el presente estudio.

Con este procedimiento también se verifica si el material puede clasificarse como orgánico (INV E – 181). Teniendo en cuenta las muestras secadas al horno se puede observar una relación promedio entre el límite líquido después del secado y antes de este de 58%, que es menor al 75% reportando en la norma, entonces, el material puede clasificarse como inorgánico.

Sobre las muestras 4 (SIL), 5 (SIL) y 6 (Tierra Negra), los ensayos se realizan únicamente alterando su humedad inicial, con el fin de verificar el comportamiento; las dos primeras se clasifican como CL y la última como MH. Cabe resaltar que la muestra 6 (Tierra Negra) corresponde a un horizonte de transición orgánico, por lo que, la presencia de raíces y materia orgánica afectan drásticamente el comportamiento, debido a esto, el material mantiene su plasticidad inicial. A pesar de esto, este valor se tuvo en cuenta en el promedio presentado anteriormente.

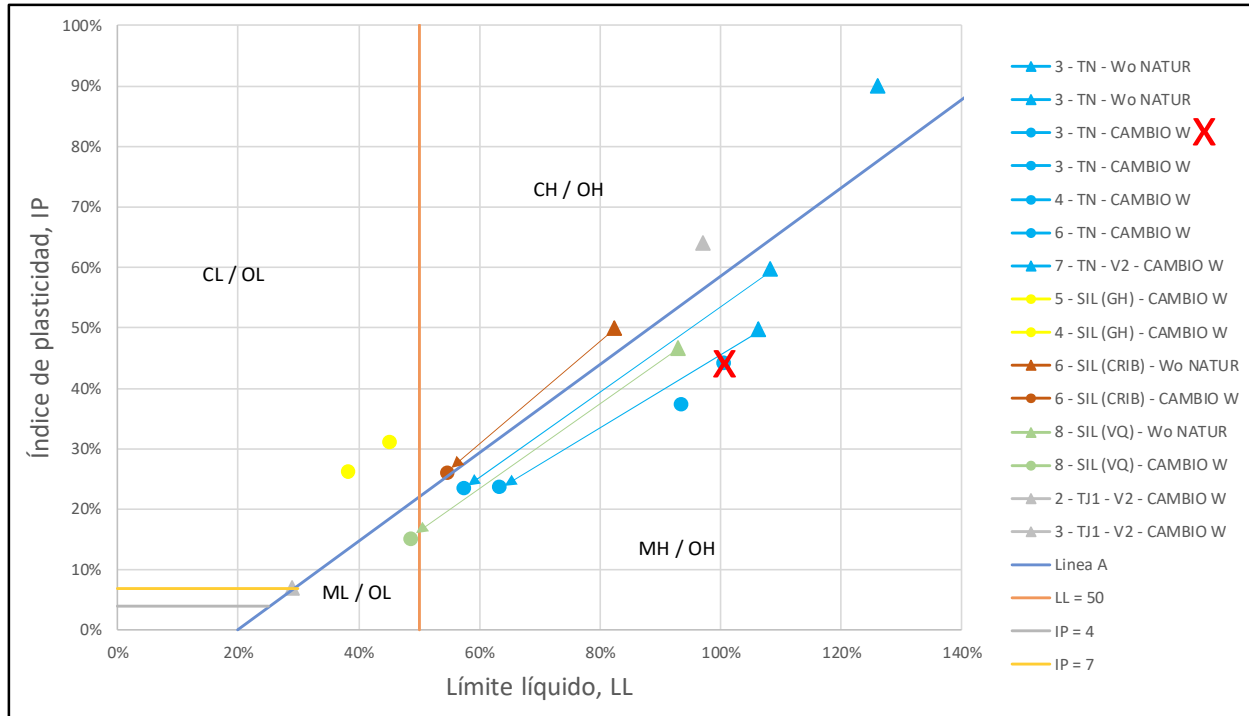


Figura 33. Carta de plasticidad para la clasificación de muestras; material secado es representado con puntos y material inalterado con triángulos, se diferencian con colores las distintas zonas de exploración sobre el altiplano. Se observan cambios significativos en el comportamiento del material expuesto a ciclos de secado y humedecimiento; disminución promedio aproximada de 41% en el límite líquido y 43% en índice de plasticidad, por lo que pasa de un material de alta plasticidad a uno de media a baja.

5.2.3. Otros ensayos de caracterización

A continuación, se presentan los resultados y la información previamente suministrada con relación a algunas de las principales propiedades físicas del material de estudio y que pueden ser comparadas con las propiedades presentadas en la tabla 2 (capítulo 3).

5.2.3.1. Humedad natural

- Perfil Tunja 1

En la tabla 19 se presentan los contenidos de humedad para el talud muestreado en esta localización, únicamente se presentan los valores correspondientes a las muestras tomadas en la

visita No.1, se recalca que estas fueron embaladas en bolsas selladas para conservar el contenido de humedad natural.

Muestra No.	w (%)	Prof. (m)
1	11.20%	0
2	26.88%	1.41
3	41.30%	1.74
4	14.03%	1.74
5	41.83%	2.15
6	73.05%	2.15
7	44.82%	2.15
8	49.52%	6.58
9	19.85%	6.74
10	31.22%	6.84

Tabla 19. Contenidos de humedad natural perfil Tunja 1, visita 1.

En la figura 34 se presenta la variación de la humedad con la profundidad, se descartan los valores correspondientes al material que cubre superficialmente el talud.

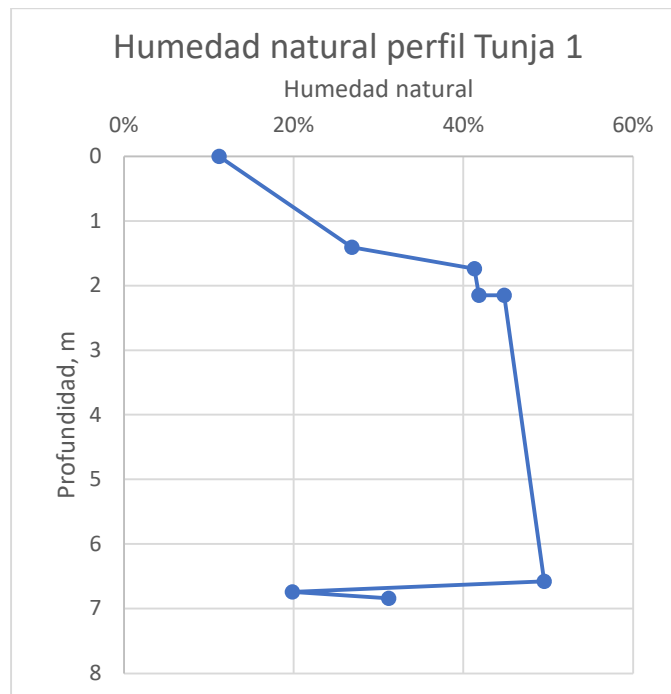


Figura 34. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil Tunja 1.

- Perfil Tunja 2

El resumen de los resultados y la variación del contenido de humedad con la profundidad se presentan en la tabla 20 y figura 35, respectivamente. Se debe tener en cuenta que este talud fue muestreado superficialmente, presentaba desecación y agrietamiento prolongado.

Muestra No.	w (%)	Prof. (m)
11	13%	0.45
12	11%	0.90
13	8%	1.35
14	12%	1.80

Tabla 20. Contenidos de humedad natural perfil Tunja 2

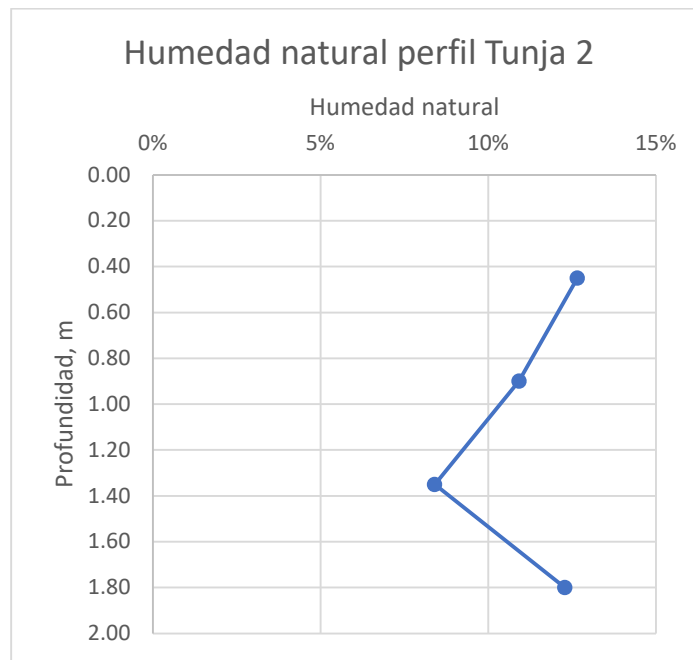


Figura 35. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil Tunja 2

- Tierra Negra

Debido a que las muestras fueron tomadas superficialmente en puntos cercanos (para las visitas No.1 y No.2), no es posible establecer un perfil de variación del contenido de humedad con la profundidad. Por otro lado, en la visita No. 1 el muestreo se desarrolló en un día lluvioso lo que

pudo afectar considerablemente los resultados obtenidos. El contenido de humedad promedio determinado para este material es de 75%.

- Tunja y Ventaquemada (SIL)

La empresa Servicios de Ingeniería LTDA, suministró para cada una de las localizaciones, los valores de humedad natural obtenidos en ensayos realizados en su laboratorio. A continuación, se presenta dicha información para las distintas localidades.

- Zona puente peatonal CRIB, suroriente Tunja

En la tabla 21 se presentan los contenidos de humedad obtenidos, y en la figura 36 la variación de estos con respecto a la profundidad.

Ubicación Profundidad (m)	Zona puente peatonal CRIB - Tunja Contenido de humedad (%)
1.60	14.78%
2.20	31.99%
4.20	41.70%
5.90	44.15%
7.40	47.84%
9.70	45.71%
10.50	42.75%
12.10	35.08%
12.70	35.10%
14.10	30.77%
17.00	29.43%
20.90	30.40%
22.70	34.30%
24.30	38.16%
25.50	39.87%

Tabla 21. Contenidos de humedad perfil de suelo zona puente peatonal CRIB - Tunja

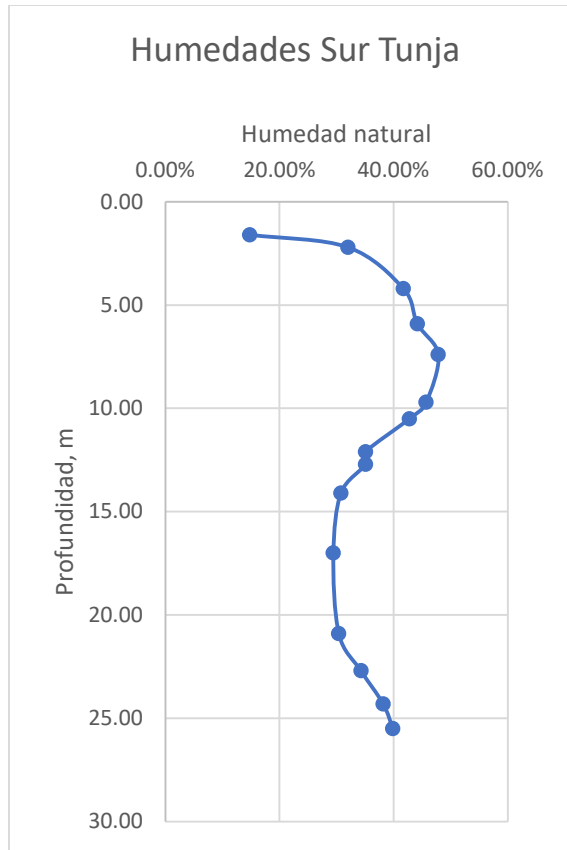


Figura 36. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil zona puente peatonal CRIB – Tunja, información suministrada por SIL (Tunja).

- Zona Green Hills, nororiente de Tunja

Los resultados obtenidos por SIL se presentan a continuación.

Ubicación Profundidad (m)	Cercanías Green Hills - Tunja Contenido de humedad (%)
0.10	12.05%
0.50	8.67%
0.80	10.76%
1.50	14.05%
2.20	15.62%
3.20	13.43%
3.70	10.43%
4.20	12.12%
4.70	16.33%
5.70	21.26%
6.70	14.96%

Ubicación Profundidad (m)	Cercanías Green Hills - Tunja Contenido de humedad (%)
7.50	15.21%
9.00	25.79%
10.70	22.73%
12.70	16.17%
13.70	20.25%
14.20	23.00%
15.00	17.73%
15.70	15.11%
16.40	22.24%

Tabla 22. Contenidos de humedad perfil de suelo zona Green Hills – Tunja

En la tabla 22, se puede observar los valores, en negrilla, correspondientes a las muestras suministradas y que posteriormente se verifican.

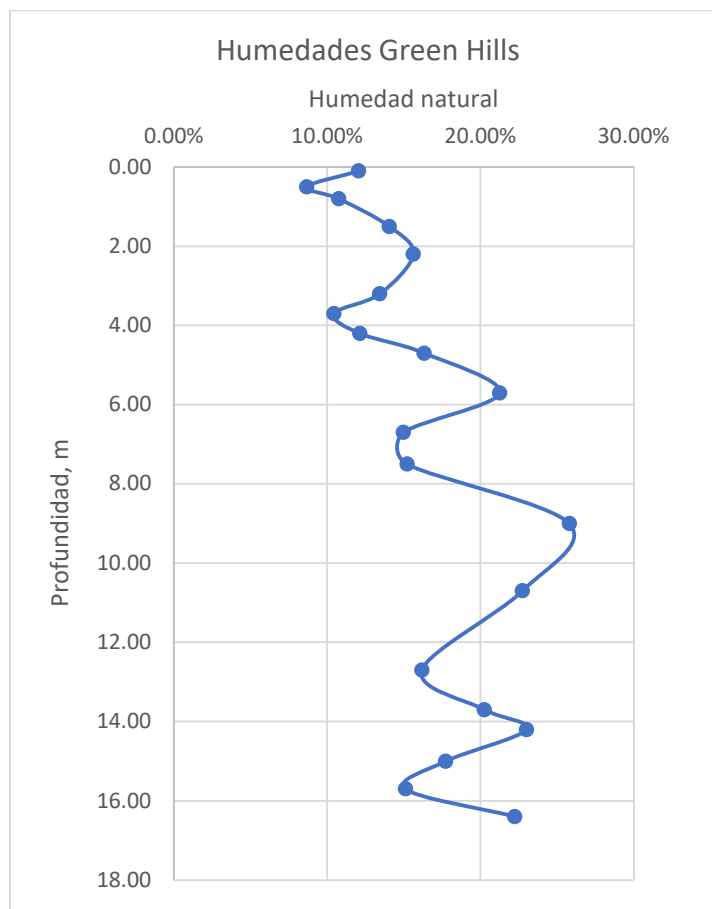


Figura 37. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil zona Green Hills – Tunja, información suministrada por SIL (Tunja).

- Ventaquemada

Se presentan los datos suministrados por SIL en la tabla 23 y figura 38.

Ubicación Profundidad (m)	Ventaquemada Contenido de humedad (%)
0.70	13.01%
1.80	21.95%
2.30	18.60%
3.20	11.54%
3.80	11.84%
4.40	10.43%
5.20	14.05%
6.30	11.23%
7.20	41.11%
8.70	55.65%
10.20	47.57%
11.30	42.80%
12.20	44.43%
13.20	51.66%
14.70	35.70%

Tabla 23. Contenidos de humedad perfil de suelo Ventaquemada, Boyacá.

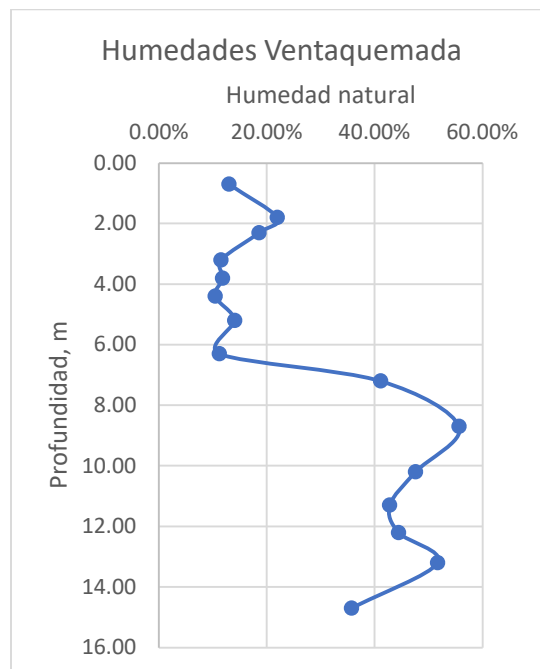


Figura 38. Variación del contenido de humedad con la profundidad, perfil zona Ventaquemada, Boyacá, información suministrada por SIL (Tunja).

Los datos anteriores se verifican con ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, encontrando algunas diferencias significativas, las cuales pueden atribuirse a que las muestras pasaron tiempos considerables entre su extracción y el suministro por parte de SIL para el desarrollo del presente trabajo. El error estimado se evidencia en la tabla 24.

Muestra No.	w (%)	Profundidad (m)	w SIL (%)	Error (%)
4 (SIL)	19.55%	2.50 - 3.00	14.53%	26%
5 (SIL)	14.21%	6.50 - 7.00	15.09%	6%
6 (SIL)	36.69%	12.00 - 12.50	35.09%	4%
7 (SIL)	48.50%	1.00 - 1.50	20.28%	58%
8 (SIL)	59.82%	1.80 - 2.30	17.48%	71%

Tabla 24. Variación humedad por almacenamiento sobre muestras SIL

Por lo anterior, los contenidos de humedad que se tendrán en cuenta corresponden a los valores dados por SIL.

En general, la humedad natural del material se encuentra en un rango que oscila entre el 20% y 40%; humedades significativamente bajas a las reportadas por otros autores sobre depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas en Colombia. En la figura 39, se presenta una comparación de los contenidos de humedad determinados en este estudio y algunos reportados en la literatura sobre suelos derivados de cenizas volcánicas.

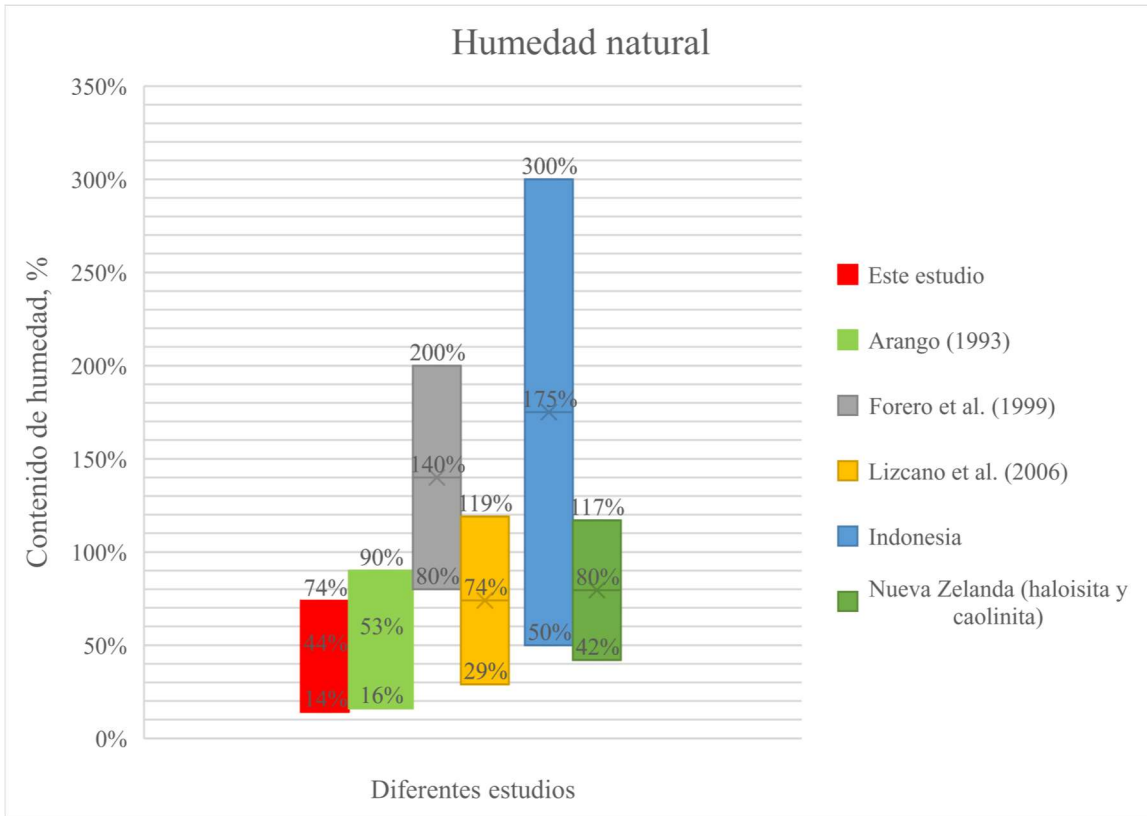


Figura 39. Comparación de las humedades naturales obtenidas en este estudio con aquellas reportados en la literatura para suelos derivados de cenizas volcánicas.

5.2.3.2. Gravedad específica, G_s

La determinación de G_s de las partículas sólidas del suelo se realiza siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E – 128, específicamente el método A, por la vía húmeda, obligatorio para suelos tropicales y aquellos que contenga halloysita, como en este caso.

La tabla 25, presenta los resultados obtenidos del ensayo, valores que serán discutidos posteriormente, adicionalmente en la imagen 17 se presenta parte del procedimiento llevado a cabo en el ensayo.

Ensayo No.	Muestra	G_s
1 y 2	Tierra Negra - No. 5	2.47
3 y 4	TJ-1 No. 4	2.46
5 y 6	TJ-1 No. 5	2.20
7 y 8	TJ-1 No. 9	2.65

Ensayo No.	Muestra	Gs
9 y 10	TJ-2 No. 14	2.70
11 y 12	TJ-1 No. 6	2.28
Promedio		2.46

Tabla 25. Resultados ensayo gravedad específica con picnómetro muestras tomadas sobre el Altiplano Cundiboyacense

Durante la ejecución de los ensayos, particularmente en la muestra 2 (Tierra Negra) se observó la presencia de raíces.



Imagen 17. Procedimiento para la ejecución del ensayo de gravedad específica de las partículas sólidas (Gs); A) instrumentos necesarios para el desarrollo del ensayo; B) preparación de la lechada, se usa vaso de dispersión para homogeneizar la mezcla; C) lechada puesta en picnómetro previo a la extracción de aire; D) configuración bomba de vacío para la extracción de aire al interior de la mezcla dispuesta en el picnómetro de 500 mL; E) medición de masa de picnómetro con suelo y agua; F) y G) medición de masa de suelo proveniente de mezcla en picnómetro, secada al horno a 110 °C durante aproximadamente 24 horas.

La figura 40, compara los resultados obtenidos en este estudio con aquellos reportados en la literatura para suelos derivados de cenizas volcánicas.

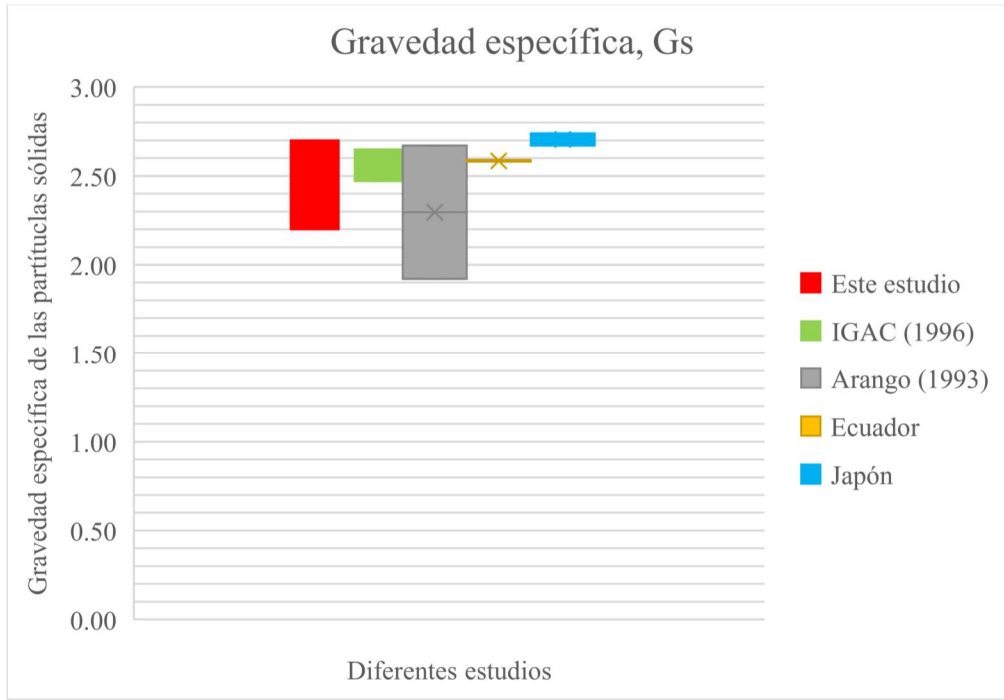


Figura 40. Comparación gravedad específica de las partículas sólidas (Gs) obtenida en este estudio con valores en la literatura para suelos derivados de cenizas volcánicas.

Los valores obtenidos se encuentran en el rango típico de gravedad específica para los suelos derivados de cenizas volcánicas (tabla 26), coherente con el origen de los depósitos de suelo sobre el Altiplano Cundiboyacense.

Tipo de suelo	Gs
Cenizas Volcánicas	2.20 - 2.50
Suelos Orgánicos	2.50 - 2.65
Arenas y Gravas	2.65 - 2.67
Limos	2.67 - 2.72
Arcillas poco Plásticas	2.72 - 2.78
Arcillas Plásticas	2.78 - 2.84
Arcillas Expansivas	2.84 - 2.88

Tabla 26. Valores típicos de gravedad específica de las partículas sólidas del suelo para distintos tipos de suelo, los valores obtenidos en este estudio se encuentran en el rango típico. Tomado de valores reportados por Marcia (2017).

5.2.3.3. *Peso unitario*

Los especímenes evaluados, como se mostró anteriormente, corresponden a materiales franco-arcillosos, razón por la cual, se usa el método de parafinado (imagen 18) de muestras descrito en la norma INV E – 129. También se determinada mediante la medición de la masa de un volumen cilíndrico de material con dimensiones bien establecidas. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 27.

Ensayo No.	Muestra	Método	Peso unitario (kN/m ³)
1	TN - No. 6	Parafinado	16.62
3	SIL - No. 4 (GH)	Parafinado	21.36
5	TJ1 - No. 6	Parafinado	15.14
6	TJ1 - No. 9	Parafinado	15.64
8	5 (TJ-1, V2)	Parafinado	15.90
9	5 (TJ-1, V2)	Parafinado	16.08
10	6 (TJ-1, V2)	Parafinado	15.67
11	6 (TJ-1, V2)	Parafinado	15.58
12	TN - No. 4	Dimensiones conocidas	14.76
13	SIL - No. 5 (GH)	Dimensiones conocidas	21.03
		Promedio	16.78

Tabla 27. Valores obtenidos correspondientes al peso unitario total sobre muestras inalteradas a partir de los dos métodos descritos en la norma INVIAS. Se excluyen datos de ensayos cuyo parafinado no fue adecuado y por lo tanto no son confiables.

Los resultados obtenidos muestran un amplio rango de valores, pudiendo clasificarse desde densos a sueltos, sin embargo, se puede observar que la mayoría de los valores están cercanos a 16 kN/m³, a excepción de los obtenidos en ensayos realizados sobre las muestras SIL (GH) No. 4 y No.5, especímenes que presentaban lentes de arena. Es por esto, que este estudio considera que el peso unitario total de los suelos derivados de cenizas volcánicas con alto grado de meteorización varía en un rango de 14.76 kN/m³ a 16.62 kN/m³, con un promedio de 15.67 kN/m³. Es posible considerar como propiedad característica de este tipo de material su bajo peso unitario total.

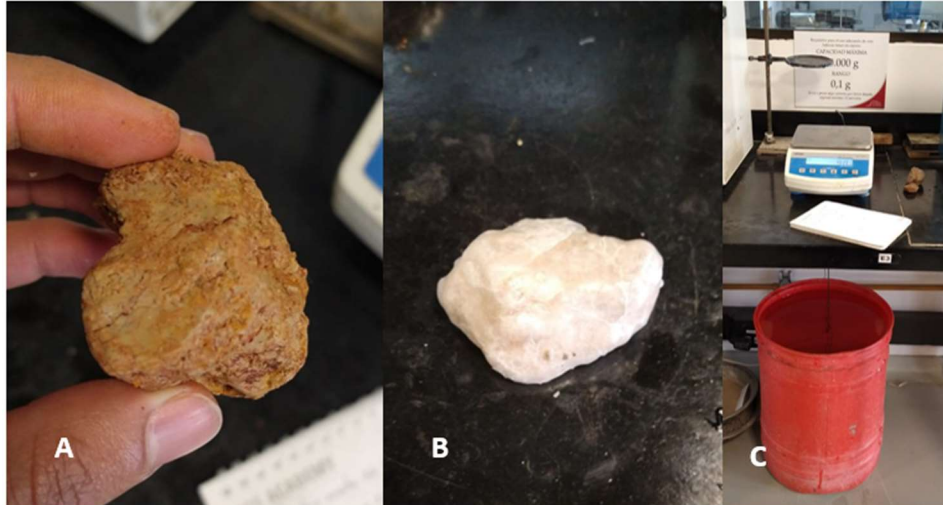


Imagen 18. Peso unitario total mediante el parafinado de la muestra y aplicación del principio de Arquímedes. A) muestra sin parafinar, previa a ser pesada al aire; B) muestra parafinada, será pesada al aire y sumergida en agua; y C) configuración balanza para pesar muestras al aire y en agua.

En la figura 41, se compara esta propiedad con algunos valores reportados en la literatura para este tipo de suelos. Para el caso de Colombia, los resultados muestran ser ligeramente mayores a los reportados por autores cuyo análisis se realizó sobre la cordillera central (Lizcano et al., 2006, Rendón et al., 2020).

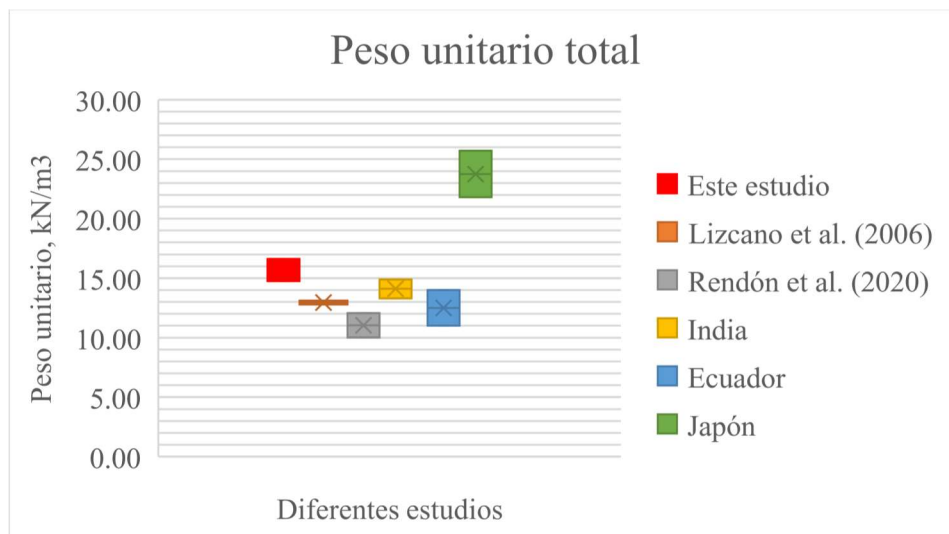


Figura 41. Comparación valores obtenidos de pesos unitarios totales respecto a los reportados en la literatura sobre suelos derivados de cenizas volcánicas.

5.2.3.4. Otras relaciones gravimétricas y volumétricas

A partir de los resultados anteriores se determinan las relaciones gravimétricas y volumétricas de interés; relación de vacíos, porosidad, saturación, peso unitario saturado y peso unitario seco. Algunas de estas propiedades se comparan con valores típicos de este tipo de suelos reportados en distintas investigaciones. Estos se muestran en las figuras 42, 43 y 44, correspondientes a relación de vacíos (e), saturación (S) y peso unitario seco (γ_d) respectivamente.

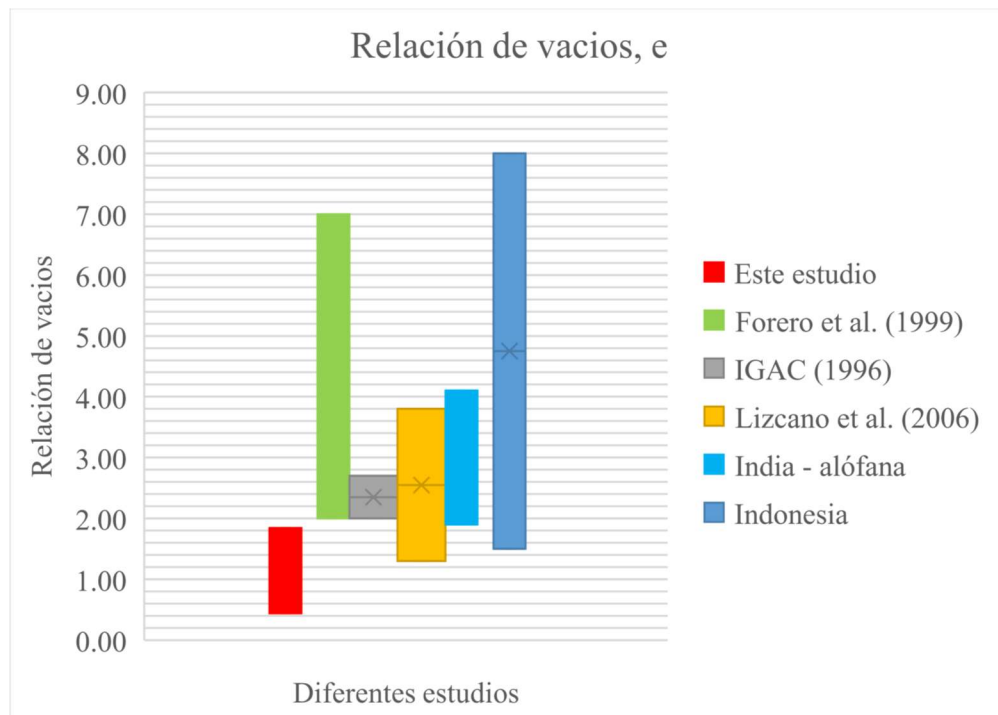


Figura 42. Comparación valores obtenidos para relación de vacíos, significativamente más bajos que los reportados por otros autores.

Se puede observar que el rango en que varía la relación de vacíos de este estudio es significativamente menor a relaciones reportadas por otros autores en zonas de la cordillera central (Forero et al., 1999, Lizcano et al., 2006). Esto se relaciona con el predominio de la fracción de arcilla en los depósitos de suelo del Altiplano Cundiboyacense, cuyo grado de meteorización es

bastante alto. Esta característica condiciona la deformabilidad del material ante la aplicación de cargas.

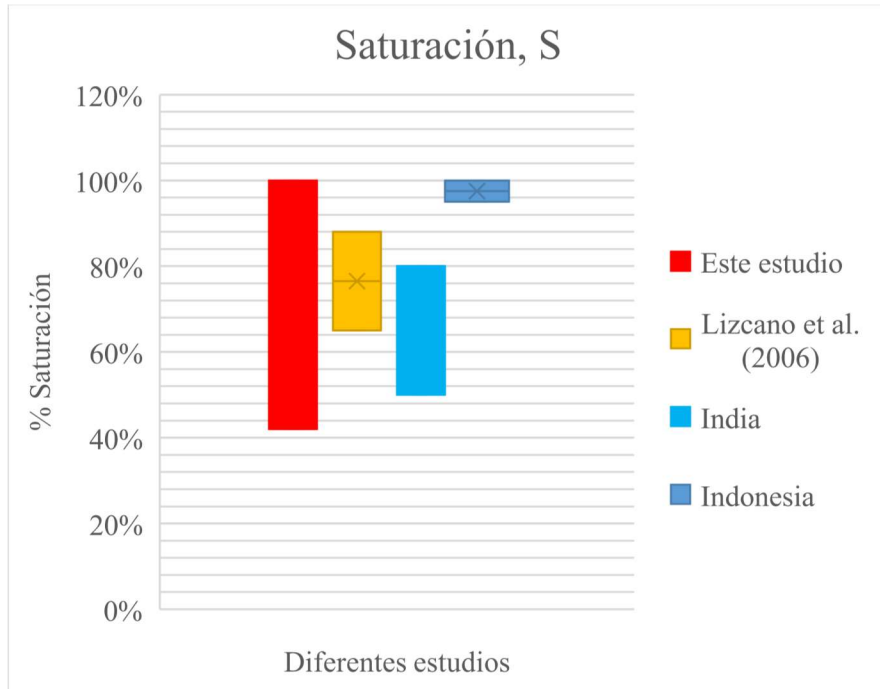


Figura 43. Comparación valores obtenidos para saturación (S, %) con otras investigaciones

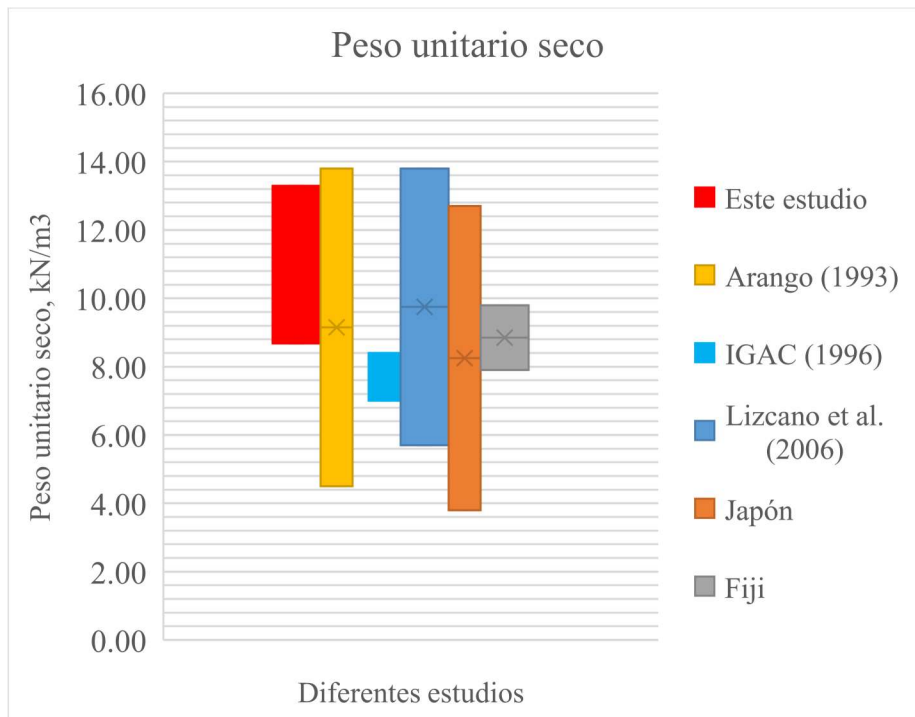


Figura 44. Comparación valores obtenidos para peso unitario seco

Los suelos derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense pueden presentar propiedades que varían en un rango bastante amplio, afectados en gran medida por sus minerales constituyentes. En general, se caracterizan por presentar relaciones de vacíos relativamente altas, entre 0.8 y 1.8, las cuales son mucho menores a las reportadas por otros investigadores sobre suelos de origen volcánico en otras zonas del país cuya actividad volcánica es más reciente.

Por otro lado, a pesar de presentar contenidos de agua entre el 20% y 40%, las muestras tienen niveles de saturación elevados, en su mayoría, superiores al 90%. Con relación al peso unitario total, seco y saturado, exceptuando algunas muestras, es posible calificar como ligeramente bajos estos parámetros.

En la tabla 28, se resumen los valores correspondientes a las relaciones gravimétricas y volumétricas determinadas sobre las muestras ensayadas tomadas en el Altiplano, cuyo origen volcánico es respaldado con los análisis mineralógicos realizados.

Zona	Muestra	wn (%)	Gs	γ_t (kN/m ³)	e	n	S	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{dry} (kN/m ³)
Perfil 1 - Tunja	TJ1-4	14.03	2.46	15.16	0.82	0.45	0.42	17.88	13.29
	TJ1-5	41.83	2.2	15.30	1.00	0.50	0.92	15.85	10.79
	TJ1-6	73.05	2.51	15.02	1.84	0.65	1.00	15.18	8.68
	TJ1-9	19.85	2.65	15.30	1.04	0.51	0.51	17.94	12.77
Perfil 2 - Tunja	TJ2-14	12.29	2.7	19.47	0.53	0.35	0.63	20.94	17.34
Green Hills - Tunja	SIL 5 (GH)	15.09	2.7	21.17	0.44	0.31	0.93	21.61	18.39
Tierra Negra	TN - 4	73.35	2.49	14.76	1.87	0.65	0.98	15.06	8.51

Tabla 28. Resumen de las relaciones gravimétricas y volumétricas determinadas en este estudio para muestras de suelo derivadas de cenizas volcánicas. En la tabla wn, humedad natural; Gs, gravedad específica; γ_t , peso unitario total; e, relación de vacíos; n, porosidad; S, saturación; γ_{sat} , peso unitario saturado; y γ_{dry} , peso unitario seco.

5.3. Propiedades mecánicas

En la presente sección se presentan los parámetros mecánicos estimados mediante ensayos ejecutados sobre muestras inalteradas, alteradas, remoldeadas y compactadas. Puntualmente, se presenta la resistencia al corte en condiciones drenada y no drenada.

Las condiciones a largo plazo se evaluaron mediante ensayos de corte directo en estado consolidado drenado (CD) sobre muestras remoldeadas y compactadas a la densidad natural o inicial (típicamente 16 kN/m^3) tomadas en la visita No. 2. Los ensayos se ejecutan a una velocidad lo suficientemente baja como para permitir la disipación del exceso de presión de poros, esta oscila entre 0.002 mm/min y 0.033 mm/min , condicionadas por las curvas de consolidación y el tiempo prudente de toma de datos en el laboratorio de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Los ensayos realizados a menores velocidades fueron ejecutados por un laboratorio externo. Se recalca que para todo el rango velocidades se garantizó la disipación del exceso de presión de poros de acuerdo con las metodologías establecidas para asegurarlo, adicionalmente, con estos resultados se realizó la evaluación de la pendiente máxima en el software Slide2.

Por otra parte, se ejecutaron ensayos de corte directo sobre muestras tomadas en la visita No.1, a una velocidad de 0.300 mm/min , en estos se permite la consolidación, sin embargo, la velocidad es tan alta que no garantiza la disipación del exceso de presión de poros. Se considera de interés para el estudio analizar la variación en los parámetros de resistencia al corte ante cambios en las condiciones de drenaje, que podrían estar controladas por la disposición estructural interna de las partículas del suelo.

La obtención de los parámetros de resistencia al corte en condición no drenada (S_u) se realiza mediante ensayos triaxiales UU, en este se analizan muestras inalteradas (humedad inicial

correspondiente a humedad natural) y alteradas (humedad inicial varia debido a ciclos de secado sobre la muestra) con el fin de obtener la relación existente entre las condiciones iniciales de humedad y la resistencia al corte.

5.3.1. Corte directo CD a velocidades muy bajas

Para evaluar la pendiente máxima recomendada, así como la relación entre los parámetros de resistencia al corte y la mineralogía de este tipo de suelos, se realizaron ensayos de corte directo en condición consolidada drenada siguiendo la metodología descrita por la norma INV E – 154.

Se procura llevar cada espécimen a su densidad natural compactando distintas capas al interior de la caja de corte. Posteriormente el espécimen compactado es llevado al equipo de corte y sometido a tres esfuerzos verticales distintos (50 kPa, 100 kPa y 200 kPa) para obtener la envolvente de resistencia de cada una. Previo al inicio del ensayo de corte, se permite la consolidación primaria del espécimen para cada uno de los niveles de esfuerzos mencionados anteriormente.

El ensayo de corte se ejecuta a una velocidad adecuada para arcillas debido a que es lo suficientemente lenta para permitir la disipación de la presión de poros. La muestra se lleva a la falla siguiendo los criterios de falla presentados en la norma INVIAS, una vez alcanzada esta, se procede a desmontar el espécimen del equipo de corte, observar la superficie de falla y tomar la humedad final. En la imagen 19 se presenta parte del procedimiento llevado a cabo.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 29, con estos se determinaron algunas relaciones de interés, como el cambio de la cohesión (c') y el ángulo de fricción interna (ϕ') con la profundidad, la humedad inicial del ensayo (en este caso la humedad natural, w_n), humedad

final del ensayo (w_f) y el peso unitario total (γ_t). En las figuras 46, 47, 48 y 49, se presentan estas relaciones respectivamente.

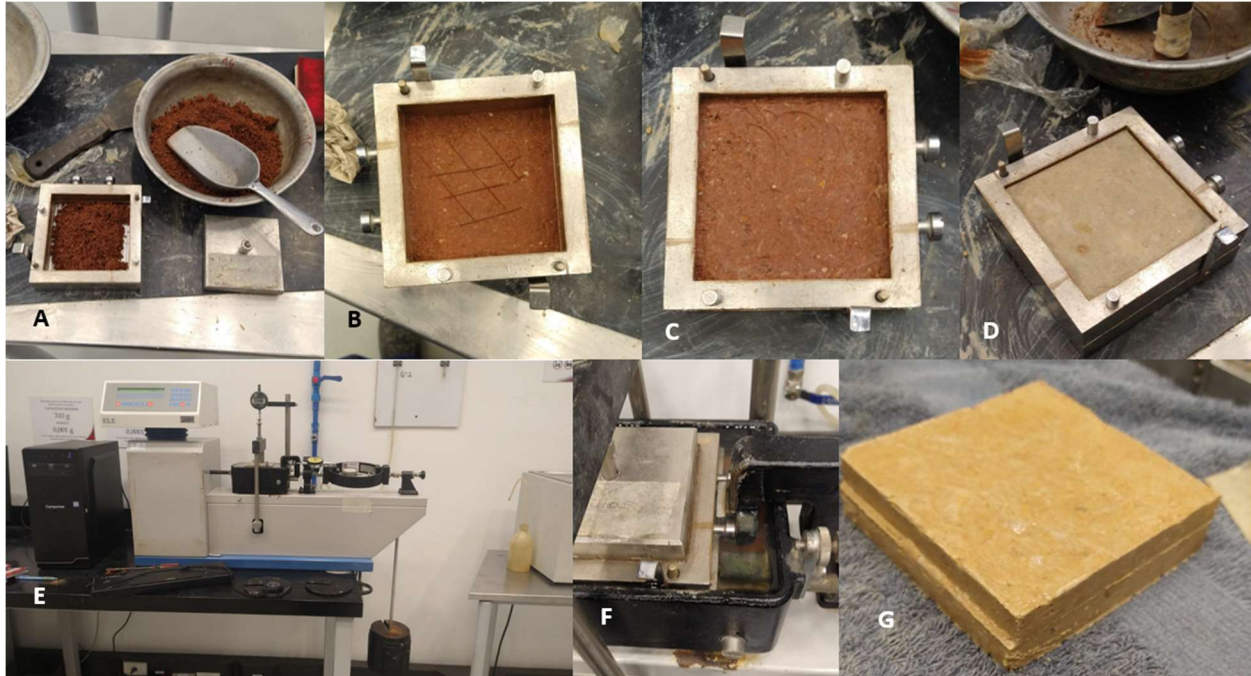


Imagen 19. Procedimiento del ensayo de corte directo CD sobre muestras remoldeadas provenientes de Tunja y Tierra Negra en visita No. 2 (TJ1-V2 y TN-V2); A) material pesado para lograr la densidad requerida en la caja de corte con dimensiones conocidas, se inicia proceso de compactación poniendo previamente la piedra porosa y el papel filtro; B) compactación por capas del material; C) muestra compactada a la densidad requerida (se presentan algunas variaciones debido a energía de compactación difícilmente controlada); D) colocación de papel filtro y piedra porosa sobre muestra compactada, previo a colocación de placa de transferencia y montaje en equipo de corte directo; E) configuración equipo de corte y proceso de consolidación de la muestra; F) procedimiento de corte sobre muestra compactada y consolidada; y G) muestra fallada, se puede observar el plano de falla y la deformación lateral generada por la máquina de corte directo.

Muestra No.	Z (m)	w_n (%)	γ ensayo CD (kN/m ³)	w falla CD (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
TJ1-1-V2	Superficial	14.03	17.53	30.67	11.74	21.39
TJ1-2-V2	2.00	3.1	17.68	23.27	9	35.01
TJ1-3-V2	0.50	23	20.85	28.87	974	49.47

Muestra No.	Z (m)	wn (%)	γ ensayo CD (kN/m ³)	w falla CD (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
TJ1-5-V2	2.50	57.79	15.81	66.12	24.6	23.06
TJ1-6-V2	5.00	12.29	15.59	44.58	11.58	30.82
TN-7-V2	3.00	80.1	15.11	81.77	15	22.01
Promedio					14.38	26.46

Tabla 29. Resultados del ensayo de corte directo CD a bajas velocidades sobre muestras remoldeadas y compactadas.

La muestra TJ1-3-V2 presenta unos valores muy altos tanto de cohesión como de ángulo de fricción, totalmente atípicos si se compara con el resto de los resultados, esto se debe a la presencia abundante de raíces en la muestra tomada en el horizonte de transición orgánico, estos elementos aportan en gran medida en la resistencia al corte si se tiene en cuenta la escala del ensayo. Por tal razón, la muestra se excluye de los análisis desarrollados más adelante porque no representa fielmente la resistencia que estos suelos podrían desarrollar bajo estas condiciones.

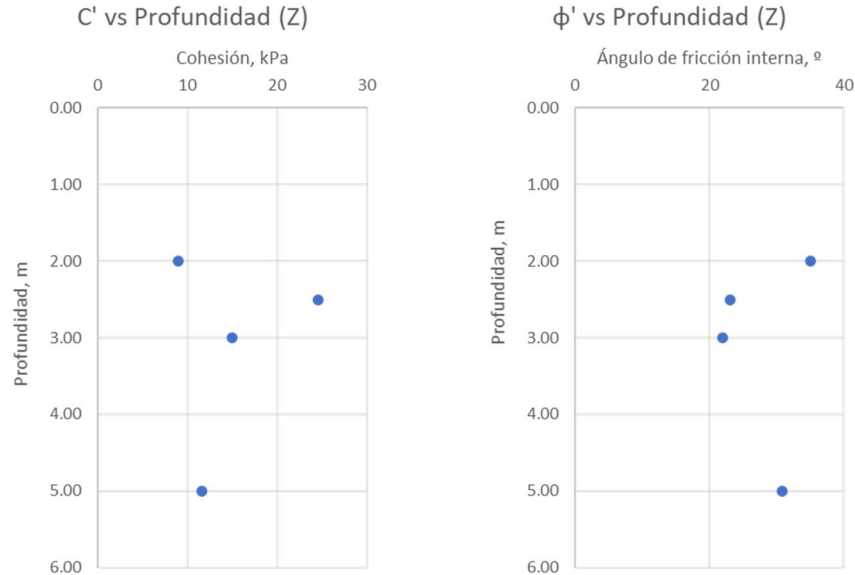


Figura 45. Variación de los parámetros de resistencia al corte con la profundidad

En la figura anterior se puede observar que no hay una relación clara entre la resistencia al corte y la profundidad. Esto concuerda con la hipótesis presentada en algunos estudios, expuestos

en el capítulo 3, en donde se reconoce que la resistencia al corte en suelos derivados de cenizas volcánicas depende en mayor medida de su estructura interna que de su historia de esfuerzos.

Por el contrario, en las figuras 46 y 47 se evidencia el condicionamiento de los parámetros de resistencia al corte con los contenidos de humedad inicial y final del ensayo respectivamente. Mayores contenidos de humedad aumentan la cohesión del material, pero disminuyen el ángulo de fricción, se debe considerar que el material está drenado y los parámetros se presentan en términos de esfuerzos efectivos. Esto confirma que el comportamiento mecánico de suelos derivados de cenizas volcánicas con alto grado de alteración, como los que cubren amplias zonas del Altiplano Cundiboyacense, está ligado al contenido de agua inicial del material. Mas adelante se verifica si la humedad está relacionada con la mineralogía característica de este material y, por lo tanto, ligada al comportamiento mecánico.

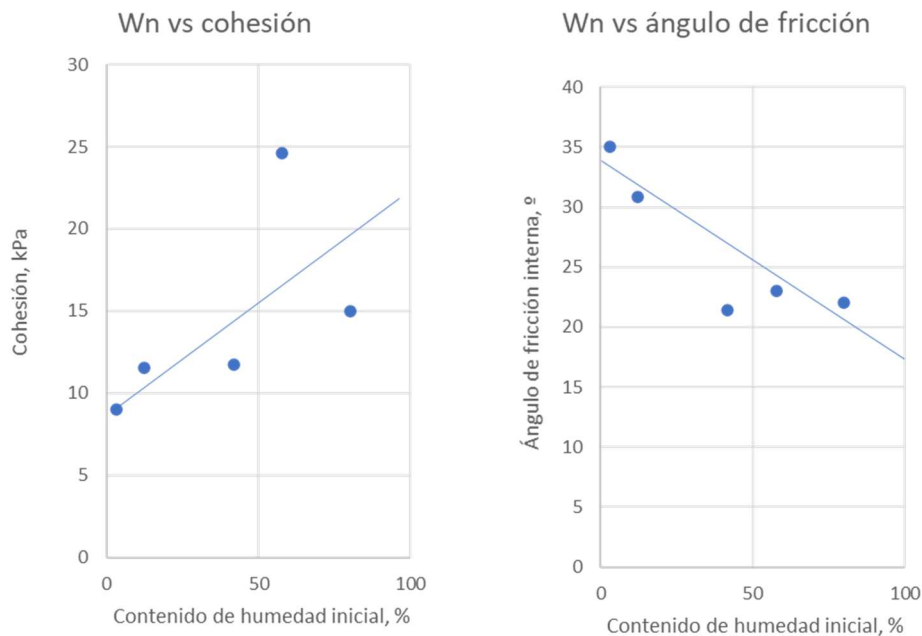


Figura 46. Variación de los parámetros de resistencia al corte con la humedad inicial del ensayo, en este caso, la humedad natural del espécimen (w_n).

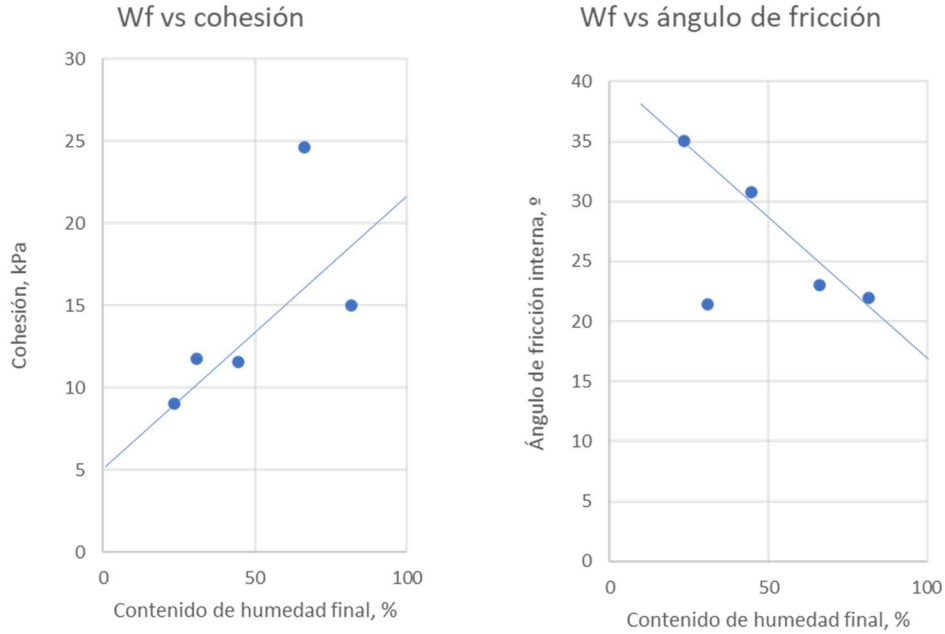


Figura 47. Variación de los parámetros de resistencia al corte con la humedad final del ensayo.

En la figura 48 se aprecia que no existe relación alguna entre el peso unitario total y los parámetros de resistencia al corte del suelo.

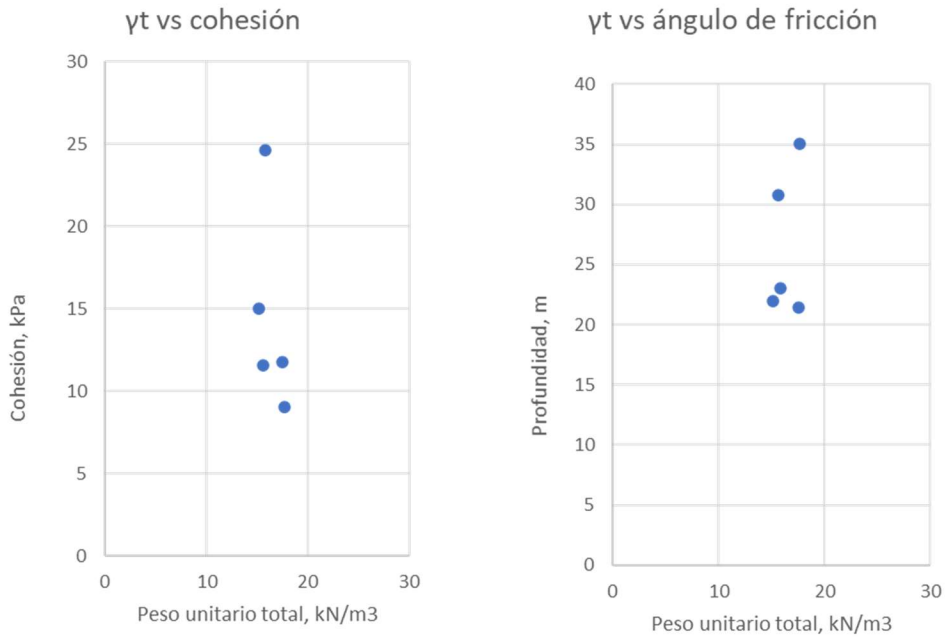


Figura 48. Variación de los parámetros de resistencia al corte con el peso unitario total de los especímenes de ensayo.

La respuesta esfuerzo deformación en general corresponde a un material dúctil, comportamiento típico de un suelo arcilloso blando, el cual no exhibe una resistencia pico, sino que muestra una tendencia a desarrollar una resistencia residual. Además, en la mayoría de los casos presenta endurecimiento por deformación. En la figura 49 se presentan las curvas de esfuerzo - deformación y las envolventes de resistencia de algunos especímenes.

Se aclara que las muestras TJ1-1-V2, TJ1-5-V2 y TJ1-6-V2 fueron ensayadas en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, mientras que las muestras TJ1-2-V2, TJ1-3-V2 y TN-7-V2 fueron ensayadas en un laboratorio externo. En ambos casos las velocidades fueron apropiadas para evaluar las condiciones a largo plazo.

En resumen, en los suelos derivados de cenizas volcánicas en el Altiplano, en condiciones consolidadas drenadas, su cohesión varía entre 9.0 y 24.6 kPa con un valor promedio de 14.38 kPa, esta se considera baja para un material franco arcilloso. Por otro lado, el ángulo de fricción varía en un rango de 21.39° a 35.01° con un promedio de 26.46° . Si se compara con los valores reportados por Lizcano et al. (2006) quien cita los trabajos de Forero et al. (1999) para Colombia y de Rao (1995) para el resto del mundo, los ángulos de fricción obtenidos varían entre 26° a 43° y 29° a 41° respectivamente; los valores determinados en este trabajo son cercanos, pero ligeramente menores, esto muestra que a pesar de ser un material franco arcilloso es capaz de desarrollar fricción en el largo plazo. Adicionalmente, la presencia de cohesión en el largo plazo es evidencia de su estructura interna cementada, propia de un suelo cuyas partículas floculan durante su formación.

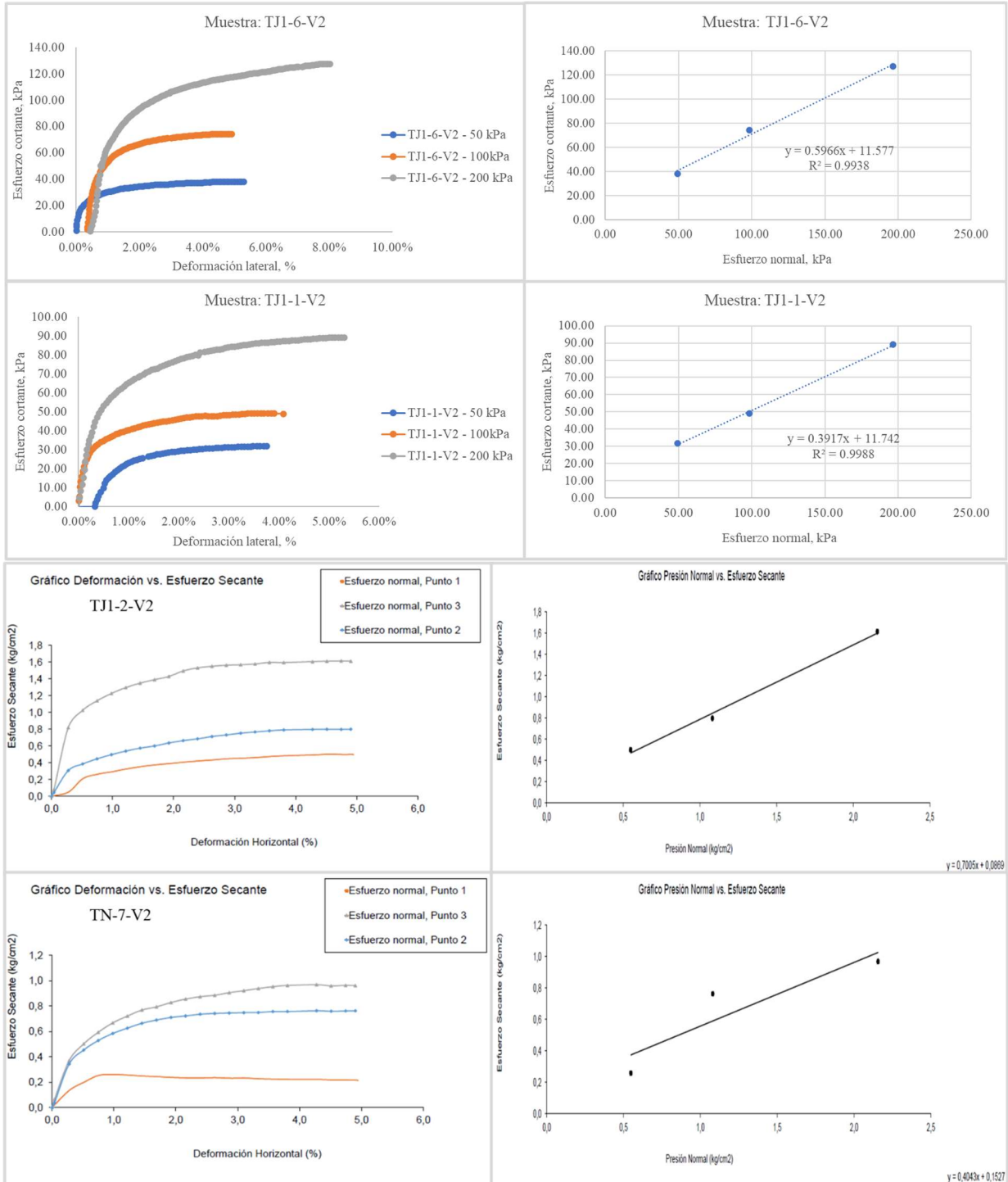


Figura 49. Comportamiento esfuerzo cortante – deformación lateral obtenido de ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD) sobre muestras tomadas durante la visita No. 2 a las localidades de Tunja y Tierra Negra (Ventaquemada). El material exhibe las características de un material dúctil con tendencia a presentar endurecimiento por deformación.

5.3.2. Corte directo CD a velocidades mayores

Se consideró de interés analizar el comportamiento del suelo en condiciones consolidadas, realizando el ensayo a una velocidad mayor que no permita por completo la disipación de presión de poros, es decir, no drenado. Se pretende verificar el cambio que habría en las propiedades mecánicas del corto o mediano plazo al largo plazo, asimismo, comprobar si la humedad sigue condicionando estos parámetros. La velocidad utilizada en este caso es de 0.30 mm/min, la totalidad de los ensayos se realizó en la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

La tabla 30 resume los resultados obtenidos. La figura 50 evidencia que tampoco existe una relación entre la profundidad y los parámetros de resistencia al corte del suelo.

Zona	Muestra No.	Z (m)	w _n (%)	γ ensayo CD (kN/m ³)	w falla CD (%)	c' (kPa)	φ' (°)
Perfil 1 - Tunja	TJ1-4	1.74	14.03	17.75	35.90	62.89	3.81
	TJ1-5	2.15	41.83	17.38	45.39	53.72	7.88
	TJ1-6	2.15	73.05	16.75	56.78	32.69	5.53
	TJ1-9	6.74	19.85	16.36	49.96	8.50	23.91
Perfil 2 - Tunja	TJ2-14	1.80	12.29	18.66	54.46	35.65	11.43

Tabla 30. Resultados ensayo de corte directo CD sobre muestras remoldeadas y compactadas a una velocidad de corte mayor.

En general, el ángulo de fricción interna del suelo (ϕ'), en este caso, presenta valores bajos, a excepción de la muestra TJ1-9, por lo que las envolventes de resistencia tienden a la horizontal, evidenciando el comportamiento predominantemente cohesivo del material en el corto a mediano plazo. Lo anterior puede estar asociado a la estructura interna y morfología del mineral.

Se observan relaciones estrechas entre algunas de las variables del ensayo y los parámetros de resistencia al corte; principalmente con la cohesión (c'), no se logró identificar una relación clara entre estas y el ángulo de fricción interna (ϕ') obtenido en los ensayos. Se determinaron

relaciones directas entre la humedad final o en la falla y la cohesión, y el peso unitario del ensayo y la cohesión (figura 51).

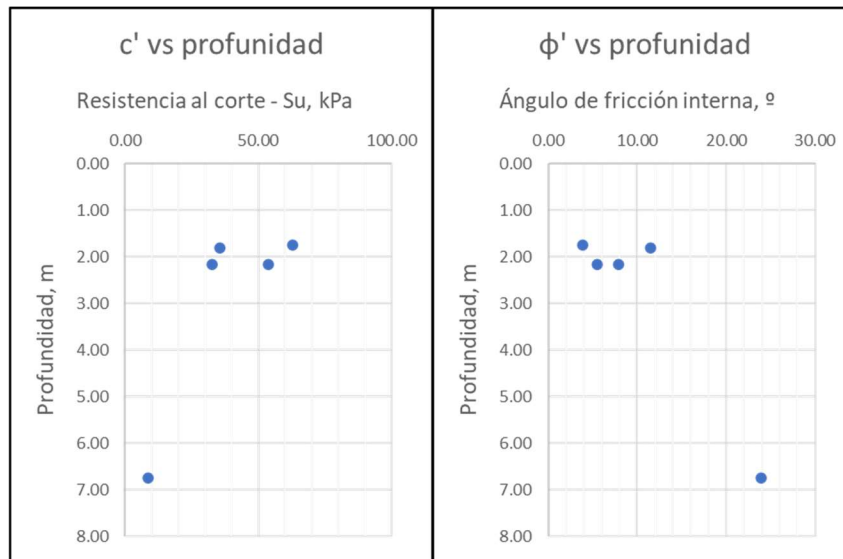


Figura 50. Variación con la profundidad de los parámetros de resistencia al corte en condición consolidada y parcialmente drenada obtenidos de ensayos de corte directo CD a mayores velocidades sobre especímenes remoldeados.

La relación existente entre la humedad final y la cohesión persiste, sin embargo, la tendencia varía respecto al ensayo anterior, lo cual no anula el hecho de que el contenido de humedad en la muestra afecta claramente la cohesión del material; en este caso a mayor contenido de agua menor cohesión. Esto significaría la ocurrencia de un fenómeno de ablandamiento asociado al contenido de agua y a la imposibilidad de disipar las presiones de poros.

Todos los especímenes ensayados presentaron un comportamiento dúctil con respecto a la respuesta esfuerzo deformación tanto en los ensayos anteriores como en estos. Esta deformación plástica puede explicarse por el hecho de que la estructura nano tubular entrelazada de la meta halloysita va reacomodándose, moviéndose como rodillos, a medida que va rompiendo enlaces cementantes.

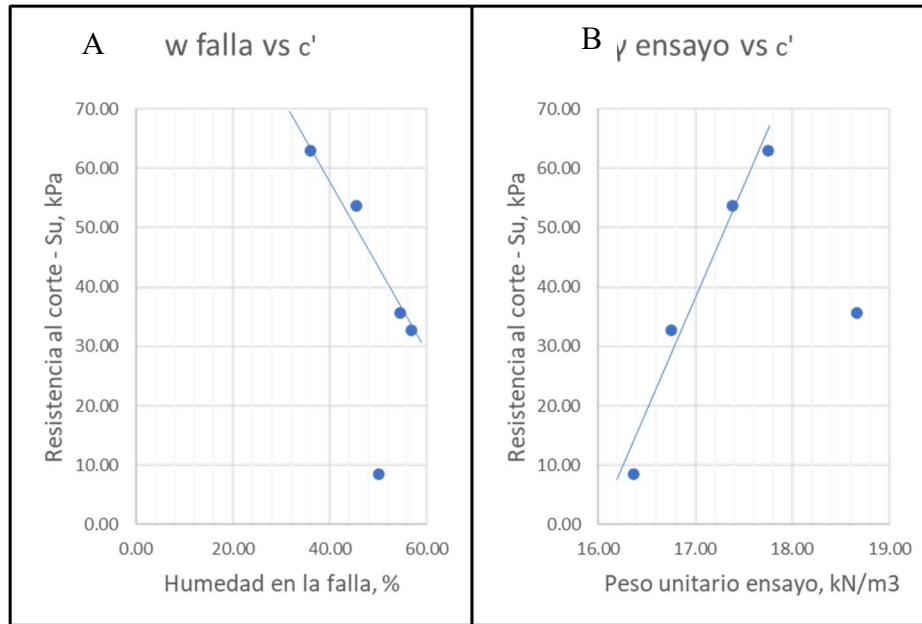


Figura 51. Relación entre el contenido de agua del espécimen en la falla, el peso unitario al que es llevado el espécimen en el ensayo de CD sobre muestra remoldeada y la cohesión. En A) no se aprecian humedades en el rango de 0 a 30 % aproximadamente debido a que para el proceso de compactación el material fue ligeramente humedecido en muestras secas, adicionalmente el ensayo de CD se realiza sumergiendo la caja de corte.

5.3.3. Ensayo triaxial UU

La ejecución del ensayo se realiza sobre especímenes extraídos mediante muestreador de pared delgada, cuyo diámetro es de 2" (5 cm). El equipo disponible en el laboratorio de suelos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito requiere especímenes de diámetro máximo igual a 3.50 cm, manteniendo una relación mínima de altura – diámetro de dos (2), razón por la cual, la muestra es tallada hasta lograr las dimensiones requeridas. Los ensayos realizados siguen el procedimiento descrito en la norma INV E – 153 para suelos cohesivos ensayados bajo condiciones no consolidadas y no drenadas (UU).

El montaje del ensayo se realiza sobre muestras inalteradas y sobre muestras alteradas (en su humedad) que se tallan previamente al proceso de secado, puesto que, el secado excesivo genera

agrietamiento y la manipulación posterior a la aparición de este hace que las muestras no sean manejables. Indistintamente de la condición inicial de humedad de los especímenes, estos se montan en el equipo para el ensayo triaxial y se permite la saturación mediante determinados incrementos de presión de cámara y contrapresión (aproximadamente de 7 psi cada uno) hasta lograr un valor superior al 95% en el parámetro B de Skempton, el cual relaciona el incremento en la presión de poros y el incremento en la presión de confinamiento. El tiempo de saturación varia desde un día hasta ocho días, por lo que, no se pudo definir un tiempo característico para este tipo de suelo.

Saturada la muestra se realiza el proceso de compresión hasta lograr la falla, esta es identificada de acuerdo con los criterios de falla presentados en la norma INVIAS. Los resultados acá obtenidos pretenden determinar la resistencia al corte en muestras saturadas, puesto que, teniendo en cuenta las relaciones volumétricas el suelo puede presentar saturación a humedades bajas. Además, se busca verificar la relación entre el contenido de humedad y la resistencia al corte. Los parámetros de resistencia correspondientes a muestras en estado inalterado, junto con los valores entregados por SIL, serán usados para algunos de los análisis de estabilidad de taludes discutidos posteriormente. Parte del proceso descrito anteriormente se presente en la imagen 20.

Se miden humedades previo al montaje del espécimen (humedad inicial) y una vez la muestra ha fallado (humedad final o humedad de la muestra saturada). Los valores de cohesión no drenada o resistencia al corte en condición no drenada, S_u , obtenidos de los ensayos y suministrados por SIL se presentan en la tabla 31 y figura 52.

Muestra No.	Estado	Prof. (m)	W _o (%)	W _f (%)	S _u (kPa)	E(S _u)	37.04
4 - Tierra Negra	W _o NATURAL	1.5	71.35	86.86	17.40	E(S _u ²)	1514.63
5 - SIL (Green Hills)	CAMBIO W _o	6.75	14.21	21.73	34.34	(E(S _u)) ²	1372.04
4 - SIL (Green Hills)	CAMBIO W _o	2.75	1.49	21.27	32.37	Var(S _u)	142.59

Muestra No.	Estado	Prof. (m)	Wo (%)	Wf (%)	Su (kPa)	E(Su)	37.04
7 - SIL (Ventaquemada)	CAMBIO Wo	1.25	5.73	40.36	57.40	σ (Su)	11.94
SIL (CRIB)	Wo NATURAL	12.2	35.08		133.4 2	COV	0.32
SIL (Green Hills) - A	Wo NATURAL	1.7	14.84		41.79	c max	57.40
SIL (Green Hills) - B	Wo NATURAL	1.7	14.84		38.95	c min	17.40

Tabla 31. Resistencia al corte en condición no consolidada - no drenada obtenida de ensayos triaxiales realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y proveniente de información entregada por SIL.

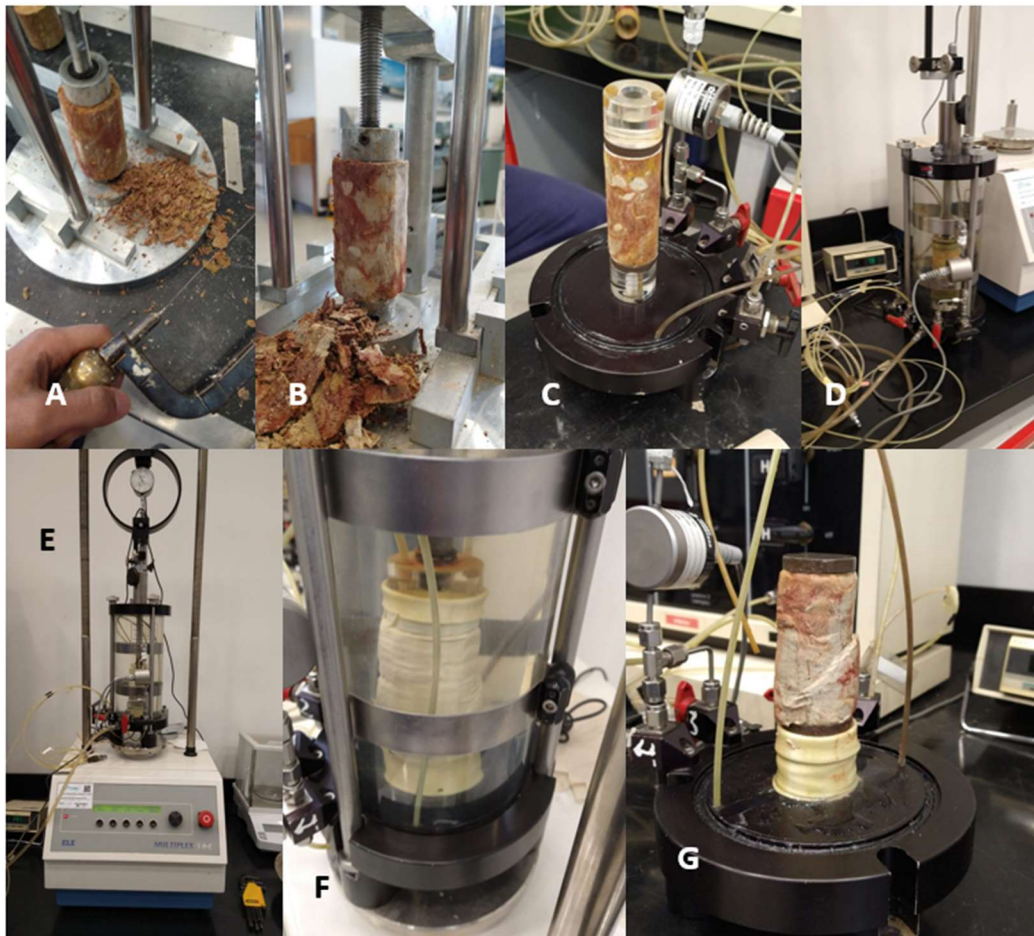


Imagen 20. Procedimiento realizado para la determinación de la resistencia al corte en condición UU mediante ensayo Triaxial UU. A) y B) proceso de tallaje de espécimen a las dimensiones requeridas; C) montaje espécimen en cámara de equipo triaxial; D) proceso de saturación a determinadas presiones de cámara y contrapresión; E) aplicación esfuerzo de compresión sobre muestra saturada hasta llevar a la falla; F) fallo de la muestra al interior de la cámara; y G) superficie de falla, aproximadamente a 45°. Fotografías tomadas en ensayo muestra SIL – 5 (GH).

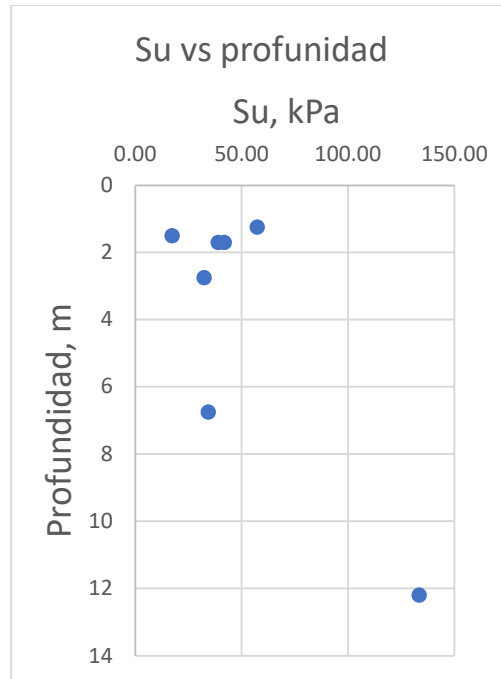


Figura 52. Cambio de la resistencia al corte S_u con la profundidad.

Se puede apreciar que el valor de S_u no mantiene una tendencia clara con la profundidad, pero es posible observar la agrupación de valores en un rango estrecho, exceptuando el valor obtenido a una profundidad de 12.20 metros proveniente de la zona del CRIB, Tunja. Por lo anterior, este valor se descartó para la determinación de los valores típicos de resistencia al corte en condición no consolidada no drenada de suelos derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense. El rango de resistencias obtenido, entre 17.40 kPa a 57.40 kPa, con un valor esperado de 37.04 kPa; se puede clasificar el suelo como blando.

La relación existente entre S_u y la humedad del espécimen (inicial y final) se presenta en la figura 53, en esta se observa una tendencia tipo campana, evidencia del condicionamiento que genera el contenido de agua en el comportamiento mecánico del material. Esta tendencia es observada tanto en la humedad inicial como en la humedad final, saturada o en la falla; más clara respecto a la última. Jacquet (1987) recoge en su trabajo información de estudios sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en Nueva Zelanda, en esta cita la investigación realizada por

Northey y Schafer (1974), quienes identifican un comportamiento similar en un suelo alofánico (figura 54). Este comportamiento se asocia a la estructura mineral y morfología de las partículas.

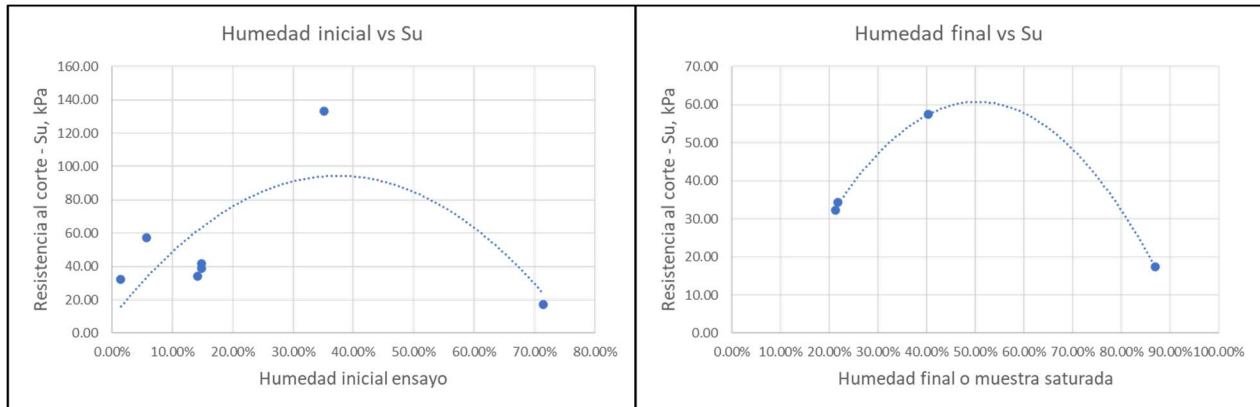


Figura 53. Comportamiento de la resistencia al corte en condición no consolidada – no drenada (S_u) con el cambio en el contenido de agua de las muestras, tanto en humedad final como inicial. Con la humedad final se presenta un mayor ajuste en la tendencia, condicionamiento asociado a la estructura mineral de este tipo de suelo.

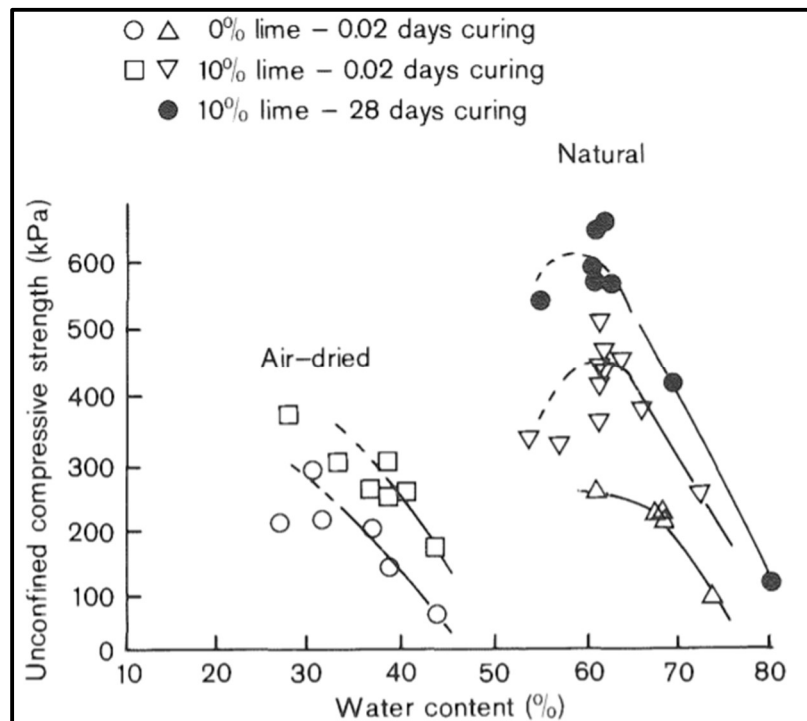


Figura 54. Comportamiento identificado por Northey y Schafer (1974), en un suelo alofánico desarrollado en Nueva Zelanda, este relaciona el contenido de humedad y la resistencia a la compresión inconfnada, ensayo similar al triaxial UU. Tomado de Jacquet (1987).

Se identifica también la relación que existe entre el peso unitario inicial de la muestra y la resistencia al corte, lo cual coincide con el caso anterior (corte directo a velocidades de 0.30 mm/min), es decir, esta característica puede ser atribuible a condiciones no drenadas. Sin embargo, en los datos obtenidos existe un valor atípico que sugiere la verificación de esta relación (figura 55).

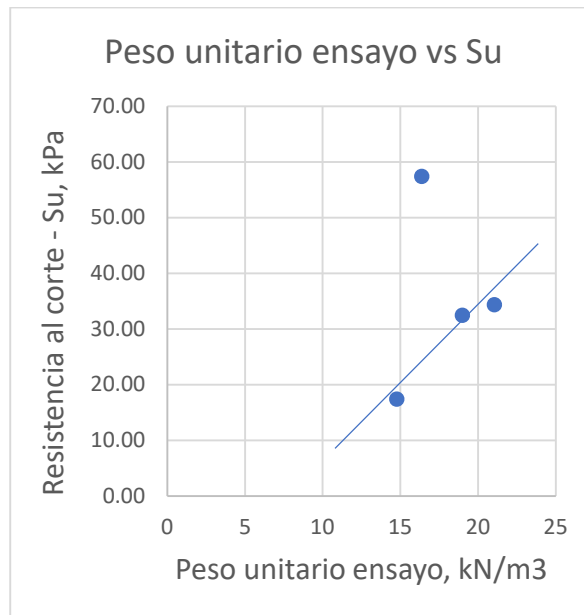


Figura 55. Relación entre el peso unitario del espécimen ensayado en el triaxial UU y la resistencia al corte, S_u .

5.4. Índices de expansión y colapso

Para determinar cuál será la deformación volumétrica más probable se realizan los ensayos de determinación de suelos expansivos (INV E – 132) y de potencial de colapso en suelos parcialmente saturados (INV E – 157).

Expansión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en ensayos de expansión en consolidómetro bajo un esfuerzo vertical de 0.7 kg/cm² (7 kPa). Encontrando un porcentaje de

expansión promedio de 2.18%, lo que corresponde a un potencial de expansión bajo. Para muestras inalteradas se tienen valores promedio de límite líquido e índice de plasticidad de 92 y 49 respectivamente, lo que resulta a un potencial de expansión muy alto según la tabla 32.

Esta valoración contradictoria puede estar asociada a la estructura mineral de este tipo de suelos, puesto que, de acuerdo con su tendencia a formar agregaciones, flocular, cementar y generar una estructura abierta tipo panel, hace que el material sea más susceptible a colapsar. Asimismo, la presencia de minerales como la caolinita y la meta halloysita generan que el material sea poco expansivo por la dificultad que tiene de permitir la ubicación de moléculas de agua en el espaciado interlaminar de su estructura mineral. Por lo tanto, se considera que el potencial de expansión es bajo, siguiendo el resultado obtenido del ensayo en consolidómetro.

Potencial de expansión	Expansión (%) medida en consolidómetro bajo presión vertical de 0.07 kgf/cm ²	Límite líquido LL, en (%)	Límite de contracción en (%)	Índice de plasticidad, IP, en (%)	Porcentaje de partículas menores de una micra (μ)	Expansión libre EL en (%), medida en probeta
Muy alto	> 30	> 63	< 10	> 32	> 37	> 100
Alto	20 – 30	50 – 63	6 – 12	23 – 45	18 – 37	> 100
Medio	10 – 20	39 – 50	8 – 18	12 – 34	12 – 27	50 100
Bajo	< 10	< 39	> 13	< 20	< 17	< 50

Tabla 32. Medida del potencial de expansión bajo distintos criterios de evaluación. Se genera contradicción en resultados de ensayos en consolidómetro y evaluación a partir de límites de consistencia. Tomada de NSR-10, título H.

Colapso

La medida del potencial de colapso se realiza siguiendo la metodología presentada en la norma INV E – 157. Como en el caso anterior se toma una muestra en estado inalterado de 2” (5cm) de diámetro, que se coloca en el anillo de consolidación (de igual diámetro) y posteriormente se posiciona en el consolidómetro sin inundar con agua. Sobre esta se realizan distintos incrementos de carga asociados a distintos esfuerzos verticales, cada incremento se realiza en periodos de una hora hasta llegar a un esfuerzo de 200 kPa en el cual la muestra parcialmente

saturada se inunda y se deja 24 horas bajo estas condiciones. A este nivel de esfuerzos se mide el índice de colapso y con esto se realiza una valoración cualitativa del grado de colapso (tabla 33).

La figura 56, resume los resultados obtenidos de los ensayos de potencial de colapso, se presenta la gráfica de la variación de la deformación unitaria axial con el esfuerzo vertical aplicado (en escala logarítmica). Al llegar a los 200 kPa, la muestra se inunda y se mide al día siguiente el cambio volumétrico generado, este salto puede evidenciarse en las curvas presentadas. De acuerdo con la tabla 33, tomada de la norma INVIAS, el grado del colapso del espécimen es moderado, con valores cercanos al grado moderadamente severo.

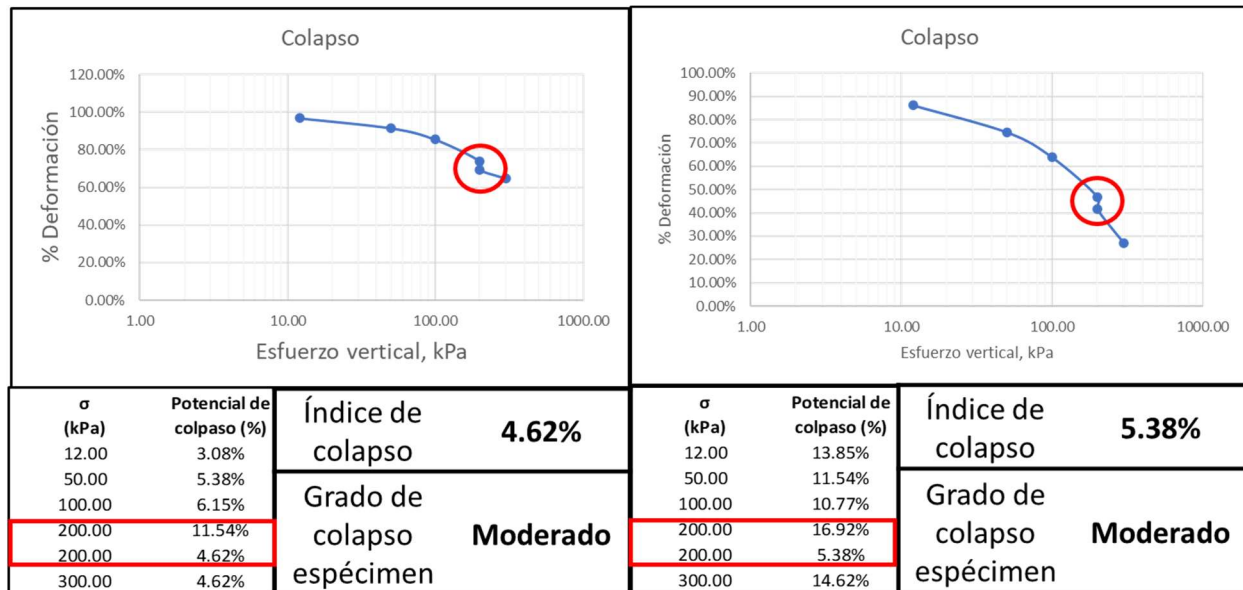


Figura 56. Resultados ensayo índice de colapso, espécimen mostró grado del colapso moderado.

La presencia de una estructura conformada por minerales con morfología de nano tubos como es el caso de la meta halloysita provoca cambios volumétricos negativos (disminución del volumen) o colapso de la estructura interna del suelo por la pérdida de enlaces cementantes. Con esto, se confirma la estrecha relación entre la estructura interna del suelo, el tipo de mineral constituyente, la interacción de los anteriores con el agua y el comportamiento mecánico del material.

GRADO DEL COLAPSO DEL ESPÉCIMEN	ÍNDICE DE COLAPSO I_c , %
Ninguno	0
Ligero	0.1 a 2.0
Moderado	2.1 a 6.0
Moderadamente severo	6.1 a 10.0
Severo	> 10

Tabla 33. Grado de colapso de acuerdo con el índice de colapso determinado en los ensayos. Especímenes se encuentran en el rango moderado de grado de colapso, con valores cercanos a presentar moderadamente severo grado de colapso. Tabla tomada de Norma INV E – 157.

Cavallaro et al. (2017) realizan una comparación de nanotubos de halloysita de distintas localidades, mediante ensayos de microscopía electrónica de barrido (SEM), estas imágenes muestran la disposición estructural de la halloysita (figura 57). Se observan partículas tubulares alargadas, entrelazadas y formando una estructura abierta, esto es claro sobre la muestra de arcilla tomada de Siberia, oeste de Australia, así como en la muestra de arcilla de Matuari Bay, Northland, Nueva Zelanda, cuyo origen corresponde a la alteración de cenizas volcánicas.

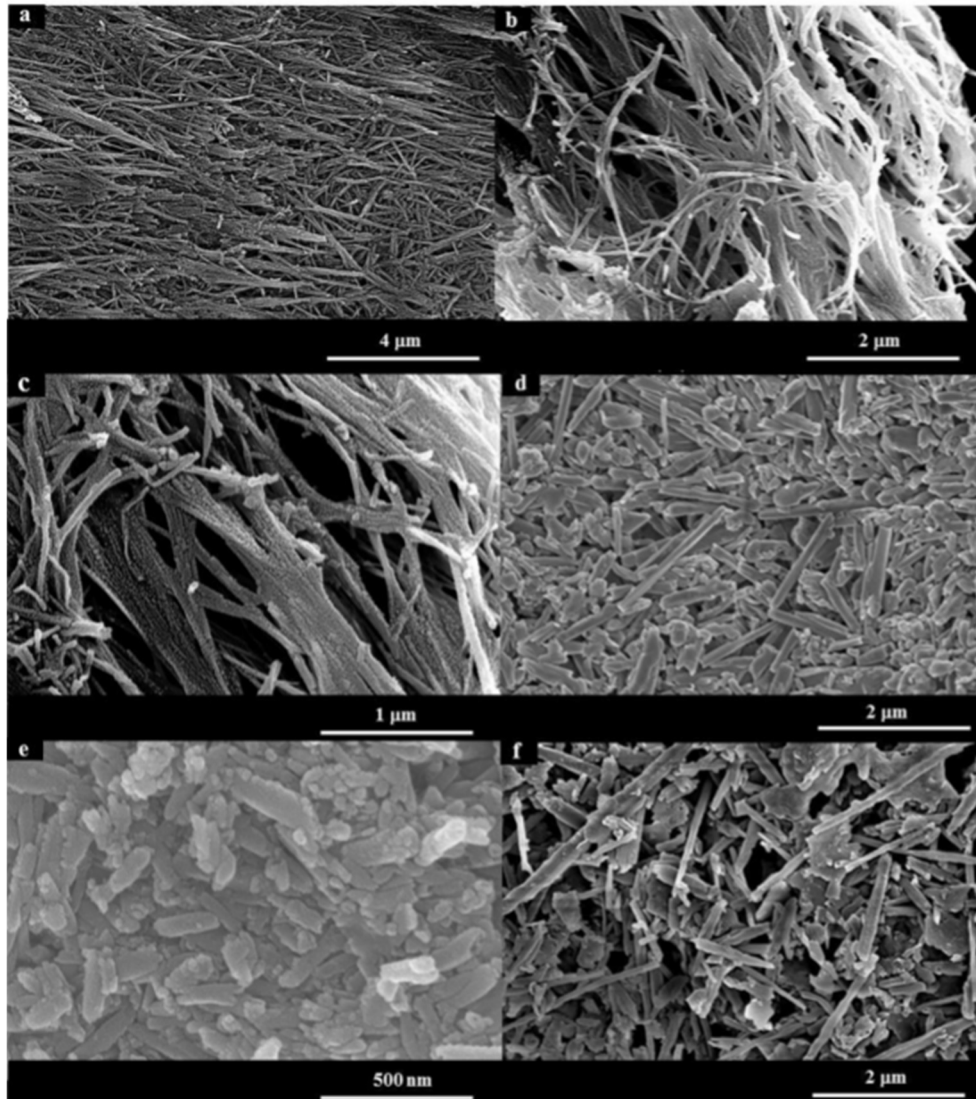


Figura 57. Disposición estructural de nanotubos de halloysita en distintas zonas del mundo, imágenes provenientes de microscopio electrónico de barrido (SEM); a), b) y c) arcilla de Siberia, oeste de Australia; d) Matuari Bay, Northland, Nueva Zelanda; e) Dragon Mine, Utah, Estados Unidos de América; y f) Latah County, Idaho, Estados Unidos de América. Tomado de Cavallaro et al. (2017).

5.5. Potencial de erodabilidad

En esta sección se realiza la evaluación del potencial de erosión interna de los suelos derivados de cenizas volcánicas en el Altiplano Cundiboyacense. Por cuestiones de disponibilidad de equipos el potencial de erosión se mide mediante un ensayo cualitativo que involucra la

ejecución de ensayos de hidrometría sobre muestras con agente dispersante y sin él, es decir, se evalúa el potencial de erosión a partir de la dispersividad del material.

Las arcillas dispersivas son fácilmente erodables en presencia de agua en condición estática o fluyendo a bajos y altos gradientes hidráulicos debido a sus propiedades fisicoquímicas. La tendencia dispersiva de las partículas genera pérdida de atracción electroquímica hasta un punto mínimo donde las partículas individuales desprendidas se asocian con otras partículas de suelo y son transportadas, generando así un flujo interno de material. La diferencia entre arcillas dispersivas y no dispersivas puede radicar en la preponderancia de cationes de sodio sobre cationes de calcio, potasio y magnesio presentes en el agua de poros (Porteros y Hurtado, 1999).

Existen ensayos cuantitativos y cualitativos para la evaluación de la dispersividad y con esta la erodabilidad de los materiales, sin embargo, por la alta correlación con el ensayo de “Pinhole” (cuantitativo) se realiza el ensayo de doble hidrómetro (ASTM D 4221 – 90) desarrollado por el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos de América. Este califica cualitativamente el grado de dispersión del material.

El ensayo consiste en la determinación de las curvas de distribución de tamaños de partículas en dos ensayos de hidrometría; en uno de estos se emplea un agente dispersante o defloculante y en el otro únicamente se mezcla el material con agua. Para los ensayos ejecutados en este estudio una de las muestras es agitada mecánicamente, la otra no, esta última como exige el ensayo. En las imágenes 10 y 11, se aprecian las muestras M3 (sin agente defloculante y sin agitación mecánica) y M4 (sin agente defloculante y con agitación mecánica) cuyas curvas de distribución de partículas serán comparadas con las curvas generadas por las muestras M1 y M2 (con agente defloculante y agitación mecánica), que siguen el procedimiento descrito en la norma INV E – 123.

Con la distribución granulométrica de las partículas que pasan el tamiz No. 10 (correspondiente al 100% en este caso), se determina el porcentaje de suelos más finos que 0.005 mm para la muestra sin dispersante (P) y con dispersante o defloculante (Q). La relación P/Q en porcentaje corresponde al grado de dispersión del material. En la figura 58, se presentan las curvas de distribución granulométrica obtenidas en el ensayo de doble hidrómetro.

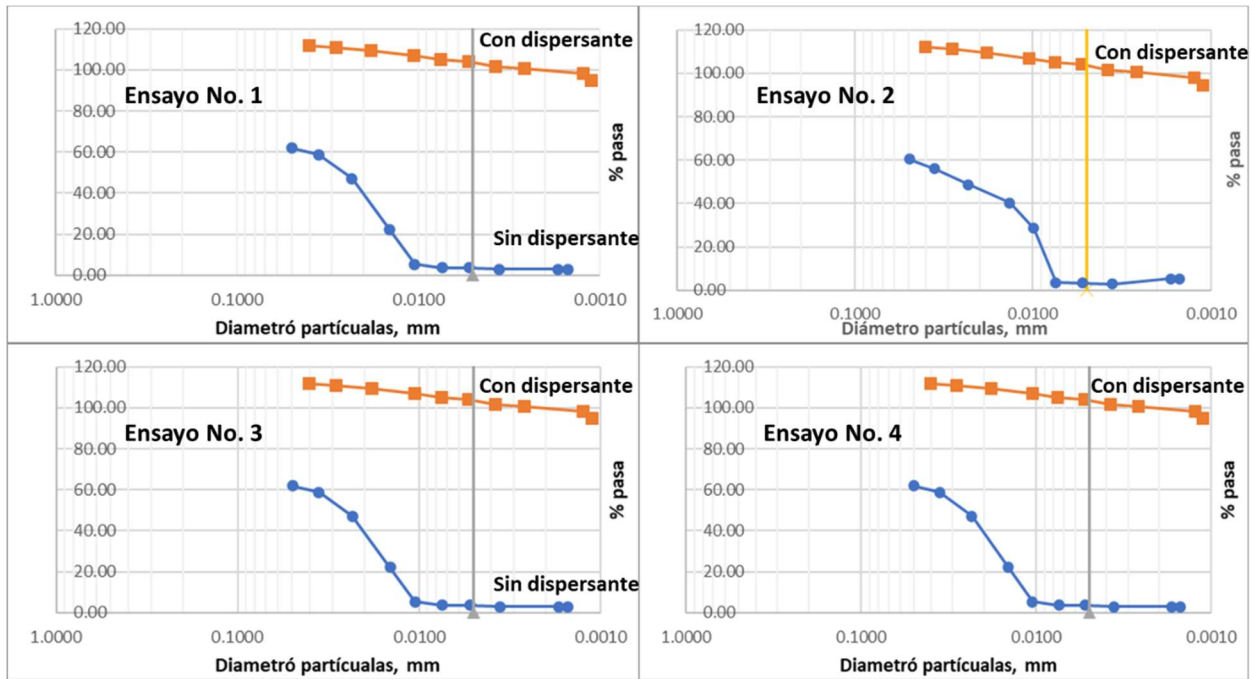


Figura 58. Curvas de distribución granulométrica ensayo de doble hidrómetro para estimación potencial de erodabilidad se observa la variación del diámetro de las partículas con el porcentaje que pasa cada uno de los tamaños de estas.

La tabla 34 muestra los criterios de clasificación de suelos dispersivos en el ensayo de doble hidrómetro. La tabla 35 resume los resultados obtenidos.

Porcentaje de Dispersión	Grado de Dispersión
<30	No dispersivo
30 a 50	Intermedio
>50	Dispersivo

Tabla 34. Criterios de evaluación grado de dispersión de un suelo aplicando el ensayo de doble hidrómetro.

Ensayo No.	P (%)	Q (%)	Porcentaje dispersión	Grado dispersión
1	3.57	103.45	3.45%	No dispersivo
2	3.28	103.45	3.17%	No dispersivo
3	3.57	86.76	4.11%	No dispersivo
4	3.28	86.76	3.78%	No dispersivo

Tabla 35. Grado de dispersión suelos derivados de cenizas volcánicas en el Altiplano Cundiboyacense.

En general los suelos derivados de cenizas volcánicas con alto grado de alteración y minerales constituyentes característicos como la meta halloysita no son susceptibles a fenómenos de erosión interna. La tendencia a flocular y formar agregaciones características de este tipo de suelos impide la dispersión del material sometido a flujo interno o en condiciones de agua estática.

En este trabajo no se evalúa la erosión superficial, esta no se contempló en el alcance, sin embargo, se resalta que este fenómeno es identificado en el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras realizado por el IGAC (2000 y 2005) en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Puntualmente para la ciudad de Tunja la erosión superficial es catalogada como severa, asociada en muchos casos a la actividad antrópica e intensas lluvias. En observaciones realizadas sobre distintos taludes e imágenes satelitales de la zona de estudio se identificó la pérdida de cobertura vegetal, que facilita la erosión superficial, como una de las principales características de los taludes colapsados o en proceso de falla.

En la imagen 21 se presentan algunos de los casos observados sobre la doble calzada Bogotá – Sogamoso, en ambos sentidos, en el área comprendida entre Tierra Negra y Tunja.



Imagen 21. Fenómenos de inestabilidad de taludes ocasionados por la pérdida de cobertura vegetal y erosión superficial, casos observados en la zona de estudio. Imágenes A y B son fuente propia, imagen C extraída de Google Maps (Street View). En B y C se puede observar el desprendimiento superficial de material producto de la erosión.

5.6. Inclinación máxima de taludes en suelos derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense.

El Altiplano Cundiboyacense exhibe una topografía suave, es decir, las pendientes de sus laderas se mantienen en inclinaciones muy bajas. En esta sección, se pretende aclarar este hecho mediante el análisis de estabilidad de taludes con los parámetros resistencia al corte de los ensayos de corte directo CD (ejecutado a muy bajas velocidades) y triaxial UU, para distintos mecanismos de falla; haciendo uso de metodologías de equilibrio límite y algunos métodos de análisis simple para taludes verticales y talud infinito.

5.6.1. Mecanismo de falla rotacional

En las visitas a campo se observó que el mecanismo de falla más común es el rotacional, siendo este también, el mecanismo de falla característico de depósitos homogéneos de suelos cohesivos blandos. Se identifica la ocurrencia de movimientos complejos como deslizamientos rotacionales retrogresivos debidos a la pérdida de soporte generada por el deslizamiento inicial, los cuales agravan las condiciones de estabilidad de muchas zonas del Altiplano, en muchos casos estos daban lugar a flujos de tierra.

Las imagenes 22 a 28, exponen algunos deslizamientos rotacionales observados durante las salidas realizadas, en estos es posible apreciar claramente la morfología típica generada por este tipo de movimientos. Se aprecian los escarpes de la corona, el levantamiento del terreno y la forma lobulada en el pie del deslizamiento. Las pendientes a las que se mantienen estables estos taludes no corresponden a las reportadas por otros autores en otras zonas del país sobre suelos derivados de cenizas volcánicas, los cuales alcanzan alturas de 10 a 20 metros con pendientes superiores a 60° (Forero et al.,1999, Redondo, 2003, Herrera, 2006, Lizcano et al., 2006). En contraste, el talud muestreado en el perfil Tunja 1 (TJ-1) tiene una altura cercana a los siete (7) metros e inclinación máxima y promedio de 34° y 29° respectivamente.



Imagen 22. Deslizamientos rotacionales en la zona alta de un depósito de cenizas volcánicas en cercanías de Tierra Negra, se observa el escarpe principal de falla, al igual que los flancos del deslizamiento, en la fotografía de la izquierda se observa la implementación de sistemas de estabilización (trinchos). Es posible ver estos grandes deslizamientos en la figura 26, en la sección 4.3, en esta la morfología se observa claramente. Fuente propia.



Imagen 23. Enorme deslizamiento cuyo movimiento más probable corresponde a un deslizamiento rotacional, su magnitud se aprecia en la figura 26 de la sección 4.3. Evidencia las grandes masas que involucra este tipo de depósitos. Fuente propia.



Imagen 24. Movimiento complejo correspondiente a un deslizamiento rotacional retrogresivo en el municipio de Ventaquemada, en la fotografía de la izquierda se puede identificar un escarpe de menor magnitud, al fondo se identifica el flanco derecho y escarpe principal del deslizamiento. La fotografía derecha fue tomada tiempo después, en el mismo lugar, mostrando el avance del deslizamiento; el material situado en la parte superior se transporta sobre el deslizamiento más antiguo, por tal razón, no es posible identificar el escarpe de menor magnitud. Fuente propia.



Imagen 25. Deslizamiento rotacional en el sector de Tierra Negra, se observa el escarpe principal en la zona media del talud, el deslizamiento podría evolucionar a un movimiento complejo retrogresivo. Fuente propia.



Imagen 26. deslizamiento en zona de Ventaquemada, se observa la corona del deslizamiento dentro de la calzada, también es posible apreciar el levantamiento del material debido al movimiento sobre la superficie circular de falla generada. Fotografía suministrada por Servicios de Ingeniería Ltda - SIL.



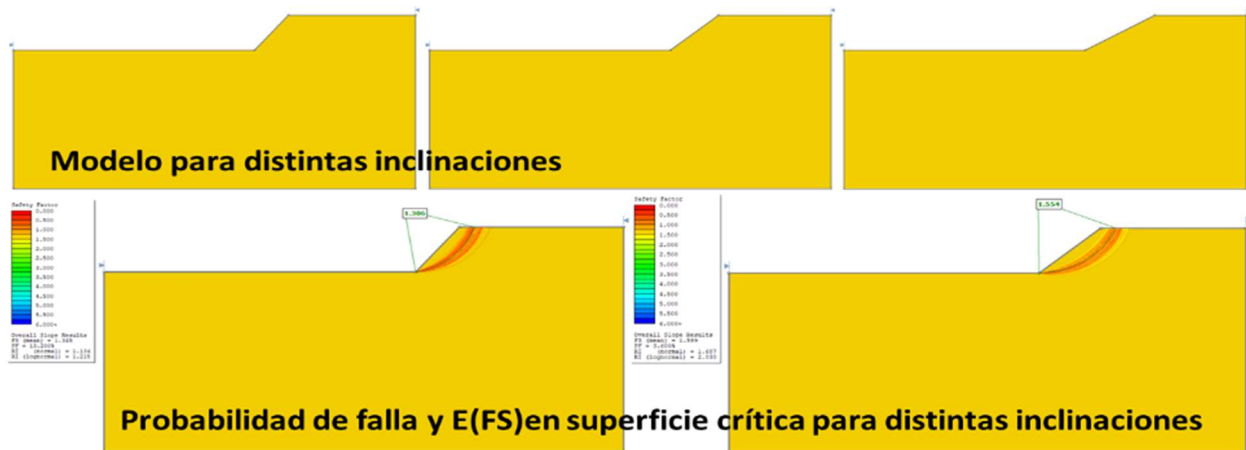
Imagen 27. Posible deslizamiento rotacional, podría convertirse en un movimiento complejo. En este se han aplicado algunas medidas de mitigación, como la instalación de un muro en gaviones y posteriormente un muro de contención. Fuente propia.



Imagen 28. Enorme zona inestable conformada por distintos deslizamientos de menor magnitud, en la figura 23 se aprecia la extensión de esta zona.

Mediante el software “Slide 2D” se realiza el análisis de equilibrio límite para determinar las superficies de falla críticas generadas en un deslizamiento rotacional, aplicando lo expuesto en

la sección 4.9; para distintas alturas de talud se buscó la inclinación máxima para obtener una probabilidad de falla de 0.02%, asimismo, la inclinación para obtener valores esperados del factor de seguridad iguales a 1.0 y 1.5, este último de acuerdo con el reglamento NSR-10. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 60.



Gráficas para determinación de pendiente taludes

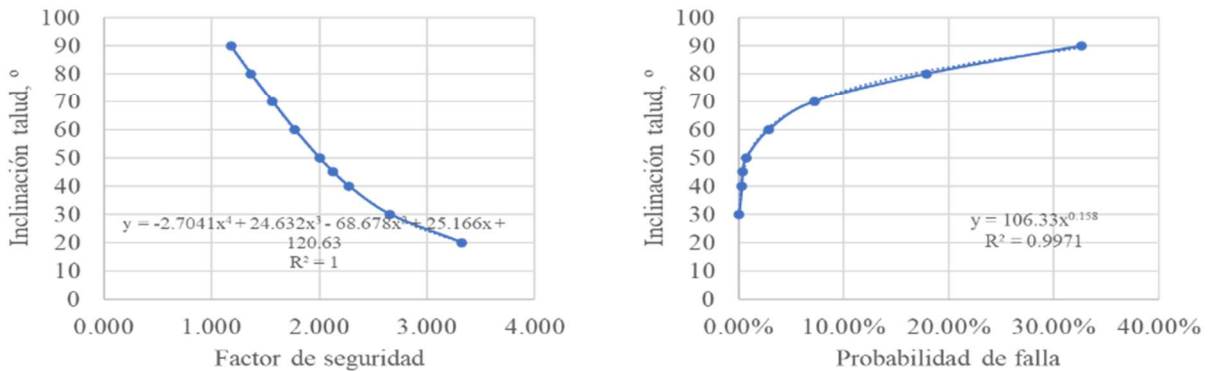


Figura 59. Procedimiento llevado a cabo para la determinación de la inclinación máxima para una P_f igual a 0.02% y para $E(FS)$ iguales a 1.0 y a 1.5 en la superficie circular crítica, mediante análisis de equilibrio limite en software “Slide 2D”.

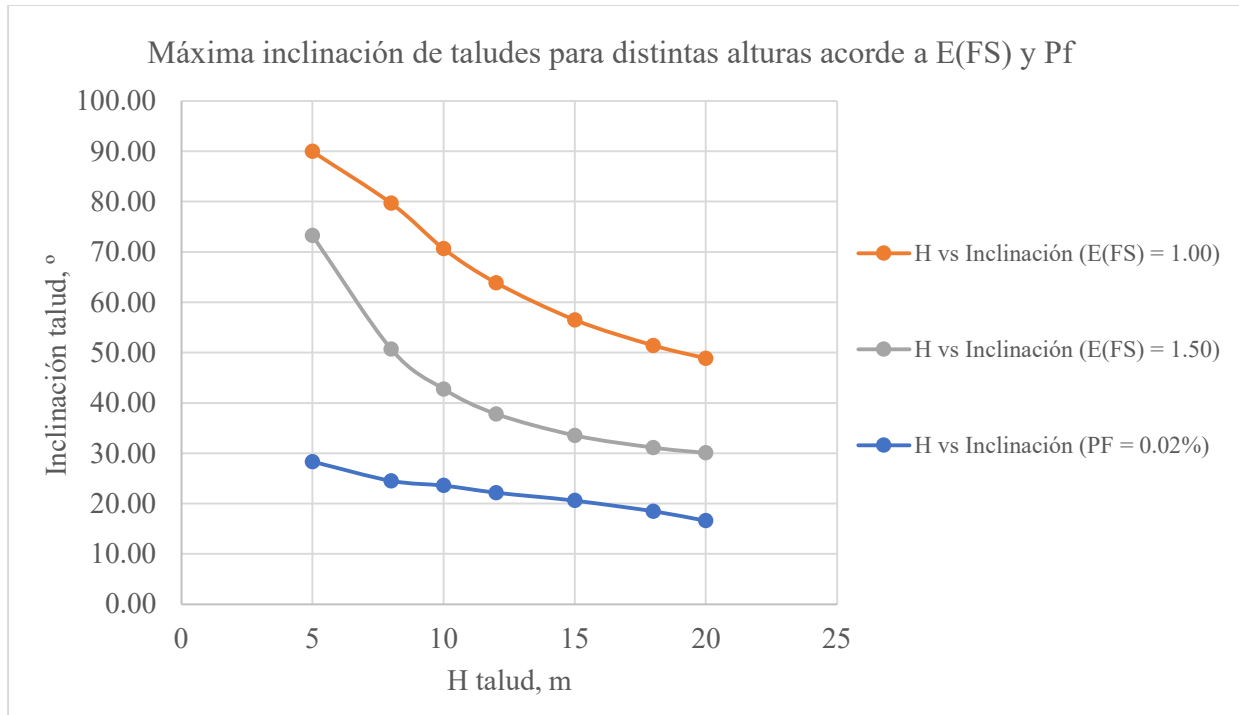


Figura 60. Inclinación máxima de taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas para distintas alturas, en el rango de resistencia al corte determinado mediante ensayos de corte directo en condiciones CD. Sin tener en cuenta sobrecarga en la cresta del talud.

Teniendo en cuenta la figura anterior (60), para un talud de 20 metros de altura se obtienen inclinaciones de 16.63° , 48.88° y 30.08° para una Pf de 0.02%, un E(FS) de 1.0 y un E(FS) de 1.5 respectivamente. Teniendo en cuenta la incertidumbre inherente en geotecnia, para una Pf de 0.02% y un E(FS) de 1.5, la inclinación máxima representa de buena manera las configuraciones de taludes de corte y laderas presentes sobre el Altiplano, mientras que, la inclinación correspondiente a un E(FS) de 1.0 dista de las observaciones realizadas en la zona. Si el análisis se basa en confiabilidad la probabilidad de falla seleccionada representa de muy buena manera el comportamiento general de los taludes observados en la zona. La tabla 36 resume las configuraciones obtenidas.

Lo anterior, da respuesta a la topografía suave que exhibe el Altiplano Cundiboyacense. En la imagen 29 se evidencia esta condición, representada en las bajas pendientes a las que naturalmente se pueden mantener los taludes y laderas en suelos derivados de cenizas volcánicas.

H Talud (m)	Inclinación talud (°)		
	PF = 0.02%	E(FS) = 1.00	E(FS) = 1.50
5	28.35	99.05	73.30
8	24.55	79.70	50.72
10	23.61	70.67	42.78
12	22.20	63.90	37.82
15	20.62	56.52	33.58
18	18.50	51.42	31.13
20	16.63	48.88	30.08

Tabla 36. Resumen de las inclinaciones máximas para distintas alturas de talud en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense, teniendo en cuenta una probabilidad de falla (Pf) de 0.02% y valores esperados del factor de seguridad [E(FS)] de 1.0 y 1.5.

En general, en suelos derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense, con alto grado de meteorización, no es posible mantener taludes estables con inclinaciones superiores a los 60° para alturas superiores a los 15 metros.



Imagen 29. Topografía suave exhibida en el paisaje del Altiplano Cundiboyacense, relacionada con los valores de resistencia al corte obtenidos en estos suelos; A) disposición natural suelo derivado de cenizas volcánicas en el contacto suelo roca, este se deposita formando un ángulo aproximado de 14° con la horizontal; B) y C) topografía suave presente en el altiplano, se observan colinas redondeadas y pendientes bajas en laderas naturales.

5.6.2. Mecanismo de falla traslacional

En condición no drenada, se verifica la altura máxima de un talud infinito mediante la expresión $H = \frac{Su}{FS \cdot \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \text{sena}}$, donde, H es la altura del talud infinito, Su es la resistencia al corte en condición no consolidada no drenada, FS es el factor de seguridad, γ es el peso unitario total del suelo y α es la inclinación de la superficie de falla. En la expresión anterior se identifica que el ángulo de inclinación crítico corresponde a 45° . El factor de seguridad usado en el análisis corresponde a la unidad.

Se evalúa el rango de valores de cohesión obtenidos en los ensayos triaxiales UU. La altura máxima para una inclinación crítica de 45° con la variación de Su se presenta en la figura 61.

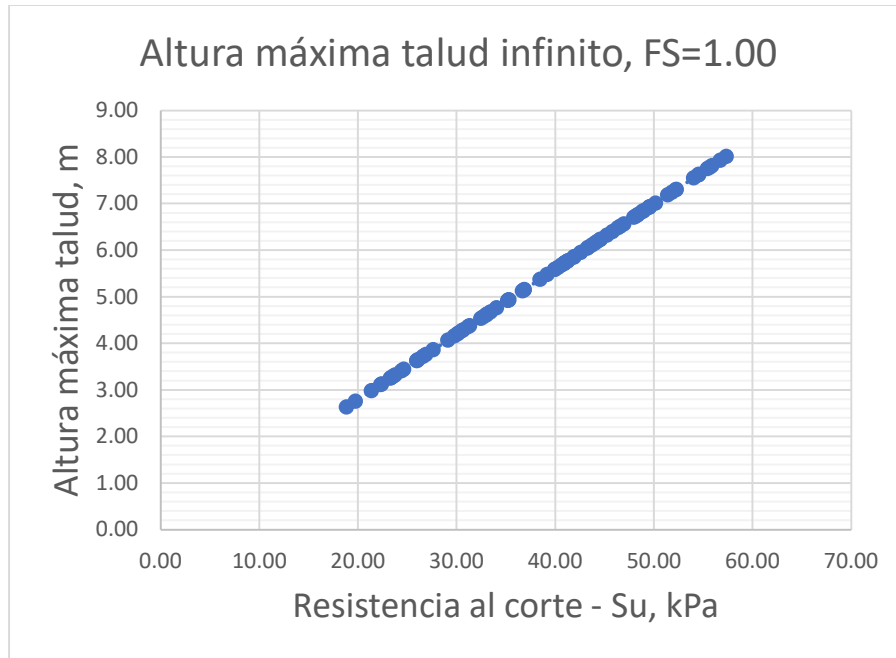


Figura 61. Variación de la altura máxima para un talud infinito con la resistencia, para un ángulo crítico de 45° , factor de seguridad de uno (1) y peso unitario igual a 16 kN/m^3 .

Se observa una relación de proporcionalidad obteniendo un valor máximo de 8 metros y un mínimo de 2.5 metros de altura, para un rango de resistencia al corte de 17.4 kPa a 57.4 kPa.

5.6.3. Corte vertical

Se estima la altura máxima para un corte vertical (figura 62) siguiendo la metodología anteriormente usada; se varia la cohesión, en este caso el ángulo de la superficie de falla crítica también corresponde a los 45° , de acuerdo con la expresión $H = \frac{2 * Su}{FS * \gamma * \cos \alpha * \text{sen} \alpha}$. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 63.

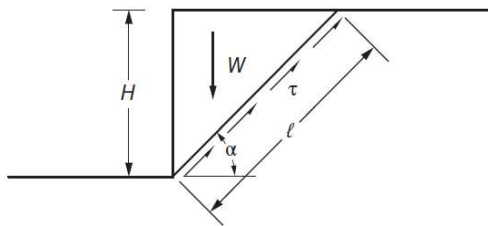


Figura 62. Corte vertical evaluado, para la determinación de la altura máxima con la variación de la resistencia al corte, Su.

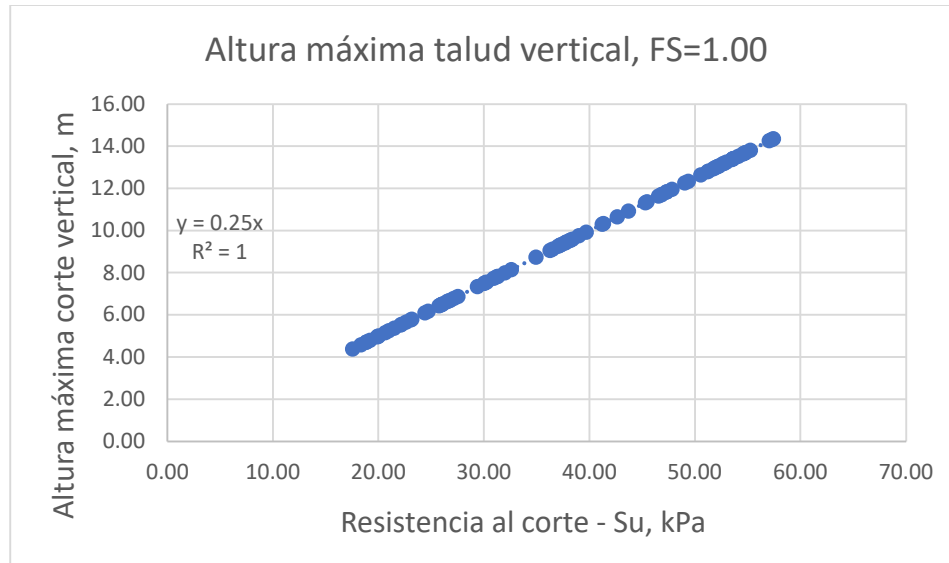


Figura 63. Variación de la altura máxima para un talud de corte vertical con la resistencia, para un ángulo crítico de 45° , factor de seguridad de uno (1) y peso unitario igual a 16 kN/m^3 .

Se obtiene una altura máxima de 14 metros y una mínima de 4 metros para el rango de resistencias evaluado. Estos resultados guardan una similitud con los obtenidos para un mecanismo de falla rotacional, cabe aclarar que el factor de seguridad con el que se evalúa es igual a la unidad.

6. RELACIÓN DE LA MINERALOGÍA CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

Los suelos derivados de cenizas volcánicas estas constituidos por minerales característicos, como la caolinita y la meta halloysita. Sobre el Altiplano Cundiboyacense, las dataciones muestran un alto grado de alteración, esto se refuerza con el hecho de que en los análisis de XRD el contenido de minerales amorfos es muy bajo e incluso inexistente, entonces, el vidrio volcánico y mineraloides o minerales amorfos como alófana e imogolita han dado lugar a minerales como meta halloysita y caolinita, identificados en la totalidad de las muestras.

La morfología y disposición estructural de estos minerales han mostrado condicionar el comportamiento de los suelos. En este trabajo se lograron establecer algunas relaciones de interés que reafirman esta premisa, tanto para propiedades las físicas como para las mecánicas.

6.1. Meta halloysita y humedad natural

La figura 64, muestra la relación que existe entre el contenido de meta halloysita en la muestra y su humedad natural. Los resultados presentan algunos datos dispersos, que pueden relacionarse con la afectación a la humedad durante el muestreo, en la visita No. 1 a Tierra Negra (TN) se presentaron lluvias.

La tendencia definitiva de esta relación podría ser cualquiera de las dos presentadas en la figura 64, polinómica o lineal, por lo que, un mayor número de muestras analizadas que favorablemente cubran el rango entre 20% y 30% de contenido de meta halloysita definirían la tendencia real.

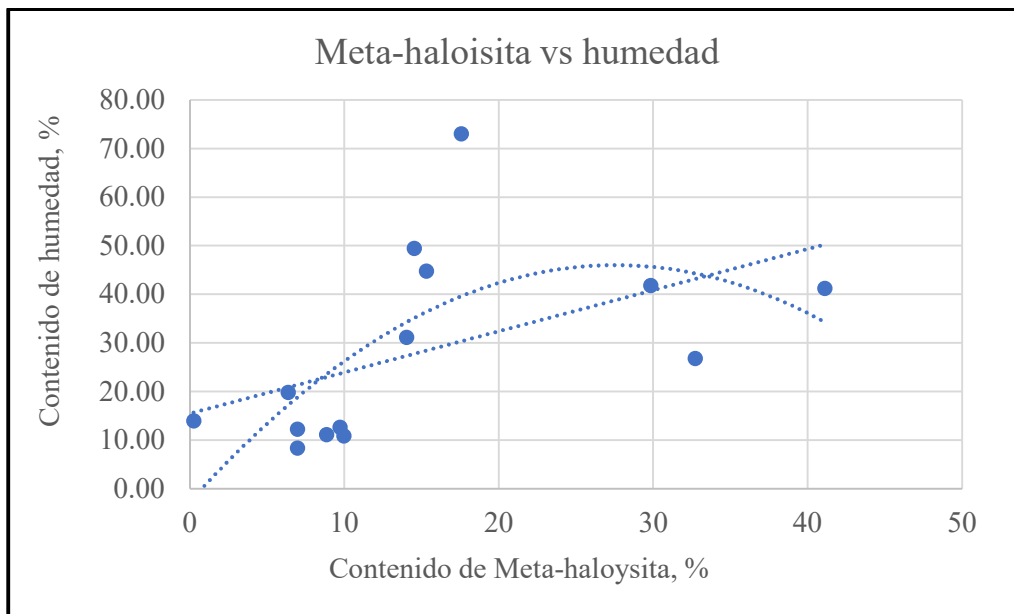


Figura 64. Relación entre el contenido de meta halloysita en los especímenes y el contenido de humedad.

Adicionalmente, como se expuso en la sección de límites de Atterberg (5.2.2), la determinación de estos está directamente relacionada con la humedad inicial del espécimen a ensayar, principalmente y mucho más notoria, con el índice de plasticidad (figuras 65 y 66).



Figura 65. Relación de proporcionalidad entre la humedad inicial del espécimen y su límite líquido.

En consecuencia, si existe una relación entre la humedad natural del espécimen y el contenido de meta halloysita, se puede inferir, que existe una relación entre la presencia de este mineral y la consistencia del suelo, puntualmente afectando la plasticidad del material. Propiedad que condiciona la respuesta esfuerzo-deformación, compresibilidad y resistencia al corte de los suelos.

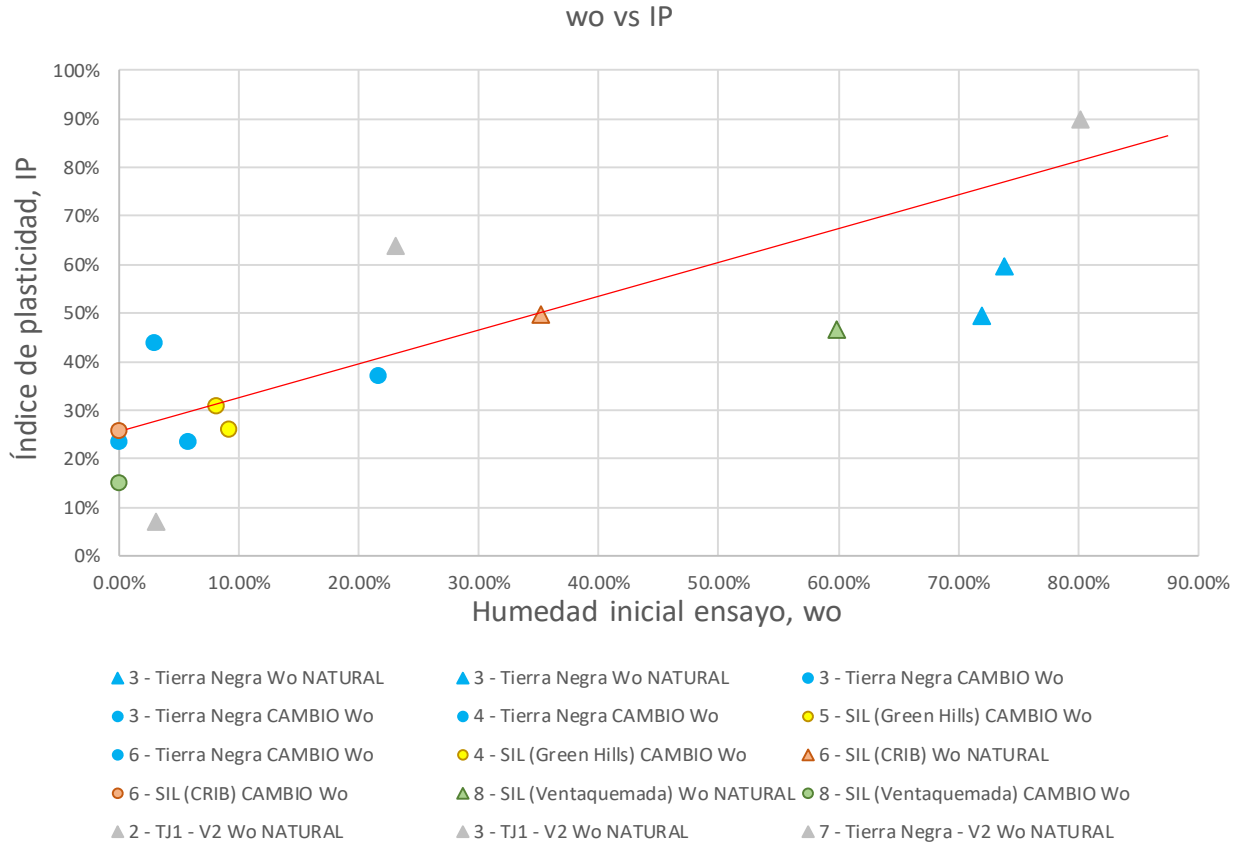


Figura 66. Relación de proporcionalidad entre la humedad inicial del espécimen y su índice de plasticidad.

6.2. Meta halloysita con la gravedad específica y la saturación

Otras de las relaciones que se pudieron establecer con coeficientes de correlación adecuados corresponden a la variación del contenido de meta halloysita con la gravedad específica y la saturación. En las figuras 67 y 68 se presentan los resultados obtenidos.

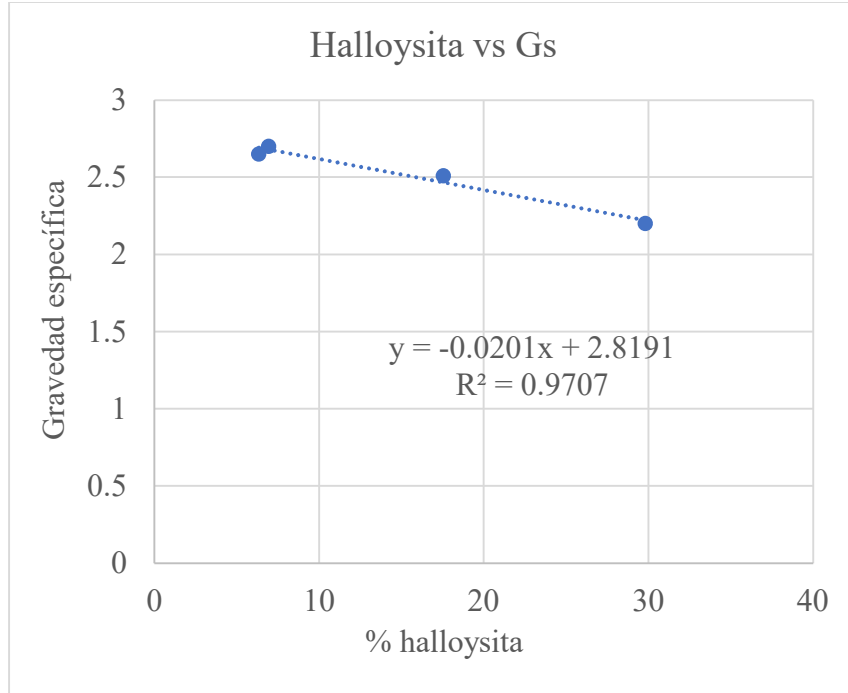


Figura 67. Variación de la gravedad específica de las partículas sólidas con el contenido de meta halloysita.

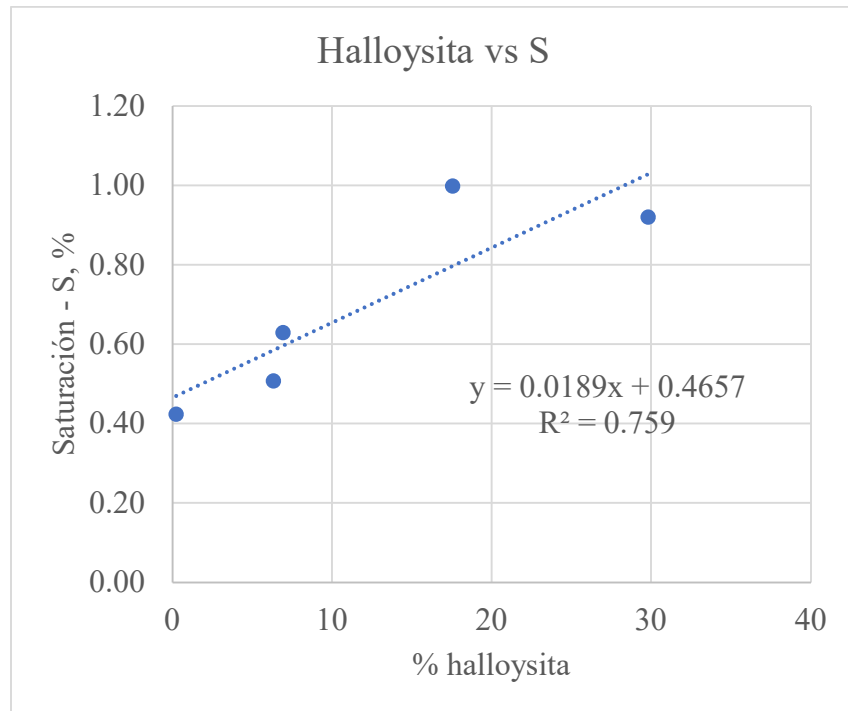


Figura 68. Variación de la saturación del suelo con el contenido de meta halloysita.

La típica estructura tubular hueca de la meta halloysita o halloysita 7 angstrom condiciona dos de las propiedades físicas de los suelos que están directamente relacionados con su estructura interna y morfología de las partículas sólidas, en este caso la gravedad específica (G_s) y la saturación (S). A mayor contenido de meta halloysita el valor de G_s disminuye, debido a que la estructura hueca de los nanotubos hace que las partículas sólidas sean más livianas, por otra parte, sus partículas tienden a formar agregaciones generando configuraciones abiertas, tipo panal, lo cual incide en este comportamiento. En contraste, a mayor contenido de meta halloysita la saturación (S) aumenta, este comportamiento se relaciona con la morfología del mineral y la estructura que conforma, en la cual, el agua puede llenar fácilmente los vacíos que existan entre las partículas. Comportamiento que podría confirmarse midiendo la permeabilidad del material, procedimiento no contemplado en el alcance del presente trabajo.

6.3. Mineralogía y propiedades mecánicas.

Sobre algunas las muestras tomadas en los perfiles 1 y 2 de Tunja (TJ1 y TJ2) se determinó la mineralogía y se realizaron ensayos de corte directo en condición consolidada drenada (CD) bajo dos tipos de velocidades; muy bajas para permitir la disipación del exceso de presión de poros y otras mayores que no permitían la completa disipación. Se obtuvo relaciones poco claras entre el contenido de meta halloysita y los parámetros de resistencia al corte, mientras que, se obtuvo mejores relaciones entre el contenido de caolinita y estos parámetros.

La figura 69, muestra la relación entre el contenido de meta halloysita y la cohesión. Los parámetros obtenidos mediante ensayos de corte directo con velocidades entre 0.033 a 0.002 mm/min, es decir, a largo plazo, no muestran el condicionamiento significativo de la presencia de este mineral en el comportamiento cohesivo del material. Por otro lado, para velocidades de 0.30

mm/min; en el corto a mediano plazo, el comportamiento de la cohesión es directamente proporcional al contenido de meta halloysita.

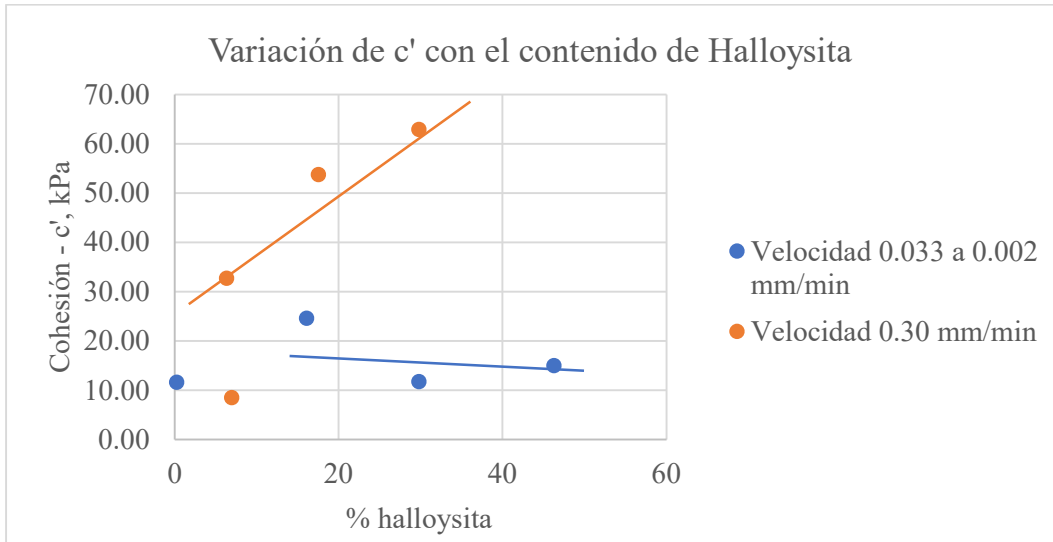


Figura 69. Variación de la cohesión con el contenido de meta halloysita

La figura 70, muestra que tanto para el corto a mediano y largo plazo, el contenido de meta halloysita no incide en el ángulo de fricción interna. Las funciones obtenidas tienden a la horizontal, mostrando que este mineral no condiciona el desarrollo de fricción entre las partículas del suelo.

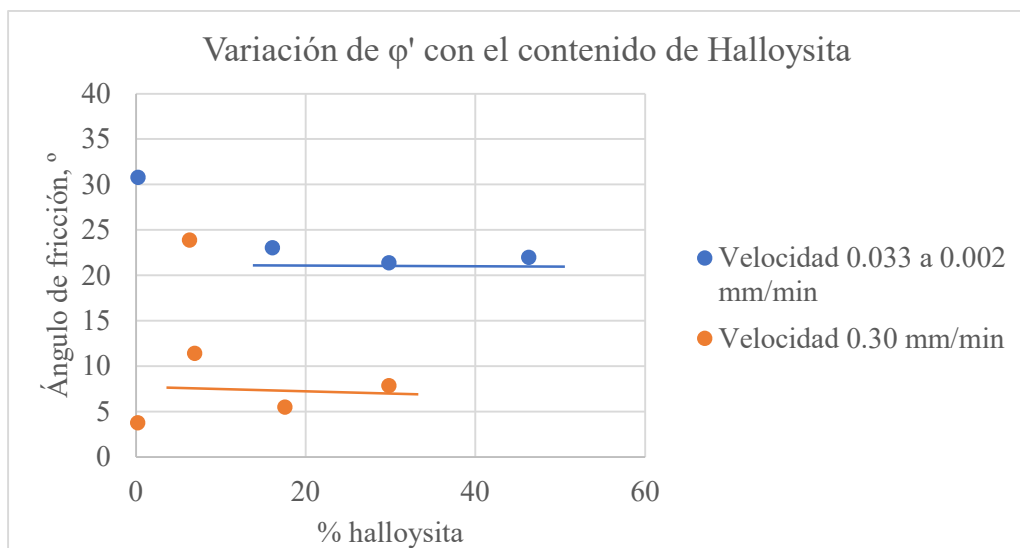


Figura 70. Variación del ángulo de fricción con el contenido de halloysita.

En el caso de la caolinita se observan relaciones claras tanto con la cohesión como con el ángulo de fricción en el corto a mediano plazo. En cuanto a la cohesión es evidente que a medida que el contenido de caolinita aumenta este parámetro disminuye. Esto muestra que por lo menos en este escenario la meta halloysita gobierna el comportamiento cohesivo del material; asociado a la estructura cementada típica que conforma este tipo en minerales.

Lo contrario sucede con el ángulo de fricción, en este escenario, este parámetro aumenta significativamente con el contenido de caolinita, la tendencia que mejor describe este comportamiento presenta cierto grado de curvatura. Esto prueba que el aporte a la fricción del material está dado por la caolinita. A largo plazo, no se lograron establecer variaciones en ϕ' con el contenido de caolinita de la muestra.

Las figuras 71 y 72 muestran lo descrito anteriormente.

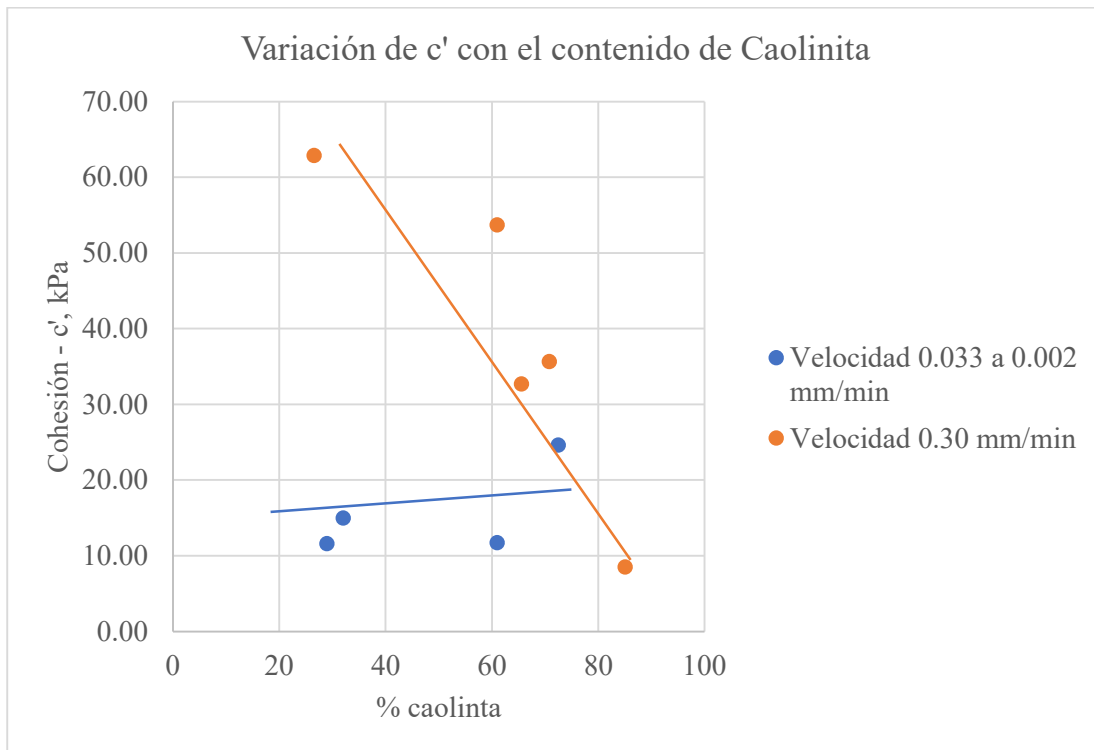


Figura 71. Variación de la cohesión con el contenido de caolinita.

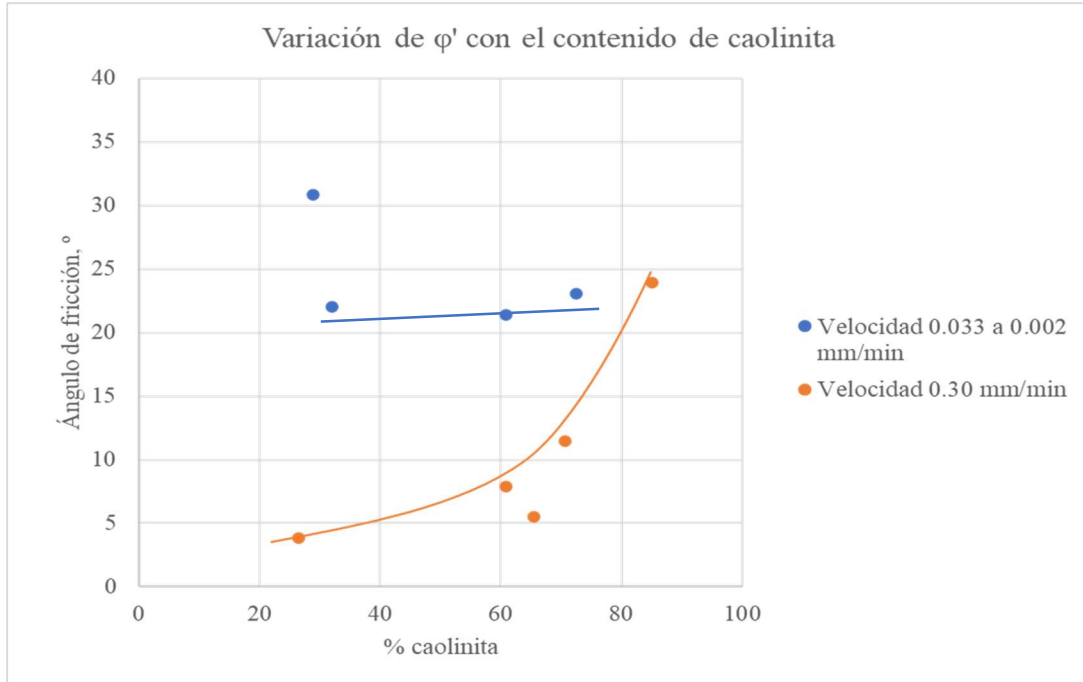


Figura 72. Variación del ángulo de fricción con el contenido de caolinita.

Así pues, la presencia de minerales típicos de altos grados de meteorización de cenizas volcánicas, como es el caso de la meta halloysita y la caolinita, muestran el condicionamiento que generan en el comportamiento mecánico del material en el corto a mediano plazo; cuando no ha ocurrido por completo la disipación del exceso de presión de poros y la muestra presenta niveles altos de saturación. Esto indica que la interacción de la estructura interna del suelo con el agua y las condiciones de drenaje juegan un papel fundamental en la respuesta mecánica del material. Por el contrario, en el largo plazo, cuando ha ocurrido la disipación del exceso de presión de poros estos minerales de arcilla no tienen incidencia alguna en la respuesta mecánica del material, en este caso, la interacción con otras partículas, es decir, el conjunto podría condicionar su comportamiento. Sin embargo, respecto al resto de minerales determinados mediante la técnica de XRD, como Cuarzo, Cristobalita, Anatasa, Hematita y demás detectados en menor proporción, no se obtuvo evidencias para relacionarlos con el comportamiento mecánico de los suelos derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense con muy alto grado de alteración.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los depósitos de suelo sobre el Altiplano Cundiboyacense analizados mediante técnicas de XRF y XRD tienen un origen volcánico. La presencia de minerales característicos como la meta halloysita o halloysita 7 Å producto de la alteración de minerales primarios de cenizas volcánicas (principalmente vidrio volcánico) confirman el origen de estos depósitos de suelo. Adicionalmente, la cristobalita, que es reconocida como un indicador de cenizas volcánicas, fue identificada en todas las muestras analizadas por medio de XRD.
- La composición química, determinada mediante el análisis de XRF, muestra el predominio de óxidos de hierro, aluminio y titanio, sobre óxidos de calcio, sodio y potasio. Teniendo en cuenta las condiciones frías y secas características del Altiplano, los suelos aquí desarrollados provienen de la depositación y alteración del material emanado por una fuente volcánica del cuaternario o más antigua, posiblemente el volcán de Paipa. Además, la datación realizada por Jaramillo et al. (2005) en la zona central de un afloramiento localizado en el sector de Tierra Negra resulta en un rango estrecho de edades, evidencia de la ocurrencia de distintos eventos volcánicos. La actividad de los volcanes que dieron origen a estos depósitos podría estar relacionada al levantamiento de la Cordillera Oriental, tema que podría tratarse en estudios posteriores, con el fin de establecer correctamente la fuente de origen de estos suelos.
- El grado de alteración de los suelos es bastante alto, explicado por las dataciones realizadas por Jaramillo et al. (2005) en esta zona y por la presencia de minerales de arcilla como la meta halloysita producto de la alteración del mineral amorfo alófana, este último producto de la meteorización del vidrio volcánico.

- Los depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas se extienden en gran parte del Altiplano Cundiboyacense, sobre las distintas formaciones geológicas presentes en esta región, como las formaciones Tilatá y Tunja. Los mapas de suelos del IGAC, para distintos paisajes del Altiplano, indican la extensión aproximada de estos depósitos. Por otro lado, los mapas desarrollados por el SGC presentan las unidades cronoestratigráficas del área de estudio, las cuales van principalmente desde el cretácico al cuaternario, esto concuerda con el principal periodo de levantamiento de la Cordillera Oriental, las épocas eruptivas que dieron origen a los depósitos de suelo de estudio y su secuencia estratigráfica.
- La morfología más común y estable de la meta halloysita o halloysita 7 Angstrom corresponde a nanotubos, alargados y huecos que forman una estructura abierta. Mediante microscopia electrónica de barrido o de transmisión (SEM y TEM respectivamente) esta estructura puede observarse. Carrillo et al. (2014) muestran mediante TEM la morfología del mineral de arcilla meta halloysita tomado en el sector de Mondoñedo, Cundinamarca; localidad que también pertenece al Altiplano Cundiboyacense. Adicionalmente, Cavallaro et al. (2017) muestran dicha estructura abierta con mayor detalle, formada por nanotubos de halloysita en distintas localidades del mundo, zonas que se caracterizan por su alta actividad volcánica. Massaro, Noto y Riela (2020) describen la morfología cristalina y la estructura atómica de la halloysita confirmando la configuración descrita por otros autores.
- El contenido de humedad inicial, relacionado con el contenido de meta halloysita, ha mostrado condicionar la consistencia del material, afectando directamente el límite líquido e índice de plasticidad. Estos cambios en la humedad inciden en la

- compresibilidad, respuesta esfuerzo – deformación y resistencia al corte, puesto que, varía la plasticidad del material.
- Los ensayos de corte directo en condición consolidada drenada (CD) a velocidades muy bajas muestran que los parámetros de resistencia al corte; cohesión (c') y ángulo de fricción interna (ϕ'), no tienen una clara relación con la profundidad, confirmando la hipótesis de la importancia de su estructura interna sobre su historia de esfuerzos. Además, para ambos parámetros se observó la estrecha relación que tienen con las humedades inicial y final del ensayo; a medida que aumenta el contenido de agua en el espécimen lo hace también la cohesión, por el contrario, el ángulo de fricción disminuye. Esto mostraría la interacción del agua con la estructura mineral del suelo, tema que requiere de un estudio más detallado.
 - Ensayos de corte directo ejecutados a velocidades mayores, muestran una relación entre la humedad final del ensayo y la cohesión del material, en este caso c' disminuye con el contenido de agua, contrario a lo que ocurre en el punto anterior. Esto indica la influencia que tiene las condiciones de drenaje en el comportamiento mecánico, las cuales están relacionadas con la presencia de minerales como la meta halloysita.
 - Se resalta que para los ensayos de corte directo bajo distintas velocidades en general la respuesta esfuerzo deformación es propia de un material dúctil, con tendencia a presentar endurecimiento por deformación. Condición que podría estar relacionada con la pérdida de enlaces cementantes, cuyo aporte a la resistencia es escaso, por lo tanto, a medida que se rompen estos enlaces la resistencia tiende a aumentar.
 - En condiciones a corto plazo, analizadas mediante el ensayo triaxial UU, sobre muestras en estado natural (sin remoldeo) ensayadas a humedad natural y alterada por

ciclos de secado y humedecimiento se ha determinado que la humedad inicial y final condicionan el valor de la resistencia al corte, S_u . De acuerdo con la tendencia mostrada, para ensayos de compresión sobre especímenes saturados, estos presentan una humedad óptima en la cual el valor de resistencia es el máximo posible. Suelos con contenidos de humedad muy altos o bajos, los cuales representan la saturación del material, presentan valores bajos de cohesión en condición no drenada. Cabe resaltar que, de acuerdo con las relaciones volumétricas y gravimétricas obtenidas, humedades relativamente bajas, entre 20% y 40% conducen a valores de saturación superiores al 90%.

Por lo tanto, el clima seco con régimen de lluvias bimodal caracterizado por la ocurrencia de intensas lluvias, es uno de los factores detonantes de deslizamientos, principalmente en las dos épocas de lluvias, que llevan al material a condiciones de alta saturación. Reafirmando las observaciones reportadas en la literatura sobre estabilidad de taludes o movimientos en masa en suelos derivados de cenizas volcánicas.

- La presencia de minerales de arcilla como meta halloysita y caolinita están altamente relacionados con la cohesión del material, en el corto plazo. Para la meta halloysita como para la caolinita su relación con la cohesión y el ángulo de fricción dependen de las condiciones de drenaje, por lo tanto, de la disipación del exceso de presión de poros. Esto puede atribuirse a que su estructura hueca, cementada, semejante a un panal puede incluir agua en su interior, similar a la porosidad dual presentada en la figura 10, condicionando la respuesta ante la aplicación de cargas o cambios en las condiciones de esfuerzos. Por el contrario, en el largo plazo, la incidencia de estos minerales en las propiedades mecánicas no es significativa, lo que podría explicarse en el hecho de que,

al ocurrir el drenaje, es decir, el flujo interno del agua hasta encontrar una condición de equilibrio, la interacción de todas las estructuras formadas por las partículas presentes en el material tendría mayor relevancia en su desempeño mecánico. Es importante resaltar que hace falta mucha información al respecto, con el fin de comprender de mejor manera cual es la incidencia de la nanoestructura y/o microestructura en la respuesta de suelos derivados de cenizas volcánicas ante la aplicación de cargas o cambios en el estado de esfuerzos.

- La gravedad específica de las partículas sólidas y la saturación del suelo; propiedades que están claramente relacionadas con la configuración interna que pueda presentar el suelo, están inversa y directamente relacionadas con el contenido de meta halloysita respectivamente. A mayor contenido de meta halloysita el valor de G_s disminuye, por el contrario, la saturación aumenta.
- La estructura interna de la meta halloysita o halloysita deshidrata y de la caolinita impiden la fácil ubicación de moléculas de agua en su interior, razón por la cual, los resultados de los ensayos determinaron un potencial de expansión bajo.
- La estructura tipo panal que presentan los suelos derivados de cenizas volcánicas implica que la deformación volumétrica más probable es el colapso. Los resultados mostraron valoraciones del potencial de colapso como moderado, con valores cercanos a moderadamente severo, confirmando esta afirmación. Adicionalmente, en normas, como la NSR-10, este tipo de suelo es catalogado como colapsable.
- Los suelos derivados de cenizas volcánicas del Altiplano Cundiboyacense presentan bajo potencial de erosión interna como se deduce de la designación del grado de dispersión del ensayo de doble hidrómetro, **no** dispersivo. Por otra parte, en visitas de

- campo no se logró evidenciar señales de este fenómeno, como tubificaciones en el talud o presencia de agua turbia proveniente del lavado interno del material. Sin embargo, se observó que procesos de erosión superficial, acompañados por pérdida de cobertura vegetal, se repiten en gran parte de los taludes colapsados o en proceso de falla. Los parámetros para la evaluación adecuada del fenómeno de erosión superficial salen del alcance del presente trabajo. Estimaciones del grado de erosión superficial en cercanías a la zona de estudio (Tunja) han sido realizadas por el IGAC, quienes asignaron un grado severo, relacionado en gran medida a la actividad antrópica y las lluvias intensas.
- El mecanismo de falla más común en taludes en depósitos de suelo derivados de cenizas volcánicas sobre el Altiplano Cundiboyacense, con alto grado de meteorización, corresponde a deslizamientos rotacionales, típico de suelos cohesivos homogéneos blandos. También se identificaron movimientos complejos de deslizamientos rotacionales retrogresivos, agravando las condiciones de estabilidad de taludes de corte y laderas.
 - La topografía suave que exhibe el Altiplano Cundiboyacense se debe a los valores de resistencia al corte en condiciones drenada (c' y ϕ') y no drenada (S_u) que pueden desarrollar estos suelos. A largo plazo, para el rango de cohesión y ángulo de fricción evaluado y una altura del talud de 20 metros se obtiene una inclinación aproximada de 17° y 30° , para un análisis probabilístico asociado a una P_f igual a 0.02% y para un valor esperado del FS de 1.5 respectivamente. Esto dista bastante de las configuraciones reportadas por otros autores, en estudios sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en otras regiones del país, con pendientes superiores a los 60° y alturas cercanas a los 20 metros. Por lo tanto, no es posible construir taludes escarpados con alturas superiores

a los 10 o 15 metros en los suelos del Altiplano Cundiboyacense, sin medidas de estabilidad adicionales.

- En la evaluación de parámetros de resistencia sobre los suelos de cenizas volcánicas del Altiplano se recomienda analizar el cambio generado con el contenido de humedad, debido a que, pequeñas variaciones pueden provocar pérdidas de resistencia significativas. Se resalta que el régimen bimodal de la región, con periodos realmente secos y deficitarios, y la ocurrencia de intensas precipitaciones durante periodos de lluvias generan claramente condiciones propicias para los cambios de humedad.
- Procedimientos como el tratamiento de este tipo de suelos con cal han mostrado aumentar la resistencia al corte para ensayos en condición no consolidada, no drenada, esto se observa en la figura 54, con resultados bastante satisfactorio para tiempos de curado cercanos a los 28 días.
- Es recomendable proteger de la entrada de agua el material constituyente de taludes en suelos de cenizas volcánicas con alto grado de alteración, con el fin de mantener las condiciones de humedad óptimas y conservar sus propiedades, evitando así el desarrollo de fenómenos que causen procesos de inestabilidad. Coberturas vegetales parecen ser eficaces en esta labor, sin embargo, definir la mejor solución puede tratarse en trabajos posteriores.
- Durante el desarrollo de este trabajo fue evidente la poca información sobre este tipo de suelos en la Cordillera Oriental y sobre todo en el Altiplano Cundiboyacense. Se logró establecer buenas relaciones entre su comportamiento mecánico, los minerales constituyentes, el contenido de humedad y las condiciones de drenaje, sin embargo, es claro que hacen falta estudios que muestren como es la interacción más precisa entre

los minerales característicos, cuáles son las técnicas y procedimientos más adecuados para mejorar su desempeño en aplicaciones geotécnicas, que otras aplicaciones podrían tener y definir puntualmente cual o cuales fuentes volcánicas que podrían haber dado origen secuencias estratigráficas de espesores tan considerables.

- Se recomienda a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, continuar con una línea de investigación enfocada en la interacción que tienen las estructuras y demás características de los suelos con el comportamiento mecánico de los materiales. De acuerdo con lo expuesto en este trabajo la interacción es bastante significativa, a escalas muy pequeñas (nanométrica o micrométrica) es posible plantear soluciones en busca de mejores condiciones mecánicas de los materiales, pero sin duda alguna, esto requiere de una amplia variedad de estudios.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aristizábal, J., Mendoza, N., 2017. Obtención de Propiedades Mecánicas a partir de la Relación V_p/V_s para Depósitos Superficiales de Ceniza Volcánica en Manizales Colombia. Revista Espacio. Volumen 38. 32, p.22.
- Arango, J., 1993. Características generales y comportamiento geotécnico de las cenizas volcánicas en la zona del antiguo Caldas. Trabajo de tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Bailey, S., 1990. Halloysite – A critical assessment. Proceedings of the 9th International Clay Conference, Strasbourg, 1989. Sci. Géol. Mém., 85, 89 – 98.
- Bommer, J., Rolo, R., Mitroulia, A., Berdousis, P., 2002. Geotechnical Properties and Seismic Slope Stability of Volcanic Soils. Department of Civil and Environmental Engineering. Imperial College, Londo, UK.
- Betancur, Y., Builes, M., Millán, A., 2013. Variación de las propiedades mecánicas de arcillas alófanas en Colombia al variar el grado de saturación. Revista EIA, 10(20) julio - diciembre, pp. 173-181. [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2013.10.20.173-181>.
- Caballero, V., Parra, M., Mora, A., 2010. Levantamiento de la cordillera oriental de Colombia durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: proveniencia sedimentaria en el sinclinal de nuevo mundo, cuenca valle medio del Magdalena. Boletín de Geología. Volumen 32, No.1, enero – junio 2010, pp 45-77.
- Carrillo, A., Urruchurto, C., Carriazo, J., Moreno, S., Molina, R., 2014. Caracterización estructural y textural de una halloysita colombiana. Revista Mexicana de Ingeniería

- Química. Vol. 13, No. 2. Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.
- Cavallaro, G., Chiappisi, L., Pasbakhsh, P., Gradzielski, M., Lazzara, G., 2017. A structural comparison of halloysite nanotubes of different origin by Small-Angle Neutron Scattering (SANS) and Electric Birefringence. *Applied Clay Science*.
 - Corredor, V., Terraza, R., Etayo, F., 2015. Geología de la plancha 228 Bogotá Noreste. Servicio Geológico Colombiano.
 - Cuervo, A., Pérez, N., Lamus, F., 2015. Levantamiento de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos. *Hipótesis, Apuntes científicos uniandinos*, núm. 19, pp 69-73. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias.
 - Escobar, L., Valencia, Y., 2012. Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín – Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
 - Forero, C., Gálvez, P., Fino, Ulloa, 1999. Estudio de la Estructura de las Cenizas Volcánicas de Armenia y su Relación con el Comportamiento Geotécnico. X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. *Boletín Colombiano de Geotecnia*. Sociedad Colombiana de Geotecnia.
 - Garay, H., Alva, J., 1999. Identificación y Ensayos en Suelos Dispersivos. Ponencia presentada en el XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huánuco.
 - Herrera, M., 2006. Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en Colombia: Estudio Fundamental e Implicaciones en Ingeniería. Trabajo de tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes.

- Horton, B.K., Parra, M. & Mora, A. 2020. Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, pp. 67–88. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>.
- Hidalgo, C., Pacheco, A., 2011. Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: aplicación. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, volumen 10, No. 19, pp 79-86.
- IGAC, 2000. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca. Tomos I, II y III y mapas de zonificación.
- IDEAM, 2015. Atlas interactivo: Atlas climatológico de Colombia. Minambiente. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- Jacquet, D., 1987. Bibliography on the physical and engineering properties of volcanic soils in New Zealand. NZ Soil Bureau Bibliographic Report 33. NZ Soil Bureau. Department of Scientific and Industrial Research.
- Jaramillo, J., Rojas, P., Garver, J., 2005. Neogene's Volcanism in the Cordillera Oriental of the Andes, Colombia. Earth Sciences Research Journal, Vol 9, No.1, 19 - 29.
- Kirkman, J., 1981. Morphology and structure of halloysite in New Zealand tephra. Clays and Clay Minerals 29, 1 - 9.
- Lizcano, A., Herrera, M., Santamarina, J., 2006. Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en Colombia. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 167.

- Manosalva, S., Amaya, E., Gil, M., Gavidia, O., Pérez, F. et al., 2010. Zonas Potenciales para Diatomitas en un Sector del Altiplano Cundiboyacense: Cartografía y Caracterización de Diatomitas Sector Tunja - Soracá - Oicatá - Tuta, Departamento de Boyacá. Acuerdo Específico No. 004 de 2010. INGEOMINAS, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).
- Massaro, M., Noto, R., Riela, S., 2020. Past, Present and Future Perspectives on Halloysite Clay Minerals. Department of Biological, Chemical and Pharmaceutical Sciences and Technologies. University of Palermo Viale delle Scienze.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), 2006. Plan Frutícola Nacional: Desarrollo de la Fruticultura en Boyacá. Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009. Resolución Número (2331), modifica Licencia Ambiental para llevar a cabo el proyecto de “Rehabilitación y Construcción de la Segunda Calzada Carretera Briceño – Tunja – Sogamoso”, en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Gobierno de Colombia.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2021. Información: Perfiles Económicos Departamentales: Departamento de Boyacá. Colombia.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2021. Información: Perfiles Económicos Departamentales: Departamento de Cundinamarca. Colombia.
- Montoya, D., Reyes, G., 2007. Geología de la Sabana de Bogotá. Publicaciones especiales del INGEOMINAS No 28. Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS. Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia.
- Mosavi, A., Sajedi-Hosseini, F., Choubin, B., Taromideh, F., Rahi, G., Dineva, A., 2020. Susceptibility Mapping of Soil Water Erosion Using Machine Learning Models.

- Nanzyo, M., 2004. Unique properties of volcanic ash soils. Global Environmental Research, Vol. 6 No. 2. Association of International Research Initiatives for Environmental Studies (AIRIES), Japan.
- Nanzyo, M., Shoji, S., Dahlgren, R., 1993. Developments in soil Science: Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization (pp. 189 – 207).
- National Food Security Act Manual, 2006. HEL Soil Erodibility Index. Cuarta Edición.
- Nemeth, K., 2010. Volcanic Glass Textures, Shape Characteristics and Compositions of Phreatomagmatic Rock Units from the Western Hungarian Monogenetic Volcanic Fields and Their Implications for Magma Fragmentation. Editorial Manager (Tm) for Central European Journal of Geosciences.
- Pardo, N., Cepeda, H., Jaramillo, J., 2005. The Paipa Volcano, Eastern Cordillera of Colombia, South America: Volcanic Stratigraphy. Earth Sciences Research Journal, Vol. 9, No.1, 3 - 18.
- Patarroyo, P., Terraza, R., 2011. ¿Existió Vulcanismo Cenozoico en la Sabana de Bogotá? Rev. Acad. Colombiana. Ciencias. 35 (137), 473 - 484.
- Rao, S., 1995. Mechanistic Approach to the Shear Strength Behavior of Allophanic Soils. Engineering Geology 40, 215 - 221.
- Rendón, M., Viviescas, J., Osorio, J., Hernández, M., 2020. Chemical, Mineralogical and Geotechnical Properties Characterization of Volcanic Ash Soils. Springer Nature Switzerland.
- Reyes, I., 1990. Observaciones sobre el Cuaternario del Altiplano Tunja - Sogamoso. Geol. Colombiana, 17, 151 - 157.

- Riley, C., Rose, W., Bluth, G., 2003. Quantitative Shape Measurements of Distal Volcanic Ash. *Journal of Geophysical Research*.
- Rodriguez, A., Solano, O., 2000. Mapa geológico del departamento de Boyacá: Memoria explicativa. Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química, INGEOMINAS. Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia.
- Rouse, W., 1986. Volcanic soil properties in Dominica, West Indies. *Engineering Geology*, 23: 1-28.
- Speakman, S., Basics of Xray Powder Diffraction. Training to Become an Independent User of th X-Ray SEF at the Center for Material Science and Engineering at MIT. Massachusetts Institute of Technology.
- Van Olphen, H., 1971. Amorphous clay materials. *Science* 171, pp 90 – 91.
- Van der Hammen, T., Werner, J.H., Van Dommelen, H., 1973. Palynological record of the upheaval of the northern Andes: a study of the Pliocene and lower quaternary of the Colombian eastern cordillera and the early evolution of its high-Andean biota. *Review of Paleobotany and Palynology*, No. 16, pp 1-122.
- Wesley, L., 1974. Structural Behavior of Residual Soils of the Continually Wet Highlands of Papua New Guinea - Discussion. *Géotechnique* 23, 471 - 494.
- Wohletz, K., Krinsley, D., 1982. Scanning electron microscopy of basaltic hydro magmatic ash. Los Alamos National Laboratory Report, 33-43.

9. Anexos