



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias y su incidencia en la estabilidad de laderas y taludes**

**Daniela Alejandra Morales Herrera**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia

2022



# **Heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias y su incidencia en la estabilidad de laderas y taludes**

**Daniela Alejandra Morales Herrera**

Trabajo Final presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Geotecnia**

Director:

MSc. Pedro Antonio Hernández Borda

Línea de Investigación:

Modelación y análisis en geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2022



*“Uno vuelve siempre a los viejos sitios donde amó la vida y entonces comprende cómo están de ausentes las cosas queridas”*

*Armando Tejada Gómez –Cesar Isella*

*Dedicado a la memoria de quienes ya no están a mi lado, con los que compartí momentos muy felices de mi vida, en especial a mi madrina Herenia por ser un ejemplo de lucha y perseverancia contra las adversidades, mi abuelo Manuel, que durante muchos años se dedicó a la explotación minera y con quien tuve la oportunidad de vivir mi niñez y adolescencia, convirtiéndonos en “cómplices” de nuestras travesuras.*

*Abuelito estoy segura que si vieras la profesión que elegí, y en lo que la vida me llevo a especializarme, sonreírías y sin duda alguna compartiríamos esta pasión por la aventura entre muchos taludes de roca.*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Daniela A Morales H

---

Daniela Alejandra Morales Herrera

Fecha 29/08/2022

## **Agradecimientos**

A mis padres Martha Herrera y Ernesto Morales por siempre creer en mí y alentarme en los momentos difíciles que se presentaron durante el desarrollo de este trabajo de grado. A mi mamá por su amor, dedicación y constancia en todas las etapas y decisiones de mi vida. A mi papá por su paciencia y acompañamiento en todo el desarrollo de campo de este trabajo, y seguirme el paso, así en algunos casos no entendiera lo que quería hacer.

A mi hermana Laura Camila por ser compañía en largas charlas mientras organizaba mis ideas, por su ayuda en la preparación de muestras, pero especialmente por siempre animarme y evitar que desfalleciera a pesar de la situación.

A mi abuelita Mercedes, por el amor incondicional que me ha brindado, sus cuidados, enseñanzas, comprensión y apoyo incondicional.

A mi tío Manuel Antonio, por la dedicación que tuvo para enseñarme las fórmulas matemáticas y físicas; por las largas charlas que teníamos tanto profesionales como personales que mucho me han servido; y quien desde el inicio de esta larga travesía creyó en mí; me brindó su cariño y apoyo.

A mis tíos y primos, por entender y ser solidarios a lo largo de esta maestría, cuando no podía compartir con ellos como quería.

Al geólogo geotecnista Pedro Hernández Borda, director de este trabajo de grado, por su ayuda desde el inicio; sin su conocimiento, apoyo y determinación, no hubiese sido posible alcanzar este logro. Infinitas gracias le doy por su dedicación y entusiasmo en las numerosas idas a campo y charlas llenas de conocimiento.

A la empresa Geología y Geotecnia S.A.S (GYG), por brindarme el espacio para trabajar y desarrollar simultáneamente mi maestría, en especial a mis compañeros de trabajo Néstor Hernández, Nicole Hernández y Clara Triana, por su apoyo en campo y en la organización de espacios para asistir a clases y ejecutar el presente trabajo de grado.

A la Ladrillera Santafé S.A., por darme la oportunidad de desarrollar el trabajo de campo para este proyecto en la mina Los Ajos, en particular al geólogo Oscar Mauricio Cogua, por su apoyo en el suministro de la información y por su acompañamiento, lo que me permitió hacer posible el llevar a cabo la fase práctica.

A los laboratorios SUELOS Y PAVIMENTOS GREGORIO ROJAS & CIA LTDA., donde se desarrollaron los ensayos geomecánicos y a GMAS S.A.S. Laboratorio de Geología, Geoquímica y Geofísica donde se elaboraron los análisis mineralógicos (XRD). Les agradezco su compromiso, dedicación, la calidad de los ensayos de laboratorio y los análisis realizados y el apoyo en la solución de las dudas que iban surgiendo durante el desarrollo de la fase de laboratorio.

A Vargas Ingeniería y Ensayos S.A.S, por haberme facilitado algunas herramientas requeridas para realizar las campañas de exploración y la caracterización geotécnica, en especial a la ingeniera civil Lizeth Vargas.

A mis compañeros de maestría Juan José Sepúlveda García, Yesenia Chacón, Nayel Rubiano y Naren González por haber compartido conmigo sus conocimientos durante largas jornadas de estudio y en el desarrollo de trabajos; de cada uno tengo los mejores recuerdos.

A la prestigiosa Universidad Nacional de Colombia, por haberme dado la oportunidad para mi formación profesional como ingeniera civil y ahora como magister. A todos mis profesores por su entrega y dedicación, por compartir su conocimiento y experiencia; porque me han dado las herramientas necesarias para formarme como una profesional que siempre buscará la excelencia sin perder de vista la calidad humana, el sentido social y el bienestar general.

## Resumen

### **Heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias y su incidencia en la estabilidad de laderas y taludes**

En el presente trabajo se busca entender y comprender el papel que juega la meteorización física por desleimiento en rocas sedimentarias blandas, las cuales hacen parte de una heterogeneidad litológica. El desleimiento en muchos casos progresa a través del tiempo y es imperceptible para el profesional, pero cuando actúa un agente externo que supera la resistencia del material meteorizado se pueden generar problemas muy importantes de estabilidad.

La investigación se desarrolló en la mina Los Ajos propiedad de Ladrillera Santafé S.A.S, la cual se encuentra ubicada dentro de la Formación Bogotá. Dentro de la mina se seleccionaron dos taludes en arcillolitas que presentan el proceso de meteorización física por desleimiento; sin embargo, su desarrollo y preservación en el tiempo es diferente con base en los factores externos que lo interfieren.

Con el objetivo de entender cómo evoluciona el proceso de desleimiento y comprender su incidencia en la estabilidad de cada uno de los taludes, se procedió a hacerle un monitoreo a cada uno mediante la colocación de puntos de control en la cara de cada talud. En esos puntos se realizaron mediciones de deformaciones durante ciclos de expansión y contracción en la cara del talud y en surcos con gran avance para entender el proceso de desleimiento. Además, se hizo la caracterización geomecánica y mineralógica de la arcillolita con desleimiento y la arcillolita levemente afectadas por este proceso.

A partir de la caracterización geomecánica y de la composición mineralógica de las arcillolitas de cada talud, se establecieron espesores de material afectado por el proceso de desleimiento y se propusieron los parámetros: intensidad de desleimiento para el Talud 1 y tasas de erosión-transporte-depositación para el Talud 2.

**Palabras clave:** Heterogeneidad litológica, rocas sedimentarias blandas, meteorización, desleimiento, minerales arcillosos, expansión.

## Abstract

### **Lithological heterogeneity in sedimentary rocks and its impact on the stability of hillsides and slopes**

The present work seeks to understand and comprehend the role of physical weathering by slaking in soft sedimentary rocks, which are part of a lithological heterogeneity. In many cases, slaking progresses with time and is imperceptible to the professional but when an external agent acts by overcoming the resistance of weathered material, it can generate very important stability problems.

The investigation was in development at the Los Ajos mine owned by Ladrillera Santafé S.A.S, which is found localizate inside of Bogota formation. Within the mine, two slopes were selected in claystones that show the process of physical weathering by slaking; however, its development and preservation over time is different based on the external factors that interfere with it.

With the aim to understand how the process of slaking evolves and comprehend its incidence in the stability of each of the slopes, monitoring was carried out on each slope by placing checkpoints on the face of each slope. At these points, deformation measurements were made on during expansion and contraction cycles on the slope face and in furrows with great progress to understanding the slaking process. In addition, geomechanical and mineralogical characterization of the degraded claystone and slightly weathered claystone were carried out.

Based on the geomechanical characterization and mineralogical composition of the claystone of each slope, thicknesses of material affected by the slaking process were established and the following parameters were proposed: slaking intensity for Slope 1 and erosion-transport-deposition rates for Slope 2.

**Keywords: Lithological heterogeneity, soft sedimentary rock, weathering, slaking, clay minerals, swelling.**

# Contenido

	Pág.
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XVI</b>
<b>Lista de fotos.....</b>	<b>XX</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XXII</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
<b>2. Antecedentes y estado del arte.....</b>	<b>9</b>
<b>3. Marco Teórico.....</b>	<b>17</b>
3.1 Heterogeneidad Litológica.....	17
3.2 Rocas sedimentarias blandas .....	22
3.3 Meteorización.....	27
3.3.1 Meteorización física .....	29
3.3.2 Meteorización química.....	31
3.4 Desleimiento .....	36
3.5 Expansión por hinchamiento .....	44
3.5.1 Minerales arcillosos .....	46
3.5.2 Mecanismos de expansión .....	50
3.5.3 Factores que influyen en la expansión.....	52
<b>4 Localización geográfica e hidrometeorológica.....</b>	<b>55</b>
4.1 Localización geográfica de la zona de estudio .....	55
4.2 Evaluación hidrometeorológica.....	60
<b>5 Geología.....</b>	<b>70</b>
5.1 Geología regional.....	70
Formación Bogotá (Pgb) .....	70
Formación Regadera (Pgri) .....	71
5.2 Geología local .....	72
5.3 Geología estructural regional .....	75
<b>6 Descripción de la problemática.....</b>	<b>78</b>

<b>7</b>	<b>Instrumentación de campo.....</b>	<b>81</b>
7.1	Talud 1.....	81
7.1.1.	Puntos de control .....	83
7.1.2.	Medición de los espesores de material meteorizado por desleimiento .....	88
7.2	Talud 2.....	92
7.2.1	Puntos de control .....	94
7.2.2	Medición de los conos de depositación .....	99
7.2.3	Medición de los espesores de la arcillolita meteorizada por desleimiento....	103
<b>8</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>110</b>
8.1	Talud 1.....	110
8.1.1	Puntos de control y análisis de las mediciones.....	110
8.1.2	Estimación de los espesores de material meteorizado por desleimiento en el Talud 1.....	123
8.2	Talud 2.....	129
8.2.1	Diferenciales de profundización (erosión) de los surcos .....	130
8.2.2	Análisis climatológico .....	134
8.2.3	Cuantificación aproximada del material acumulado en los conos de depositación	151
8.2.4.	Estimación de los espesores de material meteorizado por desleimiento en el Talud 2.....	159
<b>9.</b>	<b>Caracterización geotécnica de las arcillolitas .....</b>	<b>161</b>
9.1	Exploración del subsuelo .....	161
9.1.1	Talud 1 .....	163
9.1.2	Talud 2 .....	171
9.2	Caracterización física y mecánica de las arcillolitas que conforman los taludes de este estudio.....	176
9.2.1	Talud 1 .....	178
9.2.2	Talud 2 .....	187
<b>10.</b>	<b>Análisis de resultados mineralógicos, expansividad y límites de Atterberg... 195</b>	
10.1	Talud 1.....	195
10.2	Talud 2.....	200
<b>11.</b>	<b>Análisis del proceso de desleimiento y su implicación en la estabilidad de taludes .....</b>	<b>211</b>
11.1	Condición inicial.....	211
11.2	Condición actual.....	212
11.3	Condición futura .....	214
<b>12.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>219</b>
12.1	Conclusiones .....	219
12.1.1	Conclusiones generales .....	219
12.1.2	Talud 1 .....	220
12.1.3	Talud 2 .....	223
12.2	Recomendaciones .....	226
<b>13.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>228</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo: Resultados de ensayos de laboratorio.....</b>	<b>235</b>

---

<b>B. Anexo: Análisis mineralógicos por difracción de rayos X- XRD.....</b>	<b>237</b>
---	------------

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 3-1.</b> Heterogeneidad de las formaciones sedimentarias. ....	20
<b>Figura 3-2.</b> Perfil típico de cuatro intercalaciones ideales de areniscas meteorizadas y lutitas denominadas rocas compuestas.....	21
<b>Figura 3-3.</b> Ilustración de la formación y evolución de la roca blanda.....	25
<b>Figura 3-4.</b> Meteorización de la roca en diversas zonas climáticas. ....	36
<b>Figura 3-5.</b> Resumen de los parámetros que influyen en la durabilidad al desleimiento.	41
<b>Figura 3-6.</b> Ilustración esquemática de la clasificación de los minerales arcillosos según su estructura. ....	48
<b>Figura 3-7.</b> Esquemas de las capas que forman los minerales arcillosos más frecuentes .....	49
<b>Figura 4-1.</b> Localización general de la mina de arcilla Los Ajos- Ladrillera Santafé S.A.	56
<b>Figura 4-2.</b> Localización específica de la mina en la localidad Ciudad Bolívar, vereda Mochuelo Bajo. ....	57
<b>Figura 4-3.</b> Localización en planta de los sitios de análisis (Talud 1 y Talud 2). ....	58
<b>Figura 4-4.</b> Plano división de la cuenca del río Tunjuelo. Fuente: Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Tunjuelo. ....	61
<b>Figura 4-5.</b> Registro histórico de la variación de la precipitación anual para la estación Doña Juana. ....	62
<b>Figura 4-6.</b> Registro histórico de la variación de la precipitación media mensual de la estación Doña Juana. ....	63
<b>Figura 4-7.</b> Registro histórico de promedio de días mensuales con precipitación de la estación Doña Juana. ....	64
<b>Figura 4-8.</b> Registro histórico de la variación de la humedad relativa media mensual de la estación Doña Juana. ....	65
<b>Figura 4-9.</b> Registro histórico de la temperatura media mensual de la estación Doña Juana. ....	65
<b>Figura 4-10.</b> Registro histórico de la variación de la precipitación anual para la estación Quiba. ....	67
<b>Figura 4-11.</b> Registro histórico de la variación de la precipitación media mensual de la estación Quiba. ....	67
<b>Figura 4-12.</b> Registro histórico de promedio de días mensuales con precipitación de la estación Quiba. ....	68
<b>Figura 4-13.</b> Registro histórico de la temperatura media mensual de la estación Doña Juana. ....	69
<b>Figura 5-1.</b> Mapa geológico de Bogotá con el detalle de la zona de estudio. ....	72

<b>Figura 5-2.</b> Mapa geológico del Sinclinal de Usme, el círculo negro señala ubicación aproximada de la mina Los Ajos.....	76
<b>Figura 7-1.</b> Ubicación del Talud 1 y de los puntos de control.....	82
<b>Figura 7-2.</b> Perfil 1-A con la ubicación de los puntos 1, 2, 3 y 6 en la cara del Talud 1..	82
<b>Figura 7-3.</b> Perfil 1-B con la ubicación de los puntos 4 y 5 en la cara del Talud 1.....	83
<b>Figura 7-4.</b> Medición realizada en la longitud libre de cada varilla- instalada en la cara del Talud 1. ....	85
<b>Figura 7-5.</b> Talud 1, ubicación en el Perfil 1-A de las varillas hincadas en la cara del talud. ....	92
<b>Figura 7-6.</b> Ubicación del Talud 2 y de los puntos de control.....	93
<b>Figura 7-7.</b> Perfil 2 con la ubicación del punto de control 2. ....	94
<b>Figura 7-8.</b> Medición realizada a la profundidad del surco controlado por las varillas instaladas en la cara del Talud 2. ....	97
<b>Figura 7-9.</b> Ubicación en el Perfil 2 de las varillas hincadas en la cara del Talud 2.....	109
<b>Figura 8-1.</b> Comportamiento de las mediciones de cada punto en la cara del Talud 1 con respecto al tiempo. ....	110
<b>Figura 8-2.</b> Ubicación en plata de los seis puntos de control en el Talud 1.....	111
<b>Figura 8-3.</b> Punto 1, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo. ....	112
<b>Figura 8-4.</b> Punto 2, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo. ....	113
<b>Figura 8-5.</b> Punto3, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo. ....	114
<b>Figura 8-6.</b> Punto 4, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo. ....	115
<b>Figura 8-7.</b> Punto 5, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo. ....	116
<b>Figura 8-8.</b> Punto6, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo. ....	117
<b>Figura 8-9.</b> Deltas de longitud en función del tiempo para los puntos 4 y 6 ubicados en la parte alta del talud. ....	118
<b>Figura 8-10.</b> Deltas de longitud en función del tiempo para los puntos 1, 2 y 5 ubicados en la parte media del talud. ....	119
<b>Figura 8-11.</b> Deltas de longitud en función del tiempo para el punto 3 ubicado en la parte baja del talud.....	120
<b>Figura 8-12.</b> Número de días de lluvia, secos y cantidad de precipitación en la estación meteorológica Quiba entre 09/10/2020 al 06/01/2021. ....	121
<b>Figura 8-13.</b> De los puntos 4 y 6, comparación del comportamiento de los deltas de longitudes con la precipitación acumulada en función del tiempo.....	121
<b>Figura 8-14.</b> De los puntos 1, 2 y 5, comparación del comportamiento de los deltas de longitudes con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo. ....	122
<b>Figura 8-15.</b> Comparación del comportamiento de los deltas de longitudes con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo del punto 3. ....	122
<b>Figura 8-16.</b> Talud 1, ubicación en el Perfil 1-A del espesor de la franja de meteorización. ....	124
<b>Figura 8-17.</b> Comportamiento propuesto para estimar el espesor de la franja de meteorización.....	126
<b>Figura 8-18.</b> Intensidad de desleimiento planteada en función del tamaño de partícula y la profundidad con respecto a la cara expuesta. ....	128
<b>Figura 8-19.</b> Ubicación en plata de los tres puntos de control en el Talud 2 .....	129

<b>Figura 8-20.</b> Comportamiento de las mediciones de cada punto de control en la cara del Talud 2 con respecto al tiempo. ....	130
<b>Figura 8-21.</b> Punto de control 1, profundidades y deltas de profundidad en función del tiempo.....	131
<b>Figura 8-22.</b> Punto de control 2, profundidades y deltas de profundidad en función del tiempo.....	132
<b>Figura 8-23.</b> Punto de control 3, profundidades y deltas de profundidad en función del tiempo.....	133
<b>Figura 8-24.</b> Número de días de lluvia, secos y cantidad de precipitación en la estación meteorológica Quiba entre 28/01/2020 y 06/01/2021.....	135
<b>Figura 8-25.</b> Punto 1, comparación del comportamiento de los deltas de profundidad con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo.....	136
<b>Figura 8-26.</b> Punto 2, comparación del comportamiento de los deltas de profundidad con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo.....	141
<b>Figura 8-27.</b> Punto 3, comparación del comportamiento de los deltas de profundidad con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo del punto 3. ....	147
<b>Figura 8-28.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 09/10/2020 en el punto de control 1.....	152
<b>Figura 8-29.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 13/11/2020 en el punto de control 1.....	152
<b>Figura 8-30.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 13/08/2020 en el punto de control 2.....	153
<b>Figura 8-31.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 10/09/2020 en el punto de control 2.....	154
<b>Figura 8-32.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 13/08/2020 en el punto de control 3.....	155
<b>Figura 8-33.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 10/09/2020 en el punto de control 3.....	156
<b>Figura 8-34.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 09/10/2020 en el punto de control 3.....	156
<b>Figura 8-35.</b> Cálculo del volumen del cono de depositación para el 13/11/2020 en el punto de control 3.....	156
<b>Figura 8-36.</b> Comparación del proceso de monitoreo de los conos de meteorización en los tres puntos de control.....	158
<b>Figura 8-37.</b> Perfil 2 con la ubicación del punto de control 2 y la franja de meteorización. ....	160
<b>Figura 8-38.</b> Detalle del perfil 2 con los espesores de la franja de meteorización. ....	160
<b>Figura 9-1.</b> Localización de los sitios de muestreo en el sector del Talud 1.....	162
<b>Figura 9-2.</b> Localización de los sitios de muestreo en el sector del Talud 2.....	162
<b>Figura 9-3.</b> Perfil 1-A con la ubicación de los sitios de muestreos en el Talud 1.....	170
<b>Figura 9-4.</b> Perfil 2 con la ubicación de los sitios de muestreo en el Talud 2.....	176
<b>Figura 9-5.</b> Carta de plasticidad para la roca meteorizada (suelo) para el talud 1. ....	180
<b>Figura 9-6.</b> Ubicación de las tres muestras seleccionadas en el perfil 1-A para el ensayo mineralógico en el talud 1. ....	185

<b>Figura 9-7.</b> Carta de plasticidad para la roca meteorizada (suelo) para el talud 2.....	189
<b>Figura 9-8.</b> Ubicación de las tres muestras seleccionadas en el perfil 2 para el ensayo mineralógico en el Talud 2. ....	193
<b>Figura 10-1.</b> Talud 1, comparación de los resultados mineralógicos de las muestras de 0,05 m, 0,40 m y 0,76 m de profundidad. ....	196
<b>Figura 10-2.</b> Talud 1, comparación de los minerales cuarzo, caolinita y esmectita para las muestras de 0,05 m, 0,40 m y 0,76 m de profundidad. ....	197
<b>Figura 10-3.</b> Talud 1, comparación del contenido de esmectita y el potencial de expansión libre en cada muestra. ....	198
<b>Figura 10-4.</b> Talud 1, comparación del contenido de esmectita con el potencial de expansión libre y los límites de Atterberg para las muestras de 0,05 m y 0,40 m de profundidad. ....	199
<b>Figura 10-5.</b> Talud 2, comparación de los resultados mineralógicos de las muestras de 0,09 m, 0,19 m y 0,20 m de profundidad. ....	201
<b>Figura 10-6.</b> Talud 2, comparación de los minerales cuarzo, caolinita, illita-esmectita y esmectita para las muestras de 0,09 m, 0,19 m y 0,20 m de profundidad. ....	203
<b>Figura 10-7.</b> Talud 2, comparación del contenido de esmectita y el potencial de expansión libre en cada muestra del Talud 2.....	204
<b>Figura 10-8.</b> Talud 2, comparación del contenido de esmectita con el potencial de expansión libre y los límites de Atterberg para las muestras de 0,09 m y 0,20 m de profundidad. ....	205
<b>Figura 10-9.</b> Relación entre el contenido de esmectita y el potencial de expansión libre para las muestras de material particularizado del talud 1 y 2.....	207
<b>Figura 10-10.</b> Relación entre el contenido de esmectita y el potencial de expansión libre para todas las muestras del talud 1 y 2 .....	208
<b>Figura 10-11.</b> Relación entre el contenido de esmectita y los límites líquido y plástico de las muestras de material particularizado del talud 1 y 2.....	209
<b>Figura 10-12.</b> Relación entre el potencial de expansión libre y los límites líquido y plástico de las muestras de material particularizado del talud 1 y 2.....	210
<b>Figura 11-1.</b> Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición inicial (arcillolita intacta). ....	212
<b>Figura 11-2.</b> Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición actual con un espesor de franja de meteorización de 1,62 m.....	213
<b>Figura 11-3.</b> Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición en el año 2024 con un espesor de franja de meteorización de 2,16 m. ....	215
<b>Figura 11-4.</b> Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición en el año 2034 con un espesor de franja de meteorización de 3,96 m. ....	215
<b>Figura 11-5.</b> Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición en el año 2040 con un espesor de franja de meteorización de 5,04 m. ....	216
<b>Figura 11-6.</b> Factores de seguridad obtenidos en función del espesor de la franja de meteorización.....	217

## Lista de fotos

	<b>Pág.</b>
<b>Foto 2-1.</b> Talud vial de la variante Melgar en la vía Bogotá-Girardot. ....	11
<b>Foto 2-2.</b> Talud vial del sector El Uval en la vía Bogotá-Villavicencio. ....	12
<b>Foto 4-1.</b> Vista general del Talud 1, conformado aproximadamente en el año 2012.....	59
<b>Foto 4-2.</b> Vista general del Talud 2, conformado aproximadamente en el año 2017.....	59
<b>Foto 5-1.</b> Litologías presentes en la mina Los Ajos. Las flechas señalan la ubicación de los taludes estudiado.....	73
<b>Foto 5-2.</b> Panorámica de la mina Los Ajos, con la variación de litología reflejada en el cambio de color de las capas.....	74
<b>Foto 5-3.</b> Detalle de un cuerpo de arenisca, color gris claro y su disgregación en pequeñas partículas al quedar expuesta a los procesos de intemperismo .....	75
<b>Foto 6-1.</b> Talud encontrado en la mina los Ajos que ha presentado problemas de estabilidad a causa del proceso de desleimiento. ....	78
<b>Foto 7-1.</b> Ubicación de los 6 puntos (varillas) instalados en la cara del talud 1.....	84
<b>Foto 7-2.</b> Detalle de la medición realizada periódicamente en los 6 puntos instalados en la cara del talud 1. ....	86
<b>Foto 7-3.</b> Mediciones del 28/01/2020 en la cara del talud 1 de los espesores de material particularizado y de arcillolita afectada por desleimiento.....	89
<b>Foto 7-4.</b> Muestreo realizado en la cara del talud 1 con tubo shelby, alcanzando una profundidad de 0,40 m .....	90
<b>Foto 7-5.</b> Estimación del espesor de la capa de arcillolita altamente meteorizada a través del hincado de una varilla de acero en la cara del Talud 1. ....	91
<b>Foto 7-6.</b> Talud 2, ubicación de los 3 puntos instalados en la cara del talud, tomada el 13/11/2020.....	95
<b>Foto 7-7.</b> Detalle de los 3 puntos instalados en la cara del Talud 2. ....	96
<b>Foto 7-8.</b> Estado final de la cara del Talud 2, tomada el 11/06/2021. ....	98
<b>Foto 7-9.</b> Demarcación, el 09/10/2020, del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 1. ....	99
<b>Foto 7-10.</b> Estado del cono del desarrollado en la pata del talud para el 13/11/2020 en el punto de control 1. ....	100
<b>Foto 7-11.</b> Estado del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 2. ....	101
<b>Foto 7-12.</b> Estado del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 3 entre el 13/08/2020 al 10/09/2020. ....	102

---

<b>Foto 7-13.</b> Estado del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 3 entre el 09/10/2020 al 13/11/2020.....	102
<b>Foto 7-14.</b> Mediciones del 28/01/2020 en la cara del talud 2 de los espesores de material particularizado y de roca afectada por desleimiento. ....	104
<b>Foto 7-15.</b> Mediciones del 13/11/2020 en la cara del Talud 2 de los espesores de material particularizado y de roca afectada por desleimiento. ....	105
<b>Foto 7-16.</b> Perfil de donde se hincó el tubo shelby el 16/12/2020 en la cara del talud 2. ....	106
<b>Foto 7-17.</b> Mediciones del 06/01/2021 en la cara del Talud 2 de los espesores de material particularizado y de roca afectada por desleimiento. ....	107
<b>Foto 7-18.</b> Estimación de la capa de material altamente meteorizada a través del hincado de una varilla de acero en la cara del talud 2. ....	108
<b>Foto 8-1.</b> Detalle de la medición realizada entre el 28/01/2020 al 10/09/2020 del punto de control 1 del Talud 2. ....	138
<b>Foto 8-2.</b> Detalle de la medición realizada entre el 18/09/2020 al 06/01/2021 del punto de control 1 del Talud 2. ....	140
<b>Foto 8-3.</b> Detalle de la medición realizada entre el 28/01/2020 al 10/09/2020 del punto de control 2 del Talud 2. ....	143
<b>Foto 8-4.</b> Detalle de la medición realizada entre el 18/09/2020 al 06/01/2021 del punto de control 2 del Talud 2. ....	146
<b>Foto 8-5.</b> Detalle de la medición realizada entre el 17/06/2020 al 18/09/2020 del punto de control 3 del Talud 2. ....	149
<b>Foto 8-6.</b> Detalle de la medición realizada entre el 09/10/2020 al 13/11/2020 del punto de control 3 del Talud 2. ....	151
<b>Foto 9-1.</b> Talud 1 con la ubicación de los tres sitios de muestreo realizados. ....	163
<b>Foto 9-2.</b> Ubicación del muestreo 1 en la cara del Talud 1 (Shelby). ....	164
<b>Foto 9-3.</b> Detalles de las muestras seleccionadas sobre la cara del talud 1. ....	165
<b>Foto 9-4.</b> Ubicación del muestreo 2 en la berma del Talud 1 (Shelby). ....	166
<b>Foto 9-5.</b> Detalles de las muestras extraídas de la berma del Talud 1. ....	167
<b>Foto 9-6.</b> Ubicación del apique del muestreo 3 en la berma del Talud 1 (Bloque). ....	168
<b>Foto 9-7.</b> Talud 2 con la ubicación de los tres sitios de muestreo realizados. ....	171
<b>Foto 9-8.</b> Ubicación del muestreo 1 en la cara del Talud 2 (Shelby). ....	172
<b>Foto 9-9.</b> Detalles de las muestras seleccionadas sobre la cara del Talud 2. ....	172
<b>Foto 9-10.</b> Ubicación del muestreo 2 en la parte superior del Talud 2 (Shelby). ....	173
<b>Foto 9-11.</b> Detalles de las muestras seleccionadas en la parte superior del talud 2 (Shelby). ....	173
<b>Foto 9-12.</b> Ubicación del muestreo 3 en la parte superior del Talud 2 (Bloque). ....	174
<b>Foto 9-13.</b> Bloque extraído del muestreo 3 en la parte superior del Talud 2. ....	174

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3-1.</b> Factores y procesos importantes en la meteorización física, basado en Brunsden 1979.....	29
<b>Tabla 3-2.</b> Factores y procesos importantes en la meteorización química, basado en Brunsden 1979.....	33
<b>Tabla 3-3.</b> Calificación del índice de durabilidad por desleimiento .....	43
<b>Tabla 3-4.</b> Rangos de hinchamiento para algunos minerales arcillosos.....	49
<b>Tabla 4-1.</b> Coordenadas de la entrada de la mina Los Ajos.....	55
<b>Tabla 4-2.</b> Información hidrometeorológica de la zona de estudio con base en los datos reportados en la estación Doña Juana. ....	62
<b>Tabla 4-3.</b> Información hidrometeorológica de la zona de estudio con base en los datos reportados en la estación Quiba. ....	66
<b>Tabla 7-1.</b> Registro de las mediciones realizadas a los 6 puntos del talud 1 entre el 18/09/2020 al 11/06/2021. ....	87
<b>Tabla 7-2.</b> Registro de las mediciones realizadas a los 3 puntos del talud 2 entre el 28/01/2020 al 06/01/2021. ....	98
<b>Tabla 8-1.</b> Deltas de longitud para los 6 puntos del talud 1 entre el 09/10/2020 al 11/06/2021.....	111
<b>Tabla 8-2.</b> Espesores promedio reportados de las capas de material particularizado y roca afectada por desleimiento. ....	123
<b>Tabla 8-3.</b> Espesores reportados en la hincada de la varilla el 06/01/2021.....	124
<b>Tabla 8-4 :</b> Estimación de los espesores desde la cara del talud hacia adentro del terreno y en la berma superior bajo la hipótesis de un comportamiento lineal y constante.....	126
<b>Tabla 8-5.</b> Resultados de los ensayos de granulometría efectuados en los taludes 1 y 2. ....	128
<b>Tabla 8-6.</b> Deltas de profundidad para los 3 puntos de control del Talud 2 entre el 17/06/2020 al 06/01/2021. ....	130
<b>Tabla 8-7.</b> Tasa de depositación o de erosión calculadas en cada punto de control. ....	134
<b>Tabla 8-8.</b> Volúmenes y el caudal calculados del cono de depositación en el punto de control 1 entre el 09/10/2020 y el 13/11/2020. ....	153
<b>Tabla 8-9.</b> Volúmenes y el caudal calculados del cono de depositación en el punto de control 2 entre el 13/08/2020 y el 10/09/2020. ....	154
<b>Tabla 8-10.</b> Volúmenes depositados y el caudal calculados del cono en el punto de control 3 entre el 13/08/2020 y el 13/11/2020. ....	157

<b>Tabla 8-11.</b> Espesores reportados de las capas de material particularizado y roca afectada por desleimiento entre el 28/01/2020 el 06/01/2021. ....	159
<b>Tabla 8-12.</b> Espesores reportados en el hincado de la varilla el 06/01/2021. ....	159
<b>Tabla 9-1.</b> Detalles de las muestras seleccionadas para el Talud 1. ....	169
<b>Tabla 9-2.</b> Detalles de las muestras seleccionadas para el Talud 2. ....	175
<b>Tabla 9-3.</b> Relación de ensayos de laboratorio ejecutados. ....	177
<b>Tabla 9-4.</b> Programa de ensayos de laboratorio para el talud 1. ....	178
<b>Tabla 9-5.</b> Peso unitario para el talud 1. ....	178
<b>Tabla 9-6.</b> Humedad natural para el talud 1. ....	179
<b>Tabla 9-7.</b> Límites de Atterberg para el talud 1. ....	179
<b>Tabla 9-8.</b> Lavado sobre pasa tamiz N°200 para el talud 1. ....	180
<b>Tabla 9-9.</b> Índice de desleimiento para el Talud 1. ....	181
<b>Tabla 9-10.</b> Potencial de expansión para el Talud 1. ....	182
<b>Tabla 9-11.</b> Predicción de la expansividad a partir del límite líquido. ....	182
<b>Tabla 9-12.</b> Predicción de la expansividad a partir del índice de plasticidad. ....	183
<b>Tabla 9-13.</b> Predicción de la expansividad a partir de otras medidas. ....	183
<b>Tabla 9-14.</b> Resistencia a la compresión simple en el talud 1. ....	184
<b>Tabla 9-15.</b> Resistencia al corte en el Talud 1. ....	184
<b>Tabla 9-16.</b> Porcentajes de cada fase cristalina, análisis mineralógico del Talud 1. ....	186
<b>Tabla 9-17.</b> Programa de ensayos de laboratorio para el Talud 2. ....	187
<b>Tabla 9-18.</b> Peso unitario para el Talud 2. ....	187
<b>Tabla 9-19.</b> Humedad natural para el talud 2. ....	188
<b>Tabla 9-20.</b> Límites de Atterberg para el talud 2. ....	188
<b>Tabla 9-21.</b> Lavado sobre pasa tamiz N°200 para el talud 2. ....	189
<b>Tabla 9-22.</b> Índice de desleimiento para el talud 2. ....	190
<b>Tabla 9-23.</b> Potencial de expansión para el talud 2. ....	191
<b>Tabla 9-24.</b> Resistencia a la compresión simple en el talud 2. ....	191
<b>Tabla 9-25.</b> Resistencia al corte en el Talud 2. ....	192
<b>Tabla 9-26.</b> Porcentajes de cada fase cristalina, análisis mineralógico del Talud 2. ....	194
<b>Tabla 10-1.</b> Talud 1, detalle de las muestras implementadas para los análisis mineralógicos y ensayos de expansión y límites de Atterberg. ....	195
<b>Tabla 10-2.</b> Predicción de expansividad para las muestras particularizadas del Talud 1. ....	200
<b>Tabla 10-3.</b> Talud 2, detalle de las muestras implementadas para los análisis mineralógicos y ensayos de expansión y límites de Atterberg. ....	201
<b>Tabla 10-4.</b> Predicción de expansividad para las muestras particularizadas del Talud 2. ....	206
<b>Tabla 10-5.</b> Resultados del contenido de esmectita, potencial de expansión libre y límite líquido y plástico para las muestras del Talud 1 (T1) y Talud 2 (T2). ....	206
<b>Tabla 11-1.</b> Propiedades utilizadas en el análisis de la condición inicial del Talud 1. ....	211
<b>Tabla 11-2.</b> Propiedades utilizadas en el análisis de la condición actual del Talud 1. ....	213
<b>Tabla 11-3 :</b> Estimación de los espesores desde la cara del talud hacia adentro del terreno y en la berma superior bajo la hipótesis de un comportamiento lineal y constante. ....	214

<b>Tabla 11-4.</b> Factores de seguridad obtenidos para cada espesor de franja de meteorización establecido.....	217
<b>Tabla 11-5.</b> Resumen de los valores de cohesión y fricción de las arcillolitas muestreadas en el Talud 1 y Talud 2.....	218

# 1. Introducción

En las últimas décadas, en nuestro medio tropical húmedo, un gran número de proyectos de ingeniería de rocas tales como taludes, cimentaciones, túneles y líneas de ferrocarriles han sido construidos en rocas sedimentarias caracterizadas por presentar heterogeneidad litológica, es decir, macizos rocosos conformados por capas de roca dura intercaladas con capas de roca blanda (lutitas, arcillolitas y lodolitas). El comportamiento físico y mecánico de cada litología al quedar expuesta en taludes mineros y viales ha generado problemas de estabilidad de variadas características y magnitudes

La atención temprana al problema de la no homogeneidad litológica de la roca surgió desde el campo de la ingeniería de petróleo donde los esfuerzos han sido dedicados a evaluar el efecto de la heterogeneidad en la producción en los campos petroleros. Por lo cual es importante señalar que casi no se ha prestado atención en la evaluación del efecto de la heterogeneidad litológica en el comportamiento general del macizo rocoso a la hora de diseñar y construir taludes, cimentaciones, túneles, etc.

En taludes excavados en macizos rocosos con heterogeneidad litológica, los mecanismos de degradación están fuertemente relacionados con la respuesta a la meteorización por desleimiento de las diferentes litologías que lo conforman; esto es de suma importancia a lo largo de la vida útil de un corredor vial o de cualquier otra obra de infraestructura cuyos taludes estén permanentemente expuestos a las variaciones del clima. La aparición de inestabilidades a lo largo de estos taludes causa importantes costos de mantenimiento y reparación, adicionalmente, representa un riesgo significativo para la seguridad de los usuarios (Mišćević & Vlastelica, 2014).

La meteorización de rocas blandas ha sido estudiada en diversos campos incluyendo geología, ingeniería geológica, mineralogía, mecánica de suelos y rocas, y geomorfología. Sin embargo, la relación entre la influencia de la erosión diferencial y la inestabilidad de taludes (deslizamientos de tierra, desprendimientos de rocas, erosión de la superficie) todavía no se ha entendido muy bien (Mišćević & Vlastelica, 2014). Esto se debe en algunos casos a que se tienen grandes desventajas en la realización y correlación de los ensayos que se realizan, como es el caso de los resultados obtenidos utilizando índices derivados de los ensayos de durabilidad al desleimiento, los cuales generalmente son útiles para predecir cualitativamente el rendimiento de diferentes tipos de rocas, aunque su uso para la predicción del comportamiento cuantitativo en condiciones de campo es extremadamente cuestionable; pese a que las correlaciones entre la durabilidad al desleimiento y el rendimiento en campo existen, lo observado por (Dick et al., 1994). Hack & Huisman (2002) y Nicholson (2000) han demostrado que las pruebas de laboratorio tienen graves limitaciones para predecir el rendimiento de la roca intacta in situ, especialmente cuando las discontinuidades influyen en el comportamiento del macizo rocoso.

Dentro de la expectativa del estudio se incluía la caracterización geomecánica de la roca dura y de la roca blanda para poder entender adecuadamente el comportamiento del macizo rocoso. La mina Los Ajos fue la que me facilitó algunos de los taludes para hacer el estudio, pero el macizo rocoso no posee una marcada heterogeneidad litológica porque las rocas predominantes son arcillolitas y limolitas.

En este Trabajo Final de Maestría, con base en las características litológicas del área de estudio considere que para avanzar en el conocimiento de los factores que inciden en el proceso de meteorización por desleimiento es importante involucrar la composición mineralógica de arcillolitas de la Formación Bogotá como también las propiedades físicas y mecánicas. Por tanto, para estos análisis se tomaron muestras con diferentes intensidades de meteorización con el fin de determinar posibles cambios mineralógicos e intentar encontrar algunas relaciones con las propiedades físicas y mecánicas de esta roca y su incidencia en la estabilidad geotécnica. Para este fin se tomaron muestras in situ a las cuales se les realizaron 6 ensayos mineralógicos y 28 ensayos físicos (peso unitario,

contenido de humedad, límites de consistencia, pasa tamiz N° 200, índice de desleimiento y expansividad) y mecánicos (compresión y corte directo).

## **1.1 Planteamiento del problema**

En la revisión bibliográfica realizada sobre la heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias y lo observado en algunos taludes mineros y viales, es muy frecuente encontrar este tipo de heterogeneidades al realizar proyectos de ingeniería. Dada la dificultad de caracterizar geomecánicamente las rocas afectadas por desleimiento y entender el comportamiento de las diferentes litologías como componentes de un todo, en un clima específico, se toman decisiones a través de experiencias locales o con base en el juicio ingenieril.

En estos casos, frecuentemente, se hacen generalizaciones con base en la litología que tenga mayor presencia, se realiza la caracterización física y mecánica mediante núcleos de roca intacta, si es posible obtenerlos, dada la dificultad de muestrear este tipo de rocas; la otra alternativa es caracterizar muestras reconformadas, muchas veces subestimando o sobrestimando dichos parámetros. Y realizar el modelo de análisis, los análisis y los diseños; todo lo anterior, en algunos casos, se ve reflejado en la aparición de problemas de inestabilidad y los correspondientes sobrecostos.

En Colombia, varios corredores viales excavados en arcillolitas presentan frecuentemente cierres debido a la inestabilidad de los taludes sobre todo en la época invernal; de igual manera estas situaciones ocurren en el entorno minero donde en la actividad de explotación, se generan taludes de gran altura que cotidianamente se ven expuestos a factores atmosféricos y antrópicos por el constante movimiento de material dentro de la mina que podrían afectar la estabilidad de los taludes. Por lo tanto, en nuestro país, donde los factores geográfico y climático son bastante variables es importante estudiar de manera detallada esta situación; este conocimiento redundara positivamente en la economía y en la modernización y/o construcción de infraestructura vial segura y eficiente, y en la explotación y producción de materiales para construcción.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Evaluar en macizos rocosos conformados por rocas sedimentarias la incidencia de la heterogeneidad litológica en los procesos de erosión diferencial y sus implicaciones en la estabilidad de los taludes de las explotaciones mineras y en los taludes viales.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte que permita establecer qué se ha investigado sobre la heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias, en clima tropical.
- Cuantificar las tasas de desleimiento tanto en laboratorio como en campo con el fin de caracterizar el proceso de desleimiento en rocas blandas específicas.
- Proponer un modelo geológico-geotécnico que represente adecuadamente el talud de estudio.
- Determinar la relación entre: composición mineralógica, proceso de desleimiento y la estabilidad de taludes mineros o viales.
- Modelar el proceso de desleimiento en un talud de una explotación minera con heterogeneidad litológica.

## 1.3 Metodología

La metodología que se usó para alcanzar los objetivos propuestos anteriormente fue la siguiente:

Se realizó una revisión del estado del arte sobre la heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias y de los procesos de erosión diferencial por desleimiento, la cual permitió identificar carencias y necesidades en el conocimiento; esta revisión facilitó enfocar la investigación en los aspectos de composición mineralógica y su relación con las propiedades físicas y mecánicas de las arcillolitas.

Dentro de la expectativa del estudio se incluía la caracterización geomecánica de la roca dura y de la roca blanda para poder entender adecuadamente el comportamiento del

macizo rocoso, pero, por razones de tiempo y económicas por motivo de la pandemia, el componente de laboratorio tuvo que ser modificado y centrado en la caracterización de la roca blanda. Lo anterior se decidió con base en dos argumentos: el primero, la revisión del estado del arte y del desarrollo del marco teórico sobre rocas heterogéneas concluye que la resistencia del macizo rocoso, en general, está influenciada por la roca blanda. Segundo, el conocimiento previo del director del Trabajo Final de Maestría de procesos de inestabilidad en los taludes mineros en el área de estudio, relacionado al fenómeno de desleimiento.

Se establecieron los requerimientos y/o características que debía cumplir el talud tipo para poder desarrollar la investigación; de manera paralela se analizaron los parámetros que requería el software y los que se podían obtener de los taludes a analizar para la elaboración de los modelos.

Se seleccionaron dos taludes con base en su tiempo de conformación, su problemática y la ubicación y el software a usar, y se procedió a elaborar un programa tentativo de ensayos físicos, mecánicos y mineralógicos para la caracterización de las arcillolitas y del proceso de desleimiento en cada talud.

En el trabajo de campo se realizaron las siguientes actividades: levantamiento de las características geológicas y geotécnicas de los taludes seleccionados, la toma de muestras tipo shelby, bloque y bolsa para ensayos de laboratorio. Se instalaron puntos de control (varillas ancladas en la cara de los taludes) que permitieran hacer el seguimiento a probables deformaciones (erosión, depositación, expansión) relacionadas al proceso del desleimiento de las arcillolitas expuestas en cada talud. Las mediciones fueron cuantitativas.

En el Talud 1, la profundidad a la que se hincó cada varilla estuvo en función del incremento de la resistencia de la roca, lo cual indico hasta qué punto había afectación por el proceso de desleimiento. Antes de hincar cada varilla se determinó su longitud inicial, de tal forma que, en cada visita de control se midió la distancia entre el borde externo de la varilla y la cara del talud, denominándose dicha distancia como longitud libre. Se tomaron varias mediciones de longitud libre por diferentes lados de la varilla y se promediaron.

En el Talud 2, se instalaron un par de varillas con un cordel en cada surco seleccionado, con el objetivo de hacer un seguimiento a la evolución de la profundidad del surco a través del tiempo. En cada visita de control, la profundidad fue medida desde el cordel hasta el fondo del surco; en cada punto de control se realizaron entre dos y tres medidas, las cuales al final se promediaron.

Se analizó la información hidrológica de la subcuenca baja del Rio Tunjuelo, para la caracterización hidrometeorológica (precipitación media y máxima mensual, precipitación media anual, humedad relativa, temperatura media, promedio de días mensuales con lluvia y meses de máxima precipitación) de la zona, lo cual permitió relacionar las lecturas de los puntos de control con los periodos de lluvia y secos.

Adicionalmente, con la finalidad de medir el espesor de la franja de meteorización, se hincó una varilla de acero en diferentes partes de la cara del talud, tratando de mantener siempre la misma energía de hincado para lo cual se usó el mismo martillo y la misma altura de caída hasta obtener un rechazo, donde la varilla no se pudo profundizar más. En el Talud 2, se hicieron mediciones al material particularizado del macizo rocoso que se ha ido paulatinamente convirtiendo en suelo y la roca que se ha afectado a causa del desleimiento.

Se cuantificó en los tres puntos de control el material que se desprende de la cara del Talud 2 a causa del agua de escorrentía y la acción de la gravedad, el cual finalmente se deposita en la base del talud. Lo anterior se realizó por medio de la medición de las geometrías aproximadas de los conos de depositación que se desarrollaron en la pata del talud.

Los ensayos de laboratorio físicos y mecánicos de las muestras de arcillolitas recolectadas en terreno se hicieron en el Laboratorio Suelos y Pavimentos Gregorio Rojas Ltda. que posee acreditación ONAC. Para la caracterización mineralógica, de las arcillolitas se usó parte del material de las mismas muestras utilizadas para los ensayos físicos y mecánicos; para la composición mineralógica se usó la técnica de difracción de rayos X (DRX) dado que era importante determinar si dentro de los minerales arcillosos existían esmectitas y

su porcentaje composicional. Los análisis se realizaron en GMAS S.A.S. Laboratorio de geología, geoquímica y geofísica.

Se efectuó el procesamiento y análisis de los resultados de los ensayos físicos y geomecánicos y se plantearon posibles correlaciones con la composición mineralógica reportada en los análisis con rayos X. Adicionalmente, se realizó el análisis a las bases de datos obtenidos de las mediciones de los puntos de control.

Se elaboró el modelo geológico-geotécnico en el que se incluyó el factor desleimiento variable de las arcillolitas expuestas en la cara de taludes y a profundidad.

## **2. Antecedentes y estado del arte**

Los macizos rocosos con heterogeneidad litológica contienen, al menos, dos tipos de litologías que tienen composición mineralógica diferente y por tanto propiedades geomecánicas diferentes; la mayoría de estas características se observan en rocas sedimentarias y metamórficas (Marinos & Hoek, 2001). La heterogeneidad litológica genera mayor anisotropía en las propiedades físicas y mecánicas y por ende en el comportamiento del macizo rocoso. Para comprender y determinar las propiedades es indispensable adquirir un conocimiento detallado sobre las propiedades de las diferentes litologías expuestas en un talud y sobre la composición mineralógica y su incidencia en los cambios que a través del tiempo de exposición produce el intemperismo.

La litología en rocas sedimentarias se caracteriza por secuencias de estratos duros y competentes (areniscas cuarzosas, calizas) que están intercalados con estratos blandos y menos competentes (lutitas, arcillolitas y lodolitas). Las rocas que componen los estratos blandos están constituidas por minerales arcillosos, los cuales son altamente susceptibles a la meteorización cuando quedan expuestos a la acción de la intemperie durante largo tiempo; en este escenario las capas más blandas y débiles son afectadas por el desleimiento y por ende se erosionan más rápido en comparación con las unidades más duras y resistentes. La erosión genera pérdida de soporte de la capa resistente que la suprayace y se desencadena una variedad de movimientos en el talud como: caída de bloques, deslizamientos planares o deslizamientos en cuñas o flujos de tierras que pueden ser de magnitud local o general.

A medida que avanza el proceso de pérdida del soporte vertical de las capas resistentes que están arriba de la capa débil, el talud se vuelve inestable. Para tratar de controlar tales eventos se emplean diversas medidas correctivas para reducir el potencial de falla. Para diseñar las medidas correctivas, un aspecto que es necesario determinar es la tasa de

pérdida por erosión en el sitio del proyecto para poder determinar la medida correctiva e implementarla de manera oportuna (Shakoor, 1995).

Un claro ejemplo de lo expuesto anteriormente se puede evidenciar en la vía Bogotá-Girardot, en el sector de la variante de Melgar (ver Foto 2-1) y en la vía Bogotá - Villavicencio, en el sector El Uval sentido Bogotá (ver Foto 2-2), donde los taludes viales presentan pérdida de soporte debido a la meteorización y erosión que presentan las rocas blandas.

En la Foto 2-1 se tiene una intercalación de areniscas y arcillolitas donde la protagonista principal es la capa de arcillolita que se va meteorizando y erosionando, dejando sin soporte y en voladizo a la arenisca. En la roca dura (arenisca) comienzan a trabajar los planos de estratificación y las diaclasas haciendo que se individualicen bloques de rocas que posteriormente caerán. Ante esta situación implementan una solución parcial que es el concreto lanzado el cual no funciona porque debajo de este el agua sigue haciendo su labor, atrapando la humedad y haciendo que el proceso sea más intenso, como se evidencia en la foto.

**Foto 2-1.** Talud vial de la variante Melgar en la vía Bogotá-Girardot.



Fuente: Archivo propio.

En la Foto 2-2 se presenta el talud ubicado en la vía Bogotá -Villavicencio, en el sector El Uval sentido Bogotá, el cual se encuentra compuesto por intercalaciones de areniscas y arcillolitas, siendo la protagonista fundamental la capa de arcillolita ubicada en la pata del talud, la cual se ha venido meteorizando y perdiendo continuidad con respecto al material ubicado en la parte superior. La disminución del material de soporte hace que se generen problemas de estabilidad, como se evidencia al costado izquierdo de la foto, donde se han presentado caída de bloques de arenisca.

**Foto 2-2.** Talud vial del sector El Uval en la vía Bogotá-Villavicencio.



Fuente: Archivo propio.

El efecto de la meteorización y erosión diferencial, es decir, la cantidad de pérdida de soporte depende de tres factores:

- (1) Las características litológicas de las rocas (composición mineralógica y textura) y de las propiedades ingenieriles del material rocoso de la roca más blanda pero también de las más resistentes.
- (2) Las características geotécnicas del macizo rocoso (propiedades del material rocoso y las discontinuidades). Entendiéndose como material rocoso al fragmento de roca limitado por las discontinuidades, pero sin considerar el efecto de las discontinuidades estructurales ni los esfuerzos in situ; dentro de las características geotécnicas se tienen la resistencia (corte y tracción) y la rigidez. Las discontinuidades son los planos de origen mecánico o sedimentario que independizan o separan los bloques o fragmentos de roca intacta; los fragmentos más las superficies de las discontinuidades conforman el macizo. Dependiendo de las características de las discontinuidades del macizo rocoso se tendrán variados comportamientos puesto que presentan unas propiedades relevantes (orientación,

separación, espaciamiento, persistencia, rugosidad, alteración de las paredes, abertura y relleno) y su comportamiento mecánico estará caracterizado por la resistencia al corte que posee la superficie de discontinuidad o del material de relleno.

- (3) Las características geométricas del talud construido que incluyen: la orientación, inclinación y altura del talud, la vegetación presente, la escorrentía superficial, la infiltración de agua, la presencia de agua subterránea y la acumulación de talus (Shakoor, 1995).

Analizando el primer y segundo grupo de los factores que inciden en la meteorización diferencial, en algunos casos es difícil obtener las propiedades ingenieriles y caracterizar las litologías, ya que muchos estudios han sido dirigidos a reconocer los parámetros geomecánicos de rocas con heterogeneidad litológica y se ha encontrado que seleccionar una resistencia de una secuencia de roca dura no es realista y elegir la resistencia de una secuencia de roca blanda es muy conservador; en dichas situaciones es necesario tener un método útil que permita estimar las propiedades geomecánicas de las rocas que presenten estas características (heterogeneidad litológica) (Behnia et al., 2018).

Adicionalmente la meteorización puede inducir un cambio rápido desde las propiedades iniciales del material rocoso a propiedades similares a las de un suelo. La resistencia de una roca a la meteorización a corto plazo se describe a través de un parámetro llamado índice de durabilidad al desleimiento, el cual es un parámetro de ingeniería importante, en particular en rocas blandas que contienen minerales arcillosos ya que dicho parámetro describe la sensibilidad de este tipo de rocas a la meteorización y la tasa de ocurrencia de tal cambio, el cual puede ser evaluado mediante varias pruebas.

Existen muchas pruebas de durabilidad para los parámetros índice y de diseño para materiales como suelos y rocas blandas. El más importante y el más utilizado es el test de índice de durabilidad al desleimiento, desarrollado por Franklin y Chandra (1972), recomendado por la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981) y estandarizado por la American Society for Testing and Materials. (ASTM, 1990) (Gökceoğlu et al., 2000).

---

Entre los estudios realizados en el campo de la heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias se encuentran las investigaciones adelantadas por: Duffaut (1981), quien publicó un estudio de modelado y simulación en macizos rocosos con heterogeneidad litológica, introduciendo el término de "sándwich de masa de roca (simple o múltiple)". Goodman (1993), destacó el inconveniente que da la composición de más de un tipo litológico de roca con diferentes propiedades en un macizo ya que se crea un problema complejo para la ingeniería geotécnica. Marinos & Hoek (2001), publicaron una tabla GSI para rocas heterogéneas y sugirieron usar el método de promedio ponderado para los parámetros UCS y  $m_i$ . Lydzba, Pietruszczak, & Shao (2003), usaron un paquete de software matemático y estudiaron la formación de rocas sedimentarias compuestas, caracterizadas por una estructura periódica en capas como: arenisca, arcillolita y lutita; además ilustraron una reducción en la resistencia de la roca compuesta con una disminución en el volumen de arenisca.

Yue, Olson, & Schultz (2016), estudiaron la calibración de rigidez y resistencia para roca en capas. Ellos mencionaron que "la resistencia general de las rocas en capas es útil para predecir su estabilidad o falla en condiciones de producción, lo que puede contribuir a la contención en altura vertical de las fracturas hidráulicas en un reservorio no convencional". En su estudio, utilizaron simulaciones de PFC3D (Particle Flow Code) para evaluar las contribuciones de las propiedades de las capas (por ejemplo, número, espesor y secuencia) en la resistencia promedio de un reservorio en capas. Los resultados de laboratorio y de la simulación mostraron que la rigidez y la resistencia de una secuencia en capas de roca pueden relacionarse con las proporciones relativas de las capas duras y débiles.

La mayoría de los estudios sobre rocas compuestas y heterogéneas han indicado que la resistencia del macizo rocoso, en general, está influenciada por la parte débil. La resistencia y el volumen de las rocas blandas controlan los parámetros geomecánicos, de ahí la tabla de heterogeneidad GSI desarrollada por (Marinos & Hoek, 2001), donde es necesario tener tres parámetros para estimar las propiedades de resistencia y deformación: resistencia a la compresión uniaxial  $\sigma_{ci}$ , constante  $m_i$  e índice de resistencia geológica (GSI), los cuales se obtienen de muestras de núcleo intacto y que para este caso son extremadamente difíciles de conseguir puesto que en rocas con heterogeneidad

litológica cada muestra contendrá discontinuidades en forma de planos de estratificación y esquistosidad o diaclasas, lo cual hará que cualquier prueba de laboratorio desarrollada en este tipo de muestras de como resultado un valor de resistencia menor a la resistencia a la compresión uniaxial requerida para ingresar en el criterio de Hoek-Brown. Por ello, algunos estudios sobre las rocas con heterogeneidad litológica, como los de Pepe et al., (2015), Tziallas et al., (2013) y Yue, Olson, & Schultz (2016) han indicado que estimar y seleccionar la resistencia equivalente y adecuada de estos materiales es un desafío y requiere más investigación.

Adicionalmente, dentro de los factores que depende de la meteorización diferencial se encuentran el desleimiento el cual es un fenómeno que consiste en la desintegración en partículas de las rocas que contienen minerales arcillosos debido a su interacción con el agua, lo cual es común cuando se exponen a la atmosfera; esto es normal en áreas cuyo clima se caracteriza por la ausencia de heladas y hay gradientes de alta temperatura y ciclos de humedecimiento y secado por lluvia y humedad atmosférica (Cano & Tomás, 2016).

La resistencia al desleimiento depende de muchos parámetros diferentes, citados en la literatura como: mineralogía, textura microscópica, microfábricas, presencia de microfracturas, porosidad, permeabilidad, adsorción, etc. La variedad de factores hace que la caracterización del desleimiento sea compleja. Entonces, usar un solo parámetros resulta insuficiente. Es por ello que diferentes macizos rocosos muestran una respuesta específica a cada combinación particular de parámetros relacionados con la meteorización presente in situ, y la intensidad y velocidad de esta respuesta determina su susceptibilidad a la meteorización.

La susceptibilidad de las rocas con minerales arcillosos que se encuentran a la intemperie (erosión y/o degradación diferencial) influye en la estabilidad de los taludes heterogéneos en litologías.

Estudios recientes han destacado la importancia de la composición mineralógica, la porosidad, el fracturamiento, las características estructura-textura y el potencial de expansión para controlar la descomposición física del material rocoso y en lo posible poder determinar la durabilidad e identificar materiales rocosos potencialmente inestables.

Taylor & Spears (1970), enfatizaron que la estratificación en pequeñas escalas puede dar lugar a planos de debilidad en el material rocoso, y que las orientaciones de las microfracturas en relación con estas estructuras juegan un papel importante en el comportamiento de desintegración. Adicionalmente, resaltaron que la capilaridad y la acumulación de presión capilar son factores importantes en términos de absorción de agua y la consiguiente desintegración, donde la presencia de minerales arcillosos que se hinchan afecta la tasa de degradación.

Gökceoğlu et al. (2000), indicaron que el tipo y la cantidad de minerales arcillosos son los principales factores que influyen en las variaciones de durabilidad al desleimiento; además encontraron una fuerte correlación con la cantidad de minerales arcillosos expansivos. También hallaron una correlación positiva entre el índice de durabilidad y el contenido total de minerales carbonatados, lo que significa que un alto contenido de carbonato aumenta la durabilidad de las rocas al desleimiento.

Sin embargo, no todas las rocas manifiestan el mismo comportamiento, ya que existen diferencias considerables en términos de velocidad y del tipo de meteorización observada. Por lo cual es muy importante establecer relaciones entre el comportamiento cuantificado en el laboratorio, la composición mineralógica y lo observado en campo.

El ensayo de durabilidad al desleimiento (SDT) es uno de los ensayos más simples en mecánica de rocas y más utilizado en todo el mundo para caracterizar la resistencia a la meteorización ambiental de la roca. Aunque originalmente el ensayo de durabilidad al desleimiento se desarrolló para probar la meteorización potencial de lutitas, argilita, limolitas y otras rocas que contiene minerales del grupo de las arcillas (Franklin & Chandra, 1972), el índice de durabilidad al desleimiento también se usa típicamente para analizar rocas blandas como margas, ignimbrita, conglomerados y areniscas pobremente cementadas; aunque presenta una serie de desventajas como que no tiene en cuenta los cambios en la forma y el tamaño de los fragmentos retenidos en el tamiz de 2 mm, ni su índice más utilizado (Id2) refleja con precisión el comportamiento a la intemperie observado en el campo (Mišćević & Vlastelica, 2014).

## **3. Marco Teórico**

En este capítulo se describe el marco teórico que se utilizó como base para el desarrollo del presente Trabajo Final de Maestría.

### **3.1 Heterogeneidad Litológica**

Los macizos rocosos con heterogeneidad litológica o compuestos se pueden caracterizar como formaciones, que constan de al menos dos unidades litológicas con diferentes comportamientos y propiedades de ingeniería, los cuales presentan una estructura de capas alternas de rocas duras y más blandas de espesor variable y suelen ser de origen sedimentario.

La heterogeneidad y anisotropía en las características geomecánicas del macizo rocoso, se originan por la presencia de múltiples formaciones rocosas que tienen capas con diferentes alternancias. La incertidumbre existente en los parámetros de resistencia y deformabilidad de un macizo rocoso se debe a la variabilidad inherente asociada con el proceso de formación de la roca, así como a una falta general de conocimiento durante todo el proceso de caracterización.

Varios proyectos de ingeniería como túneles, cimentaciones, taludes viales y mineros se construyen en macizos rocosos heterogéneos. Debido a que su comportamiento es altamente anisotrópico, las incertidumbres y el riesgo en el campo de la ingeniería aumentan de manera excesiva, lo que a menudo conduce a un juicio ingenieril muy conservador y soluciones sobrevaloradas. La determinación de las propiedades mecánicas de formaciones heterogéneas, tanto en condiciones uniaxiales como triaxiales, es vital para la selección de valores característicos para el diseño y construcción de dichas obras.

La inevitable presencia de tales incertidumbres en las propiedades de las rocas intactas, complica el proceso de caracterización del macizo rocoso para una estimación confiable de sus propiedades.

Una caracterización geomecánica exitosa en macizos rocosos debe lograr una interpretación apropiada de la heterogeneidad litológica, la cual considere tanto los datos geológicos como los geomecánicos.

La caracterización del lugar es una fase preliminar esencial para implementar un programa exitoso de mecánica de rocas en cualquier proyecto de ingeniería civil. La caracterización facilita las clasificaciones geomecánicas posteriores al determinar los escenarios geológicos y las características litológicas del área en la que se desarrolla la actividad. Además de determinar la configuración geológica y / o las características hidrogeológicas de la zona, la caracterización del sitio contribuye en la estimación de los parámetros de resistencia y de deformabilidad de las numerosas unidades litológicas identificadas dentro del macizo rocoso.

De hecho, antes de cualquier investigación geomecánica sobre los macizos rocosos, es fundamental caracterizar la roca intacta en términos de variabilidad litológica, considerando las propiedades mecánicas de las unidades litológicas que la constituyen.

Desde una perspectiva geológica, se pueden distinguir varias unidades litológicas intactas en función de sus diferencias litológicas y petrográficas. En algunos casos, se pueden identificar numerosas unidades dentro de la roca con ligeras diferencias en el ensamblaje mineral o en la intensidad de la alteración (Pepe et al., 2015).

El enfoque de tratar con numerosas unidades litológicas identificadas puede no ser deseable desde una perspectiva geomecánica, ya que podría imponer complejidades innecesarias en la clasificación, caracterización de macizos rocosos o en el análisis numérico de estabilidad. Por otro lado, asumir solo la calidad de la roca intacta fuerte o blanda es demasiado conservador o resulta en una sobreestimación de la resistencia del macizo rocoso (Marinos & Hoek, 2001).

Por lo tanto, una solución típica para lidiar con la heterogeneidad litológica de la roca en una perspectiva geomecánica, puede ser mediante la definición de una presencia periódica

de unidades de roca fuertes y blandas con sus correspondientes propiedades geomecánicas. En la caracterización geomecánica de macizos rocosos se han utilizado diferentes métodos para estimar los parámetros de resistencia y deformabilidad. Sin embargo, se ha informado que el empleo del criterio de falla empírico de Hoek-Brown junto con el sistema de clasificación del Índice de Resistencia Geológica (GSI) es el método más común para la estimación de las propiedades del macizo rocoso. La aplicación determinista convencional del enfoque mencionado anteriormente no es capaz de abordar la naturaleza variable intrínseca de los macizos rocosos, ya que no tiene en cuenta la variabilidad inherente de los parámetros. Por otro lado, la estimación probabilística de las propiedades del macizo rocoso, sería capaz de incorporar la variabilidad inherente de los parámetros geomecánicos y representar una imagen más realista del comportamiento geomecánico del macizo rocoso.

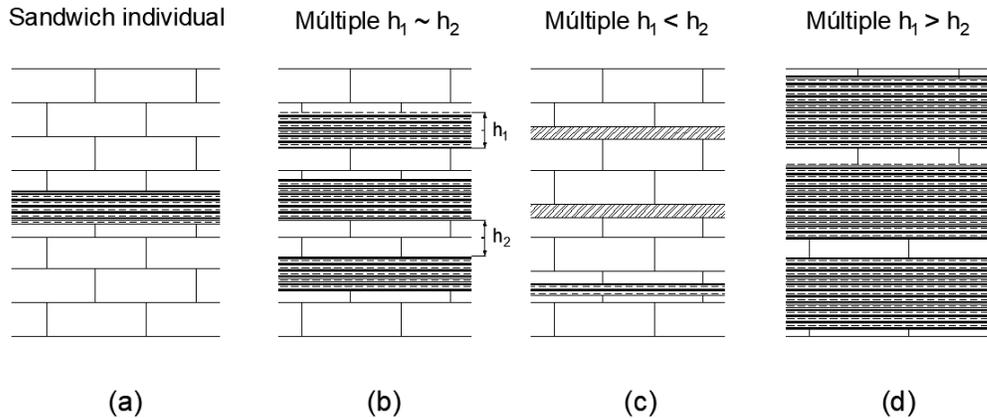
Tziallas et al. (2013), determinaron las propiedades mecánicas de rocas heterogéneas en el laboratorio y propusieron una metodología para predecir la resistencia del macizo rocoso de formaciones flysch y molasa que se caracterizan por alternancias de areniscas y rocas pelíticas (de grano fino) como limolitas, margas, lutitas y lutitas arcillosas en diferentes proporciones. En su investigación encontraron que el modo de falla se vio afectado por la proporción de los materiales más débiles en este caso la limolita. Para las muestras con porcentajes más bajos de limolita, se formaron fracturas extensionales a lo largo de los especímenes, mientras que, para las muestras con porcentajes más altos, las fracturas se limitaron simplemente a los materiales más débiles.

No obstante que la determinación de las propiedades de macizos rocosos heterogéneos constituye un problema de ingeniería desafiante, la literatura disponible es relativamente limitada. Solo en la última década, debido al aumento de los proyectos de infraestructura subterránea, ha habido interés en la investigación de estos macizos rocosos.

Entre los estudios realizados en el campo de la heterogeneidad litológica en rocas sedimentarias se encuentran las investigaciones adelantadas por: Duffaut (1981), quien publicó un estudio sobre el modelado y simulación de macizos rocosos con heterogeneidad litológica, introduciendo el término de "macizo rocoso sándwich (único o múltiple)".

La Figura 3-1 muestra las cuatro condiciones de los perfiles sándwich ideales típicos de dicha formación denominada sándwich único y sándwiches múltiples, con la presencia de material débil ( $h_1$ ) en varios espesores.

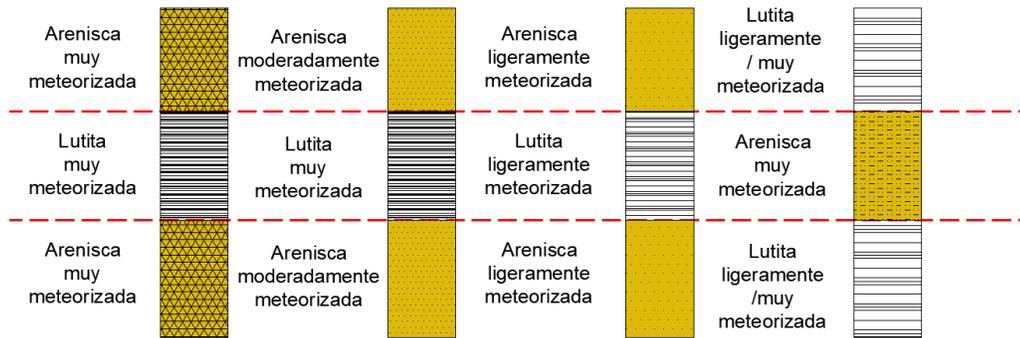
**Figura 3-1.** Heterogeneidad de las formaciones sedimentarias.



Fuente: Duffaut (1981).

Liang et al. (2007), realizaron ensayos de laboratorio en muestras de capas naturales de sal de roca y anhídrido, donde concluyeron que la resistencia general está definida por el comportamiento del componente más débil. Mohamed, Mohamed, & Cho. (2007), realizaron pruebas en muestras compuestas de arenisca y lutita muy erosionadas de Kuala Lumpur, Malasia. En el estudio propusieron cuatro posibles perfiles de los modelos compuestos de la formación Kenny Hill por grado de meteorización. La ilustración esquemática de los perfiles se muestra en la Figura 3-2, donde se representa la matriz compuesta de arenisca y lutita, cada uno varía desde un estado levemente degradado, moderadamente degradado hasta muy degradado.

**Figura 3-2.** Perfil típico de cuatro intercalaciones ideales de areniscas meteorizadas y lutitas denominadas rocas compuestas.



Fuente: Mohamed, Mohamed, & Awang (2007).

La figura anterior indica claramente la heterogeneidad del macizo rocoso compuesto de Kenny Hill. Generalmente, a medida que el estado de la meteorización cambia de levemente degradado a muy degradado, las propiedades físicas y mecánicas también se deterioran y degradan en consecuencia debido a que la mineralogía, la textura y la estructura de la roca también varían respectivamente, por lo que el resultado es una tasa diferente de meteorización. Por consiguiente, se espera que cualquier combinación de perfil de macizo rocoso sea única, lo que explica las dificultades que a menudo encuentran y reportan los profesionales que trabajan con el macizo rocoso de Kenny Hill, ya que la erosión de las rocas tropicales tiene un gran impacto en la resistencia y el comportamiento en la roca, puesto que para cualquier estudio lo anterior se refleja en posibles retrasos inesperados en el trabajo geotécnico.

Además de las investigaciones realizadas, aún se requieren más estudios para aclarar cómo deben interpretarse las heterogeneidades litológicas y petrográficas de un macizo rocoso para proporcionar una entrada útil para la caracterización geomecánica. La identificación de numerosas unidades litológicas dentro de un macizo rocoso (como resultado de las caracterizaciones geológicas del sitio) no proporcionará necesariamente datos confiables para los profesionales, ya que los parámetros geomecánicos de las unidades litológicas identificadas pueden no mostrar diferencias considerables. De hecho, la mejor práctica para tratar con numerosas unidades litológicas identificadas dentro de las rocas debe ser desarrollada y caracterizada por expertos en mecánica de rocas, no solo

para aumentar la eficiencia sino también para disminuir la confusión causada por la presencia de docenas de unidades litológicas diferentes, en geomecánica.

Un buen modelo geológico permitirá a los geólogos e ingenieros involucrados en el proyecto comprender las interacciones de los muchos componentes que forman la corteza terrestre y tomar decisiones de ingeniería racionales basadas en esta comprensión.

En proyectos donde no existe un modelo geológico adecuado, las decisiones solo se pueden tomar de manera ad hoc (solución elaborada específicamente para un problema que no es generalizable) y los riesgos de los problemas en la construcción, debido a condiciones geológicas imprevistas, son muy altos.

### **3.2 Rocas sedimentarias blandas**

Duque Escobar (2019) afirma que, aunque las rocas sedimentarias constituyen una proporción muy pequeña del volumen de la corteza de la tierra, son muy altas las posibilidades de encontrarlas en la superficie, ya que cerca de tres cuartas partes de las rocas expuestas son sedimentarias. La Cordillera Oriental colombiana es un claro ejemplo, puesto que es fundamentalmente de naturaleza sedimentaria.

Estas rocas se han formado por la consolidación de sedimentos. Las causas que establecen el tipo de roca son principalmente el origen de los sedimentos, el agente que las erosiona y transporta, y el medio de depositación y forma de litificación.

Las rocas que se forman a partir de partículas que conservan su integridad física durante el transporte, se denominan detríticas y las que se constituyen por la precipitación de sustancias que se encontraban en disolución, se conocen como químicas. Existe un tercer grupo de rocas sedimentarias, las biogénicas, en cuya creación interviene solamente la actividad de organismos vivos.

Algunas rocas sedimentarias en Colombia se encuentran en:

- La Serranía de la Macarena: Exhibe una sucesión rítmica de grawacas turbidíticas de grano fino a grueso y color gris, calizas delgadas fosilíferas y shales gris oscuro.
- En la región de los Llanos Orientales: Areniscas de cuarzo blanca y grises de grano fino a medio, en estratos delgados a gruesos intercalados con arcillolitas grises, verdes o rojas.

- Hacia el sur-orienté de Bogotá: se encuentran capas gruesas de arcillolitas de color crema, comúnmente abigarradas, con intercalaciones de areniscas friables y limolitas pertenecientes a la formación Bogotá.

Las rocas blandas que se encuentran con mayor frecuencia en la construcción de proyectos de ingeniería civil son las rocas sedimentarias arcillosas, que contienen más del 50% de granos clásticos de menos de 60 micrones de diámetro (Dick & Shakoor, 1992). Son un grupo de rocas litológicamente heterogéneas que incluyen: arcillolitas, lutitas, y limolitas. Este tipo de rocas son el tipo más común de roca sedimentaria y comprenden alrededor de dos tercios de toda la columna geológica y expuesto más de un tercio del área terrestre (Blatt, 1982).

Los materiales geotécnicos se clasifican ampliamente en suelos y rocas. La roca blanda se define como un material geotécnico que tiene la resistencia mecánica superior a la del suelo, denominado "débil" y "erosionado" en relación con la terminología de roca o "duro" y "endurecido" en la terminología de suelos (Hudson, 1993). La roca blanda también se conoce como un término genérico que abarca aquellos materiales que podrían describirse como arcillas duras, rocas extremadamente débiles, muy débiles y débiles. La clasificación de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas para materiales geotécnicos intactos ha hecho una distinción entre rocas y arcillas por la resistencia superior para arcilla dura y la superposición entre roca extremadamente débil y arcillas muy rígidas y duras, consideradas como materiales al margen de la mecánica de rocas y la mecánica de suelos. La directriz sugirió que la roca blanda es el grupo de materiales geotécnicos para los que tienen una resistencia a la compresión uniaxial muy amplia que oscila entre 0.5 y 25 MPa. El material se ha caracterizado tradicionalmente de manera conservadora en lo que se trata de extrapolaciones de tecnología de suelos.

Las rocas blandas constituyen la base de muchos proyectos de construcción como, por ejemplo, cimentaciones, excavaciones de túneles y minas a cielo abierto. Este tipo de rocas presentan varios tipos de problemas como baja resistencia, desagregación, desmoronamiento, alta plasticidad, desleimiento, rápida meteorización y muchas otras características, por este motivo se imposibilita varias veces su aprovechamiento o se tiende a buscar una mejor condición geológica y una mejor alineación escapando de las zonas débiles para importantes obras de ingeniería, siempre y cuando sea posible. Sin

embargo, hay regiones enteras en el mundo dominadas por rocas blandas donde no se encuentran rocas mejores, lo que obliga a los profesionales a aceptarlas y tratarlas.

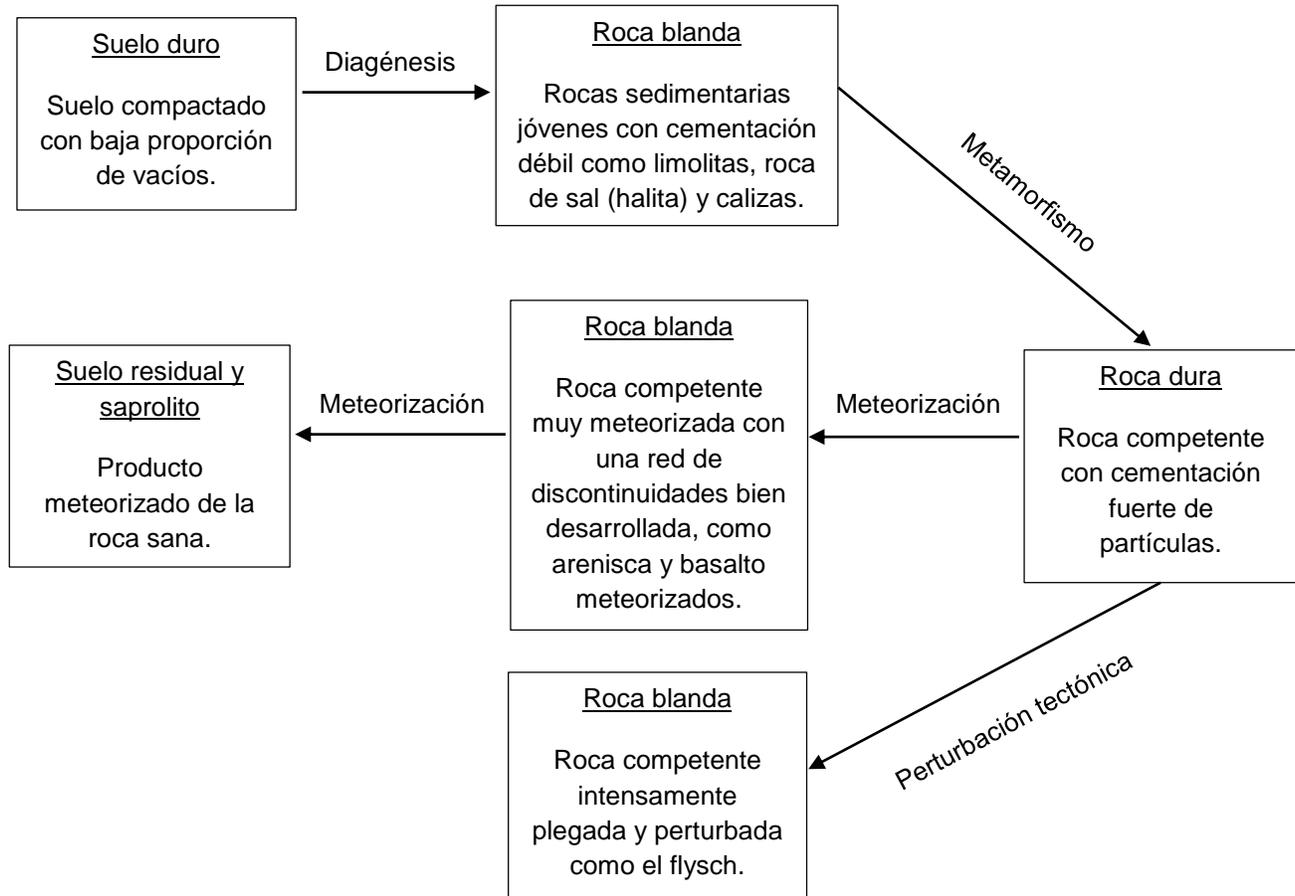
A pesar de ello, el grado de investigación del comportamiento de estos tipos de rocas en proyectos de construcción rara vez corresponde con su frecuencia y con los problemas geológicos de ingeniería que causan.

La resistencia de las rocas blandas es intermedia, entre suelo y rocas duras. En algunos casos, el material puede ser muy blando para ser probados en equipos de mecánica de rocas y demasiado duros para equipos de mecánica de suelos. Esto indica que se debe desarrollar algún ajuste en las pruebas para caracterizar bien sus propiedades.

Otra dificultad identificada, está relacionada con el muestreo e investigación del sitio, puesto que, en términos prácticos, en un material tipo suelo se considera impenetrable con SPT superiores a 50 y no es posible un muestreo adecuado. Por otro lado, para el material tipo roca las perforaciones destruyen parcialmente la muestra o la recuperan en pedazos, evitando conocer bien los rasgos del material (Kanji, 2014).

La determinación de las propiedades del macizo rocoso de una roca blanda es un desafío importante en la ingeniería geotécnica. En general, las rocas blandas se consideran como un material de transición entre las rocas competentes y el suelo, por lo tanto, su comportamiento converge a roca competente en su límite superior y suelo en el límite inferior. A pesar de una cantidad significativa de investigación, los métodos para estimar el comportamiento in situ y la resistencia de los macizos rocosos de una roca blanda siguen estando relativamente fragmentados e incompletos. La dificultad de determinar su comportamiento se debe principalmente a su naturaleza compleja y a las caracterizaciones inadecuadas. Los diferentes orígenes y procesos de alteración de este tipo de rocas dan como resultado propiedades variables que inevitablemente influyen en su comportamiento general. Por lo tanto, es importante comprender las diferencias en sus propiedades heredadas, tanto de la fase anterior como del proceso de alteración, y adoptar enfoques adecuados para estimar su resistencia de acuerdo con estas características.

Con base en el origen y las alteraciones geológicas, la roca blanda se puede clasificar como roca sedimentaria joven, roca competente meteorizada y roca competente tectónicamente perturbada, como se muestra en la Figura 3-3

**Figura 3-3.** Ilustración de la formación y evolución de la roca blanda.

Fuente: Zhai et al. (2017).

Las rocas sedimentarias jóvenes, por ejemplo, lutita y la arcillolita, contienen una litificación deficiente y una cementación de partículas débil. Su resistencia se puede describir mediante la definición ISRM de rocas débiles con una resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de 0,5 MPa a 25 MPa. Las rocas competentes meteorizadas, como la arenisca, también pueden considerarse rocas débiles. Durante la exposición prolongada al intemperismo, algunos componentes del macizo rocoso comienzan a romperse y agrietarse a lo largo de microfracturas preexistentes. Como resultado de la meteorización, la fábrica defectuosa bien desarrollada e interconectada deteriora la integridad del macizo rocoso, lo que conduce a una reducción de la resistencia mecánica general. Este tipo de roca está bien representada en los sistemas de clasificación Rock Mass Rating (RMR) y

Geological Strength Index (GSI) como rocas de mala calidad con clasificaciones inferiores a 25 y 20 respectivamente o inferiores a 0,1 en el sistema Q. En la práctica, existe una tendencia a considerar las rocas competentes tectónicamente perturbadas, que conservan estructuras originales limitadas formadas en la litificación, como un macizo rocoso débil (Kanji, 2014). Debido a la destrucción de la estructura original durante el plegamiento y a las fallas geológicas, es común observar fracturas intensas y ampliamente persistentes. Así, este tipo de roca tiene propiedades mecánicas muy bajas similares a otros tipos de macizos rocosos débiles. El estudio del flysch de Marinós & Hoek (2001), proporciona un buen ejemplo de este tipo de roca débil.

En la ingeniería de rocas blandas en un clima tropical, se encuentran con frecuencia problemas relacionados con el potencial de hinchamiento, contracción y colapso del suelo. Este fenómeno es una de las consecuencias más alarmantes en la ingeniería geotécnica que implica tensiones destructivas, deformaciones y pérdida de resistencia que normalmente se observan meses después de la construcción, puesto que la durabilidad al desleimiento de las rocas blandas varía mucho desde la descomposición espontánea hasta la degradación lenta en meses o años.

La roca blanda tiene una resistencia relativamente baja y una alta sensibilidad a la humedad; los componentes minerales y los procesos genéticos contribuyen significativamente a la complejidad de su comportamiento en ingeniería. La caracterización de la roca blanda, hasta ahora, ha estado a favor de métodos cualitativos debido a la tediosa tecnología de muestreo, la muy alta sensibilidad a las perturbaciones de la muestra y el bajo grado de precisión (Hudson, 1993).

Se ha demostrado que la alta sensibilidad a los cambios de humedad es el factor clave, de por qué hasta ahora la mayoría de los investigadores preferían alternar las técnicas de caracterización cualitativa y observacional. Desafortunadamente, el enfoque descriptivo no es cuantificable en datos significativos que puedan traducir la característica física de la roca blanda a una comprensión simple y consistente que sea beneficiosa para el ingeniero civil. Debido a eso, la información crítica se dejó en una caja negra. Por lo tanto, el juicio ingenieril de la propiedad de la roca blanda se hace normalmente asumiendo el comportamiento de la franja superior de la mecánica del suelo y apoyándose en

experiencias y registros previos; lo cual deriva en un riesgo de posible recurrencia de fallas geotécnicas similares.

Las investigaciones realizadas han demostrado que los métodos de prueba que se realizan habitualmente, según lo estipulado en las normas nacionales (por ejemplo, DIN, Ö-Norm, ASTM) o los métodos sugeridos (por ejemplo, IAEG, ISRM), no son adecuados para cubrir la respuesta inmediata y el comportamiento a largo plazo de la roca blanda en la práctica de la construcción.

Por lo tanto, la mayoría de las especificaciones para la aceptación de la roca para su uso en ingeniería se basan en un comportamiento aceptable en más de una prueba. Con la amplia disponibilidad de computadoras y software estadístico, el énfasis de la evaluación basada en un resultado de prueba único o múltiple está cambiando a una evaluación estadística de múltiples variables de los resultados de la prueba.

Una estimación incorrecta del comportamiento de la roca a menudo significa un aumento de tiempo y costos durante la fase de construcción, así como una disminución de la calidad de la obra (Nickmann et al., 2006).

### **3.3 Meteorización**

La meteorización se puede definir como el proceso de alteración de las rocas que ocurre bajo la influencia de la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera por medios físicos, químicos y bióticos cerca de la superficie terrestre.

La meteorización modifica la mineralogía y la textura de los materiales geológicos, por lo tanto, se considera una de las mayores fuentes de dificultades potenciales en la ingeniería geotécnica, ya que modifica considerablemente las propiedades ingenieriles del macizo rocoso, haciendo que estas modificaciones sean difíciles de prever y no puedan tratarse fácilmente mediante técnicas de cálculo puesto que en algunos casos estas comienzan a manifestarse una vez está finalizado el proyecto.

La roca fuerte y resistente cambia a un estado de menor resistencia y mayor permeabilidad, siendo la meteorización un componente principal en la primera etapa del

proceso y es el primer paso en la formación del suelo in situ y en la liberación o acumulación de óxidos de hierro, alúmina y sílice dentro del suelo o roca meteorizada.

El estilo de meteorización y el carácter de los productos de meteorización también se ven fuertemente influenciados por la litología. Dadas litologías similares, la meteorización en los trópicos produce una respuesta diferente del macizo rocoso en comparación al que se meteoriza en un ambiente templado, y diferentes rocas pueden reaccionar de manera muy diferente a las mismas condiciones climáticas. Por lo tanto, no debe sorprender que el estudio de los fenómenos de meteorización por diferentes disciplinas y por investigadores en diferentes partes del mundo hayan producido una amplia gama de enfoques, terminología y conclusiones.

Para los ingenieros y geólogos, la descripción y evaluación de un macizo rocoso meteorizado debe transmitir la distribución de los estados de meteorización, sus propiedades de ingeniería y la importancia para un diseño propuesto.

En consecuencia, es importante reconocer el papel que juegan los procesos de meteorización en el desempeño de las rocas en aplicaciones de ingeniería y realizar una evaluación con respecto a las características de la meteorización, donde la roca ha sido alterada por procesos de meteorización y presenta características distintas en comparación con la roca fresca o el suelo residual.

Existen dos procesos dominantes en la meteorización: la meteorización física, que resulta en la disgregación de rocas sin cambios mineralógicos y la meteorización química que resulta en la descomposición de los minerales constituyentes en productos minerales secundarios estables o metaestables. Cualquiera de estos dos procesos puede dominar, aunque su ocurrencia aislada es rara y lo más común es que uno actúe para mejorar o acelerar el otro; siendo el proceso dominante una función tanto del clima como del entorno local. Por ejemplo, la meteorización física aumenta rápidamente la superficie de exposición a la acción del agua y puede considerarse que actúa como un control de la meteorización química (Taylor & Spears, 1970).

### 3.3.1 Meteorización física

Reiche (1950) definió la meteorización como “la respuesta de los materiales que estaban en equilibrio dentro de la litósfera a las condiciones cercanas a su contacto con la atmosfera, la hidrósfera y, quizás lo más importante la biosfera” y la meteorización física como “cualquier proceso que cause fragmentación o trituración esencialmente in situ sin un cambio químico contribuyente”. La meteorización física principalmente desintegra el material rocoso mediante la aplicación de una serie de esfuerzos cíclicos, como congelación-descongelación, secado-humedecimiento o calentamiento-enfriamiento, que conducen a la eventual ruptura del material rocoso, generalmente a lo largo de superficies discontinuas y fallas dentro del material de fábrica. Los procesos de meteorización física y su relación con áreas de extremos climáticos han sido reconocidos en trabajos previos, por ejemplo, (Peltier, 1950). La Tabla 3-1 presenta un resumen de los procesos de meteorización física que se consideran más aplicables dentro de una escala de tiempo de ingeniería.

**Tabla 3-1.** Factores y procesos importantes en la meteorización física, basado en Brunsden 1979.

Principales controles	Meteorización física	Respuesta de material
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ambiente de meteorización</li> <li>▪ Clima</li> <li>▪ Atmosfera</li> <li>▪ Hidrosfera</li> <li>▪ Factores locales (topografía, drenaje, superficie piezométrica)</li> </ul>	<p style="text-align: center;">Entorno físico →</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Procesos de cristalización*</li> <li>▪ Humedecimiento y secado*</li> <li>▪ Procesos coloidales</li> <li>▪ Procesos orgánicos</li> <li>▪ Diaclasado, descarga y rotura</li> <li>▪ Insolación *</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desintegración</li> <li>▪ Pulverización</li> <li>▪ Cambio de volumen</li> <li>▪ Cambio en el tamaño de grano</li> <li>▪ Cambio en el área de superficie</li> <li>▪ Consolidación</li> </ul>

\*procesos que se consideran más aplicables a una escala de tiempo de ingeniería

Los procesos de cristalización, como la congelación-descongelación y la meteorización salina, pueden ser particularmente perjudiciales para los materiales rocosos incluso

durante períodos cortos. La acción de congelación y descongelación del agua dentro de la microfábrica de las rocas también puede ser altamente perjudicial y puede encontrarse en cualquier clima donde prevalezcan las condiciones ambientales y/o altitudinales apropiadas (Aplica en climas de estaciones y en zona periglaciares).

Ya sea debido a la congelación del agua o a la acción de la sal, que ocurre en canales estrechos y cerrados dentro de la estructura de la roca, se pueden ejercer fuerzas que alcanzan a exceder la resistencia a la tracción del material (típicamente en el rango de 10-20 MPa), por ejemplo, la expansión de arcilla puede aplicar una presión de 2 MPa o el congelamiento del agua a -20 °C una presión de 200 MPa.

Los materiales rocosos son malos conductores del calor y el calentamiento de la superficie externa por la radiación solar puede conducir al desarrollo de gradientes térmicos entre la superficie cercana y la parte interna del material. Los minerales poseen diferentes coeficientes de expansión térmica y las expansiones diferenciales dentro de la fábrica de la roca pueden conducir al desarrollo de esfuerzos a lo largo de los contactos de grano que, por lo tanto, pueden provocar el desarrollo de microfracturas y, en última instancia, la desintegración granular. Una vez más, el proceso es cíclico y ocurre en períodos cortos de tiempo.

Las rocas de grano fino pueden desintegrarse fácilmente al agrietarse y descascararse cuando se someten a ciclos sucesivos de humedecimiento y secado. Los ciclos de humedecimiento y secado son probablemente la causa principal de la meteorización y degradación del macizo rocoso, ya que causan el desleimiento de la roca debido a la expansión y contracción del volumen de los minerales arcillosos o se encuentra asociada con movimientos de humedad en el macizo rocoso.

A escala de material rocoso, la roca se vuelve más porosa, pierde la fuerza de unión (cohesión) entre los granos y se pueden depositar nuevos minerales en los poros y a lo largo de las fracturas. En la escala del macizo rocoso, se forman y extienden nuevas fracturas, se reduce la resistencia de la roca en la pared de la discontinuidad y sobreviven residuos de roca más fuerte como resultado de la meteorización interna de conjuntos de discontinuidades. Independientemente de la escala, generalmente se produce un macizo

rocoso más débil que requiere un gran cuidado en la caracterización. La roca meteorizada puede exhibir una variedad de propiedades, desde un comportamiento mecánico controlado por una estructura relictiva hasta situaciones en las que la masa rocosa debe tratarse como un suelo. Las secciones transversales de macizos rocosos meteorizados generalmente muestran una mayor resistencia y espaciamiento de fracturas, y una disminución de la porosidad, permeabilidad y fisibilidad con el incremento de la profundidad con relación a la superficie del terreno. Sin embargo, se producen excepciones a esta imagen idealizada. El reconocimiento de la meteorización a partir de pruebas de observación y de índices de resistencia simples es generalmente posible en afloramientos rocosos, excavaciones superficiales y a través del registro y la correlación de perforaciones.

(Taylor, 1988) considero la desintegración física como el control de la meteorización química e identifiqué que los principales controles de la ruptura son los siguientes:

- La incidencia de las estructuras sedimentarias y las discontinuidades como planos de estratificación, laminación, diaclasas, superficies lítricas y fallas.
- Desleimiento, que es función del humedecimiento y el secado en condiciones atmosféricas. Generalmente se denomina como “rotura del aire” (air-breakage) en la industria minera.
- Expansión de minerales de arcilla de capa mixta con capas de esmectita en expansión. Este proceso parece ser más importante cuando el porcentaje de iones de sodio (Na) intercambiables es alto.

### **3.3.2 Meteorización química**

La meteorización química como método de descomposición del material rocoso tiene un potencial mucho mayor donde el régimen climático es cálido y húmedo y opera durante largos períodos de tiempo geológico.

El clima afecta la meteorización tanto directa como indirectamente. En la región tropical húmeda, la meteorización química generalmente tiene lugar a un ritmo muy rápido en comparación a otros climas. La condición oxidante siempre existe en la zona meteorizada.

Sin embargo, con respecto a su velocidad, la meteorización química puede ser muy lenta, mientras que la meteorización física es relativamente rápida.

En la meteorización química de la superficie, a menudo es asistida por la contaminación atmosférica y los productos químicos de origen pueden ser depositados por la lluvia, el rocío o la niebla.

Fookes et al. (1988) describen tres procesos simultáneos involucrados en la meteorización química de la siguiente manera:

- La ruptura de la estructura del material original con la liberación concomitante de los elementos constituyentes como iones o moléculas.
- La eliminación en solución de algunos de estos constituyentes liberados.
- La reconstitución del residuo con componentes de la atmósfera para formar nuevos minerales, que se encuentran en un equilibrio estable o metaestable con el medio ambiente.

Los principales controles sobre el proceso de meteorización química y la respuesta de los materiales rocosos se muestran en la Tabla 3-2.

Dentro de una escala de tiempo en ingeniería, los procesos de meteorización química más relevantes son probablemente los de oxidación/reducción y disolución. La meteorización química generalmente incluye la disolución, cuyas tasas dependerán de la temperatura, la velocidad del flujo, cantidad de agua que pasa sobre la superficie de la solución, la solubilidad del sólido que se disuelve y el pH del solvente que los ataca, junto con otros factores como la dirección del viento y el ángulo de la superficie con el horizonte. La solubilidad de los elementos varía de acuerdo a un orden de solubilidad citado a menudo para elementos formadores de minerales:  $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Si} > \text{Al} > \text{Fe}$ . Sin embargo, el grado de solubilidad puede variar dependiendo del valor del pH.

**Tabla 3-2.** Factores y procesos importantes en la meteorización química, basado en Brunsden 1979.

Principales controles		Meteorización química		Respuesta de material
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Litosfera</li> <li>▪ Litología</li> <li>▪ Roca madre</li> <li>▪ Estructura</li> <li>▪ Clima</li> <li>▪ Atmosfera</li> </ul>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="margin-right: 10px;">Entorno químico</div> <div style="font-size: 1.5em;">→</div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hidratación</li> <li>▪ Hidrólisis</li> <li>▪ Disolución*</li> <li>▪ Oxidación*</li> <li>▪ Reducción*</li> <li>▪ Carbonatación*</li> </ul>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 1.5em; margin-right: 10px;">→</div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mineral no afectado por falta de tiempo o agentes débiles</li> <li>▪ Reacciones de descomposición, recombinación e intercambio catiónico</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hidrosfera</li> <li>▪ Estructura cristalina</li> </ul>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 1.5em; margin-right: 10px;">→</div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quelación</li> <li>▪ Fijación</li> </ul>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 1.5em; margin-right: 10px;">→</div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lixiviación</li> <li>▪ Iones disueltos</li> </ul>

\*aquellos procesos que se consideran más aplicables a una escala de tiempo de ingeniería

Prácticamente todos los procesos de meteorización química dependen de la presencia de agua. La hidratación, es decir la adsorción superficial del agua, es el precursor de todas las reacciones químicas más complejas, muchas de las cuales se desarrollan simultáneamente.

La *hidrólisis*, probablemente es el proceso químico más importante, es la reacción entre el mineral y el  $H^+$  y  $(OH)^-$  del agua. El pequeño tamaño del ion le permite entrar en la red de minerales y reemplazar los cationes existentes. De esta forma, minerales arcillosos y zeolitas (aluminosilicatos microporosos) pueden formarse por meteorización de minerales de silicato a medida que los iones asociados como sílice, sodio, potasio, calcio y magnesio, se pierden en la solución.

El ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ) acelera la meteorización química. Este ácido débil se forma por la disolución en agua de lluvia de una pequeña cantidad de dióxido de carbono gaseoso de la atmósfera. Las raíces de las plantas, los insectos que viven en el suelo y las bacterias

que degradan los restos de plantas y animales producen ácido carbónico adicional y otros ácidos.

El pH del sistema es importante porque influye en la cantidad de  $H^+$  disponible, la solubilidad de  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  y el tipo de mineral arcilloso que se puede formar.

El *intercambio de cationes* es importante en la meteorización química en al menos tres formas:

- Puede causar el reemplazo de hidrógeno en coloides que contienen hidrógeno. Esto reduce la capacidad de los coloides para llevar  $H^+$  a superficies no meteorizadas.
- Los iones que contienen los coloides  $Al_2O_3$  y  $SiO_2$  influyen en los tipos de minerales arcillosos que se forman.
- Las propiedades físicas del sistema, como la permeabilidad, pueden depender de las concentraciones y tipos de iones adsorbidos.

La *oxidación* es la pérdida de electrones por parte de los cationes, y la *reducción* es la ganancia de electrones. Ambos son importantes en la meteorización química. Los productos de oxidación más importantes dependen del oxígeno disuelto en el agua. Muchos minerales de hierro se transforman en óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ , hematita), por ejemplo, los suelos rojos de las regiones cálidas y húmedas están coloreados por óxidos de hierro. Los óxidos pueden actuar como agentes cementantes entre las partículas del suelo.

Las reacciones de *reducción*, que son importantes en relación con las influencias de la acción bacteriana y las plantas en la meteorización, almacenan energía que puede utilizarse en etapas posteriores de la meteorización.

Los procesos químicos tales como *hidratación*, *hidrolisis*, *oxidación*, *reducción* y *quelación*, forman minerales secundarios (a menudo minerales arcillosos) a partir de minerales primarios. Se reconoce que algunos minerales son más resistentes a la disolución y a la meteorización química que otros.

El desarrollo de minerales secundarios puede implicar un cambio de volumen, introduciendo presiones internas que conducen a la fragmentación del mineral; esto ofrece más superficie sobre la cual puede actuar la meteorización química. A veces, la meteorización de un mineral en particular es suficiente para provocar la descomposición de toda la roca.

El tiempo necesario para meteorizar diferentes materiales varía mucho. Cuanto más no consolidado y permeable sea el material original, y cuanto más cálido y húmedo sea el clima, menor será el tiempo necesario para lograr cierta cantidad de formación de suelo. Las tasas de meteorización y desarrollo del suelo disminuyen con el aumento del tiempo; para la formación del suelo a partir de materiales parentales de roca dura puede ser muy largo; sin embargo, los suelos jóvenes pueden desarrollarse en menos de 100 años a partir de material parental loess, glacial y volcánico (Millar et al., 1965); en comparación con las rocas que contienen pirita, las cuales se rompen y experimentan transformaciones químicas y minerales en solo unos pocos años.

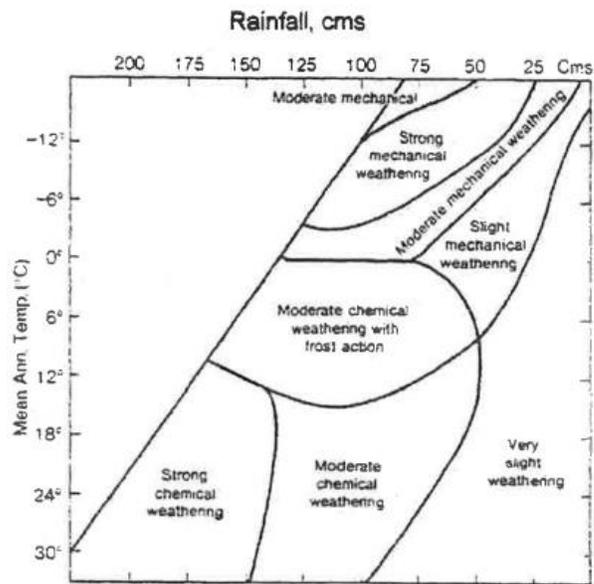
La meteorización en las rocas blandas puede considerarse como un proceso constante. En la mayoría de los casos la roca es débil porque esta meteorizada o contiene productos de una meteorización anterior. Los productos de una meteorización química, en su mayoría filosilicatos (varias arcillas), avanzan o aceleran el proceso de meteorización física. La predicción de la resistencia a la meteorización de una roca blanda está basada en la identificación y cuantificación de la presencia de minerales secundarios o erosionados en la roca, y en los resultados de las pruebas físicas, como la congelación y descongelación directa y la abrasión.

Es difícil asignar una tasa de meteorización a la roca en términos de años, las diversas pruebas descritas anteriormente pueden distinguir las rocas blandas que probablemente se deterioran en unos pocos años de exposición de las rocas más fuertes que pueden durar generaciones en términos humanos. Por lo tanto, el ambiente de exposición, así como la naturaleza de la roca determinan cómo se comportará la roca con el tiempo.

La meteorización física y química de las rocas pueden considerarse como dos partes finales de una serie continua, dictada por el tipo y la severidad del clima. En la Figura 3-4 se muestra el diagrama de (Peltier, 1950), el cual ilustra el tipo y la severidad de la

meteorización en función de la temperatura y la lluvia; entendiéndose por severidad a las tasas de meteorización. En especial, las rocas blandas pueden comportarse de manera diferente, dependiendo de la composición mineral, la porosidad y la distribución del tamaño de los poros. La composición mineral dictará las tasas de meteorización química y las características de los poros dictarán las tasas de meteorización física.

**Figura 3-4.** Meteorización de la roca en diversas zonas climáticas.



Fuente: Peltier (1950).

### 3.4 Desleimiento

Es el proceso de meteorización física que induce cambios rápidos en el macizo rocoso por disgregación de la roca en fragmentos; por tanto, empieza paulatinamente a convertirse en suelo.

Chandra (1970), define el concepto de durabilidad por desleimiento como “la capacidad de una roca de resistir cambios, desgastes o rupturas con el tiempo, cuando se le somete a la acción de desleimiento por el agua. Como se manifiesta en el rompimiento o desintegración en fragmentos más pequeños, es esencialmente un proceso físico”.

Okamoto (1993), define el desleimiento como la ruptura estructural de una masa en partículas de tamaño pequeño en respuesta a cambios en el contenido de humedad. El

proceso de humedecer y secar tensiona la estructura esquelética de la roca y actúa para agrandar y extender los poros.

La sensibilidad de un tipo de roca frente a la meteorización y la tasa de ocurrencia de dicho cambio se describen mediante el parámetro de durabilidad, el índice de durabilidad al desleimiento. La durabilidad es un parámetro de ingeniería importante para todas las litologías pertenecientes a grupos de rocas blandas, en particular arcillolitas, lutitas, limolitas, conglomerados y areniscas con material cementante débil. Está estrechamente relacionado con su composición mineralógica.

Este comportamiento no duradero de estas rocas es responsable de los problemas de estabilidad de taludes debido a la rápida degradación por pérdida de resistencia del material, fallas de terraplenes y pérdida a largo plazo de la resistencia intacta que afecta la estabilidad de excavaciones (Gökceoğlu et al., 2000).

Los ciclos de desecación seguidos de la saturación por la precipitación conducen a la contracción y la expansión generando la ruptura de la roca en la zona cercana a la superficie. El proceso de desintegración por humectación y secado se conoce como desleimiento climático (Franklin & Chandra, 1972), un fenómeno que es el resultado del corte producido por el cambio de volumen asociado con la hidratación y deshidratación.

Las rocas blandas son conocidas por su sensibilidad a los cambios de contenido de humedad. Estas rocas pueden desintegrarse y cambiar rápidamente de roca a materiales similares al suelo tras exponerse al agua, lo cual genera numerosos problemas de estabilidad en proyectos de ingeniería (Rincon et al., 2016).

La estructura y el grado inicial de microfractura ejercen un control importante sobre la tasa de entrada de agua en el material y son factores que separan las rocas duraderas de las no duraderas. La tasa de degradación de una roca intacta depende tanto de las propiedades del material rocosos como de la exposición a agentes ambientales como el agua y el sol, y esta interrelación es crucial en cada evaluación de estabilidad de un proyecto de ingeniería civil (Selen et al., 2019).

Taylor (1988) atribuyó el desleimiento en rocas arcillosas menos endurecidas a una combinación del aumento de la presión del aire; si se permite que el fragmento de una roca se seque, el aire se introduce en los vacíos y capilares exteriores a medida que se

desarrollan presiones de succión altas (negativas). En la saturación, el aire atrapado se presuriza a medida que el agua entra en la roca por capilaridad y falla por tracción de enlaces intercristalinos débiles debido a succiones de la presión de poros de agua; por lo tanto, el proceso de desleimiento provocara que se tensione la estructura esquelética. La falla puede no ser inmediata pero inducida después de repetidos ciclos de humedecimiento y secado, especialmente si el material cementante se elimina durante el proceso cíclico. En consecuencia, se requeriría cada vez menos energía de fractura en cada ciclo para que la roca falle.

Por otro lado, la deshidratación causada por altas temperaturas también puede contribuir a la ruptura de la roca si el esfuerzo térmico excede la resistencia a la tracción de la roca. Debido a las altas temperaturas, se evapora más agua de los poros y se generan fisuras en la roca, lo que da como resultado grietas por tensión que a su vez proporcionan canales para el agua. La extensión de la ruptura debido tanto a los efectos de la temperatura como a los cambios de humedad varía entre los tipos de rocas debido a diferencias considerables de composición mineralogía, textura y litología (Erguler & Ulusay, 2009).

Sadisun et al. (2005), afirman que los principales factores que controlan el proceso de desleimiento son los minerales arcillosos expandibles, los minerales no arcillosos (pirita) y los minerales solubles. Según Moriwaki & Mitchell, (1977), existen cuatro modos comunes de desleimiento:

- Desleimiento por dispersión: las partículas de arcilla se desprenden de la superficie de la arcilla intacta por dispersión en el agua adyacente.
- Desleimiento por expansión: el agua es absorbida por la arcilla y el material se expande y se ablanda.
- Desleimiento por cuerpo: el material se parte y se desintegra en pedazos y la falla parece desarrollarse de adentro hacia afuera.
- Desleimiento por superficie: los agregados de partículas de arcilla se desprenden de la superficie y se acumulan como sedimento en el agua adyacente.

Adicionalmente, se han propuesto numerosos mecanismos responsables para dar explicación a estos modos de desleimiento, como se expone a continuación:

- Ruptura por aire o efectos capilares: al sumergir una muestra de roca seca, los meniscos de agua en la roca aumentan su radio de curvatura a medida que la roca se satura, de modo que se reducen las tensiones capilares en los contactos de los granos y en los puntos de las grietas. Adicional, el agua que se introduce en la roca por la acción de fuertes fuerzas capilares puede comprimir el aire en su camino, lo que da como resultado la ruptura interna de la roca, causando algunas zonas de falla, resultando como consecuencia el rompimiento de la roca.
- Expansión diferencial: en materiales con características expansivas, puede producirse el desprendimiento de escamas o fragmentos, como consecuencia de fallas por expansión en la zona externa que se satura al sumergir una muestra seca.
- Disolución de agentes cementantes: este fenómeno es especialmente importante en rocas sedimentarias en las que la litificación se alcanzó mediante un agente cementante (ejemplo, carbonato de calcio).
- Intercambio iónico: Entre otros mecanismos que pueden explicar el comportamiento del deterioro por desleimiento, se encuentra el intercambio iónico que parece ser el dominante. Los minerales arcillosos están rodeados por una “atmosfera” de cationes adsorbidos, generalmente iones hidroxilo que se encuentran unidos de forma débil. Las partículas se pueden dispersar en una solución que contenga iones negativos o se pueden flocular mediante iones positivos. La disolución iónica del fluido medida por su constante dieléctrica controla la eficiencia de la dispersión, pero el tipo de arcilla también es fundamental. Las arcillas de sodio son más fáciles de dispersar, luego las arcillas de potasio entre capas que favorecen la hidratación. En estos casos, el hinchamiento de la red cristalina puede ayudar en el proceso de dispersión.
- Alivio de esfuerzos: es posiblemente también un mecanismo importante, ya que las rocas que contienen arcilla sobreconsolidadas, es decir las rocas que han sido sometidas a fuerzas tectónicas o diagenéticas, probablemente almacenan deformaciones elásticas que se liberan si los enlaces intergranulares se debilitan por la acción del agua (Franklin & Chandra, 1972).

Los mecanismos de desleimiento son complicados y difíciles de identificar en especial porque normalmente existe interacción entre ellos. Las rocas sedimentarias de grano fino (lutitas, arcillolitas, etc.) son muy abundantes en nuestro medio (formación Bogotá o Guaduas, por ejemplo). Aunque muchas de estas rocas se degradan fácilmente en los procesos de excavación vial o minera.

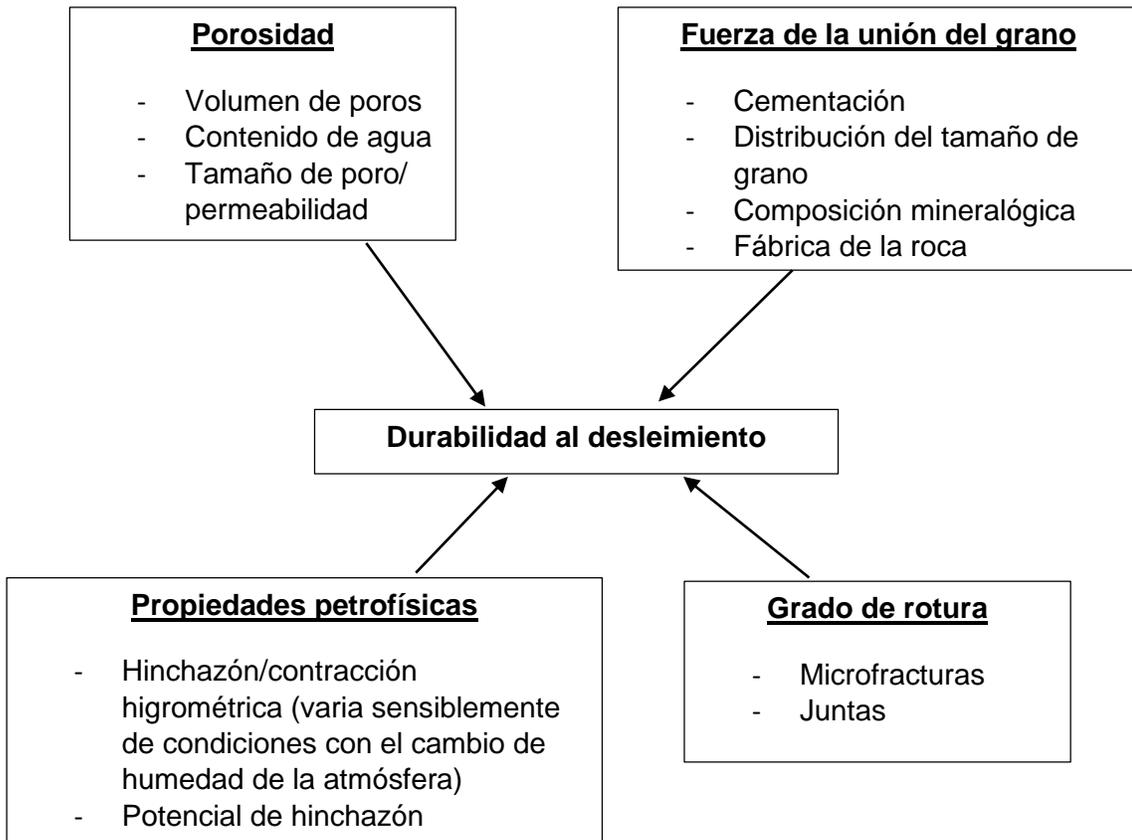
La caracterización y cuantificación del comportamiento del desleimiento en rocas blandas como lutitas, arcillolitas, lodolitas y limolitas, suele ser una tarea difícil porque su naturaleza es extremadamente diversa.

Los trabajos combinados de un gran número de investigadores durante los últimos 25 años han demostrado que la durabilidad de las rocas blandas está controlada por la proporción de minerales arcillosos expansivos, la estructura de la roca, las estructuras sedimentarias (láminas, espejo de falla o superficie de deslizamiento y microfracturas) y la cementación.

Los ingenieros a menudo sobreestiman los parámetros de diseño para taludes de corte en estas rocas cuando se realizan pruebas de laboratorio en muestras frescas. El ajuste de los parámetros de diseño para la cantidad anticipada de desintegración puede ser problemática debido a la naturaleza compleja y dependiente del tiempo del comportamiento de desleimiento (Rincon et al., 2016).

El método ASTM-Standard, el cual es utilizado para determinar la durabilidad al desleimiento en rocas blandas es el principal problema, ya que el esfuerzo técnico es relativamente alto debido a que la prueba funciona con material secado al horno por lo que no simula las condiciones naturales. Especialmente, no se reconoce la respuesta inmediata de materiales rocosos con baja durabilidad en condiciones naturales.

Para investigar las causas de la durabilidad al desleimiento, algunos investigadores probaron las relaciones entre las categorías de durabilidad y muchos otros parámetros de roca y suelos. La evaluación mostró que la durabilidad al desleimiento depende de una variedad de parámetros, que se muestra en la Figura 3-5.

**Figura 3-5.** Resumen de los parámetros que influyen en la durabilidad al desleimiento.

Fuente: Nickmann et al. (2006).

Algunos de estos parámetros muestran una gran influencia en la durabilidad, por lo tanto, pueden denominarse decisivos.

*Porosidad:* se puede describir por medio del volumen de poros. Por un lado, afecta la durabilidad al desleimiento al controlar la entrada y retención de fluidos a través del material rocoso y los parámetros hidráulicos y, por lo tanto, es una medida de la tasa de humectación y el volumen de percolación.

*Fuerza de la unión de grano:* el parámetro significa la cohesión de los granos individuales de un material rocoso. Depende de los minerales de construcción de la roca, su tamaño de grano, la cantidad y tipo de cemento potencial. Un valor indirecto de la fuerza de unión del grano podría ser la resistencia a la compresión uniaxial, es decir, el esfuerzo necesario para destruir la cohesión.

*Propiedades físicas:* Especialmente en materiales rocosos de grano fino, concretamente arcillas, la existencia de materiales arcillosos hinchables es un parámetro importante para el potencial de hinchamiento de la roca y una causa de la fuerte descomposición de estos materiales. Por lo tanto, la capacidad de la roca para resistir fuerzas disruptivas determinará hasta qué punto se producirá el debilitamiento, el hinchamiento o la desintegración completa del material rocoso.

*Grado de rotura:* Las rocas muy fracturadas muestran un rápido deterioro en las grietas o discontinuidades existentes al principio.

Las rocas con una alta estabilidad combinan una alta resistencia a la compresión con pequeños volúmenes de poros. La filtración de agua en estas rocas resulta ser lenta y a pequeña escala, por lo tanto, la estructura de la roca solo se puede romper lentamente en un gran número de ciclos de secado-humedecimiento. Cuando mayor sea el volumen de poros, mejor será la conductividad hidráulica y más rápido el agua podrá filtrarse y debilitar el material rocoso. En materiales de grano fino, puede desarrollarse una presión de poro adicional, lo que produce la descomposición espontánea de la roca.

Materiales rocosos con resistencia a la compresión media, pero con un tamaño de grano más grueso y composición mineralógica diferente y un volumen de poro más grande (ej. arenisca) también son duraderas. Dado que la filtración de agua es mucho más rápida en ese tipo de roca, es poco probable que se desarrolle una presión de poros y se exceda la fuerza de unión del grano.

El desleimiento de las rocas arcillosas, al exponerlas a las condiciones climáticas naturales, es un problema común en muchos proyectos de ingeniería. Dependiendo del clima de la región, las rocas arcillosas se desmoronan en respuesta a los ciclos de calentamiento y enfriamiento, humedecimiento y secado, y congelación y descongelación. Hay varios procedimientos de prueba disponibles para la caracterización del material arcilloso, pero sus rangos de aplicabilidad son significativamente limitados. Existen muchas pruebas de durabilidad para índices y parámetros de diseño para materiales similares al suelo y rocas blandas. El más importante y más comúnmente utilizado de estos es la prueba del índice de durabilidad al desleimiento, que fue desarrollada por Franklin &

Chandra (1972), recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas ISRM (1981) y estandarizada por la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales ASTM (1990).

El ensayo de durabilidad al desleimiento fue desarrollado inicialmente en el Imperial College de Londres por Franklin, Chandra y otros investigadores en 1970, con el objetivo de plantear un método simple y relativamente rápido, para identificar las lutitas con base a sus características al desleimiento.

Chandra (1970), implementó el índice de Durabilidad como el porcentaje (%) en peso seco retenido en el tambor después de 10 minutos; sobre este parámetro estableció las categorías de durabilidad que se indican en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3.** Calificación del índice de durabilidad por desleimiento

Índice	Durabilidad % (20 rev./min.)	Término descriptivo	Clasificación
1	95-100	Durabilidad extremadamente alta	Durabilidad muy alta
2	90-95	Durabilidad muy alta	
3	75-90	Durabilidad alta	Durabilidad alta
4	50-75	Durabilidad media	Durabilidad media
5	25-50	Durabilidad baja	Durabilidad baja
6	0-25	Durabilidad muy baja	

Fuente: Chandra (1970).

- Durabilidad muy alta: el número de fragmentos permanece prácticamente constante y no se observa ninguna esfericidad en ellos.
- Durabilidad alta: en este caso el número de fragmentos puede aumentar ligeramente y se observa alguna esfericidad en sus bordes.
- Durabilidad media: el número de fragmentos aumenta y se observa una buena esfericidad.
- Durabilidad baja: se aprecia bastante esfericidad con gran reducción en los tamaños de los fragmentos y una alta desintegración.

Gamble (1971), modificó el ensayo desarrollando un segundo ciclo de desleimiento sobre el material retenido en el tambor, con el objeto de establecer condiciones más rigurosas para la clasificación de lutitas más durables y sugerir sistemas para predecir la durabilidad de las lutitas de acuerdo con los resultados obtenidos para el índice de durabilidad (Id) a uno y dos ciclos.

Es difícil comparar el comportamiento al desleimiento de las rocas arcillosas en condiciones de campo con el comportamiento al desleimiento en condiciones de laboratorio porque el comportamiento en campo está influenciado por los siguientes factores que no pueden simularse fácilmente en el laboratorio (Gautam & Shakoor, 2013):

- El desleimiento en condiciones naturales de campo es un fenómeno a largo plazo en comparación con las pruebas de laboratorio que son a corto plazo, lo que lleva a resultados diferentes.
- El comportamiento del desleimiento del campo está muy influenciado por las fisuras.
- Las estructuras sedimentarias de campo contribuyen al desleimiento.

El grado de desleimiento se puede estimar por observación y descripción, monitoreando las deformaciones por hinchamiento, midiendo la reducción en la resistencia o tamizando una muestra de agregado para determinar la reducción del tamaño como resultado del proceso de desleimiento. Es preferible emplear este último método si se produce una separación apreciable, ya que se puede utilizar una muestra grande y representativa (Franklin & Chandra, 1972).

### **3.5 Expansión por hinchamiento**

La expansión por hinchamiento es el aumento del volumen de una roca a causa del incremento de la humedad, favorecido por una transformación del estado de esfuerzos, normalmente una relajación. Este fenómeno se debe por lo general a la adsorción de agua por los minerales hidrófilos contenidos en las rocas, especialmente los minerales arcillosos tipo esmectita o por la hidratación de compuestos cristalinos (transformación de anhidrita en yeso).

Varias litologías tienen componentes expansivos; por ejemplo, en algunas rocas carbonatadas (anhidrita), mientras que los minerales arcillosos pueden existir en una gran variedad de rocas sedimentarias como las lutitas, arcillolitas, limolitas, como componentes primarios o en rocas ígneas y metamórficas como minerales secundarios.

En las rocas sedimentarias, los minerales arcillosos son componentes frecuentes de la fracción clástica y son el resultado de los procesos de meteorización que alteraron a las rocas formadoras de esa fracción.

El proceso de expansión por hinchamiento se da como resultado de la interacción de moléculas de agua con la superficie de minerales arcillosos, donde se pueden establecer dos tipos de capas de hidratación: una capa de agua con espesor cercano a 1 nm y dos capas de un grosor de 10 a 20nm (Seedsman, 1993).

Los minerales arcillosos del grupo de las caolinitas, se caracterizan por tener fuertes uniones en los granos minerales, impidiendo que el agua interactúe con las superficies intergranulares, por lo tanto, el volumen ocupado por el agua es menor, puesto que solo se adhieren a las superficies externas de los granos y estos son de gran volumen. En las Illitas que se caracterizan por ser de grano fino, aun cuando el agua también se adhiere solo a las superficies externas, la cantidad de agua puede ser mayor debido a que se tiene un menor tamaño de grano. Para el grupo de las esmectitas sucede lo contrario, debido a la debilidad de las fuerzas que unen las capas individuales del mineral, por lo tanto, el agua ingresa entre ellas generando un fuerte hinchamiento, a causa del gran volumen de agua adherida.

La presencia de minerales arcillosos en el interior de una roca es catalogada de manera negativa, ya que estos minerales pueden reducir la resistencia de la roca y afectar a otras propiedades físicas, pero es especialmente importante en el tema de la durabilidad. Sin embargo, el proceso de alteración también puede actuar sobre la roca de manera positiva, cuando se produce la resoldadura de las discontinuidades existentes en la roca mediante la disposición de óxidos ferrosos, calcita o material de relleno silíceo.

Las propiedades iniciales de la roca pueden cambiar durante los procesos de meteorización y/o alteración y pueden resultar en una estructura de roca débil sensible a

la humedad; especialmente si los minerales que la constituyen se descomponen o se alteran en minerales arcillosos.

La degradación de las rocas se refiere a los cambios irreversibles en las propiedades mecánicas que ocurren como resultado de los procesos de meteorización. Así, la degradación de las rocas se puede evaluar, desde un punto de vista macroscópico, en términos de pérdida de resistencia y rigidez, en términos de cambios de volumen irreversibles (hinchamiento) y en términos de pérdida de continuidad de masa (fisuración). A nivel microscópico, la degradación puede evaluarse en términos de modificaciones en la disposición estructural de los constituyentes de la roca y en cambios de composición y distribución del tamaño de los poros. Sin embargo, no está bien establecido un vínculo fuerte entre la respuesta a nivel macro y la evolución de la microestructura, ni los mecanismos iniciales que conducen a la degradación de las rocas.

### **3.5.1 Minerales arcillosos**

La arcilla es un término general, utilizado para describir a las partículas sedimentarias de diámetro inferior a  $2\mu\text{m}$  y un espesor menor a 10 nm. Desde el punto de vista mineralógico, los minerales arcillosos son filosilicatos de aluminio hidratados o silicatos en hojas; la familia mineralógica más abundante en la corteza terrestre (cerca del 90%), en algunos casos con cantidades variables de Fe, Mg, K y otros cationes organizados en una estructura de dos o tres capas. (Gozali Balkanloo et al., 2022),

La caolinita, la montmorillonita, la Illita y la clorita son minerales arcillosos dominantes en la litosfera que se crean como producto de la meteorización y la erosión de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias; por lo tanto, podría decirse que son minerales de la cotidianidad, pues continuamente se están formando y transformando (Alejano Monge & Ramírez Oyanguren, 2007).

En términos de estructura química, las partículas de arcilla están compuestas por varios tipos de aluminosilicatos hidratados, que tienen diferentes propiedades químicas y poseen propiedades de resistencia eléctrica, térmica, química y UV (Cai et al., 2022).

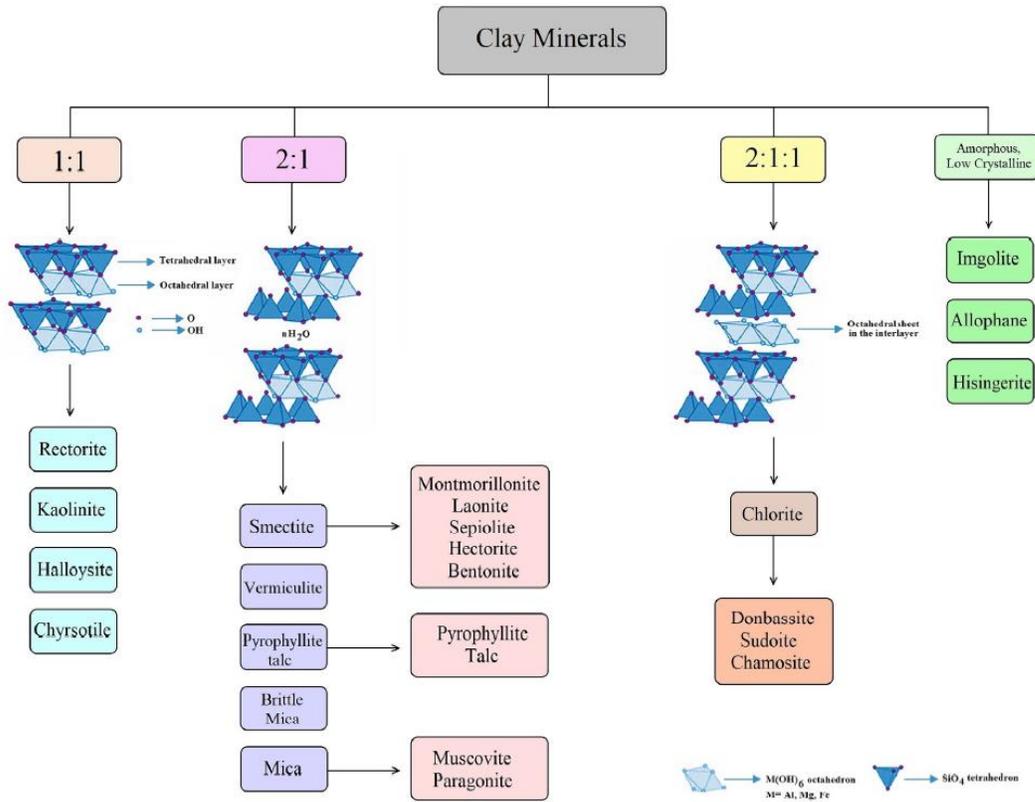
Los minerales arcillosos se caracterizan de otros minerales por tener una plasticidad en modo húmedo, lo que induce una forma contante después de eliminar la presión sobre ellos. Sin embargo, las ventajas que más han llamado la atención incluyen la alta área de superficie específica por su estructura laminar, estructura química de sus superficies por modificación de la interfaz y alta capacidad de intercambio iónico (Abdeldaym et al., 2021).

Los minerales arcillosos se dividen en dos grupos de formas amorfas y cristalinas y existen una variedad de tipos, como la montmorillonita, caolinita, haloisita, vermiculita, Illita, clorita y palygorskita. Aun cuando los minerales arcillosos han sido clasificados tradicionalmente como compuestos de silicato, también contienen otros elementos como O, Al o Mg, por lo tanto, los minerales arcillados pueden considerarse como hidróxidos de Si, Al o Mg.

Las bandas de Si-O se encuentran conectadas en forma de cuadriláteros en tres vértices y el cuarto vértice permanece libre. La estructura de estos tipos de minerales generalmente consiste en láminas de estructuras tetraédricas y octaédricas, en las que los iones OH se encuentran en el vértice y los iones Al en el centro. Cada tetraedro consta de un catión coordinado por cuatro átomos de oxígeno y unido al tetraedro adyacente por una unión de tres esquinas para crear u patrón de red bidimensional hexagonal infinito en el cristal. En las láminas octaédricas, las conexiones entre cada octaedro y el octaedro vecino se establecen compartiendo aristas, creando laminas hexagonales o cuasi hexagonales simétricas (Ahmad et al., 2010).

Las principales subclases de silicatos en capas se basan en los tipos de configuraciones de láminas octaédricas y tetraédricas y en cómo se combinan unas con otras. Los minerales arcillosos se clasifican en una relación de 1:1 en la que una lámina octaédrica está unida a una tetraédrica, para la proporción 2:1, dos laminas tetraédricas intercalan una lámina octaédrica, y si hay una lámina trioctaédrica dominada por magnesio (conocida como brucita) entre los minerales 2:1, se denomina una relación 2:1:1 (Gozali Balkanloo et al., 2022), ver Figura 3-6.

**Figura 3-6.** Ilustración esquemática de la clasificación de los minerales arcillosos según su estructura.

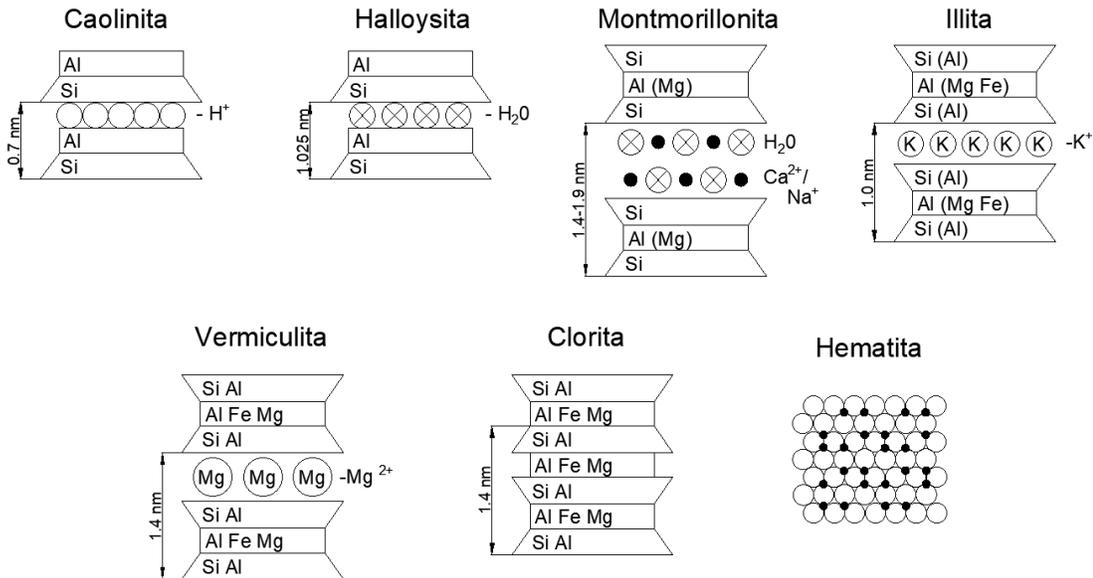


Fuete: Gozali Balkanloo et al. (2022).

Por otra parte, algunas veces se presentan sustituciones en la red cristalina que, aunque introducen deformaciones, mantienen su forma (sustituciones isomorfas). Estas sustituciones, alteran el equilibrio eléctrico del cristal; ya que, si bien es cierto que mantienen la forma o estructura cristalina, dan como resultado una pequeña deformación en la red, debido a que los iones no son del mismo tamaño; llevando a un aumento de la carga neta negativa debido a que la valencia de los iones sustituyentes, cargados positivamente, es comúnmente inferior a la de los iones normalmente presentes. Siendo necesario neutralizar la carga negativa en la superficie por cationes, llamados “cationes de cambio” porque pueden ser fácilmente sustituidos por otros.

En la Figura 3-7 se presentan los esquemas de las capas que conforman los filosilicatos más comunes.

**Figura 3-7.** Esquemas de las capas que forman los minerales arcillosos más frecuentes



Fuente: Selby (1993).

Algunos minerales arcillosos consiguen mezclarse en capas alternativas, dando origen a interestratificaciones, donde cada mineral mantiene sus propiedades. Algunos ejemplos de interestratificaciones frecuentes son de montmorillonita con Illita, clorita con vermiculita, Illita con vermiculita y clorita.

Grim (1962), resume los rangos característicos de hinchamiento para algunos minerales arcillosos, ver Tabla 3-4 :

**Tabla 3-4.** Rangos de hinchamiento para algunos minerales arcillosos.

Mineral de arcilla	% Hinchamiento Libre
Montmorillonita-Na	1400 a 2000
Montmorillonita-Ca	45 a 145
Vermiculita	Variable
Clorita	Variable
Illita	60 a 120
Caolinita	6 a 60

Fuente: Grim (1962).

### 3.5.2 Mecanismos de expansión

El agua juega un papel significativo en el comportamiento de las rocas y los suelos (expansión-retracción), especialmente en aquellas que contienen minerales arcillosos. Pousada Presa (1982), resume los numerosos mecanismos de expansión que han sido descritos en la literatura:

- *Atracción:* las partículas de arcilla compuestas por minerales arcillosos, tienen en sus superficies una carga eléctrica negativa que da lugar a fuerzas atractivas que se compensan por cationes, en particular, por moléculas dipolares, como el agua. Formando una importante “fuerza de fijación” del agua de la capa doble. Su dominio en la variación de volumen deriva del esfuerzo generado para nivelar la inestabilidad de carga. Por lo tanto, el volumen de agua en la capa doble seguirá creciendo hasta que suceda un suficiente cambio de volumen.
- *Repulsión osmótica:* Producida por los gradientes de presión generados en las capas dobles como consecuencia de las variaciones en la concentración iónica de las mismas. La mayor concentración sucede cerca de las superficies del mineral y decrece al alejarse hacia el límite exterior de la capa doble. El dominio de este mecanismo se explica considerando el límite de la capa doble como una membrana semipermeable expuesta a una fuente de agua libre. Por lo tanto, el agua libre intenta pasar hacia el interior de la capa doble con el fin de disminuir la concentración iónica, dando como resultado un aumento en el volumen de agua de la capa doble y desarrollando fuerzas de repulsivas entre capas dobles interactuantes, que se reflejan en un incremento del volumen de la masa.
- *Hidratación de cationes:* se fundamenta en la hidratación física de los cationes de cambio que se encuentran unidos a las superficies de la partícula. Su influencia radica en el aumento que el radio iónico de los cationes experimenta a medida que se hidratan, dando lugar a un cambio de volumen.
- *Hinchamiento intercrystalino:* se genera por la expansión interlaminar de la celda cristalina (principalmente en las esmectitas) que puede añadirse a la presión

osmótica. Varios minerales arcillosos expansivos logran hincharse a causa de que admiten cantidades de agua que pueden llegar a alcanzar de 4 a 5 veces el volumen de la fase sólida. El tipo e intensidad del hinchamiento, que puede exhibir una roca por efecto de los minerales arcillosos, depende de varios factores como: el tipo y cantidad de minerales arcillosos, la distribución en el interior de la roca, la magnitud de los espacios capaces de expandirse en el interior de las redes cristalinas y de la distancia entre partículas, así como de la composición y disponibilidad de las disoluciones que percolan a través de la roca.

Algunos autores han tomado en consideración, pero en menor influencia en la expansión a las fuerzas de Van der Waals y la relajación elástica.

Adicionalmente, la imbibición de agua en cantidades significativas, disminuye manera importante la resistencia de la roca, ayudando a la particularización del material; si se impide el aumento de volumen, el hinchamiento da como resultado el desarrollo de una presión que, a su vez, puede conducir a la fractura del material rocoso circundante. Es importante evaluar la presencia de minerales que puedan disolverse en componentes que deterioren por ejemplo el revestimiento de hormigón proyectado de los túneles y la estabilidad de las excavaciones (Vergara & Triantafyllidis, 2016).

El grado de alteración de la roca es una reacción de los minerales arcillosos a la interacción con el agua (superficie de exposición, penetración intersticial y flujo). El desplazamiento del agua por el interior de la roca y sus condiciones de evaporación-flujo-humedecimiento vienen señaladas por el tamaño y la forma de la red porosa, que a su vez es función de la distribución espacial de los granos minerales (fábrica).

Cambios de humedad y temperatura de tipo estacional y diario, se consideran uno de los principales procesos que pueden inducir microfisuras en las zonas más superficiales en el material rocoso ya que pueden alcanzar valores extremadamente elevados e inducir la desintegración. Este comportamiento obedece en gran proporción a la interacción entre los constituyentes de la roca y la humedad; ya que los vacíos, incluidos los poros y las microfracturas, brindan rutas de acceso para que el agua obtenga acceso a los minerales sensibles al agua (Selen et al., 2021).

Algunos autores han llevado a cabo mediciones de los esfuerzos de expansión y han señalado la importancia de este mecanismo de deterioro. Por ejemplo, la presencia de esmectitas en un espécimen de roca basáltica puede generar un esfuerzo de expansión de 20 MPa y en margas de 5 y 13 MPa; siendo estos valores suficientes para fracturar rocas muy resistentes (Rodrigues, 2001).

Cuando los minerales arcillosos presentes en una roca no tienen carácter expansivo, el esfuerzo de expansión es mínimo, pero la repetición de ciclos de humedecimiento y secado, como consecuencia de la variación de la humedad, pueden contribuir a la falla por un mecanismo de fatiga progresiva de la masa rocosa.

Otro mecanismo importante es la alteración inducida por procesos de hidrólisis de los minerales primarios (feldespatos, micas, piroxenos, anfíboles, olivinos, etc.), generando la transformación progresiva en minerales arcillosos.

### **3.5.3 Factores que influyen en la expansión**

Los factores fundamentales que influyen en la expansión, se dividen en tres grupos. El primero agrupa a las propiedades intrínsecas de los minerales arcillosos y de la roca, como *tipo de mineral arcilloso, contenido de mineral arcilloso, densidad seca y contenido de humedad*. El segundo grupo está relacionado con las *propiedades del fluido que ocupa los poros*, por ejemplo, la *composición electroquímica del agua* y la *interacción agua-arcilla*; y el tercer grupo reúne las *condiciones del medio de ambiente*, ya sea en campo o en el laboratorio, la *historia geológica del depósito o de esfuerzos, la temperatura* y el *agua* (Pousada Presa, 1982).

El potencial de expansión se basa en la *composición mineralógica* y proporción de minerales expansivos en la red cristalina, mientras que los factores intrínsecos restantes, como son el *fluido de los poros* y las *condiciones del medio ambiente*, establecen la extensión o magnitud del cambio de volumen.

Entre los minerales arcillosos expansivos, se resalta la montmorillonita, que habitualmente exhibe mayor potencial de expansión, debido al tipo de estructura, a la alta superficie

específica y elevada capacidad de cambio de cationes, haciendo que al estar saturada se generan capas dobles con gran espesor en relación al tamaño de los cristales.

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, ISRM (1981), plantea tres ensayos de laboratorio para caracterizar el potencial de expansión de las rocas:

- Medición de la presión axial de hinchamiento a volumen constante.
- Medición de la deformación axial de hinchamiento en una muestra de roca confinada lateralmente y sometida a cargas axiales contantes.
- Medición de la deformación de hinchamiento libre en dirección axial y radial.

Es recomendable realizar una cantidad de ensayos de expansión representativos, porque se ha comprobado que la dispersión de los resultados es grande. El potencial de expansión de una roca puede cambiar significativamente según la dirección en que se mida, paralela o perpendicular a la estratificación, por este motivo es conveniente realizar ensayos por lo menos en dos direcciones que permitan caracterizar adecuadamente la roca (Alejano Monge & Ramírez Oyanguren, 2007).

Ensayos realizados en condiciones de expansión libre, han demostrado que el aumento del volumen es mayor en las primeras etapas donde ingresa el agua, pero el mecanismo de expansión puede tener lugar en periodos muy largos, particularmente cuando se trata de materiales poco porosos. En la excavación de taludes, se eliminan la presión de confinamiento generando bloques con superficies libres, cuanto menor es el tamaño de los bloques más fáciles es el ingreso del agua en su interior y, por consiguiente, son más expuestos a la expansión y la degradación. Por lo tanto, se puede afirmar la expansión por hinchamiento es el resultado de un proceso donde los minerales arcillosos y la presencia de humedad son protagonistas.

La valoración de la importancia de la expansión por hinchamiento puede ser manejada a través de dos aspectos: uno directo, donde se mide la causa, expresada a través de la cantidad de minerales arcillosos presentes en la roca; y otro indirecto, por el cual se evalúan solo los síntomas como el tipo y magnitud del hinchamiento. Los minerales arcillosos poseen un tamaño de partícula muy pequeño, apenas visible a través de un microscopio óptico, por lo tanto, es difícil de cuantificar por esta técnica y cuando es

posible, lleva implícitamente una gran incertidumbre. A pesar de estas dificultades, algunos autores han usado ampliamente este instrumento e incluso han propuesto su uso para obtener valores que sirven como criterio para predecir el comportamiento expansivo de las rocas a una escala regional. A través de la implementación de la difracción de rayos X (XRD), los minerales arcillosos han podido ser determinados con mayor exactitud siempre y cuando se cuenten con patrones internos de calibración.

Por lo tanto con el fin de conocer de una manera más concreta los procesos involucrados en la degradación y/o conservación de las rocas es imprescindible realizar análisis más detallados de la mineralogía, petrografía y textura de la roca afectadas, así como un registro de los productos de la alteración (Veniale et al., 2001); ya que los problemas evidenciados en diferentes proyectos de ingeniería causados por diferentes procesos de degradación de la roca conducen a sobrecostos importantes de mantenimiento y reparación que suceden con frecuencia.

## 4 Localización geográfica e hidrometeorológica

La zona de estudio del presente Trabajo Final de Maestría se ubica dentro de la zona ecuatorial del continente americano, sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental, específicamente dentro de la cuenca del río Tunjuelo. En el área afloran rocas sedimentarias cretácicas (Grupo Guadalupe) y terciarias (Formaciones: Guaduas, Cacho, Bogotá, Areniscas de la Regadera y Usme) que forman los flancos de la principal estructura del área, el sinclinal de Usme, cuyo eje se direcciona de sur a norte aproximadamente paralelo al río Tunjuelo.

### 4.1 Localización geográfica de la zona de estudio

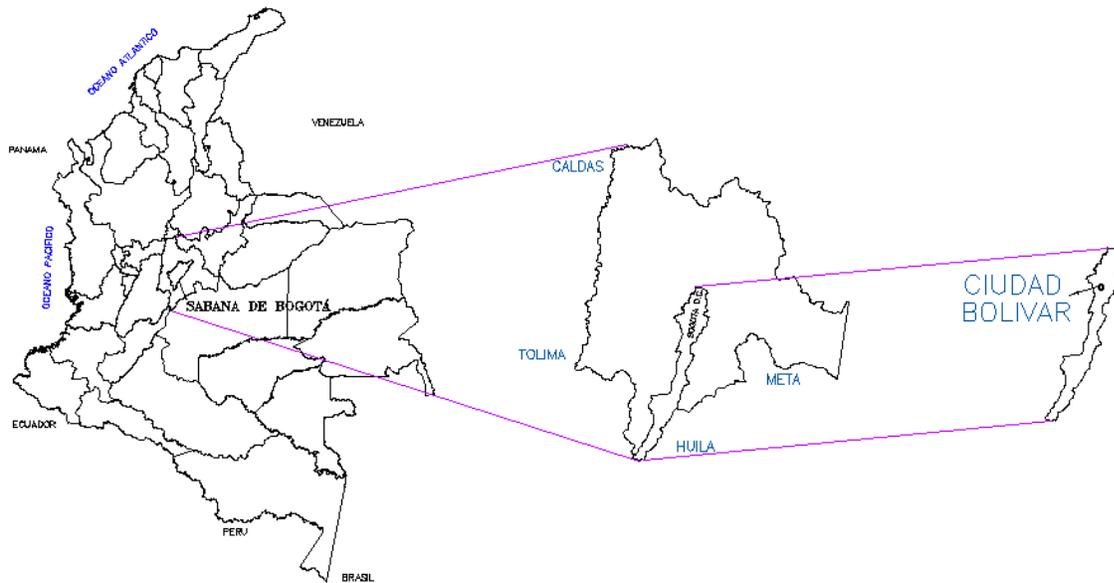
La mina Los Ajos donde se desarrolló la parte práctica del presente trabajo de grado, es propiedad de Ladrillera Santafé S.A. y se encuentra ubicada en la localidad de Ciudad Bolívar, al sur de la ciudad de Bogotá D.C. (ver Figura 4-1).

Las coordenadas geográficas de la entrada a la mina Los Ajos son:

**Tabla 4-1.** Coordenadas de la entrada de la mina Los Ajos

	<b>E</b>	<b>N</b>
<b>Mina Los Ajos</b>	993022	992347

Fuente: Elaboración propia

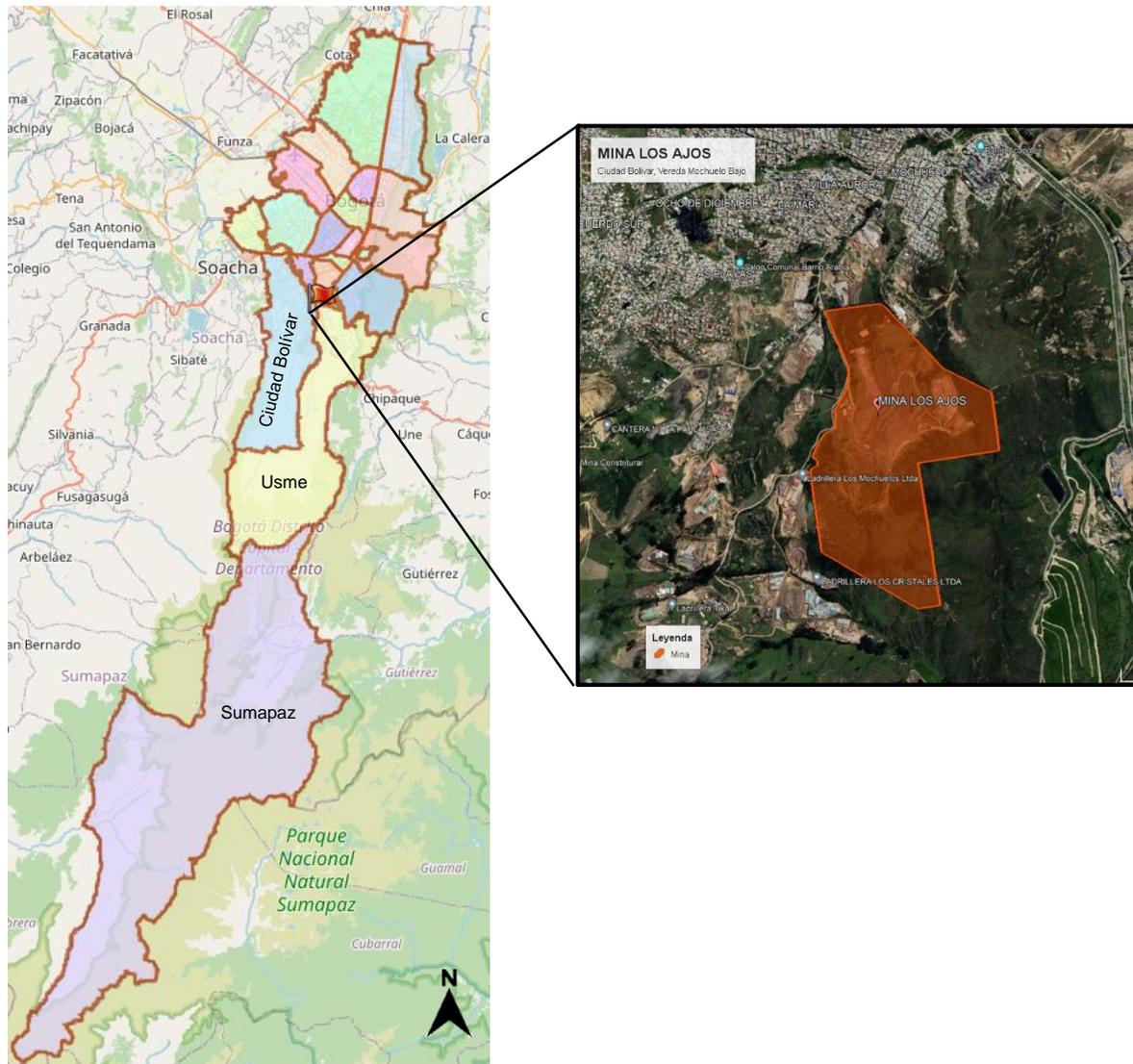
**Figura 4-1.** Localización general de la mina de arcilla Los Ajos- Ladrillera Santafé S.A.

Fuente: Elaboración propia

Específicamente, la mina se ubica en la zona rural de la localidad de Ciudad Bolívar, en la vereda Mochuelo Bajo. En la zona aledaña a la mina se encuentran el Relleno Sanitario Doña Juana y las ladrilleras Los Mochuelos y Cristales Ltda. Su acceso se realiza por la Avenida Boyacá en sentido a Villavicencio y por el barrio El Tesoro por la vía Mochuelo (ver Figura 4-2).

Los sitios de análisis seleccionados dentro de la mina corresponden a dos taludes de la explotación que se encuentran en la zona sur. Estos taludes están en una zona poco activa ya que la explotación se está desarrollando en otro sector.

**Figura 4-2.** Localización específica de la mina en la localidad Ciudad Bolívar, vereda Mochuelo Bajo.



Fuente: Geoportal Capas Normativas IDIGER y Google Earth 2021.

La elección de los taludes de análisis del presente trabajo de maestría se realizó con base en su tiempo de conformación, su problemática y la ubicación.

En la Figura 4-3 se observa la localización en planta de los dos sitios y en la Foto 4-1 y la Foto 4-2 se presenta la vista general del Talud 1 y Talud 2 para enero de 2020 cuando se realizó la visita de reconocimiento.

**Figura 4-3.** Localización en planta de los sitios de análisis (Talud 1 y Talud 2).



Fuente: Google Earth 2021.

El Talud 1 se encuentra al sur de la mina y fue conformado aproximadamente en el año 2012. Tiene una inclinación de  $48^\circ$  ( $\beta_T$ ), una altura de 7 m, con una berma inferior de 3,5 m y una superior de 7,3 m; la cara del talud se encuentra con alguna cobertura vegetal, como se evidencia en la Foto 4-1. Está compuesto por arcillolitas café rojizo con una inclinación de estratos ( $\beta_E$ ) de  $70^\circ$ .

**Foto 4-1.** Vista general del Talud 1, conformado aproximadamente en el año 2012.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

El Talud 2 se encuentra ubicado al sur de la mina en cercanías al patio y fue conformado aproximadamente en el año 2017. Tiene una inclinación de  $40^\circ$  ( $\beta_T$ ), una altura de 19 m, con una berma inferior de 5,0 m; la cara del talud presenta surcos que se forman debido a la concentración del flujo del agua de escorrentía. El talud no presenta cobertura vegetal, como se muestra en la Foto 4-2. Litológicamente está compuesto por arcillolitas grises y café rojizo, la inclinación de estratos ( $\beta_E$ ) es de  $57^\circ$  hacia el SE.

**Foto 4-2.** Vista general del Talud 2, conformado aproximadamente en el año 2017.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

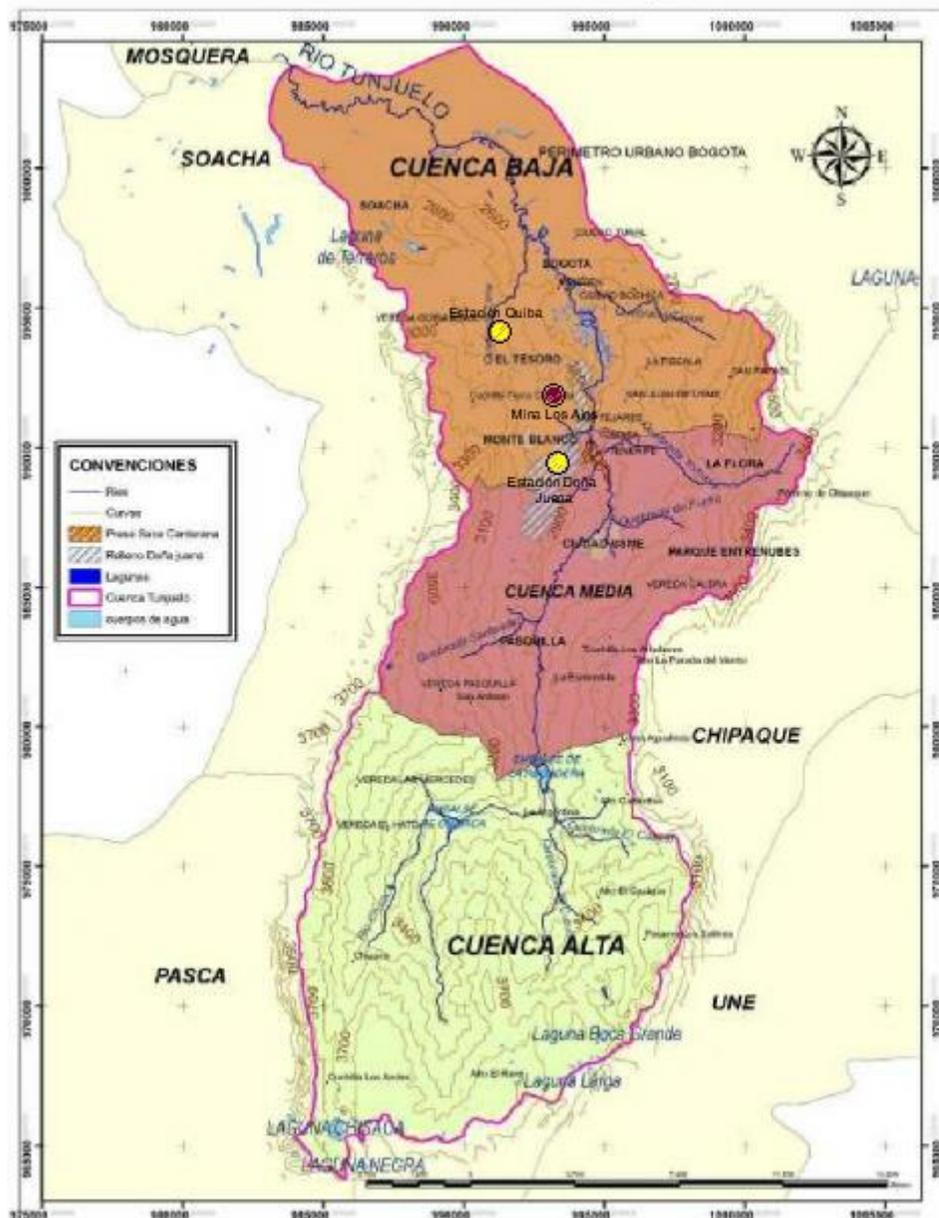
En la visita de reconocimiento se evidencio la susceptibilidad en las unidades de arcillolitas que conforman los taludes a la acción de agentes tales como: precipitación, escorrentía superficial, viento y cambios de temperatura; siendo evidente la meteorización por el proceso de desleimiento debido a cambios volumétricos de la superficie expuesta a causa de la hidratación y deshidratación de sus minerales, erosión concentrada evidente en la erosión laminar y el desarrollo de surcos y cárcavas.

## **4.2 Evaluación hidrometeorológica**

La subcuenca baja del Rio Tunjuelo tiene un área de aproximadamente 390 km<sup>2</sup> y una pendiente media del 0,16 %; esta parte de la cuenca está caracterizada por una fuerte intervención antrópica, siendo la más poblada de la extensión total de la cuenca del río.

En esta subcuenca las estaciones que se encuentran en cercanías de la zona de estudio son la estación Doña Juana y la estación Quiba, las cuales se están identificadas en color amarillo en la Figura 4-4.

**Figura 4-4.** Plano división de la cuenca del río Tunjuelo. Fuente: Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Tunjuelo.



Fuente: Consorcio Planeación Ecológica (2007).

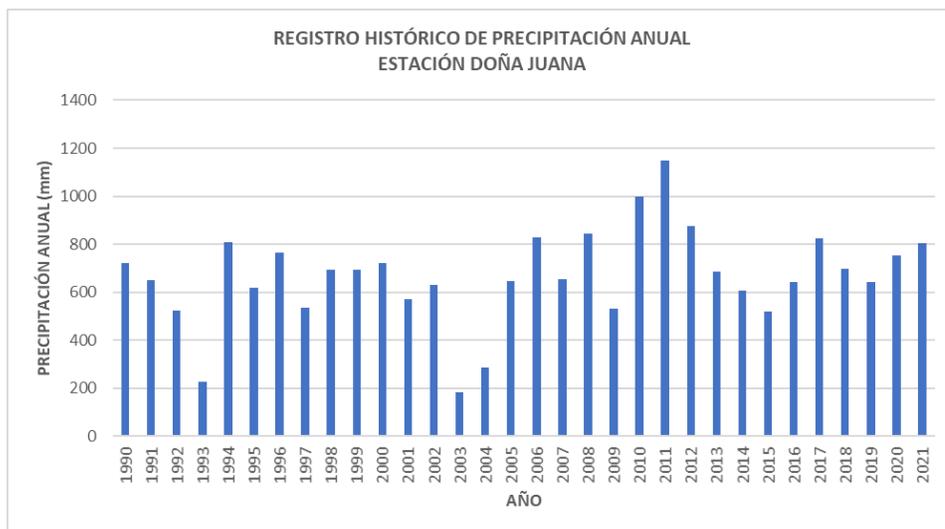
A continuación, se presenta la información recolectada de las estaciones Doña Juana y Quiba a través de las plataformas de consulta y descarga de datos hidrometeorológicos del IDEAM, del catálogo de estaciones hidrometeorológicas del IDIGER y de la CAR para un periodo de estudio de 32 años (1990-2021).

**Tabla 4-2.** Información hidrometeorológica de la zona de estudio con base en los datos reportados en la estación Doña Juana.

Estación meteorológica	Doña Juana
Localización de la estación meteorológica	989461 N 993362 E
Elevación (msnm)	2831
Tipo de estación	Climatológica principal (CP)
Precipitación media mensual (mm)	58,12
Precipitación máxima mensual (mm)	95,77
Precipitación media anual (mm)	666,42
Humedad relativa media mensual (%)	73,29
Temperatura media mensual (°)	12,63°
Promedio de días mensuales con precipitación	15
Mes de máxima precipitación	Mayo y Noviembre

Fuente: Elaboración propia.

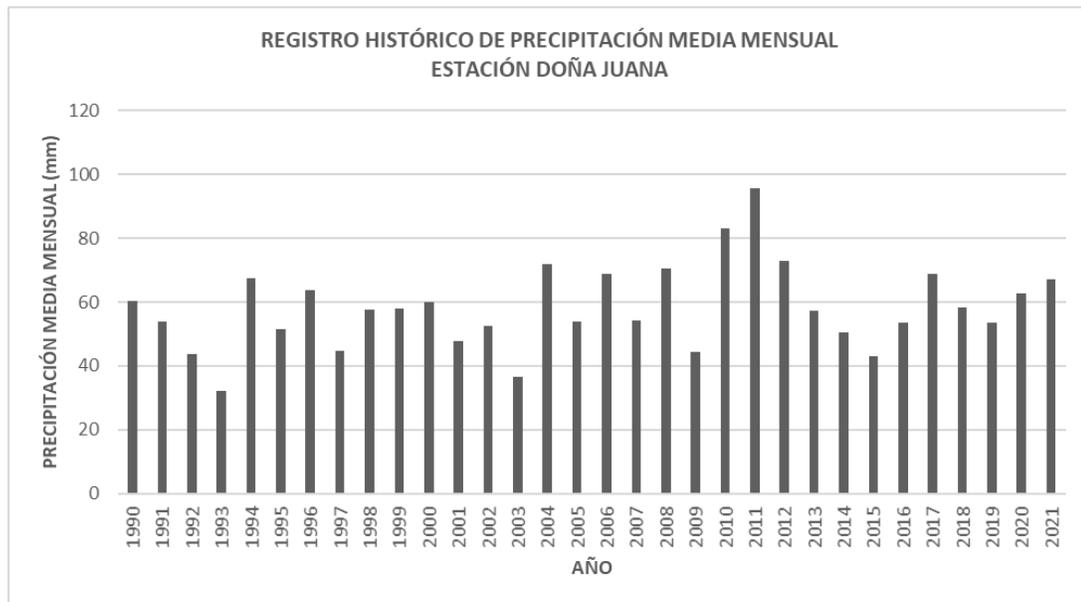
De la Figura 4-5 a la Figura 4-9 se presentan las variaciones históricas de las variables imperantes en el área de estudio, a través de la estación meteorológica de Doña Juana.

**Figura 4-5.** Registro histórico de la variación de la precipitación anual para la estación Doña Juana.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-5 se evidencia que la precipitación media anual histórica de la zona de estudio varía aproximadamente entre 182,8 mm y 1149,2 mm para un periodo comprendido entre 1990 y 2021. La precipitación media anual es de 666,42 mm.

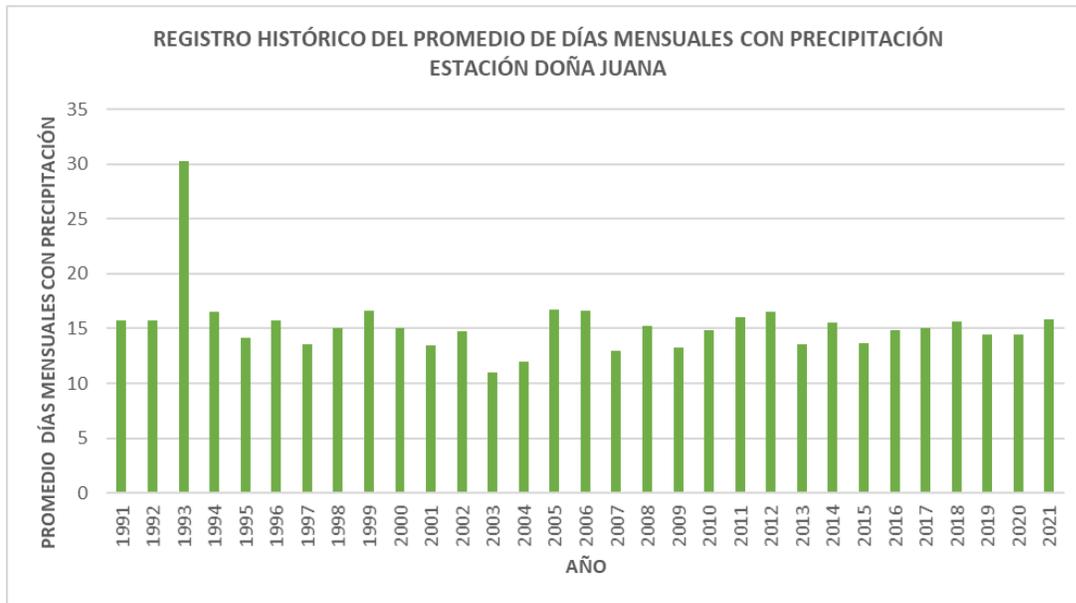
**Figura 4-6.** Registro histórico de la variación de la precipitación media mensual de la estación Doña Juana.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-6 muestra que la precipitación media mensual histórica de la zona de estudio varía entre 32,2 mm y 95,8 mm para un periodo comprendido entre los años 1990 y 2021. La precipitación media mensual es de 56,32 mm.

**Figura 4-7.** Registro histórico de promedio de días mensuales con precipitación de la estación Doña Juana.

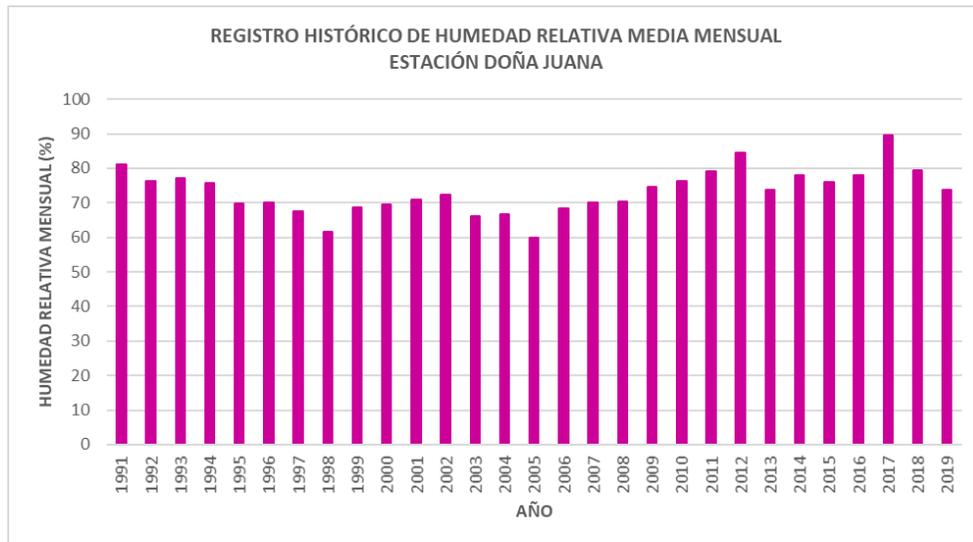


Fuente: Elaboración propia.

Según los datos analizados del registro histórico de días con precipitación de la estación Doña Juana, se observa en la Figura 4-7 que los días con precipitación se encuentran entre 11 y 30 días para un periodo de análisis comprendido entre 1991 y 2021; los días con precipitación en promedio son 15 días, demostrando que la precipitación en la zona es alta, haciendo que los taludes de análisis se vean expuestos periódicamente a precipitaciones por lo menos la mitad del mes.

Con respecto a los registros históricos de humedad relativa mensual en la zona, la cual representa la relación porcentual entre la cantidad de vapor en el aire en cualquier momento determinado y la que tendría que contener para saturarse a una misma temperatura y presión. La Figura 4-8 presenta el comportamiento a lo largo de 1991 y 2019, donde se tienen valores entre 60% y 90%, siendo la humedad relativa media mensual de 73,29%, haciendo que la zona se clasifique de alta humedad relativa.

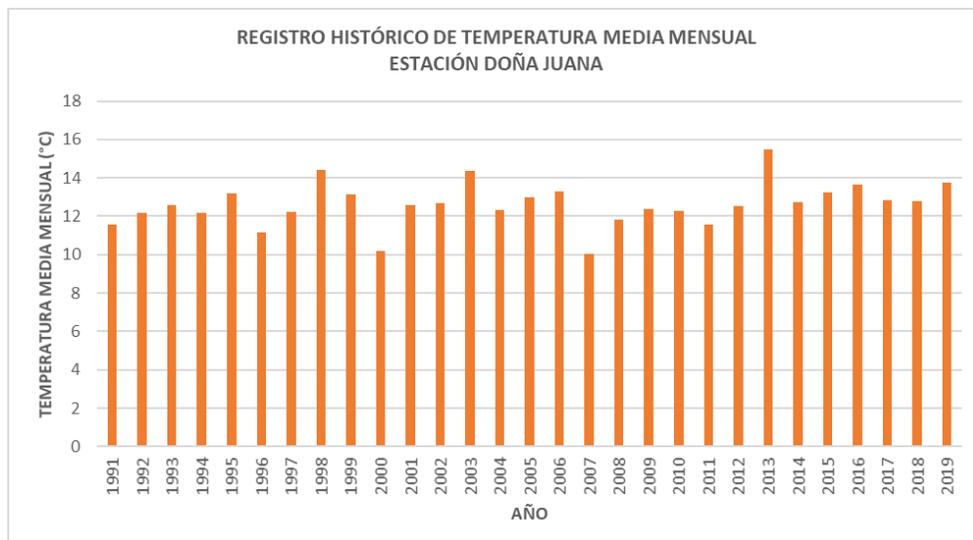
**Figura 4-8.** Registro histórico de la variación de la humedad relativa media mensual de la estación Doña Juana.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la temperatura media mensual en la zona entre 1991 y 2019 se muestra en la Figura 4-9. Los valores se encuentran entre 10 °C y 15,5 °C, estando la temperatura media mensual en 12,63 °C, la cual corresponde a una zona de clima frío.

**Figura 4-9.** Registro histórico de la temperatura media mensual de la estación Doña Juana.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4-3 se presenta el resumen de la información meteorológica consultada para la estación Quiba.

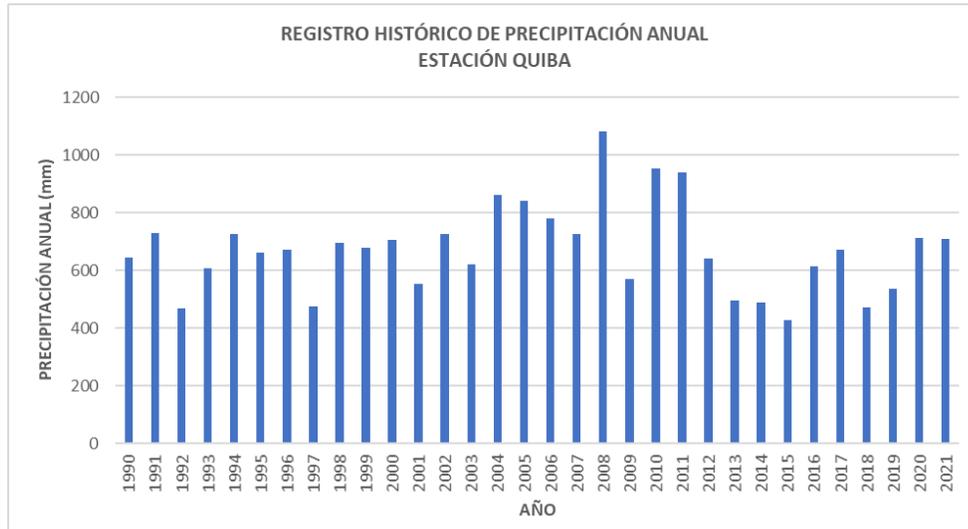
**Tabla 4-3.** Información hidrometeorológica de la zona de estudio con base en los datos reportados en la estación Quiba.

Estación meteorológica	Quiba
Localización de la estación meteorológica	994126 N 991295 E
Elevación (msnm)	2916
Tipo de estación	Climatológica principal (CP)
Precipitación media mensual (mm)	56,32
Precipitación máxima mensual (mm)	90,14
Precipitación media anual (mm)	671,38
Temperatura media mensual (°)	14,60°
Promedio de días mensuales con precipitación	15
Mes de máxima precipitación	Mayo y Octubre

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4-10 a la Figura 4-13 se presentan las variaciones históricas de las variables imperantes en el área de estudio, a través de la estación meteorológica de Quiba.

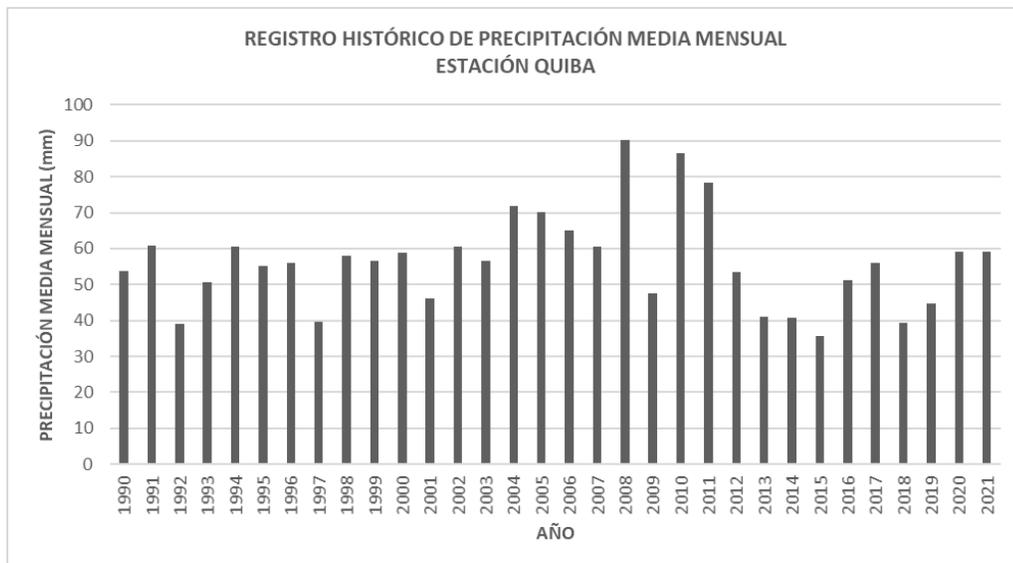
**Figura 4-10.** Registro histórico de la variación de la precipitación anual para la estación Quiba.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-10 se evidencia que la precipitación media anual histórica de la zona de estudio varía aproximadamente entre 482,5 mm y 1081,7 mm para un periodo comprendido entre 1990 y 2021. La precipitación media anual es de 671,38 mm.

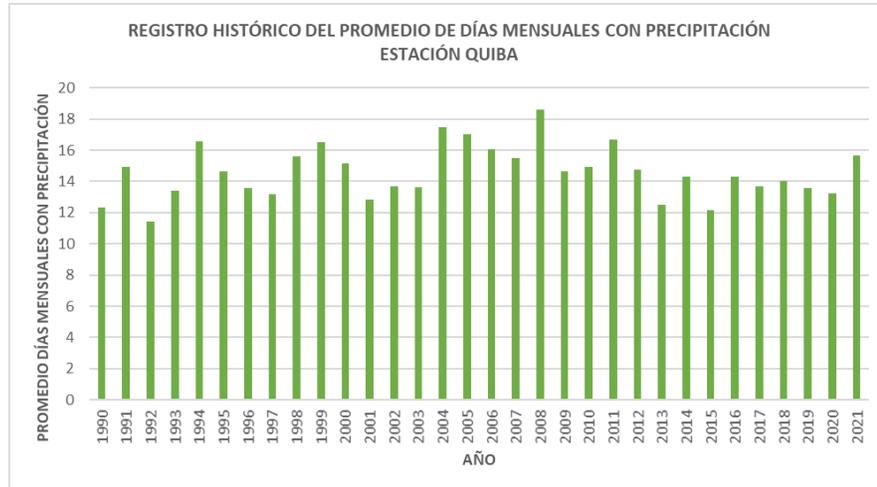
**Figura 4-11.** Registro histórico de la variación de la precipitación media mensual de la estación Quiba.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-11 muestra que la precipitación media mensual histórica de la zona de estudio varía entre 35,71 mm y 90,14 mm para un periodo comprendido entre los años 1990 y 2021. La precipitación media mensual es de 56,32 mm.

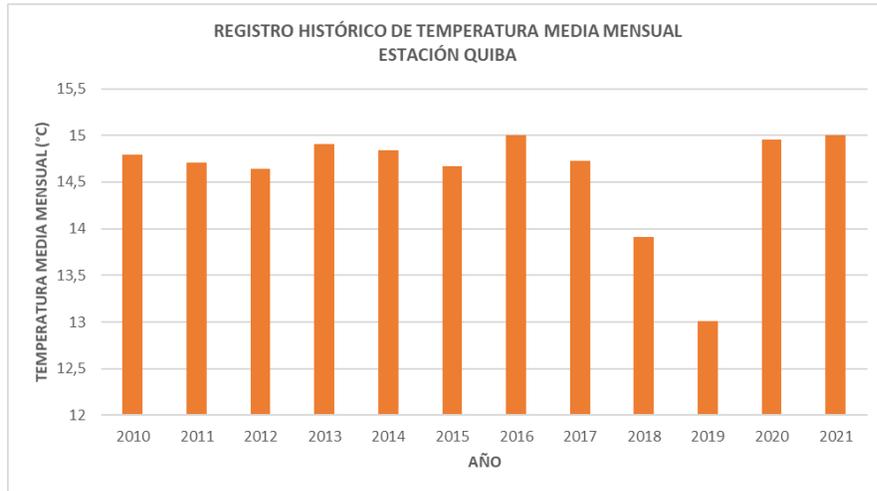
**Figura 4-12.** Registro histórico de promedio de días mensuales con precipitación de la estación Quiba.



Fuente: Elaboración propia.

Según los datos analizados del registro histórico de días con precipitación de la estación Quiba, se observa en la Figura 4-12 que los días con precipitación se encuentran entre 11 y 19 días para un periodo de análisis comprendido entre 1990 y 2021; los días con precipitación en promedio son 15 días, demostrando que la precipitación en la zona es alta, haciendo que los taludes de análisis se vean expuestos periódicamente a precipitaciones por lo menos la mitad del mes.

**Figura 4-13.** Registro histórico de la temperatura media mensual de la estación Doña Juana.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la temperatura media mensual en la zona entre 2010 y 2021 se muestra en la Figura 4-13. Los valores se encuentran entre 13 °C y 15 °C, estando la temperatura media mensual en 14,60 °C, la cual corresponde a una zona de clima frío. Los registros históricos de los parámetros hidrometeorológicos anteriormente mostrados indican que la zona de estudio presenta temperatura promedio de 13,62 °C, humedad relativa de 73,29 % y precipitaciones de 57,22 mm mensuales con al menos 15 días de lluvia durante el mes; siendo los meses de mayo, octubre y noviembre los de máxima precipitación.

## 5 Geología

En el área de la mina de arcilla Los Ajos y alrededores están presentes rocas sedimentarias de la Formación Bogotá (Pgb) y la Formación Regadera (Pgri); los suelos son depósitos de suelos transportados (ver Figura 5-1).

### 5.1 Geología regional

#### **Formación Bogotá (Pgb)**

Representada por un conjunto de capas gruesas de arcillolitas de color crema, comúnmente abigarradas, con intercalaciones de areniscas friables y limolitas. Corresponde a un ambiente fluvial de desborde entre el Paleoceno y Eoceno y presenta un espesor promedio de 1.600 m. La formación Bogotá se localiza a media ladera sobre los flancos de valle de Usme, en especial en la zona de los barrios Mochuelo y Guacamayas.

La secuencia del terciario medio está constituida por tres conjuntos: el inferior, arenoso y arcilloso e incluía el horizonte de Cacho en la parte basal; el conjunto medio conformado por arcillolitas abigarradas entre las cuales se intercalan algunos bancos gruesos de areniscas y areniscas arcillosas y el conjunto superior, formado por bancos de areniscas de grano grueso, blandas que alternan con arcillolitas abigarradas (Hubach, 1931).

La litología de esta formación genera una morfología suave de valles, constituida por intercalaciones de bancos de arcillolitas de variados colores con esporádicas crestas formadas por areniscas.

Julivert (1963), establece un contacto neto y concordante entre las Formaciones Bogotá y Regadera en la sección tipo de la Formación Bogotá (Quebrada Zo Grande) pero hacia el

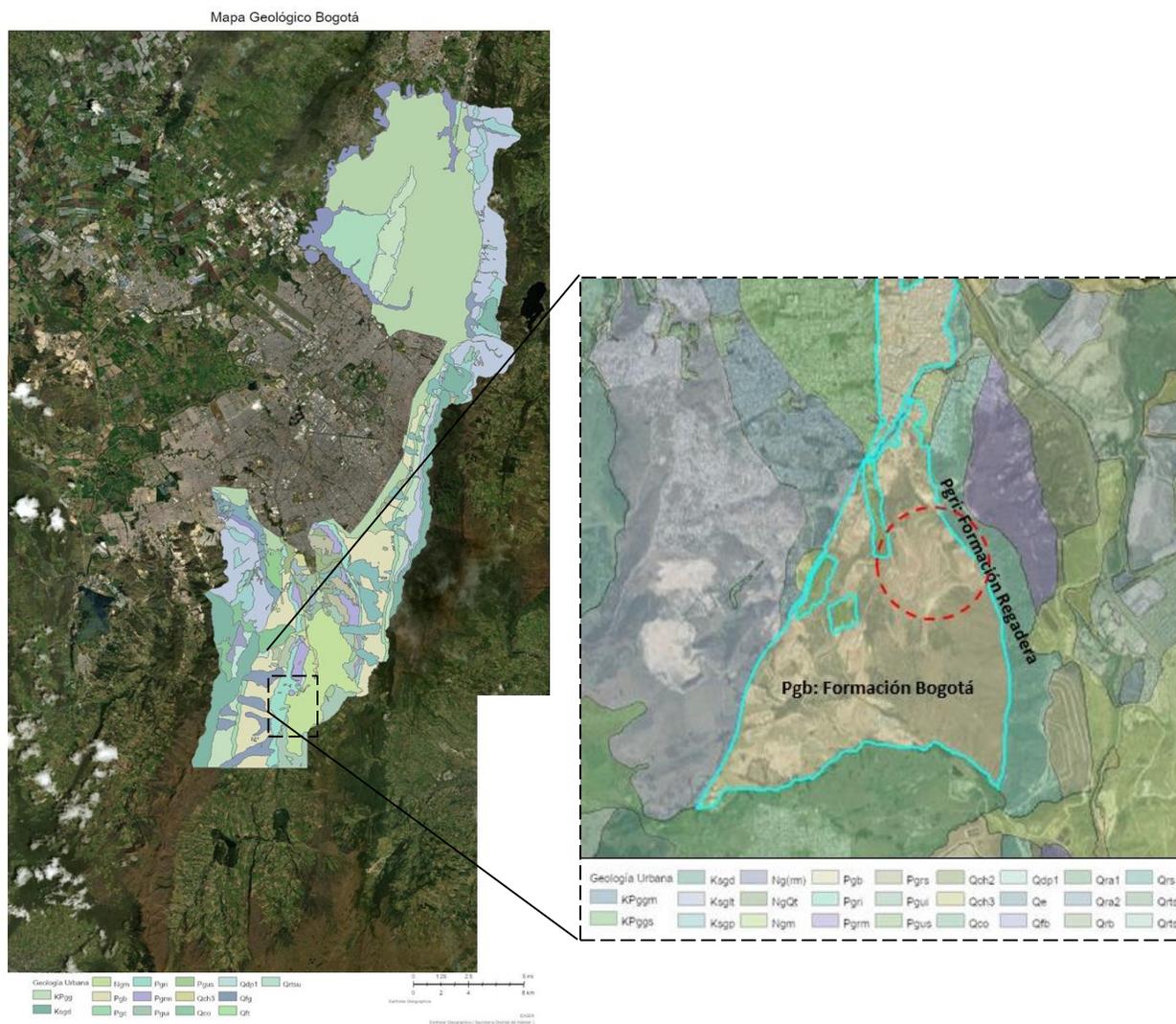
norte plantea para la zona de Tunjuelito una discordancia angular que corta niveles más bajos hasta colocar a la Formación Regadera en contacto con capas de la Formación Guaduas. Sin embargo, en este mismo sector, Acosta & Ulloa (1998) cartografiaron una falla que pone en contacto estas dos unidades, desvirtuando la presencia de una discordancia.

### **Formación Regadera (Pgri)**

Esta secuencia de rocas sedimentarias está dominada por tres capas gruesas de areniscas y conglomerados de color pardo rojizo, intercaladas por niveles arcillosos de color marrón y rojizo. Esta formación corresponde al terciario medio y un ambiente de depositación continental durante las primeras fases del levantamiento de la cordillera Andina, principalmente la cordillera Central. Por su ambiente fluvial de depositación, esta formación presenta estratificación cruzada y localmente es discordante sobre la formación Bogotá infrayacente.

Presenta un espesor promedio de 450 m y aflora sobre los flancos inferiores del valle del Tunjuelo donde presenta una morfología dominado por filos tales como Doña Juana al oeste y Entrenubes al este. Dentro del Sinclinal de Usme, este conjunto sedimentario presenta un plegamiento fuerte a ligeramente invertido. Julivert (1963) llama Formación Regadera a la parte baja de la Formación Usme definida por Hubach (1957), en ella se agrupan areniscas no consolidadas de grano grueso y capas de conglomerados que alternan con arcillas rosadas y rojizas, que suprayace a la Formación Bogotá y es cubierta por la formación Usme en la región del Río Tunjuelo (sinclinal de Usme).

La Formación Regadera restringe sus afloramientos al oriente de la Sabana, en los sinclinales de Usme y Sisga, en donde se observa una secuencia arenosa que genera una morfología de colinas alineadas redondeadas.

**Figura 5-1.** Mapa geológico de Bogotá con el detalle de la zona de estudio.

Fuente: Geoportal del IDIGER.

## 5.2 Geología local

El área de la concesión se encuentra sobre la Formación Bogotá principalmente; allí afloran secuencias de arcillolitas café-rojizas intercaladas con arcillolitas grises a moradas, areniscas friables de color gris verdoso y limolitas rojizas. Estas intercalaciones se ven con

claridad sobre los taludes (Foto 5-1). El espesor de la secuencia total expuesta es del orden de 800 m.

**Foto 5-1.** Litologías presentes en la mina Los Ajos. Las flechas señalan la ubicación de los taludes estudiado.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

### **Las arcillolitas**

Las arcillolitas están expuestas en taludes y patios, están afectadas por desleimiento por efecto de los cambios volumétricos de la superficie expuesta debido a la hidratación y deshidratación de sus minerales: su estratificación es laminar gruesa, aunque debido al desleimiento no es fácil de observar.

**Foto 5-2.** Panorámica de la mina Los Ajos, con la variación de litología reflejada en el cambio de color de las capas.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

### **Las limolitas**

Las limolitas no son muy frecuentes, son de color rojo a vino tinto, presentan cristales de muscovita muy fina, son compactas y bien cementadas.

### **Las areniscas**

Han sido clasificadas como Lito areniscas (Folk, 1974), se encuentran en capas de hasta 10 cm de espesor o con estratificación laminar, por sectores presentan estratificación cruzada, el espesor de estos cuerpos varía desde capas de 40 cm hasta 12 m. Macroscópicamente son de color gris verdoso claro, grano fino, friables, mal cementadas. Están compuestas por cristales de: cuarzo, moscovita, clorita, hematita y clorita. Microscópicamente se observa que el armazón está compuesto principalmente por cuarzo, la matriz es arcillosa y la roca tiene cementos arcillosos y débiles. Contiene líticos sedimentarios (10,4%), ígneos (8,8%) y metamórficos (6%), también contiene micas

(clorita biotita, muscovitas) y feldespatos caolinitizados, junto con plagioclasa. Localmente hay yeso relleno de fracturas.

**Foto 5-3.** Detalle de un cuerpo de arenisca, color gris claro y su disgregación en pequeñas partículas al quedar expuesta a los procesos de intemperismo



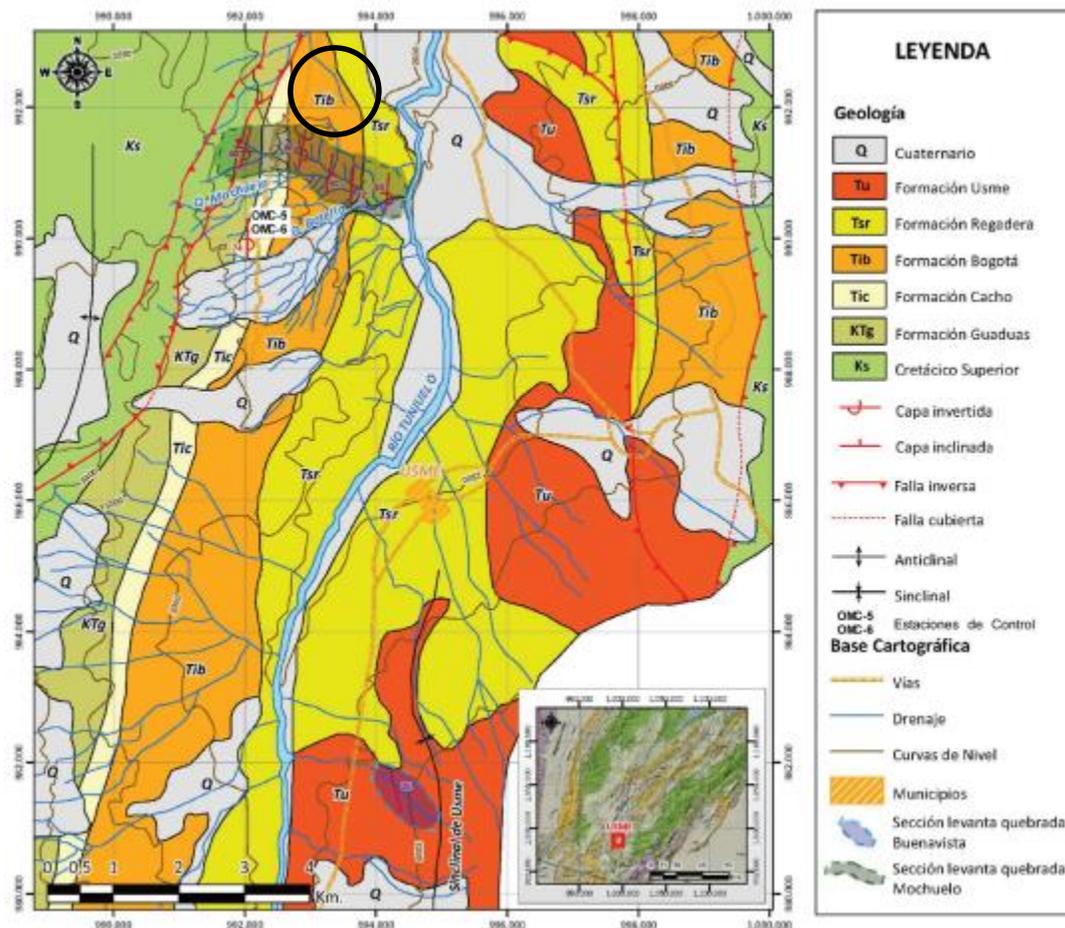
Fuente: Geología y Geotecnia S.A.S,(2014)

### 5.3 Geología estructural regional

El área al sur de Bogotá está dividida en tres grandes bloques: El Oriental Levantado (Anticlinal de Bogotá y los cerros surorientales) separados del flanco oriental del sinclinal de Usme por la falla de Bogotá. El Central Hundido (Sinclinal de Usme) limitado al oriente por la falla de Bogotá y al occidente por la falla de Tunjuelo-Mochuelo y el Occidental Levantado (Anticlinal de Cheba-Quiba), limitado al oriente por la falla de Tunjuelo-Mochuelo y al occidente por el valle del río Soacha.

La estructura geológica dominante en el sector es el Sinclinal de Usme también conocido como el sinclinal de Usme-Tunjuelo, es una estructura plegada y erosionada en el núcleo, donde se encuentra el valle aluvial del río Tunjuelo y sus afluentes, cuenca hidrográfica más importante del suroriente de la Sabana de Bogotá (ver Figura 5-2). Es un pliegue con rumbo referencial N-NE a S-SW, amplio y asimétrico que presenta cierre al sur en la región del Sumapaz y hacia el norte se hunde bajo los sedimentos cuaternarios de la Sabana. Trabajos previos sectorizan los dos flancos de la estructura con base en la disposición de los estratos de las unidades aflorantes en el sentido de capas normales e invertidas y en la presencia de fallas.

**Figura 5-2.** Mapa geológico del Sinclinal de Usme, el círculo negro señala ubicación aproximada de la mina Los Ajos



Fuente: Bayona et al. (2010).

Este sinclinal se encuentra afectado por fallas entre las cuales se destaca la Falla de Bogotá, ubicada en la parte nororiental del área y cuya dirección dominante es norte sur. Otra estructura es la denominada Falla del Río Tunjuelito, la cual se extiende desde el Boquerón de Chipaque hacia el norte de la ciudad, falla de cabalgamiento y pone en contacto estratos de la Arenisca Dura, con la Formación Bogotá; a medida que se avanza hacia el norte va cambiando el contacto de la Arenisca Dura con otras unidades más recientes.

Otra falla importante es la de la Fiscala, localizada al occidente del área, que conforma un escarpe pronunciado con dirección nornoreste, dentro de estratos de la Formación Regadera.

## 6 Descripción de la problemática

Con relación a la resistencia del macizo rocoso, en el marco teórico se resaltó que asumir solo la calidad de la roca intacta fuerte o blanda sería demasiado conservador o resultaría en una sobreestimación de la resistencia.

Para el caso específico de la mina Los Ajos, se identificaron intercalaciones de limolitas y arcillolitas, siendo esta última litología la que ha generado problemas de estabilidad debido al proceso de desleimiento por cambios volumétricos en la superficie expuesta y franja aledaña hacia profundidad a causa de la hidratación y deshidratación de sus minerales; por lo tanto, se resolvió centrar la atención en las arcillolitas.

**Foto 6-1.** Talud encontrado en la mina los Ajos que ha presentado problemas de estabilidad a causa del proceso de desleimiento.



a) Cara del talud



b) Espesor del material particularizado en la berma superior del talud

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

Con base en lo observado en la visita de reconocimiento realizada en 28 de enero de 2020 a la mina Los Ajos, se logró evidenciar algunos sitios sin cobertura vegetal donde es evidente el proceso de meteorización física por desleimiento, como se muestra en la Foto 6-1; allí por efecto del desleimiento el macizo rocoso se ha disgregado en fragmentos que paulatinamente empiezan a particularizarse y convertirse en suelo a causa de cambios volumétricos relacionados a la variación de la humedad. En la cara del talud se ha desarrollado más rápido el proceso de desleimiento en comparación a la berma superior, haciendo que se pierda el soporte del material de la corona del talud, como consecuencia a esto se genera la caída de fragmentos de roca afectada (ver numeral b de la Foto 6-1).

El Talud 1 de este estudio presenta una meteorización por desleimiento, este proceso afecta los primeros metros de la cara del talud la cual posee una cobertura de vegetación y no presenta problemas de estabilidad; sobre este talud no se presenta acción directa del agua de escorrentía, únicamente la de las gotas del agua lluvia.

El Talud 2 también exhibía una meteorización por desleimiento con el desarrollo de una delgada capa en la cara del talud sin problemas de estabilidad por deslizamiento. A diferencia del talud 1, este no presenta cobertura de vegetación y se encontraba afectado por el efecto erosivo de agua de escorrentía superficial, la cual fluye libremente por la cara del talud, erosionando una buena parte del material meteorizado mediante la generación de surcos y cárcavas. Por tanto, la roca blanda se ha convertido en suelo que es transportado y acumulado en la base del talud.

Los dos taludes presentan el proceso de meteorización física por desleimiento; sin embargo, su desarrollo y preservación en el tiempo es diferente con base en los factores externos que lo interfieren. En algunos casos el desleimiento progresa a través del tiempo y es imperceptible al profesional, pero cuando actúa un agente externo que supera la resistencia del material meteorizado se puede generar problemas muy importantes de estabilidad.

Con el objetivo de entender como evolucionaba el proceso de desleimiento y comprender su incidencia en la estabilidad de cada uno de los dos taludes, se procedió a hacerle un monitoreo a cada uno mediante la colocación de puntos de control en la cara de cada talud.

En esos puntos se realizaron mediciones, además, se hizo la caracterización geomecánica y mineralógica de la arcillolita degradada y de la roca levemente meteorizada.

## 7 Instrumentación de campo

Para entender el comportamiento de cada uno de los dos taludes seleccionados, se instrumentaron hincando varillas en la cara de cada talud. La función de los puntos de control fue evaluar a través del tiempo, los efectos del proceso de meteorización física por desleimiento.

Adicionalmente se hizo medición de los espesores de la arcillolita degradada y de la roca levemente meteorizada en cada talud.

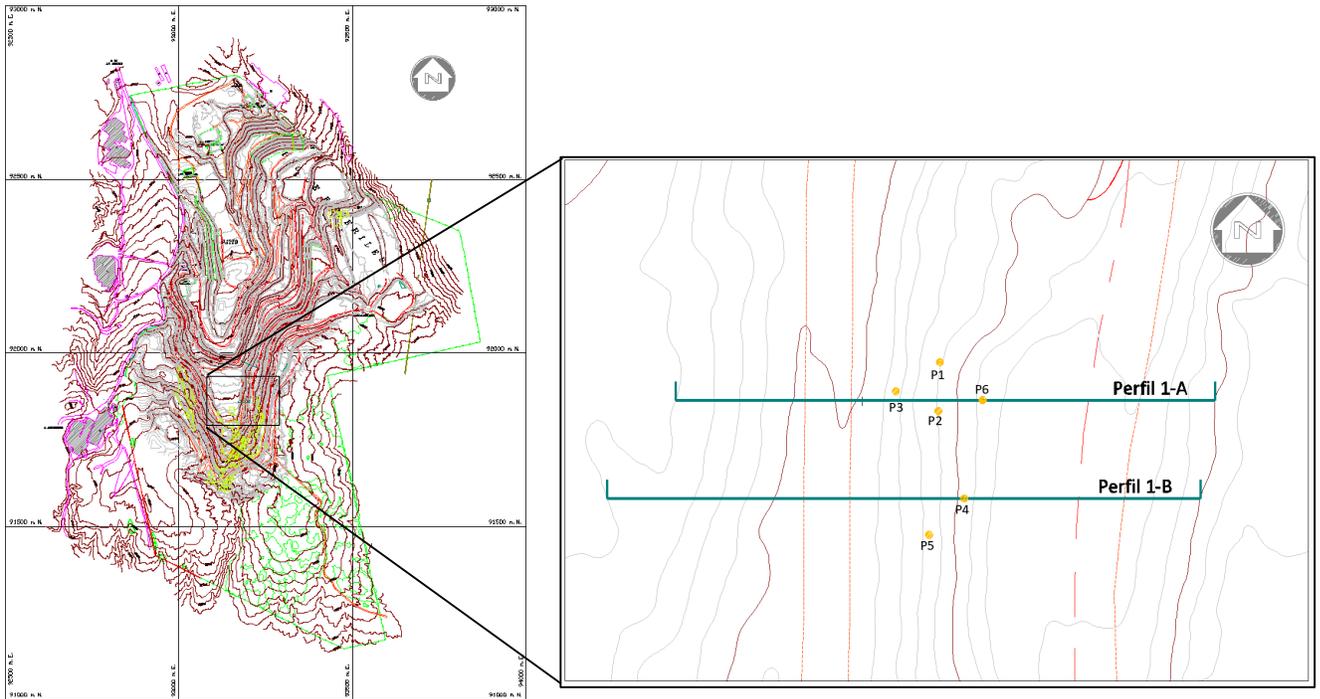
Por la condición dinámica que se presentaba en el Talud 2, se procedió a monitorear el progreso de los conos de depositación que se forman en la pata del talud donde se encontraban los tres puntos de control.

### 7.1 Talud 1

El Talud 1 se encuentra al sur de la mina y fue conformado aproximadamente en el año 2012. Tiene orientación aproximadamente de 4° NE, una inclinación de 48° ( $\beta_T$ ) hacia el SW, una altura de 7 m, con una berma inferior de 3,5 m y una superior de 7,3 m; la cara del talud se encuentra con cobertura vegetal. Está compuesto por arcillolitas café rojizo con una inclinación de estratos ( $\beta_E$ ) de 70°.

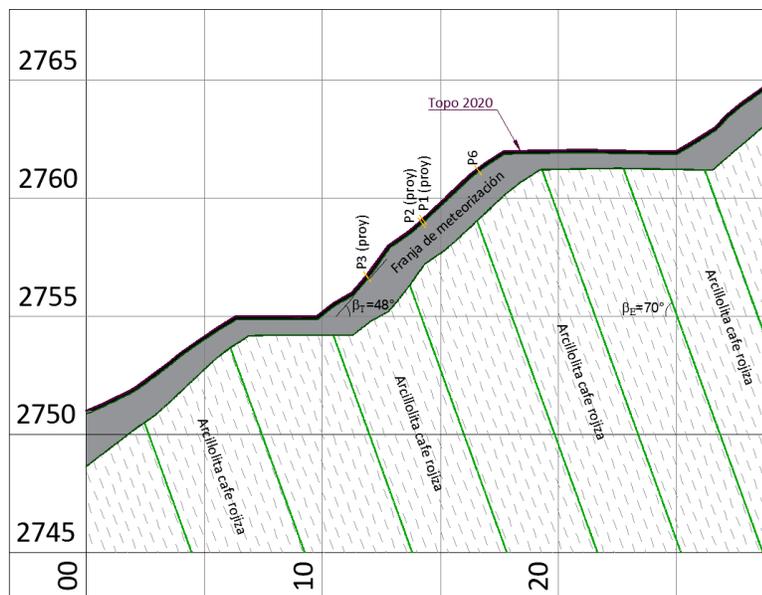
En la Figura 7-1 se presenta la ubicación en planta del Talud 1 y de los puntos de control establecidos. En la Figura 7-2 y Figura 7-3 se detalla la geometría del Talud 1 a través de los perfiles 1-A y 1-B y la altura a la cual fue instalada cada varilla.

Figura 7-1. Ubicación del Talud 1 y de los puntos de control



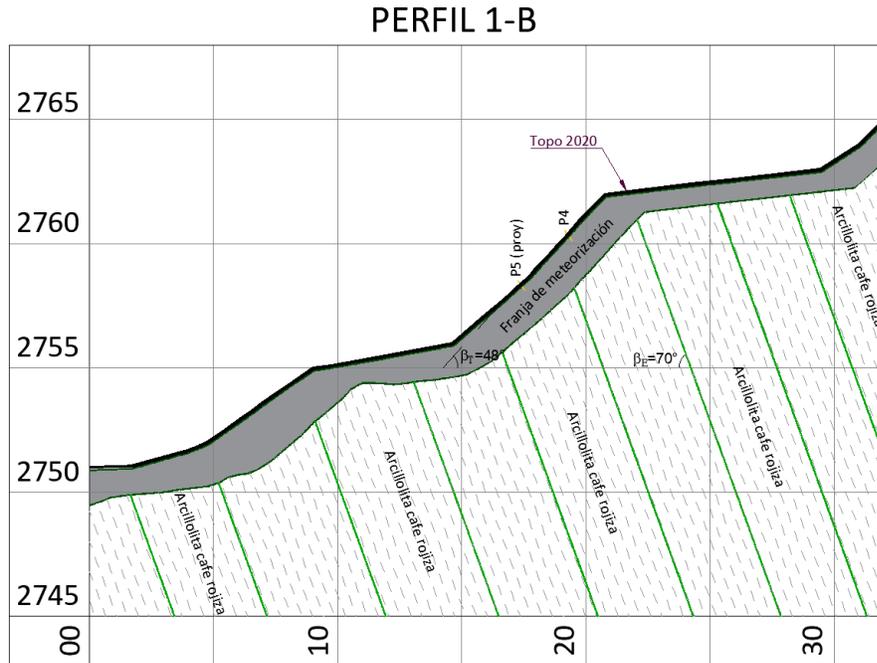
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-2. Perfil 1-A con la ubicación de los puntos 1, 2, 3 y 6 en la cara del Talud 1. PERFIL 1-A



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7-3.** Perfil 1-B con la ubicación de los puntos 4 y 5 en la cara del Talud 1.

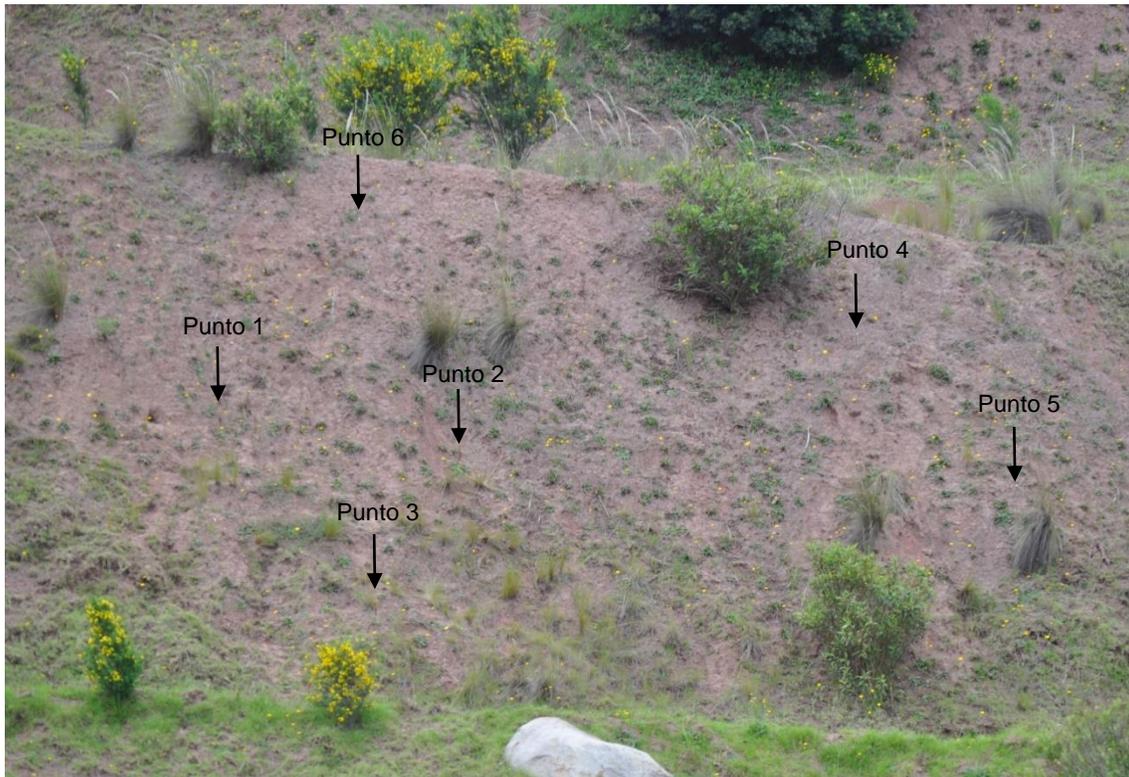


Fuente: Elaboración propia.

### 7.1.1. Puntos de control

En el Talud 1 se hincaron 6 varillas de hierro como puntos de control. La premisa inicial fue hacer un seguimiento y determinar lugares de erosión y de lugares de depositación en la cara del talud, en la Foto 7-1 se muestra la ubicación de los puntos de control (varillas) y en la Tabla 7-1 están los detalles de profundidad a que se hincó cada varilla.

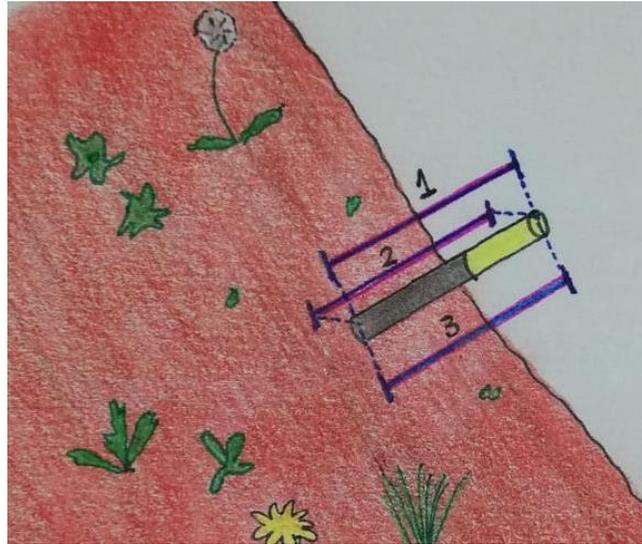
**Foto 7-1.** Ubicación de los 6 puntos (varillas) instalados en la cara del talud 1.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la Figura 7-1 se ilustra la metodología implementada para medir la longitud libre de cada varilla por diferentes lados. De las diferentes mediciones hechas a través del tiempo, los valores ya promediados están reportados en la Tabla 7-1.

**Figura 7-4.** Medición realizada en la longitud libre de cada varilla- instalada en la cara del Talud 1.



Fuente: Elaboración propia.

En la Foto 7-2 se presentan el detalle cada una de las 6 varillas instaladas en la cara del talud, las cuales se identificaron con los colores amarillo y blanco. Las de color amarillo se instalaron inicialmente el 18/09/2020 y las de color blanco el 09/10/2020; la implementación de los colores en las varillas tenía como propósito su fácil reconocimiento a la hora de la medición.

Debido a que las varillas se encontraban expuestas a la intemperie, algunas de ellas perdieron la pintura aplicada como se evidencia principalmente en las varillas de color blanco (punto 4 y punto 5).

**Foto 7-2.** Detalle de la medición realizada periódicamente en los 6 puntos instalados en la cara del talud 1.



a) Punto 1. Varilla amarilla izquierda



b) Punto 2. Varilla amarilla derecha



c) Punto 3. Varilla amarilla parte baja



d) Punto 4. Varilla blanca derecha



e) Punto 5. Varilla blanca parte baja



f) Punto 6. Varilla blanca izquierda

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la Tabla 7-1 se presentan las mediciones realizadas durante los diez meses de seguimiento a los 6 puntos de control del Talud 1. La premisa inicial con la que se establecieron los puntos de control fue identificar los lugares de erosión y los de depositación; sin embargo, el procesamiento de las lecturas y lo observado en el talud no evidenciaron erosión ni depositación sino una disminución leve pero progresiva en la longitud libre de cada varilla.

Lo anterior llevo a plantear una nueva hipótesis: el talud estaba experimentando ciclos de expansión y contracción. Por lo tanto, se decidió complementar, en el laboratorio, la caracterización de arcillolita con ensayos de expansión. Además, análisis de la composición mineralógica de las arcillolitas usando la técnica de difracción de rayos x.

**Tabla 7-1.** Registro de las mediciones realizadas a los 6 puntos del talud 1 entre el 18/09/2020 al 11/06/2021.

ID	Descripción	Fecha							
		18/09/20	09/10/20	13/11/20	06/01/21	04/03/21	11/03/21	29/04/21	11/06/21
		<b>Longitud (cm)</b>							
Punto 1	Varilla amarilla izquierda	23,5	22,5	22,5	21,67	20,83	21,00	21,07	21,10
Punto 2	Varilla amarilla derecha	17,4	15	13,5	14,33	14,33	14,50	14,57	14,30
Punto 3	Varilla amarilla parte baja	19,1	18	19	19,10	18,65	18,83	18,77	18,60
Punto 4	Varilla blanca derecha	-	19	17,5	17,33	17,67	17,50	17,50	17,37
Punto 5	Varilla blanca parte baja	-	18	17	17,00	16,83	17,00	17,43	16,97
Punto 6	Varilla blanca izquierda	-	18,5	18	17,83	18,00	18,33	18,40	18,50

Fuente: Elaboración propia.

### **7.1.2. Medición de los espesores de material meteorizado por desleimiento**

En sector del Talud 1 se tiene una capa particularizada del macizo rocoso arcillolítico que se ha ido paulatinamente convirtiéndose en suelo y una de arcillolita que ha sido afectada por desleimiento. La capa más externa se ha convertido en un material suelto, que ha perdido cohesión, y por acción del agua y de la gravedad se ha venido desprendiendo y depositándose en la pata del talud. Al irse incrementando la capa del material acumulado esta cumple una función de capa de protección para la roca afectada en menor medida por el desleimiento, haciendo que las velocidades de este proceso se ralenticen.

Para la visita inicial de campo (28/01/2020) se encontró que la capa de suelo estaba entre 10 cm a 12 cm y que la profundidad a la cual se encontraba fragmentos de roca disgregados ya afectados era de 33 cm, siendo aproximadamente 20 cm el espesor del material tipo roca que comienza a ser afectado por el desleimiento, ver Foto 7-3.

En la campaña de exploración del subsuelo realizada el 16/12/2020, se hincó un tubo Shelby en la cara del talud hasta donde el material generó resistencia y no se pudo seguir penetrando, llegando a la profundidad de 0,40 m; el material muestreado fue fundamentalmente la arcillolita particularizada, como se observa en la Foto 7-4.

**Foto 7-3.** Mediciones del 28/01/2020 en la cara del talud 1 de los espesores de material particularizado y de arcillolita afectada por desleimiento.



a) Cara del Talud 1



b) Capa de material particularizado (14 cm)



c) Capa de material particularizado (12 cm)



d) Fragmentos de arcillolita particularizada por desleimiento (20 cm).

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 7-4.** Muestreo realizado en la cara del talud 1 con tubo shelby, alcanzando una profundidad de 0,40 m



Fuente: Registro fotográfico visita de campo

Con la finalidad de medir el espesor de la franja de meteorización, se hincó una varilla de acero en diferentes partes de la cara del talud (ver Foto 7-5), tratando de mantener siempre la misma energía de hincado para lo cual se usó el mismo martillo y la misma altura de caída hasta obtener un rechazo, donde la varilla no se pudo profundizar más. Obteniéndose espesores entre 1,64 y 1,55 m.

Adicionalmente cerca al sector del Talud 1, se pudo evidenciar un perfil de meteorización muy ilustrativo de lo que está pasando internamente en el macizo rocoso y se midió en la parte superior de este el espesor de la capa particularizada, que para este caso fue de 0,86 m.

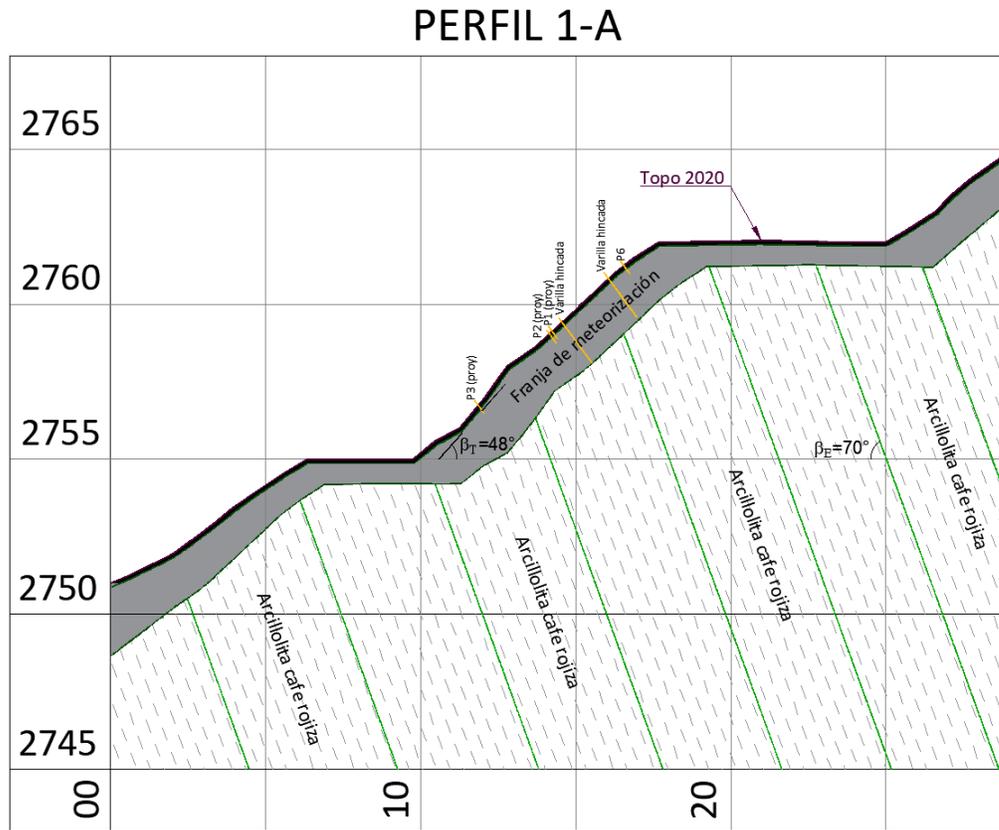
**Foto 7-5.** Estimación del espesor de la capa de arcillolita altamente meteorizada a través del hincado de una varilla de acero en la cara del Talud 1.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la Figura 7-5 se presenta la ubicación de los sitios donde se hincaron las varillas para estimar la capa de material altamente meteorizada.

**Figura 7-5.** Talud 1, ubicación en el Perfil 1-A de las varillas hincadas en la cara del talud.



Fuente: Elaboración propia.

## 7.2 Talud 2

El Talud 2 se encuentra al sur de la mina (ver Figura 7-6) y fue conformado aproximadamente en el año 2017. Tiene orientación aproximada de  $35^\circ$  NE y una inclinación de  $40^\circ$  ( $\beta_T$ ) hacia el NW, una altura de 19 m, con una berma inferior de 5,0 m; la cara del talud no presenta cobertura vegetal. Está compuesto por arcillolitas grises y café rojizo con una inclinación de estratos ( $\beta_E$ ) de  $57^\circ$  hacia el SE.

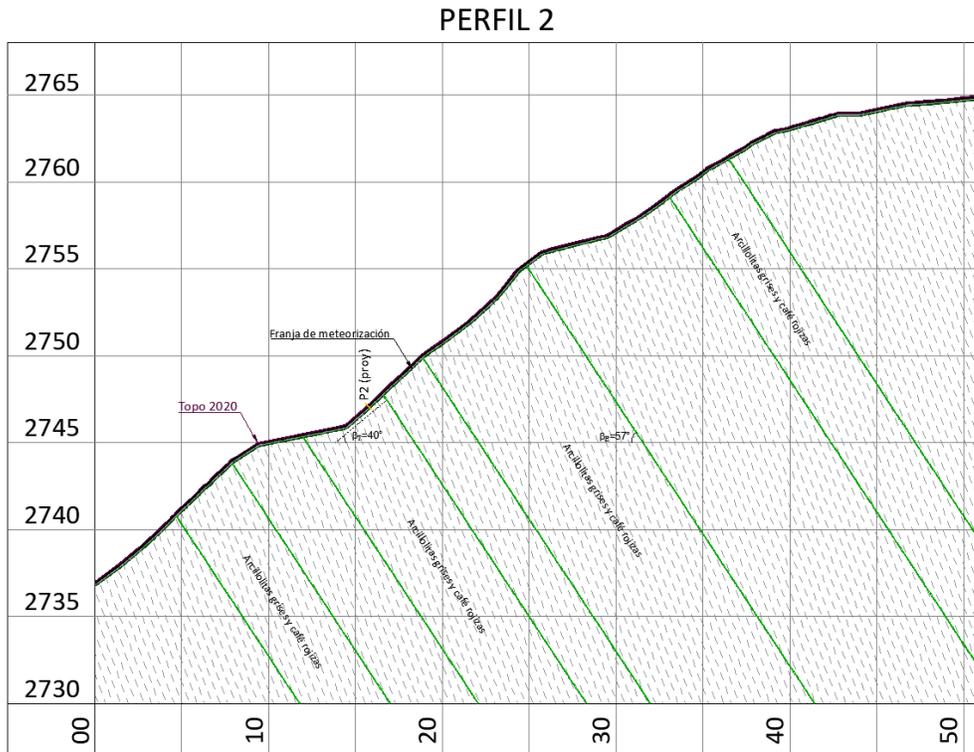
**Figura 7-6.** Ubicación del Talud 2 y de los puntos de control

Fuente: Elaboración propia.

La cara del Talud 2 presenta surcos que se forman como caminos preferenciales, del flujo del agua de escorrentía, flujo que a su paso desgarrará partículas de suelo y los transporta dejando canales (surcos y cárcavas) que generalmente son paralelos y de poca profundidad.

Los surcos crean una compleja microred de drenaje donde un surco al profundizarse va capturando los vecinos, formando surcos de mayor tamaño, los cuales a su vez se profundizan o se amplían formando cárcavas con sección transversal en forma de V que puede transformarse a forma de U.

En la Figura 7-7 se detalla la geometría del Talud 2 a través del perfil 2 y la altura a la cual fue instalado el punto de control 2.

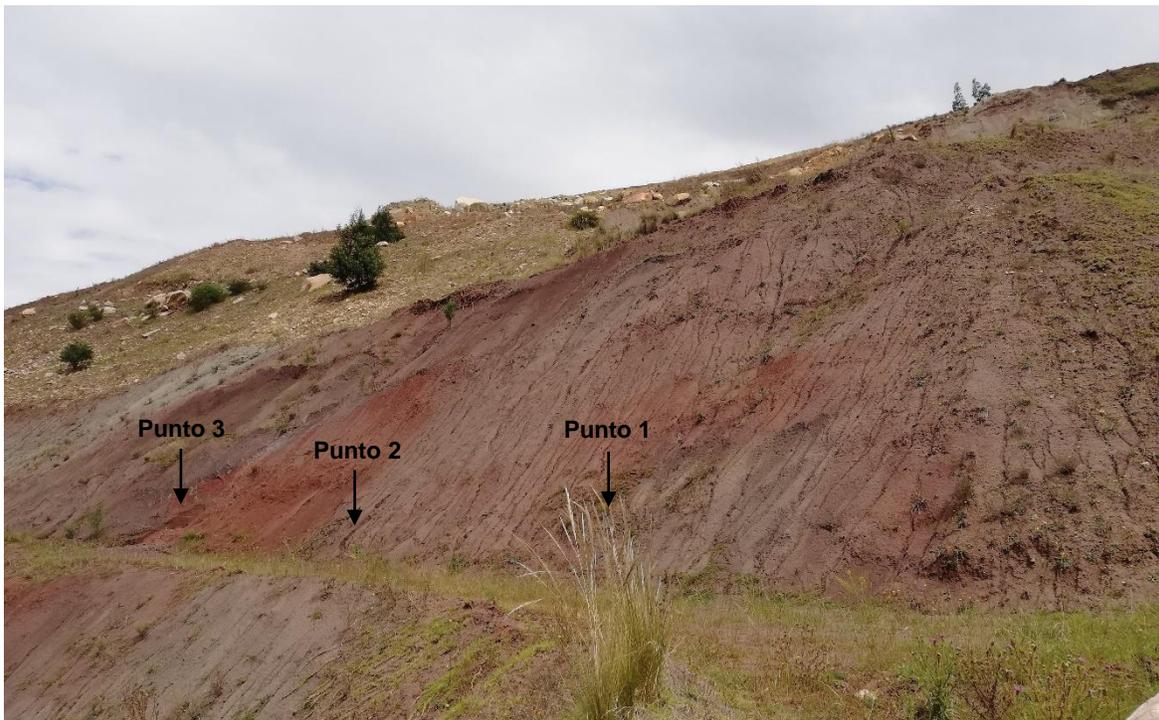
**Figura 7-7.** Perfil 2 con la ubicación del punto de control 2.

Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.1 Puntos de control

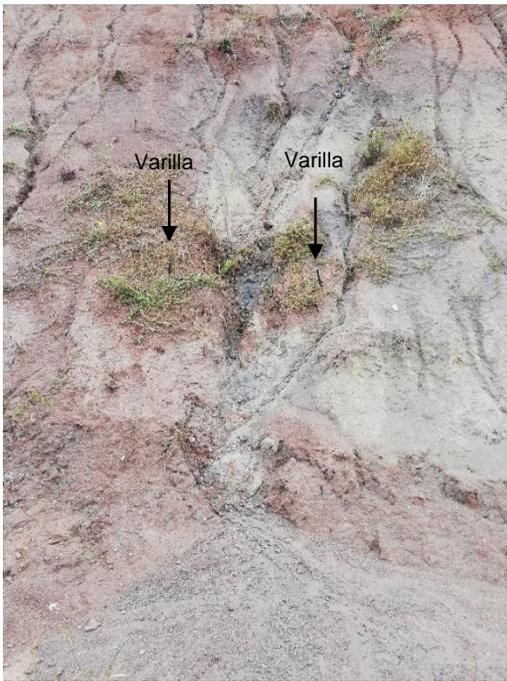
Para hacer el seguimiento cuantitativo del proceso de desleimiento-erosión-transporte, se seleccionaron tres surcos con gran avance (ver Foto 7-6), cada uno se delimitó mediante un par de varillas de hierro (punto de control) con el objetivo de hacer un seguimiento a la evolución de la profundidad del surco con el tiempo.

**Foto 7-6.** Talud 2, ubicación de los 3 puntos instalados en la cara del talud, tomada el 13/11/2020.

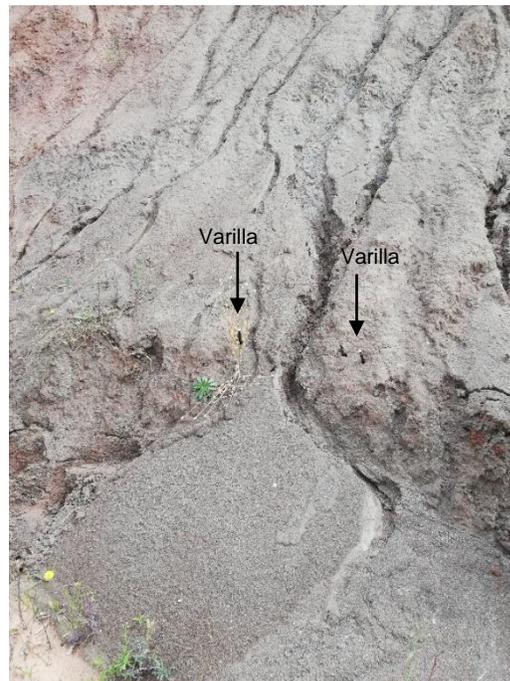


Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

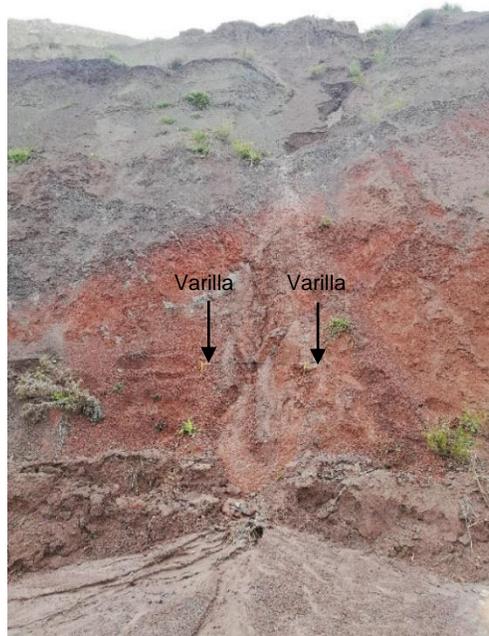
A continuación, en la Foto 7-7, se presenta el detalle los tres puntos seleccionados para el seguimiento.

**Foto 7-7.** Detalle de los 3 puntos instalados en la cara del Talud 2.

a) Punto 1, instalado en la parte derecha de la cara del Talud 2.



b) Punto 2, instalado en la parte central de la cara del Talud 2



c) Punto 3, instalado en la parte izquierda de la cara del Talud 2.

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la Figura 7-8 se ilustra la metodología implementada para medir la profundidad del surco.

**Figura 7-8.** Medición realizada a la profundidad del surco controlado por las varillas instaladas en la cara del Talud 2.



Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones de los puntos 1 y 2 se iniciaron el 28/01/2020 y las del punto 3 el 17/06/2020. El seguimiento finalizó para el punto 3 el 09/10/2020 debido a que el surco se extendió lateralmente de manera que erosionó el soporte de las varillas de control. Para los puntos 1 y 2 finalizaron el 06/01/2021 ya que el sector se vio afectado por el paso de maquinaria y la caída de bloques de arenisca, debido a que Ladrillera Santafé inicio la reconfiguración de la parte alta del talud, lo cual hizo que se perdieran las varillas de control; en la Foto 7-8 se presenta el estado final del Talud 2.

**Foto 7-8.** Estado final de la cara del Talud 2, tomada el 11/06/2021.

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la Tabla 7-2 se presentan las mediciones realizadas durante aproximadamente cuatro meses para el punto 3 y doce meses para los puntos 1 y 2.

**Tabla 7-2.** Registro de las mediciones realizadas a los 3 puntos del talud 2 entre el 28/01/2020 al 06/01/2021.

ID	Descripción	Fecha							
		28/01/20	17/06/20	13/08/20	10/09/20	18/09/20	09/10/20	13/11/20	06/01/21
		Longitud (cm)							
Punto 1	Surco derecho	39	31,5	25,5	22,5	21,8	37	41	38,5
Punto 2	Surco central	20	10	8	6,5	6,5	10	25	25
Punto 3	Surco izquierdo	-	23	15,5	10,5	9,30	18	-	-

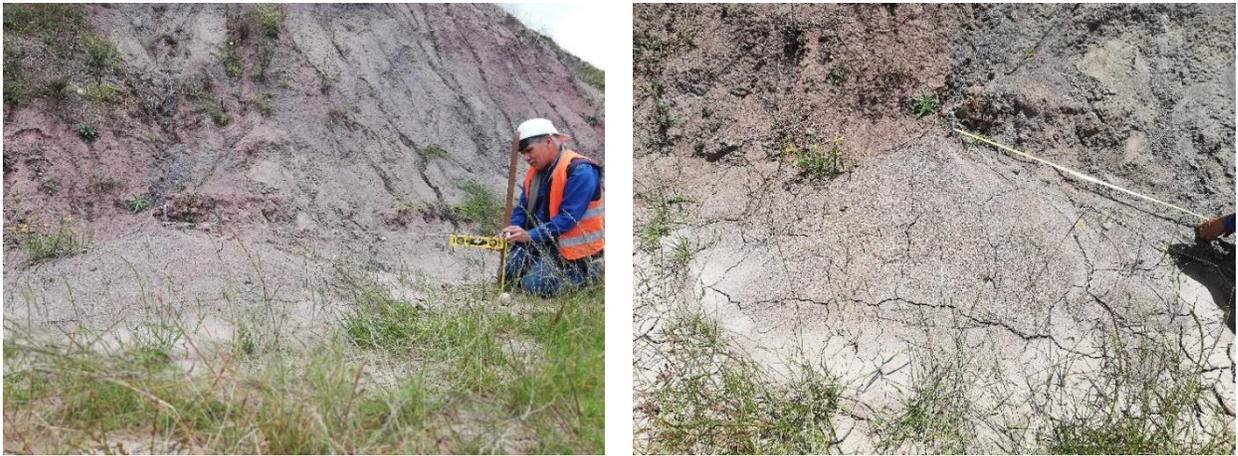
Fuente: Elaboración propia.

## 7.2.2 Medición de los conos de depositación

### Punto de control 1

En la visita de campo del 09/10/2020 el punto de control 1 presentaba material acumulado en la pata del talud, por lo cual se instaló una varilla en el inicio del cono y se radio su extensión para poder calcular, de manera aproximada, el volumen depositado y su evolución en las posteriores visitas, como se evidencia en la Foto 7-9.

**Foto 7-9.** Demarcación, el 09/10/2020, del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 1.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

La siguiente medición fue realizada el 13/11/2020 donde se pudo evidenciar que parte del material depositado en la pata del talud había sido afectado (erosionada) por el agua de escorrentía que bajo por la micro red de surcos de la cara del talud, la cual lavo y modificó una parte del cono de depositación.

**Foto 7-10.** Estado del cono del desarrollado en la pata del talud para el 13/11/2020 en el punto de control 1.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

### **Punto de control 2**

En la visita de campo del 13/08/2020 el punto de control 2 presentaba material acumulado en la pata del talud. A diferencia de los puntos de control 1 y 3, el material depositado se acumuló en parte de la cara del talud, casi al inicio de donde se instalaron las varillas para monitorear el surco seleccionado, como se puede evidenciar en la Foto 7-11. Para poder radiar y calcular el volumen acumulado se instaló un tornillo en la mitad del cono.

La siguiente medición fue realizada en la visita del 10/09/2020 se pudo evidenciar que el material depositado se ha extendido hacia los lados.

**Foto 7-11.** Estado del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 2.



a) Visita de campo 13/08/2020



b) Visita de campo 10/09/2020

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

### **Punto de control 3**

En cono de depositación desarrollado en el punto de control 3 fue el que presento mayor actividad y se pudo medir en 4 visitas de campo, iniciando el 13/08/2020 hasta el 13/11/2020. Al igual que en los otros puntos de control, se instaló una varilla en el inicio del cono y se radio su extensión, midiendo longitud y altura de depositación. En la Foto 7-12 y Foto 7-13 se resumen la evolución del cono de depositación para las diferentes visitas de campo.

**Foto 7-12.** Estado del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 3 entre el 13/08/2020 al 10/09/2020.



a) Visita de campo 13/08/2020



b) Visita de campo 10/09/2020

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 7-13.** Estado del cono de depositación desarrollado en la pata del talud en el punto de control 3 entre el 09/10/2020 al 13/11/2020.



a) Visita de campo 09/10/2020



b) Visita de campo 13/11/2020

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

### **7.2.3 Medición de los espesores de la arcillolita meteorizada por desleimiento**

La evolución de la capa más externa que se ha convertido en un material tipo suelo, porque ha perdido cohesión y que fácilmente, por acción del agua y de la gravedad, se moviliza dejando expuesta una nueva superficie en la cara del talud, la cual hasta ese momento había sido impactada de una forma más lenta por la meteorización por desleimiento. Al perderse la capa de protección que ofrecía el material particularizado a la roca afectada en menor medida por el desleimiento, en ella los ciclos de humedecimiento y secado comienzan a acelerar dicho proceso generando una nueva capa de material particularizado y una nueva capa de roca que comienza a ser afectada por los cambios de humedad.

A diferencia del Talud 1, este talud cuenta con una condición dinámica por acción de agua de escorrentía, donde la capa de material particularizado constantemente va siendo removida y no se desarrollan grandes espesores de material tipo suelo, que es lo que se aprecia en el Talud 1.

En el Talud 2 para la visita inicial a campo (28/01/2020) se estableció que la capa de material particularizado era de 10 cm y que la profundidad hasta la cual se encontraba la roca afectada era de 23 cm, siendo aproximadamente 13 cm el espesor de arcillolita afectada por el desleimiento, ver Foto 7-14.

**Foto 7-14.** Mediciones del 28/01/2020 en la cara del talud 2 de los espesores de material particularizado y de roca afectada por desleimiento.



a) Capa de material particularizado (10 cm)



b) Arcillolita afectada por la acción del desleimiento (13 cm).

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

Durante la visita de campo del 13/11/2020 se evidenció que el flujo de agua que bajo a través de la red de surcos arrastró material particularizado de la cara del talud hasta dejar expuesta roca con meteorización, pero la cual no es fácilmente afectada por la fuerza de arrastre que genera el caudal de agua de ese momento. En el sector del punto de control 1 se midieron espesores de la capa de material tipo suelo en la parte media y alta de la cara del talud, obteniéndose capas de 14 cm y 12 cm, respectivamente.

Hacia el sector del punto de control 3 se presentó pérdida de material particularizado y de roca afectada por la meteorización a causa de la cantidad de agua que bajo por la red de surcos, los cuales eran alimentados por una cárcava creada en la corona del talud. El espesor de material que se lavó con respecto a la cara del talud fue de aproximadamente 35 cm, dejando a la vista una arcillolita levemente meteorizada.

**Foto 7-15.** Mediciones del 13/11/2020 en la cara del Talud 2 de los espesores de material particularizado y de roca afectada por desleimiento.



a) Capa de material particularizado en parte media de la cara del talud (14 cm)



b) Capa de material particularizado en la parte alta del talud (12 cm)



c) Roca afectada por la meteorización por desleimiento (35 cm).

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En el mes de diciembre de 2020 se realizó una campaña de exploración con el objetivo de obtener muestras para ensayos de laboratorio, para lo cual se hincó un tubo shelby en la

cara del talud. El tubo se pudo hincar hasta 37 cm y al extraerlo se midió el perfil expuesto; encontrándose una capa de material particularizado de 11 cm y 26 cm de material tipo roca afectado por cambios de humedad.

**Foto 7-16.** Perfil de donde se hincó el tubo shelby el 16/12/2020 en la cara del talud 2.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la visita de campo del 06/01/2021 se midió de nuevo en el sector del punto de control 1 el espesor del material tipo suelo de la misma parte media de la cara del talud, obteniéndose una capa de 7,5 cm.

En el sector del punto de control 3 se presentó pérdida de material tipo roca afectada por la meteorización cuyo espesor fue de 5 cm, ver Foto 7-17.

**Foto 7-17.** Mediciones del 06/01/2021 en la cara del Talud 2 de los espesores de material particularizado y de roca afectada por desleimiento.



a) Capa de material particularizado en parte media de la cara del talud (7.5 cm)



b) Roca afectada por la meteorización por desleimiento (5 cm)

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

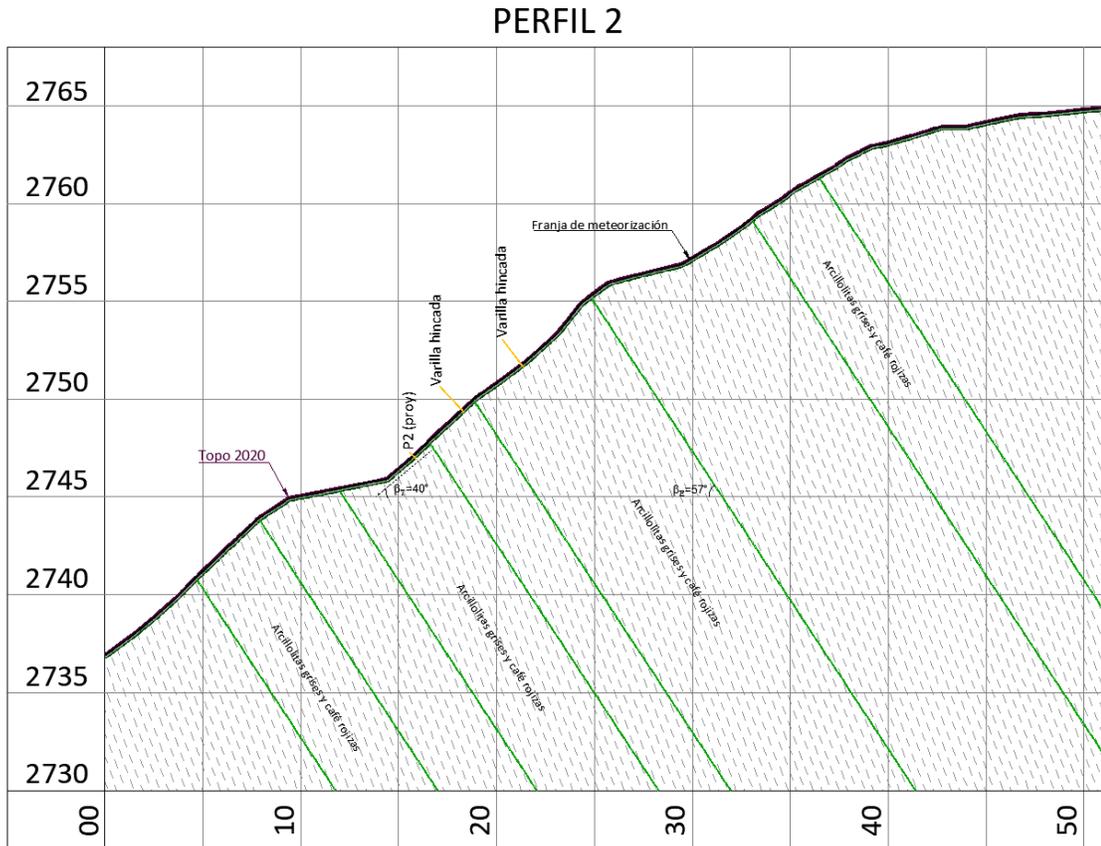
Además de las mediciones anteriormente descritas, se hincó una varilla de acero en diferentes partes de la cara del talud (ver Foto 7-18), tratando de mantener siempre la misma energía de hincado (masa del martillo y altura de caída del martillo hasta obtener un rechazo del material). Obteniéndose espesores entre 20 cm y 26 cm.

En la Figura 7-9 se presenta la ubicación de los sitios donde se hincaron las varillas para estimar la capa de arcillolita altamente meteorizada.

**Foto 7-18.** Estimación de la capa de material altamente meteorizado a través del hincado de una varilla de acero en la cara del talud 2.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Figura 7-9.** Ubicación en el Perfil 2 de las varillas hincadas en la cara del Talud 2.

Fuente: Elaboración propia.

## 8 Análisis de resultados

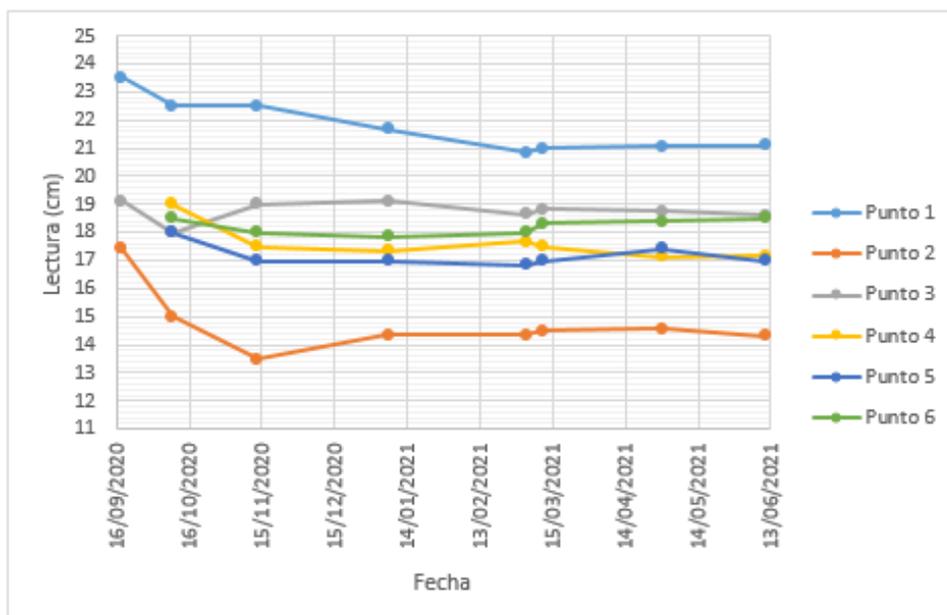
### 8.1 Talud 1

#### 8.1.1 Puntos de control y análisis de las mediciones

Inicialmente se realizó la gráfica de las lecturas a las varillas en función del tiempo, como se evidencia en la Figura 8-1, para poder identificar algún comportamiento similar de acuerdo a la ubicación de las varillas en la cara del talud.

En la Figura 8-1 se muestra que entre el 16/09/2020 y el 4/02/2021 se presentó un comportamiento fluctuante en las mediciones y que posterior a la última fecha el comportamiento se fue estabilizando para la mayoría de los puntos de control.

**Figura 8-1.** Comportamiento de las mediciones de cada punto en la cara del Talud 1 con respecto al tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

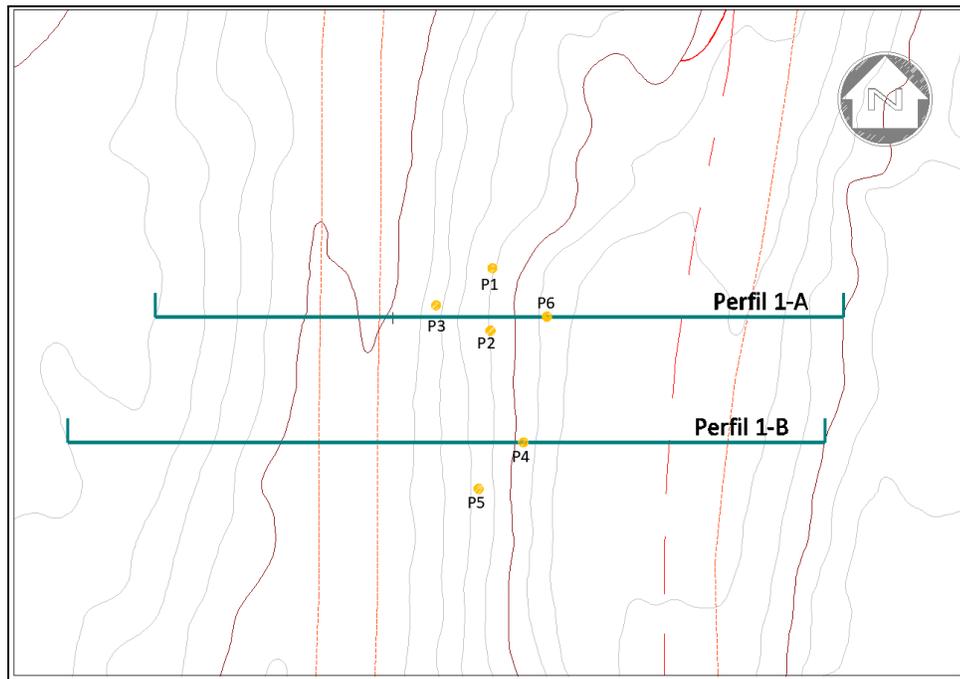
Con el objetivo de hacer un análisis más detallado de las mediciones, se procedió a calcular los deltas o diferencia (incremento o disminución) de longitud libre de la varilla en cada punto de control, es decir la diferencia de longitud obtenida al restarle a la longitud inicial las mediciones posteriores en cada periodo. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 8-1.

**Tabla 8-1.** Deltas de longitud para los 6 puntos del talud 1 entre el 09/10/2020 al 11/06/2021.

	9/10/2020	13/11/2020	06/01/2021	04/02/2021	11/03/2021	29/04/2021	11/06/2021
	$\Delta$ (cm)						
<b>Punto1</b>	1,00	1,00	1,83	2,67	2,50	2,43	2,40
<b>Punto2</b>	2,40	3,90	3,07	3,07	2,90	2,83	3,10
<b>Punto3</b>	1,10	0,10	0,00	0,45	0,27	0,33	0,50
<b>Punto4</b>		1,50	1,67	1,33	1,50	1,87	1,83
<b>Punto5</b>		1,00	1,00	1,17	1,00	0,57	1,03
<b>Punto6</b>		0,50	0,67	0,50	0,17	0,10	0,00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-2.** Ubicación en planta de los seis puntos de control en el Talud 1.



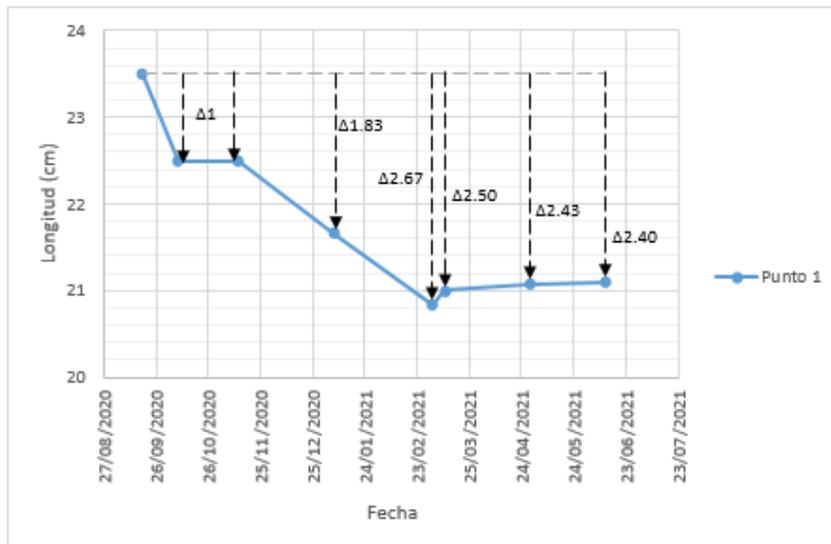
Fuente: Elaboración propia.

**Punto 1**

Para el punto 1, el cual se encuentra ubicado aproximadamente a la mitad de la cara del talud al costado izquierdo, ver Figura 8-2 y Foto 7-1; se presentó una disminución de 1 cm de la longitud libre inicial entre la varilla y la superficie de la cara del talud, entre el 18/09/2020 y el 13/11/2020. Posteriormente, la longitud libre se redujo en 1,83 cm con respecto a la inicial para 06/01/2021.

El delta de mayor longitud se presentó para el periodo comprendido entre el 06/01/2021 y el 04/03/2021, reduciéndose la longitud libre en 2,67 cm. Para las mediciones siguientes el delta estuvo entre 2,50 y 2,40 cm, haciendo que la longitud libre pasara de 23,5 cm a 21,1 cm, como se evidencia en la Figura 8-3.

**Figura 8-3.** Punto 1, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

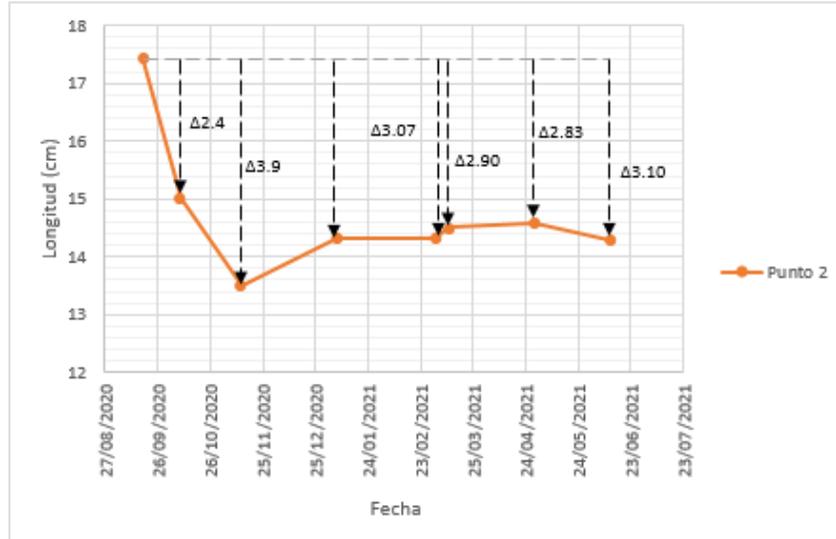
Analizando el comportamiento bajo la primera hipótesis de áreas de erosión y depositación, se puede decir que la zona del punto 1 presentó depositación hasta el 04/03/2021 y después se generó un poco de erosión. Pero en la cara del talud no había huellas de estos procesos.

Para la segunda hipótesis de ciclo de expansión y contracción se puede afirmar que para el periodo comprendido entre el 18/09/2020 y 04/03/2021, la cara del talud en la zona del punto 1 experimento una expansión gradual y posteriormente se presentó un indicio de contracción.

## **Punto 2**

El punto 2 se encuentra ubicado aproximadamente en la mitad de la cara del talud hacia el costado izquierdo, a unos 10 cm hacia abajo en vertical del punto 1, ver Figura 8-2 y Foto 7-1. En la medición del 9/10/2020, la longitud libre inicial de la varilla con respecto a la superficie del talud se redujo en 2,4 cm. El 13/11/2020 se presentó el delta o diferencia de mayor longitud con 3,9 cm, pasando de una longitud libre de 17,4 cm a 13,5 cm. Posteriormente, para el 06/01/2021 el delta fue de 3,07 cm y en las siguientes mediciones presento un comportamiento estable entre deltas de 2,85 y 3,10 cm, como se evidencia en la Figura 8-4.

**Figura 8-4.** Punto 2, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

En relación con la primera hipótesis de áreas de depositación y erosión, se puede decir que la zona del punto 2 presentó depositación hasta el 13/11/2020, luego presento un poco

de erosión hasta el 06/01/2021 y después no se generó ni depositación ni erosión. Sin embargo, en la superficie del talud no se identificaron evidencias

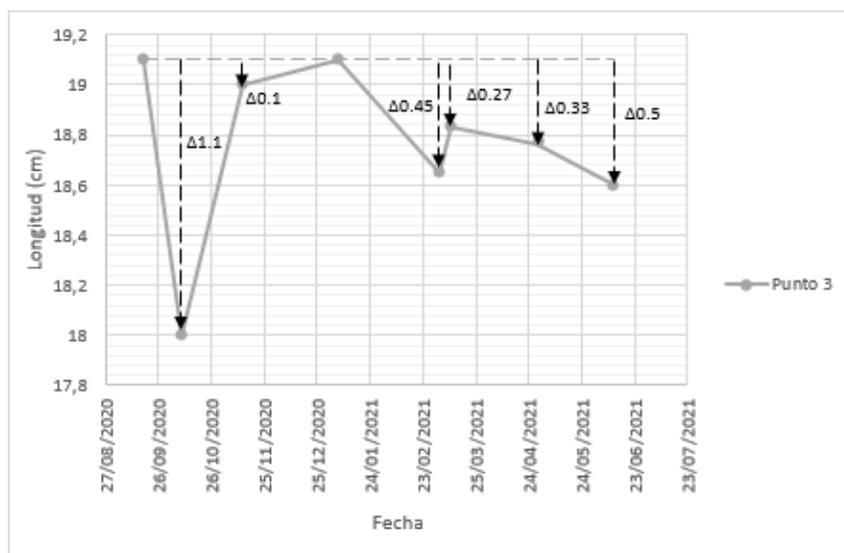
Con base en la segunda hipótesis, se puede afirmar que para el periodo comprendido entre el 18/09/2020 y 13/11/2020, la cara del talud en la zona del punto 2 experimentó una expansión gradual, posteriormente se contrajo hasta el 11/03/2021 y finalmente presentó un comportamiento relativamente estable.

### **Punto 3**

El punto 3 se encuentra ubicado hacia la parte baja de la cara del talud en el costado izquierdo, aproximadamente a 2 metros de la pata del talud, ver Figura 8-2 y Foto 7-1. Para la medición del 09/10/2020, se presentó el delta de mayor longitud con 1.1 cm, posteriormente para la medición del 13/11/2020 la longitud libre inicial prácticamente permaneció igual hasta la medición del 04/03/2021.

Para las mediciones siguientes el delta estuvo entre 0,27 y 0,50 cm, haciendo que la longitud libre pasara de 19,1 cm a 18,6 cm, como se evidencia en la Figura 8-5.

**Figura 8-5.** Punto3, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando el comportamiento bajo la primera hipótesis de área de depositación debido a su ubicación, se puede decir que la zona del punto 3 presentó depositación hasta el

09/10/2020, pero luego se generó erosión hasta el 13/11/2020, lo cual no sería concordante con la primera hipótesis. Finalmente se presentó un poco de depositación y de erosión. Pero en el talud no hay evidencias de estos procesos.

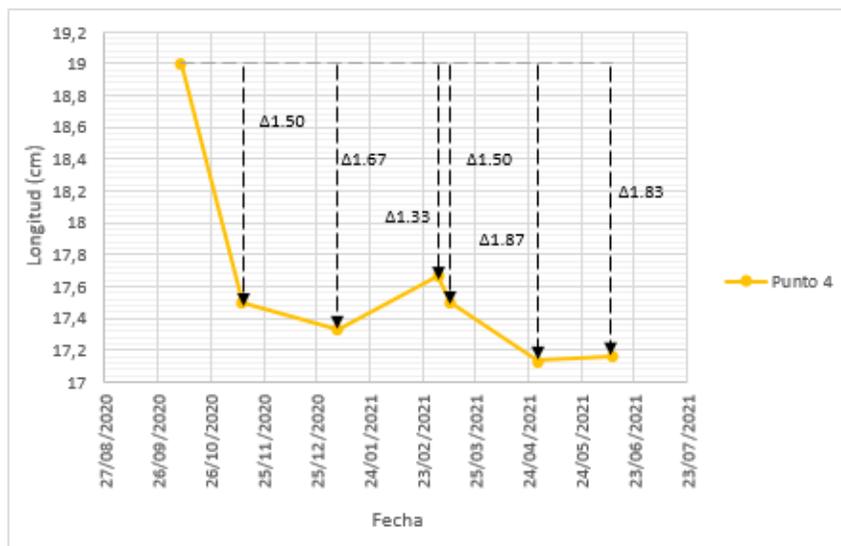
Para la segunda hipótesis de ciclos de expansión y contracción se puede afirmar que para el periodo comprendido entre el 18/09/2020 y 09/10/2020, la cara del talud en la zona del punto 3 experimento una expansión gradual y posteriormente se contrajo entre el periodo del 09/10/2020 y 06/01/2021. Finalmente presentó un comportamiento variable entre expansión y contracción.

#### **Punto 4**

El punto 4 se encuentra ubicado en la parte alta de la cara del talud hacia el costado derecho, ver Figura 8-2 y Foto 7-1. En la medición del 11/13/2020, la longitud libre inicial entre la varilla y la superficie del terreno se redujo en 1,50 cm. El 06/01/2021 se presentó el delta mayor longitud con 1,67 cm, pasando de una longitud libre de 19 cm a 17,3 cm.

Posteriormente, para el 04/03/2021 el delta fue de 1,33 cm y en las siguientes mediciones presento un comportamiento relativamente estable entre deltas de 1,50 y 1,87 cm, como se evidencia en la Figura 8-6.

**Figura 8-6.** Punto 4, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

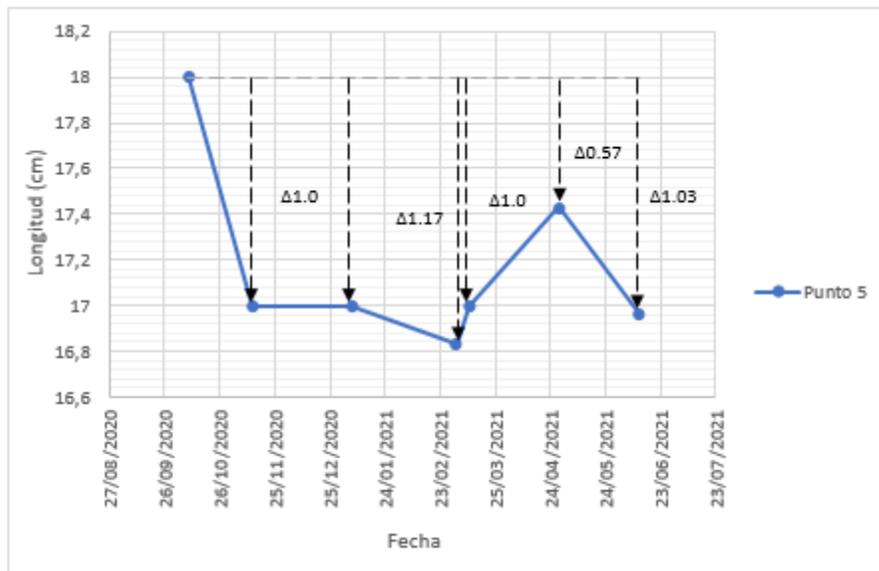
En relación con la primera hipótesis de áreas de depositación y erosión, se puede decir que la zona del punto 4 presentó depositación hasta el 06/01/2021, luego presentó un poco de erosión hasta el 04/03/2021 y después se generó nuevamente depositación. Dado que este punto se encuentra en la parte alta del talud este sector sería más un área de erosión que de depositación.

Con base en la segunda hipótesis, se puede afirmar que para el periodo comprendido entre el 09/10/2020 y 06/01/2021, la cara del talud en la zona del punto 4 experimentó una expansión gradual, posteriormente se contrajo hasta el 04/03/2021 y finalmente presentó una leve expansión.

### **Punto 5**

El punto 5 se encuentra ubicado aproximadamente hacia la mitad de la cara del talud en el costado izquierdo, ver Figura 8-2 y Foto 7-1 **Foto 7-1**. Para la medición del 13/11/2020, se presentó un delta de 1 cm el cual se mantuvo hasta la medición del 06/01/2021. El delta de mayor longitud se presentó en la medición del 04/03/2021, con 1,17 cm. Entre los periodos del 04/03/2021 y el 29/04/2021 el delta disminuyó, con lecturas de 1,0 cm y 0,57 cm, respectivamente. Finalizando el monitoreo el 11/06/2021 con un delta de 1,03 cm, haciendo que la longitud libre pasara de 18 cm a 16,97 cm, como se evidencia en la Figura 8-7.

**Figura 8-7.** Punto 5, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando el comportamiento bajo la primera hipótesis de áreas de depositación y erosión, se puede decir que la zona del punto 5 presentó depositación hasta el 04/03/2021, luego se generó erosión hasta el 29/04/2021 y finalmente se presentó un poco de depositación.

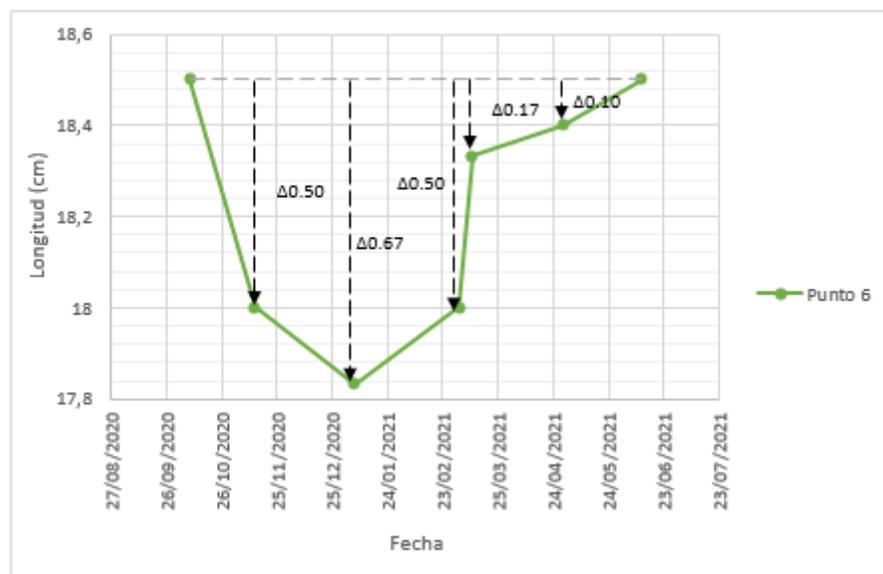
Para la segunda hipótesis de ciclo de expansión y contracción se puede afirmar que para el periodo comprendido entre el 09/10/2020 y 04/03/2021, la cara del talud en la zona del punto 5 experimentó una expansión gradual y posteriormente se contrajo entre el periodo del 04/03/2021 y 29/04/2021; finalmente se presentó un poco de expansión.

### **Punto 6**

El punto 6 se encuentra ubicado en la parte alta de la cara del talud hacia el costado izquierdo, ver Figura 8-2 y Foto 7-1. En la medición del 11/13/2020, la longitud libre inicial entre la varilla y la superficie del terreno se redujo en 0,50 cm. El 06/01/2021 se presentó el delta mayor longitud con 0,67 cm, pasando de una longitud libre de 18,5 cm a 17,83 cm.

Posteriormente, para el 04/03/2021 el delta fue de 0,50 cm y en las siguientes mediciones se presentó una disminución del delta hasta 0,10 cm, como se evidencia en la Figura 8-8.

**Figura 8-8.** Punto6, longitudes y deltas de longitud en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

En relación con la primera hipótesis de áreas de depositación y erosión, se puede decir que la zona del punto 6 presentó depositación hasta el 06/01/2021 y luego exhibió un comportamiento erosivo hasta el final del monitoreo. Dado que este punto se encuentra en la parte alta del talud este sector sería más un área de erosión que de depositación.

Con base en la segunda hipótesis, se puede afirmar que para el periodo comprendido entre el 09/10/2020 y 06/01/2021, la cara del talud en la zona del punto 6 experimentó una expansión gradual, posteriormente se contrajo hasta el 11/06/2021.

Analizando los puntos de medición en función a la ubicación en la cara del talud, se identificó que en la parte alta del talud donde está instalado el punto 6 al costado izquierdo y el punto 4 en el costado derecho, el comportamiento de ambos puntos fue similar entre 18/09/2020 al 04/03/2021. Luego de la medición del mes de febrero los comportamientos cambiaron de pendiente, siendo el del punto 4 creciente y el del punto 6 decreciente, como se evidencia en la Figura 8-9.

**Figura 8-9.** Deltas de longitud en función del tiempo para los puntos 4 y 6 ubicados en la parte alta del talud.



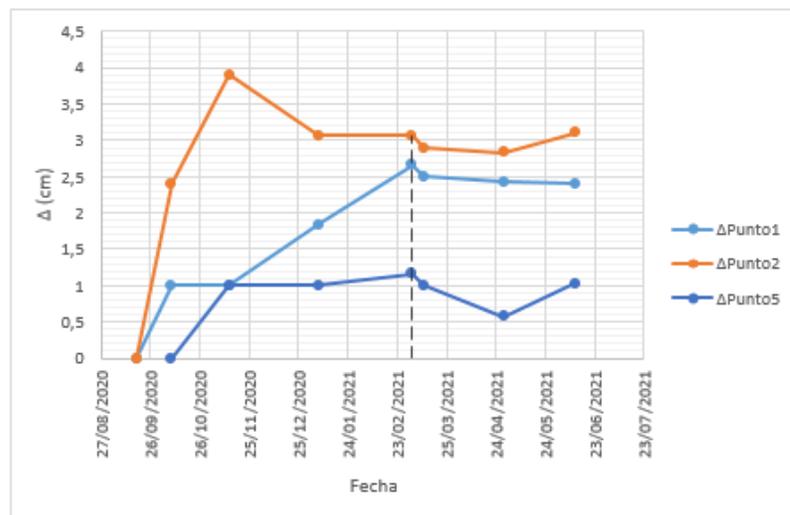
Fuente: Elaboración propia.

En la parte media del talud están instalados el punto 1 y 2 al costado izquierdo y el punto 5 en el costado derecho. En la Figura 8-10 se presentan los deltas de longitud en función

del tiempo y se evidencia que para los puntos 1 y 5 el comportamiento es ascendente entre 18/09/2020 al 04/03/2021. En el punto 2, inicialmente se presentó un comportamiento ascendente entre 18/09/2020 al 13/11/2020 y posteriormente decrece entre 13/11/2020 al 04/03/2021.

Después de la medición del mes de febrero los comportamientos son similares, teniendo pendientes decrecientes en los tres puntos hasta el 29/04/2021 y luego aumentan.

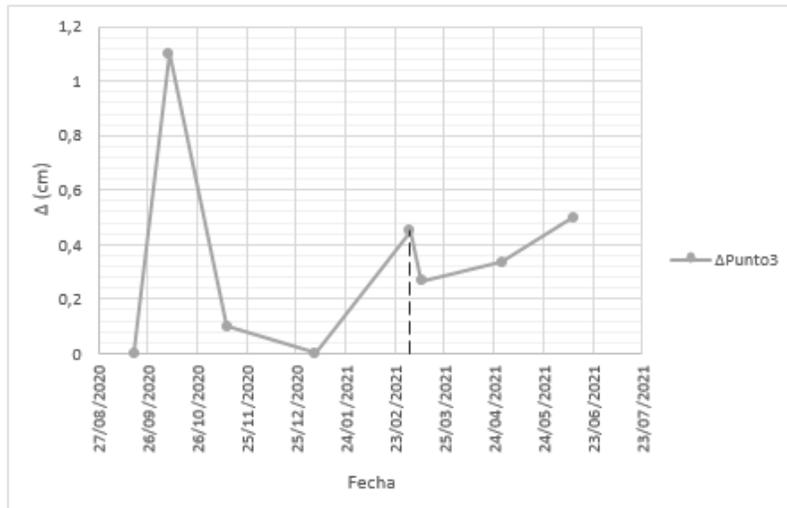
**Figura 8-10.** Deltas de longitud en función del tiempo para los puntos 1, 2 y 5 ubicados en la parte media del talud.



Fuente: Elaboración propia.

En la parte inferior del talud está instalado el punto 3 al costado izquierdo, siendo el único punto en esa ubicación. En Figura 8-11 se presentan los deltas de longitud en función del tiempo y se evidencia un comportamiento fluctuante, después del 04/03/2021 los deltas se disminuyeron hasta el fin las mediciones.

**Figura 8-11.** Deltas de longitud en función del tiempo para el punto 3 ubicado en la parte baja del talud.

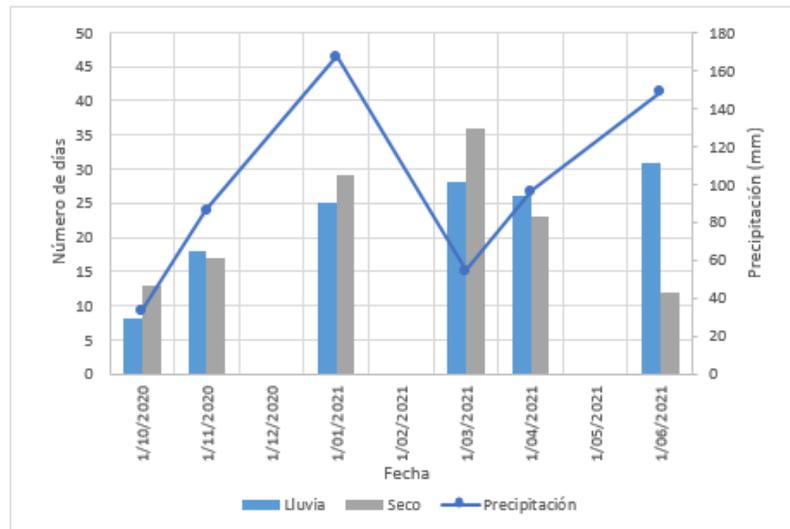


Fuente: Elaboración propia.

De otra parte, se realizó un análisis climatológico que permitiera relacionar el comportamiento evidenciado en las lecturas en los puntos de medición en el Talud 1 con los períodos de lluvia y verano en la zona. Para lo cual se implementaron los datos diarios de los años 2020-2021 de la estación meteorológica Quiba.

En la Figura 8-12 se presenta el número de días de lluvia y de tiempo seco, y la precipitación acumulada en función del tiempo. Por ejemplo, entre la medición del 18/09/2020 y la del 09/10/2020, se presentaron 8 días de lluvia, 13 días secos y la precipitación acumulada fue de 33,5 mm. Posteriormente, entre la medición del 09/10/2020 y la del 13/11/2020, se tuvieron 18 días de lluvia, 17 días secos y la precipitación acumulada fue de 86,3 mm.

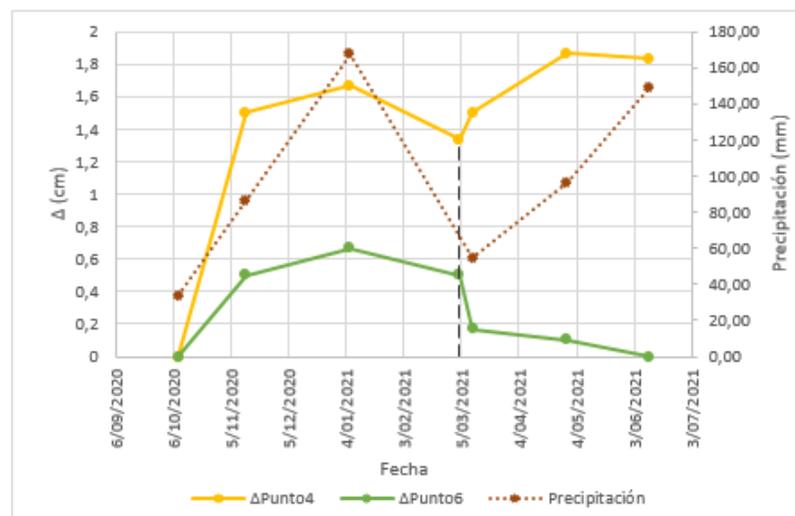
**Figura 8-12.** Número de días de lluvia, secos y cantidad de precipitación en la estación meteorológica Quiba entre 09/10/2020 al 06/01/2021.



Fuente: Elaboración propia.

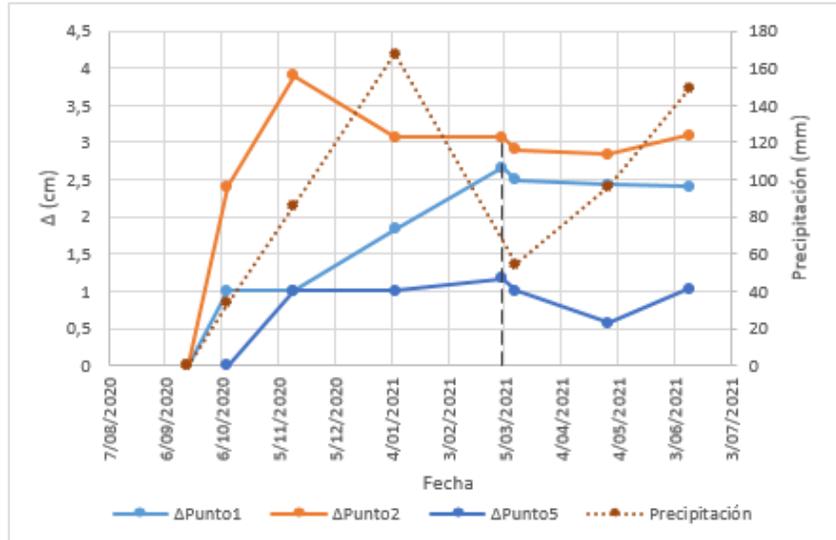
Se cruzó la información de los deltas de longitud en función del tiempo de los puntos 4 y 6 con la precipitación acumulada dentro de cada periodo de medición, encontrándose un comportamiento similar.

**Figura 8-13.** De los puntos 4 y 6, comparación del comportamiento de los deltas de longitudes con la precipitación acumulada en función del tiempo.



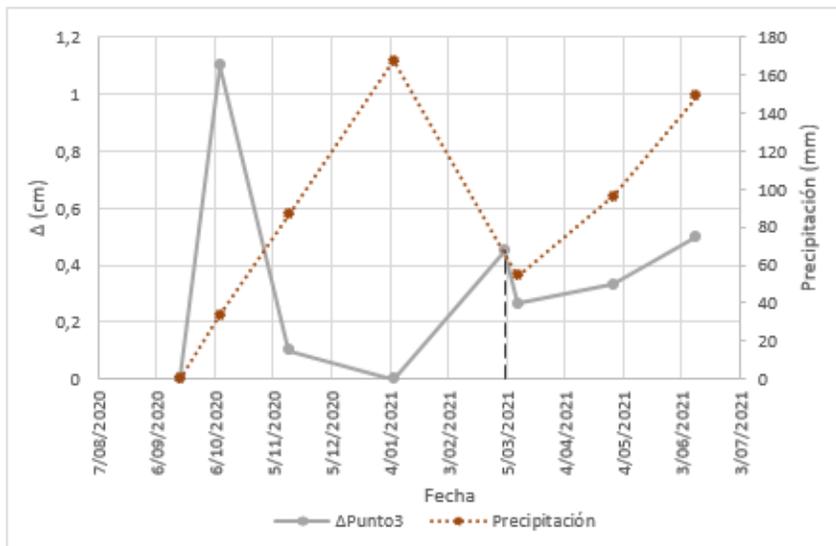
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-14.** De los puntos 1, 2 y 5, comparación del comportamiento de los deltas de longitudes con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-15.** Comparación del comportamiento de los deltas de longitudes con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo del punto 3.



Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas de las Figura 8-14 y Figura 8-15 permiten deducir que el comportamiento expansivo de las arcillolitas que conforman la cara del talud no ocurre de manera instantánea con el evento de precipitación, sino que existe un desfase de tiempo, el cual está relacionado con la velocidad de infiltración del agua lluvia para estar disponible a la actividad higroscópica de los minerales arcillosos expansivos que hacen parte de la composición mineralógica de las arcillolitas. Con el objetivo de comprobar las hipótesis planteadas anteriormente, se efectuaron ensayos de expansión y de composición mineralógica, los cuales se detallan en el numeral 9 y se realiza su respectivo análisis en el numeral 10.

### 8.1.2 Estimación de los espesores de material meteorizado por desleimiento en el Talud 1

De los espesores de arcillolita desleída, en la Tabla 8-2 se resumen las mediciones realizadas en la cara del Talud 1 para los espesores del material particularizado y de la arcillolita afectada por el desleimiento que en promedio se encuentra en 13 cm a 40 cm y más de 40 cm, respectivamente.

**Tabla 8-2.** Espesores promedio reportados de las capas de material particularizado y roca afectada por desleimiento.

Fecha	Capa de material	
	Particularizado (cm)	Afectada por desleimiento (cm)
28/01/2020	26	>40

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8-3 se presentan las diferentes profundidades obtenidas a través del hincado de la varilla de acero en diferentes sitios de la cara del talud; obteniéndose espesores entre 1,64 m y 1,55 m.

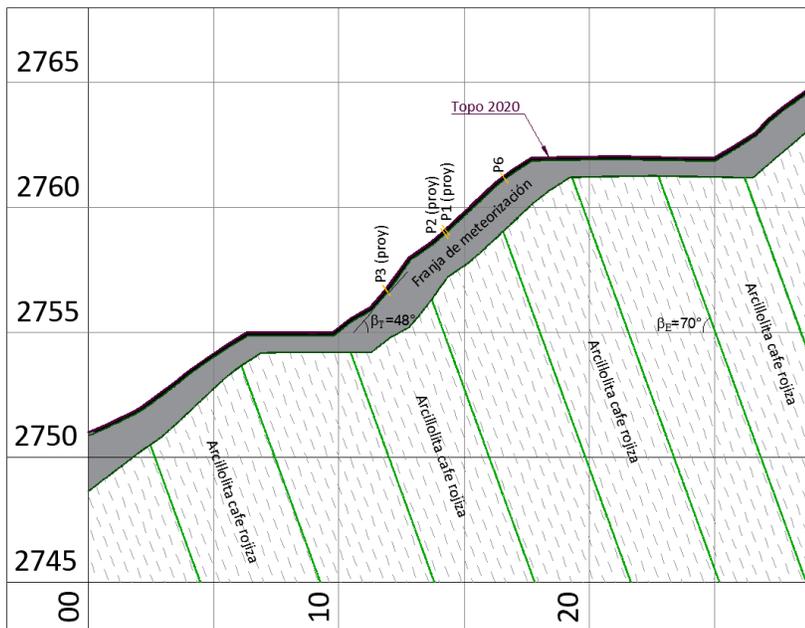
**Tabla 8-3.** Espesores reportados en la hincada de la varilla el 06/01/2021.

Fecha	Hincada varilla		
	Profundidad 1 (m)	Profundidad 2 (m)	Profundidad promedio (m)
06/01/2021	1,64	1,55	1,59

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, se tiene que el espesor de la capa de la arcillolita particularizada (tipo suelo) es de 26 cm, que el espesor de la capa de la arcillolita afectada por el desleimiento se encuentra a más de 40 cm y que, después de una profundidad de 1,59 m se puede encontrar la arcillolita levemente afectada por la meteorización la cual presenta una buena resistencia. Hacia la berma superior del talud se determinó una franja de meteorización entre 0,8 y 0,9 m, como se presenta en la Figura 8-16.

**Figura 8-16.** Talud 1, ubicación en el Perfil 1-A del espesor de la franja de meteorización.  
PERFIL 1-A



Fuente: Elaboración propia.

Como una primera aproximación, se plantea la hipótesis simple de que el proceso de meteorización por desleimiento es lineal, por lo tanto, se podría proponer una tasa de desleimiento para el Talud 1.

Suponiendo que el espesor de la franja de meteorización se desarrolló desde el momento en que se configuro el talud hasta las mediciones que se realizaron en el desarrollo de este trabajo, se procede a calcular la tasa de desleimiento como una velocidad, donde la distancia recorrida es el espesor de la franja meteorizada y el tiempo es los años que han transcurrido entre la conformación del talud y la medición realizada, ver Ecuación 8-1.

$$Tasa\ de\ desleimiento = V = \frac{d}{t} \quad \text{Ecuación 8-1}$$

Aplicando la ecuación anteriormente propuesta para los espesores de la cara del talud y de la berma superior, se tiene:

a) Cara del talud

$$Tasa\ de\ desleimiento = \frac{\text{Espesor franja de meteorización}}{\text{Tiempo de conformación}}$$

$$Tasa\ de\ desleimiento = \frac{1,60\ m}{2021 - 2012} = \frac{1,60\ m}{9\ años}$$

$$Tasa\ de\ desleimiento = 0,18 \frac{m}{año} = 18 \frac{cm}{año}$$

a) Berma superior

$$Tasa\ de\ desleimiento = \frac{\text{Espesor franja de meteorización}}{\text{Tiempo de conformación}}$$

$$Tasa\ de\ desleimiento = \frac{0,80\ m}{2021 - 2012} = \frac{0,80\ m}{9\ años}$$

$$Tasa\ de\ desleimiento = 0,09 \frac{m}{año} = 9 \frac{cm}{año}$$

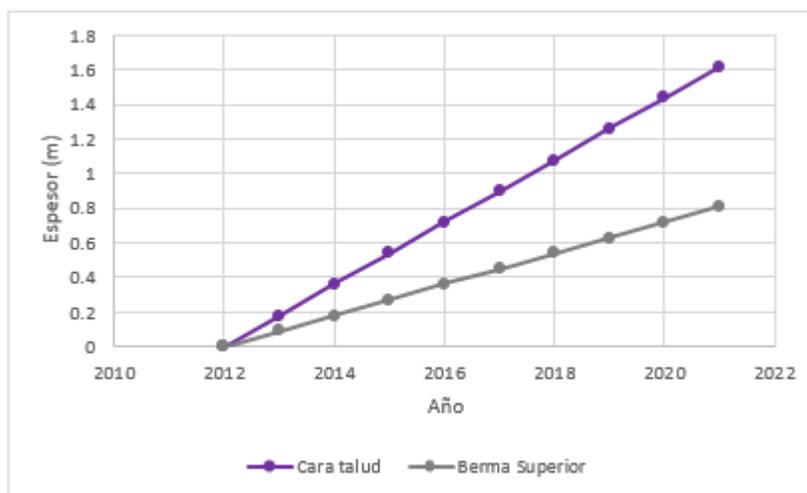
Con base en las tasas de desleimiento calculadas en la cara del talud y en la berma superior, se procedió a proyectar el espesor de la franja de meteorización desde la conformación del talud hasta la fecha cuando se realizó la medición. Los valores de los espesores en función de los años se resumen en la Tabla 8-4 y se grafican en la Figura 8-17.

**Tabla 8-4 :** Estimación de los espesores desde la cara del talud hacia adentro del terreno y en la berma superior bajo la hipótesis de un comportamiento lineal y constante.

Año	Espesor	
	Cara del talud (m)	Berma superior (m)
2012	0	0
2013	0,18	0,09
2014	0,36	0,18
2015	0,54	0,27
2016	0,72	0,36
2017	0,9	0,45
2018	1,08	0,54
2019	1,26	0,63
2020	1,44	0,72
2021	1,62	0,81

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-17.** Comportamiento propuesto para estimar el espesor de la franja de meteorización.



Fuente: Elaboración propia.

En el comportamiento mostrado anteriormente no refleja la realidad, debido a que, como se puso evidenciar en el marco teórico, la durabilidad al desleimiento es función de la porosidad, la fuerza de unión del grano, las propiedades petrofísicas y el grado de rotura; siendo para este caso desconocido el detalle del componente de la porosidad, el cual depende del volumen de poros, el contenido de agua, la permeabilidad que es un aspecto microscópico y que se escapa del detalle que se maneja en el presente Trabajo Final de Maestría.

Es claro que al inicio del proceso de meteorización por desleimiento se arranca con una velocidad rápida ya que toda la superficie del talud estará expuesta a ciclos de humedecimiento y secado producto de la lluvia y el sol, pero a medida que se va desarrollando un espesor considerable de material desleído este protege la roca interna, haciendo que ralentice dicha velocidad con la que empezó el proceso; de igual manera la precipitación no afectara con la misma intensidad como lo hace sobre la cara libre del talud, haciendo que se genere un cambio en la infiltración de agua y su conducción en la parte interna del talud.

A partir de lo desarrollado anteriormente, se hace un segundo planteamiento, donde se analiza la intensidad de desleimiento en cambio del término de velocidad o tasa de desleimiento. Entendiéndose como intensidad de desleimiento al grado de fragmentación de la roca y cómo se comporta en función del tamaño de grano, siendo este medido a través de ensayos de granulometría.

Entre los ensayos de laboratorio, se realizaron dos ensayos de granulometría al material de la cara del talud para el Talud 1 y Talud 2, en ellos se observaron pequeñas variaciones entre las que se encuentra, que la muestra más cerca de la superficie (0,20 m) en el Talud 2 presenta mayor porcentaje de finos en comparación a la muestra de una profundidad de 0,40 m en el Talud 1, como se resume en la Tabla 8-5.

**Tabla 8-5.** Resultados de los ensayos de granulometría efectuados en los taludes 1 y 2.

	Profundidad (m)	% Finos	% Arena	% Grava
Talud 1	0,40	92,7	7,3	0
Talud 2	0,20	99	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior hace que se pueda cuantificar una intensidad de desleimiento a través de ensayos de granulometría con respecto a la profundización, medida desde la cara de la superficie expuesta, donde la intensidad del proceso de desleimiento es muy rápida en la superficie del terreno en que queda expuesta la arcillolita a la acción directa de la lluvia y el sol (humedecimiento-secado), pero a medida que la acción deja de ser tan directa, por el espesor de capa que se va particularizando, el desleimiento disminuye su intensidad hasta una profundidad Z donde su efecto es casi cero. Luego, la intensidad de desleimiento no tiene un comportamiento lineal y podría tener un comportamiento como el que se expone en la Figura 8-18.

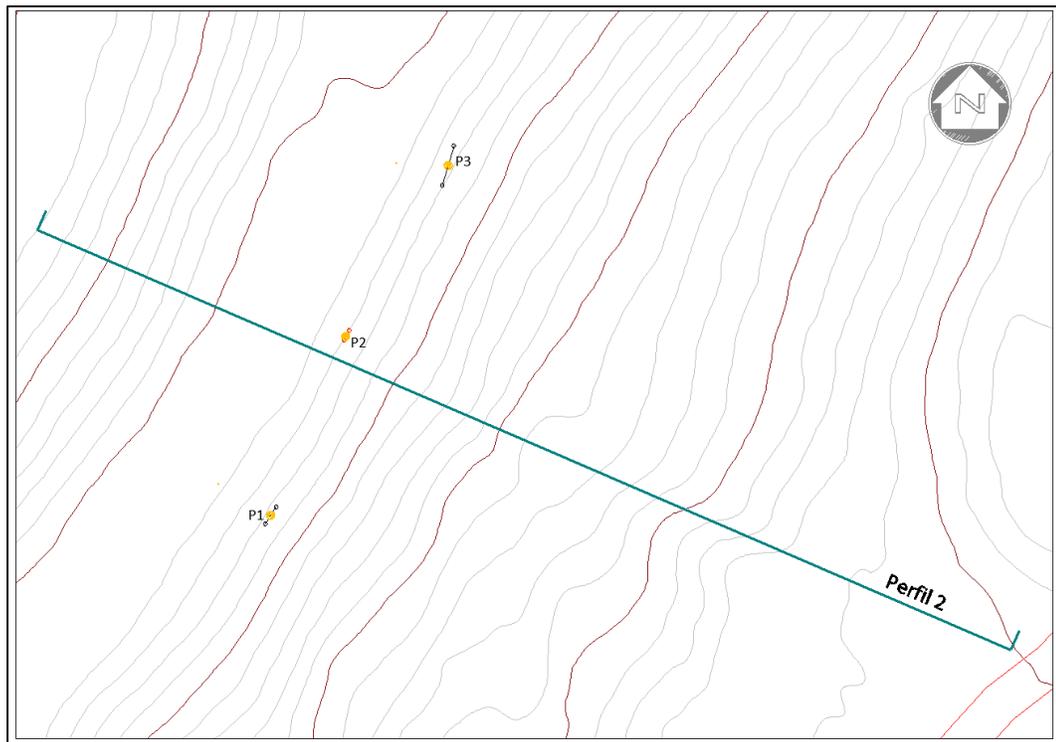
**Figura 8-18.** Intensidad de desleimiento planteada en función del tamaño de partícula y la profundidad con respecto a la cara expuesta.

Fuente: Elaboración propia.

## 8.2 Talud 2

Para el análisis de resultados, inicialmente se realizó la gráfica de las lecturas a los puntos de control en función del tiempo como se evidencia en la Figura 8-20 para poder cuantificar el comportamiento de la profundización de los surcos instrumentados.

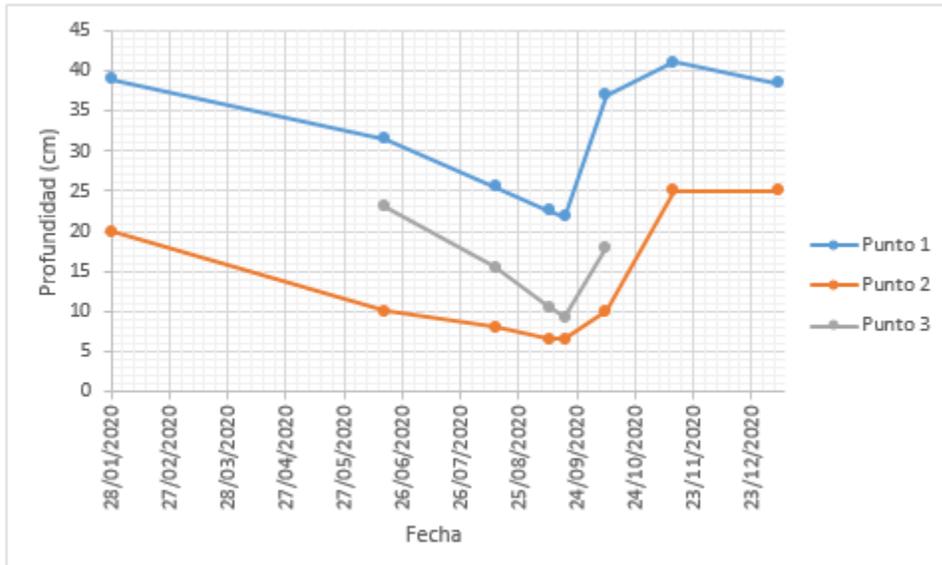
**Figura 8-19.** Ubicación en planta de los tres puntos de control en el Talud 2



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8-20 se evidencia que entre el 28/01/2020 y el 18/09/2020 se presentó una disminución de la profundidad en los tres surcos, posteriormente la profundidad fue aumentando hasta el 13/11/2020.

**Figura 8-20.** Comportamiento de las mediciones de cada punto de control en la cara del Talud 2 con respecto al tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

### 8.2.1 Diferenciales de profundización (erosión) de los surcos

Con el objetivo de hacer un análisis más detallado del comportamiento de las mediciones, se procedió a calcular los diferenciales o deltas de profundidad en cada punto de control, como la diferencia por incremento (erosión) o disminución (sedimentación) de la profundidad obtenida al restarle a la profundidad inicial las mediciones posteriores de cada periodo.

**Tabla 8-6.** Deltas de profundidad para los 3 puntos de control del Talud 2 entre el 17/06/2020 al 06/01/2021.

	17/06/2020	13/08/2020	10/09/2020	18/09/2020	9/10/2020	13/11/2020	06/01/2021
	$\Delta$ (cm)						
Punto 1	7,5	13,5	16,5	17,2	2,0	-2,0	0,5
Punto 2	10	12	13,5	13,5	10	-5,0	-5,0
Punto 3		7,5	12,5	13,7	5,0		

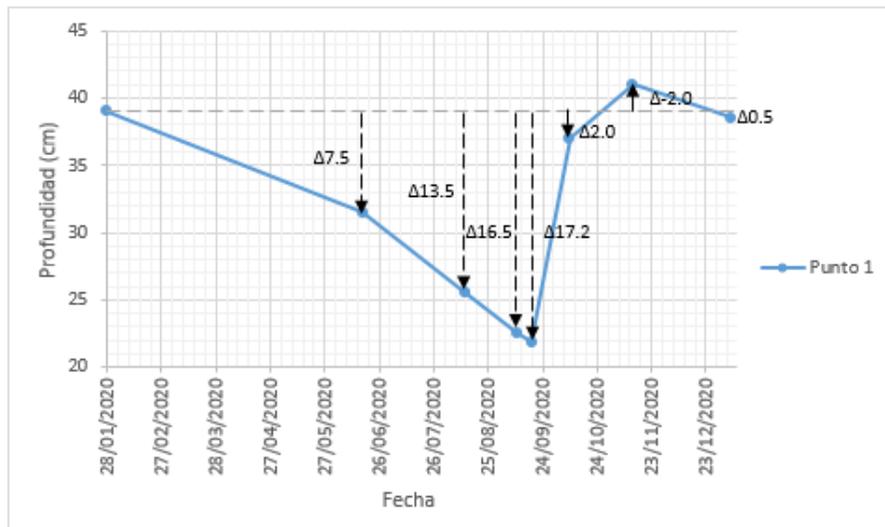
Fuente: Elaboración propia

### **Punto de control 1**

El punto de control 1 se encuentra ubicado en la parte baja de la cara del talud al costado derecho, ver Foto 7-6 y Figura 8-19. En la primera medición se presentó una disminución de la profundidad libre inicial entre el cordel y el fondo del surco en 7,5 cm entre el 28/01/2020 y el 17/06/2020. Posteriormente, la profundidad libre se fue reduciendo hasta llegar a un delta de profundidad máximo de 17,2 cm con respecto a la inicial para 24/09/2020, haciendo que la profundidad libre pasara de 39 cm a 21,8 cm, explicar.

Para las mediciones siguientes el delta disminuyó hasta llegar a -2,0 cm, haciendo que la profundidad libre pasara de 21,8 cm a 41 cm, como se evidencia en la Figura 8-21.

**Figura 8-21.** Punto de control 1, profundidades y deltas de profundidad en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia

Analizando el comportamiento del punto 1, entre las fechas del 28/01/2020 y el 18/09/2020 se presentó un periodo de depositación de material y después un periodo de erosión entre el 18/09/2020 y el 13/11/2020.

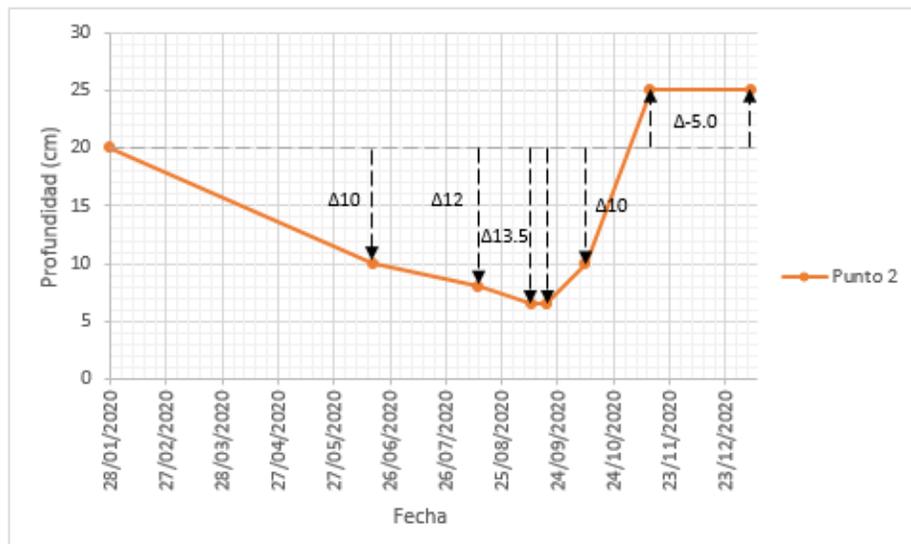
### **Punto de control 2**

El punto 2 se encuentra ubicado aproximadamente en la parte baja de la cara del talud hacia la parte central, entre el punto de control 1 y 3, ver Foto 7-6 y Figura 8-19. En la

medición del 17/06/2020, la profundidad libre inicial entre el cordel y el fondo del surco se redujo en 10 cm. El 10/09/2020 se presentó el delta mayor profundidad con 13,5 cm, pasando de una longitud libre de 20 cm a 6,5 cm.

Posteriormente, para el 09/10/2020 el delta se redujo y fue de 10 cm y en las siguientes mediciones se siguió disminuyendo hasta llegar a un delta de profundidad de -5,0 cm, como se evidencia en la Figura 8-22.

**Figura 8-22.** Punto de control 2, profundidades y deltas de profundidad en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia

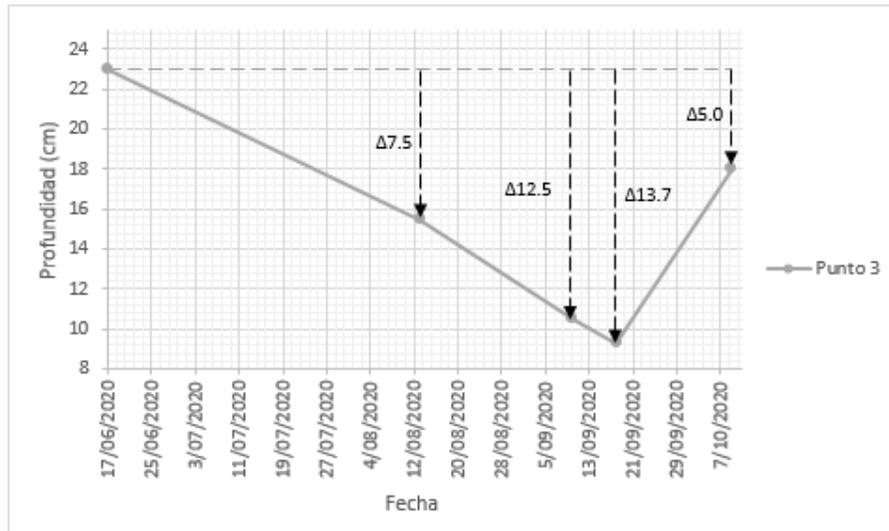
En relación con los procesos de depositación y erosión, se puede decir que el surco del punto 2 presentó depositación hasta el 18/09/2020 y posteriormente un ciclo de erosión hasta el 06/01/2021.

### **Punto de control 3**

El punto 3 se encuentra ubicado en la parte inferior de la cara del talud hacia el costado izquierdo, ver Foto 7-6 y Figura 8-19. Para la medición del 13/08/2020, se presentó el delta de 7,5 cm, posteriormente para el 10/09/2020 la profundidad libre inicial se disminuyó en 12,5 cm.

En la medición del 18/09/2020 se tuvo un delta de profundidad máximo de 13,7 cm, haciendo que la profundidad libre pasara de 23 cm a 9,3 cm; después el delta disminuyó, llegando a 5 cm, como se evidencia en la Figura 8-23.

**Figura 8-23.** Punto de control 3, profundidades y deltas de profundidad en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia

Analizando el comportamiento del punto 3, entre las fechas del 17/06/2020 y el 18/09/2020 se presentó un periodo de depositación de material y después un periodo de erosión entre el 18/09/2020 y el 09/10/2020.

Con base en las mediciones realizadas y los diferenciales de profundidad calculados en cada periodo, se procedió a calcular tasas de depositación y de erosión aproximadas en cada punto de control, como se presenta en la Tabla 8-7.

**Tabla 8-7.** Tasa de depositación o de erosión calculadas en cada punto de control.

	Tasa de depositación (cm/día)				Tasa de erosión (cm/día)		
	17/06/2020	13/08/2020	10/09/2020	18/09/2020	9/10/2020	13/11/2020	6/01/2021
Punto 1	0,05	0,11	0,11	0,09	-0,72	-0,11	0,05
Punto 2	0,07	0,04	0,05	0,00	-0,17	-0,43	0,00
Punto 3		0,13	0,18	0,15	-0,41		

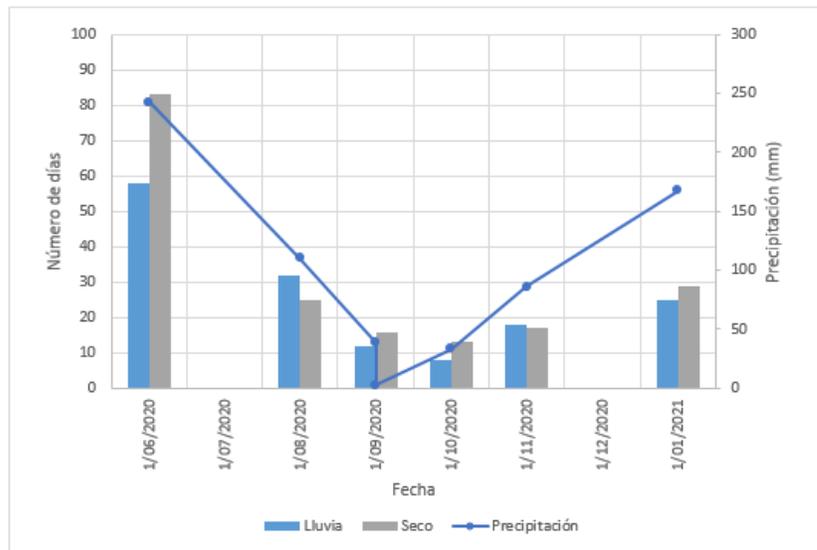
Fuente: Elaboración propia.

## 8.2.2 Análisis climatológico

Adicionalmente, se realizó un análisis climatológico para relacionar el comportamiento evidenciado en las lecturas en los puntos de control en el Talud 2 con los períodos de lluvia en la zona. Para lo cual se implementaron los datos diarios de los años 2020-2021 de la estación meteorológica Quiba.

En la Figura 8-24 se presenta el número de días de lluvia y secos, y la precipitación acumulada en función del tiempo. Por ejemplo, entre la medición del 28/01/2020 y la del 17/06/2020, se presentaron 58 días de lluvia, 83 días secos y una precipitación acumulada de 242,9 mm. Posteriormente, entre la medición del 17/06/2020 y la del 13/08/2020, se tuvieron 32 días de lluvia, 25 días secos y una precipitación acumulada de 110,2 mm.

**Figura 8-24.** Número de días de lluvia, secos y cantidad de precipitación en la estación meteorológica Quiba entre 28/01/2020 y 06/01/2021.

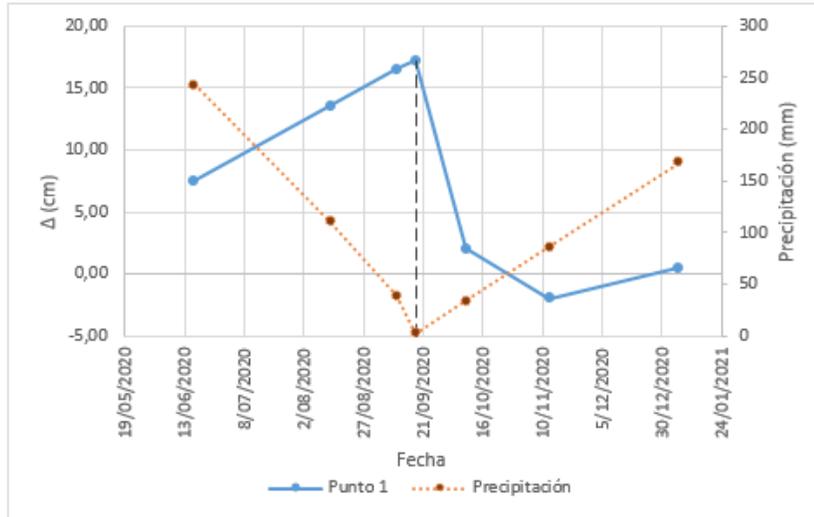


Fuente: Elaboración propia

### **Punto de control 1**

En la Figura 8-25 se presentan los deltas o diferenciales de profundidad calculados en el punto de control 1 en función del tiempo, los cuales permiten entender, en detalle, el comportamiento del surco derecho; la pendiente ascendente representa el proceso de depositación y la pendiente descendente el proceso de erosión. Adicionalmente, se añadió a la gráfica la precipitación acumulada en cada periodo con el objetivo de comparar el proceso de depositación y el de erosión con el comportamiento de la lluvia.

**Figura 8-25.** Punto 1, comparación del comportamiento de los deltas de profundidad con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de complementar y detallar el comportamiento del surco derecho del Talud 2 mostrado en la Figura 8-25, a continuación en la Foto 8-1 se presenta el registro fotográfico de campo entre el 28/01/2020 al 10/09/2020 donde se llevaron a cabo las mediciones del punto de control 1 y se detalla cada una de las fotos identificadas con los numerales a, b, c y d.

- a) En la primera visita de campo (28/01/2020) se tenía material acumulado en la pata del talud aportado por la red de surcos por donde se transporta el agua y sedimentos por la caída de material particularizado por efecto de la meteorización por desleimiento a través de la acción de la gravedad. Revisando el comportamiento del clima unos días antes de la primera visita, se estableció que 7 días antes se tuvieron 3 días secos y 4 días con lluvia, presentándose la precipitación más alta en esos cuatro días (35,2 mm) que en el resto de los días de enero (2,1 mm). Lo anterior puede ser la causa del material acumulado en la pata del talud, aportado en gran medida por el agua que baja a través de la red de surcos en la cara del talud y arrastra las partículas débilmente adheridas y sueltas.
- b) La visita de campo del 17/06/2020 se observó que la red de surcos no era tan marcada a comparación a la del mes de enero y que no se tenían sedimentos en la pata del talud. Analizando el comportamiento del clima dentro de este periodo,

se presentaron más días secos (83 días) en comparación a los días con lluvia (58 días). Adicionalmente, la precipitación acumulada en esos 141 días fue de 243 mm, siendo la precipitación máxima diaria de 22,3 mm. En detalle, los 7 días antes de la visita se caracterizaron por ser lluviosos, con una precipitación de 28,8 mm. Siendo más los días secos dentro del periodo y la intensidad de la lluvia poco concentrada, se puede afirmar que el material particulado se va depositando en los surcos en su gran mayoría por acción de la gravedad y en menor proporción por el transporte del agua de escorrentía, ya que no hay una huella marcada en la cara del talud.

- c) En el mes de agosto se llevó a cabo la tercera visita de campo, se evidencio un pequeño flujo de lodo bajando por el surco monitoreado y agua empozada en la berma. Dentro de la anterior y la presente medición, trascurrieron 57 días, donde se presentaron 32 días con lluvia y 25 secos, con una precipitación acumulada de 110,2 mm y una precipitación máxima diaria de 17,5 mm a inicios del ciclo. La posible causa del pequeño flujo de lodos se debe a que el periodo de análisis se caracterizó por la alternancia de días secos y lluviosos, siendo este último el de mayor protagonismo, pero con cantidades pequeñas de precipitación que hace que se genere un flujo que transporta sedimentos, los cuales se van depositando a lo largo de su trayectoria y que no ocasionan arrastre debido a su poca intensidad del flujo.
- d) En la visita del 10/09/2020 se apreció el rastro que dejo el flujo de lodos de la anterior visita y material depositado en la red de surcos. Entre el 13/08/2020 y el 10/09/2020 se presentaron 12 días con lluvia y 16 secos, con una precipitación acumulada de 38,9 mm y una precipitación máxima diaria de 7,8 mm, siendo la depositación el proceso más evidente.

**Foto 8-1.** Detalle de la medición realizada entre el 28/01/2020 al 10/09/2020 del punto de control 1 del Talud 2.



a) Medición de campo del 28/01/2020



b) Medición de campo del 17/06/2020



c) Medición de campo del 13/08/2020



d) Medición de campo del 10/09/2020

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la Foto 8-2 se presenta el registro fotográfico de campo entre el 18/09/2020 y el 06/01/2021 cuando se llevaron a cabo las mediciones del punto de control 1 y se detalla cada una de las fotos identificadas con los numerales a, b, c y d.

- a) En la visita de campo del 18/09/2020, al igual que la visita anterior se evidencio que el proceso dominante era el de depositación. Dentro de los 8 días transcurridos entre las dos visitas se tuvieron 6 días secos y 2 días con lluvia, con una precipitación acumulada 2,7 mm la cual se presentó en su mayoría en un solo día.
- b) En la visita de campo del 09/10/2020 se observó que la red de surcos estaba más marcada a comparación a la del mes de septiembre y comienzan a acumularse sedimentos en la pata del talud. Analizando el comportamiento del clima dentro de este periodo, se presentaron más días secos (13 días) en comparación a los días con lluvia (8 días). Adicionalmente, la precipitación acumulada en esos 21 días fue de 33,5 mm, siendo 8,7 mm la precipitación máxima diaria.
- c) En la visita del 13/11/2020 se evidencio en la red de surcos su profundización y un aumento en el tamaño del cono de material en la pata del talud. Entre el 09/10/2020 y el 13/11/2020 trascurrieron 35 días, donde se presentaron 18 días con lluvia y 17 secos, con una precipitación acumulada de 86,3 mm y una precipitación máxima diaria de 20,9 mm a finales del ciclo. En detalle, los 7 días previos a la visita fueron 2 días secos y 5 con lluvia, con una precipitación de 56,5 mm. Siendo estos días los que aportaron la mayor cantidad de precipitación dentro del periodo. En consecuencia, se han profundizado los surcos por el flujo de agua que transporta sedimentos y va arrastrando el material anteriormente depositado en los surcos y alimenta el material de la pata del talud.
- d) En la última visita (06/01/2021) la red de surcos estaba más marcada sobre la cara del talud, pero no fue posible evidenciar el progreso del cono de material debido a que paso maquinaria por la zona y limpio el material ubicado en la berma. Se presentaron 25 días con lluvia y 29 secos, con una precipitación acumulada de 167,4 mm, los cuales en su mayoría se presentaron a inicio del ciclo y una precipitación máxima diaria de 31,3 mm. Los 7 días anteriores a la visita fueron 3 días secos y 4 con lluvia, con una precipitación de 13 mm. La intensidad de la lluvia al inicio del ciclo pudo generar la profundización de los surcos y la disminución de la precipitación al final produjo depositación en los surcos en su gran mayoría por acción de la gravedad y en menor proporción por el transporte en el agua de escorrentía, siendo la depositación el proceso que predominó.

**Foto 8-2.** Detalle de la medición realizada entre el 18/09/2020 al 06/01/2021 del punto de control 1 del Talud 2.



a) Medición de campo del 18/09/2020



b) Medición de campo del 09/10/2020



c) Medición de campo del 13/11/2020



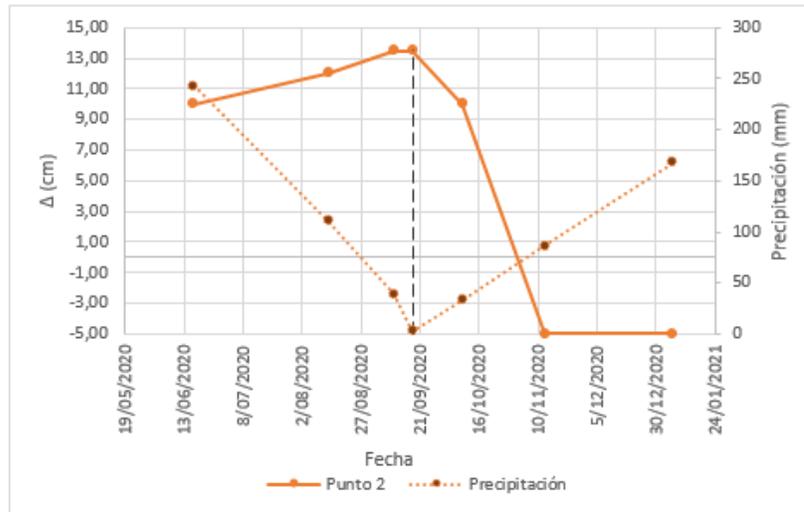
d) Medición de campo del 06/01/2021

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

### **Punto de control 2**

En la Figura 8-26 se presentan los deltas de profundidad calculados en el punto de control 2 en función del tiempo, los cuales permiten entender a detalle el comportamiento del surco central, el control se instaló el 28/01/2020. La pendiente ascendente representa el proceso de depositación y la pendiente descendente el proceso de erosión. Adicionalmente, se insertó a la gráfica la precipitación acumulada en cada periodo con el objetivo de comparar el proceso de depositación y erosión con el comportamiento de la lluvia.

**Figura 8-26.** Punto 2, comparación del comportamiento de los deltas de profundidad con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo.



Fuente: Elaboración propia

De igual manera que en el punto de control 1, a continuación, en la Foto 8-3 se presenta el registro fotográfico de campo. Entre el 28/01/2020 y el 10/09/2020 donde se llevaron a cabo las mediciones del punto de control 2 y se detalla los rasgos en cada una de las fotos identificadas con los numerales a, b, c y d.

- a) El 28/01/2020 se realizó la visita inicial de campo y se hace la primera medición. El surco se encontraba bien marcado, con material acumulado en la pata del talud y un pequeño flujo de lodos. Se revisó el comportamiento de las lluvias de los 7 días anteriores, donde se tuvieron 3 días secos y 4 días con lluvia, presentándose la precipitación más alta en esos cuatro días (35,2 mm) con respecto al resto de los

días de enero (2,1 mm). El resultado del contexto descrito anteriormente puede ser la acumulación del material en la pata del talud aportado en gran medida por el agua que bajo a través de la red de surcos en la cara del talud y arrastró partículas sueltas.

- b) El 17/06/2020 se observó que el surco seleccionado para hacer las mediciones fue cubierto por material acumulado resultante del arrastre del agua y/o por acción de la gravedad que hace que se desprenda el material particularizado. No se pudo evidenciar el estado de cono de material ubicado en la pata del talud, debido a que la berma fue limpiada por el paso de maquinaria. Dentro de este periodo, se presentaron 83 días secos y 58 días con lluvia, con una precipitación acumulada en esos 141 días de 243 mm, siendo la precipitación máxima diaria de 22,3 mm. En detalle, los 7 días antes de la visita se caracterizaron por ser lluviosos, con una precipitación de 28,8 mm. Predominaron los días secos dentro del periodo y la intensidad de la lluvia estuvo poco concentrada, se puede afirmar que el material particularizado se va depositando en los surcos en su gran mayoría por acción de la gravedad y en menor proporción por el transporte en el agua de escorrentía ya que no hay una huella marcada en la cara del talud.
- c) En el mes de agosto se llevó a cabo la tercera visita de campo, donde se evidencio que el surco continuaba cubierto por material acumulado, el cual ha venido bajando por el talud y se ha acumulado en la pata del talud. Entre el 17/06/2020 y el 13/08/2020 trascurrieron 57 días, donde se presentaron 32 días con lluvia y 25 secos, con una precipitación acumulada de 110,2 mm y una precipitación máxima diaria de 17,5 mm a inicios del ciclo. El periodo de análisis se caracterizó por la alternancia de días secos y lluviosos, siendo estos últimos los de mayor protagonismo, pero con cantidades pequeñas de precipitación que hace que se genere un flujo que transporta sedimentos, los cuales se van depositando a lo largo del talud en zonas de baja pendiente.
- d) En la visita del 10/09/2020 se apreció el aumento del material ubicado en la pata del talud, en la parte inferior del surco seleccionado, el cual continúa con material a nivel de la cara del talud. Durante el periodo entre mediciones se presentaron 12 días con lluvia y 16 secos, con una precipitación acumulada de 38,9 mm y una precipitación máxima diaria de 7,8 mm, siendo la depositación el proceso más evidente.

**Foto 8-3.** Detalle de la medición realizada entre el 28/01/2020 al 10/09/2020 del punto de control 2 del Talud 2.



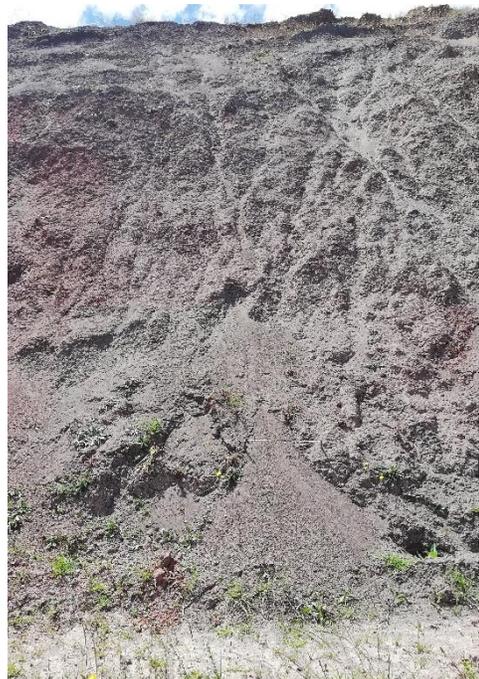
a) Medición de campo del 28/01/2020



b) Medición de campo del 17/06/2020



c) Medición de campo del 13/08/2020



d) Medición de campo del 10/09/2020

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

---

La Foto 8-4 presenta el registro fotográfico de campo entre el 18/09/2020 y el 06/01/2021 cuando se llevaron a cabo las mediciones del punto de control 2. En los numerales a, b, c y d se detalla cada una de las fotos.

- a) En la visita de campo del 18/09/2020, al igual que la visita anterior se evidencio que el proceso más dominante era el de depositación. Dentro de los 8 días entre las dos visitas se tuvieron 6 días secos y 2 días con lluvia, con una precipitación acumulada 2,7 mm la cual se presentó en su mayoría en un solo día.
- b) En el mes de octubre se observó que la red de surcos se veía más marcada en comparación con la del mes de septiembre y el surco monitoreado se destapo y en él se evidenció material depositado. Los sedimentos ubicados en la pata del talud fueron esparcidos por acción del agua que fluyo por el surco, movilizandoo material sobre la berma. Analizando el comportamiento del clima dentro de este periodo, se presentaron más días secos (13 días) en comparación a los días con lluvia (8 días). Adicionalmente, la precipitación acumulada en esos 21 días fue de 33,5 mm, siendo la precipitación máxima diaria de 8,7 mm.
- c) En la visita del 13/11/2020 el surco se había profundizado y ampliado más con respecto a la visita inicial. El paso del agua arrastro el material anteriormente depositado y fragmentos de roca, puesto que erosiono el fondo del surco, dejando expuesta, en algunos sectores, la roca que no había sido afectada fuertemente por el proceso de desleimiento. El material acumulado en la pata del talud se extendió más sobre la berma. Entre la medición de octubre y la de noviembre trascurrieron 35 días, donde se presentaron 18 días con lluvia y 17 secos, con una precipitación acumulada de 86,3 mm y una precipitación máxima diaria de 20,9 mm a finales del ciclo. Los 7 días previos a la visita fueron 2 días secos y 5 con lluvia, con una precipitación de 56,5 mm. Siendo estos días los que aportaron la mayor cantidad de precipitación dentro del periodo. Como consecuencia de lo anterior, el caudal de agua que bajo por la red de surcos genero la profundización ya que arrastró el material anteriormente depositado en los surcos y alimento el material de la pata del talud.
- d) En la última visita (06/01/2021) la red de surcos estaba más marcada sobre la cara del talud, pero no fue posible evidenciar el progreso del material acumulado e la pata del talud debido al paso de maquinaria en la zona, la cual limpio el material de

---

la berma. Se presentaron 25 días con lluvia y 29 secos, con una precipitación acumulada de 167,4 mm, los cuales en su mayoría se presentaron a inicio del ciclo y una precipitación máxima diaria de 31,3 mm. Los 7 días anteriores a la visita fueron 3 días secos y 4 con lluvia, con una precipitación de 13 mm. La intensidad de la lluvia al inicio del ciclo pudo generar la profundización de los surcos y la disminución de la precipitación al final produjo depositación en los surcos en su gran mayoría por acción de la gravedad y en menor proporción por el transporte en el agua de escorrentía siendo depositación el proceso que se va desarrollando.

**Foto 8-4.** Detalle de la medición realizada entre el 18/09/2020 al 06/01/2021 del punto de control 2 del Talud 2.



a) Medición de campo del 18/09/2020



b) Medición de campo del 09/10/2020



c) Medición de campo del 13/11/2020



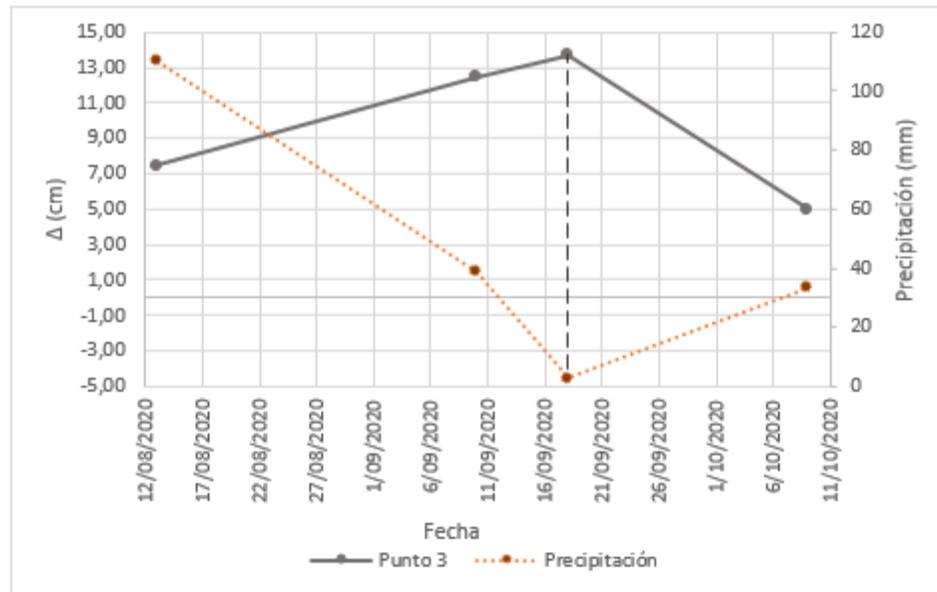
d) Medición de campo del 06/01/2021

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

### **Punto de control 3**

En la Figura 8-27 se presentan los deltas de profundidad calculados en el punto de control 3, en función del tiempo, los cuales permiten entender a detalle el comportamiento del surco izquierdo; la pendiente ascendente representa el proceso de depositación y la pendiente descendente el proceso de erosión. Adicionalmente, se añadió a la gráfica la precipitación acumulada en cada periodo con el objetivo de comparar el proceso de depositación y erosión con el comportamiento de la lluvia.

**Figura 8-27.** Punto 3, comparación del comportamiento de los deltas de profundidad con respecto a la precipitación acumulada en función del tiempo del punto 3.



Fuente: Elaboración propia

En la Foto 8-5 se presenta el registro fotográfico de campo entre el 17/08/2020 y el 09/10/2020 cuando se llevaron a cabo las mediciones del punto de control 3 y se detalla cada en cada una de las fotos identificadas con los numerales a, b, c y d.

- a) La instalación del punto de control 3 se realizó el 17/06/2020 y se tomó la primera medición. El surco seleccionado no tenía material depositado y en la pata del talud se encontraba mucho material acumulado debido a que en la parte superior del talud se estaba generando una cárcava que conducía grandes cantidades de agua

al sector del punto de control 3. Los 7 días antes de la visita se caracterizaron por ser lluviosos, con una precipitación de 28,8 mm.

- b) En la visita del 13/08/2020, la parte inferior del surco seleccionado estaba cubierto por material acumulado que bajo por arrastre del agua y/o por acción de la gravedad que hace que se desprenda el material particularizado. Adicionalmente, se evidencio el rastro de un pequeño flujo de lodo que bajo por el surco monitoreado. El cono de material ubicado en la pata del talud aumentó y los rastros del flujo de agua sobre este fueron parcialmente cubiertos. Dentro de la anterior y la presente medición, trascurrieron 57 días, donde se presentaron 32 días con lluvia y 25 secos, con una precipitación acumulada de 110,2 mm y una precipitación máxima diaria de 17,5 mm a inicios del ciclo. La posible causa del relleno del surco se debe a que el periodo de análisis se caracterizó por la alternancia de días secos y lluviosos, siendo estos últimos los de mayor protagonismo, pero con cantidades pequeñas de precipitación que hace que se genere un flujo que transporta sedimentos, los cuales se van depositando a lo largo de su trayectoria.
- c) En la visita del 10/09/2020 se evidenció que la acumulación del material continuo creciendo en la zona del surco, al igual que la altura del cono de depositación desarrollado en la pata del talud. Entre el 13/08/2020 y el 10/09/2020 se presentaron 12 días con lluvia y 16 secos, con una precipitación acumulada de 38,9 mm y una precipitación máxima diaria de 7,8 mm, siendo la depositación el proceso más evidente.
- d) En la visita de campo del 18/09/2020, al igual que la visita anterior se evidencio que el proceso dominante era el de depositación. Dentro de los 8 días entre las dos visitas se tuvieron 6 días secos y 2 días con lluvia, con una precipitación acumulada 2,7 mm la cual se presentó en su mayoría en un solo día.

**Foto 8-5.** Detalle de la medición realizada entre el 17/06/2020 al 18/09/2020 del punto de control 3 del Talud 2.



a) Medición de campo del 17/06/2020



b) Medición de campo del 13/08/2020



c) Medición de campo del 10/09/2020



d) Medición de campo del 18/09/2020

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

La Foto 8-6 presenta el registro fotográfico de campo entre el 09/10/2020 y el 13/11/2020 cuando se llevaron a cabo las mediciones del punto de control 3. En los numerales a y b se detalla cada una de las fotos.

- a) En el mes de octubre el flujo de agua que bajo por el surco movilizó parte del material depositado en este y en el cono de la pata del talud, dividiendo en dos el material acumulado en la berma inferior del talud. Analizando el comportamiento del clima dentro de este periodo, se presentaron más días secos (13 días) en comparación a los días con lluvia (8 días). Adicionalmente, la precipitación acumulada en esos 21 días fue de 33,5 mm, siendo la precipitación máxima diaria de 8,7 mm.
- b) En la visita del 13/11/2020 se encontró que el punto de control se perdió debido a que el material donde estaba instalada la varilla del lado izquierdo se desprendió del talud. Entre la medición de octubre y la de noviembre transcurrieron 35 días, donde se presentaron 18 días con lluvia y 17 secos, con una precipitación acumulada de 86,3 mm y una precipitación máxima diaria de 20,9 mm a finales del ciclo. Los 7 días previos a la visita fueron 2 días secos y 5 con lluvia, con una precipitación de 56,5 mm. Siendo estos días los que aportaron la mayor cantidad de precipitación dentro del periodo, una gran parte de la lluvia fue encauzada por la cárcava superior al sector del punto de control 3, haciendo que este flujo arrastrara el material anteriormente depositado y el que ya se había particularizado. El material acumulado en la pata del talud se extendió más sobre la berma y tapó el rastro que anteriormente había dejado el flujo de agua al arrastrar en pequeños pulsos el material. Durante esa visita se evidenció el empozamiento de agua en la berma inferior.

**Foto 8-6.** Detalle de la medición realizada entre el 09/10/2020 al 13/11/2020 del punto de control 3 del Talud 2.



a) Medición de campo del 09/10/2020

b) Medición de campo del 13/11/2020

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

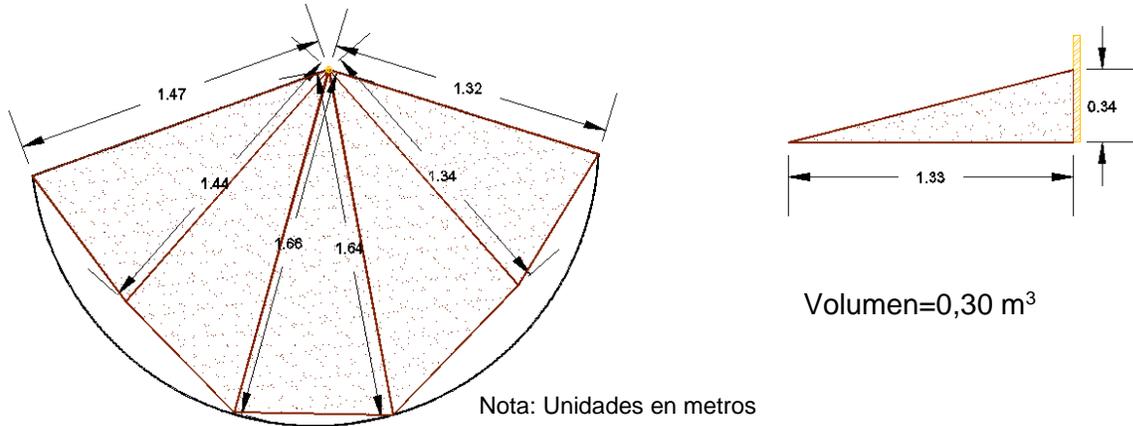
### 8.2.3 Cuantificación aproximada del material acumulado en los conos de depositación

#### **Punto de control 1**

Con base en la radiación realizada en las visitas de campo del 09/10/2020 y del 13/11/2020 se procedió a calcular el volumen depositado en la pata del talud en el sector del punto de control 1, para lo cual se asumió que la forma geométrica que se creaba era la de un cono y se calculó el volumen proporcional al área ocupada por el material como se muestra en la Figura 8-28 y Figura 8-29.

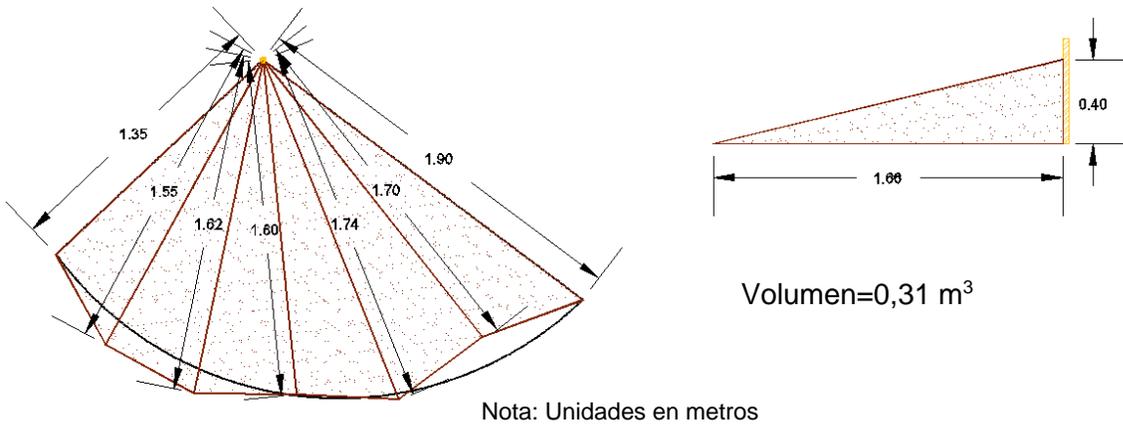
Se puede evidenciar que la forma del cono cambio, principalmente en su extensión lateral y que el volumen no cambio mucho en aproximadamente 1 mes, lo anterior se le atribuye a que parte del material del cono de la parte derecha fue lavado por el flujo de agua que bajo por la microred de surcos.

**Figura 8-28.** Cálculo del volumen del cono de depositación para el 09/10/2020 en el punto de control 1.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-29.** Cálculo del volumen del cono de depositación para el 13/11/2020 en el punto de control 1.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8-8 se resumen los volúmenes obtenidos para cada cono medido en las dos visitas de campo, la diferencia entre volúmenes y una aproximación del caudal, el cual representa. Si se asume que el proceso de depositación es constante, entre el 09/10/2020 y el 13/11/2020 se depositó un volumen de  $8,33 \text{ cm}^3$  cada hora. Haciendo una analogía es como si cada hora se depositara un cubo de 2 cm de lado.

**Tabla 8-8.** Volúmenes y el caudal calculados del cono de depositación en el punto de control 1 entre el 09/10/2020 y el 13/11/2020.

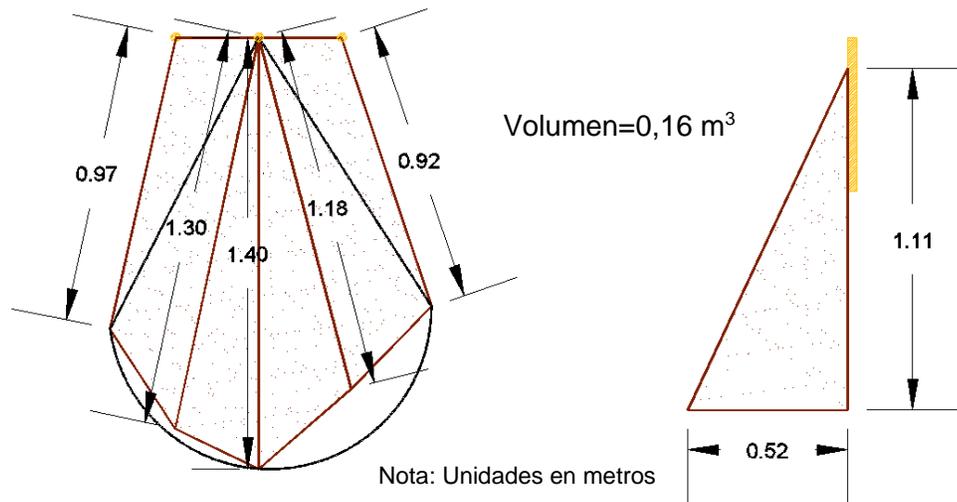
Fecha	Punto de control 1		
	Volumen (m <sup>3</sup> )	$\Delta$ (m <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /h)
09/10/2020	0,30	-	
13/11/2020	0,31	0,007	8,33

Fuente: Elaboración propia.

### Punto de control 2

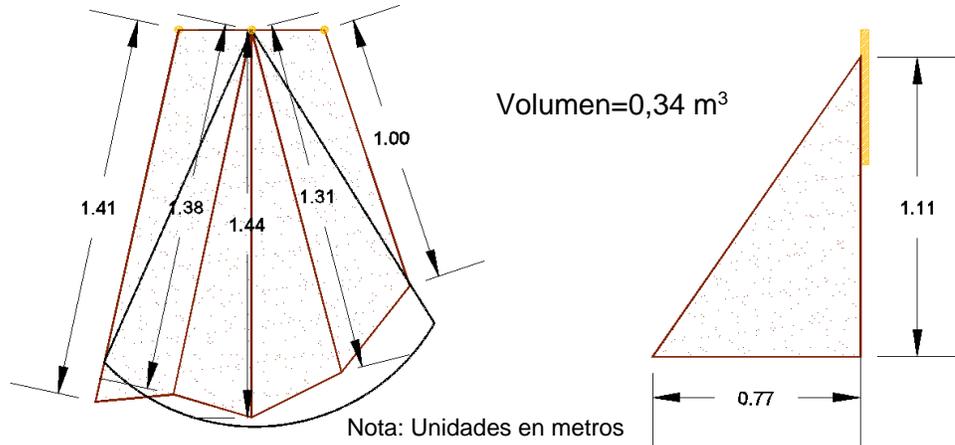
El cono de depositación desarrollado en el punto de control presento una extensión hacia los lados en el lapso entre las visitas del 13/08/2020 y el 10/09/2020, como se puede evidenciar en la Figura 8-30 y Figura 8-31. De igual manera se asumió que la forma geométrica que se creaba era la de un cono y se calculó el volumen proporcional al área ocupada por el material.

**Figura 8-30.** Cálculo del volumen del cono de depositación para el 13/08/2020 en el punto de control 2.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-31.** Cálculo del volumen del cono de deposición para el 10/09/2020 en el punto de control 2.



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 8-9 resumen los volúmenes obtenidos para cada cono medido en las dos visitas de campo, la diferencia entre volúmenes y una aproximación del caudal, el cual representa si se asume que el proceso de deposición es constante, que entre el 13/08/2020 y el 10/09/2020 se depositó un volumen de 267,86 cm<sup>3</sup> cada hora. Haciendo una analogía es como si cada hora se depositara un cubo de 6,5 cm de lado.

**Tabla 8-9.** Volúmenes y el caudal calculados del cono de deposición en el punto de control 2 entre el 13/08/2020 y el 10/09/2020.

Fecha	Punto de control 2		
	Volumen (m <sup>3</sup> )	$\Delta$ (m <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /h)
13/08/2020	0,16	-	
10/09/2020	0,34	0,180	267,86

Fuente: Elaboración propia.

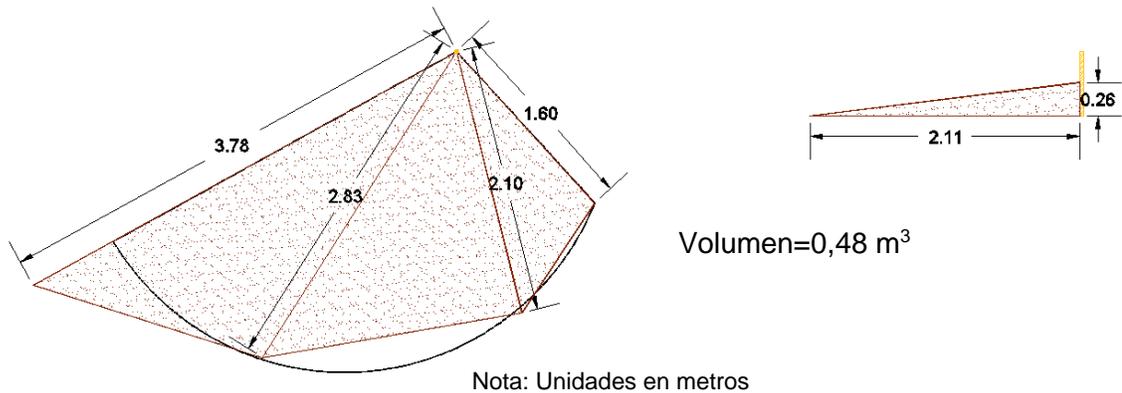
### **Punto de control 3**

El cono de deposición del punto de control 3 fue el que mantuvo una actividad constante de acumulación de material debido a su ubicación, donde la microrred de surcos era alimentada por el agua de escorrentía encauzada por la cárcava ubicada en la berna

superior del talud. En cuatro ocasiones se realizó la radiación del cono de depositación y se asumió que la forma geométrica que se creaba era la de un cono y se calculó el volumen proporcional al área ocupada por el material como se muestra en la Figura 8-32, Figura 8-33, Figura 8-34 y Figura 8-35.

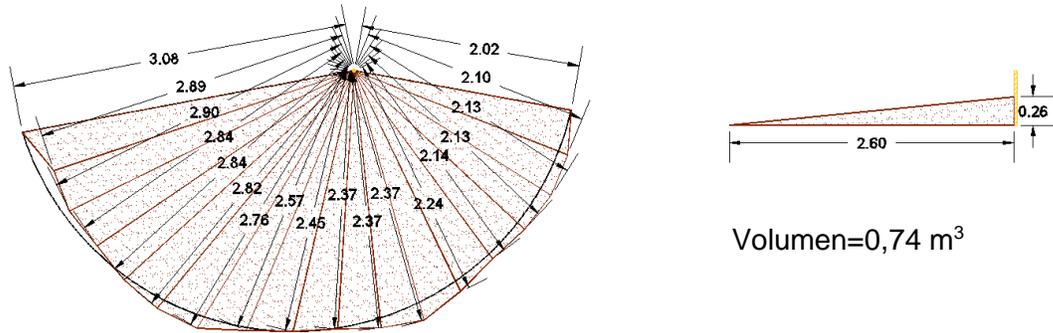
Se puede evidenciar que la forma del cono cambio con el transcurso de tiempo principalmente por la cantidad de agua transportada en la micro red de surcos la cual moviliza sedimentos y al llegar al cono de depositación en la berma extiende el material acumulado.

**Figura 8-32.** Cálculo del volumen del cono de depositación para el 13/08/2020 en el punto de control 3.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-33.** Cálculo del volumen del cono de deposición para el 10/09/2020 en el punto de control 3.

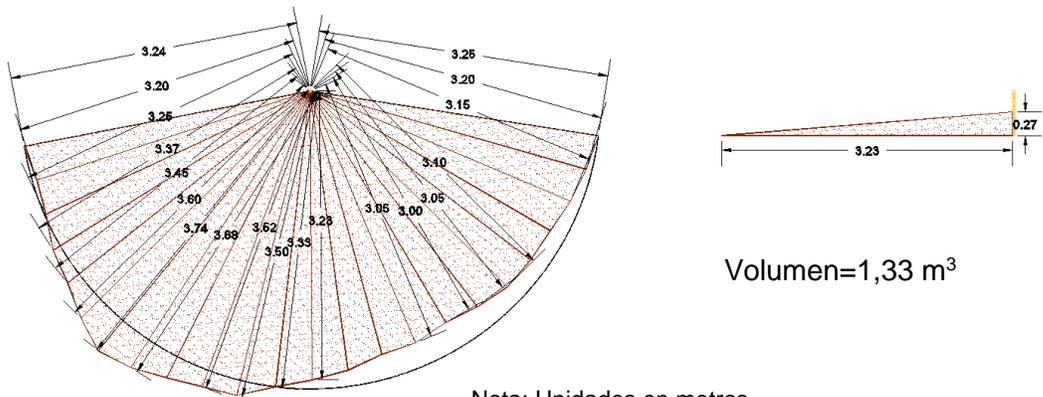


Volumen=0,74 m<sup>3</sup>

Nota: Unidades en metros

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-34.** Cálculo del volumen del cono de deposición para el 09/10/2020 en el punto de control 3.

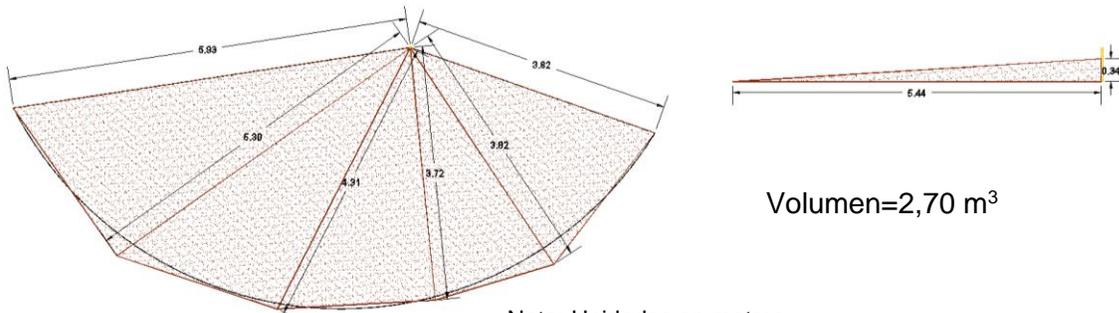


Volumen=1,33 m<sup>3</sup>

Nota: Unidades en metros

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-35.** Cálculo del volumen del cono de deposición para el 13/11/2020 en el punto de control 3.



Volumen=2,70 m<sup>3</sup>

Nota: Unidades en metros

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8-10 se resumen los volúmenes obtenidos para cada cono medido en las cuatro visitas de campo; la diferencia entre volúmenes y una aproximación del caudal, el cual representa si se asume que el proceso de depositación es constante.

Entre el 13/08/2020 y el 10/09/2020 se depositó un volumen de 386,90 cm<sup>3</sup> cada hora, lo cual es parecido a que cada hora se depositara un cubo de 7 cm de lado.

Para el periodo del 10/09/2020 y el 09/10/2020 se depositó un volumen de 847,70 cm<sup>3</sup> cada hora, lo cual es parecido a que cada hora se depositara un cubo de 9,5 cm de lado. Entre el 09/10/2020 y el 13/11/2020 se depositó un volumen de 1630,95 cm<sup>3</sup> cada hora, lo cual es parecido a que cada hora se depositara un cubo de 12 cm de lado.

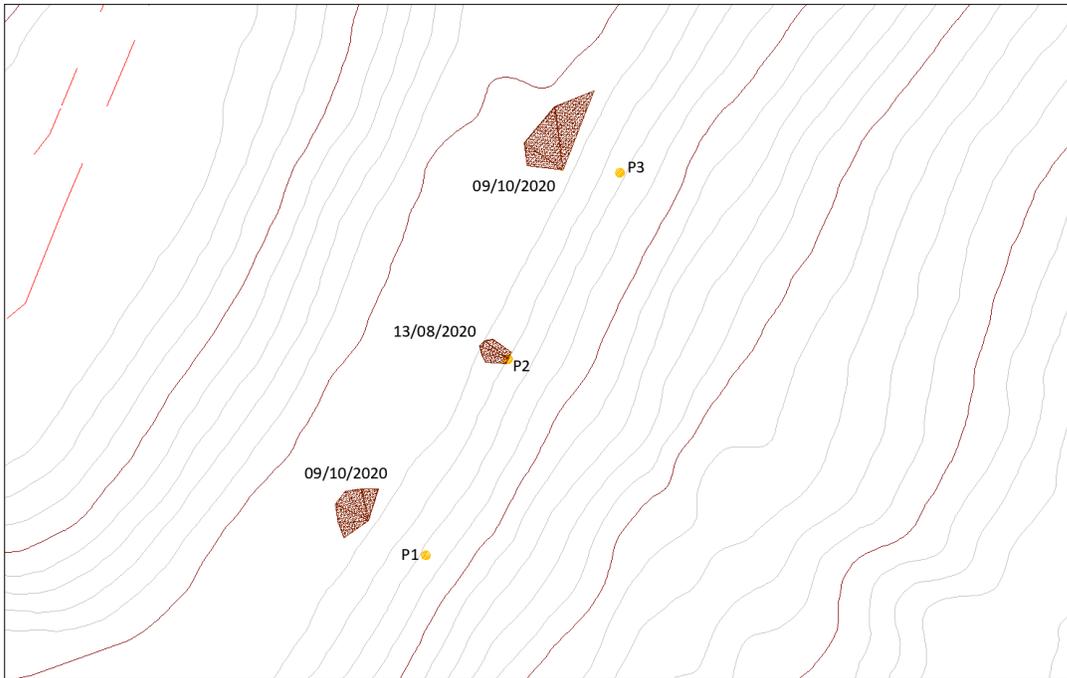
**Tabla 8-10.** Volúmenes depositados y el caudal calculados del cono en el punto de control 3 entre el 13/08/2020 y el 13/11/2020.

Fecha	Punto de control 3		
	Volumen (m <sup>3</sup> )	$\Delta$ (m <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /h)
13/08/2020	0,48	-	
10/09/2020	0,74	0,260	386,90
09/10/2020	1,33	0,590	847,70
13/11/2020	2,70	1,370	1630,95

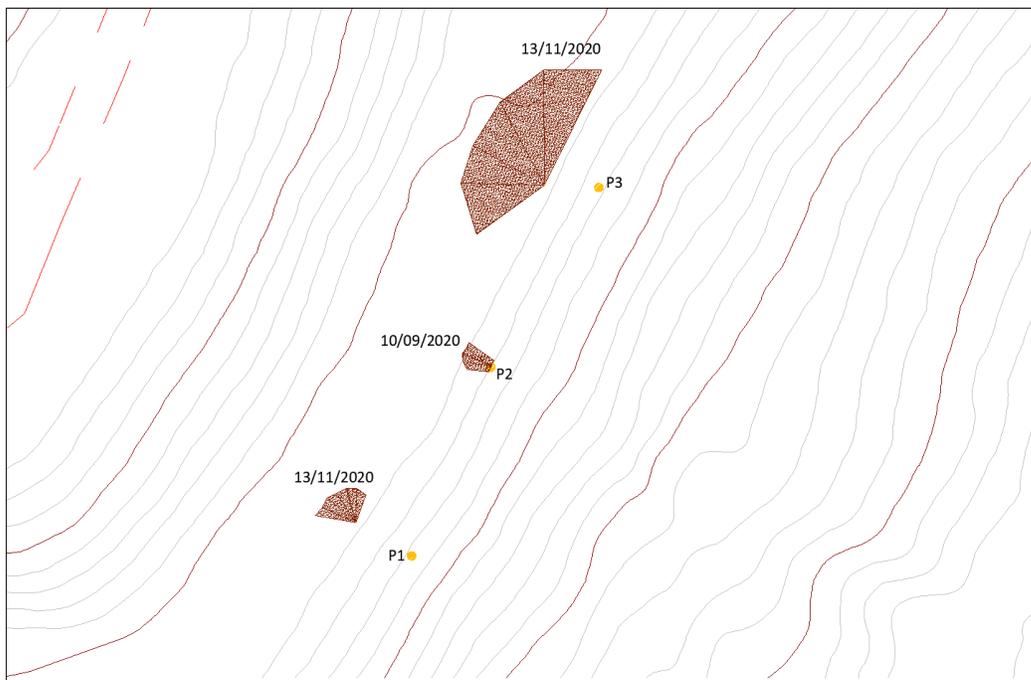
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8-35 se presenta una comparación entre la extensión inicial, en planta, de cada cono de depositación en los diferentes puntos de control y la extensión final que se midió al terminar el monitoreo, siendo evidente el desarrollo de depositación en el cono del punto de control 3.

**Figura 8-36.** Comparación del proceso de monitoreo de los conos de meteorización en los tres puntos de control.



a) Inicio del monitoreo de los conos de depositación



b) Fin del monitoreo de los conos de depositación

Fuente: Elaboración propia.

### 8.2.4. Estimación de los espesores de material meteorizado por desleimiento en el Talud 2

A continuación, en la Tabla 8-11 se resumen las mediciones realizadas en la cara del Talud 2 para los espesores del material particularizado y de la roca afectada por el desleimiento que, en promedio, se encuentra en 10 cm y 15 cm, respectivamente.

**Tabla 8-11.** Espesores reportados de las capas de material particularizado y roca afectada por desleimiento entre el 28/01/2020 el 06/01/2021.

Fecha	Capa de material	
	Particularizado (cm)	Afectada por desleimiento (cm)
28/01/2020	10	13
13/11/2020	10-12	25
16/12/2020	11	16
06/01/2021	7,5	5
Promedio (cm)	10,1	14,75

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8-12 se presentan las diferentes profundidades obtenidas a través del hincado de la varilla de acero en diferentes sitios de la cara del talud; obteniéndose espesores entre 20 cm y 26 cm.

**Tabla 8-12.** Espesores reportados en el hincado de la varilla el 06/01/2021.

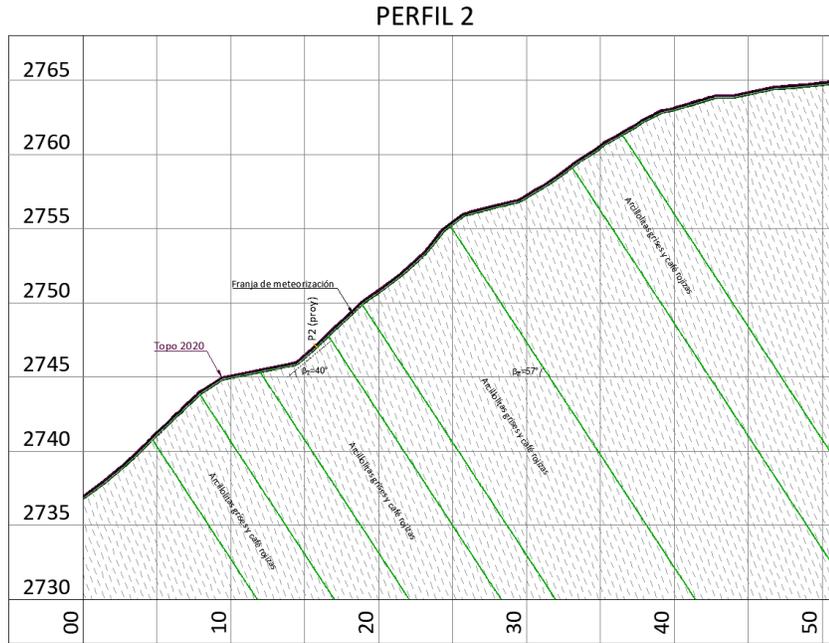
Fecha	Longitud de varilla hincada			
	Profundidad 1 (cm)	Profundidad 2 (cm)	Profundidad 3 (cm)	Profundidad promedio (cm)
06/01/2021	26	20	23	23

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión se tiene que: el espesor de la capa de material particularizado (tipo suelo), la cual hace parte del perfil desarrollado por el desleimiento, es de 10 cm, que el espesor de la capa de la roca afectada por el desleimiento menos severo es aproximadamente de 15 cm y que después de una profundidad de 23 cm se puede encontrar material tipo roca

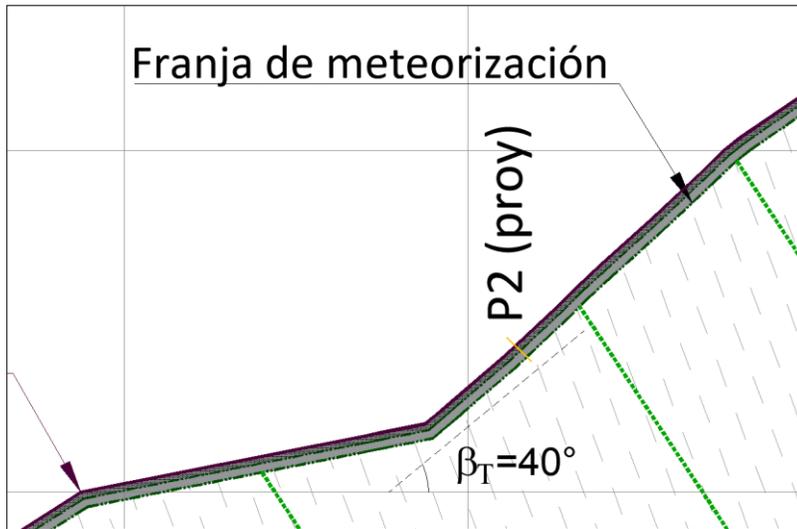
que esta levemente afectado por la meteorización; por tanto, posee una buena resistencia, como se presenta en la Figura 8-37 y Figura 8-38.

**Figura 8-37.** Perfil 2 con la ubicación del punto de control 2 y la franja de meteorización.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8-38.** Detalle del perfil 2 con los espesores de la franja de meteorización.



Fuente: Elaboración propia.

## **9. Caracterización geotécnica de las arcillolitas**

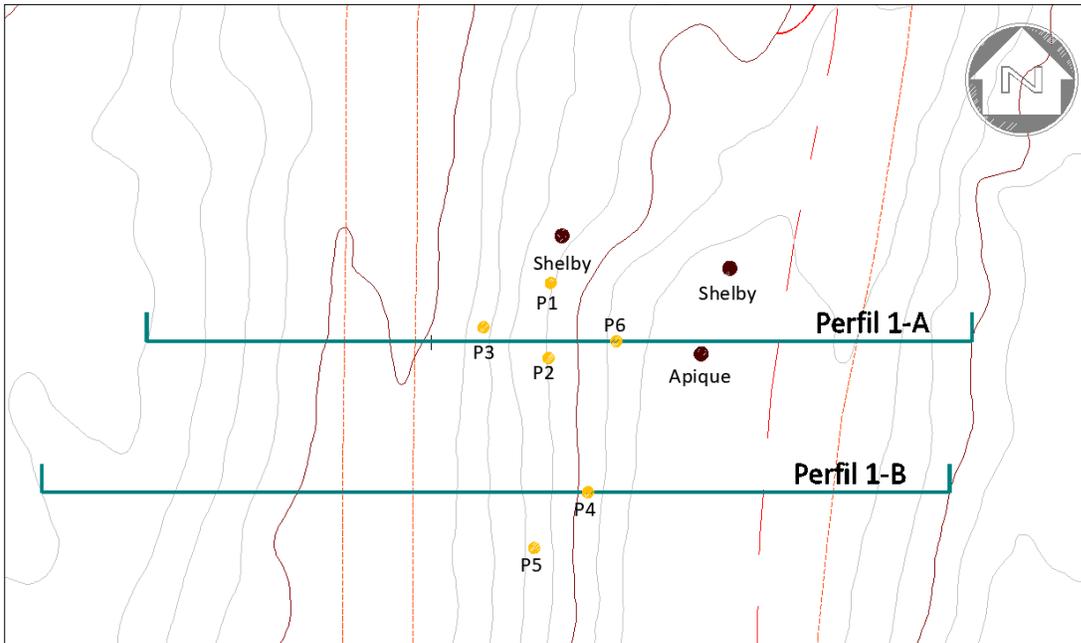
### **9.1 Exploración del subsuelo**

Con el fin de determinar de manera aproximada los parámetros físicos y mecánicos de los materiales presentes en la zona de estudio, específicamente en los dos taludes seleccionados, los cuales fueron excavados en materiales in situ, a saber: Arcillolitas rojizas y limolitas, se construyó el modelo geológico-geotécnico para la ejecución de los análisis.

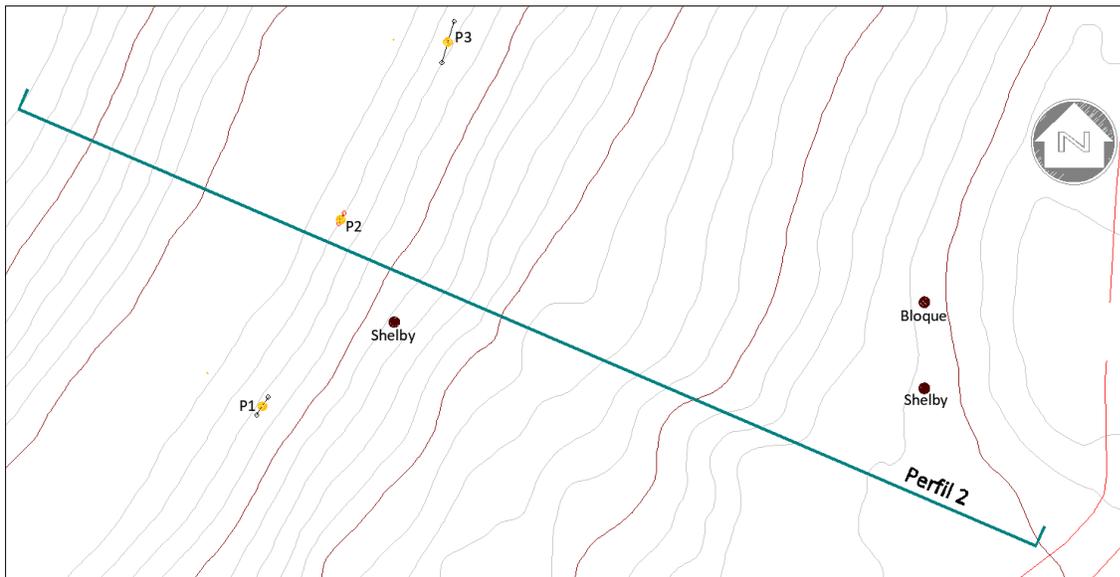
Ante la necesidad de obtener muestras para determinar de manera aproximada los parámetros físicos y mecánicos de los materiales presentes en la zona de estudio, específicamente en los dos taludes seleccionados, los cuales fueron excavados en materiales in situ, a saber: Arcillolitas rojizas y limolitas, se planeó una campaña de exploración con apiques e hincado de tubos Shelby.

Teniendo en cuenta lo anterior, se localizaron seis sitios con profundidades variables entre 5 cm a 90 cm, en los cuales se ejecutaron 2 apiques para extracción de bloques y 4 hincados de tubos Shelby. La localización de los sitios de la exploración se presenta en la Figura 9-1 y Figura 9-2.

En la Tabla 9-1 y la Tabla 9-2. Se detalla la ubicación y longitud de cada uno de los apiques como también el tipo de muestra obtenida.

**Figura 9-1.** Localización de los sitios de muestreo en el sector del Talud 1.

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 9-2.** Localización de los sitios de muestreo en el sector del Talud 2.

Fuente: Elaboración propia.

La localización de los sitios de los muestreos se definió luego de efectuar las visitas iniciales de reconocimiento

Se realizó la caracterización geomecánica de las arcillolitas afectadas por desleimiento y poco afectadas a través de la interpretación de los ensayos realizados en las muestras provenientes de tubos Shelby y bloques recuperados de material meteorizado (suelo) y roca (levemente meteorizada e intacta).

Durante las labores de campo realizadas en la mina Los Ajos de Ladrillera Santafé S.A.S, se seleccionaron 20 muestras (ver Tabla 9-1 y Tabla 9-2) y se definieron los ensayos de laboratorio a ejecutar, ver Tabla 9-4 y Tabla 9-17.

### 9.1.1 Talud 1

En el Talud 1 se establecieron tres sitios de muestreo, como se señalan en la Foto 9-1; el muestreo 1 se realizó en la cara del talud y los muestreos 2 y 3 en la berma superior del talud.

**Foto 9-1.** Talud 1 con la ubicación de los tres sitios de muestreo realizados.

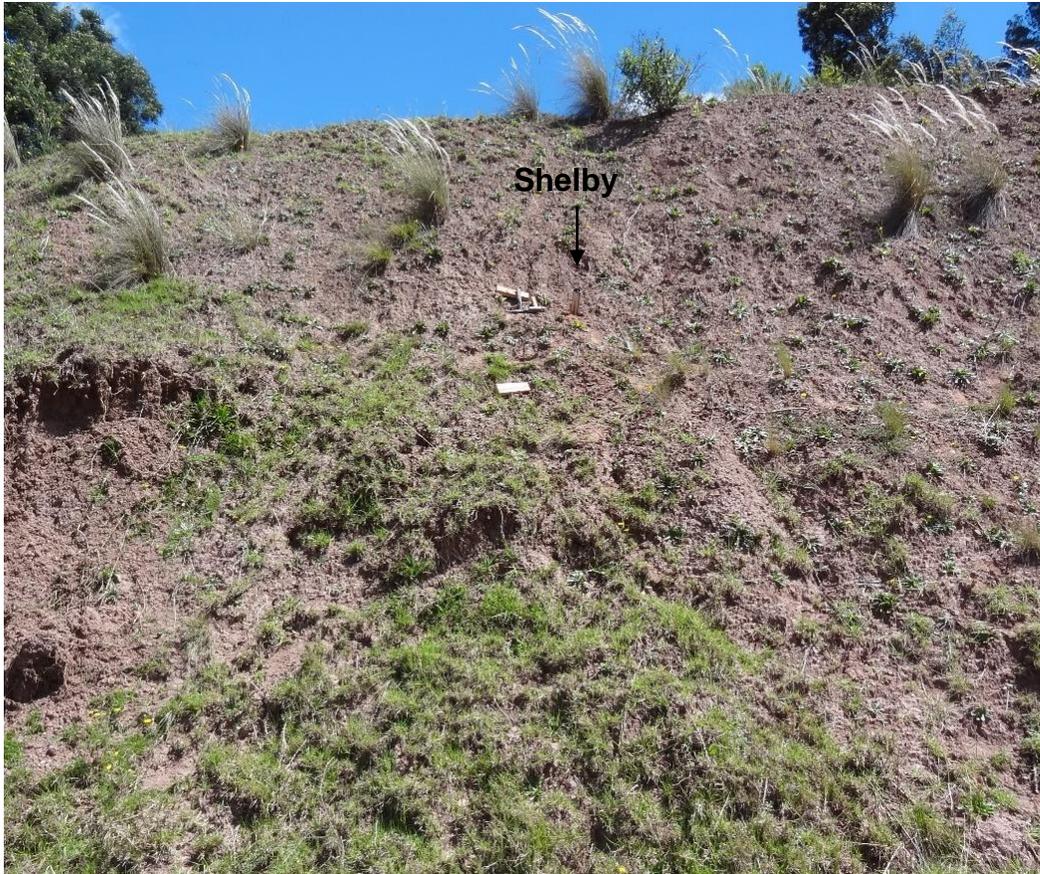


Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

El muestreo 1 consistió en el hincado de un tubo Shelby a una profundidad de 40 cm y la recolección de material suelto en bolsa, ver Foto 9-2 y Foto 9-3. Como se ilustra en la Foto 9-4 y la Foto 9-5, para el muestreo 2 se realizó el hincado de dos tubos Shelby y se tomó una muestra en bolsa para el material suelto.

Finalmente, en el muestreo 3 se realizó un pequeño apique con el objetivo de recolectar una muestra que estuviera levemente meteorizada y que no se desintegrara con facilidad (Foto 9-6).

**Foto 9-2.** Ubicación del muestreo 1 en la cara del Talud 1 (Shelby).



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 9-3.** Detalles de las muestras seleccionadas sobre la cara del talud 1.



a) Tubo Shelby hincado



b) Terreno sin el tubo Shelby hincado



c) Punta del tubo Shelby con el material



d) Muestras obtenidas en tubo Shelby y bolsa.

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 9-4.** Ubicación del muestreo 2 en la berma del Talud 1 (Shelby).



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 9-5.** Detalles de las muestras extraídas de la berma del Talud 1.



a) Primer tubo Shelby hincado



b) Terreno sin el tubo Shelby hincado



c) Segundo tubo Shelby hincado



d) Extracción y medición del segundo tubo Shelby hincado

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 9-6.** Ubicación del apique del muestreo 3 en la berma del Talud 1 (Bloque).



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

En la Tabla 9-1 se presenta un resumen de los detalles de cada muestra recolectada en el área del talud 1.

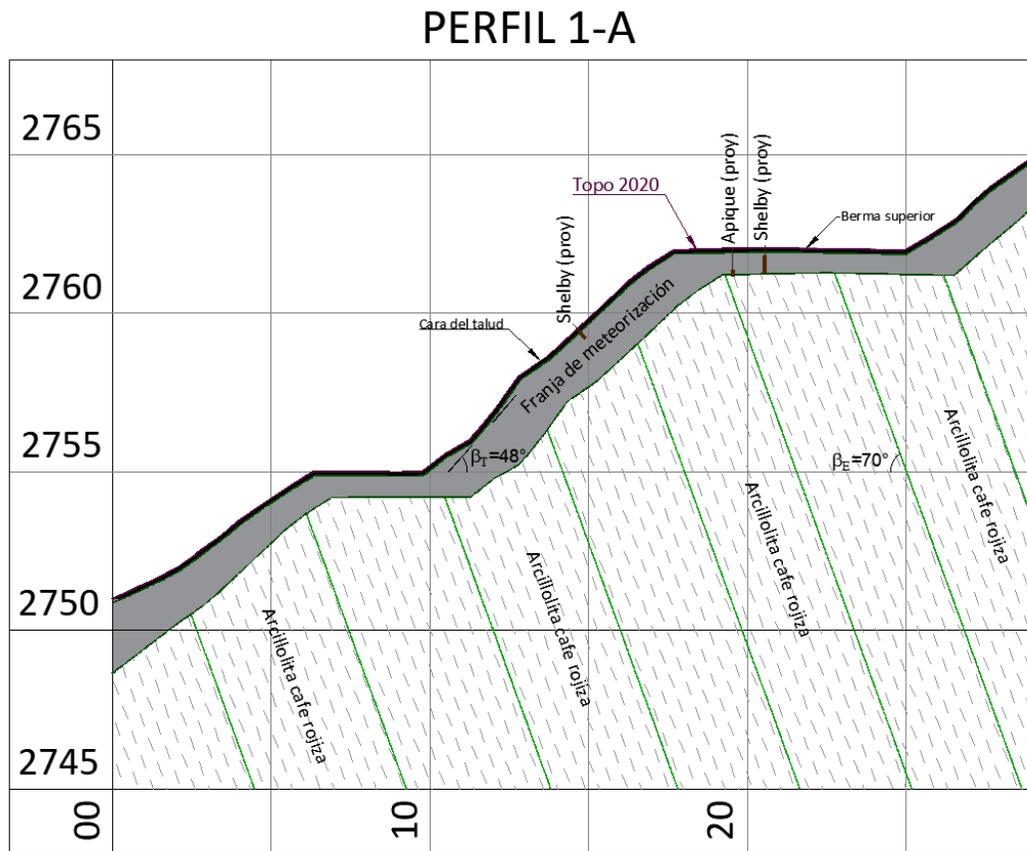
**Tabla 9-1.** Detalles de las muestras seleccionadas para el Talud 1.

	Apique	Muestra	Tipo	Descripción	Prof. (m)	Ubicación-GPS	Coordenadas	
							E	N
Muestreo 1	T1	M1	Shelby	Roca meteorizada (suelo)	0,40	Cara Talud-761	993189	991867
		M2	Bolsa		0-0,40			
Muestreo 2	T1*	M2	Shelby	Roca con meteorización leve	0,475-0,68	Berma superior-2366	993195	991866
	T6	M1	Shelby	Roca con meteorización leve	0,48-0,83	Berma superior-2366	993195	991866
	T1*	M3	Bolsa	Roca meteorizada (suelo)	0,05	Berma superior-2578	993198	991861
Muestreo 3	T4	M1	Bolsa	Roca con meteorización leve	0,76	Berma superior-2393	993194	991863
	T5	M1	Bolsa		0,76			
	T5	M2A	Bloque		0,76-0,90			
	T5	M2B	Bloque		0,76-0,90			
	T5	M2C	Bloque		0,76-0,90			

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9-3 se presenta en el Perfil 1-A la ubicación de los tres muestreo realizados en el talud 1, en la cara del talud y en la berma superior.

Figura 9-3. Perfil 1-A con la ubicación de los sitios de muestreos en el Talud 1



Fuente: Elaboración propia.

### 9.1.2 Talud 2

En el Talud 2 se establecieron tres sitios de muestreo, como se señalan en la Foto 9-7; el muestreo 1 se realizó en la cara del talud y los muestreos 2 y 3 en la parte superior del talud.

**Foto 9-7.** Talud 2 con la ubicación de los tres sitios de muestreo realizados.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

El muestreo 1 consistió en el hincado de un tubo Shelby a una profundidad de 20 cm y la recolección de material suelto en bolsa, ver Foto 9-8 y Foto 9-9. Como se ilustra en la Foto 9-10 y Foto 9-11, para el muestreo 2 se realizó el hincado de tres tubos Shelby y se tomaron muestras en bolsa del material suelto. Finalmente, en el muestreo 3 se recolectó una muestra de bloque de un corte reciente de la parte superior del talud, ver Foto 9-12 y Foto 9-13.

**Foto 9-8.** Ubicación del muestreo 1 en la cara del Talud 2 (Shelby).

Fuente: Registro fotográfico visita de campo

**Foto 9-9.** Detalles de las muestras seleccionadas sobre la cara del Talud 2.

a) Tubo Shelby hincado

b) Terreno sin el tubo Shelby hincado

Fuente: Registro fotográfico visita de campo

**Foto 9-10.** Ubicación del muestreo 2 en la parte superior del Talud 2 (Shelby).



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 9-11.** Detalles de las muestras seleccionadas en la parte superior del talud 2 (Shelby).



a) Tubo Shelby hincado

b) Terreno sin el tubo Shelby hincado

Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 9-12.** Ubicación del muestreo 3 en la parte superior del Talud 2 (Bloque).



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

**Foto 9-13.** Bloque extraído del muestreo 3 en la parte superior del Talud 2.



Fuente: Registro fotográfico visita de campo.

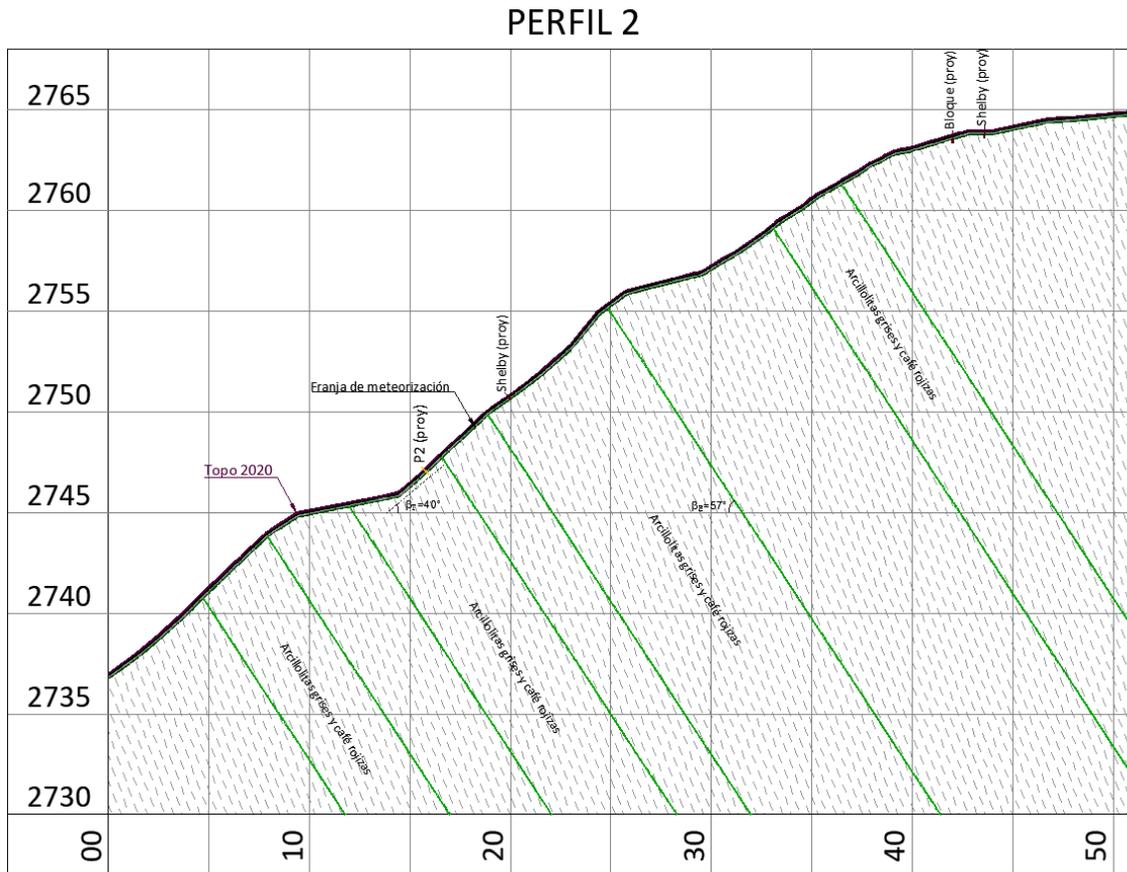
En la Tabla 9-2 se presenta un resumen de los detalles de cada muestra recolectada en el área del Talud 2.

**Tabla 9-2.** Detalles de las muestras seleccionadas para el Talud 2

	Apique	Muestra	Tipo	Descripción	Prof. (m)	Ubicación-GPS	Coordenadas	
							E	N
Muestreo 1	T2	M1	Bolsa	Meteorizado (suelo)	0-0,20	Cara Talud-762	993196	991968
		M2	Shelby		0-0,20			
Muestreo 2	T2*	M1	Shelby	Roca con meteorización leve	0-0,16	Parte superior talud-2382	993220	991964
	T2*	M2	Bolsa		0,16			
	T2*	M3	Bolsa	Meteorizado (suelo)	0,09	Parte superior talud-2577	993215	991963
	T3	M1	Shelby	Roca con meteorización leve	0-0,19	Parte superior talud -2380	993219	991962
	T3	M2	Bolsa		0,19			
	T4*	M1	Shelby	Roca con meteorización leve	0-0,21	Parte superior talud -2381	993219	991961
	T4*	M2	Bolsa		0,21			
Muestreo 3	T7	M1	Bloque	Roca con meteorización leve	0-0,20	Parte superior talud -2394	993222	991968

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9-2 se presenta en planta la ubicación de los tres muestreos y en la Figura 9-4 se presenta el Perfil 2 la ubicación en la cara del talud y en la parte superior del talud.

**Figura 9-4.** Perfil 2 con la ubicación de los sitios de muestreo en el Talud 2.

Fuente: Elaboración propia.

## 9.2 Caracterización física y mecánica de las arcillolitas que conforman los taludes de este estudio

Para la obtención de valores representativos de las propiedades físicas y mecánicas de las arcillolitas analizadas, se llevó a cabo un programa de ensayos, en especímenes muestreados en tubos Shelby, bloque y material suelto en bolsa.

Durante las labores de campo realizadas, se tomaron 20 muestras de las cuales se ensayaron 16, dado que algunas muestras al momento de realizar los ensayos se encontraban desintegradas debido a la particularidad (desleimiento) de este tipo de rocas blandas.

El análisis de las arcillolitas se desarrolló bajo dos enfoques, el primero de ellos relacionado con la caracterización física-mecánica, por tanto, ensayos como peso unitario, humedad natural, límites de Atterberg, granulometría, índice de desleimiento, compresión inconfiada, potencial de expansividad y corte directo. El segundo enfoque está relacionado con la caracterización de la composición mineralógica a través del ensayo de difracción de rayos X.

A continuación, en la Tabla 9-3 se relaciona la cantidad de ensayos, el tipo y la norma que se utilizó para cada uno de los ensayos realizados.

**Tabla 9-3.** Relación de ensayos de laboratorio ejecutados

Ensayo		Norma	Cantidad
$\gamma$	Peso unitario	ISRM-2007	6
$\omega$	Contenido de humedad natural	NTC 1495: 2013	2
Lim	Límites de consistencia	NTC 4630:1999	4
PT. N° 200	Pasa tamiz N° 200	NTC 78: 2019	2
SDI	Índice de desleimiento	INV E 236: 2013	2
Exp	Expansividad	INV E 132: 2013	6
CS	Compresión simple	ASTM D 7012: 2014	3
CD	Corte directo	ASTM D 5607: 2008	5
XRD	Difracción de rayos X	Zhang et al. (2003)	6

Fuente: Elaboración propia.

### 9.2.1 Talud 1

Para el Talud 1 se seleccionaron 9 muestras y se definieron 17 ensayos de laboratorio a ejecutar resumidos en la Tabla 9-4.

**Tabla 9-4.** Programa de ensayos de laboratorio para el talud 1.

Muestra	Prof. (m)	$\gamma$	$\omega$	Lím. Atterberg	PT N°200	SDI	Exp.	CS	CD Suelo	CD Roca	XRD
T1-M1	0,40		X	X	X		X				X
T1-M2	0,40	X							X		
T1*-M2	0,48-0,68	X									
T1*-M3	0-0,05			X			X				X
T4-M1	0,76						X				X
T5-M1	0,76					X					
T5-M2A	0,90									X	
T5-M2B	0,90							X			
T6-M1	0,48-0,83									X	
<b>Cantidad</b>		2	1	2	1	1	3	1	1	2	3

Fuente: Elaboración propia.

#### Peso unitario

Se realizaron 2 ensayos en las muestras recolectadas para determinar el peso unitario. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 9-5.

**Tabla 9-5.** Peso unitario para el talud 1.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	$\gamma_{total}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{seco}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Roca particularizada (suelo)	2758,6	0,40	21,46	19,06
Roca con meteorización leve	2761,5-2761,3	0,475-0,68	22,17	20,29

Fuente: Elaboración propia.

### **Humedad natural**

Se ejecutó un ensayo para determinar la humedad natural de la roca meteorizada (suelo). Adicionalmente, se implementó el valor reportado de humedad natural en el ensayo de peso unitario para la roca con meteorización leve para complementar la información de este parámetro, como se puede evidenciar en la Tabla 9-6.

**Tabla 9-6.** Humedad natural para el talud 1.

<b>Descripción</b>	<b>Cota (msnm)</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b><math>\omega</math> (%)</b>
Roca particularizada (suelo)	2758,6	0,40	12,5
Roca con meteorización leve	2761,5- 2761,3	0,475-0,68	9,3

Fuente: Elaboración propia.

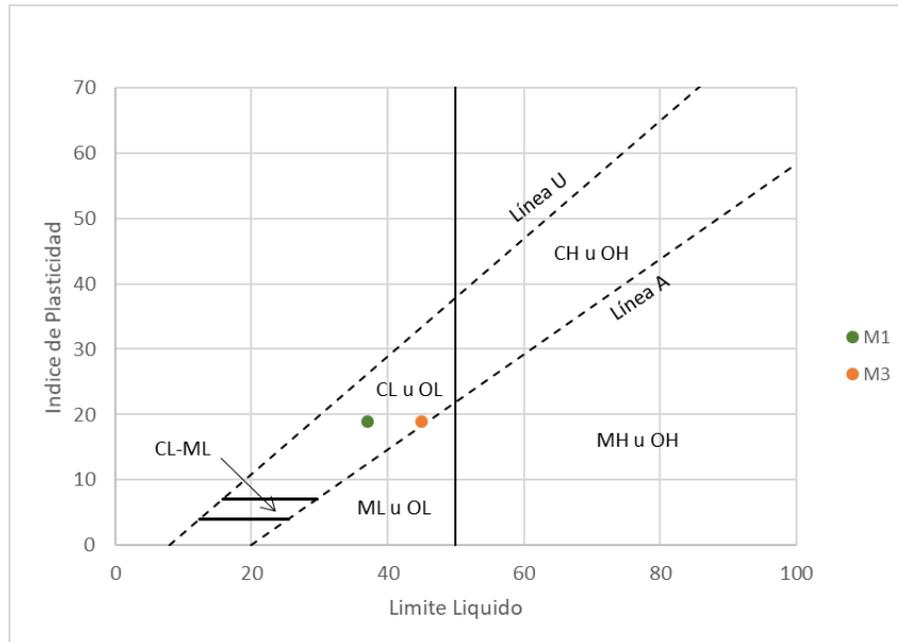
### **Límites de Atterberg**

Se realizaron dos ensayos de límites de consistencia para caracterizar la fracción fina de los materiales encontrados. A continuación, en la Tabla 9-7 se resumen los resultados obtenidos y en la Figura 9-5 se presenta la carta de plasticidad donde se puede evidenciar que la clasificación del material es una arcilla de baja plasticidad.

**Tabla 9-7.** Límites de Atterberg para el talud 1.

<b>Descripción</b>	<b>Cota (msnm)</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>	<b>Clasificación</b>
Roca particularizada (suelo)	2758,6	0,4	37	18	19	CL
Roca particularizada (suelo)	2761,95	0,05	45	26	19	CL

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 9-5.** Carta de plasticidad para la roca meteorizada (suelo) para el talud 1.

Fuente: Elaboración propia.

**Lavado sobre pasa tamiz N°200**

Para la caracterización de la fracción fina a través del lavado sobre tamiz N° 200, se ejecutó un solo ensayo, el cual clasifica al material como una arcilla de baja plasticidad, ver Tabla 9-8.

**Tabla 9-8.** Lavado sobre pasa tamiz N°200 para el talud 1.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Clasificación
Roca particularizada (suelo)	2758,6	0,40	0	7,3	92,7	CL

Fuente: Elaboración propia.

**Índice de desleimiento**

El objetivo de este ensayo es determinar el índice de desleimiento-durabilidad (SDI) de la roca blanda, cuando se somete a dos ciclos de humedecimiento y secado con abrasión.

Se examina cualitativamente la durabilidad de las rocas bajo el ambiente normal de servicio y de esta manera se le asignan valores cuantitativos de durabilidad. Este ensayo se ejecutó sobre la roca con meteorización leve y se obtuvo un SDI de 6, el cual clasifica como una roca de durabilidad muy baja, donde el material después del ensayo presenta una gran reducción en el tamaño de los fragmentos y una alta desintegración, ver Tabla 9-9.

**Tabla 9-9.** Índice de desleimiento para el Talud 1.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Índice de desleimiento-durabilidad (SDI)		Índice	Termino Descriptivo	Clasificación según numeral 6.6
			1er. ciclo (%)	2do. ciclo (%)			
Roca con meteorización leve	2761,2	0,76	4,1	0,0	6	Durabilidad muy baja	Tipo III: El material retenido contiene exclusivamente fragmentos pequeños

Fuente: Elaboración propia.

### **Potencial de expansión**

Los suelos finos, principalmente los de carácter cohesivo, se expanden o se contraen a medida que transitan del estado seco al húmedo o inversamente. La alteración de la humedad puede causar cambios volumétricos que producen movimientos diferenciales de importancia en estructuras, lo cual puede ocasionar importantes agrietamientos. El índice de expansión libre es el aumento de volumen que sufre un suelo sin restricciones externas, cuando se sumerge en agua.

Se efectuaron tres ensayos de expansión libre en la arcillolita meteorizada (suelo) y la arcillolita con meteorización leve en el Talud 1.

En la Tabla 9-10 se presentan los resultados definidos como índice de expansión libre. Adicionalmente, utilizando la Tabla 9-11, Tabla 9-12 y Tabla 9-13 se realiza la predicción de expansividad en la roca meteorizada (suelo) con base en el límite líquido, índice de plasticidad e índice de expansión libre y en la roca con meteorización leve con base en el

índice de expansión libre. Para la roca meteorizada (suelo) el carácter expansivo de acuerdo al límite líquido y el índice de plasticidad es de nivel medio y para el índice de expansión libre el nivel es bajo; en la roca con meteorización leve el carácter expansivo es bajo teniendo en cuenta el índice de expansión libre.

**Tabla 9-10.** Potencial de expansión para el Talud 1.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Índice Exp. Libre (%)	Predicción de expansividad a partir de:					
				Lim. líquido (Tabla 9-11)		Índice de plasticidad (Tabla 9-12)			Otras medidas (Tabla 9-13)
				CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	Índice Exp. libre (%)
Roca particularizada (suelo)	2758,6	0,40	10	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Roca particularizada (suelo)	2761,9	0,05	4,3	Alto	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Roca con meteorización leve	2761,2	0,76	8	-	-	-	-	-	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9-11.** Predicción de la expansividad a partir del límite líquido

GRADO DE EXPANSIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	
	CHEN	NORMA IS 1498
Bajo	< 30	20-35
Medio	30-40	35-50
Alto	40-60	50-70
Muy alto	>60	70-90

Fuente: Tabla 132-1 extraída de la INV E 132-13.

**Tabla 9-12.** Predicción de la expansividad a partir del índice de plasticidad

GRADO DE EXPANSIÓN	ÍNDICE DE PLASTICIDAD		
	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498
Bajo	<20	0-15	<12
Medio	12-34	10-35	12-23
Alto	23-45	20-55	23-32
Muy alto	>32	>35	>32

Fuente: Fuente: Tabla 132-2 extraída de la INV E 132-13.

**Tabla 9-13.** Predicción de la expansividad a partir de otras medidas

GRADO DE EXPANSIÓN	CONTENIDO DE COLOIDES (% MENOR DE 0,001 mm)	LÍMITE DE CONTRACCIÓN	ÍNDICE DE CONTRACCIÓN <sup>A</sup>	ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE <sup>B</sup> (%)	PORCENTAJE DE EXPANSIÓN EN ODÓMETRO (HOLTZ Y GIBBS) <sup>C</sup>	PORCENTAJE DE EXPANSIÓN EN EDÓMETRO (SEED et al.) <sup>D</sup>
Bajo	<17	>13	<15	<50	<10	0-1,5
Medio	12-27	8-18	15-30	50-100	10-20	1,5-5,0
Alto	18-37	6-12	30-60	100-200	20-30	5-25
Muy alto	>27	<10	>60	>200	>30	>25

Fuente: Tabla 132-3 extraída de la INV E 132-13.

<sup>A</sup> Índice de contracción = Límite plástico – Límite de contracción

<sup>B</sup> Ver sección 4

<sup>C</sup> De condición seca a saturada bajo una sobrecarga de 7kPa

<sup>D</sup> Muestra compacta, en condición saturada bajo una sobrecarga de 7 kPa

**Compresión simple en roca**

Con el fin de cuantificar el parámetro de resistencia a la compresión simple de la arcillolita, el cual permite definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, se ejecutó un ensayo sobre la roca con meteorización leve. En la Tabla 9-14 se presenta el resultado obtenido, con un valor de resistencia a la compresión que clasifica a la roca de acuerdo a la ISRM en una muy blanda.

**Tabla 9-14.** Resistencia a la compresión simple en el talud 1.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Carga máxima (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión (MPa)	Clasificación de la roca según ISRM
Roca con meteorización leve	2761,24-2761,10	0,76-0,90	12,2	1,19	Muy blanda

Fuente: Elaboración propia

**Corte directo**

Para medir el parámetro de resistencia al corte drenado en el Talud 1, se procedió a realizar dos ensayos de corte, el primer ensayo fue un corte directo en suelo para la roca meteorizada (suelo), donde dada la dificultad de muestrear este tipo de material fue necesario reconfigurar la muestra de bolsa con base en las características de peso unitario y humedad de la muestra obtenida del tubo Shelby.

El segundo ensayo fue un ensayo de corte directo en roca para la roca que presenta meteorización leve, implementando la muestra en bloque seleccionada del apique realizado en la berma superior del talud 1. En la Tabla 9-15 se presentan los resultados obtenidos

**Tabla 9-15.** Resistencia al corte en el Talud 1.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)
Roca particularizada (suelo)	2759-2758,6	0,40	29	31,3
Roca con meteorización leve	2761,24-2761,10	0,76-0,90	550	18,3

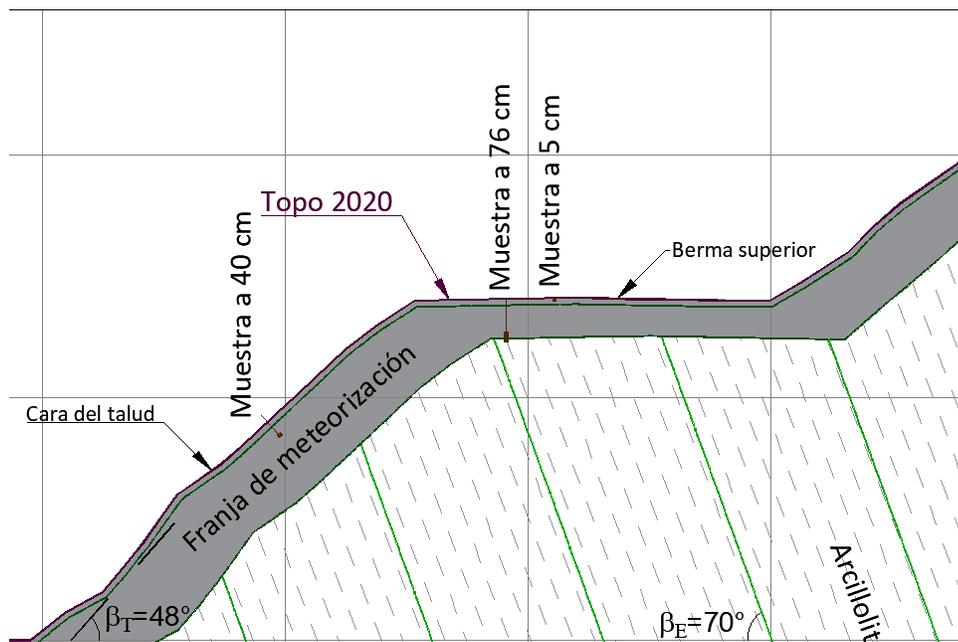
Fuente: Elaboración propia

### **Análisis mineralógico por difracción de rayos de X (XRD)**

La mineralogía principal de una muestra de arcillolita se puede ser determinada mediante la difracción de rayos X analizando un montaje en polvo; este ensayo permite determinar la presencia y porcentaje de minerales arcillosos tipo esmectitas, los cuales poseen comportamiento expansivo en presencia de humedad.

Se tomaron muestras de la roca para diferentes profundidades en el Talud 1; la primera muestra fue seleccionada de una profundidad de 40 cm en la cara del talud, la segunda y la tercera de una profundidad de 5 cm y 76 cm, respectivamente, en la berma superior del talud, ver Figura 9-6. En la Tabla 9-16 se presentan los porcentajes de cada fase cristalina.

**Figura 9-6.** Ubicación de las tres muestras seleccionadas en el perfil 1-A para el ensayo mineralógico en el talud 1.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9-16.** Porcentajes de cada fase cristalina, análisis mineralógico del Talud 1.

Fases % (p/p)	Cara del talud	Berma superior del talud	
	Roca particularizada (suelo). Prof. 0,40 m	Roca particularizada (suelo). Prof. 0,05 m	Roca con meteorización leve. Prof. 0,76 m
Cuarzo	46,6	37,7	45,8
Plagioclasa	5,3	7,2	4,5
Feldespato-K	1,0		1,2
Calcita	0,4		
Siderita	0,5		0,4
Hematita		1,0	
Pirita	1,7		2,3
Apatito	1,7		
Clorita	0,7		0,7
Caolinita	5,6	3,4	10,9
Illita-Mica	4,5	3,9	5,4
Illita-Esmectita	4,2	4,2	5,4
Esmectita	18,3	32,5	11,0
Vermiculita	9,5	10,1	12,3

Fuente: Elaboración propia.

## 9.2.2 Talud 2

Para el Talud 2 se seleccionaron 7 muestras y se definieron 17 ensayos de laboratorio a ejecutar resumidos en la Tabla 9-17.

**Tabla 9-17.** Programa de ensayos de laboratorio para el Talud 2.

Muestra	Prof. (m)	γ	ω	Lím. Atterberg	PT N°200	SDI	Exp.	CS	CD Suelo	CD Roca	XRD
T2-M1	0,20		X	X	X		X				X
T2-M2	0,20	X							X		
T2*-M2	0-0,16					X					
T2*-M3	0-0,09			X			X				X
T3-M1	0,19	X					X				X
T4*-M2	0-0,21	X									
T7-M1	0,20							X		X	
<b>Cantidad</b>		3	1	2	1	1	3	1	1	1	3

Fuente: Elaboración propia

### Peso unitario

Se realizaron 3 ensayos en las muestras recolectadas para determinar el peso unitario. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 9-18.

**Tabla 9-18.** Peso unitario para el Talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	γ total (kN/m <sup>3</sup> )	γ seco (kN/m <sup>3</sup> )
Roca particularizada (suelo)	2748,80	0,20	22,39	20,62
Roca con meteorización leve	2760-2759,80	0-0,19	20,80	18,48
	2760-2759,80	0-0,19	21,55	19,02
	2760-2759,80	0,21	23,46	21,94

Fuente: Elaboración propia.

**Humedad natural**

Se ejecutó un ensayo para determinar la humedad natural de la roca meteorizada (suelo). Adicionalmente, se implementaron los valores reportados de humedad natural en los ensayos de peso unitario para la roca con meteorización leve para complementar la información de este parámetro, como se puede evidenciar en la Tabla 9-19.

**Tabla 9-19.** Humedad natural para el talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Humedad (%)
Roca particularizada (suelo)	2748,80	0,20	7,7
Roca con meteorización leve	2760-2759,80	0,19	12,6
	2760-2759,80	0,19	13,3
	2760-2759,80	0,21	6,9

Fuente: Elaboración propia.

**Límites de Atterberg**

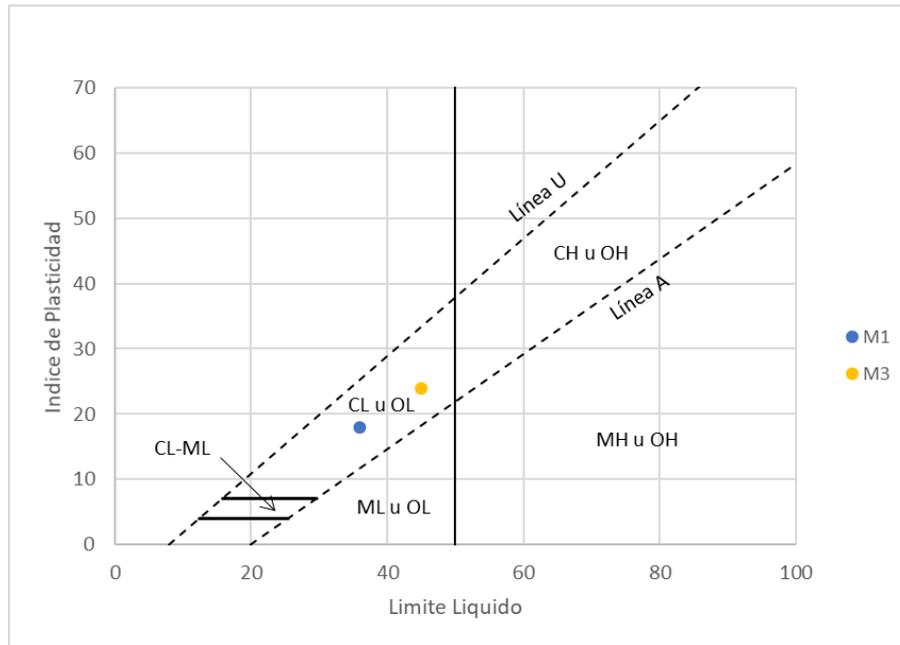
Se realizaron dos ensayos de límites de consistencia para caracterizar la fracción fina de los materiales encontrados. A continuación, en la Tabla 9-20 se resumen los resultados obtenidos y en la Figura 9-7 se presenta la carta de plasticidad donde se puede evidenciar que la clasificación del material es una arcilla de baja plasticidad.

**Tabla 9-20.** Límites de Atterberg para el talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Profundidad (m)	LL	LP	IP	Clasificación
Roca particularizada (suelo)	2748,80	0,2	36	18	18	CL
Roca particularizada (suelo)	2759,91	0,09	45	21	24	CL

Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-7.** Carta de plasticidad para la roca meteorizada (suelo) para el talud 2.



Fuente: Elaboración propia.

**Lavado sobre pasa tamiz N°200**

Para la caracterización de la fracción fina a través del lavado sobre tamiz N° 200, se ejecutó un solo ensayo, el cual clasifica al material como una arcilla de baja plasticidad, ver Tabla 9-21.

**Tabla 9-21.** Lavado sobre pasa tamiz N°200 para el talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Clasificación
Roca particularizada (suelo)	2748,80	0,20	0	1	99	CL

Fuente: Elaboración propia.

**Índice de desleimiento**

El objetivo de este ensayo es determinar el índice de desleimiento-durabilidad (SDI) de la roca blanda, cuando se somete a dos ciclos de humedecimiento y secado con abrasión.

Se examina cualitativamente la durabilidad de las rocas bajo el ambiente normal de servicio y de esta manera se le asignan valores cuantitativos de durabilidad. Este ensayo se ejecutó sobre la roca con meteorización leve y se obtuvo un SDI de 6, el cual clasifica como una roca de durabilidad muy baja, donde el material después del ensayo presenta una gran reducción en el tamaño de los fragmentos y una alta desintegración, ver Tabla 9-22.

**Tabla 9-22.** Índice de desleimiento para el talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Índice de desleimiento-durabilidad (SDI)		Índice	Termino Descriptivo	Clasificación según numeral 6.6
			1er. ciclo (%)	2do. ciclo (%)			
Roca con meteorización leve	2759,84	0,16	0,8	0,0	6	Durabilidad muy baja	Tipo III: El material retenido contiene exclusivamente fragmentos pequeños

Fuente: Elaboración propia

### **Potencial de expansión**

Los suelos finos, principalmente los de carácter cohesivo, se expanden o se contraen a medida que transitan del estado seco al húmedo o inversamente; este comportamiento está en función del tipo de mineral arcilloso presente. La alteración de la humedad puede causar cambios volumétricos que producen movimientos diferenciales de importancia en estructuras, lo cual puede ocasionar importantes agrietamientos. Se efectuaron tres ensayos de laboratorio en la roca particularizada (suelo) y la roca con meteorización leve en el talud 2.

En la Tabla 9-23 se presentan los resultados definidos como índice de expansión libre. Adicionalmente, utilizando la Tabla 9-11, Tabla 9-12 y Tabla 9-13 se realiza la predicción de expansividad en la arcillolita particularizada (suelo) con base en el límite líquido, índice de plasticidad e índice de expansión libre y en la roca con meteorización leve con base en

el índice de expansión libre. Para la roca meteorizada (suelo) el carácter expansivo de acuerdo al límite líquido y el índice de plasticidad es de nivel medio y para el índice de expansión libre el nivel es bajo; en la roca con meteorización leve el carácter expansivo es bajo teniendo en cuenta el índice de expansión libre.

**Tabla 9-23.** Potencial de expansión para el talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Índice Exp. Libre (%)	Predicción de expansividad a partir de:					
				Lim. líquido (Tabla 9-11)		Índice de plasticidad (Tabla 9-12)			Otras medidas (Tabla 9-13)
				CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	Índice Exp. libre (%)
Roca particularizada (suelo)	2748,80	0,20	14	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Roca particularizada (suelo)	2759,91	0,09	4,5	Alto	Medio	Medio	Medio	Alto	Bajo
Roca con meteorización leve	2759,81	0,19	14,3	-	-	-	-	-	Bajo

Fuente: Elaboración propia

### **Compresión simple en roca**

Con el fin de cuantificar el parámetro de resistencia a la compresión simple de la roca, el cual permite definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, se ejecutó un ensayo sobre la arcillolita con meteorización leve. En la Tabla 9-24 se presenta el resultado obtenido, con un valor de resistencia a la compresión que clasifica a la roca de acuerdo a la ISRM en una muy blanda.

**Tabla 9-24.** Resistencia a la compresión simple en el talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Carga máxima (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión (MPa)	Clasificación de la roca según ISRM
Roca con meteorización leve	2759,80	0,20	25,6	2,51	Muy blanda

Fuente: Elaboración propia

**Corte directo**

Para medir el parámetro de resistencia al corte drenado en el talud 2, se procedió a realizar dos ensayos de corte, el primer ensayo fue un corte directo en suelo para la roca meteorizada (suelo), donde dada la dificultad de muestrear este tipo de material fue necesario reconfigurar la muestra de bolsa con base en las características de peso unitario y humedad de la muestra obtenida del tubo Shelby.

El segundo ensayo fue un ensayo de corte directo en roca para la roca que presenta meteorización leve, implementando la muestra en bloque seleccionada del apique realizado en la parte superior del talud 2. En la Tabla 9-25 presentan los resultados obtenidos

**Tabla 9-25.** Resistencia al corte en el Talud 2.

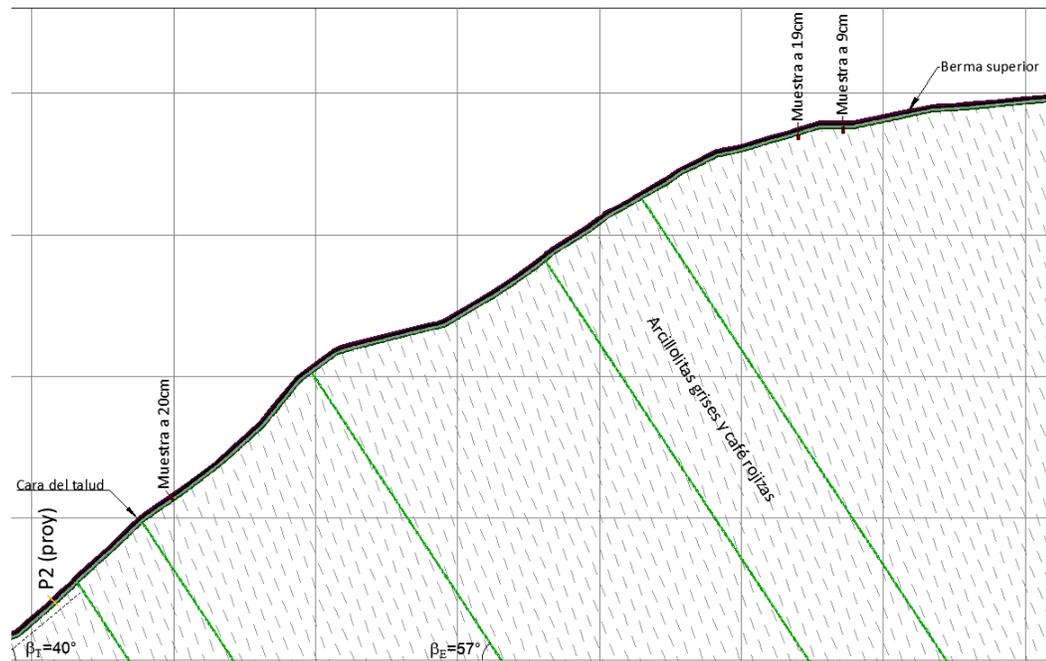
Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)
Roca particularizada (suelo)	2759,80	0,20	15	30,1
Roca levemente meteorizada	2759,80	0,20	1100	18,5

Fuente: Elaboración propia.

**Análisis mineralógico por difracción de rayos de X (XRD)**

La mineralogía principal de una muestra de arcillolita puede ser determinada mediante el ensayo de difracción de rayos X, analizando un montaje en polvo. Se tomaron tres muestras de la roca para diferentes profundidades en el talud 2; la primera muestra fue seleccionada de una profundidad de 20 cm en la cara del talud, la segunda y la tercera de una profundidad de 9 cm y 19 cm, respectivamente, en la parte superior del talud 2, ver Figura 9-8. En la Tabla 9-26 se presentan los porcentajes de cada fase cristalina.

**Figura 9-8.** Ubicación de las tres muestras seleccionadas en el perfil 2 para el ensayo mineralógico en el Talud 2.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9-26.** Porcentajes de cada fase cristalina, análisis mineralógico del Talud 2.

Fases % (p/p)	Cara del talud	Parte superior del talud	
	Roca particularizada (suelo). Prof. 0,20 m	Roca particularizada (suelo). Prof. 0,09 m	Roca levemente meteorizada. Prof. 0,19 m
Cuarzo	41,40	39,6	45,8
Plagioclasa	7,8	4,5	4,5
Feldespato-K	0,9		1,0
Calcita		1,0	
Siderita	0,5		
Pirita	1,9	1,9	2,2
Anatasa		1,4	
Clorita	0,8		0,4
Caolinita	11,9	7,1	8,2
Illita-Mica	6,6	1,8	1,5
Illita-Esmectita	4,0	6,6	7,3
Esmectita	11,6	24,9	18
Vermiculita	12,6	11,3	11,1

Fuente: Elaboración propia.

## 10. Análisis de resultados mineralógicos, expansividad y límites de Atterberg

Para analizar la composición mineralógica de las arcillolitas con relación al material particularizado y la roca levemente meteorizada por desleimiento, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en los ensayos de difracción de rayos x en las tres muestras tomadas en cada talud y ensayadas. Adicionalmente, se analizó la hipotética incidencia de la composición mineralógica sobre la expansión libre y sobre los límites de Atterberg.

### 10.1 Talud 1

En el Talud 1 se seleccionaron 3 muestras, así: una obtenida en el muestreo 1, ubicado en la cara del talud, a una profundidad de 0,40 m; la segunda y tercera muestra ubicadas en la berma superior del Talud 1 en el muestreo 2 y muestreo 3, a una profundidad de 0,05 m y 0,76 m, respectivamente

En la Tabla 10-1 se resume la información de cada muestra y que ensayos se realizaron para cada una.

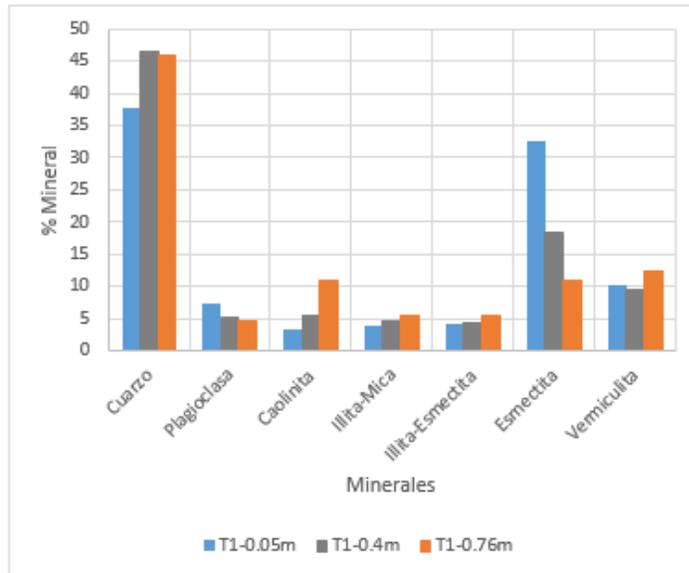
**Tabla 10-1.** Talud 1, detalle de las muestras implementadas para los análisis mineralógicos y ensayos de expansión y límites de Atterberg.

Muestra	Prof. (m)	Lím. Atterberg	Exp.	XRD
Muestreo 1	0,40	X	X	X
Muestreo 2	0-0,05	X	X	X
Muestreo 3	0,76		X	X

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10-1 se presenta la comparación de los 7 minerales comunes en las tres muestras y su ubicación en el Talud 1.

**Figura 10-1.** Talud 1, comparación de los resultados mineralógicos de las muestras de 0,05 m, 0,40 m y 0,76 m de profundidad.



Fuente: Elaboración propia.

Los minerales que presentaron contrastes evidentes fueron el cuarzo, la caolinita y la esmectita (montmorillonita), estos dos últimos son minerales arcillosos. La esmectita, que es un mineral arcilloso de comportamiento expansivo, fue la que presentó mayor diferencia entre muestras.

Analizando inicialmente el mineral cuarzo, se tiene que para la muestra de roca levemente meteorizada en la berma superior y la del material tipo suelo de la cara del talud el porcentaje es similar, 45,8% y 46,6%, respectivamente. En la muestra de arcillolita con desleimiento fuerte, tipo suelo, que se encuentra más cerca de la superficie del terreno en la berma superior, se obtuvo un porcentaje de cuarzo de 37,7%.

Para el mineral arcilloso caolinita, se puede observar en la Figura 10-1 que se tienen mayores porcentajes de este mineral en la muestra de roca levemente meteorizada y que a medida que el sitio de muestreo está más acerca a la superficie el porcentaje va

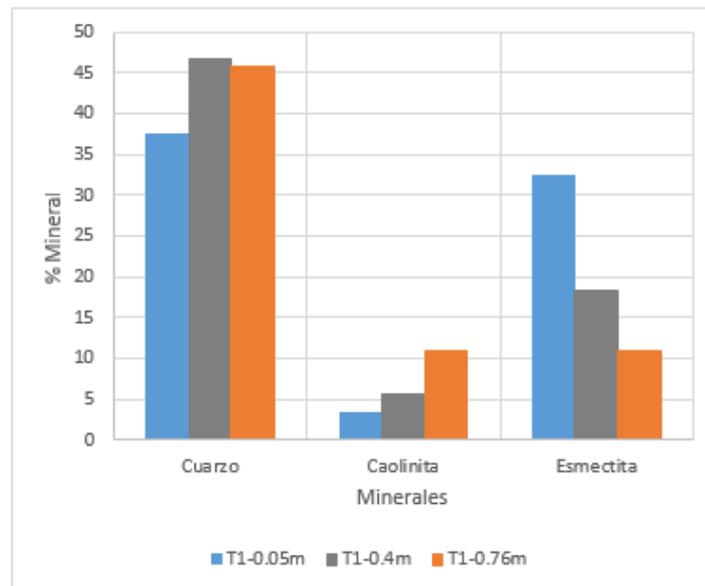
disminuyendo, pasando de 10,9 % a 5,6% y a 3,4% para las muestras de 0,76 m, 0,40 m y 0,05 m, respectivamente.

Para el mineral arcilloso esmectita, específicamente montmorillonita, se evidencia que el porcentaje del mineral aumenta a medida que el material se va particularizando, siendo mayor cerca de la superficie; pasando de 11% en la roca levemente meteorizada a 18,3% en el material tipo suelo de la cara del talud y a 32,5% en la berma superior.

La montmorillonita presenta un potencial más expansivo que la caolinita, puesto que tiene una alta capacidad de retención de moléculas de agua.

En la Figura 10-2 se resume lo anteriormente descrito para los minerales cuarzo, caolinita y esmectita.

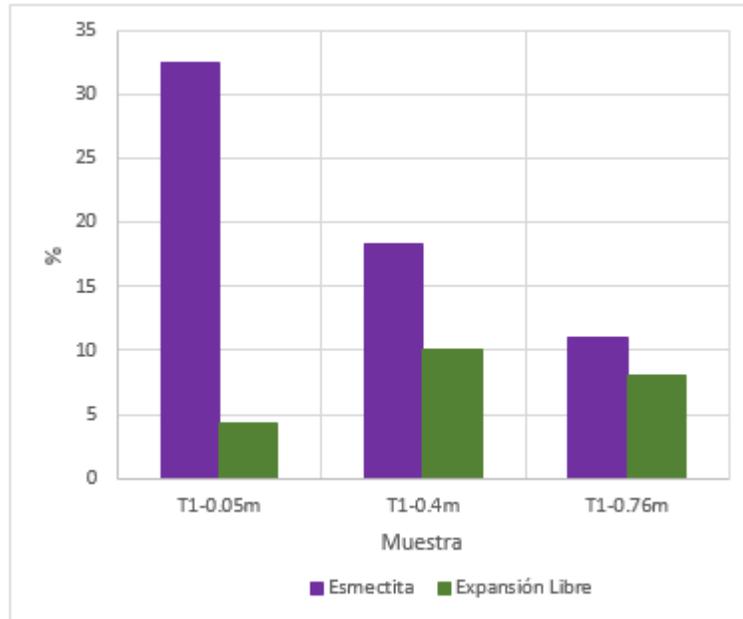
**Figura 10-2.** Talud 1, comparación de los minerales cuarzo, caolinita y esmectita para las muestras de 0,05 m, 0,40 m y 0,76 m de profundidad.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del contenido de esmética obtenidos en cada muestra se contrastan con los porcentajes de expansión libre obtenidos en el laboratorio para las correspondientes muestras. Los resultados se presentan en la Figura 10-3.

**Figura 10-3.** Talud 1, comparación del contenido de esmectita y el potencial de expansión libre en cada muestra.



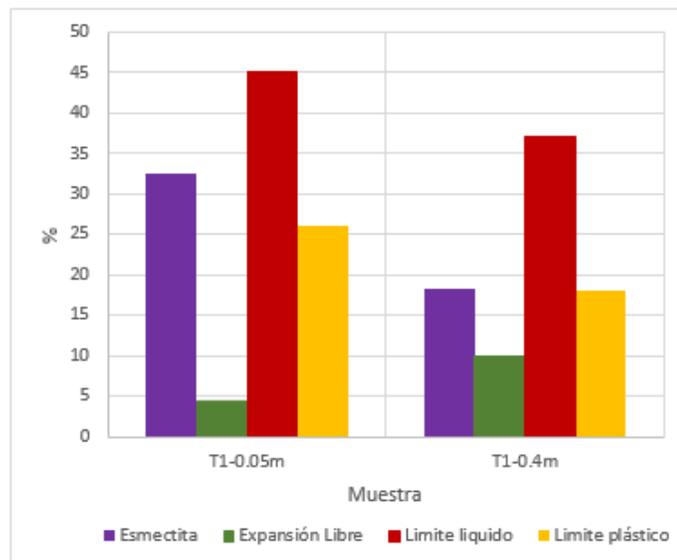
Fuente: Elaboración propia.

Para la muestra con mayor contenido de esmectita (32,5%) se obtuvo el menor porcentaje de expansión libre, esta muestra se encuentra más cerca de la superficie del terreno en la berma superior. El menor contenido de esmectita se encuentra en la muestra de roca levemente meteorizada a 0,76 m y se obtuvo un potencial de expansión libre de 8%, siendo este un poco menor en comparación al valor de la muestra de 0,40 m de profundidad, que es 10%. Inicialmente se pensaría que a mayor contenido de esmectita se tendría un potencial de expansión libre directamente proporcional, pero en el caso del talud de estudio no fue así. El mayor potencial de expansión se obtuvo para la muestra ubicada en la cara del talud a 0,40 m de profundidad, a la cual no le corresponde el mayor contenido de esmectita.

Para el Talud 1 el mayor potencial de expansión en la cara del talud explica y sustenta la hipótesis propuesta en el capítulo de instrumentación donde el comportamiento medido en la cara del talud era evidencia ciclos de expansión y de contracción muy relacionado al ciclo hidrológico del área.

Finalmente, utilizando los datos obtenidos en los límites de Atterberg que se realizaron en las muestras de arcillolita particularizada, se encontró que el contenido de esmectita es proporcional al límite líquido, es decir que para un contenido mayor de esmectita en la muestra, el límite líquido es mayor; al igual que para el límite plástico, el cual disminuye en proporción a la reducción del contenido de esmectita en las muestras analizadas. Para el potencial de expansión la relación es inversa, siendo menor la expansión libre cuando se tienen valores de límite líquido y plástico mayores, ver Figura 10-4.

**Figura 10-4.** Talud 1, comparación del contenido de esmectita con el potencial de expansión libre y los límites de Atterberg para las muestras de 0,05 m y 0,40 m de profundidad.



Fuente: Elaboración propia.

La relación calculada entre el potencial de expansión y los límites no se ajusta a lo establecido en la teoría, ver Tabla 9-11, Tabla 9-12 y Tabla 9-13. Las tablas anteriormente citadas se implementan para realizar predicciones de expansividad, las cuales se hacen en función del límite líquido, límite plástico y otras medidas, teniendo entre ellas y la expansión un carácter directamente proporcional.

En el numeral 9.2.1 se realizó la predicción de expansividad con base en los valores de los límites líquido y plástico derivados de los ensayos de laboratorio. La predicción de expansividad obtenida a través de este medio, establece que la arcillolita meteorizada

(suelo) tiene un carácter expansivo medio, lo cual difiere de la predicción realizada a través del índice expansión libre, ver Tabla 10-2.

**Tabla 10-2.** Predicción de expansividad para las muestras particularizadas del Talud 1.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Índice Exp. Libre (%)	Predicción de expansividad a partir de:					
				Lim. líquido (Tabla 9-11)		Índice de plasticidad (Tabla 9-12)			Otras medidas (Tabla 9-13)
				CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	Índice Exp. libre (%)
Roca particularizada (suelo)	2758,6	0,40	10	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Roca particularizada (suelo)	2761,9	0,05	4,3	Alto	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior hace plantear que el potencial de expansión calculado a través del índice de expansión libre no está caracterizando adecuadamente a la arcillolita, debido a que su estimación no concuerda con lo reflejado a través del límite líquido, límite plástico y lo evidenciado en el contenido de esmectita en cada muestra. Por lo tanto, es importante revisar con otro tipo de ensayo de expansividad y profundizar el tema de la micro porosidad el cual está directamente relacionado.

## 10.2 Talud 2

En el Talud 2 se seleccionaron 3 muestras, así: una obtenida en el muestreo 1, ubicado en la cara del talud, a una profundidad de 0,20 m; la segunda y tercera muestra ubicadas en la parte superior de Talud 2 en el muestreo 2, a una profundidad de 0,09 m y 0,19 m, respectivamente.

En la Tabla 10-3 se resume la información de cada muestra y que ensayos se realizaron para cada una.

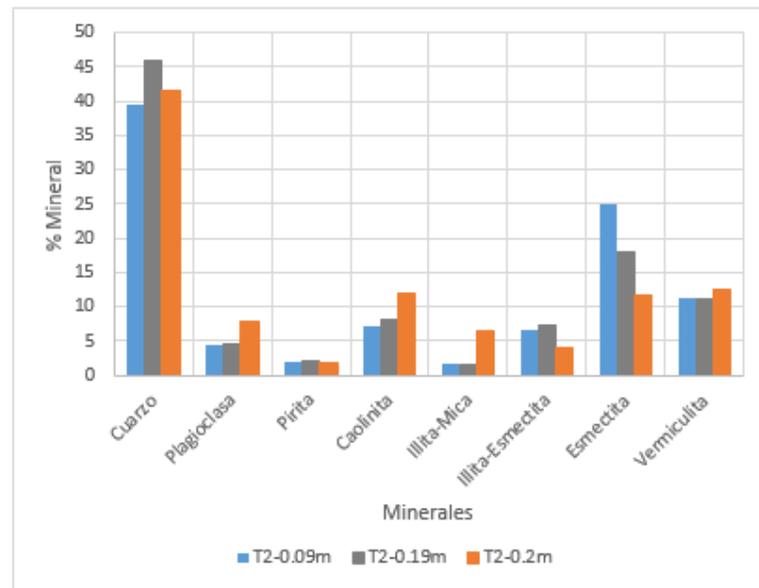
**Tabla 10-3.** Talud 2, detalle de las muestras implementadas para los análisis mineralógicos y ensayos de expansión y límites de Atterberg.

Muestra	Prof. (m)	Lím. Atterberg	Exp.	XRD
Muestreo 1	0,20	X	X	X
Muestreo 2	0-0,09	X	X	X
	0,19		X	X

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10-5 se presenta la comparación entre los 8 minerales comunes en las tres muestras y su ubicación en el Talud 2.

**Figura 10-5.** Talud 2, comparación de los resultados mineralógicos de las muestras de 0,09 m, 0,19 m y 0,20 m de profundidad.



Fuente: Elaboración propia

Los minerales que presentaron contrastes porcentuales evidentes fueron el cuarzo, la caolinita, illita-esmectita y la esmectita (montmorillonita), siendo estos tres últimos minerales del grupo de minerales arcillosos.

Analizando inicialmente el mineral cuarzo, se tiene que para las muestras de suelo de la berma superior y la de la cara del talud el porcentaje es similar, 39,6% y 41,4%, respectivamente. En la muestra de roca de la berma superior, se obtuvo un porcentaje de 45,8%.

Para el mineral arcilloso caolinita, se puede observar en la gráfica anterior que se tienen mayor contenido de mineral (11,9%) en el material particularizado de la cara del talud, que, en las otras dos muestras ubicadas en la berma superior, con contenidos de 7,1% y 8,2% para las muestras de 0,09 m y 0,19 m, respectivamente.

En el mineral Illita-esmectita, se obtuvieron contenidos similares para las muestras de la berma superior; 6,6% para la muestra más superficial y de 7,3% para la muestra de 0,19 m; en la muestra de la cara del talud el contenido de este mineral fue de un 4%.

Para el mineral esmectita, específicamente montmorillonita, se evidencia que el contenido del mineral es mayor en las muestras de la berma superior, siendo un 24,9% el contenido en la arcillolita particularizada y de 18% en los fragmentos de roca seleccionados a 0,19 m; el menor porcentaje de esmectita se obtuvo en la muestra de la cara del talud, con un 11,6% a 0,20 m de profundidad.

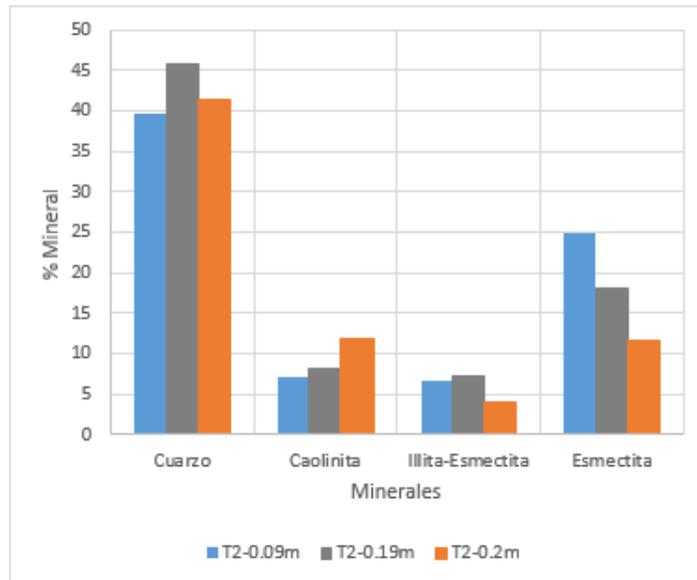
El mineral Illita hace parte del grupo de las micas dentro de los minerales arcillosos y solamente manifiesta sensibilidad al agua en condiciones de extrema degradación, lo cual no aplica en este caso.

Lo anterior puede ser resultado de la dinámica que se presenta en la cara del Talud 2, donde el espesor de la capa particularizada es menor y constantemente es removida por acción del agua y de la gravedad, dejando expuesta una nueva cara del talud que se degradara pero que no desarrollara un gran contenido de este mineral; a diferencia de lo que puede pasar en la berma superior, donde la geometría permite el empozamiento de agua que lentamente va ingresando al macizo y se va generando cambios químicos en los minerales arcillosos expansivos, principalmente en la esmectita. Lo anterior no ocurre en el Talud 1, donde la capa de material particularizado en la cara del talud no es removida

con frecuencia y permite la evolución de su espesor y del contenido de esmectita, al igual que en el material de la berma superior, pero a diferente velocidad.

Para el Talud 2, en la Figura 10-6 se resume lo anteriormente descrito para los minerales cuarzo, caolinita, Illita-esmectita y esmectita

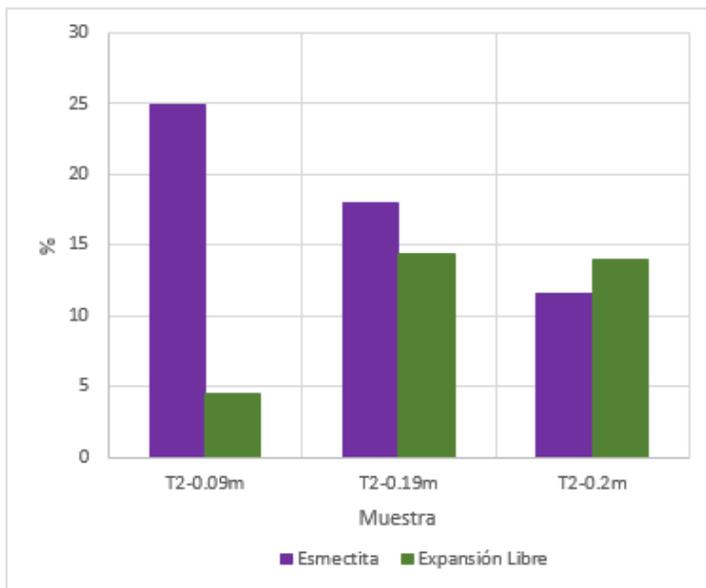
**Figura 10-6.** Talud 2, comparación de los minerales cuarzo, caolinita, illita-esmectita y esmectita para las muestras de 0,09 m, 0,19 m y 0,20 m de profundidad.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados del contenido de esmética obtenidos en cada muestra se contrastan con los porcentajes de expansión libre obtenidos en el laboratorio para las respectivas muestras del talud 2 y se presenta en la Figura 10-7.

**Figura 10-7.** Talud 2, comparación del contenido de esmectita y el potencial de expansión libre en cada muestra del Talud 2.

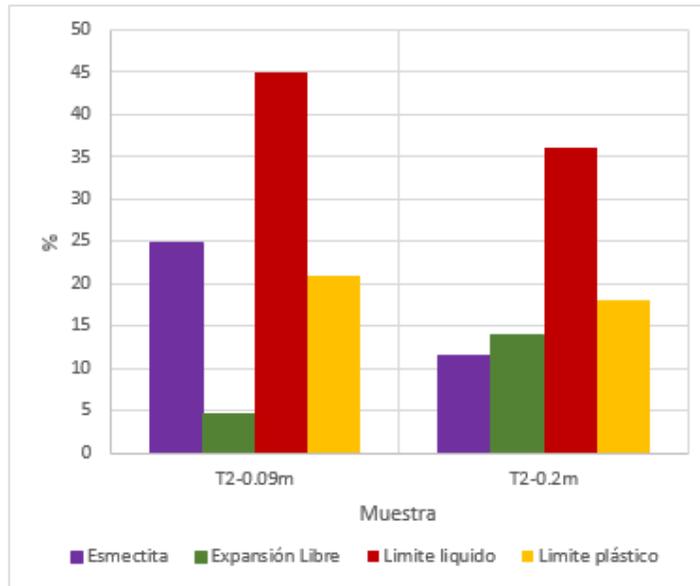


Fuente: Elaboración propia

Para la muestra con mayor contenido de esmectita (24,9%) se obtuvo el menor porcentaje de expansión libre (4,5%), la cual se encuentra más cerca de la superficie en la berma superior, al igual que en el Talud 1. En el Talud 2 se presentaron valores similares de expansión libre para diferentes contenidos de esmectita siendo una muestra la correspondiente al material particularizado y la otra a los fragmentos de roca de la berma superior, como se ilustra en la Figura 10-7.

Finalmente, utilizando los datos obtenidos en los límites de Atterberg que se realizaron en las muestras de arcillolita particularizada, se encontró que el contenido de esmectita es proporcional al límite líquido y plástico. Para el potencial de expansión la relación es inversa, siendo menor la expansión libre cuando se tienen valores de límite líquido y plástico mayores, ver Figura 10-8.

**Figura 10-8.** Talud 2, comparación del contenido de esmectita con el potencial de expansión libre y los límites de Atterberg para las muestras de 0,09 m y 0,20 m de profundidad.



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el Talud 1, la relación calculada entre el potencial de expansión y los límites no se ajusta a lo establecido en la teoría, donde se tiene un carácter directamente proporcional.

En el numeral 9.2.2 se realizó la predicción de expansividad con base en los valores de los límites líquido y plástico derivados de los ensayos de laboratorio. La predicción de expansividad obtenida a través de este medio, establece que la arcillolita meteorizada (suelo) tiene un carácter expansivo medio, lo cual difiere de la predicción realizada a través del índice expansión libre, ver Tabla 10-4.

**Tabla 10-4.** Predicción de expansividad para las muestras particularizadas del Talud 2.

Descripción	Cota (msnm)	Prof. (m)	Índice Exp. Libre (%)	Predicción de expansividad a partir de:					
				Lim. líquido (Tabla 9-11)		Índice de plasticidad (Tabla 9-12)			Otras medidas (Tabla 9-13)
				CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	Índice Exp. libre (%)
Roca particularizada (suelo)	2748,80	0,20	14	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Roca particularizada (suelo)	2759,91	0,09	4,5	Alto	Medio	Medio	Medio	Alto	Bajo

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se analizaron los resultados de los ensayos realizados para el contenido de esmectita, el potencial de expansión y los límites líquido y plástico en cada muestra para los dos taludes, con la finalidad de establecer relaciones entre diferentes parámetros de manera general en los dos taludes examinados, los resultados utilizados se encuentran resumidos en la Tabla 10-5.

**Tabla 10-5.** Resultados del contenido de esmectita, potencial de expansión libre y límite líquido y plástico para las muestras del Talud 1 (T1) y Talud 2 (T2).

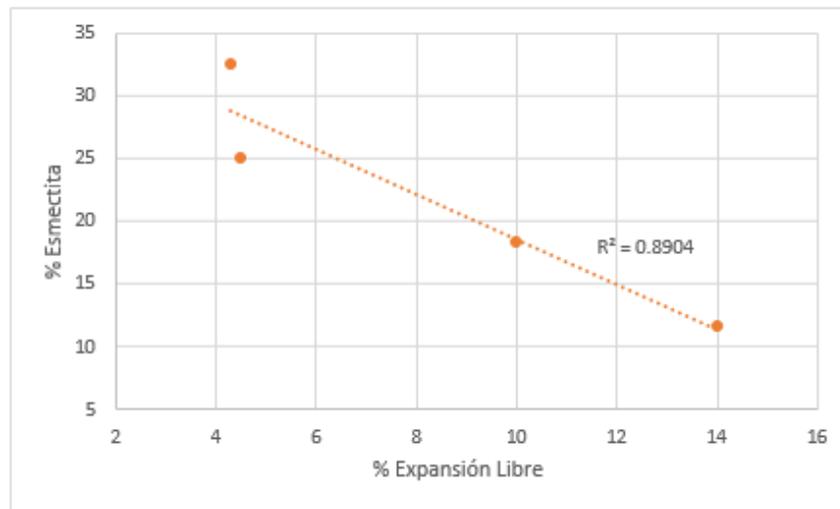
Característica	T1-0,05m	T2-0,09m	T1-0,4m	T2-0,2m	T1-0,76m	T2-0,19m
Esmectita (%)	32,5	24,9	18,3	11,6	11,0	18
Expansión Libre (%)	4,3	4,5	10	14	8,0	14,3
Límite líquido (%)	45	45	37	36		
Límite plástico (%)	26	21	18	18		

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, se pudo evidenciar que para el contenido de esmectita y el potencial de expansión libre en la arcillolita particularizada existe una relación inversa. Ajustando los datos a una línea de tendencia lineal, se obtiene un comportamiento inversamente proporcional con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,89 entre las dos variables

analizadas. Por lo tanto, a mayor contenido de esmectita, menor será el potencial de expansión libre, como se evidencia en Figura 10-9.

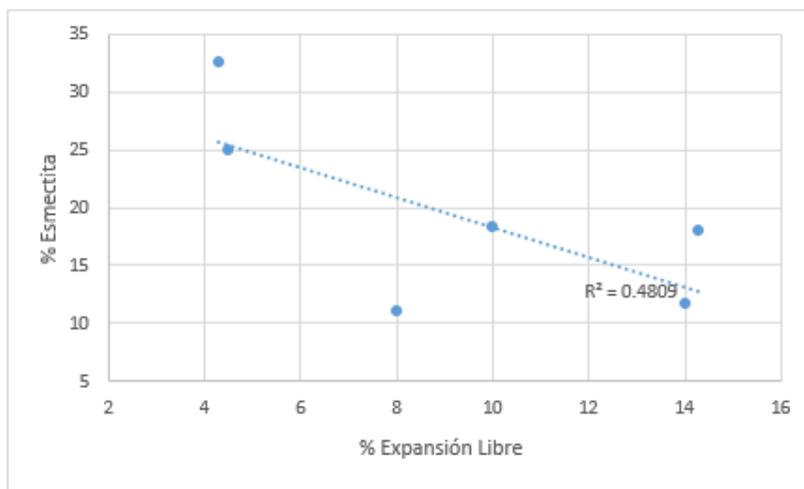
**Figura 10-9.** Relación entre el contenido de esmectita y el potencial de expansión libre para las muestras de material particularizado del talud 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia

La relación mostrada anteriormente no se mantiene si se tienen en cuenta los valores de las muestras de arcillolita levemente meteorizada de los dos taludes, al ajustar una línea de tendencia lineal a los datos del material particularizado y del material con leve meteorización, se obtiene una relación inversamente proporcional con un coeficiente de determinación de 0,48, lo cual demuestra que las variables no se ajustan al modelo que se está intentando explicar, como se muestra en la Figura 10-10.

**Figura 10-10.** Relación entre el contenido de esmectita y el potencial de expansión libre para todas las muestras del talud 1 y 2



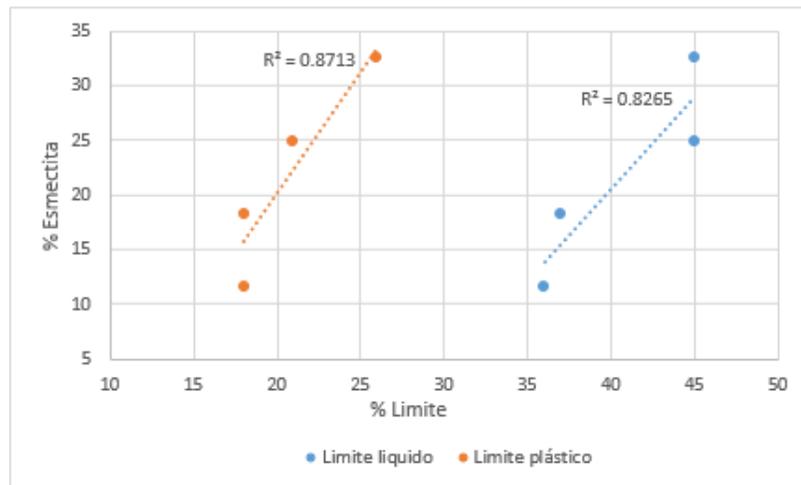
Fuente: Elaboración propia

Con base en las relaciones identificadas entre el contenido de esmectita y el porcentaje de expansión libre analizado anteriormente, se considera que lo planteado respecto a que el ensayo de expansión libre no está caracterizando adecuadamente el potencial de expansión del Talud 1 y Talud 2, tiene mayor relevancia. Por lo tanto, es importante examinar a nivel microscópico las características de la porosidad y permeabilidad en la arcillolita particularizada y levemente meteorizada, lo cual permitirá entender el papel que juega el agua a ese nivel de detalle.

Posteriormente se consideró la relación entre el contenido de esmectita y los valores para el límite líquido y plástico de las muestras de material particularizado del Talud 1 y Talud 2, para lo cual se graficaron los respectivos valores, como se señala en la muestra en la Figura 10-11.

Tanto para el límite líquido como para el límite plástico la proporcionalidad es directa con el contenido de esmectita, lo cual se refleja en el valor del coeficiente de determinación para un ajuste con tendencia lineal, donde si el contenido de esmectita aumenta el valor de los límites líquido y plástico también se incrementan en esa misma proporción.

**Figura 10-11.** Relación entre el contenido de esmectita y los límites líquido y plástico de las muestras de material particularizado del talud 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia

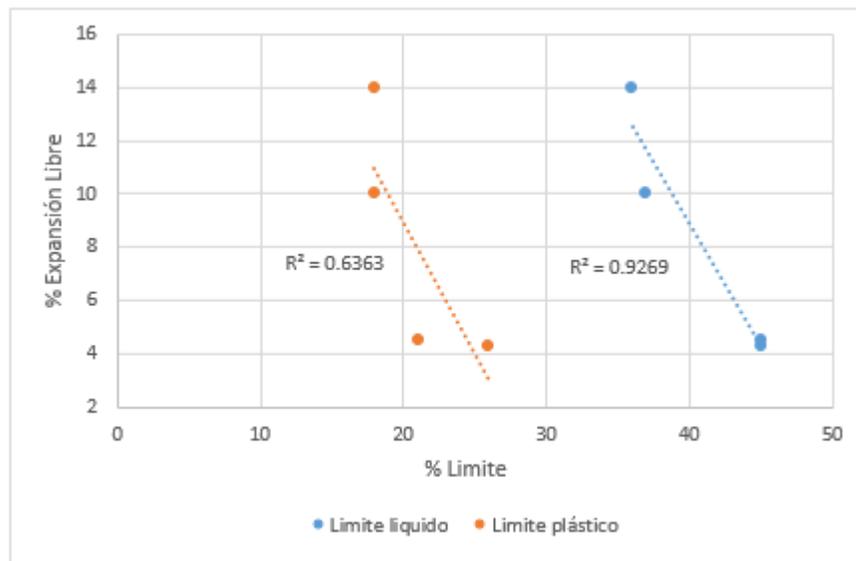
Lo anterior se relaciona con el contenido de humedad, puesto que el contenido de esmectita y los límites líquido y plástico son función de ese parámetro. El límite líquido es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que define el cambio entre el estado líquido y plástico del suelo donde cualquier cambio en el contenido de humedad en el límite líquido produce un cambio en el volumen del suelo.

Adicionalmente, cuanto mayor es la cantidad de minerales arcillosos, mayor es la plasticidad; debido a que el comportamiento de las partículas de arcilla compuestas por minerales arcillosos está fuertemente influenciado por las fuerzas de superficie, ya que al tratarse de granos muy finos la superficie específica alcanza valores importantes y las fuerzas electrostáticas desarrolladas en la superficie cobran relevancia. El agua es fuertemente atraída por la superficie de los minerales arcillosos dando como resultado la plasticidad, mientras que en las partículas no arcillosas la superficie específica es mucho menor y hay menor afinidad con el agua, con lo cual no se desarrolla una plasticidad significativa.

Finalmente se analizó la correlación entre los resultados del potencial de expansión libre y los resultados de límites líquido y plástico. Para la relación de la expansión libre en función del límite plástico se pudo evidenciar que la proporcionalidad es inversa y al ajustar a una tendencia de tipo lineal los datos, el coeficiente de determinación es de 0,63, lo cual

demuestra que las variables no se ajustan del todo al modelo que se está intentando explicar. Con el límite líquido la relación de proporcionalidad también es inversa pero al ajustar los datos a una tendencia de tipo lineal se obtiene un coeficiente de determinación de 0,92, donde se comprueba que las variables se ajustan al modelo proyectado, en el cual si el potencial de expansión libre es menor, el límite líquido será mayor; como se muestra en la Figura 10-12.

**Figura 10-12.** Relación entre el potencial de expansión libre y los límites líquido y plástico de las muestras de material particularizado del talud 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

En conclusión, en las muestras de los dos taludes se pudo evidenciar que las muestras ubicadas en las bermas superiores de los taludes a profundidades de 0,05 y 0,09 m, presentaron altos valores en el contenido de esmectita y en los porcentajes de límites líquido y plástico, pero porcentajes bajos de potencial de expansión libre.

Para las muestras de la cara del talud y las restantes de la berma superior en los dos taludes (0,76 m y 0,19 m), el comportamiento no se mantuvo en función de su ubicación, debido a que la cara de cada talud presenta una situación diferente, lo cual se ve reflejado en su contenido de esmectita y su potencial de expansión libre.

# 11. Análisis del proceso de desleimiento y su implicación en la estabilidad de taludes

Con el objetivo de modelar el avance de la meteorización por desleimiento en el Talud 1 a partir del perfil de desleimiento obtenido en el desarrollo de la instrumentación y el análisis de los datos, más las caracterizaciones físicas y mecánicas hechas en laboratorio, se hará un ejercicio de proyección de la estabilidad del Talud 1 en el tiempo en función de los cambios en las propiedades geomecánicas de las arcillolitas a medida que se desintegran en fragmentos más pequeños.

## 11.1 Condición inicial

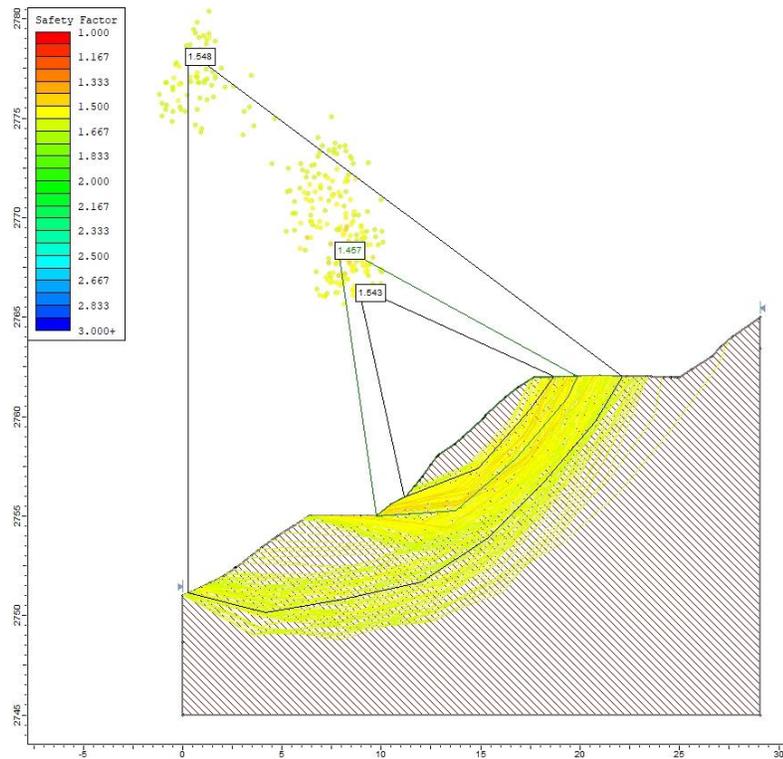
**Tabla 11-1.** Propiedades utilizadas en el análisis de la condición inicial del Talud 1

<b>Condición Inicial</b>	<b>Material</b>	<b>Peso unitario total (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\sigma_c</math> (MPa)</b>
	Arcillolita fresca	21,94	2,1

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de estabilidad se implementó el software Slide versión 6,0 producido por Rocscience, el cual es un programa de estabilidad de taludes de equilibrio limite 2D para evaluar el factor de seguridad de superficies de falla en taludes de roca y suelo. La empresa Geología y Geotecnia S.A.S, facilito el uso del software licenciado para el desarrollo de los análisis presentados a continuación.

Se utilizó el modelo geológico-geotécnico presentado en el Perfil 1-A para realizar el análisis de estabilidad, como se presentan en la Figura 11-1 para la condición inicial.

**Figura 11-1.** Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición inicial (arcillolita intacta).

Fuente: Elaboración propia usando Slide v.6,0.

Las superficies de falla críticas son de tipo local, comprometiendo a la roca intacta. El factor de seguridad mínimo fue de 1,46.

## 11.2 Condición actual

Se estableció como condición actual el año 2021, cuando se hicieron los ensayos de laboratorio y se estimaron los espesores de la franja afectada por desleimiento en la cara del talud y en la berma superior. Para el análisis de estabilidad se implementaron las mismas propiedades de la arcillolita levemente afectada del análisis anterior para la roca que infrayace la franja de meteorización. En la franja de meteorización se utilizaron las propiedades la arcillolita particularizada.

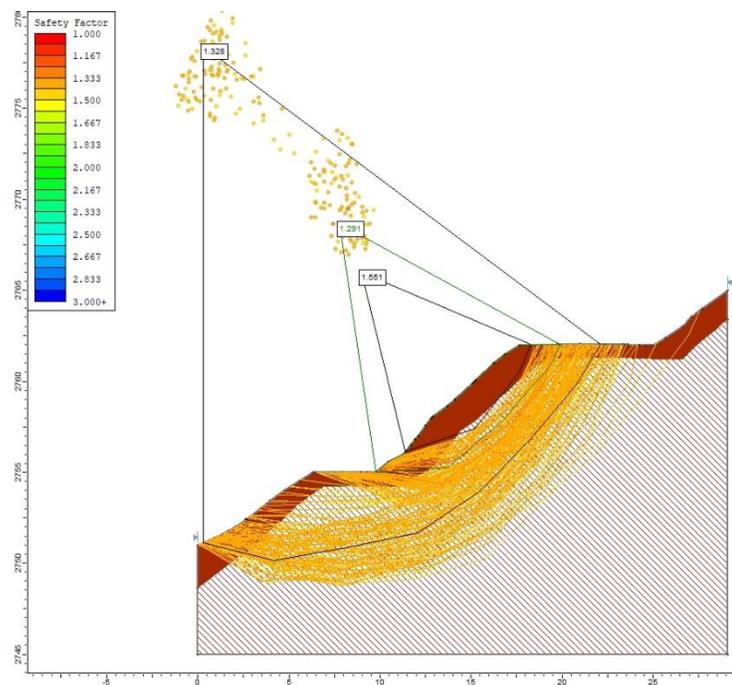
**Tabla 11-2.** Propiedades utilizadas en el análisis de la condición actual del Talud 1.

Condición Actual	Material	Peso unitario total (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	Phi (°)	σc (MPa)	Espesor Cara del talud (m)	Espesor berma (m)
	Arcillolita particularizada	22,39	15	30,1		1,62	0,81
	Arcillolita levemente meteorizada	21,94			2,1		

Fuente: Elaboración propia.

Las superficies de falla críticas son de tipo local, comprometiendo a parte de la roca levemente meteorizada y la franja de meteorización, como se evidencia en la Figura 11-2. El factor de seguridad mínimo fue de 1,29.

**Figura 11-2.** Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición actual con un espesor de franja de meteorización de 1,62 m.



Fuente: Elaboración propia usando Slide v.6,0

### 11.3 Condición futura

Con base en la hipótesis planteada de que el proceso de meteorización por desleimiento tiene un comportamiento lineal, se procedió a estimar espesores de la franja de meteorización en la cara del talud y en las bermas para posteriormente analizar su estabilidad en términos del factor de seguridad obtenido.

En la Tabla 11-3 se presentan los espesores proyectados en la cara del talud y en la berma superior para los cuales se calculará su respectivo factor de seguridad con el análisis de estabilidad.

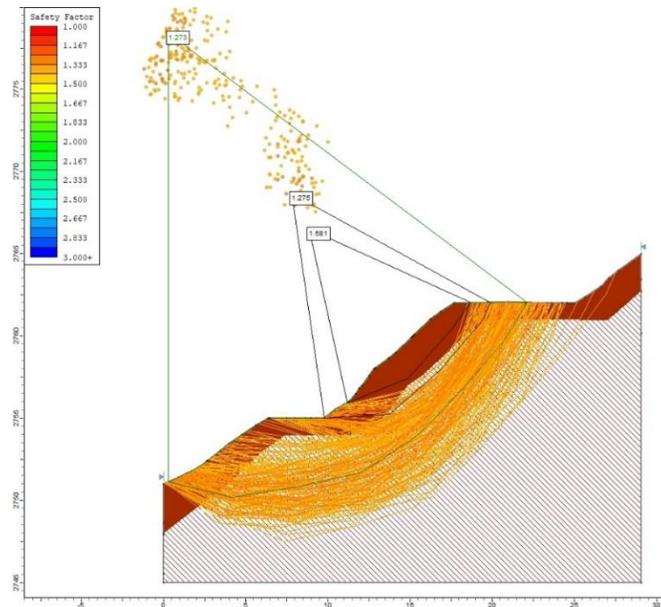
El objetivo es analizar la variación del factor de seguridad en función de la extensión del espesor de la franja de meteorización y poder establecer que espesor compromete la estabilidad del talud, con un F.S cercano a 1,0, es decir equilibrio limite.

**Tabla 11-3** : Estimación de los espesores desde la cara del talud hacia adentro del terreno y en la berma superior bajo la hipótesis de un comportamiento lineal y constante.

Año	Espesor	
	Cara del talud (m)	Berma superior (m)
2021	1,62	0,81
2024	2,16	1,08
2034	3,96	1,98
2040	5,04	2,52

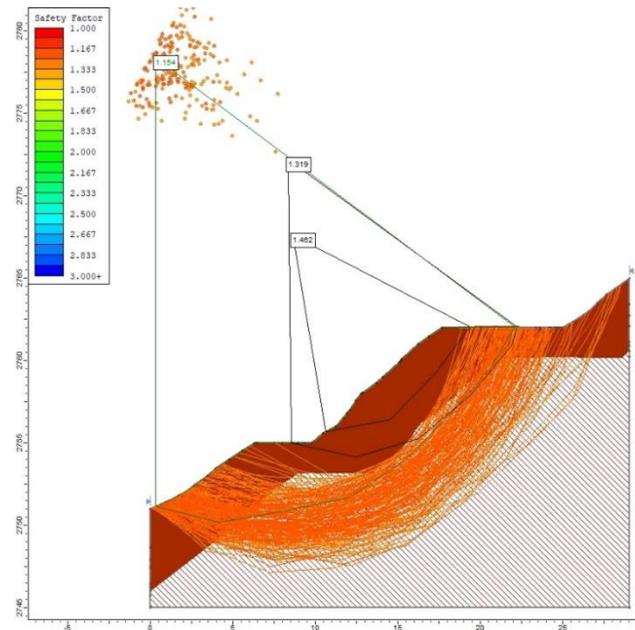
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 11-3.** Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición en el año 2024 con un espesor de franja de meteorización de 2,16 m.



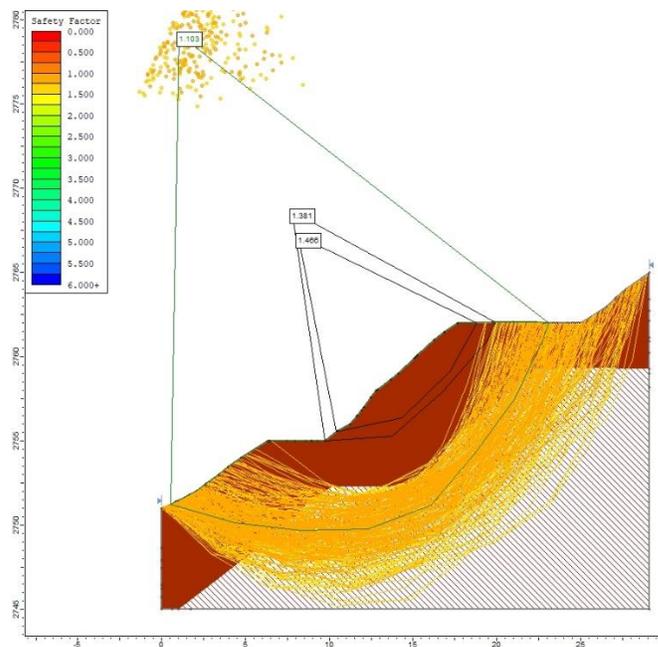
Fuente: Elaboración propia usando Slide v.6,0.

**Figura 11-4.** Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición en el año 2034 con un espesor de franja de meteorización de 3,96 m.



Fuente: Elaboración propia usando Slide v.6,0.

**Figura 11-5.** Perfil 1-A, análisis de estabilidad para la condición en el año 2040 con un espesor de franja de meteorización de 5,04 m.

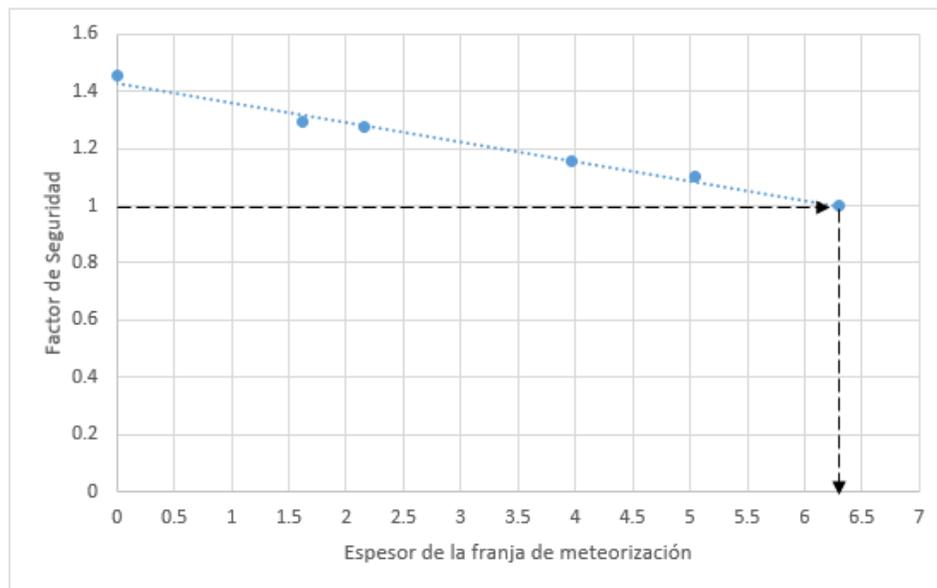


Fuente: Elaboración propia usando Slide v.6,0.

Una vez se obtuvieron los factores de seguridad para cada espesor de franja de meteorización establecido, se procedió a graficarlo con el fin de establecer una tendencia que permitiera calcular para cualquier factor de seguridad que espesor de franja de meteorización le corresponde, como se presenta en la Figura 11-6.

El análisis anterior, establece que el equilibrio limite en la estabilidad del talud ( $FS=1,0$ ) se obtendrá cuando el espesor de la franja de meteorización sea aproximadamente de 6,3 m, el cual se obtendrá aproximadamente en el 2047, como se señala en la Tabla 11-4.

**Figura 11-6.** Factores de seguridad obtenidos en función del espesor de la franja de meteorización.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11-4.** Factores de seguridad obtenidos para cada espesor de franja de meteorización establecido.

Año	Espesor		Factor de seguridad
	Cara del talud (m)	Berma superior (m)	
2012	0	0	1,46
2021	1,62	0,81	1,29
2024	2,16	1,08	1,27
2034	3,96	1,98	1,15
2040	5,04	2,52	1,10
2047	6,3	3,15	1,0

Fuente: Elaboración propia

El análisis mostrado anteriormente no refleja la realidad, porque se asume que el proceso de desleimiento es contante, lo cual no es cierto debido a los ciclos de humedecimiento y secado producto de la lluvia y el sol que se presentan. Adicionalmente, a medida que se va desarrollando un espesor considerable de material desleído este protege la roca interna.

Para poder modelar el avance del proceso de meteorización por desleimiento es necesario conocer características a nivel microscópico que permitan entender de manera adecuada el proceso que se está desarrollando al interior de la roca en función de la porosidad, la fuerza de unión del grano, las propiedades petrofísicas y el grado de rotura, las cuales no son perceptible a simple vista por el profesional. Por lo tanto, se propone simular el material particularizado a través del término propuesto anteriormente, intensidad de desleimiento, en el cual se cuantifica el tamaño de grano de la roca que se va fragmentado en función del espesor de la capa de material particularizado que se va desarrollando.

Adicionalmente, se puede complementar el planteamiento anterior con la medición de la cohesión, debido a que en el avance del desleimiento la roca se vuelve más porosa, perdiendo la fuerza de unión entre los granos; lo cual se corrobora en los resultados del ensayo de resistencia al corte que se resumen en la Tabla 11-5.

**Tabla 11-5.** Resumen de los valores de cohesión y fricción de las arcillolitas muestreadas en el Talud 1 y Talud 2.

	<b>Descripción</b>	<b>Cota (msnm)</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>	<b>Fricción (°)</b>
Talud 1	Roca particularizada (suelo)	2759-2758,6	0,40	29	31,3
	Roca con meteorización leve	2761,24-2761,10	0,76-0,90	550	18,3
Talud 2	Roca particularizada (suelo)	2759,80	0,20	15	30,1
	Roca levemente meteorizada	2759,80	0,20	1100	18,5

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que entre la arcillolita levemente meteorizada de los dos taludes se tiene una reducción de aproximadamente del 50% entre la cohesión del Talud 1 y el Talud 2, permaneciendo el ángulo de fricción casi constante, quizás en función del tiempo en que la roca ha sido expuesta, siendo de menor tiempo el Talud 2.

En la arcillolita particularizada se evidencia algo similar, la cohesión se reduce en casi un 50% y el ángulo de fricción es contante, lo anterior debido a la ubicación de la muestra e la cara del talud, estando la muestra del Talud 2 más cerca de la superficie por ende más expuesta a la disgregación.

## **12. Conclusiones y recomendaciones**

### **12.1 Conclusiones**

#### **12.1.1 Conclusiones generales**

El área del Trabajo Final de Maestría se encuentra sobre una parte de la secuencia litológica de la Formación Bogotá; afloran secuencias de arcillolitas café-rojizas intercaladas con arcillolitas grises a moradas, areniscas friables de color gris verdoso y limolitas rojizas

Las arcillolitas están expuestas en los taludes y patios, y están afectadas por desleimiento por efecto de los cambios volumétricos, de la superficie expuesta las cuales están relacionados a la hidratación y deshidratación de sus minerales arcillosos. Su estratificación varía de laminar a gruesa, aunque debido al desleimiento no es fácil de observar.

Las limolitas son de color rojo a vino tinto, presentan cristales muy finos de muscovita, son compactas y bien cementadas. Las limolitas no son muy frecuentes.

La estructura geológica dominante en el sector es el Sinclinal de Usme también conocido como el sinclinal de Usme-Tunjuelo; es una estructura con el flanco oriental invertido y erosionada en el núcleo, donde se encuentra el valle aluvial del río Tunjuelo y sus afluentes, es la cuenca hidrográfica más importante del suroriente de la Sabana de Bogotá. El área de trabajo está ubicada en el flanco oriental.

La revisión del estado del arte y lo desarrollado en el marco teórico, muestra que en la mayoría de los estudios sobre rocas con heterogeneidad litológica se ha determinado que la resistencia del macizo rocoso, en general, está influenciada por la roca débil.

Para el caso específico de los taludes de la mina Los Ajos, dentro de las rocas débiles se identificaron arcillolitas e intercalaciones de limolitas, siendo las arcillolitas las predominantes y en las que se han generado problemas de estabilidad debido al proceso de desleimiento por cambios volumétricos en la superficie expuesta a la acción directa del clima (lluvia-sol) que genera humedecimiento-secado en la superficie del terreno y en la franja aledaña, hacia profundidad, a causa de la hidratación y deshidratación de los minerales arcillosos que la conforman; por lo tanto, se centró la atención en la caracterización mineralógica y de las propiedades físicas y mecánicas de las arcillolitas.

La evaluación hidrometeorológica, a partir de los análisis , entre 2010 y 2021, de registros históricos de los parámetros: temperatura, humedad y precipitación, indican que la zona de estudio presenta temperatura promedio de 13,62 °C, humedad relativa de 73,29 % y precipitaciones de 57,22 mm mensuales, con al menos 15 días de lluvia durante el mes, mostrando que la precipitación en la zona es alta; por tanto, los taludes de análisis han estado expuestos, periódicamente a precipitaciones por lo menos la mitad del mes; siendo los meses de mayo, octubre y noviembre los de máxima precipitación.

### **12.1.2 Talud 1**

El Talud 1, ubicado al sur de la mina, fue excavado en arcillolitas de color café rojizo que están meteorizadas por desleimiento en los primeros 40 cm a partir de la cara del talud, la cara posee cobertura vegetal. Este talud tiene inclinación de 48° ( $\beta_T$ ), altura total de 7 m, con una berma inferior de 3,5 m de ancho y una superior de 7,3 m. Este talud fue conformado aproximadamente en el año 2012. Se determinó que, en este talud, el espesor de la capa de la arcillolita particularizada por el desleimiento (tipo suelo) es de 26 cm, el espesor de la capa de la arcillolita afectada por desleimiento se encuentra a más de 40 cm y que, después de una profundidad de 1,59 m se puede encontrar la arcillolita levemente afectada por la meteorización la cual presenta una buena resistencia. En la berma superior del talud se determinó una franja de meteorización entre 0,8 y 0,9 m.

Los puntos de control sobre la cara del Talud 1 evidenciaron una disminución leve pero progresiva en la longitud libre de cada varilla; por tanto, el talud estaba experimentando ciclos de expansión y contracción, no procesos de erosión o depositación. Los resultados de laboratorio, de la caracterización de las arcillolitas mediante ensayos de expansión libre

y el análisis de la composición mineralógica, usando la técnica de difracción de rayos X, evidenciaron que en la cara del talud si estaba ocurriendo un proceso de expansión-contracción y que uno de los minerales principales que componen estas arcillolitas es la esmectita, específicamente la montmorillonita que es uno los minerales arcillosos más expansivos. La concentración de montmorillonita que se encontró fue de 32,5 % en la parte más superficial del talud y de 11 a 18,3% hacia profundidad.

El análisis mineralógico de las muestras sacadas de la berma superior del Talud 1, indicaron que los principales minerales que componen las arcillolitas café rojizo son el cuarzo y los minerales arcillosos, la esmectita (11%) y la vermiculita (12,3%). Adicionalmente, se evidencio que para la arcillolita ya desleída y particularizada (suelo), el contenido de la esmectita es mayor (32,5%) en comparación a la arcillolita con leve meteorización (11%), lo cual corroboró la modificación (incremento) que está presentando este material en términos de la variación en su composición mineralógica y principalmente en la proporción de los minerales arcillosos expansivos, los cuales incrementan el potencial de expansión de la roca.

En búsqueda de una correlación entre la composición mineralógica de las arcillolitas y los ensayos mecánicos de laboratorio que se usan para determinar el potencial expansivo de este material, se seleccionó el índice de expansión libre. Los resultados de los ensayos indican que, en las arcillolitas afectadas por desleimiento fuerte (suelo) y en las arcillolitas con desleimiento leve (roca), el nivel de expansión es bajo, lo cual no refleja la realidad medida en los puntos de control (varillas) instalados en el talud ni con la cantidad del mineral arcilloso montmorillonita que está presente en la composición mineralógica de estas arcillolitas.

El potencial de expansión determinado mediante el índice de expansión libre no está caracterizando adecuadamente a la arcillolita, porque su estimación no concuerda con lo reflejado a través del límite líquido, límite plástico y lo evidenciado en el contenido de esmectita en cada muestra y las mediciones hechas en el terreno. Ante esta incoherencia entre resultados, es importante revisar con otro tipo de ensayo de expansividad y profundizar en el tema de la micro porosidad el cual está directamente relacionada. Además, es esencial promover la ejecución de futuras investigaciones.

Bajo la hipótesis simple de que el proceso de meteorización por desleimiento es lineal, se calcularon unas tasas de desleimiento, obteniéndose que en la cara del talud la tasa de desleimiento es de 18 cm /año y en la berma superior de 9 cm /año.

Para avanzar en la comprensión del proceso de desleimiento es necesario conocer las características de la porosidad, la fuerza de unión del grano, las propiedades petrofísicas y el grado de rotura. Para este caso es desconocido el detalle de la porosidad, que depende del volumen de poros, el contenido de agua y la permeabilidad, lo cual corresponde al campo microscópico, por tanto, escapa del alcance del presente Trabajo Final de Maestría.

Se propone el parámetro *intensidad de desleimiento* para ser desarrollado en posteriores investigaciones, este parámetro se fundamenta en el grado de fragmentación por desleimiento de la roca. Esta intensidad de desleimiento se cuantifica mediante ensayos de granulometría a muestras tomadas a diferentes profundidades a partir de la cara de la superficie expuesta. Se espera que la intensidad del proceso de desleimiento sea muy rápida en la superficie del terreno donde queda expuesta la arcillolita a la acción directa de la lluvia y el sol (humedecimiento-secado), y que cuando la acción de la lluvia y el sol deja de ser tan directa, el desleimiento disminuya su intensidad hasta una profundidad Z donde su efecto es casi cero.

La caracterización física y geomecánica realizada a la arcillolita particularizada (suelo) del Talud 1 mostró que, según la carta de plasticidad de Casagrande, el material se cataloga como una arcilla de baja plasticidad. La fracción de finos es de 92,7% (arcillas y limos) y la fracción de arena de 7,35%. Adicionalmente, se realizó el ensayo de corte directo a la arcillolita particularizada, para lo cual se reconfirmaron las muestras de bolsa, teniendo como base para la reconfirmación el peso unitario de los fragmentos intactos que se pudieron recolectar, dada la dificultad de muestreo en este tipo de material.

Se realizó el ensayo de índice de desleimiento-durabilidad (SDI) a la arcillolita con leve meteorización con el propósito de caracterizar la resistencia a este proceso. El índice obtenido (SDI) fue de 6, el cual clasifica a la roca en una durabilidad muy baja, donde el material después del ensayo presenta una gran reducción en el tamaño de los fragmentos y una alta desintegración. Lo cual confirmo lo encontrado en la literatura, es decir el

desleimiento en condiciones naturales de campo es un fenómeno a largo plazo en comparación con las pruebas de laboratorio que son a corto plazo, lo que lleva a resultados diferentes.

### 12.1.3 Talud 2

El Talud 2 está ubicado al sur de la mina, no presenta cobertura vegetal. Está compuesto por arcillolitas grises y café rojizo con una inclinación de estratos ( $\beta E$ ) de  $57^\circ$  hacia el SE. Exhibe una meteorización por desleimiento con el desarrollo de una delgada capa en la cara del talud. Se encuentra afectado por el efecto erosivo del agua de escorrentía, la cual fluye libremente por la cara, erosionando una parte del material meteorizado en forma de surcos y cárcavas. Por tanto, la roca blanda se ha convertido en suelo que es erosionado, transportado y acumulado en la base del talud. Este talud fue conformado aproximadamente en el año 2017, tiene orientación N  $35^\circ$  E, inclinación de  $40^\circ$  ( $\beta T$ ) hacia el NW, altura de 19 m, posee una berma inferior de 5,0 m.

En la cara del Talud 2 se midió un espesor de 10 cm para la capa de material particularizado (tipo suelo), la cual hace parte del perfil desarrollado por el desleimiento; el espesor de la roca afectada por el desleimiento menos severo es aproximadamente de 15 cm; después de esta profundidad (25 cm) se encuentra la roca levemente meteorizada, por tanto, posee una buena resistencia.

Este talud está afectado por el proceso de erosión concentrada en desarrollo del cual el agua de escorrentía generó surcos y cárcavas en las arcillolitas. Para cuantificar la dinámica de acumulación del sedimento desprendido del talud, en cada punto del control se midió el material que se depositó en la base del talud, obteniendo los siguientes volúmenes:

- En el punto de control 1 se depositó un volumen entre  $0,30 \text{ m}^3$  y  $0,31 \text{ m}^3$  en diferentes periodos, para los cuales se calculó un caudal de  $8,33 \text{ cm}^3/\text{h}$ , asumiendo que el proceso es constante.
- Para el punto de control 2, se depositó un volumen entre  $0,16 \text{ m}^3$  y  $0,34 \text{ m}^3$  en diferentes periodos, para los cuales se calculó un caudal de  $267,86 \text{ cm}^3/\text{h}$ , asumiendo que el proceso es constante.

- En el punto de control 3, se depositó un volumen entre 0,48 m<sup>3</sup>, 0,74 m<sup>3</sup>, 1,33 m<sup>3</sup> y 2,70 m<sup>3</sup> en diferentes periodos, para los cuales se calculó un caudal de 386,90 cm<sup>3</sup>/h, 847,70 cm<sup>3</sup>/h y 1630,95 cm<sup>3</sup>/h, respectivamente, asumiendo que el proceso es constante.

Con base en las mediciones realizadas y los diferenciales de profundidad (de los surcos), calculados en cada periodo, se procedió a determinar tasas de depositación y de erosión aproximadas en cada punto de control:

- Para el punto de control 1, se calcularon tasas de depositación entre 0,05 cm/día hasta 0,11 cm/día y tasas de erosión entre 0,11 cm/día y 0,72 cm/día.
- En el punto de control 2, se calcularon tasas de depositación entre 0,05 cm/día hasta 0,07 cm/día y tasas de erosión entre 0,17 cm/día y 0,43 cm/día
- Para el punto de control 3, se calcularon tasas de depositación entre 0,13 cm/día hasta 0,18 cm/día y una tasa de erosión de 0,41 cm/día.

La diferencia entre la tasa de depositación y la de erosión indica que un volumen importante del sedimento desprendido del talud es transportado por el agua de escorrentía, en suspensión y disolución, hacia afuera del área de influencia de cada punto de control.

La caracterización física y geomecánica realizada a la arcillolita particularizada (suelo) del Talud 2 mostró que, según la carta de plasticidad de Casagrande, el material se cataloga como una arcilla de baja plasticidad. La fracción de finos es de 99% (arcillas y limos) y la fracción de arena de 1%. Adicionalmente, se realizó el ensayo de corte directo sobre la arcillolita particularizada, para lo cual se reconfirmaron las muestras en bolsa, teniendo como base para la reconfirmación el peso unitario de los fragmentos intactos que se pudieron recolectar.

Se realizó el ensayo de índice de desleimiento-durabilidad (SDI) a la arcillolita con leve meteorización, el índice obtenido (SDI) fue de 6, igual que en la muestra del Talud 1.

El análisis mineralógico de las muestras de arcillolita del Talud 2, reporta que los principales minerales que la componen son: el cuarzo, la caolinita, la esmectita y la vermiculita, siendo estos tres últimos minerales arcillosos, siendo los dos últimos de comportamiento expansivo.

De las muestras ubicadas en la parte superior del Talud 2, la diferencia de contenido de montmorillonita entre la arcillolita particularizada y la arcillolita con leve meteorización (roca) corrobora la relación entre el desleimiento que presenta el material y su composición mineralógica.

En este talud al igual que en el Talud 1, el índice de expansión libre indica que para la arcillolita particularizada (suelo) y la arcillolita levemente meteorizada (roca) el nivel de expansión es bajo, calificación que no corresponde con la cantidad de mineral arcilloso montmorillonita que está presente en la composición mineralógica de estas arcillolitas.

La predicción de la expansión calculada a través de los resultados de los límites líquido y plástico clasificaron a la arcillolita particularizada en un nivel de expansión medio, lo cual reafirma que la estimación mediante el índice de expansión libre no concuerda con lo evidenciado en el contenido de esmectita en cada muestra.

Con respecto a los dos taludes analizados, se encontró que:

En el Talud 1 se evidenció que en la arcillolita particularizada (suelo) ubicada en la berma superior, a profundidad 0,05 m, presenta un mayor contenido de esmectita en comparación con la muestra de arcillolita particularizada (suelo) ubicada a 0,09 m de profundidad en la parte alta del Talud 2, lo cual confirma dos cosas: la primera, la dinámica erosiva que afecta al Talud 2 hace que la meteorización por desleimiento se vea interrumpida por el agua de escorrentía; segundo, la edad de conformación de los taludes se ve reflejada en el contenido de minerales arcillosos especialmente en los de carácter expansivo.

De igual manera se evidenció un contraste en los resultados de corte directo sobre la arcillolita, así: en el Talud 1 la cohesión es casi un 50% menor (550 kPa) con respecto a la del Talud 2 (1100 kPa). Es probable que esta diferencia esté relacionada al tiempo de conformación de cada uno de los taludes; dado que el Talud 1 ha estado expuesto mayor tiempo (9 años) a la meteorización con relación al Talud 2 (4 años). Esta característica fue planteada en el marco teórico por algunos de los autores que han trabajado el tema del desleimiento.

El detalle con el cual se caracterizan las rocas blandas sedimentarias en muchos casos se centra únicamente en las propiedades físicas y algunas geomecánicas, dejando de lado aspectos fundamentales que se pueden definir aplicando análisis microscópicos a la roca, tales como: la composición mineralógica, las propiedades petrográficas, la porosidad, la capilaridad entre otras, las cuales son variables importantes para entender los procesos de meteorización que las afectan; más aún cuando en la mayoría de los casos son las rocas blandas las que determinan la resistencia del macizo rocoso con heterogeneidad litológica.

El análisis de la meteorización física por desleimiento es una actividad que requiere de tiempo (desde pocos meses hasta años) para que su efecto sea notorio, es decir, se hayan generado los problemas de estabilidad a nivel local o global. Por lo tanto, es importante profundizar más en el estudio de este tema debido a que lo evidenciado en la mina Los Ajos y en algunos taludes viales es una pequeña muestra de lo que sucede en muchas laderas y taludes en la topografía de las montañas de Colombia. El apropiamiento de este tema permitirá tener el conocimiento y las herramientas de análisis que permitan diseños geotécnicos ajustados lo más cercanos a la realidad y de manera paralela evitar sobrecostos en obras de infraestructura.

## **12.2 Recomendaciones**

Con base en el alcance del presente Trabajo Final de Maestría, no fue posible analizar otras variables que en el desarrollo de la investigación comenzaron a ser importantes para entender mejor el proceso de meteorización física por desleimiento.

A continuación, se destacan una serie de aspectos que podrían ser motivo de futuras investigaciones para complementar la investigación realizada.

- Conocer, a nivel microscópico, características tales como: porosidad, la fuerza de unión del grano, las propiedades petrofísicas y el grado de rotura, aspectos que permitirían entender adecuada el proceso que se está desarrollando al interior de la roca.

- Determinar qué tipo de ensayo de expansividad permite caracterizar de una manera adecuada y representativa el carácter expansivo de las arcillolitas de la Formación Bogotá.
- Dentro de la heterogeneidad litológica de macizos rocosos, hacer la caracterización mineralógica y de propiedades físicas y mecánicas de la roca dura, con el objetivo de comprender de forma completa la interacción roca dura- roca blanda.
- Dentro de la caracterización de las rocas blandas para fines geotécnicos, incluir la caracterización mineralógica usando la técnica de difracción de rayos X y hacer la cantidad de ensayos físicos y mecánicos necesarios para la caracterización de la roca particularizada y de la roca con leve meteorización.
- Generar una amplia base de datos de rocas sedimentarias blandas que contengan valores de caracterización física y geomecánica, propiedades petrofísicas, composición mineralógica, expansividad entre otras con el fin de establecer correlaciones de las diferentes intensidades de desleimiento con las propiedades físicas y mecánicas para intentar predecir comportamientos.

Con base en lo observado en los taludes mineros, se recomienda la protección de taludes conformados en rocas blandas como arcillolitas o litologías similares con la implementación de coberturas vegetales en taludes finales, las cuales reducen los efectos directos de la meteorización. Es importante contar con una buena red de drenaje, tanto en taludes de trabajo como en los finales, para evitar la exposición directa a la acción del agua escorrentía, ya que a mediano y largo plazo se desarrollarán procesos de erosión concentrada de tipo laminar, surcos, y cárcavas. Adicionalmente, es importante tener un buen diseño geotécnico de estabilidad de los taludes de trabajo y finales.

## 13. Bibliografía

- Ayala Carcedo, F. J., Ferrer Gijon, M., Oteo Mazo, C., & Salinas Rodriguez, J. L. (1986). Mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en España a escala 1:1.000.000. In Instituto Geológico y Minero de España (Ed.), *Serie: Geológica Ambiental Instituto Geológico y Minero de España*.
- Abderahman, N. (2007). Evaluating the influence of rate of undercutting on the stability of slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(3), 303–309. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0078-6>
- Acosta, & Ulloa, C. (1998). *Memoria explicativa de la geología de la plancha 246 Fusagasugá*.
- Ahmad, I., Hussain, M., Seo, K. S., & Choa, Y. H. (2010). Synthesis and characterization of polymer–nanoclay conductive nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(1), 314–319. <https://doi.org/10.1002/APP.31541>
- Alejano Monge, L., & Ramírez Oyanguren, P. (2007). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*.
- ASTM. (1990). Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks (D4644). In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 4.08* (pp. 863–865).
- Ayala Carcedo, F. J., Ferrer Gijon, M., Oteo Mazo, C., & Salinas Rodriguez, J. L. (1986). Mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en España a escala 1:1.000.000. In Instituto Geológico y Minero de España (Ed.), *Serie: Geológica Ambiental Instituto Geológico y Minero de España*.
- Bayona, G. A., Montenegro Castillo, O. C., Cardona Molina, A., Jaramillo, C., Lamus, F., Morón, S. E., Quiroz, L., Ruiz, M. C., Valencia, V., Parra, M., & Stockli, D. (2010). Estratigrafía, procedencia, subsidencia y exhumación de las unidades paleógenas en el Sinclinal de Usme, sur de la zona axial de la Cordillera Oriental. *Departamento de Geociencias*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/33921>
- Behnia, M., Rahmani, A., & Zabihallah, S. (2018). Selecting Equivalent Strength for Intact Rocks in Heterogeneous Rock Masses Selecting Equivalent Strength for Intact Rocks in

- Heterogeneous Rock Masses. *Geotechnical and Geological Engineering*, January. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0440-4>
- Blatt, H. (1982). Sedimentary Petrology. *Sedimentary Petrology*. <https://doi.org/10.1201/9780203749883-4>
- Brunsdon, D. (1979). Weathering. In C. Embleton & John. B. Thornes (Eds.), *Process in Geomorphology* (pp. 73–130). Edward Arnold.
- Cai, J., Du, J., Song, M., Lei, T., Wang, X., & Li, Y. (2022). Control of clay mineral properties on hydrocarbon generation of organo-clay complexes: Evidence from high-temperature pyrolysis experiments. *Applied Clay Science*, 216, 106368. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2021.106368>
- Cano, M., & Tomás, R. (2016). Proposal of a New Parameter for the Weathering Characterization of Carbonate Flysch-Like Rock Masses: The Potential Degradation Index (PDI). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2623–2640. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0915-2>
- Chandra, R. (1970). *Slake-durability test for rocks*. London University.
- Dick, J. C., & Shakoor, A. (1992). Lithological controls of mudrock durability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 25(1), 31–46. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1992.025.01.03>
- Dick, J. C., Shakoor, A., & Wells, N. (1994). A geological approach toward developing a mudrock-durability classification system. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(1), 17–27. <https://doi.org/10.1139/t94-003>
- Duffaut, P. (1981). *Structural Weaknesses In Rocks And Rock Masses Tentative Classification And Behaviour*. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISRM-IS-1981-016>
- Duque Escobar, G. (2019). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia- Sede Manizales.
- Erguler, Z. A., & Ulusay, R. (2009). Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: Disintegration index test and a new durability classification chart. *Engineering Geology*, 105(1–2), 11–19. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2008.12.013>
- Fookes, P. G., Gourley, C. S., & Ohikere, C. (1988). Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1988.021.01.03>
- Franklin, J. A., & Chandra, R. (1972). The slake-durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(3), 325–328. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90001-0)
- Gamble, J. C. (1971). *Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks*. University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Gautam, T. P., & Shakoor, A. (2013). Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions. *Engineering Geology*, 166, 17–25. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2013.08.003>
- Geología y Geotecnia S.A.S. (2014). *Estudio geotécnico y de riesgos geotécnicos*
- Gökceoğlu, C., Ulusay, R., & Sönmez, H. (2000). Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*, 57(3–4), 215–237. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00031-4)
- Goodman, R. E. (1993). *Engineering geology: rock in engineering construction*. J. Wiley. <https://www.wiley.com/en-co/Engineering+Geology:+Rock+in+Engineering+Construction-p-9780471544241>
- Gozali Balkanloo, P., Poursattar Marjani, A., Zانبیلی, F., & Mahmoudian, M. (2022). Clay mineral/polymer composite: characteristics, synthesis, and application in Li-ion batteries: A review. *Applied Clay Science*, 228, 106632. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2022.106632>
- Grim, R. E. (1962). *Applied Clay Mineralogy* (McGraw-Hill, Ed.).
- Hack, R., & Huisman, M. (2002). *Engineering Geology for Developing Countries-Proceedings of 9 th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*.
- Hubach, E. (1931). *Geología petrolífera del Departamento de Norte de Santander* (Ministerio de Minas y Petróleos & Servicio Geológico Nacional, Eds.).
- Hubach, E. (1957). Estratigrafía de la sabana de Bogotá y alrededores. *Boletín Geológico*, 5, 93–112. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/BOLGEOL5.2.1957.286>
- Hudec, P. P. (1997). Changes in engineering properties of weak and weathered rock with time. *Characterization of Weak and Weathered Rock Masses. Special Publication*, 9, 53–70.
- Hudson, J. (1993). *Comprehensive rock engineering: principles, practice & projects* (Vol. 1). Pergamon Press.
- ISRM. (1981). *Rock characterization. In: Brown, E.T. (Ed.), testing and monitoring-ISRM suggested methods*. Pergamon Press for the Commission of Testing Methods, International Society for Rock Mechanics. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90524-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90524-6)
- Julivert, M. (1963). Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. *Boletín de Geología*, 13–14, 5–102. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/5782>
- Kanji, M. A. (2014). Critical issues in soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3), 186–195. <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2014.04.002>

- Liang, W., Yang, C., Zhao, Y., Dusseault, M. B., & Liu, J. (2007). Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(3), 400–411. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2006.09.007>
- Lydzba, D., Pietruszczak, S., & Shao, J. F. (2003). On anisotropy of stratified rocks: homogenization and fabric tensor approach. *Computers and Geotechnics*, 30(4), 289–302. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(03\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(03)00004-1)
- Marinos, P., & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch. In *Bull. Engg. Geol. Env* (Vol. 60). <http://www.geoplanning.it/test/wp-content/uploads/2012/02/Estimating-the-geotechnical.pdf>
- Millar, C. E., Foth, H. D., & Turk, F. M. (1965). *Fundamentals of Soil Science*. (Wiley, Ed.; 4th ed.). John Wiley & Sons.
- Miščević, P., & Vlastelica, G. (2014). Impact of weathering on slope stability in soft rock mass. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3), 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.03.006>
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (John Wiley & Sons, Ed.; Vol. 3).
- Mohamed, Z., Mohamed, K., & Awang, H. (2007). *Empirical strength models, elastic modulus and stiffness of weathered sandstone and shale as a composite rock*. 12.
- Mohamed, Z., Mohamed, K., & Cho, G.-C. (2007). Uniaxial compressive strength of composite rock material with respect to shale thickness ratio and moisture content. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 12, 07–50.
- Moriwaki, Y., & Mitchell, J. K. (1977). *The role of dispersion in the slaking of intact clay* (J. L. Sherard & R. S. Decker, Eds.; pp. 287–302). Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, A.S.T.M. Special Technical Publication 623, ASTM.
- Nicholson, D. T. (2000). *Deterioration of excavated rock slopes : mechanisms, morphology and assessment*.
- Nickmann, M., Spaun, G., & Thuro, K. (2006). Engineering geological classification of weak rocks. *The Geological Society of London* .
- Okamoto, T. (1993). Testing methods of indurated soils and soft rocks: suggestions and recommendations. *Technical Committee on Indurated Soils and Soft Rocks, Intern. Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- Peltier, L. C. (1950). The Geographic Cycle in Periglacial Regions as It is Related to Climatic Geomorphology. *Annals of the Association of American Geographers*, 40(3), 214. <https://doi.org/10.2307/2561059>

- Pepe, G., Piazza, M., & Cevasco, A. (2015). Geomechanical characterization of a highly heterogeneous flysch rock mass by means of the GSI method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), 465–477. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0642-4>
- Pousada Presa, E. (1982). *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Universidad Politecnica de Madrid.
- Rincon, O., Shakoor, A., & Ocampo, M. (2016). Investigating the reliability of H/V spectral ratio and image entropy for quantifying the degree of disintegration of weak rocks. *Engineering Geology*, 207, 115–128. <https://doi.org/10.1016/J.ENGCEO.2016.04.020>
- Rodrigues, J. (2001). Swelling behaviour of stones and its interest in conservation. An appraisal. *Materiales de Construccion*. DOI: 10.3989/Mc.2001.V51.I263-264.363, 51, 183–195.
- Sadisun, I. A., Shimada, H., Ichinose, M., & Matsui, K. (2005). Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23(3), 199–218. <https://doi.org/10.1007/s10706-003-6112-6>
- Seedsman, R. W. (1993). Characterizing Clay Shales. *Comprehensive Rock Engineering*. Vol. 3, 151–165. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50014-8>
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope materials and processes*. (Press Inc, Ed.; Second Edition). Oxford University .
- Selen, L., Panthi, K. K., Mørk, M. B., & Sørensen, B. E. (2021). Compositional Features and Swelling Potential of Two Weak Rock Types Affecting Their Slake Durability. *Geotechnics 2021*, Vol. 1, Pages 172-191, 1(1), 172–191. <https://doi.org/10.3390/GEOTECHNICS1010009>
- Selen, L., Panthi, K. K., & Vistnes, G. (2019). An analysis on the slaking and disintegration extent of weak rock mass of the water tunnels for hydropower project using modified slake durability test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 1919–1937. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01656-2>
- Shakoor, A. (1995). *Slope stability considerations in differentially weathered mudrocks* (pp. 131–138). <https://doi.org/10.1130/REG10-p131>
- Sharma, R. S. (1998). *Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays* [University of Oxford]. <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:6ee59b08-357a-4d2d-96f1-c5987465f437>
- Taylor, R. K. (1988). Coal Measures mudrocks: composition, classification and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 21(1), 85–99. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1988.021.01.06>

- Taylor, R. K., & Spears, D. A. (1970). The breakdown of British Coal Measure rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 7(5), 481–501. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90002-1)
- Tziallas, G. P., Saroglou, H., & Tsiambaos, G. (2013). Determination of mechanical properties of flysch using laboratory methods. *Engineering Geology*, 166, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.002>
- Veniale, F., Setti, M., Rodriguez-Navarro, C., & Lodola, S. (2001). Role of clay constituents in stone decay processes. *Materiales de Construcción*, 2001.
- Vergara, M. R., & Triantafyllidis, T. (2016). Influence of Water Content on the Mechanical Properties of an Argillaceous Swelling Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2555–2568. <https://doi.org/10.1007/S00603-016-0938-8>
- Yue, K., Olson, J. E., & Schultz, R. A. (2016). *Calibration of Stiffness and Strength for Layered Rocks*. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2016-460>