

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**EFFECTO DE LOS CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN LA
SUCCIÓN, DE UN SUELO RESIDUAL DE ANFIBOLITA PROVENIENTE DEL
OCCIDENTE DE MEDELLÍN EN ESTADO NATURAL Y COMPACTADO**

Juliana Patiño Restrepo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2021

**EFFECTO DE LOS CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN LA
SUCCIÓN, DE UN SUELO RESIDUAL DE ANFIBOLITA PROVENIENTE DEL
OCCIDENTE DE MEDELLÍN EN ESTADO NATURAL Y COMPACTADO**

Juliana Patiño Restrepo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería – Geotecnia

Director:

MSc. Oscar Echeverri Ramírez

Codirectora:

Ph.D. Yamile Valencia González

Grupo de Investigación:

Grupo investigación en Geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2021

*A mi padre que desde el cielo guía mis pasos,
a mi madre y mi hermana que son mi motor.*

A Oscar Echeverri mi maestro.

*A todos los que continúan a pesar de las
adversidades.*

Declaración de obra original

Yo Juliana Patiño Restrepo 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.



Fecha: 28 de septiembre de 2021

Agradecimientos

A mi familia porque a pesar de los momentos difíciles siempre me apoyaron y creyeron en mí y en este proyecto.

A mi director Oscar Echeverri Ramírez, por ser mi guía y amigo, porque siempre ha creído en mí y con su paciencia y sabiduría me acompañó en este proceso.

A mi codirectora, Yamile Valencia González, quien me permitió conocer la mecánica de suelos tropicales y quien fue fundamental en el desarrollo de la investigación, ya que sus aportes permitieron llevar este trabajo a buen puerto.

A Eugenio Restrepo por acompañarme en las labores de muestreo y transporte de muestras.

A Esteban Cifuentes por su apoyo y colaboración incondicional.

A Andrés Serna y al laboratorio de Geotecnia y Pavimentos, por facilitar la realización de toda la parte experimental en sus espacios y equipos.

Resumen

Efecto de los ciclos de humedecimiento y secado en la succión, de un suelo residual de anfibolita proveniente del occidente de Medellín en estado natural y compactado

La estabilidad de los taludes se ve afectada por diversidad de fenómenos físicos y químicos, el clima es uno de los factores más relevantes en este aspecto. En las zonas tropicales existen grandes variaciones meteorológicas durante todo el año, y son los suelos superficiales los más susceptibles a cambio de humedad y temperatura que repercuten en su comportamiento y resistencia.

Para evaluar la influencia de estas variaciones, se desarrollaron varios ciclos de humedecimiento y secado para el suelo de un talud vial localizado al occidente del Valle de Aburra. Las pruebas de laboratorio se realizaron inicialmente en muestras inalteradas y compactadas y posteriormente en muestras sometidas a humedecimiento por goteo y secado al horno a 30°C. Se realiza inicialmente la caracterización física y química del suelo y se mide la curva de succión por el método del papel filtro, la permeabilidad y los parámetros de resistencia para cada ciclo de humedecimiento y secado. Los resultados mostraron que la succión del suelo disminuye gradualmente con el número de ciclos de humedecimiento y secado para ambas muestras, más notorio en la natural que en la compactada ya que esta última tiene una estructura con poros de menor tamaño y las variaciones se perciben en menor grado.

Los resultados de la investigación incluyen un análisis de estabilidad de taludes donde se incluyen las propiedades hidráulicas y de resistencia de ambas muestras, obteniéndose una disminución del factor de seguridad después de los ciclos de humedecimiento y secado, en comparación con la muestra inicial, tanto para la muestra natural y compactada. Con los resultados se da un paso adelante en el estudio de los movimientos en masa detonados por lluvia ya que a través de la metodología experimental por la cual se recrean los ciclos de humedecimiento a partir de datos de campo como humedad, temperatura y precipitación, se puede anticipar la variación en los parámetros que influyen en la estabilidad del talud.

Palabras clave: Succión, suelos parcialmente saturados, estabilidad de taludes, humedecimiento-secado.

Abstract

Effect of wetting-drying cycles on a residual amphibolite soil's suction from western Medellin in a natural and compacted state

Slope stability is affected by a variety of physical and chemical phenomena, climate is one of the most relevant factors in this regard. In tropical areas there are great meteorological variations throughout the year, and surface soils are the most susceptible to changes in humidity and temperature that affect their behavior and resistance.

To evaluate the influence of these variations, several moistening and drying cycles were developed for the soil of a road slope located west of the Aburra Valley. Laboratory tests were initially performed on undisturbed and compacted samples and subsequently on samples subjected to drip wetting and oven drying at 30 ° C. The physical and chemical characterization of the soil is initially carried out and the suction curve is measured by the filter paper method, the permeability and the resistance parameters for each wetting and drying cycle. The results showed that the soil suction gradually decreases with the number of wetting and drying cycles for both samples, more noticeable in the natural than in the compacted sample since the latter has a structure with smaller pores and the variations are perceived in less.

The results of the research include a slope stability analysis that includes the hydraulic and resistance properties of both samples, obtaining a decrease in the safety factor after the wetting and drying cycles, compared to the initial sample, both for the natural and compacted sample. With the results, a step forward is taken in the study of mass movements triggered by rain since through the experimental methodology by which the moistening cycles are recreated from field data such as humidity, temperature and precipitation, it is can anticipate variation in parameters that influence slope stability.

Keywords: Suction, partially saturated soils, slope stability, wetting-drying.

Contenido

	Pág.
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	1
2.1 Objetivo General	1
2.2 Objetivos Específicos	1
3. Estado del arte.....	2
3.1 Movimientos en masa detonados por lluvia	2
3.2 Mecánica de suelos parcialmente saturados	4
3.3 Compactación de suelos	6
3.4 Succión del suelo	7
3.5 Medición de la Succión del suelo	8
3.6 Curva de Succión	10
3.7 Histéresis en la curva de Succión.....	13
3.8 Permeabilidad de los suelos no saturados	14
3.9 Resistencia al corte de los suelos	15
3.10 Antecedentes	16
4. Descripción de la Zona de Estudio	18
4.1 Localización	18
4.2 Geología Local	19
5. Metodología.....	21
5.1 Exploración	21
5.2 Ciclos de Humedecimiento y secado.....	22
5.3 Ensayos de Laboratorio.....	23
5.3.1 Clasificación del suelo	23
5.3.2 Doble hidrómetro	23
5.3.3 Miniatura Compactada Tropical MCT expedita	24
5.3.4 Compactación Proctor Estándar	25
5.3.5 Δ pH del Suelo en KCl y en agua.....	26
5.3.1 Permeabilidad por el método de cabeza constante.....	26
5.3.2 Balanza Hidrostática.....	29
5.3.3 Corte Directo	30
5.4 Topografía del área de estudio.....	30
6. Resultados y análisis.....	32

6.1	Clasificación del suelo	32
6.1.1	Humedad Natural y Gravedad Específica	32
6.1.2	Granulometría del suelo natural.....	33
6.1.3	Límites de Consistencia del suelo natural.....	34
6.1.4	Clasificación rápida MCT del suelo natural	36
6.1.5	Compactación Proctor Estándar	36
6.1.6	ΔpH del Suelo en KCl y en agua del suelo natural.....	36
6.1.7	Difracción de Rayos X	37
6.1.8	Análisis de Imagen	38
6.1.9	Succión del Suelo	41
6.1.10	Corte directo	47
6.1.11	Permeabilidad del suelo.....	51
6.1.12	Estabilidad de taludes.....	52
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	68
7.1	Conclusiones.....	68
7.2	Recomendaciones.....	70
	Bibliografía	71

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1: Mecanismo de falla por reducción de succión	3
Figura 3-2: Perfil de meteorización sobre una ladera de morfología convergente bajo lluvia.....	4
Figura 3-3: Zonas de un perfil de suelo.....	5
Figura 3-4 Cambios en las propiedades del suelo por la compactación (a) peso unitario seco, (b) conductividad hidráulica y (c) esfuerzo de compresión no confinado con contenido de humedad	7
Figura 3-5: Principio de operación de los discos con alto valor de entrada.....	8
Figura 3-6 Zonas de la curva característica.....	11
Figura 3-7: Histéresis del suelo por humedecimiento y secado	13
Figura 4-1 Localización del Sitio de interés.....	19
Figura 4-2: Geología de la zona	20
Figura 5-1: Exploración de campo.....	21
Figura 5-2: Radiación solar en el sitio de interés	22
Figura 5-3: Ciclos de Humedecimiento y Secado	23
Figura 5-4 Carta de Clasificación Rápida MCT	25
Figura 5-5 Ensayo de permeabilidad con cabeza constante	27
Figura 5-6 Balanza Hidrostática.....	30
Figura 5-7 Perfil topográfico del sitio de interés	31
Figura 6-1 Curva Granulométrica por tamizado del suelo natural	33
Figura 6-2 Curvas granulométricas con agua y hexametáfosfato de sodio del suelo natural.....	34
Figura 6-3 Carta de plasticidad de Casagrande.....	34
Figura 6-4 Recta de humedad del suelo natural	35

Figura 6-5 Cambio volumétrico a través de los ciclos de humedecimiento y secado (muestra natural (a) y compactada (b))	35
Figura 6-6 Curvas de compactación	36
Figura 6-7 Difractograma del suelo natural	38
Figura 6-8 Imágenes microscópicas Muestra Natural	38
Figura 6-9 Imágenes microscópicas Muestra Compactada.....	39
Figura 6-10 Agrietamiento en el suelo en el talud natural y en las muestras.....	41
Figura 6-11 Curvas Características para los ciclos de Humedecimiento y secado.....	42
Figura 6-12 Variación de la succión para diferentes ciclos de humedecimiento y secado.	44
Figura 6-13 Variación de la succión a través de los ciclos de humedecimiento y secado en la humedad natural. (a) Suelo Natural (b) Suelo Compactado.....	46
Figura 6-14 Envolventes de falla Suelo Natural (a) y Compactado (b).....	47
Figura 6-15 Envolventes de falla extendidas	48
Figura 6-16 Curvas de conductividad hidráulica Muestra Natural	51
Figura 6-17 Curvas de conductividad hidráulica Muestra Compactada.....	52
Figura 6-18 Geometría del talud	53
Figura 6-19 Factor de seguridad Suelo Natural	54
Figura 6-20 Factor de seguridad Suelo Compactado.....	57
Figura 6-21 Factor de seguridad Suelo Natural Día 3.....	60
Figura 6-22 Factor de seguridad Suelo Compactado Día 3	63

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Ensayos de medición de succión	10
Tabla 3-2 Relación entre el coeficiente de permeabilidad y Succión matricial.....	14
Tabla 6-1 Humedad Natural del Suelo	32
Tabla 6-2 pH en Agua y KCl.....	37
Tabla 6-3 Variación del área de vacíos a partir de imágenes.....	41
Tabla 6-4 Valor de entrada de Aire	47
Tabla 6-5 Parámetros de Resistencia	48
Tabla 6-6 Resistencia al corte del suelo para cada ciclo de humedecimiento y secado.	51
Tabla 6-7 Variación del factor de seguridad para la muestras Natural y Compactada a través de los Ciclos de Humedecimiento y Secado.	67

1.Introducción

El clima es un factor que ejerce influencia en la estabilidad de taludes, y en particular en la zona tropical donde la variación meteorológica es muy alta durante todo el año. Fenómenos como las sequías y los periodos de lluvia generan grandes variaciones de humedad y temperatura en los suelos superficiales de regiones tropicales. La mayoría de las ocurrencias de deslizamientos de tierra están asociadas con el tipo de suelo residual y las capas freáticas profundas (Huat et al., 2006). En general se ha reconocido que la mayoría de los deslizamientos en suelos residuales no saturados se inducen por infiltración de agua lluvia ((Sweeney & Robertson, 1979), (Chipp et al., 1982), (Pitts, 1983), (Pitts, 1984), (Pitts & Cy, 1987), (Brand et al., 1983), (Brand, 1984), (Tan et al., 1987), (Johnson & Sitar, 1990), (Lim et al., 1996), (Ng & Shi, 1998),(Aristizábal Giraldo et al., 2016a) (Fredlund et al., 2012).

Considerando que la fase agua y aire interactúan de forma continua con la estructura del suelo y determinan su comportamiento, se hace necesaria la medición de la propiedad del suelo para retener el agua en su estructura, es decir la succión, que tiene relación con propiedades mecánicas como la resistencia al corte, lo que permite predecir de manera más adecuada el comportamiento del suelo, aportando información útil en los análisis de estabilidad((Fredlund et al., 2012); (Lim et al., 1996), (Rahardjo et al., 1995)). Se considera que la componente de succión (tensión superficial) juega un papel importante en las propiedades mecánicas de los suelos y tiene incidencia especial en los análisis de estabilidad de laderas y análisis de interacción suelo-lluvia. La investigación de estos fenómenos permitirá evaluar las variaciones de succión ante ciclos alternos de humedecimiento y secado, recreando escenarios reales a los que se ven expuestos las laderas y taludes de corte conformados por suelos residuales.

Es importante entonces evidenciar el cambio en la capacidad de retención de agua a medida que se suceden los ciclos de humedecimiento y secado, involucrando también la

variación en el tamaño de los poros del suelo, y en este punto visualizar el cambio en la estructura; lo anterior para generar inquietudes referentes a los cambios físicos, estructurales y mecánicos que sufre el suelo con los procesos de variación de temperatura y humedad.

La presente investigación aborda un campo de la mecánica de suelos que recientemente ha tomado fuerza dentro de la ingeniería geotécnica como es el comportamiento hidromecánico de los suelos en climas tropicales. Se destaca, que si bien se han presentado recientemente adelantos detallando el comportamiento de estos suelos, ((Fredlund et al., 2012); (Blight & Leong, 2012); (Camapun de Carvallo et al., 2015)), sigue existiendo incertidumbre sobre el cambio de las propiedades mecánicas ante la presencia de lluvias y gradientes térmicos como los que se presentan sobre las laderas del valle de Aburrá. Por lo anterior, se aborda el efecto de los ciclos de humedecimiento y secado en la curva de succión de un suelo no saturado, natural y compactado, y su impacto en el factor de seguridad en un modelo de estabilidad de taludes.

Estructura del documento

El documento está compuesto por 7 capítulos como se muestra a continuación:

Los capítulos 1 y 2 presentan una introducción y los objetivos que aborda el presente trabajo.

El capítulo 3 presenta el estado del arte asociado a la línea de investigación de movimientos en masa detonados por lluvias en suelos no saturados, además de información relacionada con la compactación, la succión del suelo y su representación en la curva característica, y como ésta influencia la resistencia al corte de los suelos.

El capítulo 4 presenta la descripción de la zona de estudio y sus características además de una descripción de la geología local.

El capítulo 5 presenta la metodología utilizada en la investigación, incluyendo los ensayos de laboratorio y el modelamiento del talud para la evaluación de su estabilidad incluyendo la succión.

El capítulo 6 presenta los resultados de los ensayos de laboratorio y del modelo de estabilidad desarrollado incluyendo la succión.

El capítulo 7 presenta las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para trabajos posteriores que permitan la ampliación de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Estudiar la influencia de las variaciones de los ciclos de humedecimiento y secado en la succión de un suelo residual de anfibolita proveniente del occidente de Medellín en estado natural y compactado, y analizar su efecto en la estabilidad de taludes.

2.2 Objetivos Específicos

- Proponer una metodología de laboratorio para recrear los ciclos de humedecimiento y secado de un suelo, que se producen por la variación climática.
- Analizar los cambios en las propiedades de un suelo residual del occidente de Medellín, en estado natural y compactado, cuando se somete a ciclos de humedecimiento y secado
- Determinar la curva de succión del suelo y sus cambios para cada ciclo de humedecimiento o secado.
- Plantear un modelo de estabilidad de taludes que incluya la succión del suelo como parámetro de entrada, para observar la influencia de esta variable sobre el factor de seguridad.

3.Estado del arte

3.1 Movimientos en masa detonados por lluvia

Existen múltiples procesos que afectan la estabilidad de los taludes, algunos autores refieren que: “los movimientos en masa ocurren principalmente en respuesta a fuerzas gravitacionales, ayudadas algunas veces por actividad sísmica. La manera como un talud cede ante dichas fuerzas está controlada por una multitud de factores, entre los cuales los más importantes son la geología, la hidrología, la hidráulica, el relieve, el clima y la meteorización” (Skempton & Hutchinson, 1969).

Un elemento crucial en la formación de los suelos es el clima, ya que la temperatura y la precipitación son factores externos que influyen en la mineralogía, el estado de meteorización, la infiltración de agua y su influencia en la movilización de componentes del suelo.(Buol et al., 1983)

Los suelos tropicales desarrollan perfiles de meteorización que alcanzan grandes espesores y según (Hoyos Patiño, 2004), la alteración frecuentemente es tan intensa que el suelo se comporta muy diferente a su material parental, cosa que ocurre en pocas ocasiones en los suelos de otras latitudes; es por esto que el clima del trópico, tiene gran influencia debido a su variabilidad extrema a lo largo del año. Los suelos superficiales son más propensos a cambios de humedad y temperatura, lo que propicia procesos químicos que forman perfiles de gran espesor de suelos residuales no saturados, donde el nivel freático suele ser profundo.

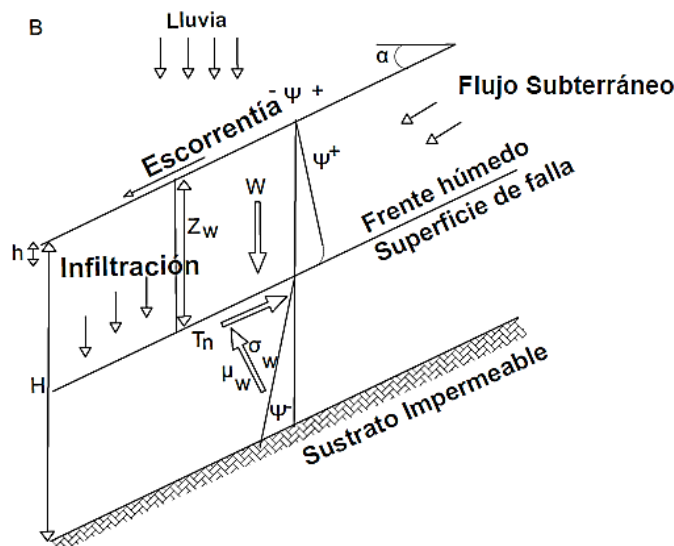
Los mantos superficiales presentan variación en la presión de poros debido a las fluctuaciones en el flujo de agua a través de su estructura; por un lado en época de sequía, la presión de poros es negativa y tiene influencia de la presión atmosférica, en consecuencia la succión matricial aumenta, y ésta a su vez tiene relación con la resistencia al corte de los suelos; si las estaciones secas se prolongan, la succión

desaparece ya que no se presenta el fenómeno de capilaridad por la ausencia del agua. En el lado opuesto, en periodos de lluvia, el agua se infiltra, en este escenario el valor de la presión intersticial negativa se reduce significativamente. En este contexto se puede reducir la resistencia al corte del suelo (Fredlund et al., 2012)

En (Aristizábal Giraldo et al., 2016b) los autores diferencian dos mecanismos de falla para deslizamientos detonados por lluvias propuestos a su vez por (Bishop, 1959). El primero por aumento de la presión de poros positiva, y el segundo por la reducción de la succión, este último se presenta en la .

Figura 3-1.

Figura 3-1: Mecanismo de falla por reducción de succión



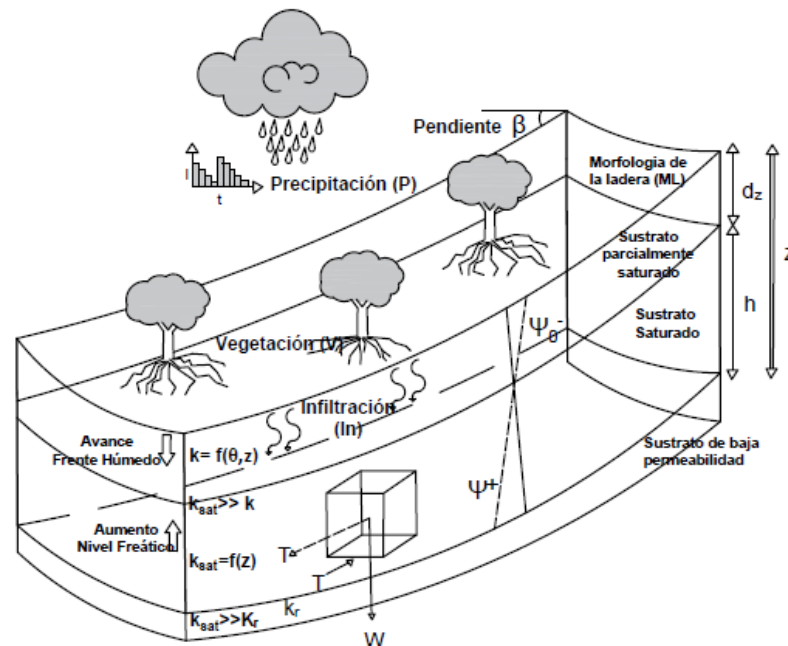
Adaptado de (Aristizábal Giraldo et al., 2016b)

Estas variaciones debidas al clima generan cambios que afectan el comportamiento e inciden en propiedades de resistencia de los materiales y son más influyentes en los mantos superficiales.

Se ha reconocido que la mayoría de los movimientos en masa en estos lugares se inducen por infiltración de agua lluvia (Aristizábal Giraldo et al., 2010), (Barrera Bucio & Garnica Anguas, 2002). La Figura 3-2 muestra la representación esquemática

tridimensional del perfil de meteorización sobre una ladera de morfología convergente bajo lluvia.

Figura 3-2: Perfil de meteorización sobre una ladera de morfología convergente bajo lluvia.¹



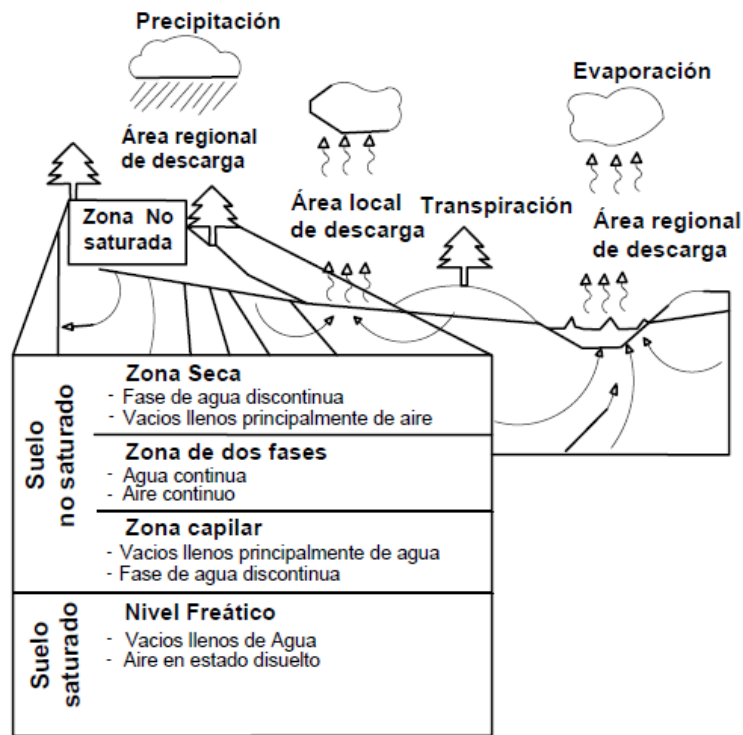
Adaptado de (Aristizábal Giraldo et al., 2010)

3.2 Mecánica de suelos parcialmente saturados

El nivel freático es el punto de separación de diferentes condiciones de suelo según su grado de saturación, por debajo se encuentran los suelos saturados, en la zona más superficial se encuentran suelos secos o con poca cantidad de agua que no es continua y su grado de saturación se acerca a 0%, inmediatamente encima del nivel freático existe una franja capilar, allí la saturación es cercana a 100%; entre la franja capilar y el suelo superficial, hay una zona denominada de dos fases, que es donde el grado de saturación está entre el 20% y el 80% y es allí donde las fases de aire y agua son continuas (zona de dos fases) ((Fredlund et al., 2012) (Figura 3-3)

¹ Donde: P: Lluvia, I: intensidad de la precipitación, Θ : contenido de agua volumétrico, ψ_+ : Presión de poros positiva, ψ_- : Presión de poros negativa o succión, K: permeabilidad, W: peso del suelo, V: vegetación, In: infiltración, β : pendiente de la ladera, τ : resistencia al cortante, Z: profundidad, H: espesor suelo saturado

Figura 3-3: Zonas de un perfil de suelo.



Adaptado de (Fredlund et al., 2012)

Como lo refieren (Barrera Bucio & Garnica Anguas, 2002), el término suelo parcialmente saturado en la práctica de la ingeniería geotécnica, ha tenido varios periodos de estudio, el primero se dio en la década de 1960, el segundo, entre 1965 y 1987 y el último desde 1987 hasta la actualidad.

En el primer periodo, los estudiosos (Bishop, 1959) y (Aitchison & Bishop, 1961), se centraron en el concepto de esfuerzo efectivo que fue modificado para aplicarlo a los suelos no saturados. En el segundo periodo se plantea pasar del uso de una variables de estado de esfuerzos a dos, se usan entonces el esfuerzo compresivo neto (tensión total menos presión de aire en los poros) y la succión (presión de aire en los poros menos

presión de agua en los poros), que sin embargo se consideraron de forma independiente a el comportamiento del cambio de volumen y de la resistencia al corte (Barrera Bucio & Garnica Anguas, 2002).

Finalmente en los últimos tiempos se comenzó a enlazar el comportamiento del cambio de volumen y la resistencia al corte de los suelos no saturados a través de modelos elastoplásticos, ya que las propiedades del suelo se podían representar en funciones matemáticas no lineales, por lo cual se empezaron a usar modelos numéricos iterativos donde la capacidad de cómputo fue relevante, tanto como el mejoramiento de equipos de laboratorio, de tal forma que sea posible medir de manera más exacta las propiedades del suelo y su comportamiento. (Fredlund et al., 2012)

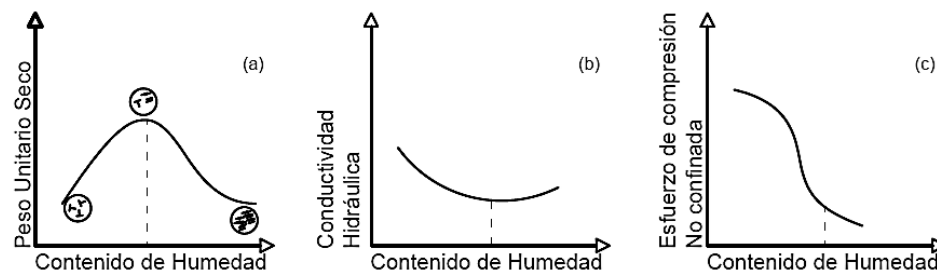
3.3 Compactación de suelos

La compactación es un proceso de mejoramiento mecánico del suelo, que implica la expulsión del aire a partir de la aplicación de energía mecánica; el grado de compactación se mide en términos de su peso unitario seco. El agua actúa como agente lubricante sobre las partículas del suelo y favorece que estas se desplacen una respecto a otra para formar una estructura empaquetada. El peso unitario seco primero aumenta a medida que crece la humedad y después de un punto, los incrementos del contenido de agua generan una disminución del peso unitario, ya que el agua llena los espacios que quedan después de que las partículas se acomodan. El contenido de humedad en el que se alcanza el peso unitario seco máximo se conoce como contenido de humedad óptimo.(Das, 2015)

Con la compactación se producen cambios en la estructura de los suelos cohesivos, estos afectan a su vez propiedades como la resistencia al corte y la permeabilidad, en la Figura 3-4(a), se observa que, si tenemos un suelo compactado en la rama seca, se tendrá una estructura donde la orientación de las partículas es aleatoria. Si se aumenta la humedad de compactación, las partículas se acomodarán en una orientación más paralela, lo que genera que estén más cerca y por tanto es suelo tendrá mayor peso unitario seco; sin embargo, al aumentar el contenido de humedad el peso unitario seco disminuirá debido a que el agua añadida, diluirá la concentración de sólidos por unidad de volumen. La permeabilidad por su parte (Figura 3-4 (b)), presentará un descenso a

medida que aumenta el contenido de agua, cuando el suelo está en la humedad óptima, la permeabilidad llega a un mínimo aproximado y si se agrega más agua, aumentará ligeramente. Finalmente, la resistencia a la compresión en suelos compactados, también disminuirá con el aumento de la humedad y al llegar al contenido de humedad óptima, representará una disminución significativa, en otras palabras, cuando el suelo presenta una estructura floclada es cuando tiene mayor resistencia (Figura 3-4(c)). (Das, 2015)

Figura 3-4 Cambios en las propiedades del suelo por la compactación (a) peso unitario seco, (b) conductividad hidráulica y (c) esfuerzo de compresión no confinado con contenido de humedad



Adaptado de (Das, 2015)

3.4 Succión del suelo

El concepto “succión del suelo” según (Ridley, 1993) indica como “succión” o potencial de agua a la energía necesaria para extraer una molécula de agua de una estructura de suelo por medio de la evaporación, es decir, cantidad de trabajo necesario para remover una unidad volumen o masa de agua desde un lugar dado en el perfil del suelo (Aitchison & Bishop, 1961). Este estado de tensiones afecta las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos, y se encuentra íntimamente ligado a la capacidad del suelo de absorber agua a presión atmosférica. (Schofield, 1935).

La energía total que permite extraer el agua del suelo tiene dos componentes, una asociada al movimiento del agua por capilaridad y relacionada con la tensión superficial que depende de la estructura del suelo (tamaño y distribución de las partículas y los poros), ésta se denomina succión matricial y otra componente asociada a agentes químicos como las sales que están presentes en el agua y el suelo, ésta se conoce como succión osmótica. La succión total, puede entonces enunciarse como la suma de la

succión matricial y la succión osmótica y se expresa en unidades de presión (kilopascales, bares, etc.) (Fredlund et al., 2012)(Ecuación 3-1)

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad 3-1$$

Donde:

$u_a - u_w$ = Succión matricial, kPa,

u_a = Presión de aire en los poros, kPa,

u_w = Presión de agua en los poros, kPa,

π = Succión osmótica

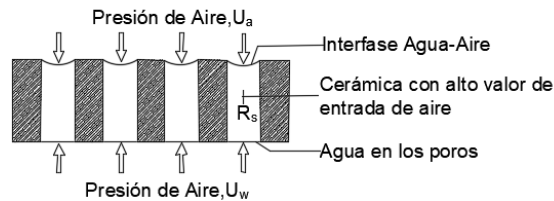
3.5 Medición de la Succión del suelo

Los métodos para medir la succión de un suelo pueden ser tanto directos como indirectos, los resultados obtenidos incluyen una relación entre la succión y el contenido de agua del suelo (humedad gravimétrica o volumétrica, o grado de saturación), a esta relación se le conoce como curva característica, curva de retención de agua o curva de succión.

Los métodos directos, miden o controlan la presión negativa del agua y del aire en los poros del suelo para obtener la succión. Los métodos indirectos permiten determinar la succión basados en la condición de equilibrio de humedad del suelo, con medidas de: presión de vapor, contenido de humedad o propiedades físicas (conductividad térmica o eléctrica) de un medio poroso en equilibrio con el suelo. (Meza Ochoa, 2012)

Los métodos directos más utilizados son tensiómetros y traslación de ejes. Para estos ensayos se usan placas o discos cerámicos con un alto valor de entrada de aire (Figura 3-5) ya que tienen una distribución y tamaño de poros en mayor medida, homogéneos. Cuando son saturados con agua, se genera tensión superficial en la interfase aire-agua que se encuentra en los poros del material, actuando como membrana, lo que a su vez permite que exista diferencia de presión entre las fases de aire y agua que estén localizadas a lado y lado del material.

Figura 3-5: Principio de operación de los discos con alto valor de entrada



Tomado de (Lu & Likos, 2004)(Meza Ochoa, 2012)

Usando los tensiómetros se obtiene una succión máxima de 90 kPa, aunque depende del valor de entrada de aire de los cerámicos y existen tensiómetros de "alta capacidad" que alcanzan mediciones de 1500 kPa (Ridley & Burland, 1993). Los equipos de traslación de ejes con extracción del agua de los poros, son los conocidos como placas de presión, permiten mediciones de succiones que alcanzan los 1500 kPa, que es el máximo valor de entrada de aire de los cerámicos comerciales; se usa para suelos con saturación inferior al 95%, debido a que el aire en los poros se encuentre de manera continua y no como burbujas.

El psicrómetro termopar y el psicrómetro con la técnica de espejo enfriado (*chilled mirror*), son métodos indirectos con rangos de medición de succión entre 300 y 7000 kPa y usan relaciones termodinámicas entre fases, donde la succión total está en términos de la presión parcial del vapor de agua en los poros y la humedad relativa. La succión se anula si la humedad relativa es 100% y una humedad relativa menor de 100%. indica la presencia de succión en el suelo. (Meza Ochoa, 2012)

Otro método indirecto ampliamente utilizado es el método del papel filtro, el cual permite determinar la succión a partir del contenido de agua de un papel filtro previamente calibrado (los más usados son *Whatman No 42* y el *Schleicher y Schuell No 589*) cuando se alcanza la humedad de equilibrio con el suelo al que se le requiere medir la succión. Este procedimiento se encuentra estandarizado por la norma (ASTM D5298-16, 2016) y es el único método que permite determinar la succión total y la succión matricial. La técnica se basa en la premisa de que el papel filtro alcanza un equilibrio con el suelo, respecto al contenido de agua, a una succión específica. Este balance se logra mediante intercambio de humedades entre el suelo y el papel filtro, bien sea en forma de vapor de agua (succión total) o en forma de líquido (succión matricial).

La Tabla 3-1 presenta los métodos para la medición de succión en el suelo y sus rangos.

Tabla 3-1: Ensayos de medición de succión

Succión	Técnica	Rango de medición (kPa)	Tipo de ensayo	Tipo de medida
MATRICIAL	Tensiómetros	0 - 100	Campo y laboratorio	Directa
	Traslación de Ejes	0 - 1500	Laboratorio	Directa
	Sensor de conductividad eléctrica o térmica	0 - 400	Campo y laboratorio	Indirecta
	Papel filtro en "Contacto"	Completo	Campo y laboratorio	Indirecta
TOTAL	Psicrómetros termopares	100 - 8000	Campo y laboratorio	Indirecta
	Psicrometro Chilled Mirror	1000 - 450000	Laboratorio	Indirecta
	Papel filtro en "No Contacto"	1000 - 500000	Campo y laboratorio	Indirecta

Adaptado de (Meza Ochoa, 2012)

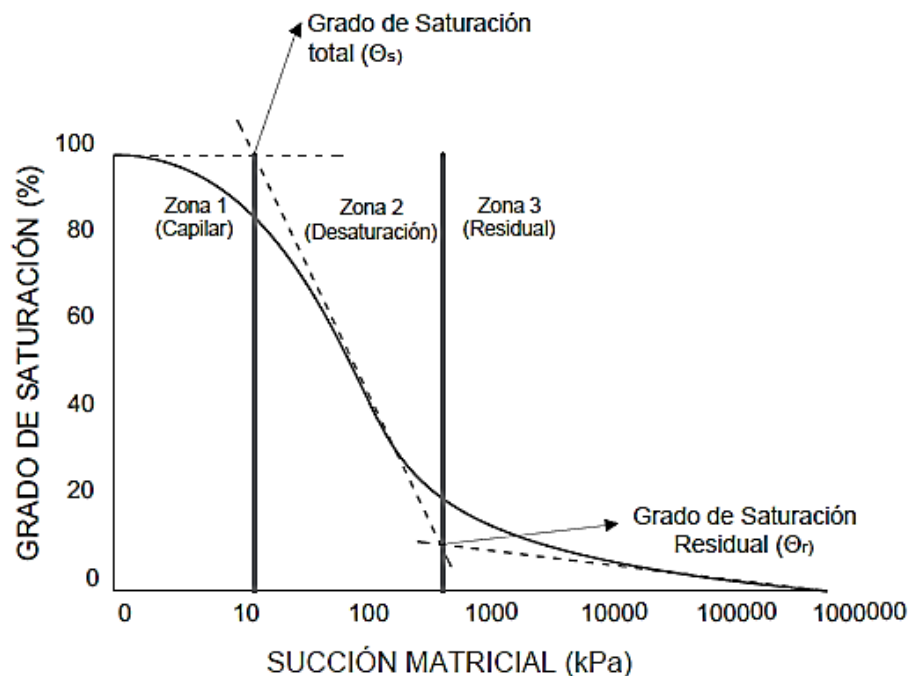
3.6 Curva de Succión

La curva característica (SWCC, Soil Water Characteristic Curve) también denominada curva de succión, o curva de retención de agua; relaciona la succión del suelo con su contenido de humedad (gravimétrico w , o volumétrico θ) o su grado de saturación (S). La curva ha sido relevante, para determinar algunas características ingenieriles de los suelos no saturados entre ellas la conductividad hidráulica, los cambios volumétricos y la resistencia al corte (Azmi et al., 2019).

La curva característica consta normalmente de 3 zonas (Figura 3-6): la capilar, la de desaturación, y la residual. En la primera zona la gráfica es horizontal allí el suelo está saturada y el contenido de agua permite que el aire ingrese a los macroporos, la zona 2

es de transición allí, el suelo tiene una interfase entre aire y agua, el aire ocupa lentamente el lugar del agua aumentándose la fuerza de adhesión del agua que queda a las partículas a medida que la saturación disminuye, la fase agua en este punto es discontinua y la permeabilidad está muy baja. En la última zona los poros están principalmente llenos de aire y un aumento de succión no producen grandes cambios en el contenido de agua porque es muy poca y no fluye entre los poros únicamente sale por evaporación.(Camapun de Carvallo et al., 2015)

Figura 3-6 Zonas de la curva característica.



Adaptado de (Camapun de Carvallo et al., 2015)

La SWCC se ve influenciada por aspectos como el tamaño, distribución y forma de los granos y los poros del suelo, de acuerdo con estas características la curva puede ser unimodal, es decir con un único tramo de des-saturación, cuya derivada tiene una forma de campana similar a la distribución de tamaños de los poros en estos suelos donde hay dos dominios, el primero de los macroporos y el segundo de los microporos, esto no es coincidencia, ya que, a partir de la derivada de la curva de succión, se puede evaluar la distribución de frecuencias de tamaño de poro. Por otra parte, la curva podría ser también bimodal, donde el suelo presenta dos tramos de desaturación por lo cual tiene

dos valores de entrada de aire, el primero correspondiente a una familia de poros de dimensiones relativamente más grande, y la segunda a la otra familia de poros más pequeña. (Camapun de Carvallo et al., 2015)

A través de los años se han desarrollado modelos de ajuste que permitan generar una ecuación matemática continua para la curva de succión, necesarios para su aplicación en modelos de estabilidad, infiltración, esfuerzo deformación, entre otros. Estos modelos se basan en diferentes características del suelo principalmente relacionadas con la distribución del tamaño de los poros, Algunos de los modelos más destacados son; (Brooks & Corey, 1966), (Campbell, 1974), (van Genuchten, 1980), (Fredlund & Xing, 1994) y (Zapata et al., 2000). En el presente trabajo se utilizará el modelo (Fredlund & Xing, 1994) que se presenta en la Ecuación (3-2) (Perez Garcia et al., 2013)

$$\theta_w = c(\psi) \frac{\theta_s}{\ln \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (3-2)$$

Dónde:

Ψ = Succión del suelo (kPa)

a = Parámetro del suelo relacionado con el valor de entrada de aire del suelo (kPa)

n = Controla la pendiente de la curva característica

m = Parámetro que se determina del contenido de agua en condiciones saturadas y del punto de inflexión de la curva

Θ_s = Contenido de agua volumétrico cuando el suelo está saturado, y

$c(\psi)$ = Factor de corrección donde la succión es igual a 106 kPa o contenido de agua igual a cero, el cual se expresa como se muestra en la ecuación (3-3):

$$c(\psi) = 1 - \frac{\ln \ln \left[1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right]}{\ln \ln \left[1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right]} \quad (3-3)$$

Dónde:

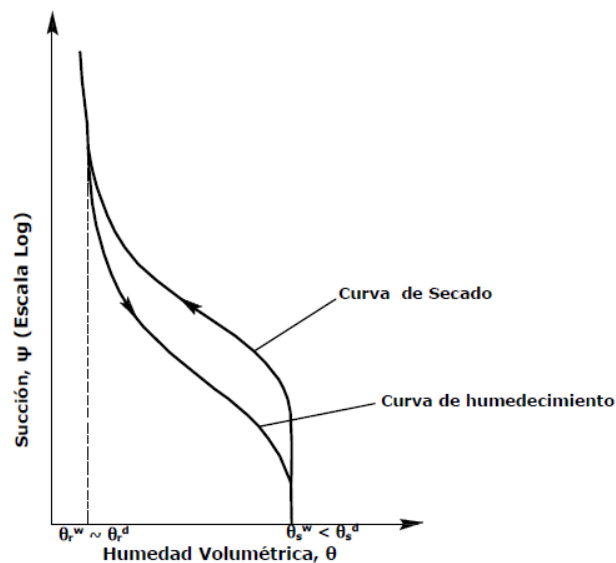
Ψ_r = parámetro relacionado con la succión residual (kPa).

3.7 Histéresis en la curva de Succión

Si se toma un suelo para la medición de succión en laboratorio y se parte de un estado húmedo para secarlo gradualmente, la representación curva característica quedará por encima de la correspondiente a un suelo seco que se va humedeciendo. Es decir, para un valor de humedad dado, el suelo humedecido presentará una succión menor que aquel que se va secando. Esto se conoce como "histéresis" y se debe a que el humedecimiento o secado, inician en los poros más grandes, lo que hace que la succión varíe de forma que al humedecerse se genera una rápida disminución del potencial hídrico y al secarse incrementa considerablemente para finalmente equilibrarse con una redistribución del agua en los poros; la diferencia de las curvas es máxima en su punto central. (Malaya & Sreedeeep, 2010)

Es importante tener en cuenta que en la medición de succión ocurre un proceso de histéresis en el suelo cuando se somete a humedecimiento y secado, ya que no existe un equilibrio único entre el contenido de agua y la succión del suelo, entonces la curva de secado suele superponerse a la curva de humedecimiento, este efecto debe ser considerado en el análisis de resultados.

Figura 3-7: Histéresis del suelo por humedecimiento y secado



Adaptado de (Malaya & Sreedeeep, 2010)

3.8 Permeabilidad de los suelos no saturados

El suelo tiene un esqueleto mineral y su conformación genera vacíos que están llenos de aire y agua, estos pueden moverse fácilmente a través de los vacíos del suelo, si las fuerzas inter partículas son bajas, lo que sucede en los suelos grueso granulares, cuando esta fuerza aumenta, parte del agua forma una película en las partículas que no se moviliza, sin embargo parte del agua logra moverse por acción de la gravedad, ese flujo libre de agua en la estructura del suelo sin afectarla, se denomina conductividad hidráulica o permeabilidad.

Los suelos saturados, presentan un coeficiente de permeabilidad k_s que se presume constante y proporcional a la velocidad y al gradiente hidráulico. En el estudio de la mecánica de suelos parcialmente saturados, el coeficiente de permeabilidad no es constante, sino que cambia en función del contenido de humedad, y se puede relacionar con la curva de retención de agua, ya que la succión origina fuerzas al interior de la masa de suelo y afecta su comportamiento en términos de tensiones y deformaciones.

En un suelo saturado todos los vacíos están llenos por agua y son conductores, y es en ese momento donde la permeabilidad alcanza su máximo valor, si se empieza a secar el suelo, entonces el coeficiente de permeabilidad de la fase agua (k_w) decrece y el de la fase aire (k_a) aumenta, aquí se puede calcular entonces la permeabilidad relativa como la relación entre la permeabilidad efectiva para un grado de saturación dado y la permeabilidad cuando la saturación es 100%.

Se han propuesto diferentes relaciones entre el coeficiente de permeabilidad y la succión matricial, algunas se presentan en la Tabla 3-2

Tabla 3-2 Relación entre el coeficiente de permeabilidad y Succión matricial

Ecuaciones	Referencia	Símbolos
$k_w = k_s$ Para $u_a - u_w \leq (u_a - u_w)_b$ $k_w = k_s \left\{ \frac{(u_a - u_w)_b}{u_a - u_w} \right\}^\eta$ Para $u_a - u_w > (u_a - u_w)_b$	(Brooks & Corey, 1966)	η =constante empírica = $2+3\lambda$

Ecuaciones	Referencia	Símbolos
$k_w = \frac{k_s}{1 + a \{(u_a - u_w)/(\rho_w g)\}^n}$	(Gardner, 1958)	a, n = constantes
$k_w = \frac{k_s}{\{(u_a - u_w)/(u_a - u_w)_b\}^{n'} + 1}$	(Arbhabhirama & Kridakorn, 1968)	n' = constante

Adaptado de (Fredlund et al., 2012)

3.9 Resistencia al corte de los suelos

La resistencia al corte de los suelos ha sido ampliamente utilizada como un factor importante en los análisis de estabilidad de taludes y el diseño de obras de cimentación y contención. Durante mucho tiempo se ha usado la teoría de Mohr-Coulomb, que se basa en el esfuerzo efectivo variable de Terzaghi, para predecir la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos saturados a través de la Ecuación (3-4)

$$\tau = c' + (\sigma_n - \mu_\omega) \tan \phi' \quad 3-4$$

Dónde

τ = Resistencia al corte del suelo

c' = cohesión efectiva

$\sigma_n - \mu_\omega$ =Esfuerzo efectivo normal en el plano de falla

σ_n =Esfuerzo normal en el plano de falla

μ_ω =Presión de Poros

ϕ' = Angulo de Fricción efectiva

En el caso de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos no saturados (Fredlund & Morgenstern, 1977),(Fredlund, 2016), establecen a partir de las variables del estado de esfuerzos una ecuación (3-5) para la resistencia al corte de los suelos no saturados, conocida como forma extendida de Fredlund, ya que considera el efecto de la succión en la resistencia

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad 3-5$$

Donde:

ϕ^b = ángulo para el aumento de la resistencia al corte, relacionada con la succión matricial.

$(u_a - u_w)$ = succión matricial

$(\sigma_n - u_a)$ = tensión normal neta en el plano de corte

En un primer momento (Fredlund & Morgenstern, 1977) planteó que el ángulo de fricción asociado con la succión era constante, pero después de que se hicieran múltiples ensayos con rangos amplios de variables de succión, se llegó a la conclusión de que ϕ^b es función de la succión (Fredlund et al., 1987), lo cual llevó a que finalmente (Vanapalli et al., 1996) planteara la ecuación

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi'$$

Donde:

θ = Contenido de agua del suelo.

θ_s = Saturación del suelo.

θ_r = Contenido de agua residual de la curva característica.

$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$ = Parámetro de la curva de retención de Agua.

3.10 Antecedentes

Mediante un modelo experimental, (Huat et al., 2006) relacionan la variación de la infiltración del agua y la succión matricial con la pendiente del talud y su cobertura superficial. (Nascimento et al., 2018) evalúa el cambio en la curva característica del suelo cuando éste es sometido a ciclos de humedecimiento y secado, en este caso se usan muestras de tipo arenoso y areno arcilloso y se obtiene la curva característica y la variación del tamaño de los poros, evidenciándose, que estos tipos de suelo presentan poca variación. (Li et al., 2017) desarrolla un método de medición de la curva

característica de un suelo arcilloso con un patrón de grietas por desecación que permite medir succiones extremadamente pequeñas en una muestra de arcilla de alta plasticidad con gran cantidad de grietas, proveniente de un talud que presentó un deslizamiento detonado por fuertes lluvias en 2003 y donde se presume que alto grado de agrietamiento influyó en la ocurrencia evento. (Pasculli et al., 2017), propone un método para estimar la curva característica para suelos gruesos y finos utilizando mediciones de succión y las propiedades índices. Los parámetros de la ecuación Fredlund y Xing se correlacionaron con las propiedades de 60 suelos revelando que la medición de succiones matriciales de 10 y 500 kPa aporta una curva más confiable. Finalmente (Kim et al., 2017), presenta un análisis completo en los deslizamientos de Umyeonsan en 2011, involucrando el colapso de taludes no saturados por precipitación extrema, en estos se analizó el mecanismo de falla y la causa de los deslizamientos de tierra, teniendo en cuenta la infiltración y su relación con el cambio en la succión matricial del suelo

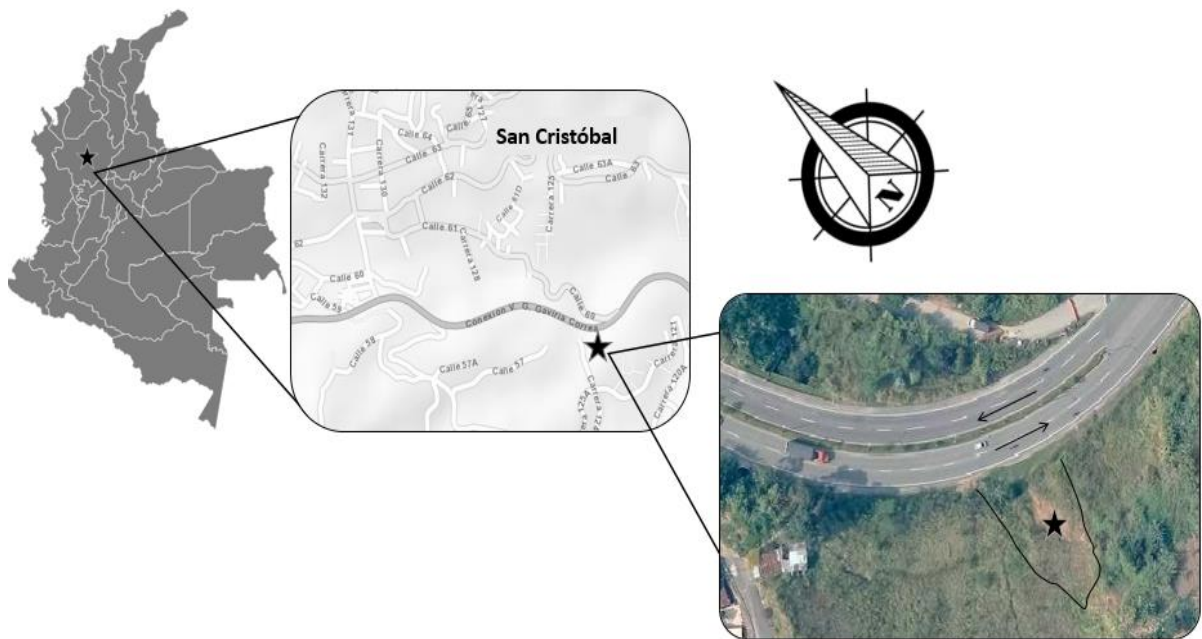
Este estudio se basa entonces en la evaluación experimental de la curva característica de los suelos obtenida por el método de papel filtro, para un suelo natural y compactado sometido a variaciones de humedad, recreando el proceso de humedecimiento y secado, controlado en el laboratorio, para evaluar sus posibles incidencias en la estabilidad de un talud formado por un suelo residual de anfibolita que pertenece al grupo ML según el USCS.

4.Descripción de la Zona de Estudio

4.1 Localización

El sitio de estudio es un talud vial con coordenadas 6°16'29.95"N - 75°37'44.73"O, al occidente de la Ciudad de Medellín, en el corregimiento San Cristóbal, sobre la conexión vial Guillermo Gaviria Correa (Figura 4-1). Este corregimiento es el más próximo a la Ciudad de Medellín y se encuentra en la vertiente norte de la cuenca de la quebrada La Iguana, su principal afluente. Tiene una extensión de 49.5 km², una altura sobre el nivel del mar que oscila entre 1.900 y 3.000 metros, su temperatura varía entre los 8°C y 21°C, con pisos térmicos de templado a frío y una precipitación anual promedio que oscila entre 1500 mm y 3000 mm, tiene una humedad relativa promedio de 68% (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2021), (Departamento Administrativo de Planeación de Medellín; & Corporación Penca de Sábila, 2006)

El talud de interés tiene una altura aproximada de 20 m, está compuesto en la parte superficial por suelo residual, que presenta procesos de inestabilidad recientes de tipo superficial, erosión tipo surcos producto de la escorrentía y desprendimientos aleatorios de material.

Figura 4-1 Localización del Sitio de interés

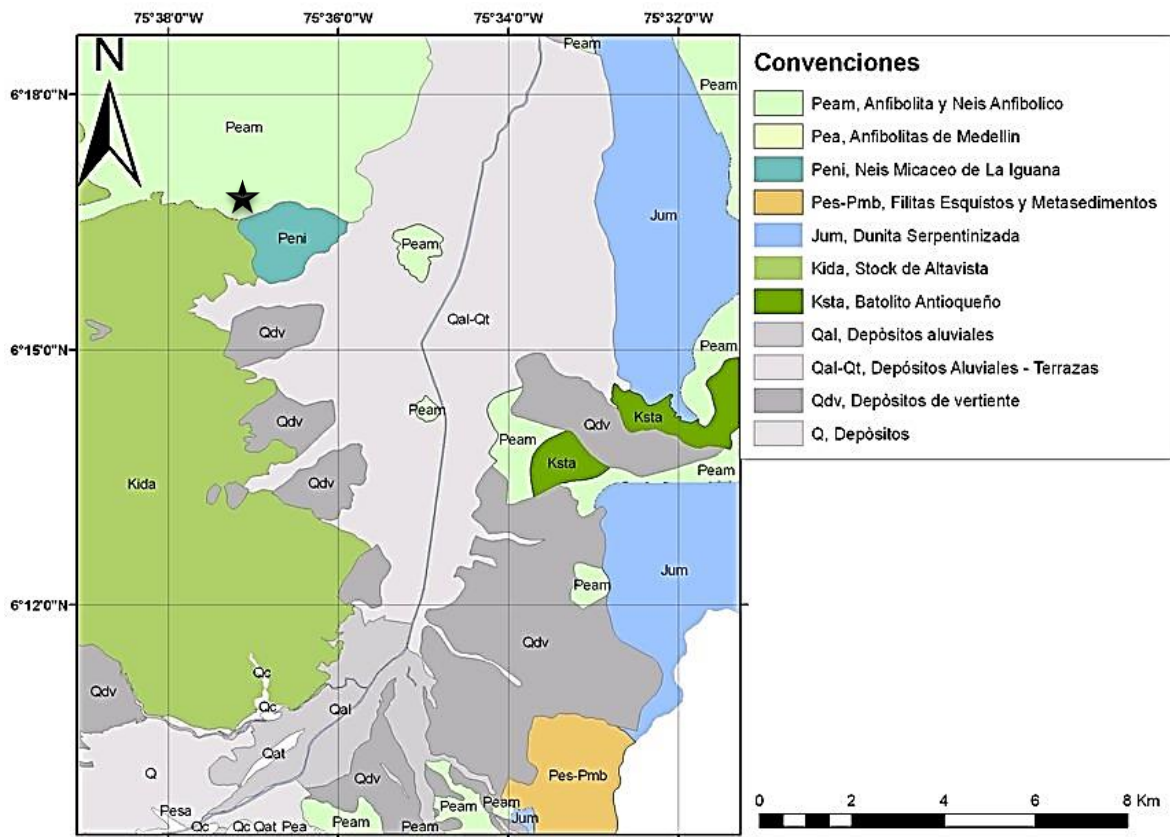
Creado a partir de (H&G Consultores, n.d.)

4.2 Geología Local

Según (Cardona Giraldo, 2016) en la zona de interés existen principalmente cuatro unidades litológicas que son: rocas metamórficas del Paleozoico, rocas ígneas del Mesozoico, rocas sedimentarias del Cenozoico y depósitos no consolidados del Cuaternario (Figura 4-2). En el primer grupo se encuentran esquistos cuarzosericíticos con una faja de 3 km desde la cuchilla Boqueroncito hasta la vereda la Frisola, y neises de Palmitas que consisten en un cuerpo alargado de hasta 1.5 km. La segunda unidad litológica agrupa unidades como el Gabro Romeral (JgR) conformada por plagioclasas, piroxenos y anfíboles, que conforma en la zona fajas de hasta 1 km de amplitud, también se encuentra el Stock de Altavista (KdA) que se presenta extensamente hacia el río Aburrá y por lo general con alto grado de meteorización presentando perfiles de hasta 20 m de profundidad; finalmente se encuentran en este grupo las rocas de la formación Quebradagrande (Kv) con meteorización moderada y afloramientos extensos de hasta 3.0 km. En el tercer grupo se encuentra el miembro inferior de la Formación Amagá, que

conforman relieves acolinados bajos y redondeados, con cierta inestabilidad y se observa cerca del empalme de la conexión vial Guillermo Gaviria con la Vía al mar. En el último grupo se destaca la presencia por aluviones (Qal) y terrazas (Qt), conos de deyección (Qcd, depósitos de vertiente del tipo flujos (Qf) y coluviones (Qcol) que se forman por acumulación de material transportado sea por las vertientes presentes en la zona o por procesos de erosión presentados en la ladera.

Figura 4-2: Geología de la zona



Adaptado de (Monsalve et al., 2010)

5. Metodología

5.1 Exploración

El sitio de exploración fue seleccionado sobre un talud de suelo residual donde se evidenciaron procesos de inestabilidad superficial, como desprendimiento de material, remoción de cobertura vegetal y cárcavas. La recolección de muestras se realiza de forma manual, mediante la realización de un apique de aproximadamente 0.80 metros de profundidad, en el sitio de interés. Se extraen 6 muestras inalteradas tipo bloque y 50 kg de muestra suelta, las cuales fueron envueltas en papel vinipel para evitar y posteriormente almacenadas en bolsas plásticas para su transporte al laboratorio.

Figura 5-1: Exploración de campo



Las muestras alteradas se usaron para la ejecución de los ensayos de: Contenido de humedad, límites de Atterberg, lavado sobre la malla N° 200, hidrómetro, tamizado, gravedad específica, compactación Proctor Normal, pH (H₂O y KCl), Miniatura compactada tropical, y difracción de rayos X. Las muestras inalteradas se usaron para

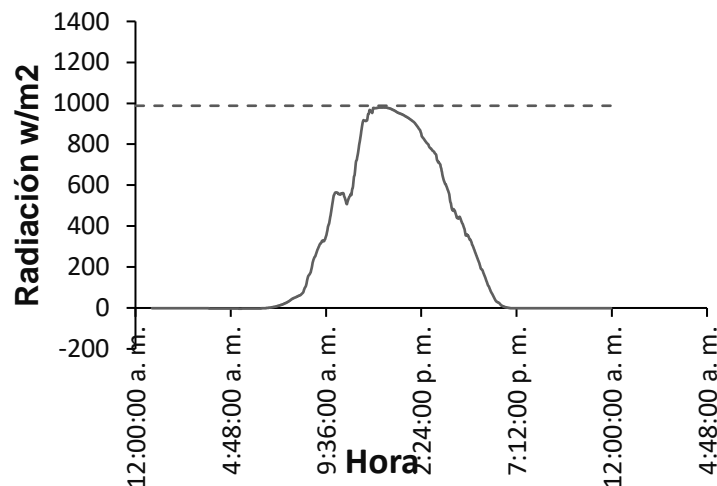
los ensayos de Succión, Permeabilidad y Corte directo, siguiendo la respectiva norma ASTM de cada ensayo.

5.2 Ciclos de Humedecimiento y secado.

Con el fin de simular en laboratorio los cambios de temperatura y humedad producto de la variación climática, se moldearon 180 muestras cilíndricas de 44.5 mm de diámetro y 19 mm de altura, 90 a partir de muestras inalteradas y 90 a partir de muestras compactadas al 100% del peso unitario seco máximo y humedad óptima. En ambos casos se usaron 22 cuerpos de prueba para la realización de un primer ensayo de succión por el método del papel filtro, para así obtener la curva característica del suelo natural y compactado previo a los ciclos de humedecimiento y Secado.

El proceso de humedecimiento y secado pretende recrear los cambios en las condiciones de humedad y temperatura ocasionados por la variación climática, por lo cual, en la etapa de secado, se someten los cuerpos de prueba a 30 ° C de temperatura constante en un horno durante 24 horas, esta temperatura se tomó en campo sobre la superficie del talud en la hora de radiación máxima (13:00 m) como se muestra en la Figura 5-2 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2021)

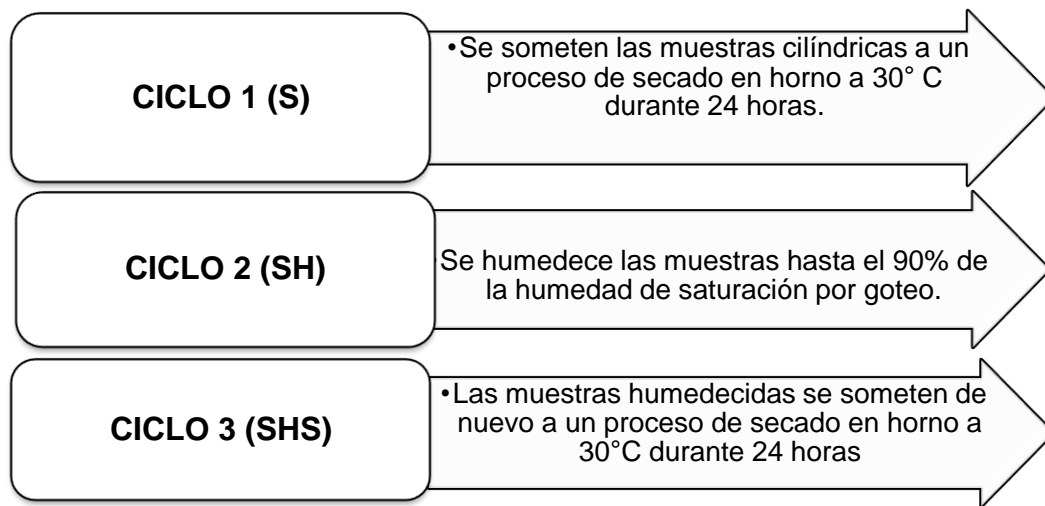
Figura 5-2: Radiación solar en el sitio de interés



Tomado de (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2021)

Para la etapa de humedecimiento se realiza un proceso de goteo sobre la muestra cilíndrica hasta que alcance 90% de la humedad de saturación. La Figura 5-3 muestra los ciclos a los cuales fue sometido el suelo.

Figura 5-3: Ciclos de Humedecimiento y Secado



En cada ciclo se toman especímenes para la ejecución de los ensayos de Succión por el método del papel filtro, así como ensayos de Permeabilidad y Corte directo.

5.3 Ensayos de Laboratorio

5.3.1 Clasificación del suelo

Se ejecutaron ensayos de contenido de humedad natural, gravedad específica, límites líquido, plástico de contracción, granulometría y dispersividad por doble hidrómetro usando los lineamientos de las normas (ASTM D2216-19, 2019), (ASTM D854-14, 2014), (ASTM D4318-17e1, 2017), (ASTM D4943-18, 2018), (ASTM D4221-18, 2018) , con el fin de realizar la clasificación primaria del suelo. Estos ensayos se realizaron tres veces cada uno, para garantizar su repetitividad.

5.3.2 Doble hidrómetro

El objetivo del ensayo de doble hidrómetro es ejecutar las curvas de granulometría del suelo para los tamaños inferiores al tamiz N°200 (0.075mm), el ensayo se ejecuta con

defloculante, y agua, se grafican y se comparan las curvas con el fin de determinar si la muestra de suelo presenta agregación. (ASTM D4221-18, 2018) El tenor de agregación (T.A) se calcula relacionando los porcentajes de arcilla (diámetro inferior a 0.002 mm) obtenidos en las curvas con y sin defloculante como se muestra en la ecuación (5-1).

$$T.A. = \frac{\% \text{ arcilla defloculante} - \% \text{ arcilla con agua}}{\% \text{ arcilla defloculante}} \quad (5-1)$$

5.3.3 Miniatura Compactada Tropical MCT expedita

Se realizó la clasificación del suelo mediante la metodología de Miniatura Compactada Tropical expedita, propuesta por (Nogami & Villibor, 1995), este sistema de clasificación de los suelos tropicales es relevante, ya que fue desarrollado con el fin de prever las propiedades mecánicas e hidráulicas de muestras compactados de dimensiones reducidas separando los suelos en dos grandes grupos, Lateríticos y No Lateríticos (Saprolíticos) (Malaver Soto & Tafur Tafur, 2018), lo que se consigue a partir de contracción diametral de una pastilla de suelo de diámetro inicial de 20 mm y la penetración de una aguja estándar cuya masa es de 10 g y su diámetro 1,3 mm.

Los cuerpos de prueba se moldean en anillos y la humedad de la muestra debe ser tal, que la aguja estándar penetre en ella 1mm. Luego de formados, los especímenes se secan al aire, y al alcanzar masa constante se mide la contracción diametral, luego se localizan sobre una piedra porosa saturada durante 2 h donde se humedecen por capilaridad y finalmente se mide la penetración de la aguja estándar en la muestra.

La clasificación MCT se realiza a partir del parámetro c' que se obtiene como se muestra en las ecuaciones (5-2) y (5-3)

Para valores de contracción diametral (c_t) entre 0,1 mm y 0,5 mm,

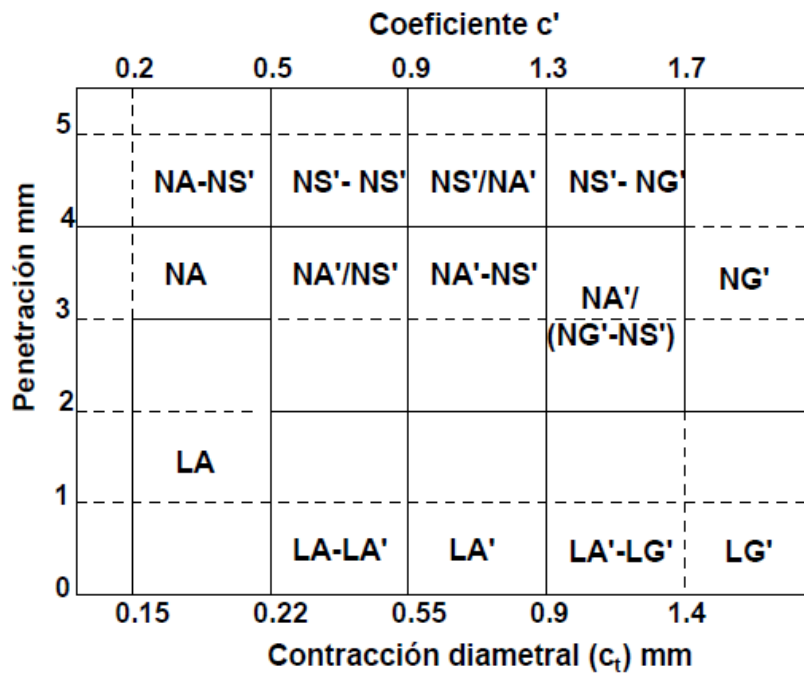
$$c' = \frac{\log_{10} c_t + 1}{0,904} \quad (5-2)$$

Para valores de contracción diametral (c_t) mayor de 0,5 mm:

$$c' = \frac{\log_{10} c_t + 0,7}{0,5} \quad (5-3)$$

La clasificación se realiza finalmente con la carta mostrada en la Figura 5-4.

Figura 5-4 Carta de Clasificación Rápida MCT



Adaptado de (Nogami & Villibor, 1995)

Donde:

LA = Arena con poca arcilla laterítica.

LA' = Arenas arcillosas lateríticas.

LG' = Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas.

NG' = Arcillas, arcillas limosas y arcillas arenosas no lateríticas.

NA = Arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no lateríticos

NA' = Arenas limosas y arenas arcillosas no lateríticas.

NS' = Limos caoliníticos y micáceos, limos arenosos y limos arcillosos no lateríticos.

5.3.4 Compactación Proctor Estándar

Se ejecuta el ensayo de Compactación Proctor Estándar según la norma (ASTM D698-12(21), 2021), para determinar la relación óptima entre la humedad y el peso unitario seco del suelo en estudio, y a partir estos valores, se elaborarán cuerpos de prueba

compactados, con el objetivo de analizar las variaciones de las propiedades físicas y mecánicas producidas por los ciclos de humedecimiento y secado que posteriormente se compararán con las obtenidas a partir de muestras inalteradas.

Para obtener los cuerpos de prueba compactados en los valores óptimos, se obtiene una muestra cilíndrica de 101,6 mm de diámetro y 116,4 mm a partir del molde de compactación, este se dividirá en especímenes de menor tamaño cuyas dimensiones dependerán del ensayo en el cual serán utilizados. Para succión por el método del papel filtro tendrán 44.5 mm de diámetro y 19 mm de altura; para corte directo, 60 mm de diámetro y 25 mm de altura y para los ensayos de permeabilidad 33 mm de diámetro y 45 mm de altura (para todos los casos se considera la contracción que sufrirá el espécimen cuando se somete a ciclos de secado).

5.3.5 Δ pH del Suelo en KCl y en agua

El potencial de hidrógeno (pH) es un indicador de la acidez o alcalinidad del suelo, este se hace con una muestra suspendida en agua y en una solución 1 M de cloruro de potasio (KCl) la diferencia entre estos dos valores (pH KCl – pH H₂O) indica, si es mayor que cero, predominio de oxihidróxidos de hierro y aluminio en el suelo y si es menor que cero, indican predominio de arcillo-minerales.

Además, se calculó el punto de carga cero (PCZ) que corresponde al valor de pH, en el que la carga eléctrica neta del conjunto de partículas de suelo es nula, es decir, la carga positiva total es igual a la carga negativa total. Generalmente, los suelos en un medio más ácido o cercano a PCZ suelen estar floculados, y en un medio más alcalino que el PCZ son dispersos. (Camapun de Carvalho et al., 2015); la ecuación (5-4) propuesta por (Keng & Uehara, 1974), permite calcular el PCZ

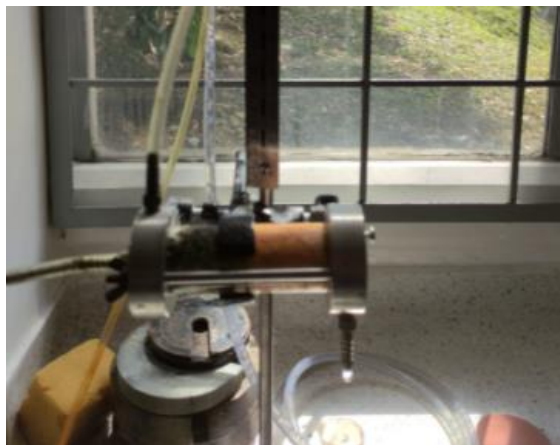
$$PCZ = 2 * pH\ KCl - pH\ H_2O \quad (5-4)$$

5.3.1 Permeabilidad por el método de cabeza constante

Se realiza el ensayo de permeabilidad por el método de cabeza constante a las muestras tanto natural como compactada, antes y después de someterse a los ciclos de humedecimiento y secado, con el fin de determinar la variabilidad de la permeabilidad. Se utiliza un espécimen cilíndrico de 33 mm de diámetro y 45 mm de altura, y se mide

caudal (cm^3/s) para tres volúmenes distintos, y se repite el procedimiento tres veces, con el fin de garantizar la veracidad de los datos.

Figura 5-5 Ensayo de permeabilidad con cabeza constante



3.7 Difracción de rayos X

Este ensayo fue realizado en el laboratorio del Grupo Catalizadores y Adsorbentes de la Universidad de Antioquia, sobre una muestra de 2-3 g, seca al aire macerada y pasada completamente por el tamiz N° 200 (0.075 mm). El equipo utilizado es de marca Malvern Panalytical, de la serie Empyrean Alpha1, modelo 2012, configurado con un monocromador de Ge con simetría única (tipo Johansson) para obtener datos de geometría de reflexión Bragg-Brentano de Cu o Co $K\alpha_1$ correspondiente a la determinación de estructuras en alta resolución y una excelente simetría de pico, este equipo es utilizado para el análisis de polvos, películas delgadas, nanomateriales y objetos sólidos adicionalmente cuenta con Software para análisis y cuantificación de datos HighScore Plus Software a partir del cual se tiene un difractograma de rayos X por reflexión estándar (rango 2θ hasta 80).

Se realiza semicuantificación de minerales ya que no se puede precisar la cantidad de amorfos presentes en la muestra, a partir de la base de datos de estructuras cristalinas inorgánicas (ICSD) del instituto FIZ Karlsruhe.

5.3.8 Análisis de imágenes

Con el fin de determinar la variación en el tamaño de los poros del suelo, se realizó la toma de imágenes con un microscopio Digital USB 1600x con luz led graduable tanto para las muestras naturales como para las compactadas antes y después de cada ciclo de humedecimiento y secado, que posteriormente fueron analizadas, a través de los programas, Photoshop y Scion Image, allí se pone la imagen en escala de grises y se genera un umbral en blanco y negro, donde el negro representa los vacíos, el programa mide el área de zonas oscuras presentándose finalmente como un porcentaje del área total, las unidades de medición de área son mm², donde un milímetro equivale a 96 pixeles.

5.3.9 Succión del suelo

La medición de la succión se hizo por el método del papel de filtro ya que es una técnica simple, económica, precisa y con un amplio rango de medición.

La norma ASTM D5298-10 describe el procedimiento de este ensayo donde los cuerpos de prueba cilíndricos entran en contacto directo con el papel filtro que actúa como una membrana y retiene el agua que fluye por acción capilar permitiendo medir la succión matricial. Se usan 22 especímenes de prueba, dos por cada humedad proyectada, entre cero y la humedad de saturación máxima que se estimó en 35% para las muestras inalteradas y en 25% para las muestras compactadas. Para la presente investigación se usó papel tipo Whatman N ° 42 y sus ecuaciones de calibración se presentan a continuación (5-5) y (5-6) (Chandler & Gutierrez, 1986).

$$Suction [kPa] = 10^{6.05-2.48 \cdot \log w}, w > 47\% \quad (5-5)$$

$$Suction [kPa] = 10^{4.84-0.0622w}, w \leq 47\% \quad (5-6)$$

A cada espécimen se le determina su humedad final para así llegar a la curva característica o la curva de retención de agua. Se realizó un ajuste de las curvas obtenidas a partir del modelo Fredlund and Xing (Fredlund & Xing, 1994)

5.3.2 Balanza Hidrostática

Con el fin de obtener la variación en la relación de vacíos del suelo a través de los ciclos de humedecimiento y secado se utiliza el método de balanza hidrostática (Figura 5-6 Balanza Hidrostática) que permite medir la densidad del suelo a partir del principio de Arquímedes, aplicado a una muestra de suelo cubierta por parafina de densidad conocida. Posteriormente con los datos obtenidos pueden determinarse las relaciones volumétricas y gravimétricas, entre ellas, la relación de vacíos (Ecuaciones 5-7, 5-8 y 5-9).

$$V_s = V_t - V_p = \frac{m_{sp} - m_{su}}{\rho_w} - \frac{m_{sp} - m_s}{\rho_p} \quad (5-7)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_s(1+\omega)} \quad (5-8)$$

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 \quad (5-9)$$

Dónde:

m_s = Masa del suelo.

m_{sp} = Masa del suelo más parafina.

m_{su} = Masa del suelo más parafina sumergida.

ρ_w = Densidad del agua.

ρ_p = Densidad de la parafina.

V_t = Volumen total.

V_s = Volumen del suelo.

V_p = Volumen de la parafina.

ρ_d = Densidad seca del suelo.

ω = Humedad del suelo.

G_s = Gravedad específica del suelo

e = Relación de vacíos.

Figura 5-6 Balanza Hidrostática

5.3.3 Corte Directo

Con el fin de conocer la variación de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción a medida que se ejecutaron los ciclos de humedecimiento y secado, se realizaron ensayos de corte directo en la modalidad consolidado drenado ya que esta permite obtener los parámetros de resistencia del suelo, en términos de esfuerzos efectivos, utilizando cargas axiales de 50, 100 y 200 kPa; Se hizo un ensayo antes de los ciclos de humedecimiento y secado, otro después del primer ciclo y otro al finalizar el tercer ciclo. Cada espécimen se saturó durante 24 horas y se consolidó durante el mismo tiempo para determinar la velocidad de corte, que finalmente fue de 0.046 mm/min para las muestras naturales y 0.055 mm/min para las compactadas.

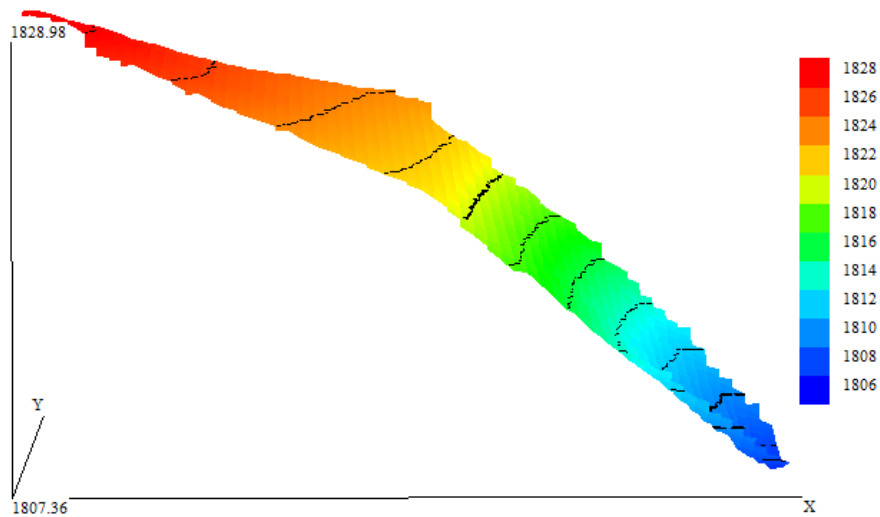
A partir de los datos adquiridos se construyen las envolventes de falla con los valores máximos de resistencia al corte para cada carga normal, a partir de éstas, se obtiene la cohesión y el ángulo de fricción antes y después de cada ciclo de humedecimiento y secado.

5.4 Topografía del área de estudio

El talud vial del cual se obtuvo las muestras utilizadas para los ensayos de laboratorio, se localiza en el corregimiento de San Cristóbal, Ciudad de Medellín como se mencionó en el capítulo 4, se efectuó un levantamiento topográfico a partir de imagen satelital que evidencia que el talud está aproximadamente entre las cotas 1807 y 1828 msnm, con una

pendiente variable entre el 55% y el 70%; la imagen tomada a partir de Google Earth fue procesada a través de TCX Converter, gpsvisualizer y QuikGrid. De la topografía obtenida se tomó una sección para la realización de un análisis de estabilidad en el software de Slide2 de Rocscience. (Figura 5-7)

Figura 5-7 Perfil topográfico del sitio de interés



Elaboración propia, software QuikGrid.

6. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados, se discuten sus variaciones y se presentan los análisis respectivos.

Para dar claridad en los análisis las muestras se rotularán según el ciclo de humedecimiento y secado del que hacen parte, precedidos de la letra “N” para las muestras en estado natural y “C” para las muestras compactadas.

6.1 Clasificación del suelo

6.1.1 Humedad Natural y Gravedad Específica

Se realizaron dos muestreos en la zona y sobre las muestras recolectadas, se ejecutaron tres ensayos de contenido de humedad y tres de gravedad específica. En la Tabla 6-1 se presenta el promedio correspondiente a cada fecha de muestreo.

Tabla 6-1 Humedad Natural del Suelo

Fecha	Humedad Gravimétrica Promedio (%)	Gravedad Específica de los sólidos
06-febrero-2020	27	2.60
11-marzo-2021	32	2.58
29-mayo-2021	26	2.59

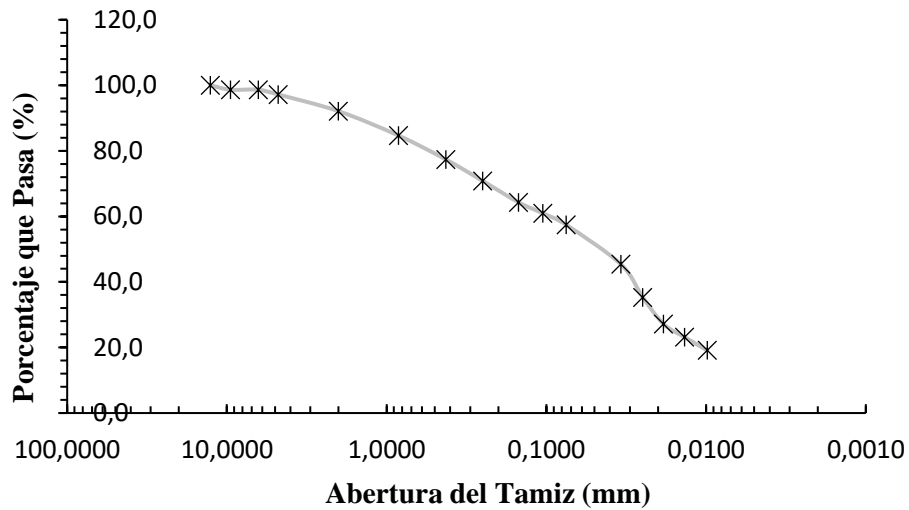
Cabe mencionar que, cuando se ejecutó el muestreo el día 11 de marzo de 2021, en los días previos se presentaron fuertes precipitaciones, lo que explica el aumento en la humedad natural.

Los valores de gravedad específica no presentan variaciones significativas y son normales para los suelos derivados de anfíbolitas. Para efectos de la investigación se tomó un valor promedio de 2,59 para la gravedad específica del suelo.

6.1.2 Granulometría del suelo natural

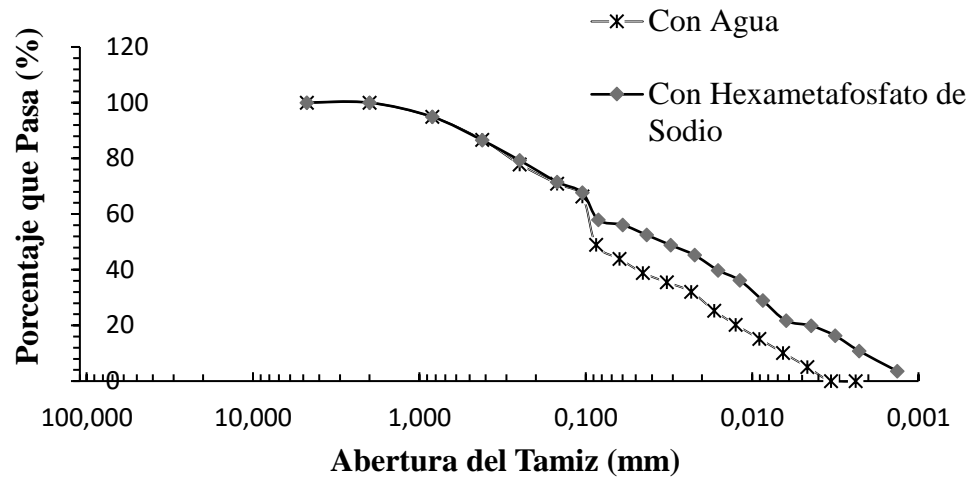
La curva granulométrica del suelo se presenta en la Figura 6-1, allí se observa que 57% del material pasa el tamiz N°200, y un 40% es arena, de acuerdo con USCS corresponde a un suelo fino granular. La distribución de tamaños de la fracción fina se obtiene por el método del hidrómetro.

Figura 6-1 Curva Granulométrica por tamizado del suelo natural



En la Figura 6-2 se observan dos curvas granulométricas obtenidas con hidrómetro una con agua y otra con defloculante. Para la fracción fina (pasa tamiz N° 200), se observa que existe una separación entre las curvas y al calcular el tenor de agregación relacionado con los tamaños inferiores a 0.002 mm, se obtiene que un 98% de los tamaños arcillosos se encuentran floculados, sin embargo, estos constituyen únicamente el 11% de la muestra por lo que el grado de agregación se considera leve, propiciado por la presencia de caolinita como se verá más adelante en el DRX.

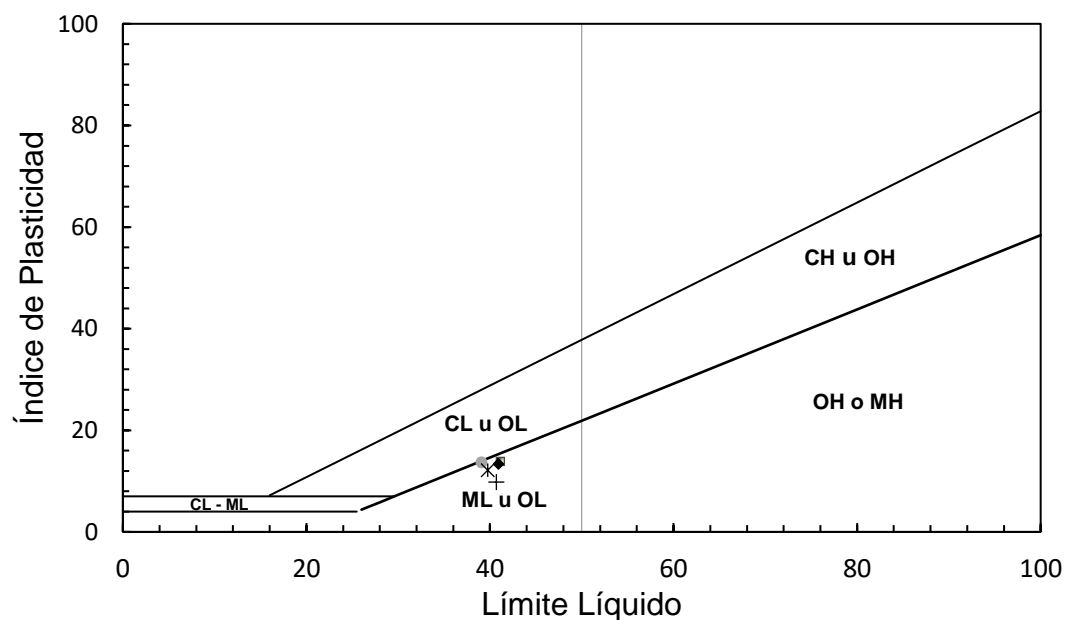
Figura 6-2 Curvas granulométricas con agua y hexametáfosfato de sodio del suelo natural.



6.1.3 Límites de Consistencia del suelo natural

Se ejecutan un total de seis ensayos de límites líquido y plástico, los resultados indican en todos los casos, que el suelo estudiado se puede clasificar con limo de baja compresibilidad (ML). En la Figura 6-3 Carta de plasticidad de Casagrande presentan los resultados obtenidos.

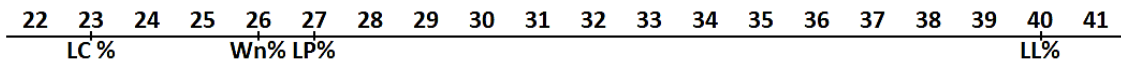
Figura 6-3 Carta de plasticidad de Casagrande



Elaboración propia

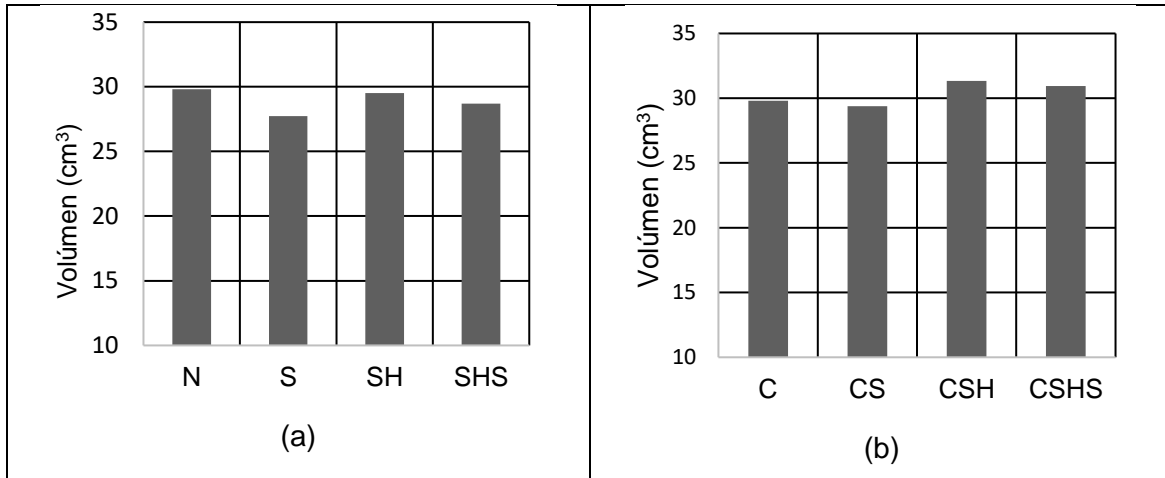
Se determina también el índice de contracción con un valor de solamente el 5%, que es coherente con la presencia de la caolinita, arcillo mineral muy estable en presencia del agua; donde su contracción y su expansión dependen de las agregaciones que, para el presente caso, son leves. En la Figura 6-4 se muestra la recta de humedad, donde se ubican los valores de límite líquido (LL), límite plástico (LP), límite de contracción (LC) y humedad natural (Wn), los valores obtenidos para los límites de consistencia están en los rangos establecidos por (Mitchell & Soga, 2005) para la caolinita, este arcillo mineral fue detectado en el ensayo de DRX, como se verá más adelante, también el rango de humedades donde el suelo sufre contracción volumétrica, que es bajo y el índice de plasticidad medio tienen coherencia con este material.

Figura 6-4 Recta de humedad del suelo natural



La variación volumétrica de la muestra a través de los ciclos de humedecimiento y secado, tanto para la muestra natural como compactada se presenta en la Figura 6-5 donde se evidencia que la mayor contracción se dio en el primer ciclo, recuperando un poco su volumen al ser humedecido nuevamente, para volver a contraerse en el último ciclo.

Figura 6-5 Cambio volumétrico a través de los ciclos de humedecimiento y secado (muestra natural (a) y compactada (b))



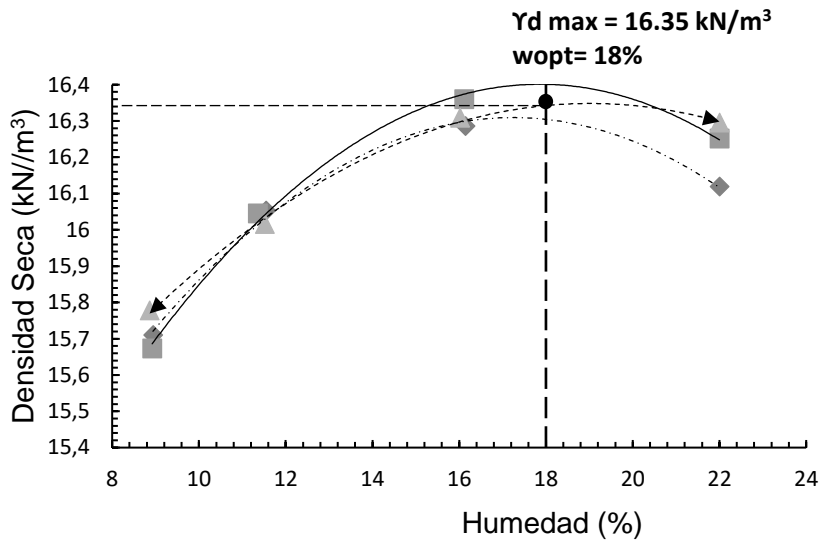
6.1.4 Clasificación rápida MCT del suelo natural

Se realiza el ensayo de MCT al suelo de interés obteniendo para 5 muestras una contracción diametral promedio de 1 mm, que equivale a un coeficiente c' promedio de 1.38, además en todos los casos se obtuvo una penetración 5mm. Lo anterior nos da una clasificación del suelo en el grupo NS' correspondiente a Limo No Laterítico, que es coherente con el grupo ML del Sistema de Clasificación Unificada de Suelos.

6.1.5 Compactación Proctor Estándar

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de la investigación es analizar el comportamiento del suelo natural y compactado, se ejecutan cuatro ensayos de Proctor Estándar con cuatro puntos cada uno como se muestra en la Figura 6-6 Obteniéndose un peso unitario seco máximo de 16.3 kN/m^3 y una humedad óptima de 18%; con los valores obtenidos del ensayo, se prepararon muestras con la humedad óptima y logrando un grado de compactación del 100%. El objetivo de compactar los especímenes es generar un comparativo, ya que los suelos residuales pueden encontrarse en un talud en estado natural, o pueden encontrarse compactados, en terraplenes, presas, llenos etc.

Figura 6-6 Curvas de compactación



6.1.6 ΔpH del Suelo en KCl y en agua del suelo natural

Se tomó el potencial de hidrógeno en tres oportunidades en KCl y Agua, con el objetivo de conocer cómo se encuentran las cargas en el suelo y su influencia en la acomodación de las partículas. Los resultados se presentan en la Tabla 6-2. El ΔpH se obtiene a partir de los promedios obtenidos para cada caso, arrojando un valor negativo, que indica predominio de arcillo minerales en la composición del suelo que se respalda los resultados del ensayo de DRX donde se encuentran minerales como la caolinita y la albita.

Se calcula también el Punto de Carga Cero (PCZ) obteniendo un valor de 2.31, considerando que el pH del suelo es 5.17 y que el PCZ es bastante bajo, el suelo en la mayoría de los casos estaría en medios alcalinos que tendería a una estructura dispersa, siendo coherente con la poca agregación que se observa en el ensayo de doble hidrómetro y debido al alto porcentaje de arenas (40%).

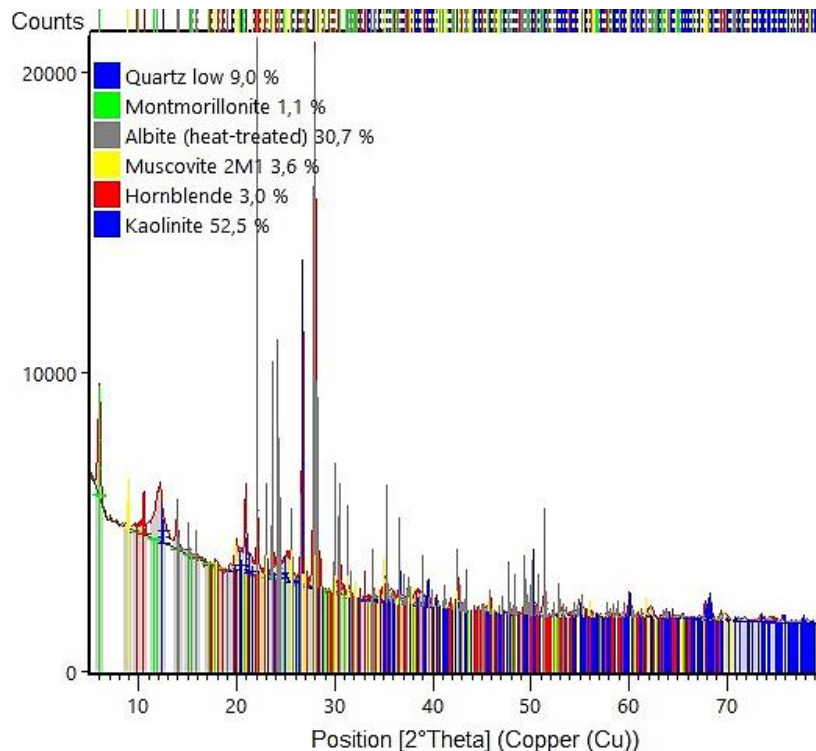
Tabla 6-2 pH en Agua y KCl

				Promedio	ΔpH	PCZ
pH en Agua	5,18	5,20	5,13	5.17	-1.43	2.31
pH en KCl	3.79	3.74	3.70	3.74		

6.1.7 Difracción de Rayos X

En la Figura 6-7 se presenta el difractograma obtenido para el suelo de estudio, donde a partir de los picos se pueden identificar los minerales presentes. En el caso particular se observa en mayor proporción la presencia de Caolinita (52.5%) que es coherente con el ensayo de pH donde se evidencia la presencia de arcillo minerales, también hay presencia de silicatos como Albite (30.7%) y cuarzo (9%), lo anterior refleja la composición mineralógica de los suelos, de la zona noroccidente de Medellín las cuales presentan proporciones de caolinita superiores al 50%, de feldespatos entre 30% y 40% y de cuarzo entre 3% y 10% (Espitia et al., 2003). La presencia en mayor proporción de caolinita es coherente con los resultados del ensayo de doble hidrómetro, límites de consistencia y Delta de pH, ya que este arcillo mineral es de los más estables en presencia de agua, que no es propenso a grandes cambios volumétricos y además suele tener una estructura de tipo disperso.

Figura 6-7 Difractograma del suelo natural

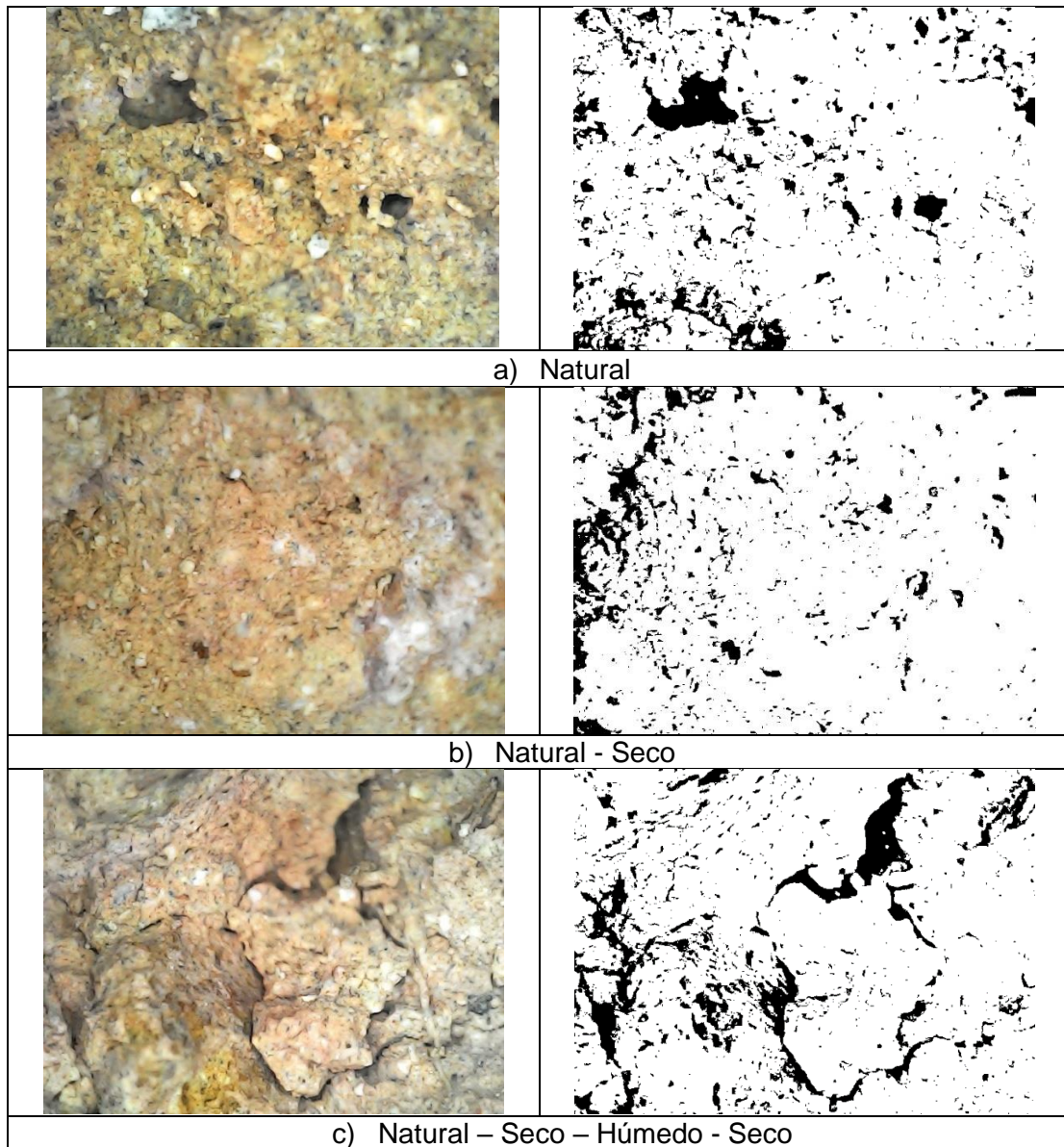


6.1.8 Análisis de Imagen

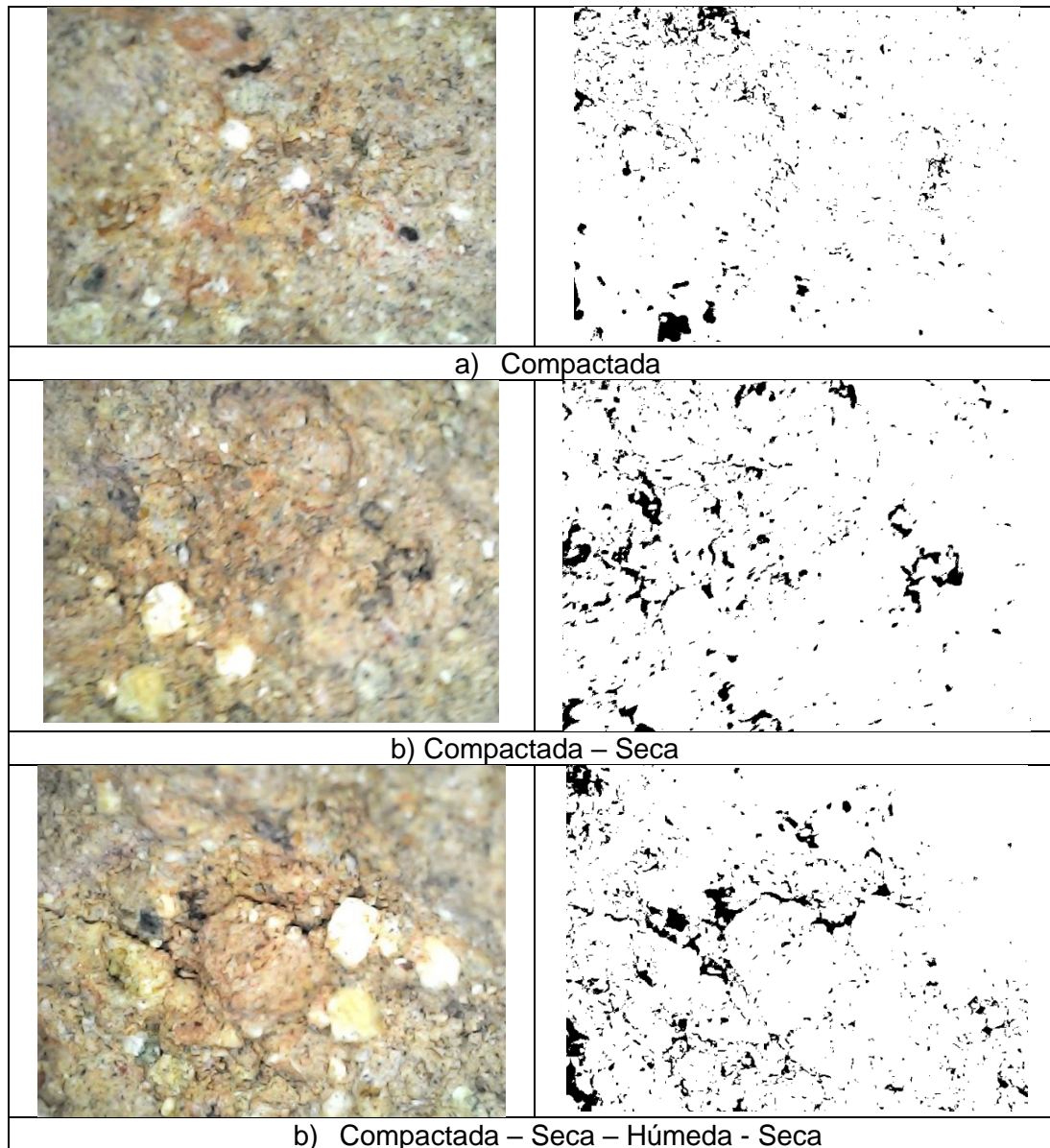
La Figura 6-8 presenta las imágenes usadas para el análisis de las muestras naturales a partir de imágenes digitales de microscopio USB, donde las zonas oscuras corresponden

a los vacíos y las claras a los sólidos, se mide el área total y a partir de ésta se calcula el porcentaje de vacíos y su variación con los ciclos de humedecimiento y secado.

Figura 6-8 Imágenes microscópicas Muestra Natural



Las imágenes en la Figura 6-9, presentan el análisis para las muestras Compactadas.

Figura 6-9 Imágenes microscópicas Muestra Compactada

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6-3; en ella se evidencia que durante primer ciclo (secado), la muestra natural sufre una contracción que ocasiona la disminución del área de vacíos. En el tercer ciclo (secado-humedecimiento-secado) el porcentaje de vacíos vuelve a aumentar ya que para este punto las muestras presentan grietas en la superficie. En la Figura 6-10 se puede observar que tanto las muestras naturales y compactadas sometidas a los ciclos de humedecimiento y secado, como el talud natural presentan este agrietamiento, cabe resaltar que el cambio en el área de

vacíos es coherente con la variación en la succión como se verá más adelante, ya que esta disminuye cuando el área de vacíos aumenta.

Para la muestra compactada se puede notar que el área de vacíos aumenta para cada etapa, aunque no significativamente, esto debido a que en estas muestras los vacíos son más pequeños y por tanto son menos susceptibles a la contracción, los aumentos también son debidos a las grietas que empiezan a presentarse.

Figura 6-10 Agrietamiento en el suelo en el talud natural y en las muestras.

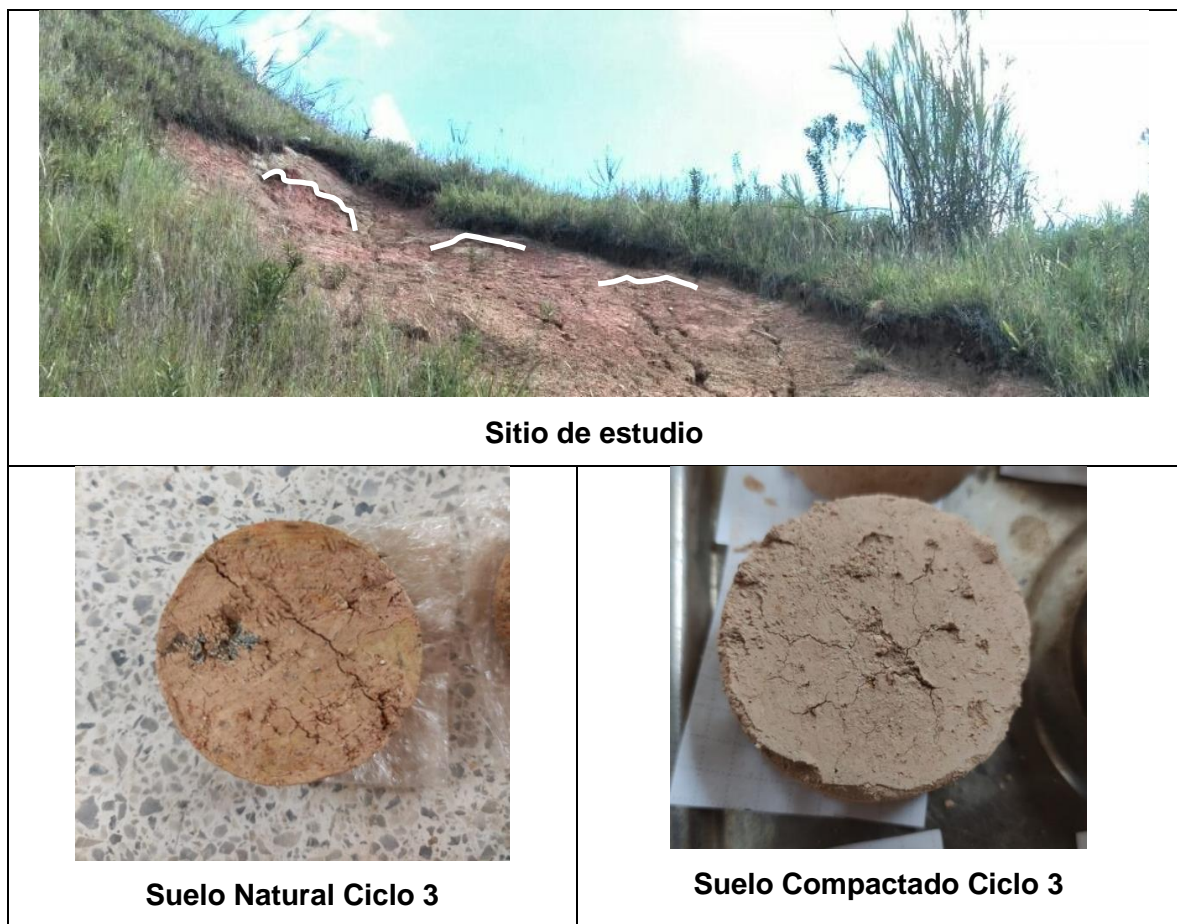


Tabla 6-3 Variación del área de vacíos a partir de imágenes

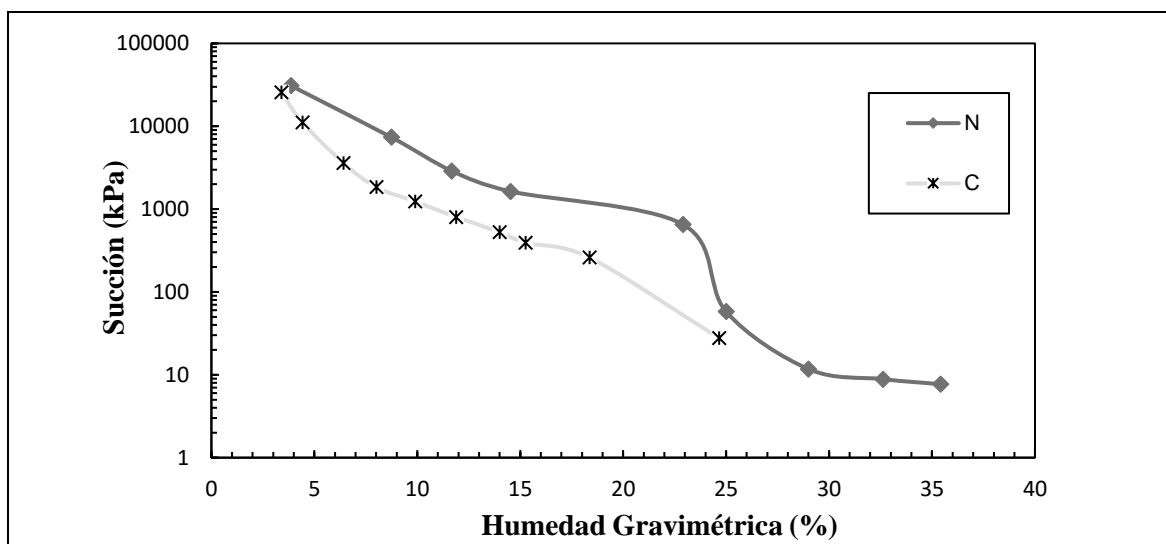
Muestra	Área total (mm²)	Área vacíos (mm²)	Porcentaje
Natural	33.33	3.92	11.8%

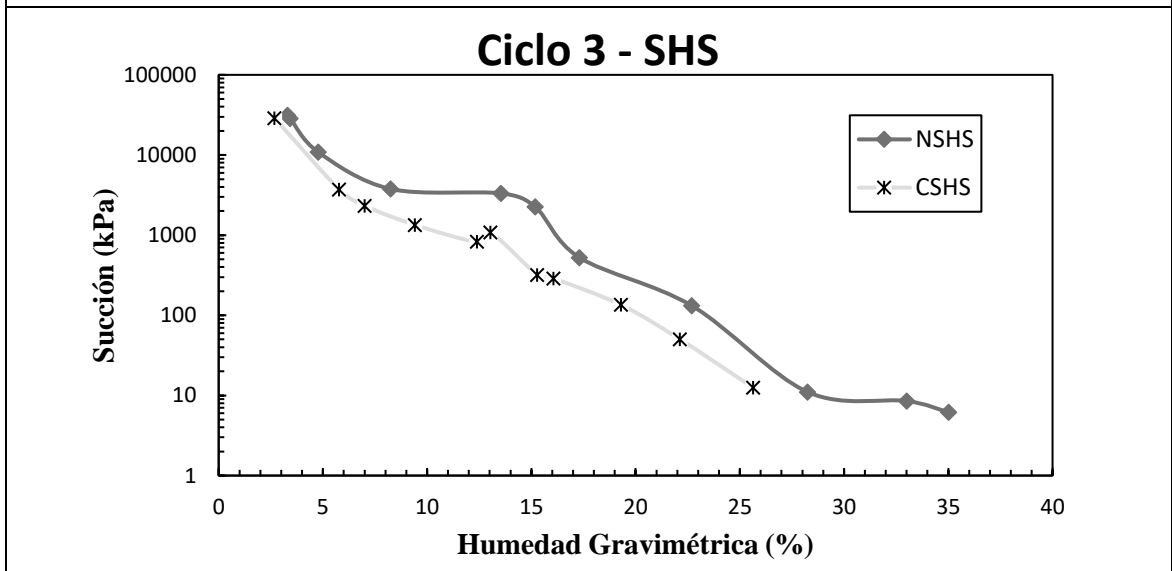
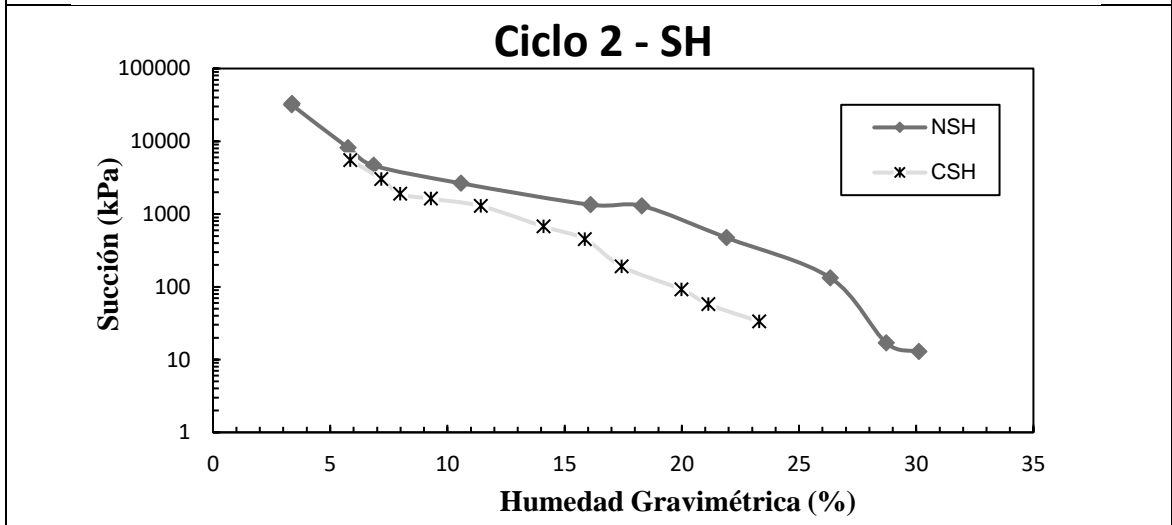
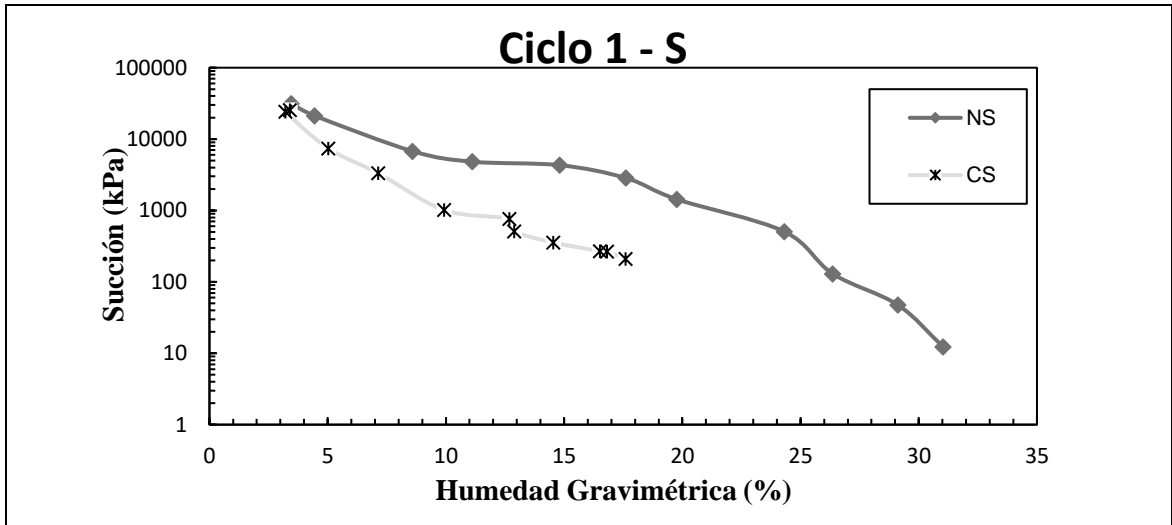
Muestra	Área total (mm ²)	Área vacíos (mm ²)	Porcentaje
Natural – Seca	33.33	3.01	9%
Natural – Seca – Húmeda - Seca	33.33	4.67	14%
Compactada	33.33	1.32	4%
Compactada – Seca	33.33	2.07	6.2%
Compactada – Seca- Húmeda - Seca	33.33	2.39	7.9%

6.1.9 Succión del Suelo

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos es determinar las variaciones de la curva de succión a través del proceso de humedecimiento y secado, se mide esta propiedad del suelo a partir del método del papel filtro. Como en el ensayo se utiliza un total de cinco papeles filtro por cada contenido de humedad, cada uno provee una medida de la succión matricial, por lo cual la curva presentada es la curva de tendencia conseguida a partir de las mediciones hechas para cada ciclo. En la Figura 6-11 se presentan las curvas obtenidas, tanto para la muestra en estado natural, como para la muestra compactada. Se observa una marcada zona de poros intermedios en las curvas del suelo natural que se desplaza dependiendo del ciclo de humedecimiento y secado al que correspondan, en las muestras de suelo compactado esta zona es más leve debido a que se tiene una distribución de poros más homogénea.

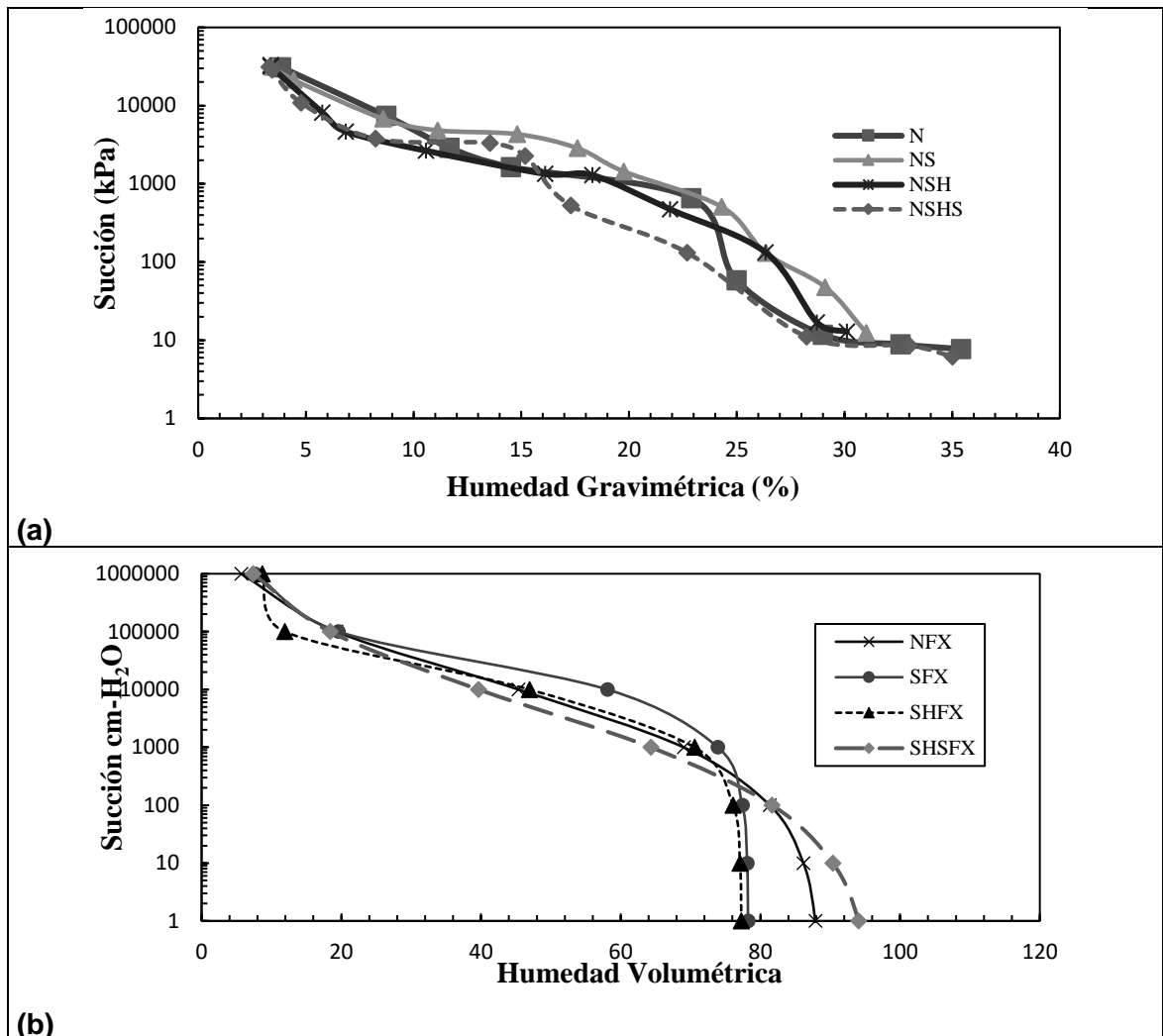
Figura 6-11 Curvas Características para los ciclos de Humedecimiento y secado

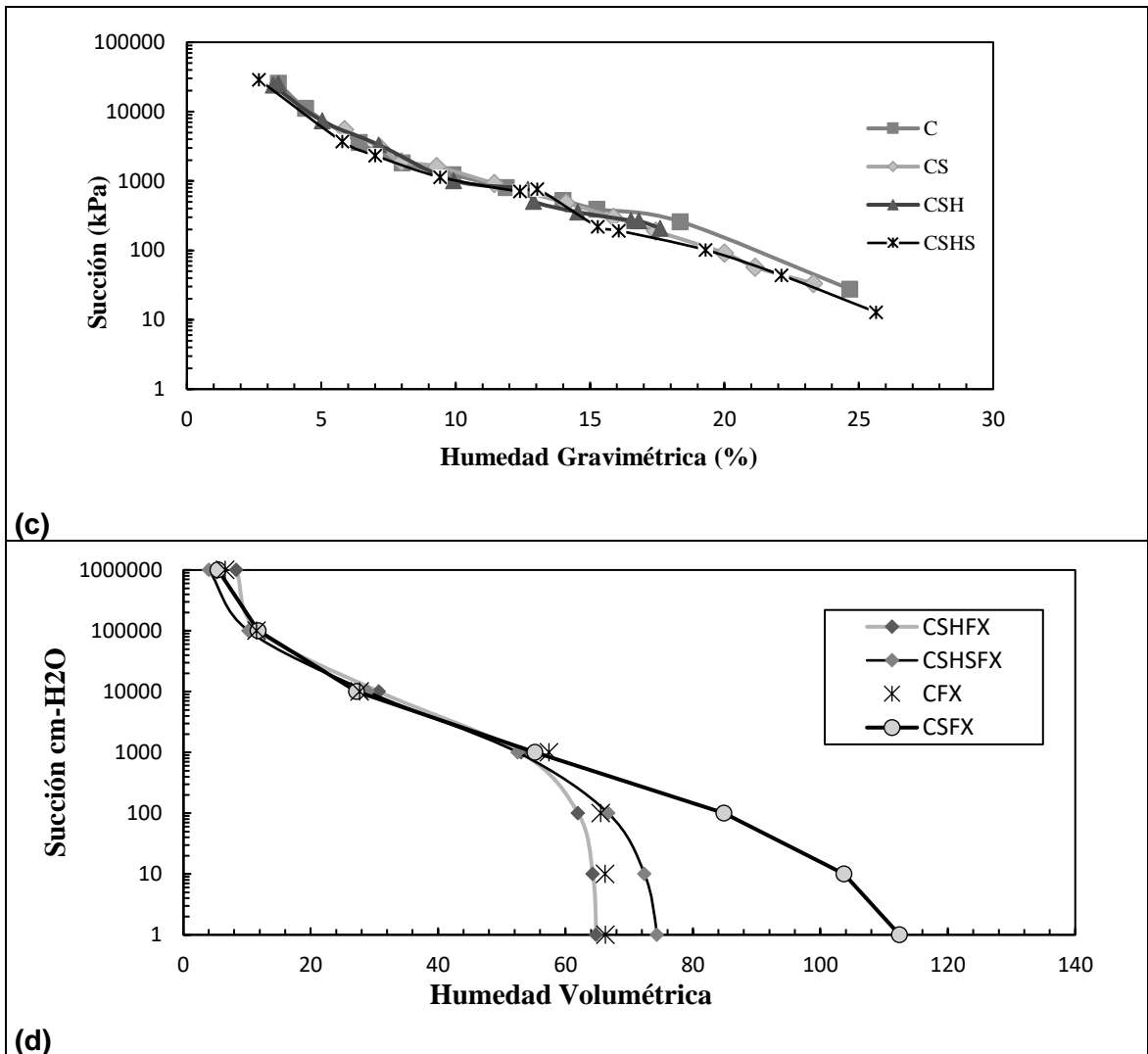




En la Figura 6-12 (a) se presenta la variación de la succión a través de los diversos ciclos de la muestra natural y en la Figura 6-12 (c) la variación de la muestra compactada. Para ambos casos se incluye el ajuste realizado con el modelo Fredlund and Xing (Fredlund & Xing, 1994) (Figura 6-12 (b) suelo natural, Figura 6-12 (d) suelo compactado a la nomenclatura se agrega FX en estos casos).

Figura 6-12 Variación de la succión para diferentes ciclos de humedecimiento y secado.

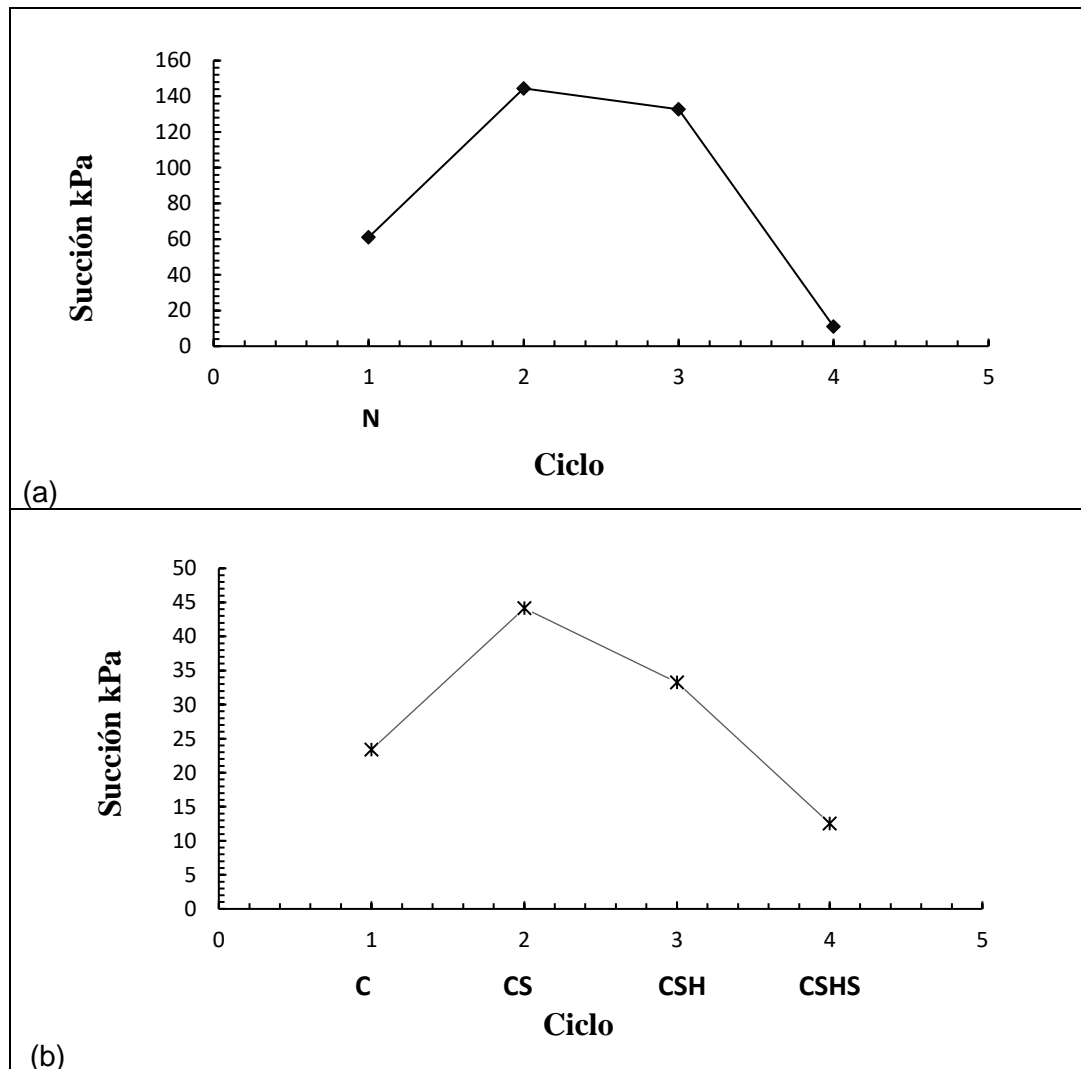




Para la muestra natural, se puede observar que las succiones más altas se presentan en el primer ciclo (secado), esto es coherente con los resultados presentados previamente, ya que en este ciclo se presentan las mayores contracciones y se midió la menor área de vacíos. Por otro lado, la curva que presenta menores valores de succión es la correspondiente al último ciclo (secado-humedecimiento-secado), en este punto, el suelo empezaba a evidenciar agrietamiento que genera mayor cantidad de macroporos lo que se traduce en un aumento en el área de vacíos como se vio en el análisis de imágenes. Para la muestra compactada la variación en los valores de succión es muy pequeña, al igual que ocurre con los cambios volumétricos y el porcentaje de área de vacíos, esta variación, sin embargo, está sujeta a la aparición de grietas, por lo que en el último ciclo

se tiene que los valores de succión también son los más bajos comparados con los demás ciclos. En la Figura 6-13 se presenta, para cada ciclo de humedecimiento y secado, el valor de la succión del suelo en la humedad natural (26%) para el suelo natural y compactado.

Figura 6-13 Variación de la succión a través de los ciclos de humedecimiento y secado en la humedad natural. (a) Suelo Natural (b) Suelo Compactado.



A partir de las curvas de ajuste, se determinó el punto de máxima pendiente en la curva y se trazó una línea tangente, se dibujó una línea horizontal a través del contenido máximo de humedad y la intersección de las dos líneas indica el valor de entrada de aire. La

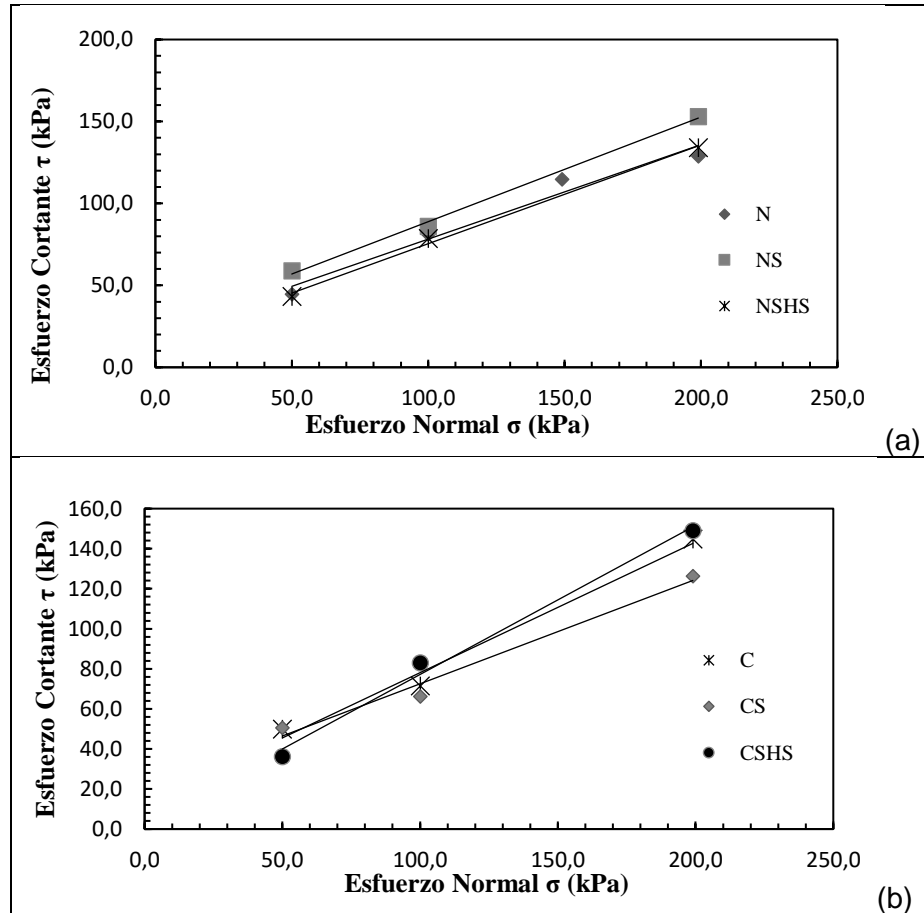
Tabla 6-4 Valor de entrada de Aire los valores obtenidos para cada ciclo de humedecimiento y secado en ambas muestras, donde se evidencia que para el ciclo 1 (S) tanto para la muestra natural como compactada hay un aumento lo que indica que la succión necesaria para sacar el agua del suelo es mayor que en los demás ciclos, esto es coherente con los resultados de los demás ensayos ya que se viene evidenciando una contracción en este ciclo, y por tanto disminución en los tamaños de vacíos. Esto también refleja el proceso de histéresis que se cumple para curvas que parten del suelo seco y se humedecen.

Tabla 6-4 Valor de entrada de Aire

Muestra	Valor de Entrada de Aire (kPa)
N	148.14
S	835.095
SHS	52.16
C	481.05
CS	793.75
CSHS	111.27

6.1.10 Corte directo

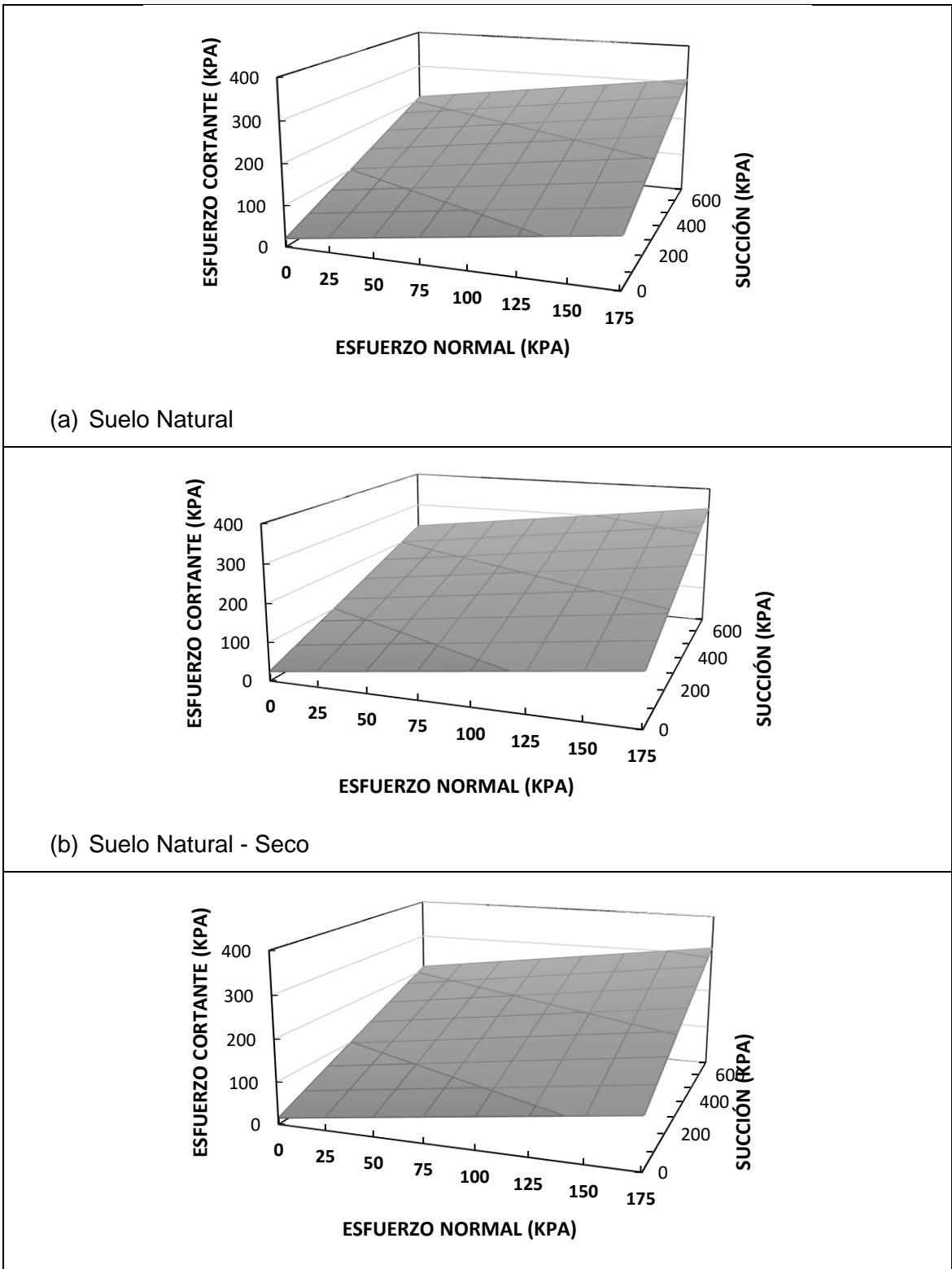
De los ensayos de corte en la modalidad Consolidado Drenado, se obtienen los parámetros cohesión y el ángulo de fricción efectivos para cada ciclo de humedecimiento y secado, a partir de los cuales se estructurará el modelo de estabilidad de taludes para cada caso. En la Figura 6-14 Envoltentes de falla Suelo Natural (a) y Compactado (b) muestran los resultados de los ensayos de corte directo. Se obtienen los parámetros de resistencia que se presentan en la Tabla 6-5 se toma el ángulo ϕ_b como $0.5 \phi'$, ya que a pesar de que este parámetro es variable (Fredlund, 1987) indica que puede suponerse constante excepto para aquellas succiones muy bajas donde se convierte en ϕ' .

Figura 6-14 Envolventes de falla Suelo Natural (a) y Compactado (b)**Tabla 6-5** Parámetros de Resistencia

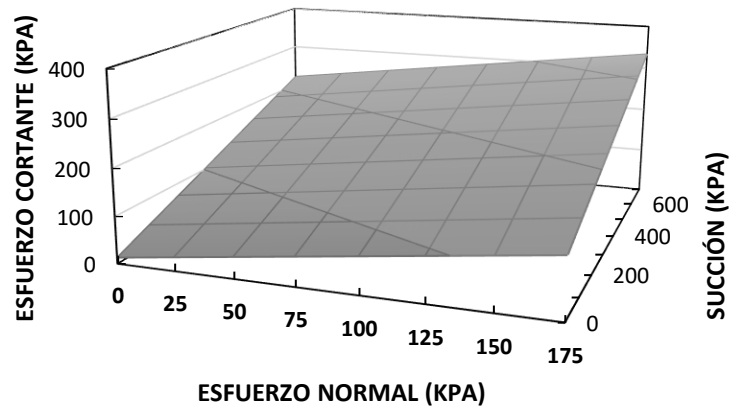
	c (kPa)	PHI (°)	PHI b (°)
N	20.6	29.9	15
S	25	32.6	16.3
SHS	15.1	31.1	15.5
C	13	33	16.5
CS	20	28	14
CSHS	8	37	18.5

A partir de los datos obtenidos se grafican las envolventes extendidas, para cada ciclo de humedecimiento y secado, estas se presentan en **Figura 6-15**.

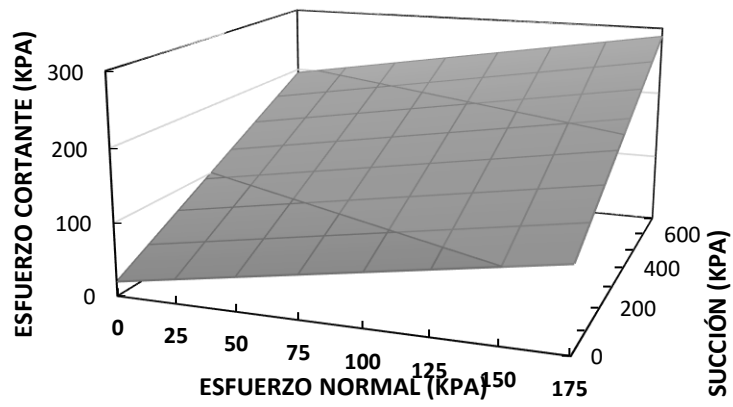
Figura 6-15 Envolventes de falla extendidas



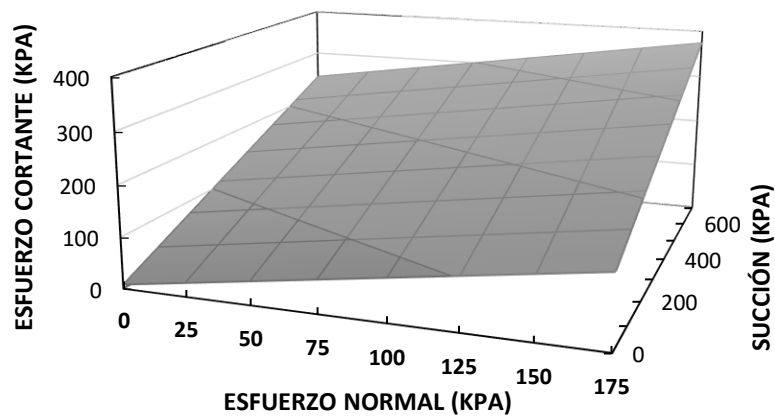
c) Suelo Natural – Seco - Húmedo - Seco



d) Compactado



e) Suelo Compactado - Seco



f) Suelo Compactado – Seco - Húmedo - Seco

Al pasar de un ciclo a otro de humedecimiento y secado se tiene que en coherencia con las variaciones de la succión va variando la cohesión y el ángulo de fricción, obteniéndose parámetros mayores para el ciclo 1 (secado), donde la muestra se contrae y se da una densificación que mejora las propiedades de resistencia del suelo, sin embargo en los demás ciclos empiezan a aparecer grietas que generan modificaciones en la estructura del suelo, que finalmente se reflejan en la resistencia de este, en la Tabla 6-6 Resistencia al corte del suelo para cada ciclo de humedecimiento y secado. se presentan los valores de la resistencia al corte obtenidas con la ecuación extendida, para un esfuerzo normal de 50 kPa y una succión de 100 kPa como ejemplo de lo anteriormente mencionado.

Tabla 6-6 Resistencia al corte del suelo para cada ciclo de humedecimiento y secado.

	Resistencia al Corte (kPa)
N	76.15
NS	86.14
NSHS	73.09
C	75.09
CS	71.51
CSHS	79.14

6.1.11 Permeabilidad del suelo

Se realiza la medición de la permeabilidad saturada del suelo por el método de cabeza constante para 3 muestras del suelo natural y compactado en cada ciclo, luego a partir del valor promedio obtenido y utilizando la ecuación de (Gardner, 1958) para proyectar la variación del coeficiente de permeabilidad a partir de la succión matricial se obtienen las curvas de conductividad hidráulica en función de la succión como se muestra en las Figuras 6-16 y 6-17.

Figura 6-16 Curvas de conductividad hidráulica Muestra Natural

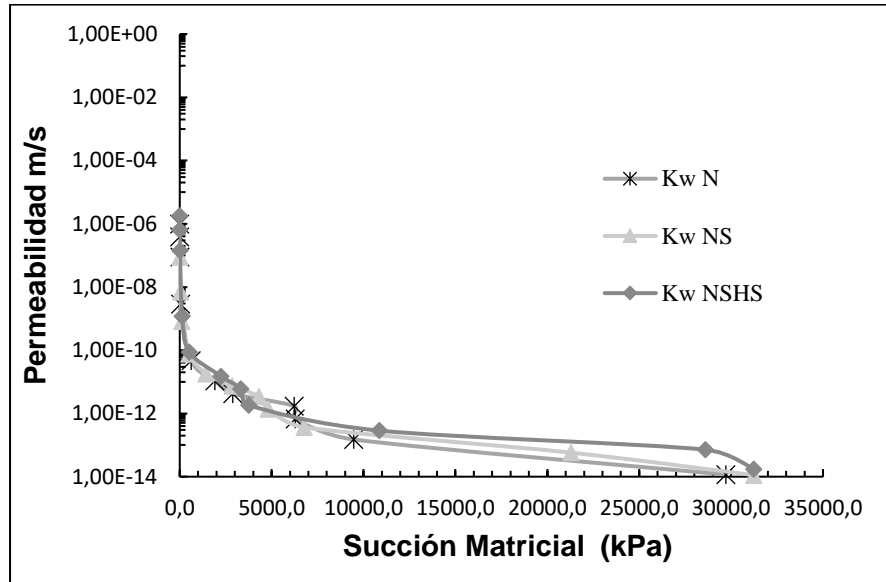
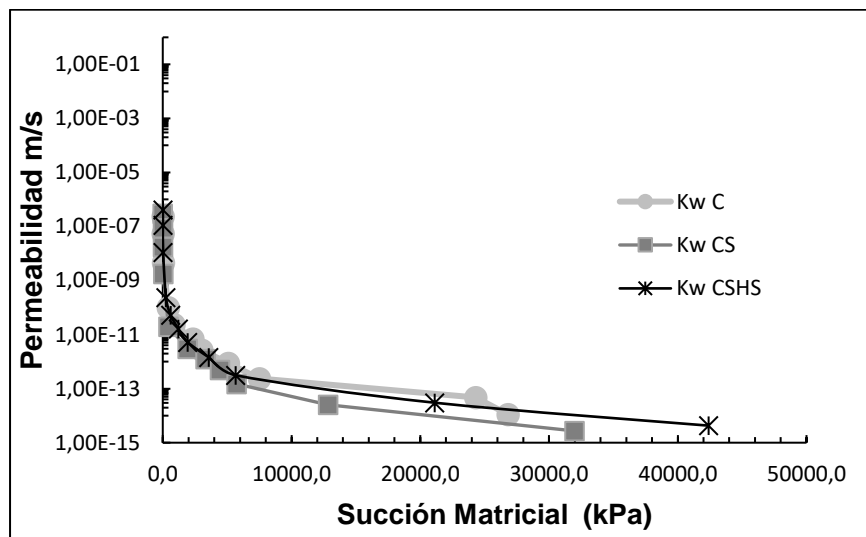


Figura 6-17 Curvas de conductividad hidráulica Muestra Compactada



Para ambas muestras, natural y compactada, existe una variación pequeña en la permeabilidad debido a que el suelo es fino, y los valores de la permeabilidad son muy pequeños, sin embargo, se evidencia que en el último ciclo en coherencia con el valor de entrada de aire y la succión, se presenta la permeabilidad más alta, confirmando un aumento en el tamaño de los poros.

6.1.12 Estabilidad de taludes

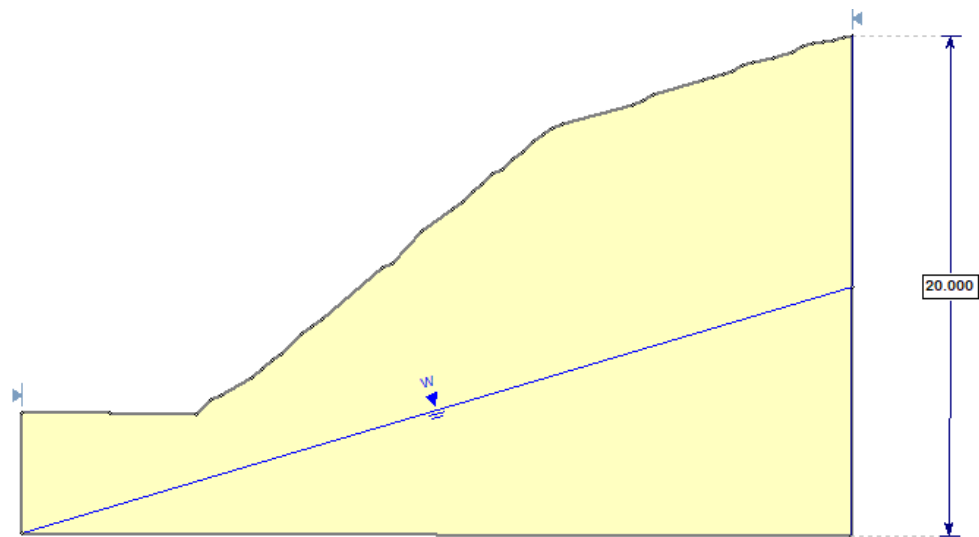
Slide2, (Antes “Slide”) es un Software de estabilidad de taludes 2D donde se pueden generar modelos complejos de forma rápida y sencilla, se obtiene el factor de seguridad de diferentes superficies de falla para taludes en suelo y roca, considerando incluso cargas externas y el agua subterránea. Utiliza métodos de equilibrio límite como Bishop, Janbu, Spencer y Sarma, entre otros (Rocscience Inc., 2021).

En el presente caso se realiza un análisis determinista (factor de seguridad) utilizando los parámetros obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio previamente descritos, entre estos, el peso unitario húmedo (γ_h), la cohesión (C), el ángulo de fricción (ϕ), las curvas de succión y permeabilidad obtenidas para los diferentes ciclos de humedecimiento y secado, el valor de entrada de aire y el ángulo de fricción asociado con la succión matricial (ϕ_b). Se analizará entonces la variación del factor de seguridad a partir de los métodos de equilibrio límite de Bishop simplificado.

Se obtiene una sección del talud a partir de la topografía y se asume un nivel freático a 10 metros de profundidad ya que no se evidencia afloramientos del mismo en la zona, por lo cual el nivel de agua en el terreno está sujeto a la cota de la quebrada La Iguaná que en el sitio de estudio se encuentra a 1775 msnm (dato tomado a partir de Google Earth), es decir aproximadamente a 52 m por debajo de la corona del talud. Se considera la lluvia acumulada de 3 días de 80 mm, que constituye uno de los umbrales críticos de lluvia definidos por (Aristizábal Giraldo et al., 2011) para el Valle de Aburrá (Figura 6-18).

Se incluye un análisis de agua subterránea transitoria con el fin de incluir en el modelo la succión, el valor de entrada de aire, y el ángulo ϕ_b ; también se agregarán fisuras por tensión en la parte superior del talud llenas de agua, ya que en campo hay evidencia de estas.

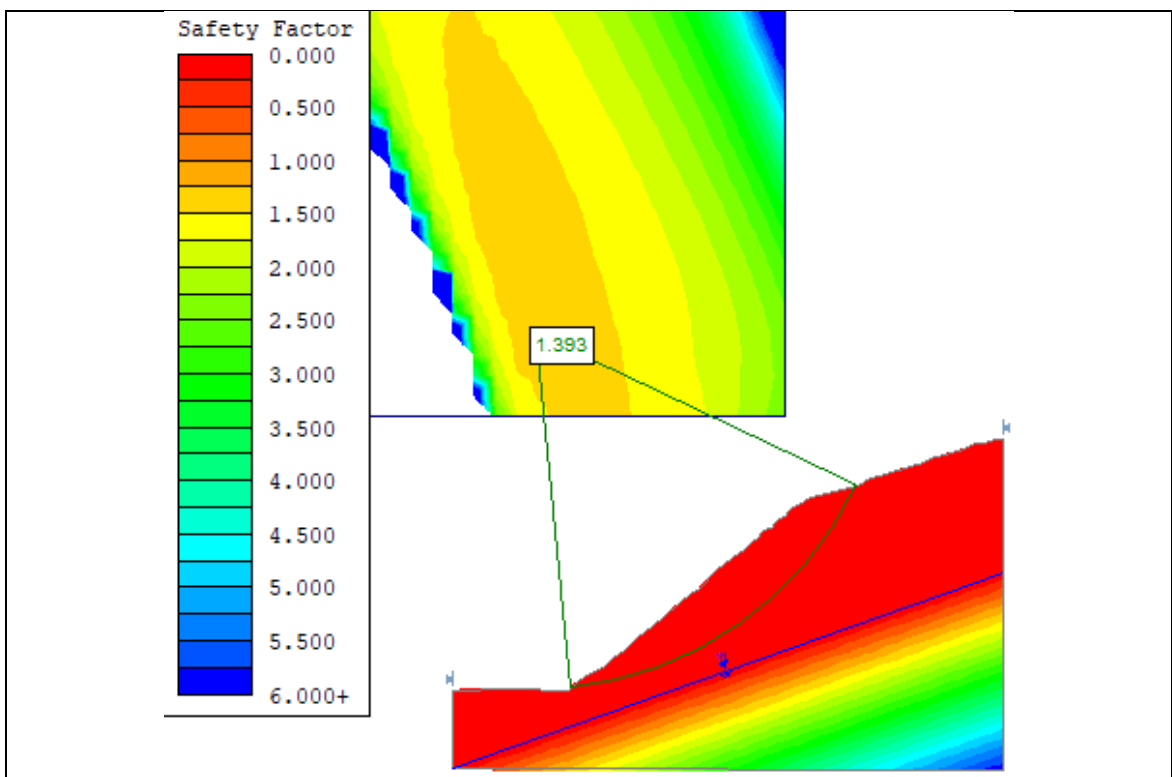
Figura 6-18 Geometría del talud



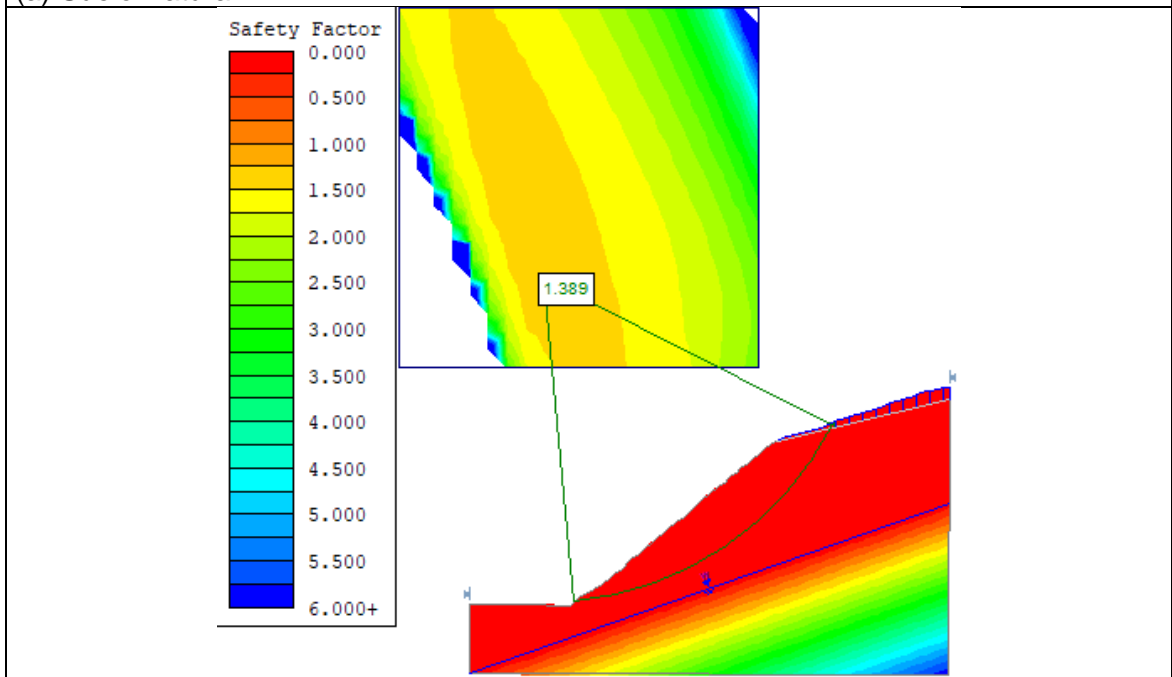
En la Figura 6-19 y la Figura 6-21 se puede observar los resultados de los análisis de estabilidad para el suelo natural para el día 0 y el día 3, en cada ciclo de humedecimiento y secado donde se evidencia que acorde con lo mencionado anteriormente, para el primer ciclo, donde ocurre la mayor contracción, y aumenta la succión, se obtiene el mayor factor de seguridad, en este mismo sentido es en el último ciclo en el cual el factor de seguridad es menor. Adicionalmente para todos los casos, cuando se agregan la fisuración el factor de seguridad también disminuye, aunque no de manera significativa.

Por otro lado, en la Figura 6-20 Factor de seguridad Suelo Compactado y Figura 6-22 observar el resultado de los análisis de estabilidad para el suelo compactado en el día 0 y día 3 respectivamente, para este caso al igual que en el caso del suelo natural, el factor de seguridad más alto se obtiene en el segundo ciclo, y el menor para el último ciclo.

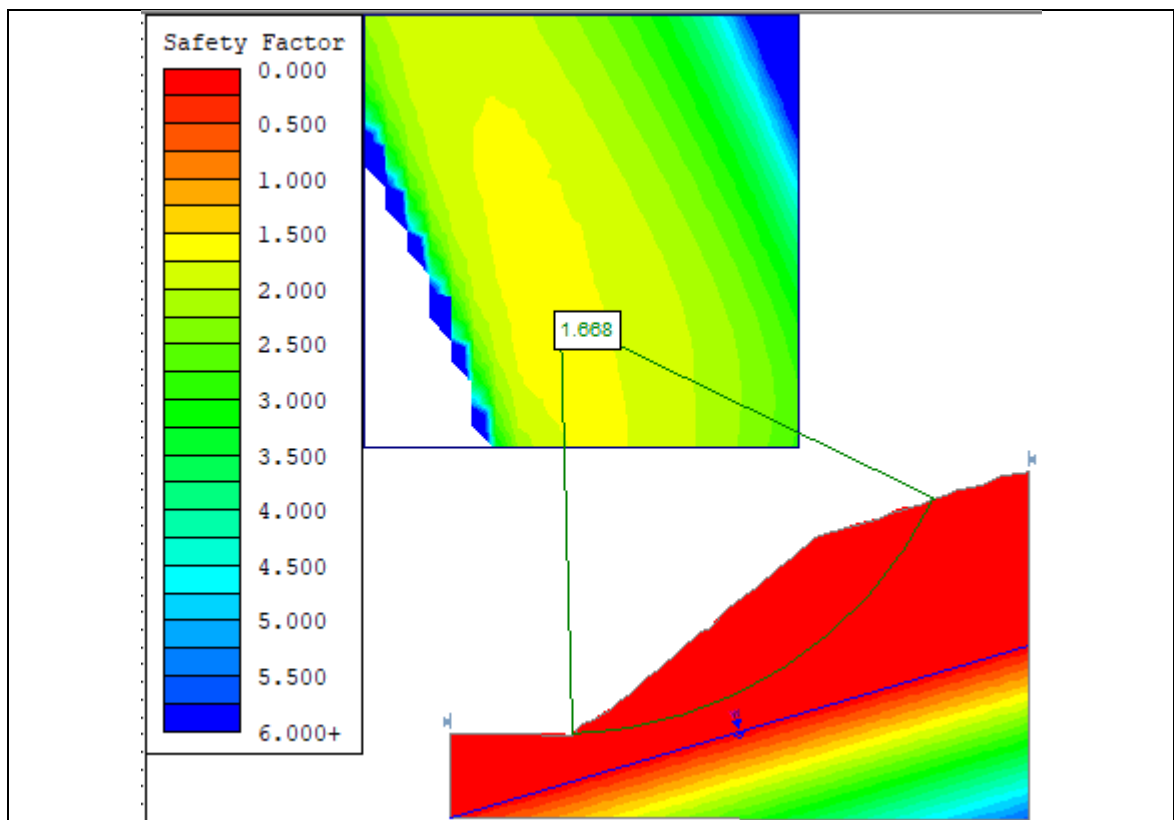
Figura 6-19 Factor de seguridad Suelo Natural



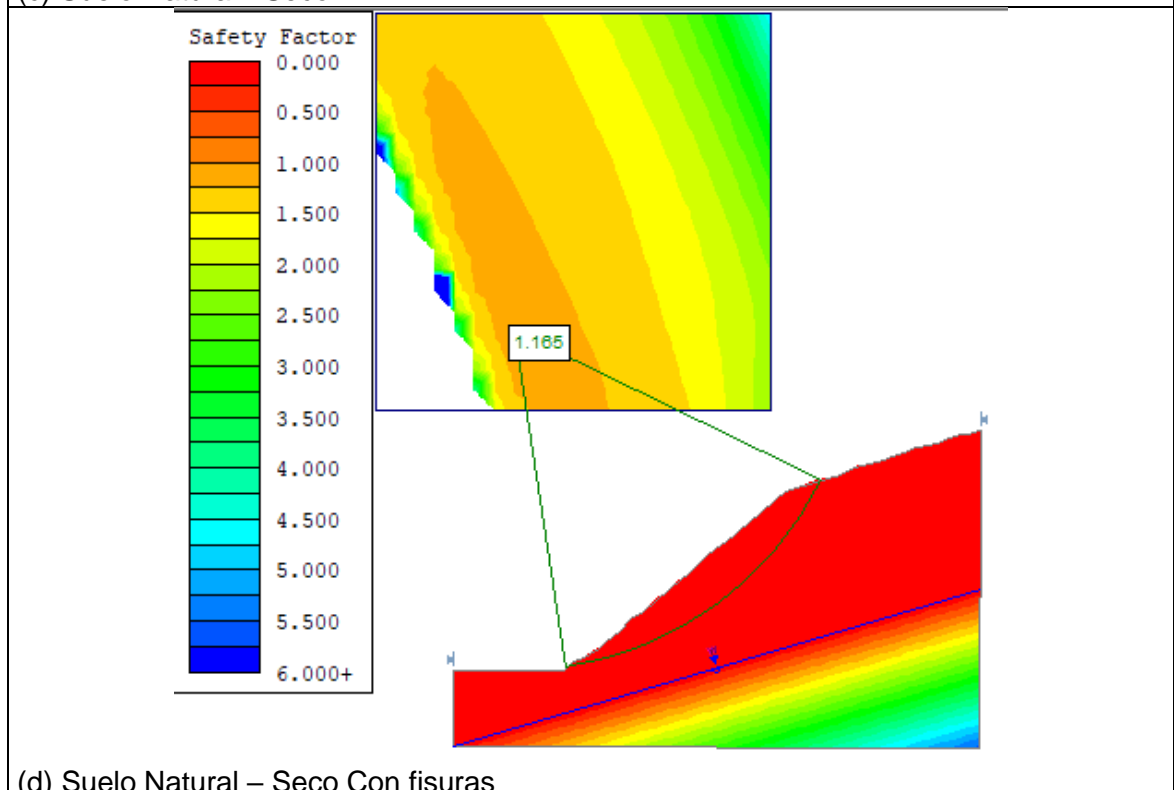
(a) Suelo Natural



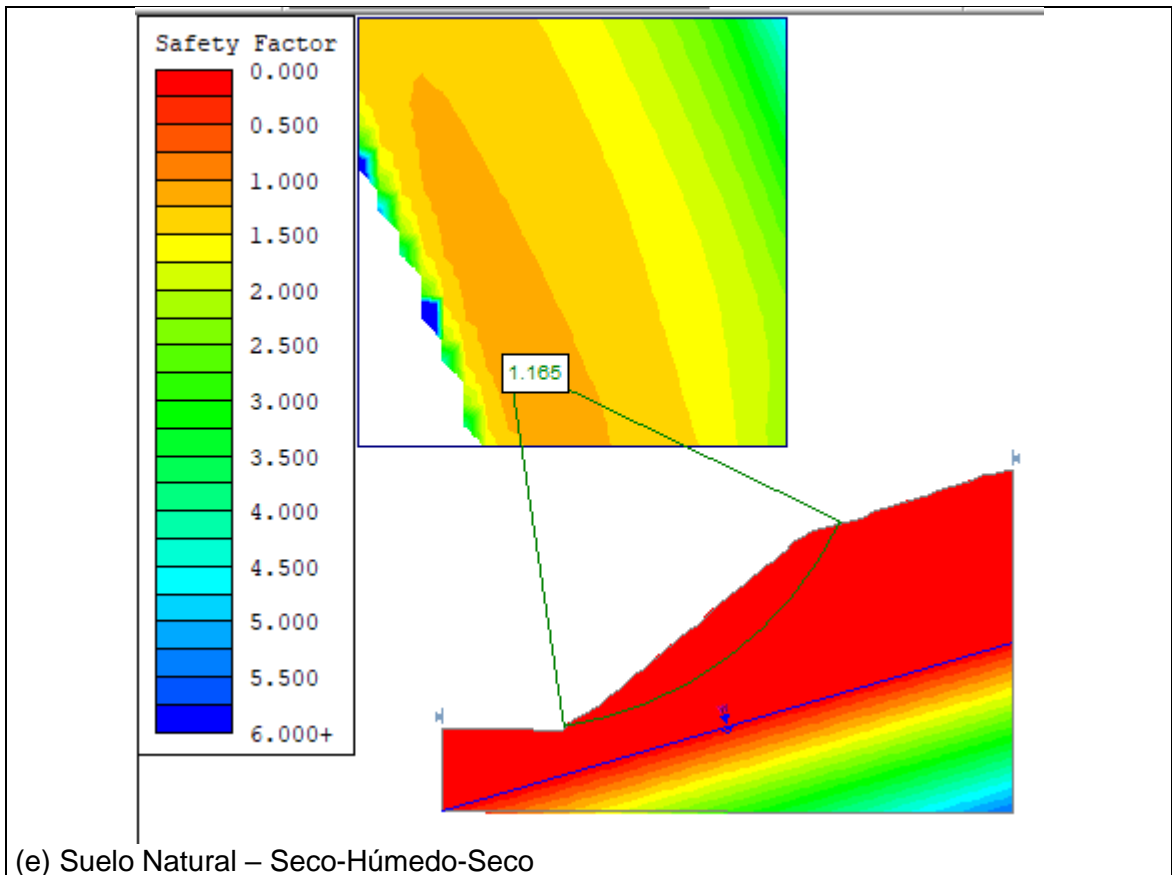
(b) Suelo Natural Con fisuras



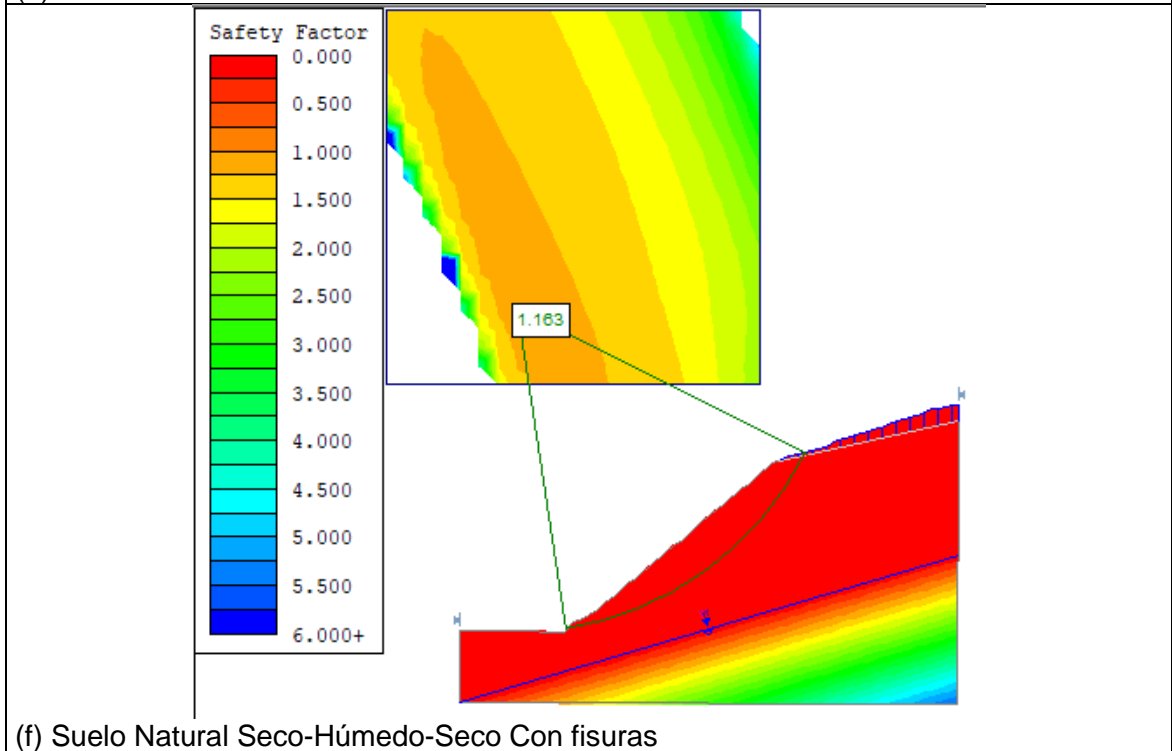
(c) Suelo Natural - Seco



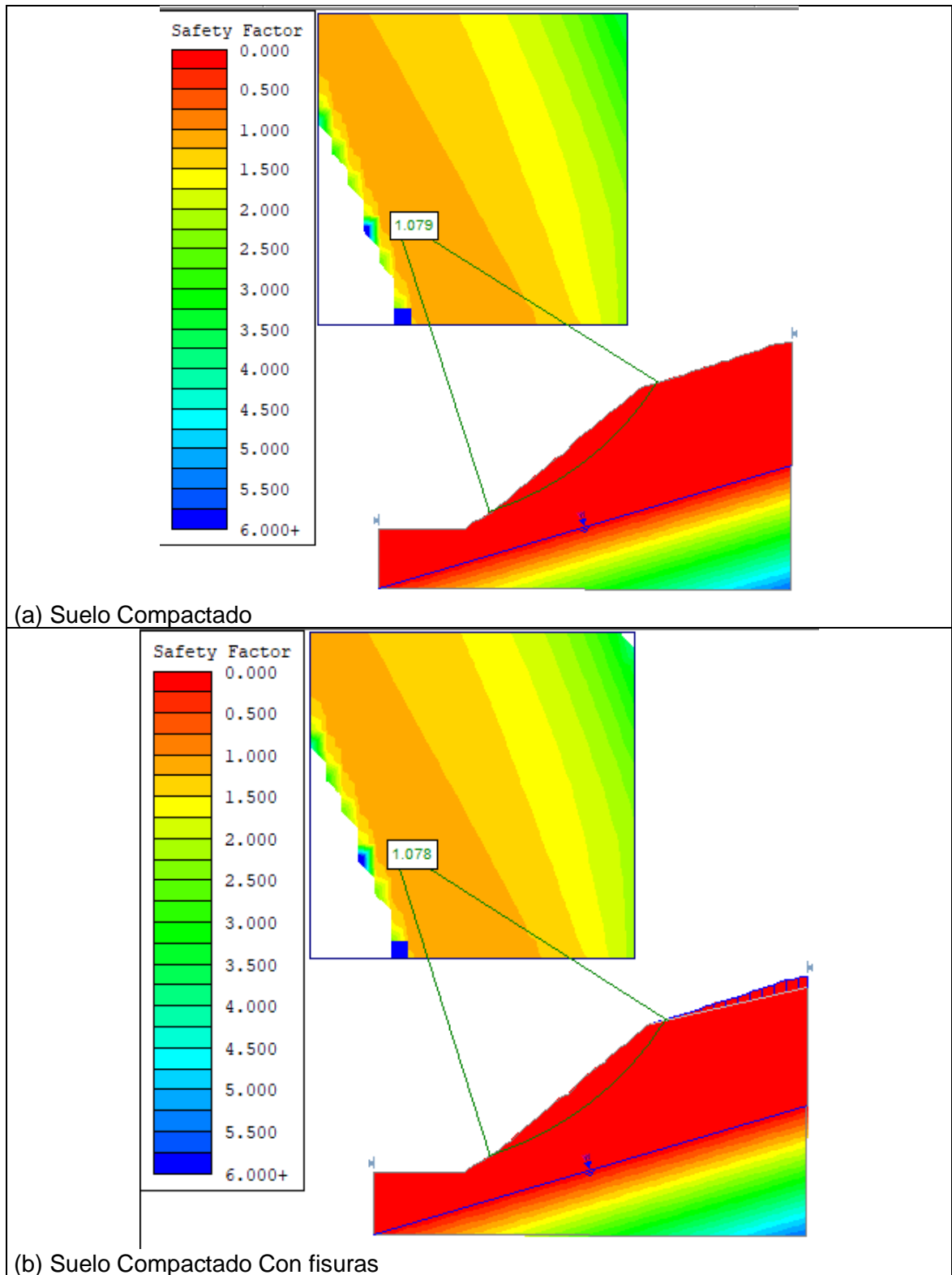
(d) Suelo Natural – Seco Con fisuras

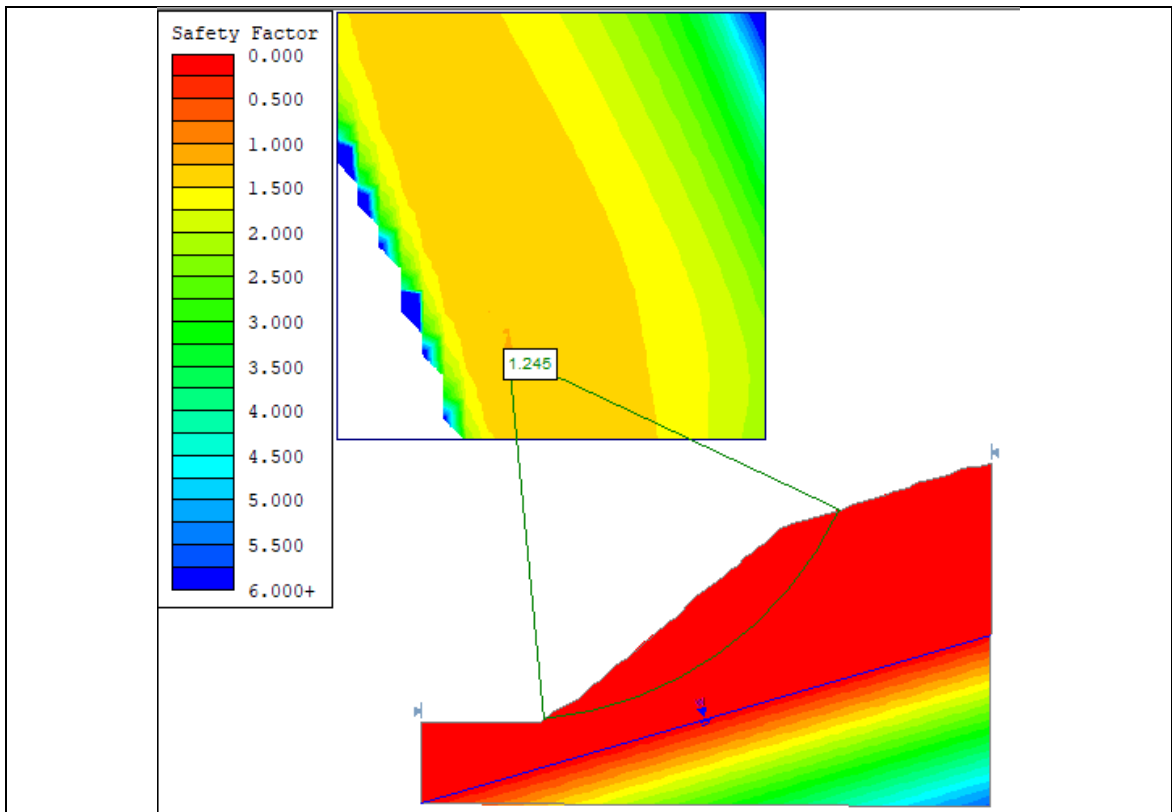


(e) Suelo Natural – Seco-Húmedo-Seco

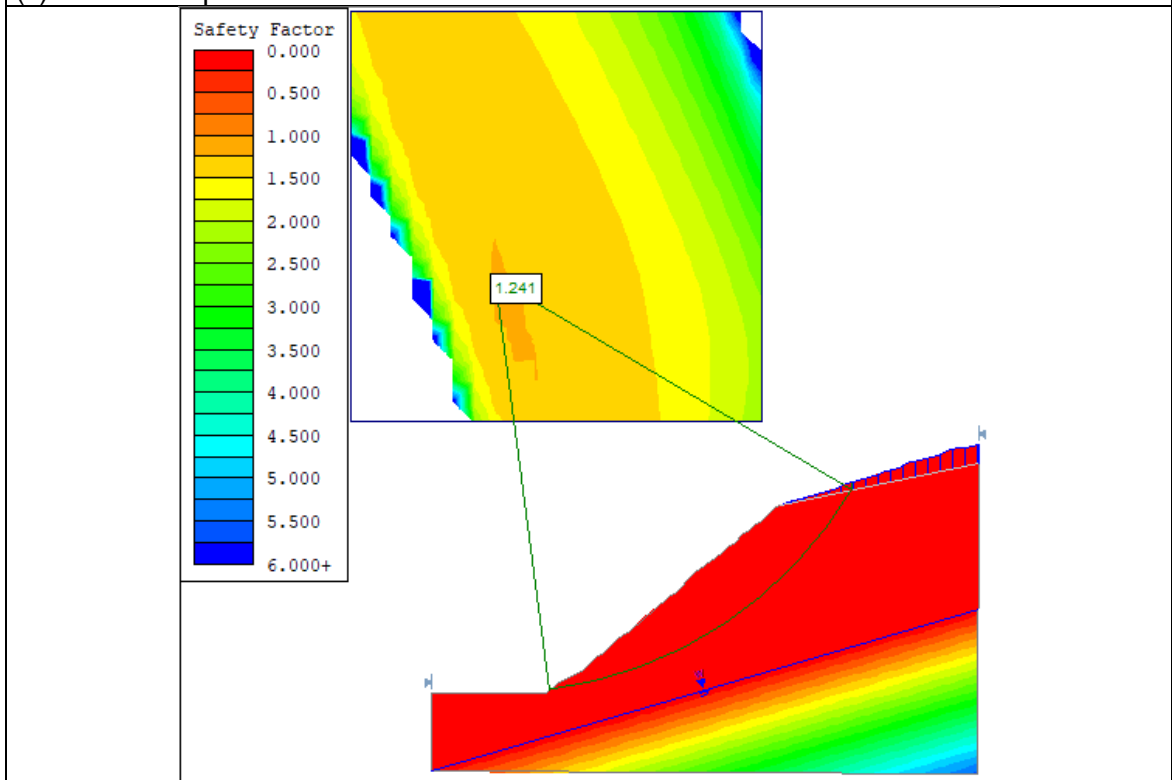


(f) Suelo Natural Seco-Húmedo-Seco Con fisuras

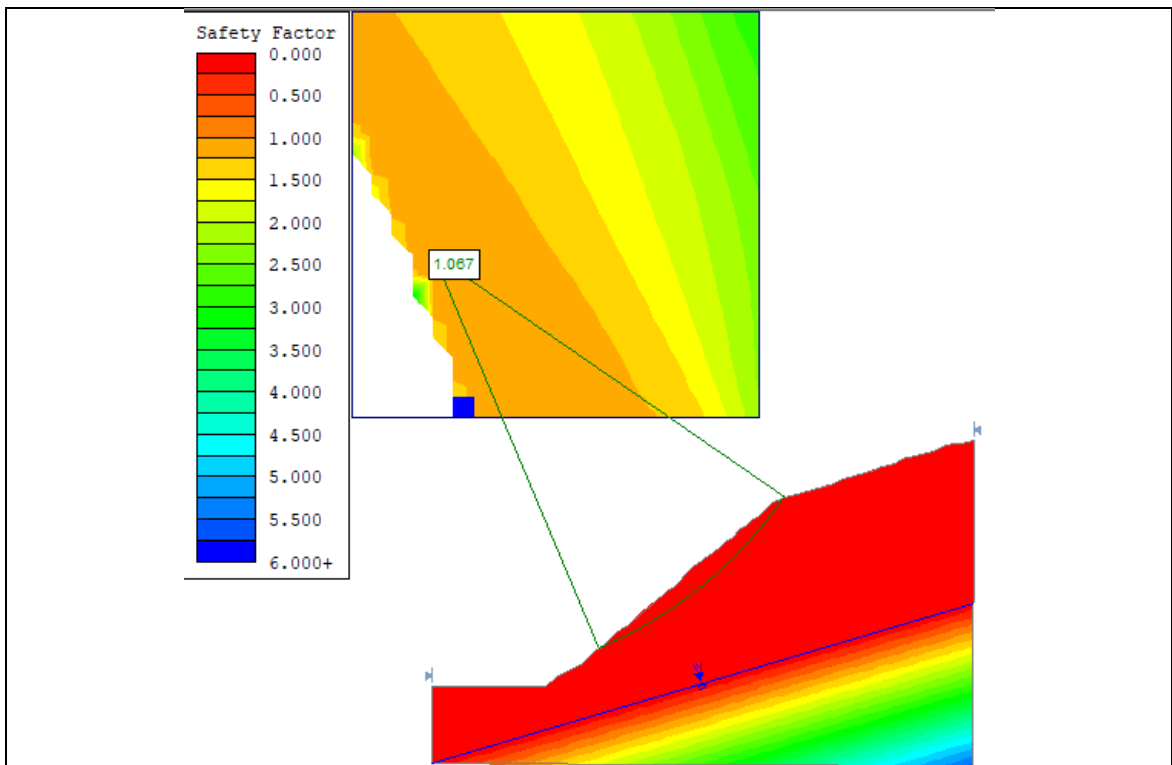
Figura 6-20 Factor de seguridad Suelo Compactado



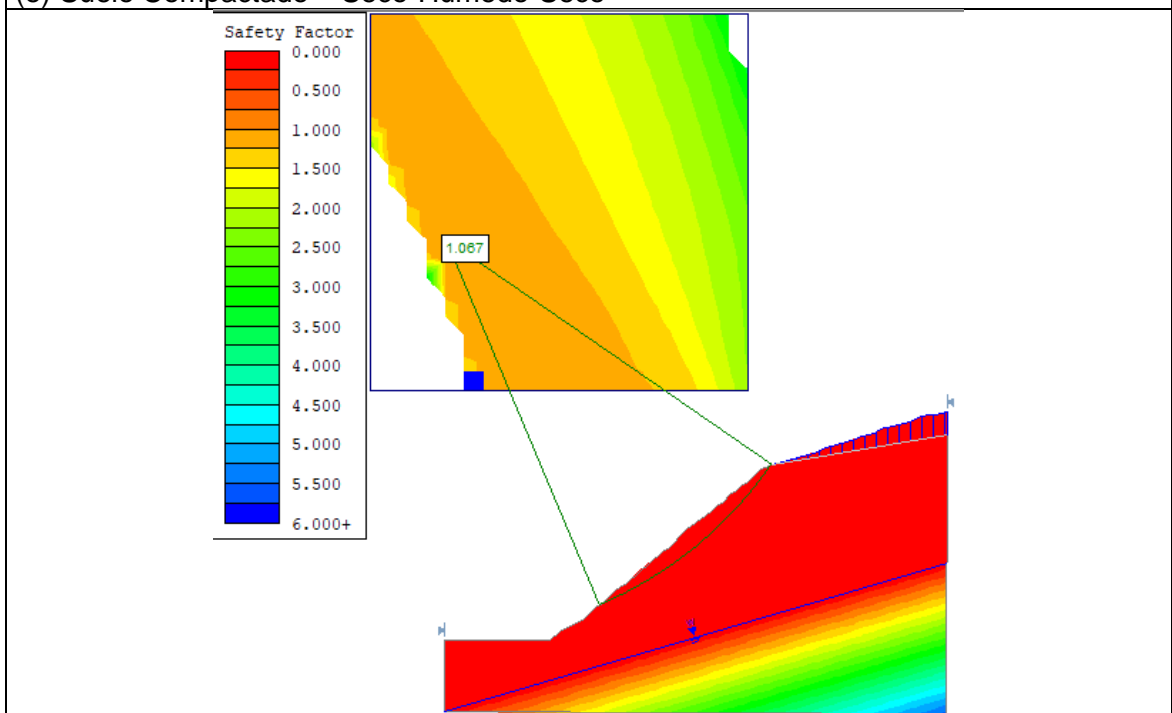
(c) Suelo Compactado - Seco



(d) Suelo Compactado – Seco Con fisuras

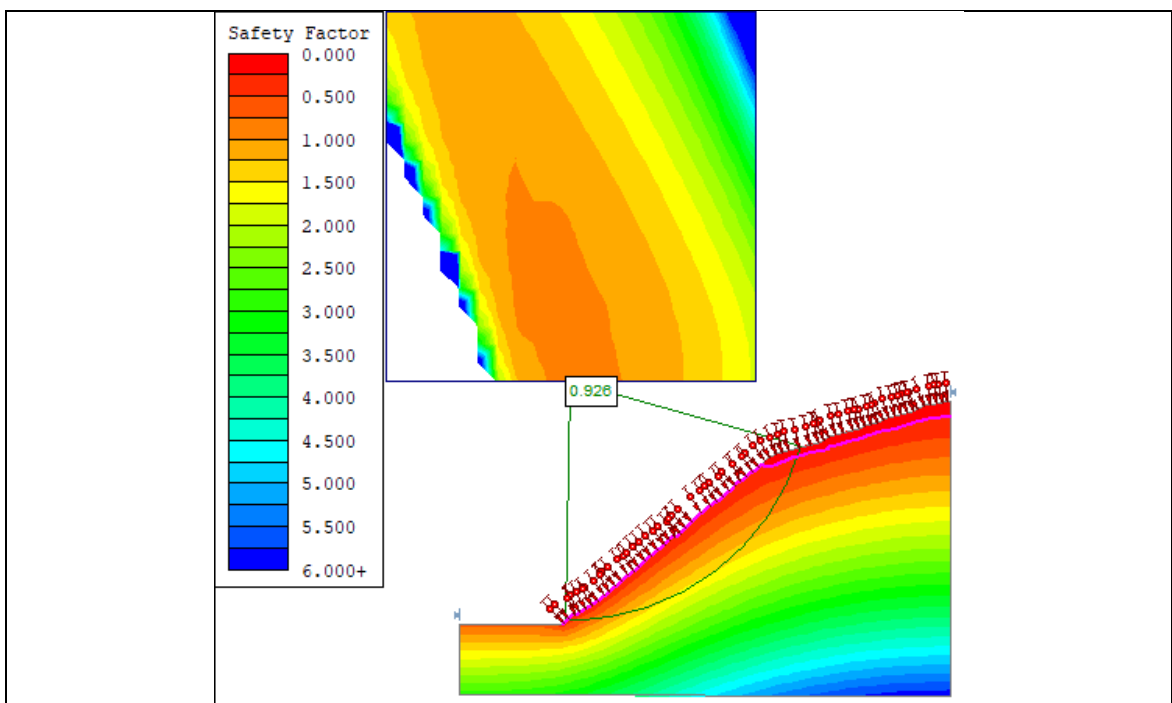


(e) Suelo Compactado – Seco-Húmedo-Seco

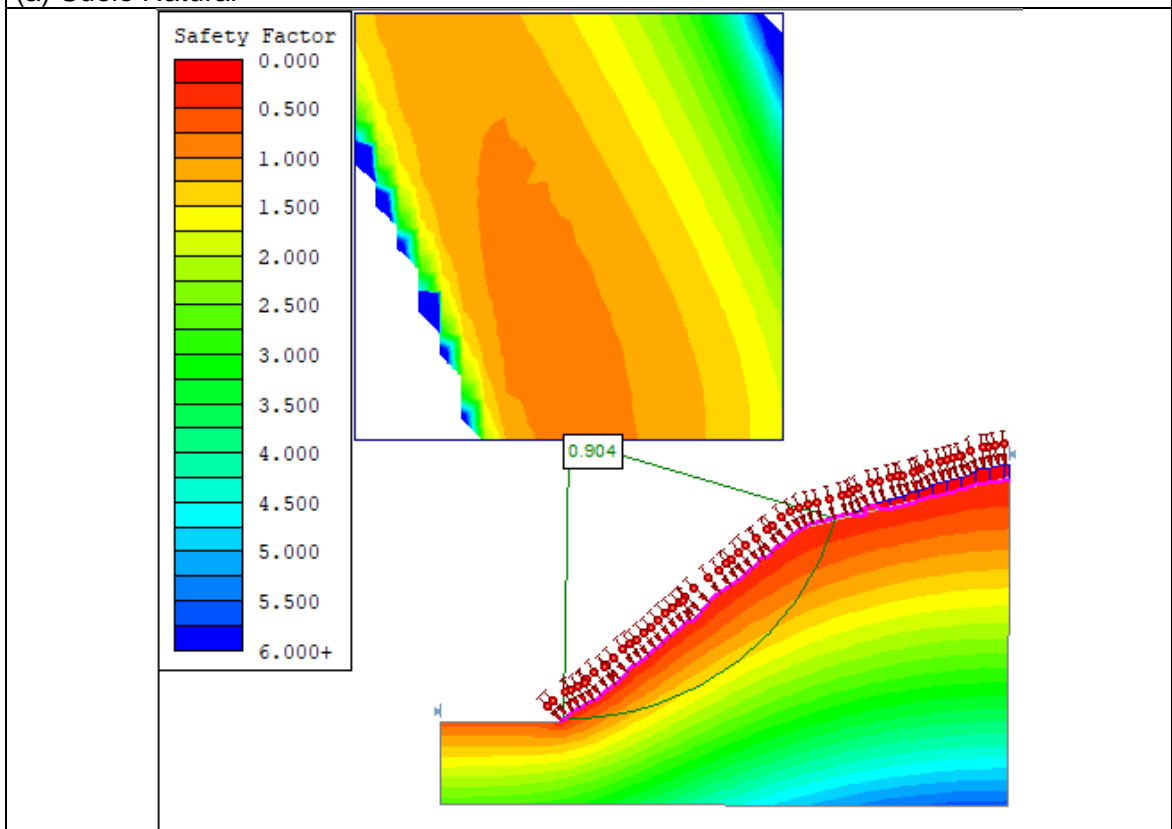


(f) Suelo Compactado Seco-Húmedo-Seco Con fisuras

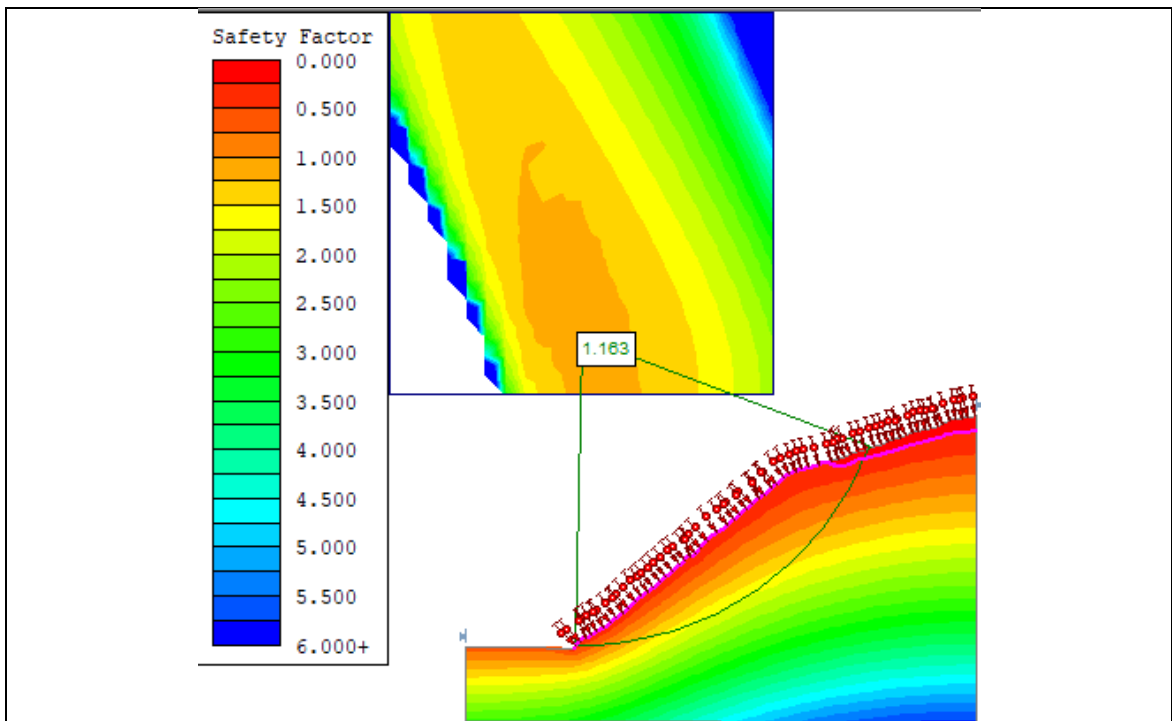
Figura 6-21 Factor de seguridad Suelo Natural Día 3



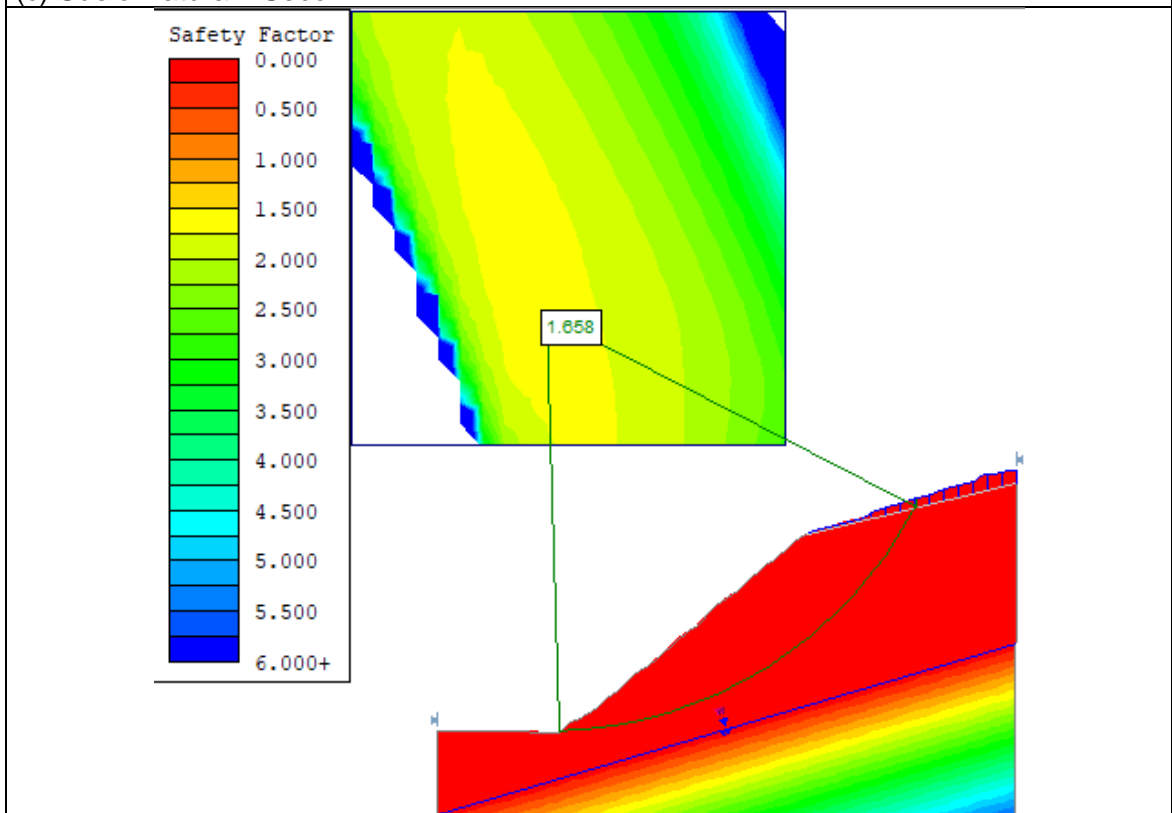
(a) Suelo Natural



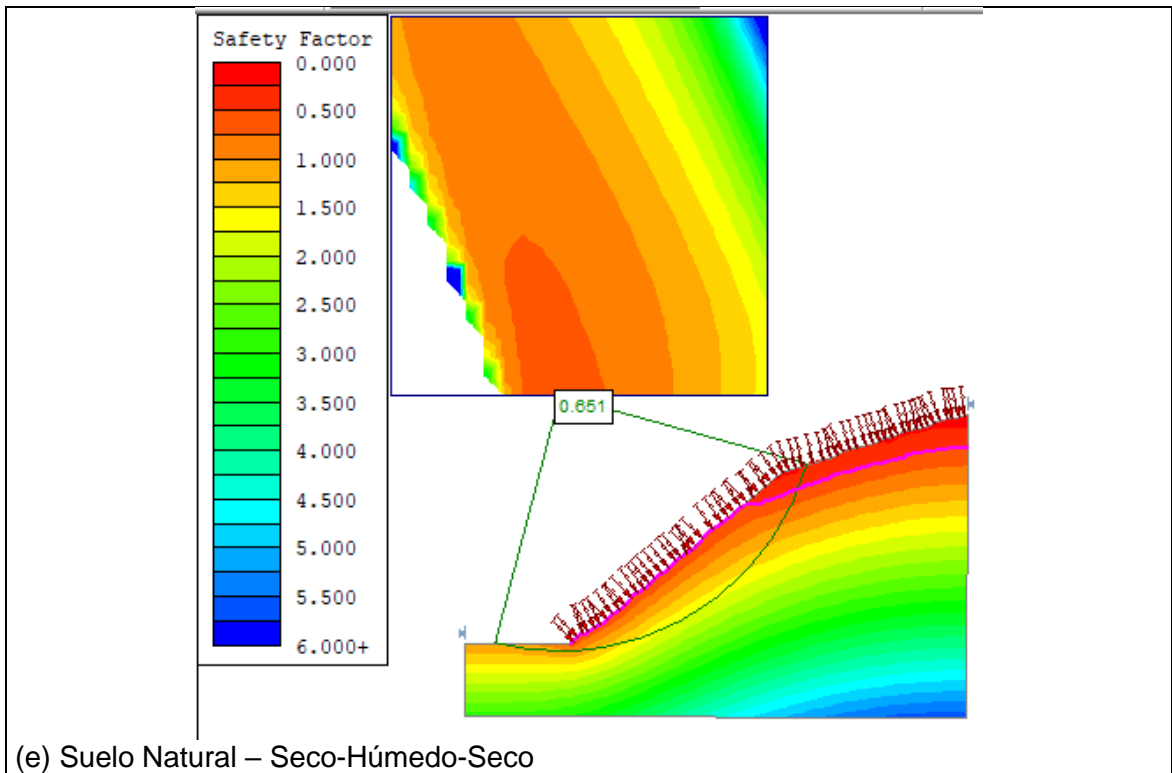
(b) Suelo Natural Con fisuras



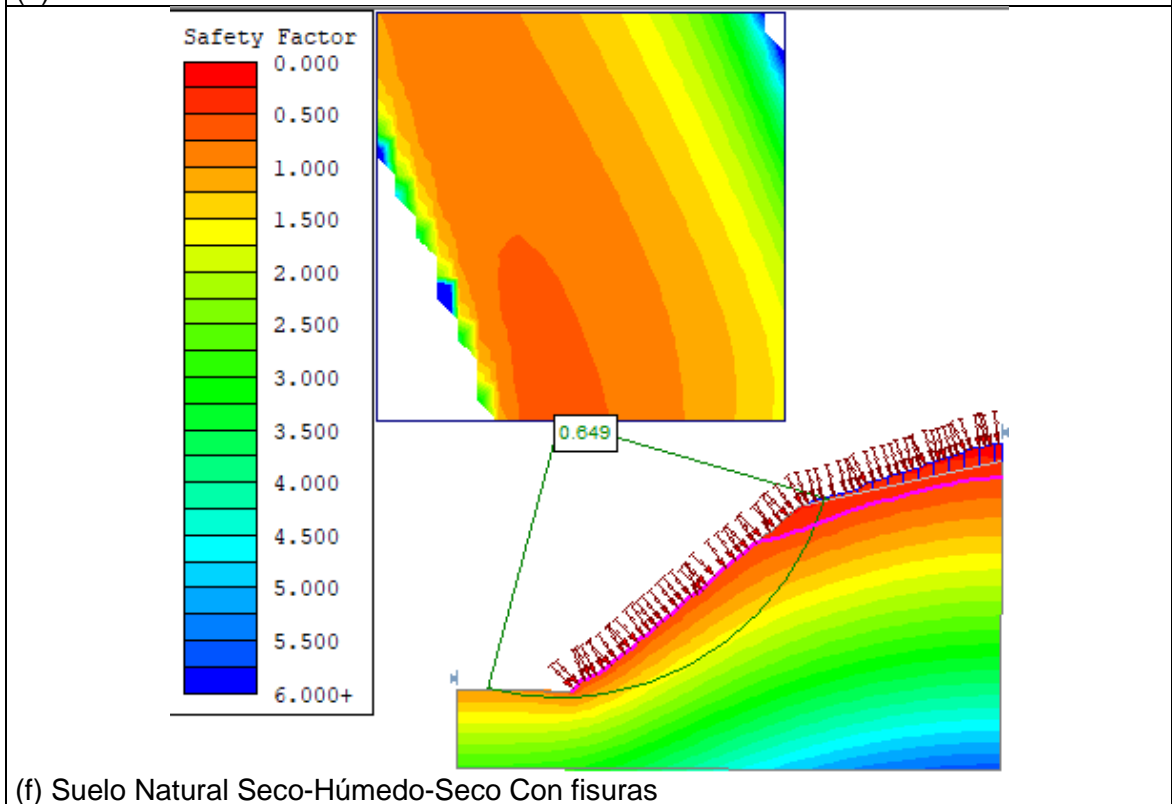
(c) Suelo Natural - Seco



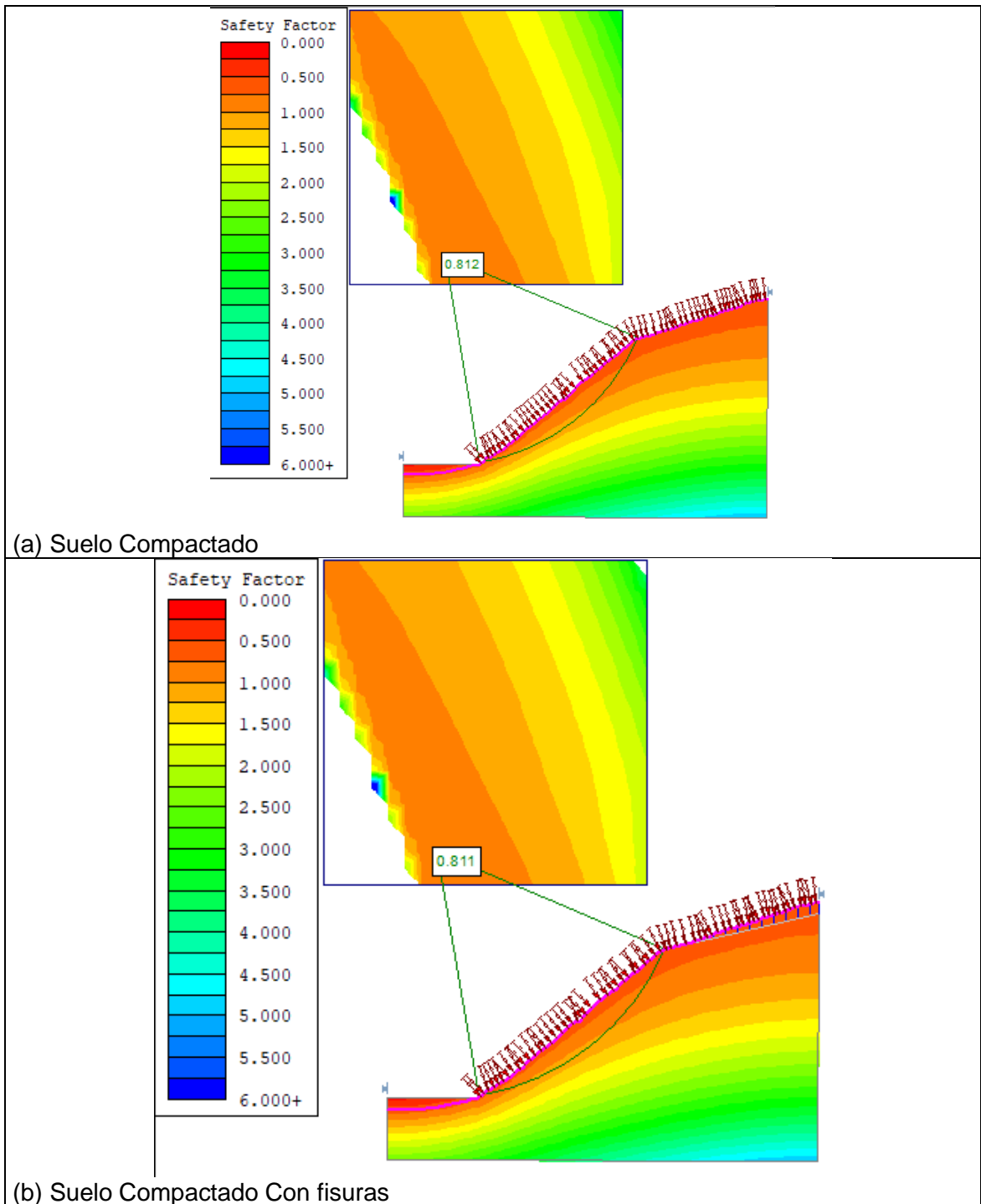
(d) Suelo Natural – Seco Con fisuras

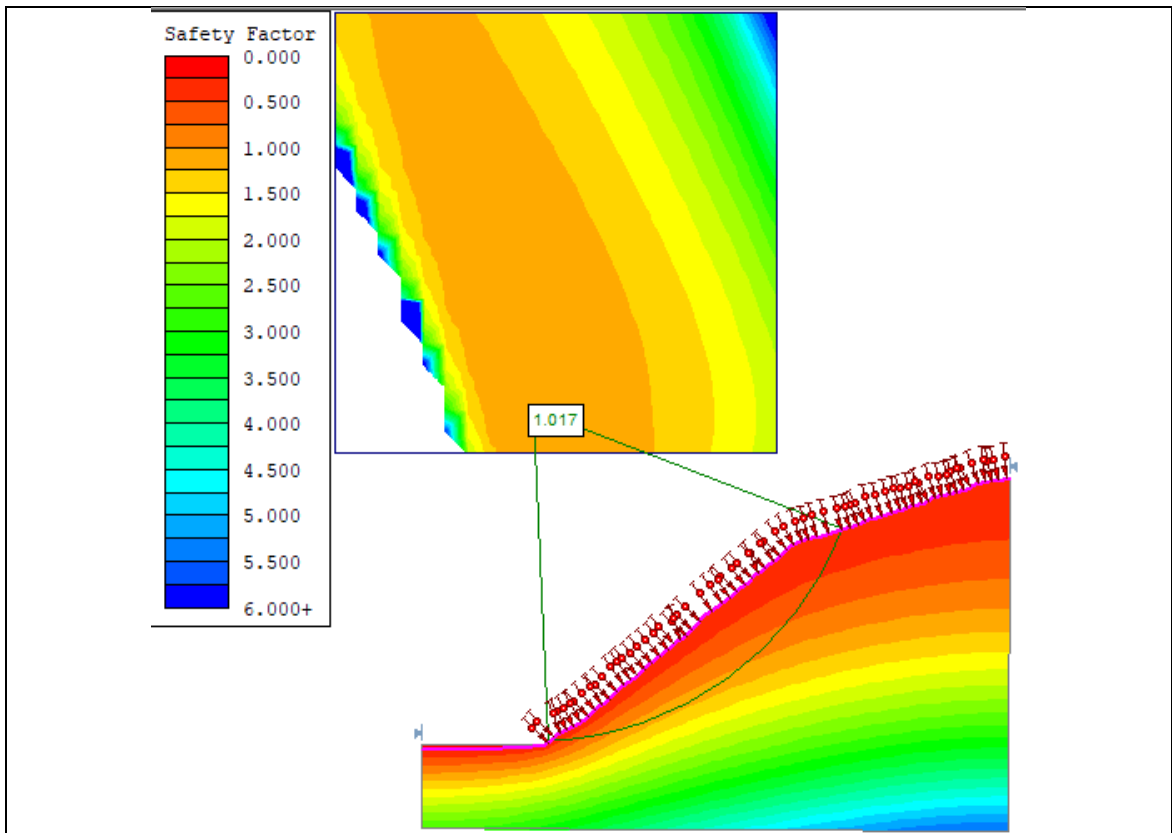


(e) Suelo Natural – Seco-Húmedo-Seco

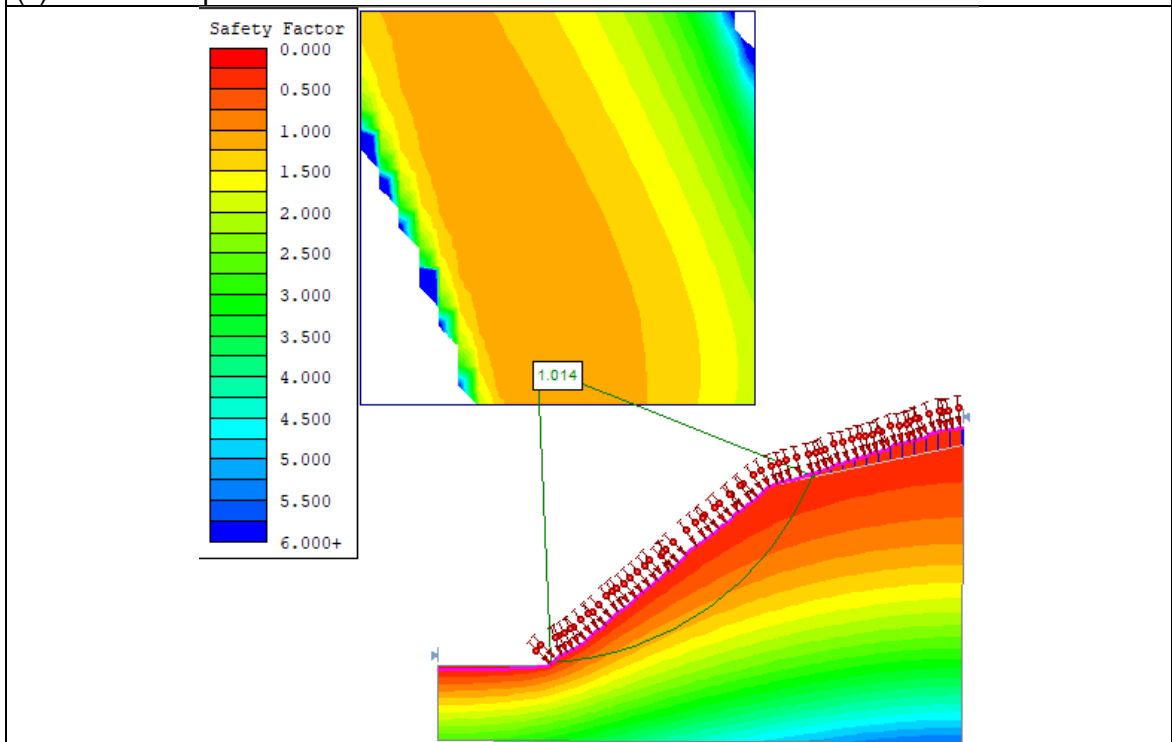


(f) Suelo Natural Seco-Húmedo-Seco Con fisuras

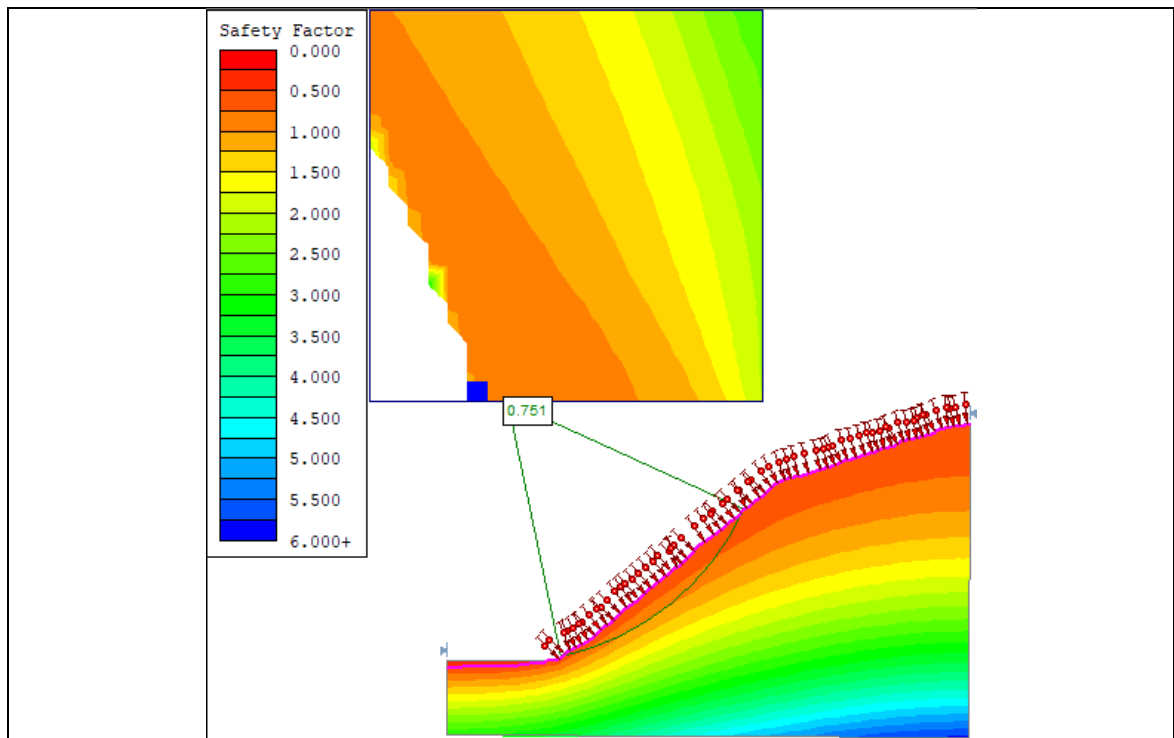
Figura 6-22 Factor de seguridad Suelo Compactado Día 3



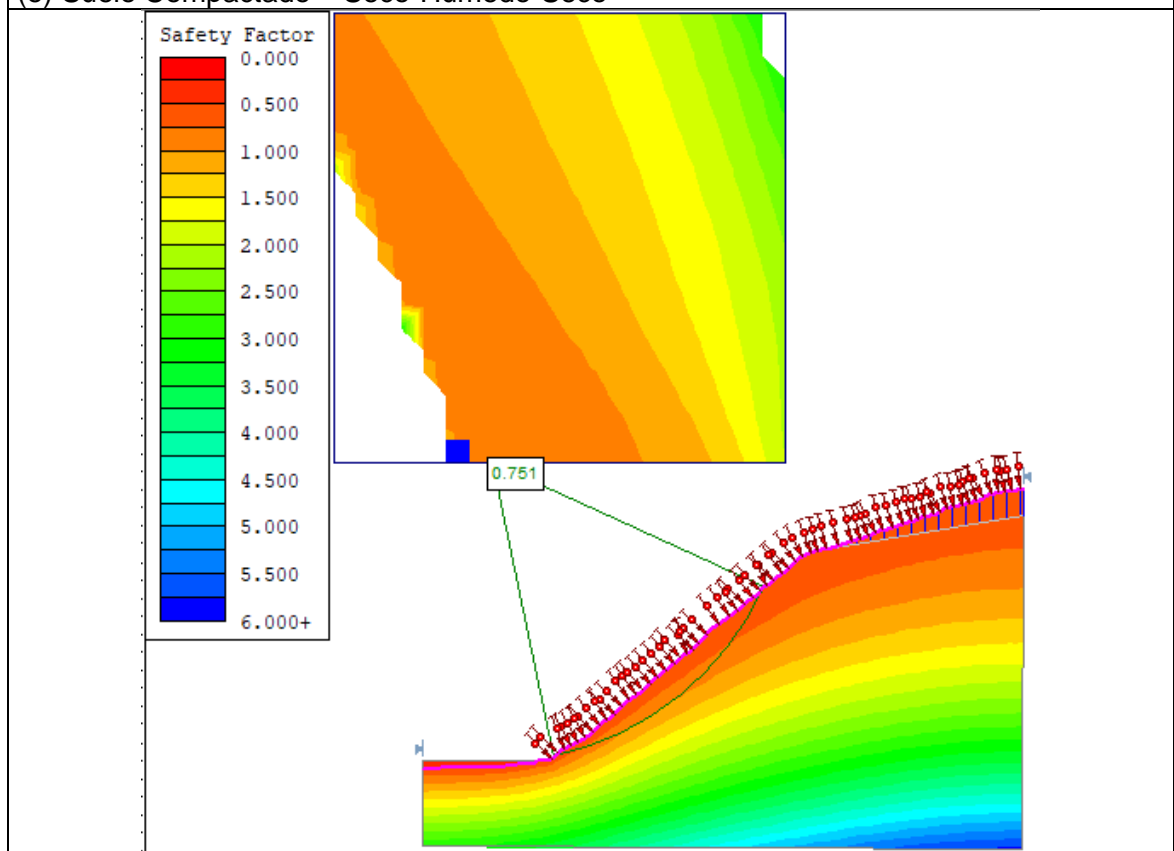
(c) Suelo Compactado - Seco



(d) Suelo Compactado – Seco Con fisuras



(e) Suelo Compactado – Seco-Húmedo-Seco



(f) Suelo Compactado Seco-Húmedo-Seco Con fisuras

En la Tabla 6-7 Variación del factor de seguridad para la muestras Natural y Compactada a través de los Ciclos de Humedecimiento y Secado. se puede apreciar cómo es la variación de los factores de seguridad tanto para la muestra natural como para la compactada con y sin fisuras, para el día 0 y 3. En los dos casos con y sin fisuras, en el día 1 la disminución del Factor de Seguridad entre el primer y último ciclo, para la muestra natural es de 16.37%; y para la muestra compactada es del 2%. Para el día 3 se observa una disminución del factor de seguridad mayor, obteniéndose para la muestra natural una disminución del 30% entre el primero y el último ciclo y en el caso del suelo compactado del 8 %. En ambos casos, los cambios volumétricos que sufrieron las muestras, y las variaciones en las curvas de succión que fueron más significativos en la muestra natural que en la compactada, se reflejan en los factores de seguridad obtenidos para cada ciclo de humedecimiento y secado, es decir en la estabilidad ya que como se menciona anteriormente, para el último ciclo se obtuvo la succión más baja y también los parámetros de resistencia menores.

Lo anterior deja clara la influencia de la succión en el factor de seguridad ya que cuando esta no se considera, da un valor más alto como se vio para el día cero.

Tabla 6-7 Variación del factor de seguridad para la muestras Natural y Compactada a través de los Ciclos de Humedecimiento y Secado.

	Factor de Seguridad Día Cero	Factor de Seguridad Con fisuras Día Cero	Factor de Seguridad Día Tres	Factor de Seguridad Con fisuras Día Tres
N	1.393	1.389	0.926	0.904
NS	1.668	1.658	1.663	1.156
NSHS	1.165	1.163	0.641	0.649
C	1.079	1.078	0.812	0.811
CS	1.245	1.241	1.017	1.014
CSHS	1.067	1.067	0.751	0.751

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

La necesidad de comprender a mayor profundidad la influencia que tiene la variación climática en la estabilidad de los taludes, permitió el desarrollo de una metodología que recrea en laboratorio las condiciones de campo y que muestra cómo el proceso de humedecimiento y secado, propio de climas tropicales, desencadena cambios en el suelo, logrando observar en tiempos mucho menores como es la variación volumétrica, el cambio en el porcentaje de vacíos, la pérdida de succión, esta última relacionada con la aparición de grietas en el suelo, como las que se evidencian en temporadas secas principalmente en taludes que no tienen cobertura vegetal.

La metodología propuesta logra simular las condiciones particulares de precipitación y temperatura del sitio donde se localiza la muestra, alcanzando las condiciones de succión más críticas posteriores a los ciclos de humedecimiento y secado que en campo, tardarán más en ocurrir. Esto permite tomar decisiones a partir de estos valores que influyen en los parámetros de estabilidad.

Al someter las muestras naturales a los ciclos de humedecimiento y secado se observa una variación volumétrica que, aunque no es elevada ya que el índice de contracción del suelo es del 5%, genera variación en la distribución y porcentaje de vacíos del suelo que a su vez influye en otras propiedades. En el primer ciclo (secado) ocurre una contracción volumétrica, en el segundo ciclo (secado – humedecimiento) se recupera algo de volumen para finalmente contraerse nuevamente en el último ciclo, esta vez en menor medida ya que en este punto se presenta agrietamiento en los especímenes. En los resultados del análisis de imágenes, se puede ver las variaciones del porcentaje de vacíos que son coherentes con los cambios de volumen mencionados. También los

valores de permeabilidad, que son mayores para el último ciclo, reiteran que hubo un aumento en el tamaño de los poros. En el caso de las muestras compactadas también se observa una variación volumétrica, que en este caso es menor ya que la compactación genera vacíos más pequeños y por tanto menos susceptibles a la contracción.

Las curvas de succión obtenidas para los ciclos de humedecimiento y secado, tanto para los cuerpos de prueba naturales como para los compactados también reflejan las variaciones de las que se ha venido hablando, los valores más altos se obtienen para el primer ciclo, por encima incluso de los valores naturales esto también influencia los valores de los parámetros de resistencia y el factor de seguridad que para este ciclo también son los más altos. En el último ciclo se presentan los valores de succión más bajos, debe considerarse que, en este punto, existen pequeños desprendimientos y agrietamiento en las muestras, que propician una estructura con poros de mayor tamaño y eventualmente generan también una disminución en la resistencia y en el factor de seguridad.

Usando los modelos de estabilidad existentes y a partir de los datos de entrada que se obtienen con la metodología propuesta en esta investigación que reflejan la disminución en la succión y los parámetros de resistencia, se puede predecir el comportamiento que va tener un talud a largo plazo, permitiendo tomar decisiones oportunas al respecto.

Al disminuirse la capacidad de retención de agua en el suelo con el pasar de los ciclos humedecimiento y secado, el valor a usarse para cálculos de estabilidad no debe ser la correspondiente a la muestra natural, sino aquella que refleje los cambios que sufrirá el suelo por humedecimiento y secado, ya que en campo el suelo siempre estará bajo la influencia del clima.

Este estudio se pueden evidenciar los efectos de la precipitación y la radiación en la capacidad de retención de agua en el suelo y su repercusión en la estabilidad de este, un insumo importante en la predicción de movimientos en masa a nivel local.

7.2 Recomendaciones

Este estudio fue ejecutado en una muestra de suelo tipo ML, sin embargo, se recomienda realizarlo en diferentes tipos de suelo, para determinar cómo es la variación de los valores de retención de agua y parámetros de resistencia, en cada uno de ellos y así precisar si las curvas tienen el mismo patrón de disminución o se tienen comportamientos diferentes.

Es importante normalizar el proceso para recrear los ciclos de humedecimiento y secado, de manera que sean replicables y permitan tener valores con una confiabilidad más alta, en ese sentido debe considerarse la infiltración en función de la profundidad de la muestra.

El número de ciclos de humedecimiento y secado puede aumentarse para tratar de determinar si el comportamiento se estabiliza o si por el contrario sigue habiendo una variación en los parámetros.

El método de papel filtro para medición de succión tiene un grado de confiabilidad alta, sin embargo, requiere de tiempos largos de ejecución, por lo cual podría implementarse otros métodos que permitan obtener este valor mucho más rápido como el método de la cámara de Richards o el equipo de Fredlund para medición de succión.

Podría implementarse una metodología de campo para la medición de estos parámetros en una parcela de suelo con medición in-situ, usando un simulador de lluvias.

El análisis numérico debe refinarse incluyendo mayor número de variables y tomando en consideración la diferenciación entre el mecanismo de falla por pérdida de succión y por aumento de la presión de poros, con el objetivo de obtener resultados con mayor relevancia en la práctica de la ingeniería geotécnica.

Bibliografía

- Aitchison, G. D., & Bishop, A. W. (1961). Pore pressure and suction in soils: Conference discussion. *Pore Pressure and Suction in Soils: Conference Organised by the British National Society of the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 150–151.
- Arbhabhirama, A., & Kridakorn, C. (1968). Steady Downward Flow to a Water Table. *Water Resources Research*, 4(6), 1249–1257.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR004i006p01249>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2021). *SIATA Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá*. <https://siata.gov.co>
- Aristizábal Giraldo, E. V., González, T., Montoya, J. D., Vélez Upegui, J. I., Martínez Carvajal, H. E., & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 95–111.
- Aristizábal Giraldo, E. V., Martínez Carvajal, H. E., & Vélez, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias*, 34(53), 209–227.
- Aristizábal Giraldo, E. V., Vélez Upegui, J. I., & Martínez Carvajal, H. E. (2016a). A comparison of linear and nonlinear model performance of SHIA_Landslide: A forecasting model for rainfall-induced landslides. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2016(80), 74–88. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n80a09>
- Aristizábal Giraldo, E. V., Vélez Upegui, J. I., & Martínez Carvajal, H. E. (2016b). Influences of Antecedent Rainfall and Hydraulic Conductivity on Landslides Triggered By Rainfall Occurrence Using the Model Shia_Landslide. *Revista EIA*, 13(26), 31–46.
- ASTM D698-12(21). (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. ASTM International.
- ASTM D854-14. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International.

- ASTM D2216-19. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International.
- ASTM D4221-18. (2018). *Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer*. ASTM International.
- ASTM D4318-17e1. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International.
- ASTM D4943-18. (2018). *Standard Test Method for Shrinkage Factors of Cohesive Soils by the Water Submersion*. ASTM International.
- ASTM D5298-16. (2016). *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>
- Azmi, M., Ramli, M. H., Hezmi, M. A., Mohd Yusoff, S. A. N., & Alel, M. N. A. (2019). Estimation of Soil Water Characteristic Curves (SWCC) of mining sand using soil suction modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012016>
- Barrera Bucio, M., & Garnica Anguas, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. *Publicación Técnica*, 198, 143.
- Bishop, A. W. (1959). *The principle of effective stress* (Norges Geotekniske Inst, Ed.).
- Blight, G. E., & Leong, E. C. (2012). Mechanics of Residual Soils. In CRC Press (Ed.), *Environmental & Engineering Geoscience*. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.v.2.255>
- Brand, E. W. (1984). Landslides in Southeast Asia: A State-of-the-Art Report. *4th International Symposium on Landslides*, 17–59.
- Brand, E. W., Phillipson, H. B., Borrie, G. W., & Clover, A. W. (1983). In-situ direct shear tests on Hong Kong residual soils. *Int. Symp. on Soil and Rock Investigations by In-Situ Testing*, 13–17.
- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1966). Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 92(2). <https://doi.org/10.1061/jrcea4.0000425>
- Buol, S. W., Hole, F. D., & McCracken, R. J. (1983). *Génesis y clasificación de suelos*. Trillas.

- Camapun de Carvalho, J., De Farias Neves, G., Lemos Machado, S., Mascarenha, M., & Chagas da Silva, F. (2015). *Solos não saturados no contexto geotécnico* (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Ed.).
- Campbell, J. D. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci*, 117, 311–314.
- Cardona Giraldo, I. C. (2016). *Validation of landslide assessment models by means of landslide inventories at sub-regional scales*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Chandler, R. J., & Gutierrez, C. I. (1986). The filter-paper method of suction measurement. *Geotechnique*, 36(2), 265–268.
<https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.2.265>
- Chipp, P. N., Clare, D. G., Henkel, D. J., & Pope, R. G. (1982). Field measurement of suction in colluvium covered slopes in Hong Kong. *7th South East Asian Geotechnical Conference, 22-26 November 1982*, 49-62.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (C. Learning, Ed.; 4th ed.).
- Departamento Administrativo de Planeación de Medellín;, & Corporación Penca de Sábila. (2006). *Plan de Desarrollo San Cristóbal 2006-2016* (pp. 12–15).
- Espitia, C. J., Quintero, J., Rodriguez, A., Bernal, F. I., Romero, F., Mojica, J., Cabezas, H., Hernández, M., Pachón, M., Múnera, M. H., & Ramirez, J. (2003). *Catálogo de propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las arcillas para cerámica roja en los centros urbanos de Medellín, Ibagué y sabana de Bogotá.hb* (p. 203). Ingeominas.
- Fredlund, D. G. (1987). *Slope Stability Chapter 4 Slope Stability Analysis Incorporating the Effect of Soil Suction*.
- Fredlund, D. G. (2016). State Variables in Saturated-Unsaturated Soil Mechanics. *Soils and Rocks*, 39(1), 3–17. <https://doi.org/10.28927/sr.391003>
- Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(5), 447–466.
<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000423>
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. In *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*.
<https://doi.org/10.1002/9781118280492>

- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & J.K.M., G. (1987). *Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils*.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521–532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- Gardner, W. R. (1958). Mathematics of Isothermal in Water Conduction Unsaturated Soil. *Soil and Water Conservation Research Division, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Riverside, California*, 78–87.
- H&G Consultores. (n.d.). *MapGIS*. Retrieved March 18, 2015, from https://www.medellin.gov.co/MapGIS/web/swf/MAPGIS_FLEX.jsp
- Hoyos Patiño, F. (2004). *Suelos Residuales Tropicales* (P. G. Fookes, Ed.).
- Huat, B. B. K., Ali, F. H. J., & Low, T. H. (2006). Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(5), 1293–1306. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-1881-8>
- Johnson, K. A., & Sitar, N. (1990). Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(6), 789–801. <https://doi.org/10.1139/t90-092>
- Keng, J. C. W., & Uehara, G. (1974). Chemistry, mineralogy, and taxonomy of Oxisols and Ultisols. [Soils]. In *Proc Soil Crop Sci Soc Fla: Vol. v. 1974*, 3.
- Kim, J., Kim, Y., Jeong, S., & Hong, M. (2017). Rainfall-induced landslides by deficit field matric suction in unsaturated soil slopes. *Environmental Earth Sciences*, 76(23), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7127-2>
- Li, J. H., Lu, Z., Guo, L. B., & Zhang, L. M. (2017). Experimental study on soil-water characteristic curve for silty clay with desiccation cracks. *Engineering Geology*, 218, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.004>
- Lim, L. L., Chang, M. F., Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1996). *Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope*. NATL RESEARCH COUNCIL OF CANADA, OTTAWA, (CAN).
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. J. Wiley.
- Malaver Soto, N. M., & Tafur Tafur, R. (2018). *Lineamientos básicos para la clasificación de suelos tropicales en Colombia orientado a pavimentos*. Universidad Católica de Colombia.

- Malaya, C., & Sreedeeep, S. (2010). A Study on Wetting Soil-Water Characteristic Curve of a Sandy Soil. *Indian Geotechnical Conference*, 2–3.
- Meza Ochoa, V. (2012). Suelos parcialmente saturados: De la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 0(31), 23–38.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. In *Soil Science* (Tercera Ed, Vol. 158, Issue 1). John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1097/00010694-199407000-00009>
- Monsalve, G., Villarraga, C., & Vallejo, J. (2010). Inferences about the seismic structure of the upper lithosphere beneath the Aburrá Valley using data from accelerometer networks. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 77–94.
- Nascimento, Í., Alencar, T., Santos, C., Assis, R., & Mota, J. (2018). Effect of sample re-saturation on soil-water characteristic curve. *Revista Caatinga*, 31, 446–454.
<https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n221rc>
- Ng, C. W. W., & Shi, Q. (1998). A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. *Computers and Geotechnics*, 22(1), 1–28. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(97\)00036-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0266-352X(97)00036-0)
- Nogami, J. S., & Villibor, D. F. P. P.-S. P. (1995). *Pavimentacao de baixo custo com solos lateriticos*. Vilibor.
- Pasculli, A., Sciarra, N., Esposito, L., & Esposito, A. W. (2017). Effects of wetting and drying cycles on mechanical properties of pyroclastic soils. *Catena*, 156(April), 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.004>
- Perez Garcia, N., Garnica Anguas, P., & Pola Velazquez, J. C. (2013). Predicción de la curva característica con el modelo de proporcionalidad natural. *Publicación Técnica*, 361, 78.
- Pitts, J. (1983). The form and causes of slope failures in an area of west Singapore Island. *Journal of Tropical Geography*, 4, 162–168.
- Pitts, J. (1984). A survey of engineering geology in Singapore. *J. of Southeast Asian Geotechnical Society*, 15, 1–20.
- Pitts, J., & Cy, S. (1987). Insitu soil suction measurements in relation to slope stability investigations in Singapore. In E. T. Hanrahan, T. L. L. Orr, & T. F. Widdis (Eds.), *9th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 79–82.).

- Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., & Fredlund, D. G. (1995). Shear-strength characteristics of a residual soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(1), 60–77. <https://doi.org/10.1139/t95-005>
- Ridley, A. M. (1993). The measurement of soil moisture suction. In *University of London*. University of London.
- Ridley, A. M., & Burland, J. B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43(2), 321–324. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.2.321>
- Schofield, R. K. (1935). The pF of the water in soil. *3rd Int. Congr. Soil Science*, 37–48.
- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. N. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. In Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (Ed.), *VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones* (pp. 291–340). https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_174
- Sweeney, D. J., & Robertson, P. K. (1979). A fundamental approach to slope stability problems in Hong Kong. *Hong Kong Engineer*, 7, 35–44.
- Tan, S. B., Tan, S. L., Lim, T. L., & Yang, K. S. (1987). Landslide problems and their control in Singapore. *9th Southeast Asian Geotechnical Conf., Southeast Asian Geotechnical Soc.*, 25–36.
- Van Genuchten, M. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. *Soil Science Society of America Journal*, 44. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vanapalli, S., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 33, 379–392. <https://doi.org/10.1139/t96-060>
- Zapata, C., Houston, W., Houston, S., & Walsh, K. (2000). Soil–Water Characteristic Curve Variability. In *Geotechnical Special Publication* (Vol. 287). [https://doi.org/10.1061/40510\(287\)7](https://doi.org/10.1061/40510(287)7)