

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Efecto del agua destilada y agua lluvia en la respuesta físico mecánica de un suelo residual originado de rocas ígneas.**

**Eduard Danilo Vanegas Chaverra**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil  
Medellín, Colombia  
2020



# **Efecto del agua destilada y agua lluvia en la respuesta físico mecánica de un suelo residual originado de rocas ígneas**

**Eduard Danilo Vanegas Chaverra**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Geotecnia**

Directora:

Dsc. Yamile Valencia González

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

2020



*Dedicatoria*

*A mis padres Amparo Chaverra y Jesús Vanegas, por su comprensión y apoyo durante esta investigación*



## Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a mi directora de tesis Yamile Valencia González, por creer en la investigación, por su apoyo, paciencia, motivación y aportes profesionales durante todo el tiempo del desarrollo de la investigación.

Al profesor David Guillermo Zapata coordinador del laboratorio de geotecnia y pavimentos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y su personal técnico encargado, Andrés Serna e Iván Castillo por la asesoría, préstamo de los equipos y herramientas para la ejecución de los ensayos característicos y mecánicos del suelo.

Al profesor Darío Gallego coordinador del laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por el apoyo en la ejecución de los ensayos químicos para el agua destilada y agua lluvia.

A Mónica Lozano y al laboratorio de Fenómenos de Superficie de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por sus aportes para la realización del ensayo de tensión superficial para el agua destilada y agua lluvia.

Al Ingeniero Juan José Toro y al laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por la ejecución del ensayo de Difracción de Rayos X y la Microscopía Electrónica de Barrido para la muestra de suelo.

Al laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, por realizar la química del suelo.

Al ex compañero y amigo Norbey Arcila por el aporte profesional para la elaboración de la geología de la zona de estudio.

A mi Jefe, el ingeniero Oscar Rodríguez por facilitarme los espacios en la empresa para cumplir con cada una de las actividades académicas y asesorías en el desarrollo de la tesis.

A todos los profesores y personas que de una u otra forma aportaron en el desarrollo de la investigación.



## Resumen

Los suelos formados en ambientes tropicales presentan propiedades y comportamientos particulares debido a diversos agentes como el clima, temperatura, presencia de agua, entre otros. En la geotecnia clásica los ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, se recomienda ejecutarlos empleando agua destilada; sin embargo, dichos resultados no representan completamente las condiciones a las que está sometido el suelo *in-situ*, y menos si se piensa en el efecto químico que el agua lluvia puede tener en estos materiales. La presente investigación se desarrolla para un suelo residual localizado al sur del Valle de Aburrá en el Municipio de Caldas (Antioquia), y sobre él se realizan ensayos de carácter geotécnico en laboratorio con agua destilada y agua lluvia para determinar algunas propiedades físicas, químicas, mineralógicas, estructurales y mecánicas del suelo y analizar la influencia que cada uno de los líquidos tiene sobre dichas propiedades.

Entre los resultados obtenidos se muestra que para las propiedades físicas específicamente en los límites de consistencia hay una influencia de los agentes químicos del agua lluvia, que le confieren a el suelo aparentemente un comportamiento más plástico modificando su clasificación, pasando de limo utilizando agua destilada a arcilla con agua lluvia, se encontraron también diferencias en las propiedades mecánicas como consolidación, presentando el suelo mayor deformación en las muestras sumergidas con agua lluvia que en aquellas sumergidas en agua destilada; de igual forma, se tienen mayores succiones y mayores resistencias al corte directo (afectadas por dicha succión) al usar agua destilada. En conclusión, es clara la influencia que puede tener el uso de un determinado tipo de agua en la respuesta de los ensayos ejecutados en laboratorio, lo cual llevaría a análisis geotécnicos diferentes.

**Palabras clave:** Suelos residuales tropicales, Propiedades físico mecánicas, Agua destilada, Agua lluvia.

## **Abstract**

Soil in tropical zones develop particular properties and behavior due to different agents, as weather temperature, presence of water, among others. In classical geotechnical testing, the use of distilled water is recommended to determine the physical and mechanical properties of soils. However, this condition does not fully represent the in situ conditions, moreover if it is considered the chemical effect that rainwater can have on these materials. The present investigation is carried out for a residual soil located at the south of the Valle de Aburrá in the Municipality of Caldas (Antioquia), with the aim of analyzing, from a chemical and physical approach, the differences between the rain and distilled water. Subsequently, a laboratory program will be to obtain physical, chemical mineralogical, structural and mechanical properties of the soil to evaluate the differences between the use of rain and distilled water and finally, analyze the influence that each of the liquids have on the properties of the soil.

The obtained results indicate that for the physical properties, specifically in the consistency limits, there is an influence of chemical agents from the rainwater, affecting apparently its plastic behavior and the its classification, passing from silt using distilled water to clay with rainwater. Differences in mechanical properties were also observed in one-dimensional compressibility behavior, showing larger strains in specimens submerged with rainwater than in distilled water; in the same way, larger suction and strength by direct shear test (affected by said suction) were observed with distilled water. In conclusion, the type of water influences the soil response for the tests herein performed.

**Keywords: Residual tropical soils, Physical mechanical properties, Distilled water, Rainwater**

**Effect of distilled water and rainwater  
on the physical mechanical  
response of a residual soil  
originating from igneous rocks**

# Contenido

	Pág.
<b>1. Hipótesis.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>4</b>
2.1 Objetivo general .....	4
2.2 Objetivos específicos .....	4
<b>3. Fundamento teórico y antecedentes .....</b>	<b>5</b>
3.1 Fundamento teórico .....	5
3.1.1 Generalidades de los suelos residuales tropicales .....	5
▪ Intercambio catiónico.....	7
3.1.2 Formas del agua en el suelo .....	8
▪ Agua freática.....	9
▪ Agua gravitacional .....	9
▪ Agua retenida .....	9
3.1.3 Generalidades químicas del agua.....	10
▪ Composición y estructura del agua.....	10
▪ Tensión superficial.....	11
▪ El agua destilada y sus características .....	12
▪ Composición media de agua en la atmósfera .....	12
▪ Composición media de lluvia y nieve.....	13
▪ Métodos de expresión de concentraciones .....	14
▪ Concentración en masa .....	15
▪ Concentración molar y actividad .....	15
▪ Concentraciones masa como CaCO <sub>3</sub> .....	15
▪ Alcalinidad y acidez .....	15
▪ Conductividad.....	16
▪ Sólidos totales disueltos(STD) .....	16
3.2 Antecedentes .....	18
<b>4. Descripción de la zona de estudio .....</b>	<b>20</b>
4.1 Localización de la zona de estudio .....	20
4.2 Componente geológico .....	21
4.2.1 Complejo Quebradagrande .....	21
▪ Miembro volcanosedimentario (KvsQG) .....	22
▪ Miembro volcánico (KvQG) .....	23
4.2.2 Depósitos de vertiente (Qd, NQFII).....	23

▪ Depósitos de deslizamiento (Qd).....	24
▪ Depósitos de flujos (NQFII).....	24
4.2.3 Depósitos aluviales (Qal).....	24
4.3 Componente geomorfológico.....	25
4.3.1 Colinas en suelo residual (CSR).....	25
4.3.2 Lomos (L).....	26
4.3.3 Morfotectónicos (RMT).....	26
<b>5. Metodología.....</b>	<b>27</b>
5.1 Exploración de campo.....	27
5.2 Características de las aguas.....	28
5.2.1 Mineralogía agua destilada.....	28
5.2.2 Mineralogía agua lluvia.....	29
5.2.3 Medida del pH.....	29
5.2.4 Tensión superficial.....	30
5.3 Caracterización física del suelo.....	31
5.3.1 Contenido de humedad natural.....	31
5.3.2 Gravedad específica.....	32
5.3.3 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S).....	32
5.3.4 Límites de Atterberg.....	33
5.3.5 Granulometría por hidrómetro.....	33
5.3.6 Miniatura Compactada Tropical (M.C.T) - expedita.....	34
5.4 Caracterización mineralógica y estructural.....	37
5.4.1 Difracción de rayos X.....	37
5.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (Scanning Electron Microscopy).....	38
▪ Caracterización química del suelo.....	39
5.4.3 Medida del pH.....	39
5.4.4 Análisis químico del suelo.....	40
5.5 Caracterización mecánica.....	41
5.5.1 Corte directo modalidad consolidado drenado (CD).....	41
5.5.2 Consolidación duplo-edométrica.....	42
5.5.3 Succión método del papel filtro y balanza hidrostática.....	44
▪ Succión método del papel filtro.....	44
▪ Balanza hidrostática.....	47
5.5.4 Desagregación.....	49
<b>6. Resultados, análisis y discusión.....</b>	<b>51</b>
6.1 Características de las aguas.....	51
6.1.1 Mineralogía.....	51
6.1.2 Medida del pH.....	52
6.1.3 Tensión superficial.....	53
6.2 Caracterización física.....	53
6.2.1 Humedad natural.....	53
6.2.2 Gravedad específica.....	53
6.2.3 Límites de Atterberg.....	54
6.2.4 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S).....	56
6.2.5 Granulometría por hidrómetro.....	57
6.2.6 Miniatura compactada tropical (M.C.T).....	59
6.3 Caracterización mineralógica y estructural.....	60
6.3.1 Difracción de rayos X.....	60

6.3.2	Microscopía electrónica de barrido (Scanning electron microscopy).....	61
6.4	Caracterización química del suelo.....	62
6.4.1	Medida del pH.....	62
6.4.2	Análisis químico del suelo.....	63
6.5	Caracterización mecánica.....	63
6.5.1	Succión método del papel filtro.....	63
6.5.2	Corte directo modalidad consolidado drenado(CD).....	65
6.5.3	Consolidación duplo edométrico.....	67
6.5.4	Desagregación.....	69
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>72</b>
7.1	Recomendaciones para obtener resultados más aproximados a la realidad del suelo en campo.....	72
7.2	Conclusiones.....	73
7.3	Recomendaciones a futuras investigaciones.....	75
	<b>Referencias.....</b>	<b>77</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>84</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 3-1:</b>	Distribución de esfuerzos durante la desecación de un suelo. Modificado de (Fredlund & Rahardjo, 1993), citado por (Huat & David G, 2013)..... 6
<b>Figura 3-2:</b>	Producto de la meteorización y su profundidad asociados a factores ambientales (Strakhov, 1967), citado y modificado de (Fookes, 2004)..... 7
<b>Figura 3-3:</b>	Estados de agua en el suelo. Modificado de (Villalaz, 2016) ..... 8
<b>Figura 3-4:</b>	Estructura del agua. Modificado de (Padilla & Garritz, 2007) ..... 10
<b>Figura 3-5:</b>	Ascensión del agua en un tubo capilar y estado de tensión en la misma. Modificado de (Júarez & Rico, 2005)..... 11
<b>Figura 3-6:</b>	Regresión lineal entre CE y $\Psi\pi$ de soluciones acuosas de suelos y aguas de riego, mediante el uso del coeficiente experimental $K_3 \times STD$ y el coeficiente $-0.036 \times CE$ . (Sánchez, Ortega, Can, Galicia, & Camacho, 2019) ..... 18
<b>Figura 4-1:</b>	Localización sitio de estudio, zona rural vereda La Queibra, municipio de Caldas, Antioquia. Modificado (Google, 2019)..... 20
<b>Figura 4-2:</b>	Sitio extracción de la muestra de suelo..... 21
<b>Figura 4-3:</b>	Geología de la zona de estudio. Modificado de (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006). ..... 25
<b>Figura 4-4:</b>	Geomorfología de la zona de estudio. Modificado de (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006). ..... 26
<b>Figura 5-1:</b>	Extracción de la muestra en bloque, fecha 7 de Julio de 2018. .... 27
<b>Figura 5-2:</b>	Recolección agua lluvia sitio de estudio. .... 28
<b>Figura 5-3:</b>	Destilador utilizado para el proceso de destilación del agua. .... 29
<b>Figura 5-4:</b>	Medida pH aguas. .... 30
<b>Figura 5-5:</b>	Tensiómetro de Du Nouy. .... 31
<b>Figura 5-6:</b>	Gravedad específica de los sólidos. .... 32
<b>Figura 5-7:</b>	Límites de Atterberg. .... 33
<b>Figura 5-8:</b>	Granulometría por hidrómetro agua destilada y agua lluvia. .... 34
<b>Figura 5-9:</b>	Miniatura compactada rápida agua destilada. .... 35
<b>Figura 5-10:</b>	Miniatura compactada rápida agua lluvia. .... 36
<b>Figura 5-11:</b>	Microscopio Electrónico de la Universidad Nacional – Sede Medellín. .... 38
<b>Figura 5-12:</b>	Preparación de la muestra. A la derecha muestra F..... 39
<b>Figura 5-13:</b>	Medida del pH del suelo..... 40
<b>Figura 5-14:</b>	Muestras inundadas falladas por corte directo modalidad CD. .... 41
<b>Figura 5-15:</b>	Muestra fallada con humedad natural por corte directo, modalidad CD.. 42

<b>Figura 5-16:</b>	Muestras consolidadas inundadas. ....	43
<b>Figura 5-17:</b>	Ensayo de consolidación . ....	43
<b>Figura 5-18:</b>	Papel filtro para medir la succión.....	45
<b>Figura 5-19:</b>	Conservación de las muestras durante el equilibrio de humedad. ....	46
<b>Figura 5-20:</b>	Procedimiento para el pesado del papel filtro .....	46
<b>Figura 5-21:</b>	Preparación de la parafina y pastillas balanza hidrostática. ....	48
<b>Figura 5-22:</b>	Montaje ensayo de balanza hidrostática. ....	48
<b>Figura 5-23:</b>	Ensayo de desagregación agua destilada.....	50
<b>Figura 5-24:</b>	Ensayo de desagregación agua lluvia.....	50
<b>Figura 6-1:</b>	Escala del pH. (Ann, Choi, & Douglas, 2018).....	52
<b>Figura 6-2:</b>	Curva de fluidez del suelo.....	55
<b>Figura 6-3:</b>	Límites de consistencia con agua destilada y lluvia.....	56
<b>Figura 6-4:</b>	Carta de plasticidad de Casagrande. (ASTM D2487-17, 2017) .....	57
<b>Figura 6-5:</b>	Curvas granulométricas .....	58
<b>Figura 6-6:</b>	Espectro difracción de rayos X .....	60
<b>Figura 6-7:</b>	Imágenes de la muestra a diferentes niveles de aumento.....	61
<b>Figura 6-8:</b>	Curva característica succión Matricial .....	64
<b>Figura 6-9:</b>	Curva característica succión Total.....	64
<b>Figura 6-10:</b>	Curvas de succión total con grado de saturación .....	65
<b>Figura 6-11:</b>	Ensayo de corte modalidad consolidado drenado. ....	66
<b>Figura 6-12:</b>	Relación $\tau^*pF$ Vs Esfuerzo Normal ( $\sigma$ ).....	67
<b>Figura 6-13:</b>	Curva de consolidación.....	68
<b>Figura 6-14:</b>	índice de colapso agua destilada y agua lluvia .....	69
<b>Figura 6-15:</b>	Ensayo de desagregación inmersión parcial.....	70
<b>Figura 6-16:</b>	Ensayo de desagregación inmersión total.....	71

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 3-1:</b> Capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Conti, 2000) .....	8
<b>Tabla 3-2:</b> Tensión superficial para diferentes tipos de agua. Modificado de (Sridhar & Rami, 1984).....	12
<b>Tabla 3-3:</b> Composición media de agua en la atmósfera (B.A, 1961) citado por (Jenkins, 2002) .....	13
<b>Tabla 3-4:</b> Composición de lluvia y nieve en mg/litro (Jenkins, 2002) .....	13
<b>Tabla 4-1:</b> Perfil de meteorización – Tobas miembro volcanosedimentario (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).....	22
<b>Tabla 4-2:</b> Perfil de meteorización – Chert miembro volcanosedimentario (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).....	22
<b>Tabla 4-3:</b> Perfil de meteorización – Diabasas miembro volcánico (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).....	23
<b>Tabla 5-1:</b> Clasificación MCT rápida (Nogami & Villibor, 1995).....	37
<b>Tabla 6-1:</b> Resultados mineralogía agua destilada y agua lluvia.....	51
<b>Tabla 6-2:</b> Resultados pH aguas .....	52
<b>Tabla 6-3:</b> Resultados Tensión Superficial.....	53
<b>Tabla 6-4:</b> Contenido de Humedad Natural.....	53
<b>Tabla 6-5:</b> Resultados Gravedad específica.....	54
<b>Tabla 6-6:</b> Gravedad específica de minerales. (Lambe & Whitman, 1969).....	54
<b>Tabla 6-7:</b> Resultados Límites de Atterberg.....	55
<b>Tabla 6-8:</b> Clasificación Casagrande.....	57
<b>Tabla 6-9:</b> Porcentaje de material CD, SD con agua destilada y lluvia . .....	58
<b>Tabla 6-10:</b> Resultados miniatura compactada tropical rápida.....	59
<b>Tabla 6-11:</b> Propiedades físicas de las muestras analizadas.....	59
<b>Tabla 6-12:</b> Resultados medida pH del Suelo.....	62
<b>Tabla 6-13:</b> Composición química de la muestra.....	63
<b>Tabla 6-14:</b> Parámetros de resistencia del suelo para condición ensayada.....	66
<b>Tabla 6-15:</b> Índice de Colapso .....	68

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos

Símbolo	Descripción
$\sigma$	Esfuerzo total
$\mu_a$	Porosidad del aire
$\mu_w$	Porosidad del agua
$Al_2O_3$	Óxidos de aluminio
$Fe_2O_3- Al_2O_3$	Óxidos de hierro y aluminio
$V$	Volumen de agua
$k$	Permeabilidad
$i$	Gradiente hidráulico
$A$	Área
$t$	Tiempo
$^{\circ}C$	Grados Celsius
$H_2O$	Agua
$NO_2$	Dióxido de nitrógeno
$N_2$	Dinitrógeno
$O_2$	Dioxígeno
$Ar$	Argón
$CO_2$	Dióxido de carbono
$Ne$	Neón
$He$	Helio
$CH_4$	Metano
$Kr$	Kriptón
$CO$	Monóxido de carbono
$SO_2$	Dióxido de azufre
$NO_x$	Grupo de gases compuesto por óxido nítrico (NO) y dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )
$N_2O$	Óxido de nitrógeno
$H_2$	Dihidrógeno
$O_3$	Ozono
$Xe$	Xenón
$Rn$	Radón
$SiO_2$	Dióxido de silicio
$Al$	Aluminio
$Ca^2$	Hidróxido de calcio
$Mg^2$	Hidróxido de magnesio
$Na$	Sodio
$K$	Potasio
$NH$	Hidruro de nitrógeno
$Cl$	Cloro

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
$NO_3$	Nitrato
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
$H_2CO_3$	Trioxo carbonato de hidrogeno
$\mu$	Fuerza iónica
$F$	Fuerza
$r$	Radio del anillo
$Ct$	Contracción diametral
$c'$	Constante clasificación MCT
$\emptyset_{Inicial}$	Diámetro inicial de la pastilla
$\emptyset_{Final}$	Diámetro final de la pastilla, después de secado
$CaCl_2$	Cloruro de calcio
$KCl$	Cloruro de potasio
$Ca$	Calcio
$Mg$	Magnesio
$P$	Fosforo
$I$	índice de colapso
$\psi$	Succión total
$(u_a - u_w)$	Succión matricial
$\pi$	Succión osmótica
$w$	Humedad papel filtro
$E$	Empuje
$m_s$	Masa del suelo
$m_{sp}$	Masa del suelo mas parafina
$m_{su}$	Masa del suelo mas parafina sumergida
$\rho_w$	Densidad del agua
$\rho_p$	Densidad de la parafina
$V_t$	Volumen total
$V_s$	Volumen del suelo
$V_p$	Volumen de la parafina
$\rho_d$	Densidad del suelo seco
$S_s$	Gravedad específica de los sólidos
$e$	Relación de vacíos
$w_{nat}$	Contenido de humedad natural
$n$	Porosidad
$\tau$	Esfuerzo cortante

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Descripción</b>
A.S.T.M	Asociación americana de ensayos de materiales
$DBO$	Demanda bioquímica de oxígeno
$DQO$	Demanda química de oxígeno
$STD$	Sólidos totales disueltos
$ST$	Sólidos totales
$LFB$	Laboratory-fortified blank
$STS$	Sólidos totales suspendidos
$SDV$	Sólidos disueltos volátiles

<b>Abreviatura</b>	<b>Descripción</b>
<i>KvsQG</i>	Miembro volcanosedimentario
<i>KvQG</i>	Miembro volcánico
<i>Qd</i>	Depósitos de deslizamiento
<i>NQFII</i>	Depósitos de flujo
<i>Qal</i>	Depósitos aluviales
<i>CSR</i>	Colinas en suelo residual
<i>L</i>	Lomos
<i>RMT</i>	Morfotectónicos
<i>SUCS</i>	Sistema unificado de clasificación de suelos
<i>MCT</i>	Miniatura compactada tropical
<i>SEM</i>	Microscopia electrónica de barrido
<i>DRX</i>	Difracción de rayos X
<i>PZC</i>	Punto de carga cero
<i>CICE</i>	Capacidad de intercambio catiónico equivalente
<i>NTC</i>	Norma técnica Colombiana
<i>LL</i>	Límite líquido
<i>LP</i>	Límite plástico
<i>IP</i>	Índice de plasticidad
<i>CL</i>	Arcilla de baja plasticidad
<i>CH</i>	Arcilla de alta plasticidad
<i>ML</i>	Limo de baja compresibilidad
<i>MH</i>	Limo de alta compresibilidad
<i>CD</i>	Con defloculante
<i>SD</i>	Sin defloculante

# Introducción

Colombia al ubicarse dentro del trópico se encuentra influenciada por factores importantes como el clima y la temperatura, que aceleran y afectan directamente el grado de meteorización del suelo; generando suelos residuales profundos en un área importante del territorio. Es por ello, que una caracterización geotécnica minuciosa de los mismos es de vital importancia en las obras de ingeniería, por tal razón, se requiere de ensayos adicionales que permitan evaluar el comportamiento químico, físico y mecánico del suelo, para obtener explicaciones o resultados más aproximados al comportamiento que presenta el material que se está estudiando.

Los cambios climáticos y la evapotranspiración influyen en el contenido de agua y, por ende, en las presiones intersticiales de los suelos, que se tornan negativas en estados no saturados. Como resultado, las propiedades hidráulicas y de resistencia al corte, así como el volumen del suelo, varían en respuesta a dichos cambios climáticos (Huat & David G, 2013). Por ello, las prácticas tradicionales de la mecánica de suelos han evolucionado durante las últimas décadas, orientando su atención a los suelos parcialmente saturados, incorporando nuevas técnicas de laboratorio y software especializados.

Si bien todo esto es importante, debe hacerse un cuestionamiento sobre la forma en que son ejecutadas las pruebas de laboratorio actualmente, como es el hecho de que la mayoría de los ensayos se realicen con agua destilada, escenario totalmente diferente a las condiciones de exposición del material en campo, si se tiene presente el efecto químico que puede provocar el agua lluvia en el comportamiento de un suelo de origen tropical residual (Seinfeld J, 2006).

La actual investigación es una primera aproximación donde se muestran las diferencias existentes al ejecutar los ensayos usando agua lluvia y agua destilada. Se fundamenta en recuperar muestras alteradas y de alta calidad en bloque, de un suelo residual originado

de rocas ígneas volcánicas al sur del Valle de Aburrá, en zona rural del municipio de Caldas (Ant), zona bastante industrializada y de elevadas precipitaciones. Con estas muestras se realizan ensayos de caracterización física y mecánica, tanto con agua lluvia de la zona y agua destilada, siguiendo los lineamientos de las normas internacionales ASTM y los fundamentos teóricos que describen los ensayos para suelos residuales tropicales. Para finalmente establecer unas recomendaciones que permitan obtener propiedades y parámetros del suelo más ajustados a las condiciones de exposición del material en campo.

# 1. Hipótesis

El comportamiento, las características y propiedades que presentan los suelos en campo es estudiado mediante prácticas de laboratorio apoyadas en las normas internacionales ASTM, donde en sus procedimientos se contempla que los ensayos deben ser ejecutados con agua destilada o desmineralizada, líquido que posee características diferentes a las que realmente se presentan en campo con el agua lluvia, dado que la acidez y los sólidos que contiene esta agua son directamente afectados por el desarrollo industrial de la zona y las emisiones que se producen a la capa de ozono (Doria A, 2017).

La lluvia cumple un papel importante en la limpieza de la atmósfera, ya que a través de ella se remueven la mayor cantidad de iones presentes en la misma. La composición química del agua lluvia varía debido a la influencia de fuentes locales (Seinfeld J, 2006). Conocer su composición es importante para entender el papel del transporte de los componentes solubles de la atmósfera y su contribución a las diferentes fuentes de contaminantes atmosféricos (Doria A, 2017).

En la geotecnia se requieren ensayos que representen las verdaderas condiciones *in situ*, y la mejor forma es ejecutando las pruebas de laboratorio con el agua lluvia que cae en la zona de estudio, que por su diferencia en composición química puede brindar resultados de clasificación y comportamiento mecánico, que posibiliten obtener soluciones y recomendaciones más acertadas en los proyectos de ingeniería.

Es así que la hipótesis se fundamenta en la variación de los resultados de los ensayos de laboratorio con agua destilada y agua lluvia en el comportamiento, físico y mecánico de un suelo residual tropical. Por tanto:

¿El agua con la cual se ejecuta un ensayo de laboratorio puede tener efecto en la respuesta física y/o mecánica de un suelo residual tropical?

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Determinar el efecto en las propiedades físicas y mecánicas que tiene el uso del agua destilada y agua lluvia en diversos ensayos de laboratorio para un suelo residual tropical derivado de rocas ígneas volcánicas al sur del Valle de Aburrá.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar las variaciones existentes en las propiedades físicas y mecánicas de un suelo residual mediante la ejecución de ensayos físicos y mecánicos con agua destilada y con agua lluvia.
- Analizar el efecto que tiene la química del suelo, del agua lluvia y del agua destilada en la respuesta de los diversos ensayos geotécnicos.
- Realizar recomendaciones que permitan obtener resultados más aproximados a la realidad del suelo en campo.

## **3. Fundamento teórico y antecedentes**

### **3.1 Fundamento teórico**

#### **3.1.1 Generalidades de los suelos residuales tropicales**

Los suelos que se forman entre las Latitudes 30°N y 30°S es decir, entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, son denominados suelos tropicales que por el efecto del clima y la temperatura, aceleran el proceso de meteorización física y química, lo que conlleva a que presenten comportamientos diferentes a los suelos originados en las regiones templadas (Fookes, 2004).

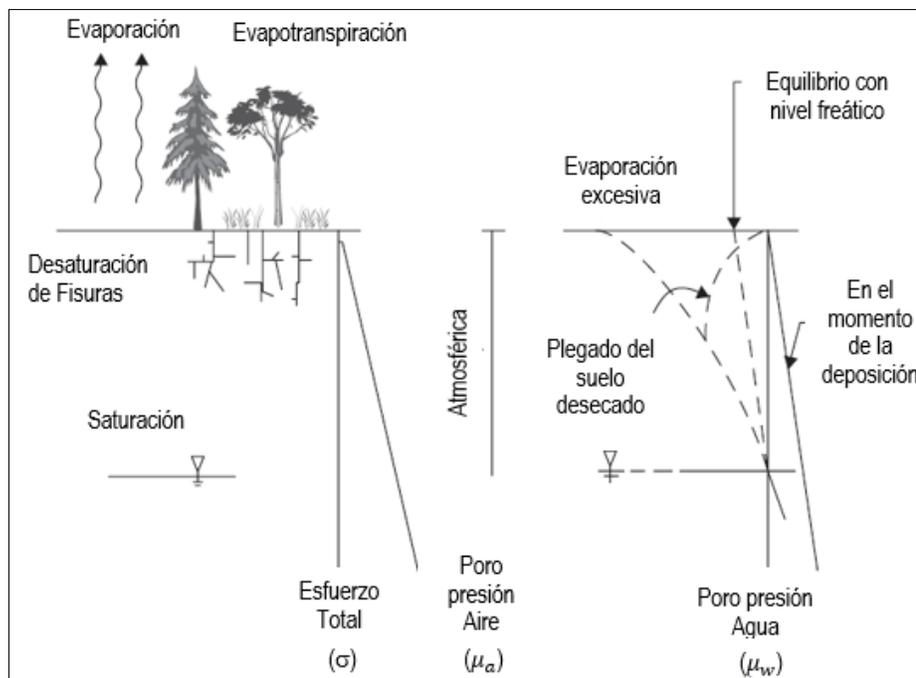
La meteorización de los minerales primarios en las regiones tropicales es más intensa y ocurre a profundidades mayores que en cualquier otro lugar. Consecuentemente, la meteorización ocurre principalmente por hidrólisis, en condiciones cercanas a un pH neutro, a profundidades muy por debajo de la influencia de los productos de descomposición ácida orgánica. La alteración frecuentemente es tan intensa, que los materiales del suelo se comportan, en sentido geotécnico, de manera muy diferente a los materiales parentales de los que se derivan (Group, 1997).

Según McCarty, (1993) los suelos residuales son aquellos que se originan a partir de la roca y permanecen en el lugar donde se formaron, esta cobertura superficial no consolidada se conoce como suelo (Press & Siever, 1994). Sin embargo, también existen suelos superficiales que se definen como laterítico, los cuales presentan acumulaciones superficiales o sub superficiales de productos provenientes de la intensa meteorización de rocas, desarrollados sobre condiciones favorables a una mayor movilidad de los elementos alcalinos, alcalinos-ferrosos y sílice e inmovilización de hierro y aluminio. Los suelos tropicales lateríticos se componen principalmente de caolinita, goethita, hematita, gibbsita, halloysita y cuarzo (Schellmann, 1981).

Colombia se encuentra dividida por la línea ecuatorial, a lo cual se le atribuye que sea un país que no cuenta con estaciones climáticas, razón importante para que la mayor parte del territorio presente suelos con un alto grado de meteorización. Los suelos residuales tropicales en Colombia se componen principalmente de minerales como óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio que son liberados por la intensa meteorización, contrario a los suelos de regiones templadas, que tienden a presentar mayor acidez debido a que el grado de descomposición de la roca a la cual se originan, es poco (Group, 1997).

Los óxidos de hierro y aluminio y los óxidos hidratados liberados por la meteorización subsuperficial tropical, no se disuelven tanto como en los ambientes de suelos más ácidos que caracterizan las regiones templadas y, consecuentemente, tienden a permanecer *in situ*. Dentro de los principales óxidos de hierro se tienen la hematita, que se cristaliza cuando el suelo se seca estacionalmente y la goetita que se cristaliza en ambientes húmedos. La hematita le da al suelo un color rojizo, la goetita un color pardo u ocre. Y en el caso de los óxido de aluminio, la gibbsita es el principal mineral que se forma durante la meteorización (Fookes, 2004).

Los cambios climáticos influyen en la descomposición química del suelo, mientras que en climas secos la descomposición de la roca se da por procesos físicos (Fookes, 2004). La evapotranspiración produce un flujo ascendente de agua en el suelo provocando desecación y agrietamiento; mientras que las precipitaciones proporcionan un flujo descendente, permitiendo eventualmente la saturación del suelo como se ilustra en la Figura 3-1, la diferencia entre estas dos condiciones de flujo causan en gran medida las presiones de poros (Huat & David G, 2013).

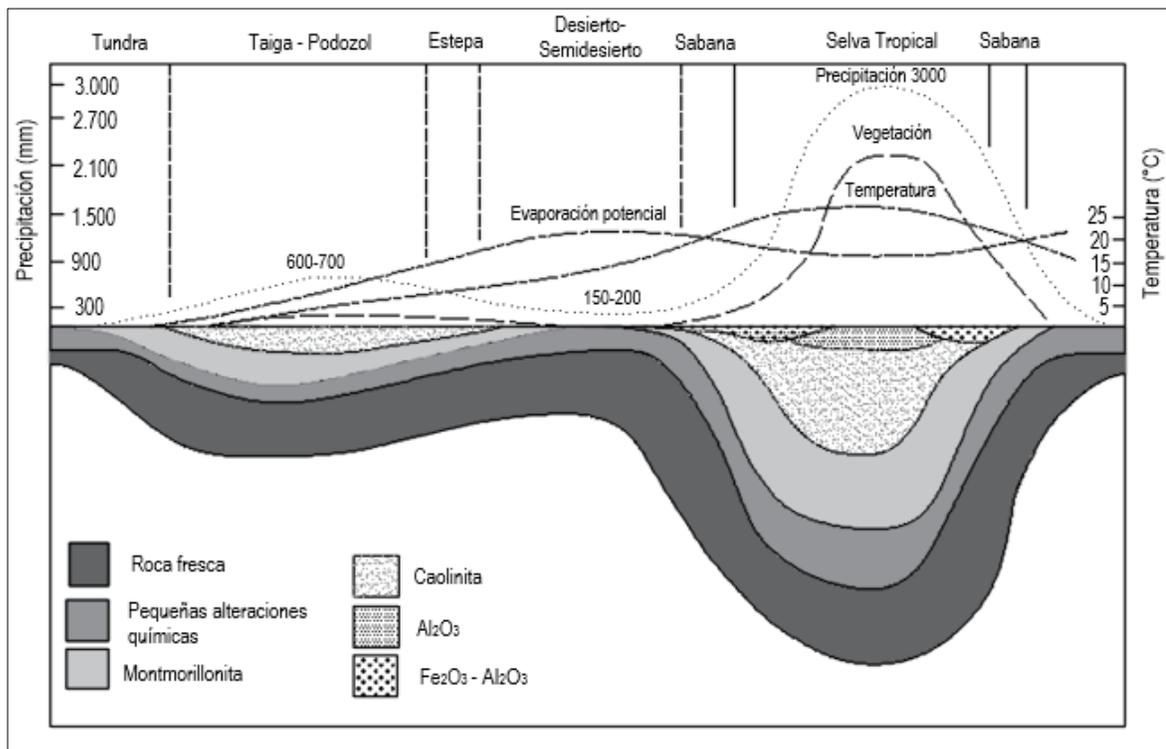


**Figura 3-1:** Distribución de esfuerzos durante la desecación de un suelo. Modificado de (Fredlund & Rahardjo, 1993), citado por (Huat & David G, 2013)

La capacidad de predecir la profundidad de los suelos residuales está limitada por las complejas interacciones de diferentes factores que la controlan. La variabilidad puede ser definida como zonal, regional o local. Es posible indicar intervalos probables de espesores de meteorización en el interior de zonas climáticas características (Fookes, 2004).

La Figura 3-2 muestra que los horizontes superficiales profundamente alterados en los trópicos dan paso en profundidad a materiales menos alterados, que frecuentemente son similares a los horizontes superficiales de los perfiles en zonas climáticas más frías y menos húmedas.

Los esquemas tradicionales de clasificación geotécnica han sido desarrollados generalmente para estimar el comportamiento de los suelos de climas templados. Estos suelos frecuentemente son depósitos sedimentarios, o transportados, poco alterados y, en la mayoría de los casos, su comportamiento geotécnico puede ser evaluado a partir de sus características granulométricas y de plasticidad, medidas en los ensayos convencionales de laboratorio. En el caso de los suelos residuales tropicales, el comportamiento geotécnico no puede ser estimado tan fácilmente, debido a que los intensos procesos de meteorización, generan materiales con minerales y estructura, que difieren a las presentadas por suelos de regiones sub-tropicales (Fookes, 2004).



**Figura 3-2:** Producto de la meteorización y su profundidad asociados a factores ambientales (Strakhov, 1967), citado y modificado de (Fookes, 2004)

### ▪ Intercambio catiónico

Es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos. La materia orgánica y las arcillas tienen la capacidad de absorber e intercambiar con la solución acuosa los nutrientes y minerales presentes que se encuentran en forma iónica

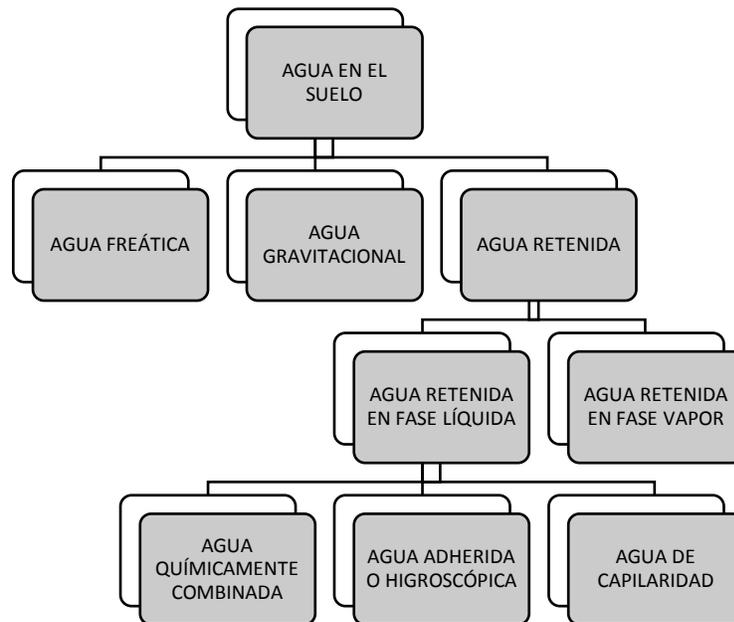
(Amézquita, 1990). En la Tabla 3-1 se muestran los rangos de capacidad de intercambio catiónico para algunos minerales y suelos.

**Tabla 3-1:** Capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Conti, 2000)

Material	Mineral	CIC (meq/100g)
Arcillas	Caolinita	3-15
	Ilita	15-40
	Montmorillonita	80-100
Suelos	Arenoso franco	1-5
	Arenoso	5-10
	Franco	5-15
	Franco arcilloso	15-30
	Arcilloso	>30

### 3.1.2 Formas del agua en el suelo

Según Villalaz (2016) el suelo es un material con arreglo variable de sus partículas, que dejan entre ellas una serie de poros conectados unos con otros para formar una compleja red de canales de diferentes magnitudes, que se comunican con la superficie del terreno; de aquí que, el agua que cae sobre el suelo, parte escurre y parte se infiltra por acción de la gravedad hasta estratos impermeables más profundos, formando la llamada capa freática. El límite superior de este manto acuoso se llama nivel freático. Según el estado en que se encuentre el agua en el suelo reciben los nombres que aparecen en Figura 3-3.



**Figura 3-3:** Estados de agua en el suelo. Modificado de (Villalaz, 2016)

El agua que pasa por los poros a través del suelo se le conoce con el nombre de agua gravitacional, y aquella que se encuentre por debajo del nivel freático se llama agua freática. Cuando se suspende el movimiento del agua gravitacional a través del suelo, parte del agua se queda retenida en los poros y sobre la superficie de las partículas debido a las fuerzas de tensión superficial y de adsorción. Esta agua, que no puede ser drenada directamente, recibe el nombre de agua retenida (Villalaz, 2016).

### ▪ Agua freática

Los poros del suelo que se localizan por debajo del nivel freático se encuentran completamente llenos de agua, y se considera que cualquier movimiento de esta agua a través del suelo sigue la ley de Darcy, que indica que la intensidad de filtración por unidad de área es directamente proporcional al gradiente hidráulico (Villalaz, 2016), o sea:

$$V = k.i.A.t \quad (3.1)$$

Donde:

V = Cantidad de agua en cm<sup>3</sup> generalmente, que escurre a través del área A.

k = Constante de permeabilidad o conductividad hidráulica, en cm/seg, normalmente.

i = Gradiente hidráulico, igual a la pérdida de carga entre la longitud recorrida.

A = Área transversal, en cm<sup>2</sup>, a través del cual fluye el agua.

t = Tiempo, normalmente en segundos, durante el cual fluye la cantidad de V de agua.

### ▪ Agua gravitacional

En el movimiento del agua gravitacional influye tanto en la porosidad del suelo como en sus características estructurales; sin embargo, al movimiento de esta agua no se le puede aplicar la ley de Darcy debido a la presencia de aire en los poros (Villalaz, 2016).

### ▪ Agua retenida

El agua retenida en fase líquida está formada por agua combinada químicamente, por el agua adherida o higroscópica y por el agua de capilaridad.

*El agua químicamente combinada*, se considera como parte integrante de los sólidos del suelo, ya que forma parte de la estructura cristalina de los minerales del mismo, y en una cantidad muy pequeña. Esta agua, no puede ser eliminada del suelo si este se seca hasta 110°C, de ahí la práctica de secar las muestras entre 105°C y 110°C (Villalaz, 2016).

*El agua adherida o higroscópica* es aquella que adquiere el suelo del aire que lo rodea. Así, si un suelo es secado en un horno a peso constante y se deja expuesto al aire mientras se enfría, dicho suelo absorberá agua de la humedad del aire que lo rodea. Esta agua

higroscópica del suelo, y la cantidad de ella que el suelo puede adquirir, depende también del área superficial de las partículas (Villalaz, 2016).

*El agua de capilaridad* es aquella que se adhiere a los poros del suelo por el efecto de la tensión superficial (Villalaz, 2016).

### 3.1.3 Generalidades químicas del agua

#### ▪ Composición y estructura del agua

Según Carbajal & González (2003) el agua es una molécula sencilla formada por átomos pequeños, dos de hidrógeno y uno de oxígeno, unidos por 66 enlaces covalentes muy fuertes que hacen que la molécula sea muy estable. Tiene una distribución irregular de la densidad electrónica, pues el oxígeno, uno de los elementos más electronegativos, atrae hacia sí los electrones de ambos enlaces covalentes, de manera que alrededor del átomo de oxígeno, se concentra la mayor densidad electrónica (carga negativa), y cerca de los hidrógenos la menor (carga positiva). La molécula tiene una geometría angular (los dos átomos de hidrógeno forman un ángulo de unos  $105^\circ$ ) (Figura 3-4), lo que hace de ella una molécula polar que puede unirse a otras muchas sustancias polares.

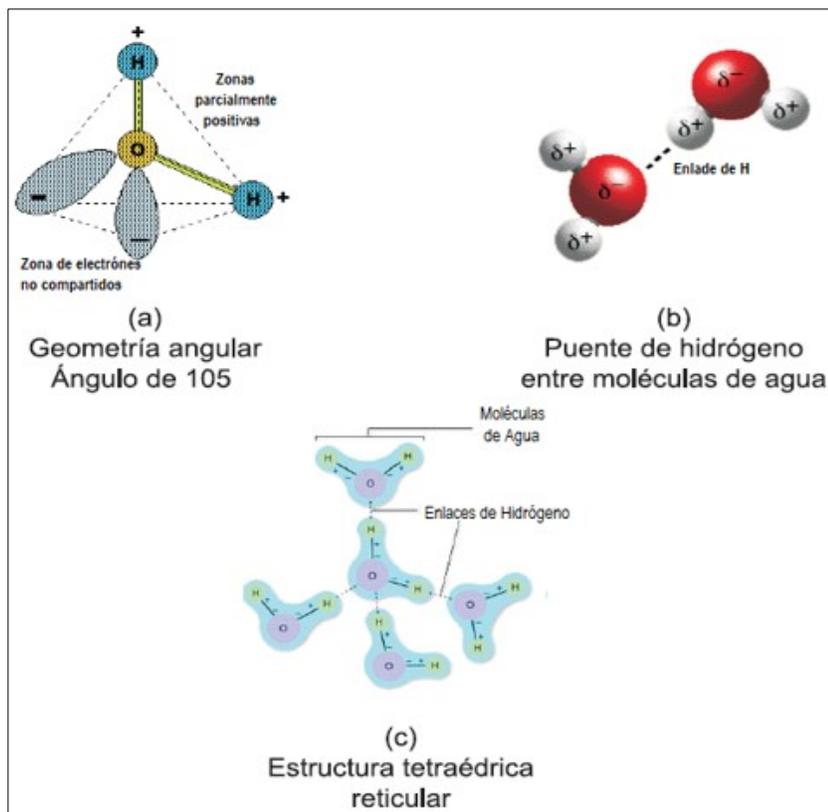


Figura 3-4: Estructura del agua. Modificado de (Padilla & Garritz, 2007)

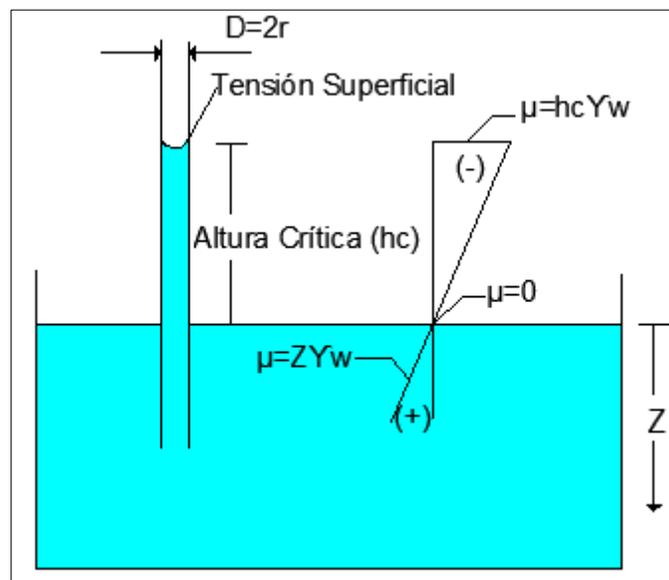
La polaridad del agua es un factor importante para determinar sus propiedades disolventes. Los minerales que forman la corteza terrestre son en su mayoría sólidos inorgánicos, en donde los iones de cargas positivas y negativas existen en una estructura reticular unidos entre sí por enlaces electrostáticos (Jenkins, 2002).

El agua disuelve cierta cantidad de sólidos o gases con los que se pone en contacto. En el ciclo global del agua sobre la Tierra, el agua establece contacto con los gases en la atmósfera (incluyendo contaminantes del aire y emanaciones volcánicas) y los minerales que hay en los primeros kilómetros de la corteza terrestre (Jenkins, 2002).

Se denomina “sólido” a toda aquella materia que se encuentra en el agua y que es sólida cuando se encuentra fuera de ella; por ejemplo, partículas o sustancias que se encuentran en suspensión (Hernández, 2015).

### ▪ Tensión superficial

La tensión superficial puede definirse como la fuerza que ejerce un líquido sobre una determinada superficie debido a la existencia de una atracción no compensada hacia el interior del mismo sobre las moléculas individuales de la superficie. Es la forma en que se refleja la cohesión entre moléculas en un líquido, que están compartidas con todos los átomos vecinos (Figura 3-5). Las de la superficie, no tienen átomos por encima y presentan fuerzas atractivas más fuertes sobre sus vecinas próximas de la superficie (Morales, 2006).



**Figura 3-5:** Ascensión del agua en un tubo capilar y estado de tensión en la misma. Modificado de (Júarez & Rico, 2005)

La tensión superficial depende de la naturaleza del líquido, del medio que le rodea y de la temperatura Tabla 3-2. En general, disminuye con la temperatura, ya que las fuerzas de cohesión disminuyen al aumentar la agitación térmica. (Morales, 2006).

**Tabla 3-2:** Tensión superficial para diferentes tipos de agua. Modificado de (Sridhar & Rami, 1984)

Tipo de Agua	Tensión Superficial (dinas/cm)
Destilada	71.7
Grifo	71.01
Lagos artificiales	71.1 - 71.9
Pozos	64.9 - 71.5
Residuales domésticas	54.9
Mar	65.6 - 66.5

### ▪ El agua destilada y sus características

El agua puede ser sometida a procesos de destilación para retirarle todos sus elementos disueltos como microorganismos, y llevarla a un estado de máxima pureza. El agua destilada no es distinta molecularmente del agua ordinaria, pues se compone de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno ( $H_2O$ ). Sin embargo, ha sido despojada de las sales minerales que usualmente la acompañan, como fluoruros y otros electrolitos (Raffino, 2019).

Dependiendo de su grado de destilación, muchas de las propiedades ordinarias del agua, como su conducción eléctrica, se ven reducidas al salir de la destiladora. Esto se debe a la eliminación de los iones metálicos disueltos en ella; y es por eso, que además de ser aislante, el agua destilada también actúa diamagnéticamente (repele el magnetismo). De manera similar, el punto de ebullición del agua destilada es mucho más alto que el del agua ordinaria, sus propiedades de gusto y olor son radicalmente nulas, pues en algunos casos el agua que tomamos tiene trazas de calcio, cloro y otros elementos en proporciones mínimas (Raffino, 2019).

### ▪ Composición media de agua en la atmósfera

La composición promedio de la atmósfera terrestre está sujeta a variaciones considerables, especialmente en los niveles de ciertos constituyentes menores como son  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ , etc., que son productos de los procesos de combustión, y que están asociados con la contaminación atmosférica que hay en las comunidades urbanas-industriales (Jenkins, 2002).

Los principales constituyentes atmosféricos  $N_2$  y  $O_2$  son ambos ligeramente solubles en agua (17.5 y 39.3 ppm, respectivamente, a  $25^\circ C$ ) pero algunos de los constituyentes

menores, por ejemplo, CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, son muy solubles (1450 y 94,100 ppm, respectivamente, a 25°C) (Jenkins, 2002). En la Tabla 3-3 describe, los porcentajes en volumen de la composición media de agua en la atmósfera.

**Tabla 3-3:** Composición media de agua en la atmósfera (B.A, 1961) citado por (Jenkins, 2002)

Gas	Porcentaje en volumen	Presión parcial (atm)
N <sub>2</sub>	78.1	0.781
O <sub>2</sub>	20.9	0.209
Ar	0.93	0.0093
H <sub>2</sub> O	0.1-2.8	0.028
CO <sub>2</sub>	0.03	0.0003
Ne	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-5}$
He	$5.2 \times 10^{-4}$	$5.2 \times 10^{-6}$
CH <sub>4</sub>	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-6}$
Kr	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-6}$
CO	$(0.06-1) \times 10^{-4}$	$(0.6-1) \times 10^{-5}$
SO <sub>2</sub>	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$
N <sub>2</sub> O	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-7}$
H <sub>2</sub>	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-7}$
O <sub>3</sub>	$(0.1-1.0) \times 10^{-5}$	$(0.1-1.0) \times 10^{-7}$
Xe	$8.7 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-8}$
NO <sub>2</sub>	$(0.05-2) \times 10^{-5}$	$(0.05-2) \times 10^{-8}$
Rn	$6 \times 10^{-18}$	$6 \times 10^{-20}$

### ▪ Composición media de lluvia y nieve

La composición de la precipitación es muy variable y los contaminantes atmosféricos influyen considerablemente sobre ella. La precipitación cerca de los océanos contiene más SO<sub>4</sub>, Cl, Na y Mg, que la precipitación que cae en el interior de una gran extensión de tierra (Jenkins, 2002).

La lluvia y la nieve que se generan en una atmósfera que contiene altas concentraciones de SO<sub>2</sub> producido por combustión, puede ser muy ácido. Sin embargo, en las cifras de la Tabla 3-4 se muestra que el agua de lluvia es sin duda una solución muy diluida de sales disueltas, lo que indica la notable eficiencia del proceso de destilación que resulta en la producción de agua potable a partir de agua de mar (Jenkins, 2002).

**Tabla 3-4:** Composición de lluvia y nieve en mg/litro (Jenkins, 2002)

Constituyente	1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	0.0		1.2	0.3	
Al (III)	0.01				
Ca <sup>2+</sup>	0.0	0.65	1.2	0.8	3.3

Constituyente	1	2	3	4	5
Mg <sup>2</sup>	0.2	0.14	0.7	1.2	0.36
Na	0.6	0.56	0.0	9.4	0.97
K	0.6	0.11	0.0	0.0	0.23
NH	0.0				0.42
HCO	3		7	4	0.0
SO <sub>4</sub> <sup>2</sup>	1.6	2.18	0.7	7.6	6.1
Cl	0.2	0.57	0.8	17	2.0
NO <sub>2</sub>	0.02		0.0	0.02	
NO <sub>3</sub>	0.1	0.62	0.2	0.0	2.2
Sólidos disueltos totales	4.8		8.2	38	
pH	5.6		6.4	5.5	4.4

1 - Nieve al este del lago Tahoe (Estados Unidos), 2 - Lluvia Carolina del Norte y Sureste de Virginia (Estados Unidos), 3 - Lluvia Menlo Park (California) 09 de enero de 1958, 4 - Lluvia Menlo Park (California) 10 de enero de 1958, 5 - Precipitación Estación 526U (Bélgica).

Obsérvese que el pH de la precipitación no contaminada (5.5 a 6.5) es significativamente menor que el del agua de mar (7.5 a 8.4) de la cual se generó. Este es un reflejo del equilibrio que se ha logrado con el CO<sub>2</sub> atmosférico. El agua de lluvia, no contiene amortiguadores o reguladores, de manera que no puede mantener su pH neutro en presencia de estas cantidades tan pequeñas de gases que producen ácidos (Jenkins, 2002).

Durante la precipitación, el agua cae sobre la superficie de la tierra y establece contacto con rocas, sedimentos y el suelo, así como con los habitantes tanto animales como vegetales de la superficie terrestre. Se llevan a cabo reacciones químicas que modifican aún más la composición del agua. Estas reacciones se pueden considerar en términos generales como una titulación ácido-base, global gigantesca en donde los ácidos del agua lluvia (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) neutralizan las bases de las rocas. Como la composición de la superficie terrestre y el grado de actividad biológica, así como su naturaleza (incluyendo lo actividad del hombre) varían de un lugar a otro, se puede esperar que de estas reacciones se produzcan aguas de muy diversas composiciones. El tiempo y el grado de contacto entre el agua y las rocas también influyen sobre la composición de la solución (Jenkins, 2002).

### ▪ Métodos de expresión de concentraciones

En las diversas ramas de la química del agua se utilizan varios métodos para expresar concentración. Esta investigación utiliza algunos métodos más para los ensayos químicos del agua lluvia y destilada los cuales se describen a continuación.

### ▪ **Concentración en masa**

Existen dos formas básicas de expresar la concentración en masa de las especies disueltas (solutos) en solución. La primera es especificar la concentración en unidades de masa de soluto en un volumen unitario de solución; llamado p/v (peso/volumen). La segunda es una base p a p, o sea el peso de soluto en un peso determinado de solución. Las unidades mg/litro y ppm (partes por millón) son, respectivamente, las unidades p v y p p que más se emplean para expresar la concentración de diversos materiales tanto en agua como en aguas de desecho (Jenkins, 2002).

$$\text{mg/litro} = \frac{\text{Masa de sustancia (mg)}}{\text{Volumen de la solución, (litro)}} \quad (3.2)$$

$$\text{ppm} = \frac{\text{Masa de sustancia (mg)}}{\text{Masa de solución (kg)}} \quad (3.3)$$

### ▪ **Concentración molar y actividad**

En la química es más frecuente el uso de las molaridades; la molaridad o concentración molar de un soluto se define como el número de moles del soluto por litro de solución (Jenkins, 2002).

### ▪ **Concentraciones masa como CaCO<sub>3</sub>**

Es un sistema para expresar las concentraciones de dureza (calcio y magnesio) y alcalinidad (HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y OH) en la ingeniería del agua y aguas residuales, así como en la química del agua es el sistema carbonato de calcio (Jenkins, 2002).

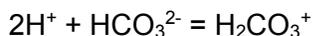
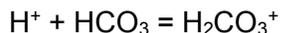
$$\text{Número de equivalentes de sustancia por litro} \times \frac{50 \times 10^3 \text{ mg CaCO}_3}{\text{equivalente de CaCO}_3} \quad (3.4)$$

### ▪ **Alcalinidad y acidez**

La alcalinidad es una medida de la capacidad de un agua para neutralizar un ácido fuerte. En las aguas naturales esta capacidad se puede atribuir a bases como HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y OH<sup>-</sup>, lo mismo que a las especies presentes con frecuencia en pequeñas concentraciones como son silicatos, boratos, amoníaco, fosfatos y bases orgánicas. Acidez es una medida de la capacidad de un agua para neutralizar una base fuerte. En las aguas naturales, esta capacidad por lo general se atribuye a ácidos como H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub><sup>+</sup> y HCO<sub>3</sub> y algunas veces a ácidos fuertes, en general H<sup>+</sup> (Jenkins, 2002).

En la determinación de alcalinidad total, un volumen conocido de muestra se titula con una solución estándar de un ácido fuerte hasta un valor de pH aproximado de 4 a 5 y casi siempre entre los valores 4.5 a 4.8. Este punto final casi siempre se detecta por el cambio

de color del indicador naranja de metilo: por tanto, la alcalinidad total a menudo se conoce como alcalinidad naranja del metilo. El  $H^+$  agregado es la cantidad estequiométrica que se requiere para las siguientes reacciones:



El pH en el punto final verdadero de la titulación de alcalinidad total debe ser el de una solución de  $H_2CO_3^+$  y  $H_2O$  (Jenkins, 2002).

### ▪ Conductividad

La conductividad de una solución es una medida de la capacidad de una solución para conducir una corriente: es una propiedad que se atribuye a los iones en solución. La corriente eléctrica se transporta a través de las soluciones por el movimiento de los iones, y la conductividad aumenta a medida que se incrementa la concentración de iones. Langelier (1936) presentó una aproximación para la estimación de la fuerza iónica si se conoce la conductividad de una muestra de agua.

$$\mu = 2.5 \times 10^5 \times STD \quad (3.5)$$

Donde:

$\mu$ : Fuerza iónica

STD: Sólidos totales disueltos

### ▪ Sólidos totales disueltos(STD)

Los sólidos disueltos son un grupo más homogéneo y clasificable, existen como moléculas o átomos individuales dispersos. En la mayoría de las aguas naturales y las aguas residuales que se originan de ellas, los sólidos disueltos son sales inorgánicas, y de estas, una buena proporción son sales como los cloruros, sulfatos, sodio y calcio (Hernández, 2015).

Los sólidos totales disueltos se obtienen filtrando una muestra mezclada mediante un filtro estándar de fibra de vidrio. Luego se transfiere el filtrado a un recipiente previamente pesado, se evapora secándose a  $180 \pm 2$  °C. El aumento comparado con el peso del recipiente representa los STD (APHA, AWWA, & WEF, 2017).

$$\frac{\text{mg sólidos totales disueltos}}{L} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{Volumen de la muestra, mL}} \quad (3.6)$$

Donde:

A: Peso final del residuo seco más el recipiente en mg

B: Peso del recipiente en mg

Las sales existen como iones cargados eléctricamente y por ello su presencia aumenta la conductividad eléctrica de la muestra. La conductividad eléctrica es un parámetro fácil y rápido de medir en el agua, así que comúnmente se mide para estimar la cantidad de sólidos disueltos en el agua (Hernández, 2015).

La relación aproximada para calcular los STD en el agua con relación a la conductividad eléctrica se expresa mediante la ecuación (3.9) (Fertilizer, 2020).

$$STD (ppm) = 0.64 \times CE \quad (3.7)$$

Donde:

CE: Conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$

La conductividad eléctrica es uno de los parámetros más utilizados para medir la salinidad del extracto de suelo saturado o del agua, ya que su valor es proporcional a la cantidad de las sales en solución que contiene (Rhoades, 1981).

La presencia de sales mantendría floculada a la arcilla y a los compuestos húmico, permitiendo entonces, que se presente un perfil homogéneo, poroso e impermeable (Piñeiro, Cerana, & Panigatti, 1973).

La concentración salina controla el potencial osmótico ( $\Psi\pi$ ) de la solución del suelo y de las aguas de riego.

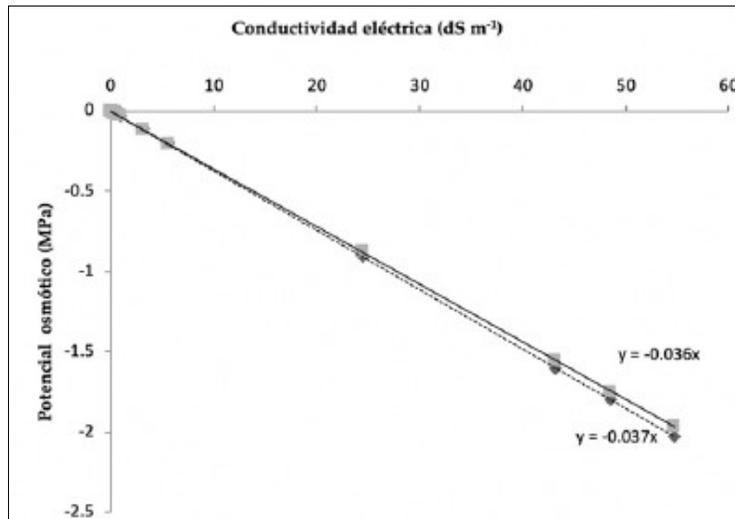
En el Manual 60 del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América (Richards, 1985) se estiman valores de presión osmótica ( $\pi$ ) para diversas soluciones salinas de muchos suelos y aguas con base en valores de conductividad eléctrica (CE). Este parámetro tiene relación con la presión osmótica a través de la ecuación (3.10) (Sánchez, Ortega, Can, Galicia, & Camacho, 2019)

$$\pi (atm) = 0.36 \times CE \quad (3.8)$$

Donde:

CE: Conductividad eléctrica

Sánchez, Ortega, Can, Galicia & Camacho, (2019), proponen un modelo basados en diversas combinaciones de sales para ajustar más los datos a la línea de potencial osmótico ( $\psi\pi$ ) teórico, obteniendo un resultado muy similar del Laboratorio de Salinidad de Suelos de los Estados Unidos de América



**Figura 3-6:** Regresión lineal entre CE y  $\Psi\pi$  de soluciones acuosas de suelos y aguas de riego, mediante el uso del coeficiente experimental  $K3 \times STD$  y el coeficiente  $-0.036 \times CE$ . (Sánchez, Ortega, Can, Galicia, & Camacho, 2019)

## 3.2 Antecedentes

En los últimos años, la creciente tasa de contaminación del suelo ha provocado una serie de investigaciones en las que se han estudiado los efectos de los productos químicos en las propiedades geotécnicas de los suelos. La lluvia ácida es el resultado de la contaminación del aire y sus principales componentes son el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), que reaccionan en el agua para producir ácidos más fuertes que pueden reducir el pH a 4.5 o incluso 3.0 (Denman, y otros, 2007). El comportamiento mecánico de los suelos está significativamente influenciado por los cambios químicos en los líquidos del medio (Bakhshipour, Asadi, Huat, A, & Kawasaki, 2016).

Las propiedades mecánicas de las arcillas se ven fuertemente afectadas por la composición química del fluido que circula por sus poros. Los análisis experimentales y teóricos han permitido determinar los efectos mecánicos de la exposición de las arcillas a soluciones acuosas con diferentes concentraciones de sal o solventes orgánicos, por diferencias en sus intercambios catiónicos. Pero no se ha estudiado la influencia que tiene el pH o la acidez del agua lluvia en el comportamiento mecánico de la arcilla (Maines, 2007), solo Kamon (1997) encontró que el pH del agua lluvia disminuyó aproximadamente a 4.0 debido a la presencia de sulfatos ( $SO_4$ ), sugiriendo que el cambio afectaría las propiedades ingenieriles del suelo (Towhata, 2015).

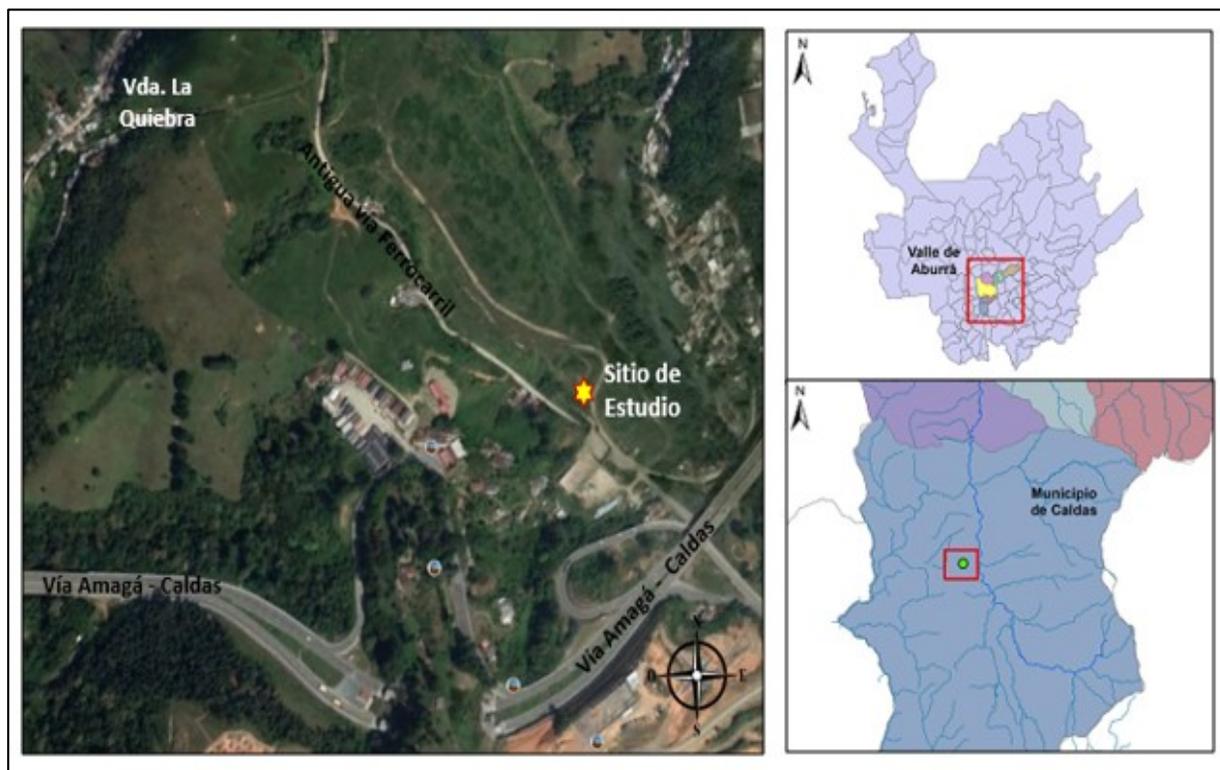
Aunque el grado de contaminación en los suelos presenta una tasa alta en áreas desarrolladas, en general existen pocas pesquisas sobre el efecto de fluidos ácidos en las características geotécnicas de los materiales. Existen algunas investigaciones sobre la influencia de los fluidos en la conductividad hidráulica de los suelos finos, en particular

bentonita, un material que es ampliamente utilizado para revestimientos (Bowder & Daniel, 1987). Una observación general que se puede hacer con respecto a los resultados de estos estudios es que los suelos que contienen montmorillonita / esmectita son más susceptibles a la alteración de sus propiedades por el fluido que circula por sus poros, que los suelos que contienen caolinita o illita. Sin embargo, todavía quedan algunos aspectos del comportamiento del suelo que deben abordarse (Sassa, 2009).

## 4.Descripción de la zona de estudio

### 4.1 Localización de la zona de estudio

El sitio de estudio se encuentra ubicado al sur del Valle de Aburrá en zona rural del municipio de Caldas Antioquia, el cual está rodeado de colinas y montañas que corresponden al relieve central de la cordillera de los Andes. El municipio se ubica aproximadamente a 22 km de la ciudad de Medellín, la precipitación promedio anual es 2523 mm y la temperatura promedio es de 19° C (Alcaldía de Caldas, 2019). Figura 4-1.



**Figura 4-1:** Localización sitio de estudio, zona rural vereda La Quebra, municipio de Caldas, Antioquia. Modificado (Google, 2019)

La ubicación específica de la exploración en campo se localiza sobre la margen derecha de la vía Caldas- Amagá en la vereda La Quebra, del municipio de Caldas, Antioquia, con coordenadas globales 6° 03' 28,69" Norte y 75° 38' 34,53" Oeste. Figura 4-2.



**Figura 4-2:** Sitio extracción de la muestra de suelo.

## 4.2 Componente geológico

A escala regional, se encuentran rocas de edad Cretácica, correspondientes a la Formación Quebradagrande, siendo estas las más antiguas. Asimismo, asociado a los procesos naturales que han afectado esta zona se identifican materiales recientes de edad Cuaternaria, correspondientes a depósitos de vertiente producto de antiguos movimientos en masa; al igual que se encuentran depósitos aluviales asociados a la dinámica de depósitos de Quebradagrande y sus afluentes (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006). Figura 4-3.

### 4.2.1 Complejo Quebradagrande

El Complejo Quebradagrande, fue definido inicialmente por Grosse (1926) como la Formación Porfírica, consistía de un conjunto de derrames volcánicos de carácter ácido y básico, formados estos últimos por porfiritas diabásicas, porfiritas augíticas y "meláfidos" (basaltos con plagioclasa) con tobas, donde en la secuencia extrusiva aparecen intercalados sedimentos marinos. Posteriormente Botero (1963) la nombra Formación Quebradagrande, conforme a la quebrada situada al sur del municipio de La Estrella que lleva el mismo nombre, describiendo los metasedimentos de la sección tipo como esquistos silíceos negros, filitas grafitosas, liditas, cuarcitas de grano fino y diques de andesita y dacita. En contraste, las rocas volcánicas las incluye dentro de un grupo denominado rocas verdes, basado en la coloración verde producto de la cloritización de rocas basálticas. Este

último tipo de rocas se caracteriza por texturas félsicas y porfídicas, y por tener una mineralogía compuesta por plagioclasas muy alteradas y augita como mineral máficos predominante, luego de esto, González (1980) hace una diferenciación los dos miembros: uno sedimentario compuesto por lutitas carbonosas arcillosas y en menor proporción, areniscas feldespáticas, limolitas, liditas y localmente bancos de caliza negra, y otro volcánico constituido por rocas de afinidad toleítica con predominio de lavas basálticas, andesitas y piroclastitas. Finalmente, Álvarez (1995) y Maya & González (1995) proponen el nombre de Complejo Quebradagrande comprendiendo litodema volcánico y el litodema sedimentario.

▪ **Miembro volcanosedimentario (KvsQG)**

Este miembro consiste de un cuerpo alargado en dirección N - S, donde se observan intercalaciones de esquistos silíceos negros (compuestos de pequeños cristales de cuarzo angular, en una masa silíceo arcillosa rica en material orgánico que le da su coloración), a veces de aspecto lenticular, filitas grafitosas, liditas, algunas cuarcitas de grano fino y color oscuro, delgados conglomerados y calizas clásticas negras con escasos fósiles marinos. Los sedimentos de la formación Quebradagrande son de origen marino, neríticos, euxínicos como lo atestiguan la abundante materia orgánica, los conglomerados intraformacionales y algunas calculaditas conteniendo Archaeolithothamnium y espinas de equinoides. Las tobas desarrollan horizontes I, V y VI principalmente. El chert presenta meteorización diferencial y desarrolla horizontes III, V y VI.

**Tabla 4-1.** Perfil de meteorización – Tobas miembro volcanosedimentario (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006)

Horizontes	Descripción
VI y V	De granulometría limosa, con colores pálidos en tonalidades grisáceas; los horizontes superficiales incorporan materia orgánica, dando una tonalidad pardusca. Alcanza dos metros de espesor
I	Roca masiva de grano muy fino, color verde pálido, en ocasiones laminada

**Tabla 4-2.** Perfil de meteorización – Chert miembro volcanosedimentario (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006)

Horizontes	Descripción
VI	Material limoso, color amarillo pardusco. Espesores no mayores a un metro.
V	Debido a la meteorización diferencial, se conservan remanentes frescos en una matriz limosa de color rojiza. Espesores aproximados de un metro

Horizontes	Descripción
VI	Material limoso, color amarillo pardusco. Espesores no mayores a un metro.
III	La meteorización diferencial genera zonas de debilidad, debido al alto fracturamiento de la roca; allí el material es de granulometría limosa en medio de una roca masiva

#### ▪ Miembro volcánico (KvQG)

Es de composición toleítica y está conformado por espilitas, diabasas y basaltos, y en menor proporción andesitas, brechas y tobas. En general son rocas máficas con coloraciones verde oscura producida por la intensa alteración de los minerales máficos que las constituyen. En cercanías a las zonas de fallas se encuentran estructuras esquistosas por efectos dinámicos y donde se dificulta la separación con la unidad de esquistos verdes. Las diabasas desarrollan horizontes de meteorización espesos desde roca fresca (horizonte I) hasta suelos residuales (horizonte VI).

**Tabla 4-3.** Perfil de meteorización – Diabasas miembro volcánico (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006)

Horizontes	Descripción
VI	Comúnmente genera suelos residuales con granulometría fina (limo y arcilla) y color rojo oscuro en la base y amarillo pardusco hacia el techo. Puede alcanzar espesores hasta de cuatro metros.
V	Presenta características similares al horizonte VI, en cuanto al color rojo y la granulometría. Se diferencian en que conserva algo de la textura original de la roca y es característica una pátina de manganeso a lo largo de las estructuras o zonas de debilidad. Alcanza espesores de seis metros.
IV	En este horizonte los bloques frescos predominan en un 30 %, cuyas superficies se encuentran usualmente cubiertas por una pátina de color negro. Se encuentra altamente fracturado, favoreciendo la meteorización por las zonas de debilidad.
III, II y I	Estos horizontes conservan la textura y color originales de la roca. La alteración en las zonas de debilidad genera colores negros de las pátinas de manganeso.

#### 4.2.2 Depósitos de vertiente (Qd, NQFII)

Bajo esta denominación de depósitos no litificados se incluyen los de deslizamiento y los flujos de escombros y/o lodos. Por sus espesores y grado de madurez es conveniente cartografiarlos como unidades geológicas independientes y no como formaciones

superficiales. La edad de estos depósitos es variable, no obstante, las características de altura, consolidación, madurez, pendiente y grado de incisión, permiten hacer relaciones cronoestratigráficas entre ellos, y, en el caso de los flujos, agruparlos en series de eventos (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

#### ▪ **Depósitos de deslizamiento (Qd)**

Se presentan en general reposando sobre las vertientes, de pendientes moderadas a bajas (15-30°), de los relieves montañosos y colinados. Son frecuentes hacia la parte baja de la vertiente, con alta presencia de rupturas de movimientos en masa tipo deslizamiento. La mayoría de ellos presentan fragmentos de roca tamaño gravas y bloques de roca embebidos en una matriz de granulometría fina. En ocasiones están cubiertos de cenizas volcánicas (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

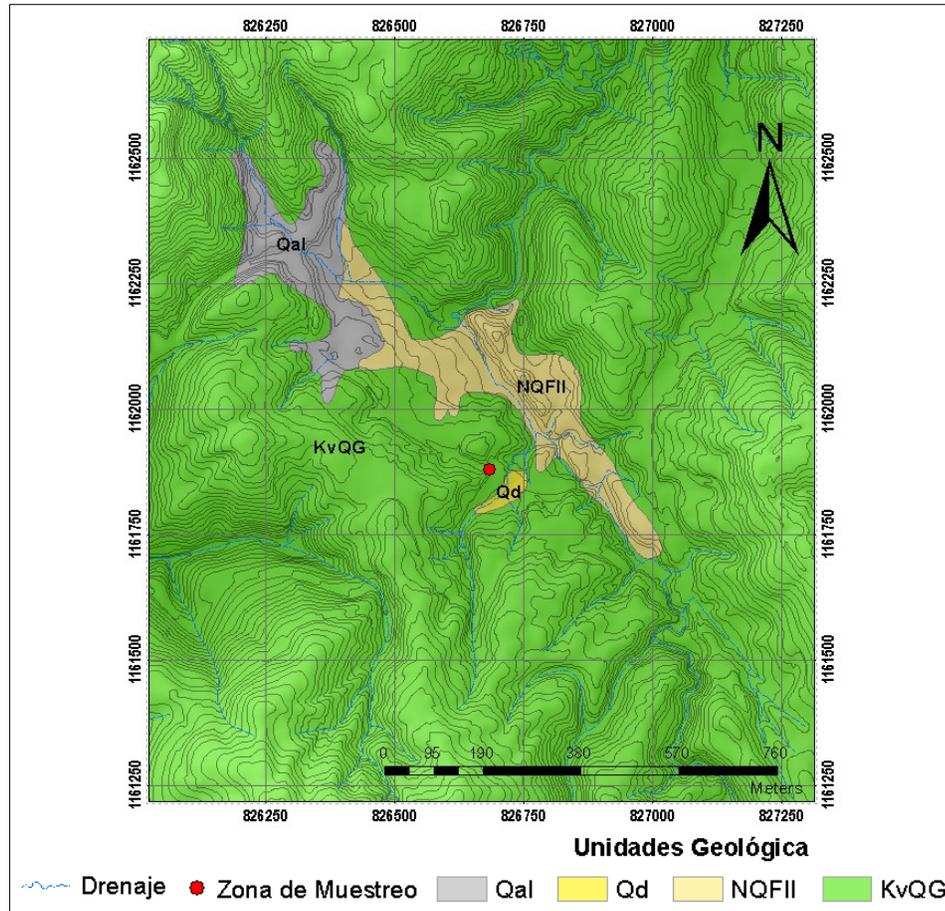
#### ▪ **Depósitos de flujos (NQFII)**

Estos depósitos están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. En general, consisten de depósitos muy antiguos, asociados a un relieve colinado, producto de la fuerte incisión. En algunos sectores, los depósitos más antiguos se encuentran en las cimas de las colinas, indicando una inversión de relieve. En contraste, los depósitos de pequeños flujos aislados bajan de algunos cerros, conforman cuerpos recientes de clastos frescos, subangulosas a subredondeados, cuyos fragmentos alcanzan 80 cm de diámetro (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

Los flujos antiguos, se caracterizan por tener clastos muy meteorizados, dificultando, en la mayoría de los casos, su diferenciación de la matriz que los alberga. Estos depósitos desarrollan horizontes de meteorización V y VI. En el sector de la universidad de La Salle se observa sobre un flujo de escombros, un horizonte VI amarillo, de carácter arcilloso, cuyo material parental puede ser tanto el flujo de escombros, como un flujo de lodos posterior, del cual no quedan relictos (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

### **4.2.3 Depósitos aluviales (Qal)**

Los depósitos aluviales y aluviotorrenciales están asociados a las corrientes principales; es decir, son producto de la depositación del río Aburrá y sus principales quebradas afluentes. Se localizan en las llanuras de inundación, como materiales de desborde y en terrazas aluviales de diferentes niveles (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).



**Figura 4-3:** Geología de la zona de estudio. Modificado de (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

### 4.3 Componente geomorfológico

Según Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2006), la zona evaluada se localiza dentro de una unidad de paisaje denominada Valle Superior de Aburrá. En cada uno de los valles se reconocieron macrounidades geomorfológicas denominadas bloques, donde se presentan condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y se distinguen de forma clara de los adyacentes. Figura 4-4.

#### 4.3.1 Colinas en suelo residual (CSR)

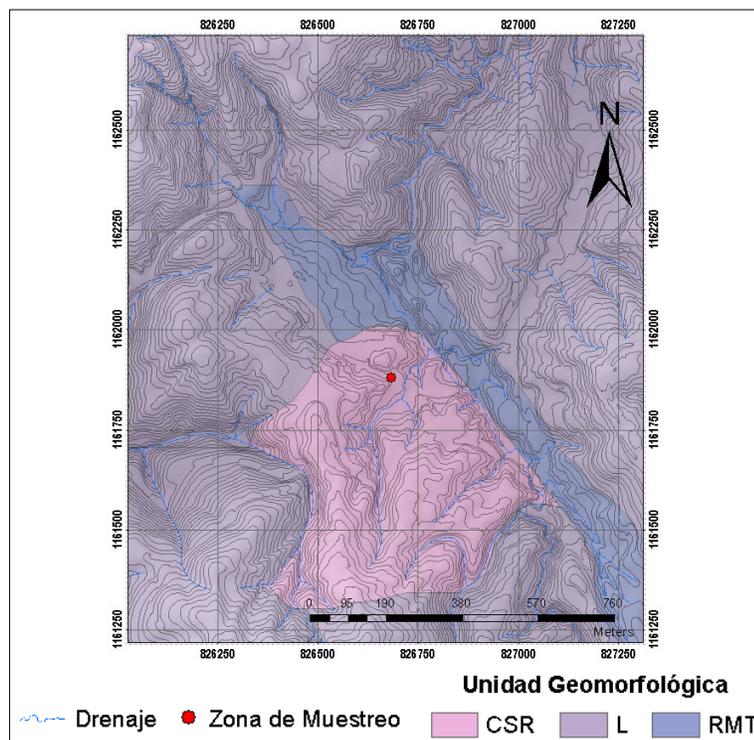
Esta unidad se localiza generalmente cerca de los lomos o en la terminación de los mismos. Presentan formas redondeadas con topes planos a ligeramente convexos. Las pendientes son moderadas y tienen un moderado grado de incisión. Aparecen en todos los municipios del Valle de Aburrá y corresponden a suelos residuales de anfibolita, metagabros, gneis, dunitas, rocas volcanosedimentario, esquistos, rocas graníticas (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

### 4.3.2 Lomos (L)

Son fillos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal. Son las unidades dominantes y de mayor cobertura dentro del Valle de Aburrá, funcionando como divisoria de agua entre cuencas (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

### 4.3.3 Morfotectónicos (RMT)

Son pequeños cuerpos que coinciden con zonas de rasgos tectónicos como lineamientos, fallas y contactos geológicos. Se identifican por sus trazados lineales semirectos que siguen los rasgos morfotectónicos de la falla San Jerónimo y sus estructuras asociadas (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).



**Figura 4-4:** Geomorfología de la zona de estudio. Modificado de (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006).

## 5. Metodología

### 5.1 Exploración de campo

Para la época de extracción de muestras del suelo (Julio de 2018), se contaba con una humedad relativa promedio de 52%, el periodo bimodal de lluvia para la fecha corresponde a temporada seca. Se realizó un reconocimiento directo de la zona, donde se ejecutó un apique a 2.5 m de profundidad en un talud con una altura aproximada de 3.5 m, recuperando muestras en bloque (Figura 5-1) siguiendo el procedimiento que contempla la norma (ASTM D-7015, 2018) de toma de muestras, para la ejecución de ensayos mecánicos y de clasificación completa del suelo.



**Figura 5-1:** Extracción de la muestra en bloque, fecha 7 de Julio de 2018.

La recolección del agua lluvia en campo se realizó mediante envases plásticos los cuales fueron lavados y desinfectados antes de la recolección del agua, estos envases fueron puestos a la intemperie en el sitio de extracción de la muestra (Figura 5-2) con la finalidad de obtener el agua lluvia directamente de la zona, pretendiendo no tener algún tipo alteración externa diferente a la misma naturaleza.

El agua lluvia una vez llevada al laboratorio se conserva refrigerada a una temperatura promedio de 4°C para evitar cualquier transformación, y que de esta forma conserve las concentraciones relativas de todos los componentes presentes en el material original, garantizando que los cambios no sean significativos en su composición antes del análisis.



Figura 5-2: Recolección agua lluvia sitio de estudio.

## 5.2 Características de las aguas

### 5.2.1 Mineralogía agua destilada

Para este ensayo se dispuso de 1.5 litros de agua pasada por el procedimiento de destilación con el equipo disponible en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, laboratorio de geotecnia y pavimentos (Figura 5-3) y finalmente llevada al laboratorio de ingeniería sanitaria de la misma universidad en envases plásticos lavados y desinfectados con anterioridad para realizarle los análisis de conductividad, alcalinidad total y a la fenolftaleína, dureza total y dureza cálcica, cloruros, sulfatos, sólidos totales disueltos. Los ensayos se realizan según *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (2540C, 2017) para los sólidos, (4500 CL-B, 2017) para cloruros, (4500 SO4 2-, 2017) para sulfatos, (2510 B, 2017) para la conductividad, (2320 B, 2017) para la alcalinidad, (3500 Ca B, 2017) y (2340 C, 2017) para la dureza cálcica y dureza total respectivamente. La elección de los análisis se determinó a partir de una apariencia visual de la muestra y evaluando las características que podrían encontrarse en el agua destilada según la literatura.



**Figura 5-3:** Destilador utilizado para el proceso de destilación del agua.

## 5.2.2 Mineralogía agua lluvia

Se dispuso de 1.5 litros de agua lluvia recolectada en campo como se describe en el numeral **5.1** y conservada en una nevera mientras se procedía con el análisis de la muestra en el laboratorio de ingeniería sanitaria de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Los análisis que se realizan son de conductividad, alcalinidad total y a la fenoltaleína, dureza total y dureza cálcica, cloruros, sulfatos, sólidos totales disueltos. Los ensayos se realizan según *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (2540C, 2017) para los sólidos, (4500 CL-B, 2017) para cloruros, (4500 SO<sub>4</sub> 2-, 2017) para sulfatos, (2510 B, 2017) para la conductividad, (2320 B, 2017) para la alcalinidad, (3500 Ca B, 2017) y (2340 C, 2017) para la dureza cálcica y dureza total respectivamente. La elección de estos análisis se determinó a partir de la apariencia visual de la muestra y según la reacción que pudiese tener con los minerales del suelo una vez obtenidos los resultados del análisis químico del suelo.

## 5.2.3 Medida del pH

El pH es un índice de la concentración de los iones de hidrógeno (H) en el agua. Se define como  $-\log(H^+)$ . Cuanto mayor sea la concentración de los iones de hidrógeno en el agua, menor será el valor del pH. El ensayo se realiza según *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (4500 H B, 2017) tomando 4 datos para el agua destilada (Figura **5-4a**) y 4 datos para el agua lluvia (Figura **5-4b**).



a) pH agua destilada

b) pH agua lluvia

**Figura 5-4:** Medida pH aguas.

### 5.2.4 Tensión superficial

Se dispuso de aproximadamente 300 ml de agua destilada y agua lluvia para realizar el ensayo en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, en el laboratorio de Fenómenos de Superficie. La metodología implementada para la ejecución del ensayo fue la metodología del anillo, que permite determinar la tensión superficial de un líquido a través de la fuerza requerida para retirar un anillo de la superficie de un líquido (Figura 5-5). Como el ensayo no está normalizado se describe el procedimiento a continuación propuesta por (Du Nouy, 1979).

- El líquido se coloca en un recipiente de vidrio limpio, el plato que sostiene al recipiente con el líquido es elevado hasta que el anillo se sumerja en el líquido y luego se baja para que el anillo quede en superficie y el índice esté en posición cero.
- Se aumenta la torsión rotando una perilla para llevar al vernier a un punto cercano, pero por debajo de la tensión superficial del líquido, mientras se gira lentamente la perilla, y el plato conteniendo el líquido se baja. Este procedimiento de doble movimiento es seguido hasta la ruptura de la película.
- La lectura sobre la escala en el momento de la ruptura del líquido es el indicativo de la tensión superficial del líquido.

Cálculos

$$Tensión\ Superficial = \frac{F}{4\pi r} \quad (5.1)$$

Donde:

$F$  = Fuerza generada a partir de la ruptura (Rompimiento de la tensión) Mn

$r$  = Radio del anillo



**Figura 5-5:** Tensiómetro de Du Nouy.

## 5.3 Caracterización física del suelo

Como parte de la caracterización de un material tenemos el resultado de sus propiedades físicas. Estas dependen en gran medida, de la estructura de los componentes, que vienen definidas por la proporción entre partículas de tamaño grande y pequeño, el conjunto de poros y los volúmenes relativos de agua y de aire que ocupan los poros (Montenegro, 2011).

### 5.3.1 Contenido de humedad natural

Para muchos materiales, el contenido de agua es una de las propiedades más significativas que se utilizan para establecer una correlación entre el comportamiento del suelo y sus propiedades índice, también es utilizado para expresar las relaciones de fase del aire, el agua y los sólidos en un volumen dado de material (ASTM D2216-19, 2019).

Una vez terminada la exploración en campo, se llevan las muestras al laboratorio y se determina el contenido de humedad el mismo día, siguiendo el procedimiento de la norma (ASTM D2216-19, 2019) para la muestra en bloque y las muestras alteradas con tres repeticiones para cada ensayo.

### 5.3.2 Gravedad específica

La gravedad específica de los sólidos se utiliza para calcular la densidad de los sólidos, las relaciones de fase de los suelos, como la proporción de vacíos y el grado de saturación (ASTM D854-14, 2014).

El ensayo se realizó cuatro veces con dos picnómetros (un total de 8 repeticiones) para ambas aguas con el fin de verificar resultados, siguiendo los procedimientos de la norma (ASTM D854-14, 2014), el cual especifica que la pureza del agua con la que se realiza el ensayo debe ser destilada (Figura 5-6a) y (Figura 5-6b).



a) Gravedad específica agua destilada

b) Gravedad específica agua lluvia

**Figura 5-6:** Gravedad específica de los sólidos.

### 5.3.3 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)

A través de un aspecto visual y de una clasificación cualitativa en campo el material se considera que presenta características fino granulares por la textura de las partículas y su plasticidad, el cual es corroborado en el laboratorio donde el mayor porcentaje de material fue pasado por el tamiz número 200 mediante el lavado.

Una vez concertado este resultado y consecuente con el diagrama de clasificación (ASTM D2487-17, 2017), se procede a desarrollar los límites de Atterberg para llegar a la clasificación del material.

### 5.3.4 Límites de Atterberg

Estos ensayos se utilizan como parte integral de varios sistemas de clasificación de ingeniería para caracterizar las fracciones de suelos de grano. El límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos, se usan ampliamente, ya sea de forma individualmente o en conjunto, con otras propiedades del suelo para correlacionar con el comportamiento de ingeniería, como la compresibilidad, la conductividad hidráulica la compactabilidad, la contracción y la resistencia al corte.

Los límites se desarrollaron siguiendo el procedimiento de la norma (ASTM D4318-17e1, 2017) donde precisa que el agua utilizada debe ser destilada o desmineralizada; la forma de realizar el ensayo fue con las muestras en su estado natural, tanto para el agua destilada (Figura 5-7a) como para el agua lluvia, (Figura 5-7b) con repetición para cada ensayo hasta tres veces.



a) Límite líquido y límite plástico agua destilada

b) Límite líquido y límite plástico agua lluvia

**Figura 5-7:** Límites de Atterberg.

### 5.3.5 Granulometría por hidrómetro

La distribución del tamaño de partícula es un término descriptivo que se refiere a las proporciones por masa seca de un suelo, distribuido en rangos de tamaño de partícula especificados. La curva de gradación generada usando este método, produce la cantidad de fracciones de limo y arcilla presentes en el suelo con base en definiciones de tamaño, no en la mineralogía o datos de límite de Atterberg (ASTM D7928-17, 2017).

Una vez obtenida la gradación y clasificación del material mediante la granulometría por tamices (ASTM C136/C136M-14, 2014), se procede a realizar el ensayo por hidrómetro pasando el suelo por la malla No. 10 (2.0 mm), según la norma (ASTM D7928-17, 2017), para obtener las fracciones de tamaños de arcillas y limos. Finalmente, para completar la curva granulométrica para partículas de tamaño mayores a 0.074 mm, el material del hidrómetro se lava por el tamiz No. 200 (0.074mm), se seca y se procede hacer nuevamente granulometría por tamices.

El ensayo se realiza en dos repeticiones con defloculante (CD) y sin defloculante (SD) tanto para agua destilada como lo exige la norma (ASTM D7928-17, 2017) y agua lluvia.



**Figura 5-8:** Granulometría por hidrómetro agua destilada y agua lluvia.

### 5.3.6 Miniatura Compactada Tropical (M.C.T) - expedita

Este método de clasificación fue propuesto por (Nogami & Villibor, 1995) para suelos tropicales, por presentar características particulares frente a los suelos de zonas templadas.

Debido a que este ensayo no se encuentra normalizado, se hace una descripción de la metodología propuesta por (Nogami & Villibor, 1995).

- Se toma material pasado por el tamiz No. 40 (0.42mm) y se le adiciona agua destilada espatulándolo hasta que se forme una pasta moldeable. Por el objetivo de la investigación se realizó también el procedimiento con agua lluvia.
- El material es colocado sobre una superficie plana que forme una capa con un espesor aproximado a 10 mm, el cual se le deja caer un penetrómetro de 1.3 mm de diámetro y 10 gramos de peso a una altura de 40 mm. El material debe tener una consistencia tal que el penetrómetro entre 1 mm, de lo contrario se debe agregar agua o usar otra mezcla según sea el caso.

- Luego con esta pasta se llenan como mínimo 3 anillos de PVC de aproximadamente 20 mm de diámetro interno y 5 mm de altura y se deja secar al aire el material por un tiempo mínimo de 6 horas.
- Después del tiempo de secado se mide el diámetro de las pastillas y se determina la contracción ( $C_t$ ) como la diferencia entre el diámetro inicial y el diámetro final.
- Posteriormente se colocan las pastillas sobre un papel filtro y una piedra porosa, que a su vez está en contacto con agua garantizando la saturación de la piedra, con el fin de que las pastillas absorben el agua por capilaridad por un tiempo de 2 horas.
- Finalmente, sobre las pastillas se deja caer nuevamente el penetrómetro y se mide la penetración en milímetros

Este procedimiento se desarrolló con agua destilada (Figura 5-9) y agua lluvia (Figura 5-10) con un mínimo de tres muestras verificando repetibilidad.



a) Saturación de la muestra agua destilada



b) Prueba de penetración

**Figura 5-9:** Miniatura compactada rápida agua destilada.



a) Saturación de la muestra agua lluvia

b) Prueba de penetración

**Figura 5-10:** Miniatura compactada rápida agua lluvia.

Cálculos

Contracción

$$C_t = \phi_{Inicial} - \phi_{Final} \quad (5.2)$$

Para  $C_t$  entre 0.1 mm y 0.50 mm

$$c' = \frac{\log_{10}(C_t) + 1}{0.904} \quad (5.3)$$

Para  $C_t$  mayores a 0.6 mm

$$c' = \frac{\log_{10}(C_t) + 0.7}{0.5} \quad (5.4)$$

Donde:

$C_t$  = Coeficiente de Contracción

$\phi_{Inicial}$  = Diámetro inicial

$\phi_{Final}$  = Diámetro final

Con los valores de  $C_t$  y  $C'$  se procede a clasificar el suelo según la

**Tabla 5-1:** Clasificación MCT rápida (Nogami & Villibor, 1995)

<b>c'</b>	<b>Penetración (mm)</b>	<b>Grupo MCT</b>
<0.5	<3	LA
	3.1 a 3.9	NA
	≥ 4.0	NA/NS'
0.6 a 0.9	<2	LA-LA'
	2.1 a 2.9	NA'-NA
	≥ 4.0	NS'-NA'
1.0 a 1.3	<2	LA'
	2.1 a 3.9	NA'
	≥ 4.0	NS'
1.4 a 1.7	<2	LA-LG'
	2.1 a 3.9	NA'/NG'-NS'
	≥ 4.0	NS'-NG'
≥ 1.8	<2	LG'
	2.1 a 3.9	NA'
	≥ 4.0	NG'

Donde:

LG': Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas.

LA': Arenas arcillosas lateríticas.

LA: Arena con poca arcilla laterítica.

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

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

NA': Arenas limosas y arenas arcillosas no lateríticas.

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

El símbolo (-) Señala opción equivalente y (/) señala que tiene mayor peso la primera clasificación.

## 5.4 Caracterización mineralógica y estructural

### 5.4.1 Difracción de rayos X

Las muestras a analizar en el ensayo de difracción, se secaron a temperatura ambiente y se pasaron por el tamiz No. 200 (0.074 mm) para ser analizadas bajo la técnica del polvo, en el equipo de difracción de rayos X. Este es uno de los métodos más usados para la

identificación de minerales en suelos arcillosos y en el estudio de su estructura cristalina (Mitchell, 1976).

El ensayo se realizó en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en el laboratorio de Tecnología y Diseño de Materiales. El difractómetro de Rayos-X es marca Panalytical, modelo X'Pert Pro MPD, que posee tubo de Rayos-X con ánodo de Cu y filtro de Ni, sistema "celerator", que permite obtener difractogramas con una buena resolución en pocos minutos, módulo "spinner" (que permite la rotación de las muestras), con velocidad de barrido 2 Theta de  $60^\circ$  en modo continuo ( $0,5^\circ$  min), el límite de detección del método de difracción de rayos X es del 5%. Además de eso cuenta con software para adquisición de datos, para análisis estructural, que permite la cuantificación de fases minerales (Quintero , 2016).

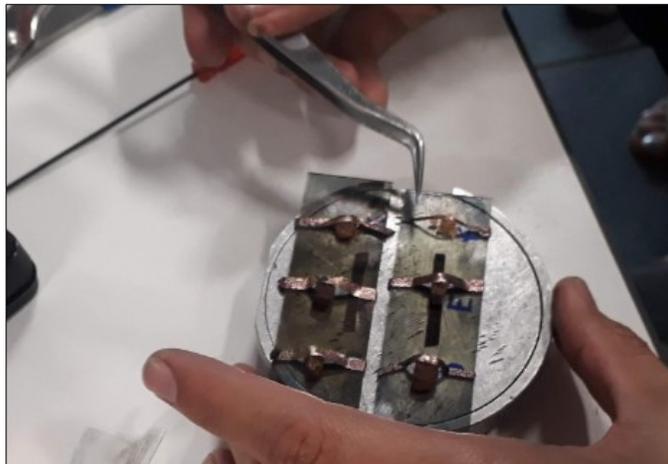
#### 5.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (Scanning Electron Microscopy)

Para la ejecución del ensayo se partieron tres especímenes de la muestra inalterada que fueron analizadas en el laboratorio de Microscopia Avanzada la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Para ello se utilizó un equipo SEM JEOL JSM 5910 LV (Figura 5-11), con detectores BES y SEI, para la generación de imágenes. El equipo funciona a alto vacío y en este caso por el suelo cargarse tan rápidamente impidiendo su visualización, se realizó el ensayo en condiciones de 3KV, y una distancia de trabajo de 10 mm.



**Figura 5-11:** Microscopio Electrónico de la Universidad Nacional – Sede Medellín.

La base del espécimen debe ser lisa y fijada en la base del aparato con un buen conductor como la plata (Figura 5-12). La muestra de suelo debe ser cubierta con una capa delgada (aproximadamente 10 nm) de oro-paladio, carbón u otro material conductor debido a que la resolución es disminuida por los materiales no conductores (Fookes, 2004).



**Figura 5-12:** Preparación de la muestra. A la derecha muestra F.

El microscopio electrónico de barrido es una de las técnicas más versátiles para la visualización y el análisis de las características microestructurales de muestras sólidas, debido principalmente, a su elevada resolución (alrededor de 2 nm) y a su gran profundidad de campo, lo que permite una visualización tridimensional (Goldstein, 1984), además contiene componentes similares a los del microscopio óptico, un sistema de iluminación, un juego de lentes y un sistema de proyección de imágenes (Mesa & Solano, 2004). Un rayo de electrones se acelera a través de un campo electrónico, adquiriendo energía cinética, incidiendo sobre la muestra y provocando una disipación de una serie de señales que generan la imagen.

### ▪ **Caracterización química del suelo**

En la caracterización química del suelo se realizaron ensayos de pH y de fertilidad (Al, Ca, Mg, k, P y CICE), con el objetivo de determinar el grado de acidez y el tipo de minerales presentes en el material.

#### **5.4.3 Medida del pH**

El pH del suelo es una variable útil para determinar la solubilidad de los minerales del suelo, la movilidad de los iones en el suelo (ASTM D4972-19, 2019) y controlar muchas actividades químicas y biológicas más.

El ensayo se realizó dos veces (para cuatro repeticiones por ensayo), basados en la norma (NTC-3651, 2012), donde se establece preparar una solución de cloruro de potasio (KCl) y agua destilad. La relación entre la muestra y la solución se efectuó con una suspensión 1 a 1, utilizando 20 g de material por 20 ml de solución, de igual forma para las mezclas del suelo con agua destilada (Figura 5-13a) y agua lluvia (Figura 5-13b), dejándolos reposar una vez mezclados, por una hora.

El  $\Delta pH$  determinado como la diferencia del pH en KCL y el pH en agua como lo indica la ecuación (5.5), permiten inferir el predominio de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio en el suelo, cuando es positivo, o de minerales de arcilla cuando es negativo (Camapum de Carvalho, 2015). También es posible calcular el punto de carga cero, ecuación (5.6), que indica el punto en el cual se equilibran las cargas positivas y negativas del medio, entre más alejado se encuentre el pH del medio del PZC se presenta mayor desagregación en el material (Lavorenti & Alves, 2005).

$$\Delta pH = pH_{KCL} - pH_{H_2O} \quad (5.5)$$

Donde:

$\Delta pH > 0$ , indica que predomina la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio.

$\Delta pH < 0$ , indica que predomina la presencia de minerales de arcilla.

$$PZC = 2pH_{KCL} - pH_{H_2O} \quad (5.6)$$



a) Medida KCL y agua destilada



b) Medida KCL y agua lluvia

**Figura 5-13:** Medida del pH del suelo.

#### 5.4.4 Análisis químico del suelo

El análisis químico del suelo en estudio, consistió en determinar los elementos, Al, Ca, Mg, k, P y CICE en el laboratorio de Suelos, de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Los ensayos para determinar Ca, Mg y k se realizan según las especificaciones planteadas en la Norma Técnica Colombiana (NTC-5151, 2003) mediante el método de espectrometría de absorción atómica. Para determinar el elemento fósforo (P) se realiza mediante el método espectrofotométrico, a partir de la Norma Técnica Colombiana (NTC - 4981, 2001), para hallar la cantidad del elemento aluminio (Al) se utiliza la Norma Técnica Colombiana (NTC - 5263, 2017) mediante un método volumétrico y la CICE se realiza mediante la Norma Técnica Colombiana (NTC-5268, 2014) empleando acetato de amonio 1 N (1 M) y pH 7.0

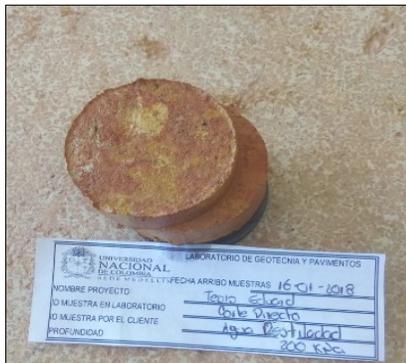
## 5.5 Caracterización mecánica

Para determinar las propiedades mecánicas del suelo, se ejecutaron ensayos de corte directo modalidad consolidado - drenado, consolidación duplo-edométrica, succión por el método del papel filtro y desagregación, los cuales se describen a continuación.

### 5.5.1 Corte directo modalidad consolidado drenado (CD)

La prueba de corte directo es utilizada para la determinación de las propiedades consolidadas de resistencia al drenaje de un suelo (cohesión aparente y ángulo de fricción), donde las rutas de drenaje a través de la muestra de prueba son lentas, permitiendo que el exceso de presión de poros se disipe (ASTM D3080M -11, 2011).

Para la ejecución del ensayo se utilizó el bloque de muestra inalterada siguiendo los lineamientos de la norma (ASTM D3080M -11, 2011), donde se tallaron las pastillas en la misma dirección que se encontraba la muestra en campo. Se realizaron dos ensayos para cada condición, agua destilada (Figura 5-14a), agua lluvia (Figura 5-14b) y con su humedad natural (Figura 5-15); cargadas mediante un esfuerzo normal de 60 kPa, 120 kPa y 200 kPa, a una velocidad durante la etapa de corte de 0.06 mm/min, sometidas las muestras inundadas, a saturación durante un tiempo estimado de 24 horas para lograr el mayor grado de saturación posible, y contar así con la condición más crítica, realizando dos repeticiones para cada ensayo.



a) Muestra fallada agua destilada

b) Muestra fallada agua lluvia

**Figura 5-14:** Muestras inundadas falladas por corte directo modalidad CD.



**Figura 5-15:** Muestra fallada con humedad natural por corte directo, modalidad CD.

### 5.5.2 Consolidación duplo-edométrica

Este ensayo es utilizado para representar las condiciones de magnitud y ritmo de consolidación de los materiales en campo, cuando estos son confinados lateralmente y drenados axialmente mientras se someten a incrementos controlados de carga vertical.

Este ensayo permite generar otros parámetros del suelo como el índice de colapso o expansión de las muestras, parámetro que se obtiene luego de realizar sobre la misma muestra, en dos cuerpos de prueba diferentes, ensayos en condiciones saturadas y sin saturar (ASTM D2435M-11, 2011).

El ensayo se realiza mediante tres repeticiones con el fin de verificar los resultados, siguiendo la norma (ASTM D2435M-11, 2011). Para cada ensayo se tomaron tres pastillas de prueba ejecutando el ensayo en condiciones saturadas, inundado con agua destilada (Figura 5-16a) y agua lluvia (Figura 5-16b), finalmente con su humedad natural (Figura 5-17a).

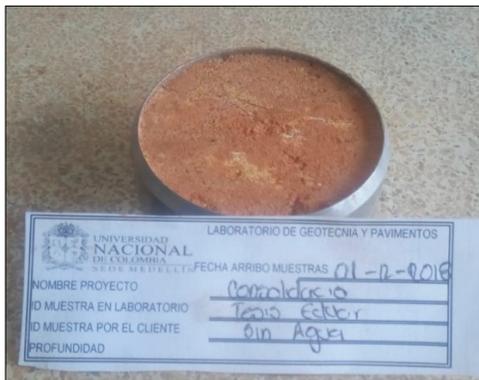


a) Muestra consolidada agua destilada



b) Muestra consolidada agua lluvia

**Figura 5-16:** Muestras consolidadas inundadas.



a) Muestra consolidada con humedad natural



b) Equipos de consolidación

**Figura 5-17:** Ensayo de consolidación .

A partir del ensayo duplo-edométrico se puede determinar el índice de colapso con el fin de encontrar las diferencias entre suelo saturado y sin saturar, así mismo se cuantificaron las diferencias al presentar una variación del fluido de saturación. Para medir el índice de colapso de las muestras estudiadas se utilizó la siguiente expresión propuesta por (Jennings & G Knight, 1957).

$$I_c = \frac{\Delta e_c}{\left[ 1 + \left( \frac{e_{nat}}{e_{0(nat)}} \right) x e_{0(medio)} \right]} \quad (5.7)$$

$$\Delta e_c = \left[ \left( \frac{e_{nat}}{e_{0(nat)}} \right) - \left( \frac{e_{inund}}{e_{0(inund)}} \right) \right] x e_{0(medio)} \quad (5.8)$$

$$e_{0(medio)} = \frac{(e_{0(nat)} + e_{0(inund)})}{2} \quad (5.9)$$

Donde:

$I_c$  = Índice de Colapso

$e_{nat}$  e  $e_{inund}$  = Índice de vacíos del suelo para una determinada tensión aplicada (Ensayo con humedad natural e inundado, respectivamente)

$e_{0(nat)}$  e  $e_{0(Inund)}$  = Índice de vacíos inicial del suelo para un ensayo con humedad natural e inundado respectivamente.

### 5.5.3 Succión método del papel filtro y balanza hidrostática

#### ▪ Succión método del papel filtro

La succión del suelo es una medida de la energía libre del agua de poro en un suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993). En términos prácticos es una medida de la afinidad del suelo para retener agua y puede proporcionar información sobre los parámetros del suelo que están influenciados por el agua en su interior; por ejemplo, cambio de volumen, deformación y características de resistencia del suelo (ASTM D5298-16, 2016).

La succión tiene dos componentes una matricial y otra osmótica, la primera hace referencia al componente de energía libre por el efecto de la tensión superficial en los poros del suelo, y la osmótica que es la componente de energía libre, se define como la presión a la que debe ser sometida el agua químicamente pura para que este en equilibrio a través de una membrana semipermeable con el agua del suelo, componente que depende de las sales disueltas en el agua del suelo (ASTM D5298-16, 2016). La succión total es la suma de la matricial y la osmótica.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (5.10)$$

Donde:

$\psi$  = Succión total

$(u_a - u_w)$  = Succión matricial

$u_a$  = Presión de aire en los poros

$u_w$  = Presión del agua en los poros

$\pi$  = Succión osmótica

El ensayo de succión por el método del papel filtro, esta normalizado por la (ASTM D5298-16, 2016), pero para la ejecución de la prueba se basó en la metodología propuesta por

(Marinho, 1994), donde se realiza el procedimiento obteniendo la curva de succión matricial y total con agua destilada y lluvia como se describe a continuación.

- Las pastillas fueron talladas de la muestra inalterada, presentando un diámetro de 45 mm y 20 mm de altura cada una.
- La succión en un suelo es dependiente de la humedad, se hace una proyección 1 con el porcentaje de humedad estableciendo un rango desde 4% hasta 64%, este último siendo la humedad de saturación.
- Como la humedad natural del suelo es 45%, las pastillas proyectadas a menor humedad se secaron a temperatura ambiente hasta alcanzar la humedad requerida, y las proyectadas a mayor humedad se les adiciona agua; para así cumplir con el rango de humedades proyectado.
- Una vez llevada las pastillas a la saturación deseada, se procede al montaje del ensayo (Figura 5-18), teniendo todos los cuidados pertinentes con el papel filtro Whatman N°42 (Guantes, pinzas) para que este no pierda o gane humedad higroscópica.



a) Papel filtro succión matricial



b) Papel filtro succión osmótica

**Figura 5-18:** Papel filtro para medir la succión.

- Para conservar la humedad la muestra se forra con papel film y papel aluminio para conservar la temperatura, dejándolas almacenadas por mínimo 15 días en una nevera de poliestireno expandido (Figura 5-19) para garantizar que el sistema se equilibre (Camapum de Carvalho, 2015).



**Figura 5-19:** Conservación de las muestras durante el equilibrio de humedad.

- Una vez pasado el tiempo de equilibrio se sacan las muestras y se pesa cada uno de los papeles filtros húmedos en una balanza de 0,0001 gramos de precisión (Figura 5-20); posteriormente los papeles filtros son colocados en un horno con una temperatura de 110° C por mínimo tres horas y se vuelven a pesar nuevamente.



a) Recipiente para ingresarlos al horno



b) Pasado del papel filtro

**Figura 5-20:** Procedimiento para el pesado del papel filtro

- Finalmente se conservan muy bien las muestras para realizar el ensayo de humedad natural y de balanza hidrostática.

La succión se determina mediante la calibración del papel filtro a partir de las ecuaciones propuestas por (Chandler & Gutierrez, 1986)

Para humedades del papel filtro  $w > 47\%$

$$Succión (kPa) = 10^{(6.05-2.48*\log w)} \quad (5.11)$$

Para humedades del papel filtro  $w \leq 47\%$

$$Succión (kPa) = 10^{(4.84-0.0622*w)} \quad (5.12)$$

Donde:

$w$  = Humedad del papel filtro en porcentaje

### ▪ **Balanza hidrostática**

Este ensayo es realizado con la finalidad de conocer la relación de vacíos del suelo, de forma precisa, donde junto con la humedad, se puede encontrar el grado de saturación del suelo, y así relacionarlo con la succión del suelo. El ensayo está regulado por la normalización española (UNE 103301-94, 1994), efectuando algunas variaciones que se describen a continuación.

Antes de iniciar el ensayo se debe conocer la densidad de la parafina, donde para determinarla, es necesario calentar la parafina hasta volverse líquida, para verterla en otro recipiente de volumen conocido y esperar a que la temperatura se estabilice y presente un estado sólido (Figura 5-21a). Este procedimiento se realiza para tres cuerpos con la finalidad de medir el volumen, pesarlos y con el promedio calcular la densidad de la parafina.

Una vez realizado el ensayo de succión se toma media pastilla para determinar el contenido de humedad (ASTM D2216-19, 2019) y con la otra mitad se efectúa la balanza hidrostática. Cada pastilla es pesada inicialmente, efectuando las medidas rápidamente para conservar la succión obtenida del ensayo por el método del papel filtro. Primero la parafina se calienta hasta que pase a un estado líquido y así poder cubrir las pastillas, con el objetivo de formar una capa impermeable para evitar el ingreso del agua cuando sea sometida a inmersión. Se deja enfriar hasta que la parafina se solidifique (Figura 5-21b) para ser pesadas nuevamente.



a) Cuerpo parafina para calcular su densidad



b) Pastillas cubiertas de parafina antes de inmersión en el agua

**Figura 5-21:** Preparación de la parafina y pastillas balanza hidrostática.

Con anticipación se debe montar el sistema para la balanza hidrostática que consiste en sumergir un recipiente en agua del acueducto con densidad conocida, que para el caso es una canasta metálica colgada de una balanza que se ha llevado a cero, de 0,1 gramos de precisión (Figura 5-22), para colocar cada pastilla en la canasta y pesarla sumergida, se mide la temperatura del agua para conocer exactamente su densidad. Para finalmente proceder con los cálculos.

**Figura 5-22:** Montaje ensayo de balanza hidrostática.

Cálculos:

$$m_{su} = E \quad (5.13)$$

$$E = \rho_w V_t \quad (5.14)$$

$$m_{su} = m_p - E \quad (5.15)$$

$$m_{su} = m_p - \rho_w V_t \quad (5.16)$$

$$V_t = V_s - V_p \quad (5.17)$$

$$V_t = \frac{m_p - m_{su}}{\rho_w} \quad (5.18)$$

$$V_s = V_t - V_p \quad (5.19)$$

$$V_s = \frac{m_p - m_{su}}{\rho_w} - \frac{m_p - m_s}{\rho_p} \quad (5.20)$$

Conociendo el volumen del suelo y la humedad de la muestra sumergida es posible encontrar la relación de vacíos para cada muestra:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_s(1+W_{nat})} \quad (5.21)$$

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 \quad (5.22)$$

Donde:

E = Empuje

$m_s$  = Masa del suelo

$m_{sp}$  = Masa del suelo mas parafina

$m_{su}$  = Masa del suelo mas parafina sumergida

$\rho_w$  = Densidad del agua

$\rho_p$  = Densidad de la parafina

$V_t$  = Volumen total

$V_s$  = Volumen del suelo

$V_p$  = Volumen de la parafina

$\rho_d$  = Densidad seca del suelo

$w_{nat}$  = Humedad del suelo

$G_s$  = Gravedad específica de los sólidos

e = Relación de vacíos

### 5.5.4 Desagregación

Es un ensayo cualitativo que tiene como finalidad comprobar la estabilidad de una muestra de alta calidad. Para su ejecución es necesario tallar dos muestras cúbicas de 60 mm de lado, las cuales son sometidas a inmersión total y parcial en agua destilada por intervalos de tiempo verificando visualmente la estructura de la muestra. La estabilidad o desintegración de la muestra está relacionada con la erodabilidad del material (Camapum de Carvalho, Martines, Moreira, & Da Silva, 2006).



## 6. Resultados, análisis y discusión

Este capítulo presenta cada uno de los resultados de los ensayos de laboratorio descritos en el capítulo anterior, teniendo presente los dos tipos de agua (destilada y lluvia). Inicialmente se muestran las características de las aguas, y posteriormente se presenta las condiciones del suelo, desde su clasificación física y mineralógica hasta la caracterización mecánica, realizando comparaciones entre los resultados, con el fin de determinar el efecto que tiene el agua destilada y agua lluvia en los resultados de cada ensayo de laboratorio.

### 6.1 Características de las aguas

#### 6.1.1 Mineralogía

Como se indicó en el numeral 5.2.1 y 5.2.2 los procedimientos fueron basados en *Standard Methods of Water and Wastewater 22<sup>TH</sup>*, los valores se determinaron una vez era recolectada el agua destilada y el agua lluvia para tener las menores alteraciones posibles, la Tabla 6-1 muestra el resumen de los resultados y la variación para cada uno de los ensayos.

**Tabla 6-1:** Resultados mineralogía agua destilada y agua lluvia

Parámetro	Agua Destilada	Agua Lluvia
Cloruros (mg/L Cl <sup>-</sup> )	1.90	2.10
Alcalinidad Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	2.00	0.00
Conductividad (μS/cm)	4.42	34.10
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	2.00	3.00
Dureza Cálcica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	1.00	1.00
Sulfatos (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0.51	1.41
Sólidos Totales Disueltos (ppm)	2.83	21.8

Para el caso de conductividad, hay una diferencia notable de casi 8 veces por encima del agua lluvia, respecto al agua destilada. Esta diferencia obedece a que el agua lluvia presenta mayor cantidad de sólidos totales disueltos(STD), permitiendo una corriente eléctrica mayor, que se da a través de los iones disueltos positivos y negativos según la

concentración de sales presentes en el agua. Los iones más positivos son sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), y los iones más negativos son cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) (California Environmental Protection Agency, 2013).

El agua lluvia por presentar mayor conductividad eléctrica, genera entonces, mayores sólidos disueltos, obteniendo mayor concentración de sales y así mismo succiones osmóticas menores (Sánchez, Ortega, Can, Galicia, & Camacho, 2019). A su vez, estas sales producen mayores floculaciones en la región de los macroporos reflejando finalmente mayor índice de vacíos en el suelo, con posteriores implicaciones en algunas respuestas mecánicas (Mitchell J. , 1993). De igual forma, el paso a una estructura floculada por cambios en el pH, se puede inferir del resultado del pH del agua lluvia con relación al PZC.

A su vez, el agua lluvia compuesta generalmente de cationes de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y ácidos que liberan  $\text{H}^+$  (Bragado, 2017), generan rechazo de los iones positivos adsorbidos hacia las cargadas negativas de las partículas de arcilla, produciendo la floculación (López F, 2000).

### 6.1.2 Medida del pH

Este ensayo se realiza con el objetivo de conocer el grado de acidez o de alcalinidad para cada una de las aguas. La escala del pH varía de 0 a 14 Figura 6-1 donde todo pH menor que 7.0 (0.0 a 6.9) se considera ácido y todo pH mayor que 7.0 (7.1 a 14.0) es considerado alcalino. La escala de pH es logarítmica por lo que cada cambio de la unidad del pH en realidad representa un cambio de diez veces en la acidez (Ann, Choi, & Douglas, 2018).



**Figura 6-1:** Escala del pH. (Ann, Choi, & Douglas, 2018)

Según los resultados del pH para cada una de las aguas Tabla 6-2 y basados en la escala del pH Figura 6-1, el agua destilada es ligeramente ácida a neutra y el agua lluvia de la zona de estudio es casi 20 veces más ácida considerándose moderadamente ácida .

**Tabla 6-2:** Resultados pH aguas

Tipo de Agua	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	Promedio
Agua Destilada	6.19	6.3	6.58	6.38	6.36
Agua Lluvia	4.42	4.37	4.32	4.33	4.36

Los resultados de la Tabla 6-1 y Tabla 6-2 coinciden en que la acidez del agua lluvia esta por el orden de 2 unidades mayor respecto a la del agua destilada, así mismo, la alcalinidad del agua destilada corrobora esta condición al encontrarse 2 unidades por encima respecto al agua lluvia. Por tanto, el agua lluvia al presentar mayor acidez, libera H<sup>+</sup> (Bragado, 2017), generando como se mencionó anteriormente, rechazo de los iones positivos adsorbido hacia las cargadas negativas de las partículas de arcilla, produciendo la floculación (López F, 2000).

### 6.1.3 Tensión superficial

El ensayo se realizó basado en la metodología de (Du Nouy, 1979) a temperatura ambiente de 25° C para el agua destilada y el agua lluvia, los resultados se muestran en la Tabla 6-3, donde se puede observar una pequeña variación (aproximadamente del 3%) entre las tensiones superficiales de ambas muestras de agua, presentando mayor tensión superficial el agua lluvia; variaciones que por pequeñas se pueden atribuir a la ejecución del ensayo.

**Tabla 6-3:** Resultados Tensión Superficial.

Tipo de Agua	Tensión Superficial (Dinas/cm)	Temperatura (°C)
Destilada	71.55	25
Lluvia	73.70	25

## 6.2 Caracterización física

### 6.2.1 Humedad natural

El ensayo se realiza con la finalidad de obtener el contenido de humedad del suelo en su estado natural, siguiendo el procedimiento de la norma (ASTM D2216-19, 2019). La humedad natural del suelo se determinó el mismo día de la exploración en campo para las muestras alteradas y para la de alta calidad (bloque) antes de someterse a cada uno de los ensayos con agua destilada y agua lluvia.

**Tabla 6-4:** Contenido de Humedad Natural.

Muestra	Humedad 1 (%)	Humedad 2 (%)	Humedad 3 (%)	Promedio (%)
Alterada	44.46	46.42	45.13	45.34
En bloque	58.31	57.05	57.28	57.55

### 6.2.2 Gravedad específica

El ensayo de gravedad específica de los sólidos se ejecuta según la norma (ASTM D854-14, 2014). Se realizan cuatro pruebas para cada tipo de agua, con medias diferentes

(Anexo 1); donde, el agua lluvia presenta menores gravedades específicas, condición que puede deberse a la presencia del calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y la acidez del agua lluvia que libera  $\text{H}^+$  (Bragado, 2017), generando como ya fue mencionado, floculación de las partículas (López F, 2000). Dicha floculación deja mayores espacios entre partículas, con consecuente disminución de la gravedad específica de los sólidos.

**Tabla 6-5:** Resultados Gravedad específica.

Tipo de Agua	Gravedad específica 1	Gravedad específica 2	Gravedad específica 3	Gravedad específica 4	Promedio
Destilada	2.86	2.83	2.84	2.82	2.84
Lluvia	2.76	2.73	2.74	2.75	2.75

Según los minerales obtenidos en el ensayo de difracción de rayos X (Figura 6-6) y las proporciones de los mismos, los resultados de la gravedad específica se encuentran dentro del rango (Tabla 6-6) de las gravedades específicas de los minerales existentes en el suelo.

**Tabla 6-6:** Gravedad específica de minerales. (Lambe & Whitman, 1969)

Mineral	Gravedad específica
Cuarzo	2.65
Feldespató (K)	2.54 – 2.57
Feldespató (Na – Ca)	2.62 – 2.76
Calcita	2.72
Dolomita	2.85
Moscovita	2.70 – 3.20
Biotita	2.80 – 3.20
Clorita	2.60 – 2.90
Caolinita	2.62 – 2.66
Ilita	2.60 – 2.86
Montmorillonita	2.75 – 2.78

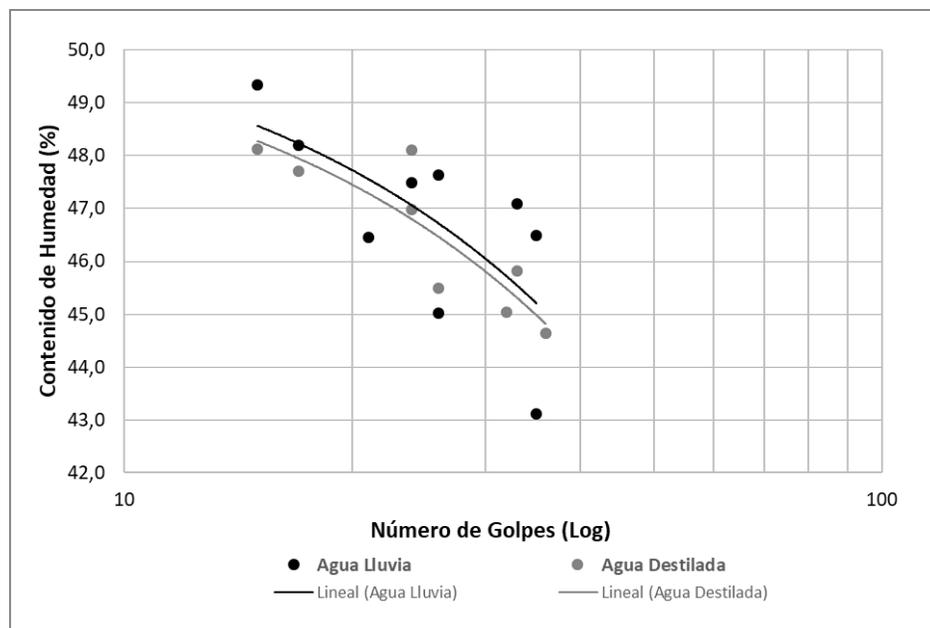
### 6.2.3 Límites de Atterberg

Según las características físicas que presenta la muestra, y con la granulometría por tamizado, se verifica que más del 50% del material es pasado por la malla No. 200, ratificando que es un suelo fino granular obligando a realizar los límites de Atterberg para tener la clasificación completa del suelo que se está trabajando. El ensayo es realizado según la norma (ASTM D4318-17e1, 2017) con agua destilada y agua lluvia obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 6-7 y Figura 6-2.

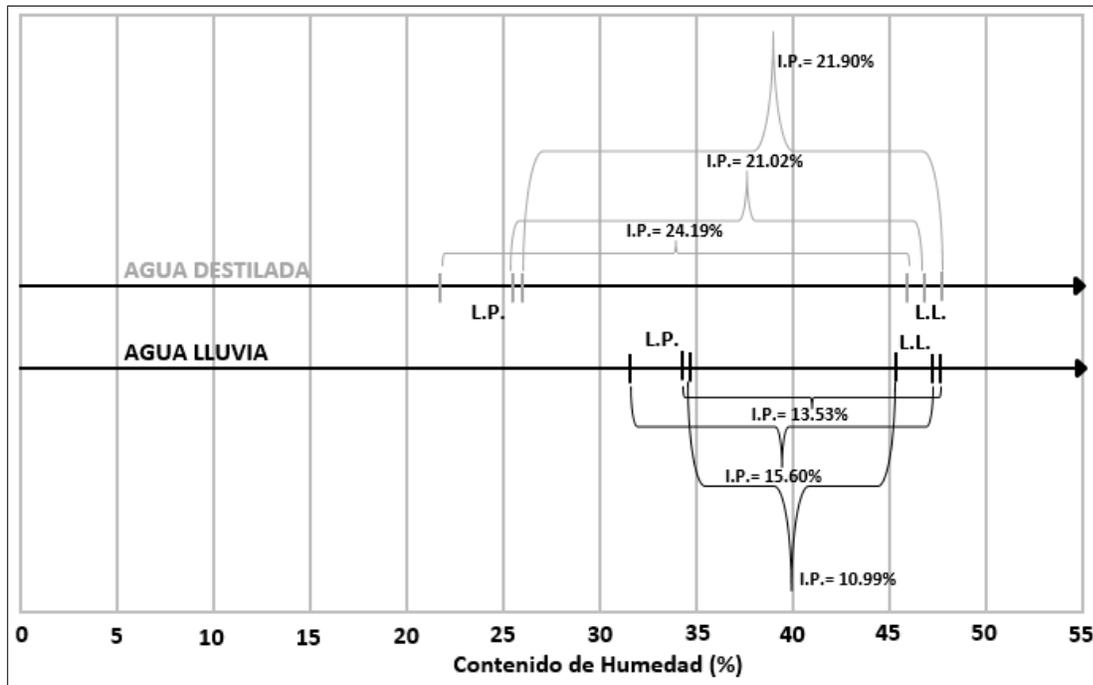
**Tabla 6-7:** Resultados Límites de Atterberg.

Parámetro	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	Destilada	Lluvia	Destilada	Lluvia	Destilada	Lluvia
Límite Líquido	46.17	47.85	46.78	47.57	48.02	45.40
Límite Plástico	21.98	34.32	25.77	31.97	26.15	34.71
Índice Plástico	24.19	13.53	21.02	15.60	21.90	10.99

Para el límite líquido Tabla 6-7, los resultados tanto con agua lluvia como con agua destilada son muy similares, las variaciones que se presentaron podrían estar dentro del rango de variación de la ejecución del ensayo (Anexo 1).

**Figura 6-2:** Curva de fluidez del suelo.

La Figura 6-2 muestra que la línea de fluidez con agua lluvia se encuentra por encima de la línea de fluidez del agua destilada, situación que obedece a que el ensayo se realiza en una condición de saturación donde el material no presenta ningún tipo de estructura, actuando la succión osmótica en la resistencia del suelo; presentando mayor influencia por tanto, con el agua lluvia, debido a la acidez, a la conductividad eléctrica y las sales que intervienen en la química del agua, permitiendo aglomeraciones, generando menores áreas superficiales y en función a ello, menor índice de plasticidad Figura 6-3 (Edafología, 2020). Condición que también fue estudiada y corroborada por Maines (2007).

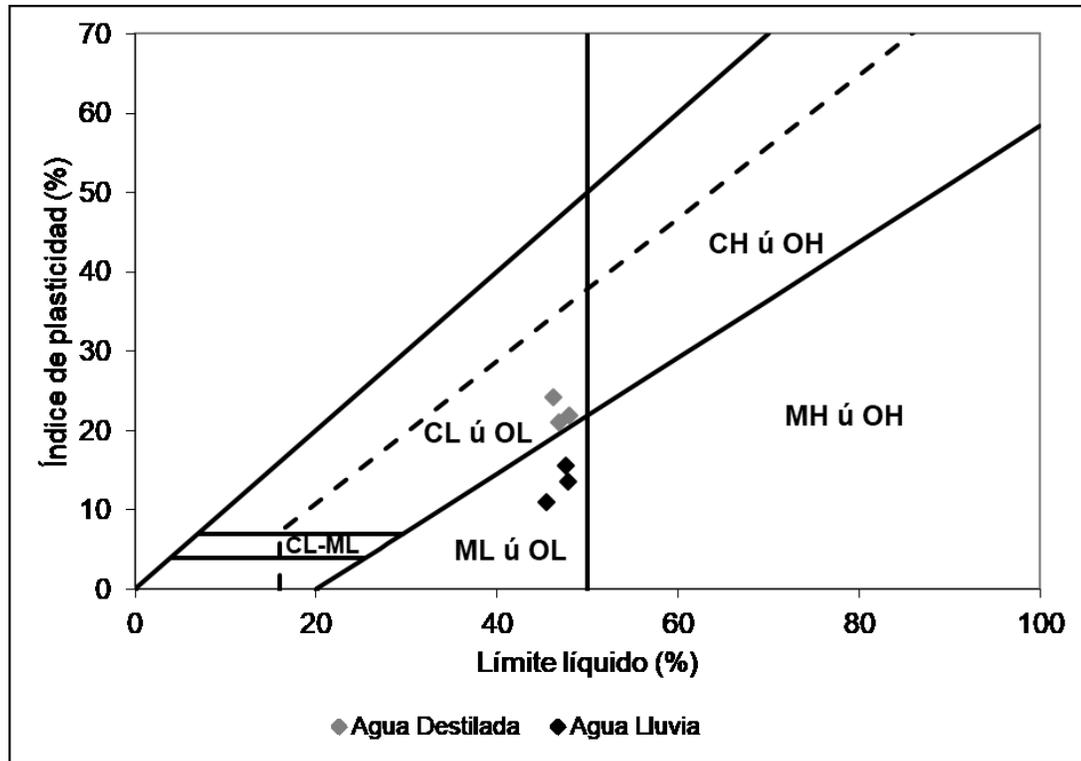


**Figura 6-3:** Límites de consistencia con agua destilada y lluvia.

La Figura 6-3, muestra adicionalmente, que hay una variación importante en los límites de consistencia, destacándose una disminución del índice de plasticidad con agua lluvia respecto a la del agua destilada en un 11%. Esta disminución afecta directamente la clasificación de la muestra con agua lluvia, disminuyendo el rango en que el material presenta un comportamiento plástico. Situación que se debe, como se mencionó anteriormente, a la mayor acidez del agua lluvia en relación con el agua destilada, y por ende a la mayor presencia del calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y  $\text{H}^+$  liberados (Bragado, 2017); lo cual genera rechazo de los iones positivos adsorbidos hacia las cargadas negativas de las partículas de arcilla, produciendo floculación (López F, 2000).

#### 6.2.4 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S)

Una vez obtenidos los resultados de los Límites de Atterberg se procede a clasificar el material por la carta de plasticidad de Casagrande Figura 6-4, presentando diferente clasificación para el ensayo realizado con agua destilada y con agua lluvia, pasando de clasificar de material arcilloso a limoso respectivamente como se observa en la Tabla 6-8.



**Figura 6-4:** Carta de plasticidad de Casagrande. (ASTM D2487-17, 2017)

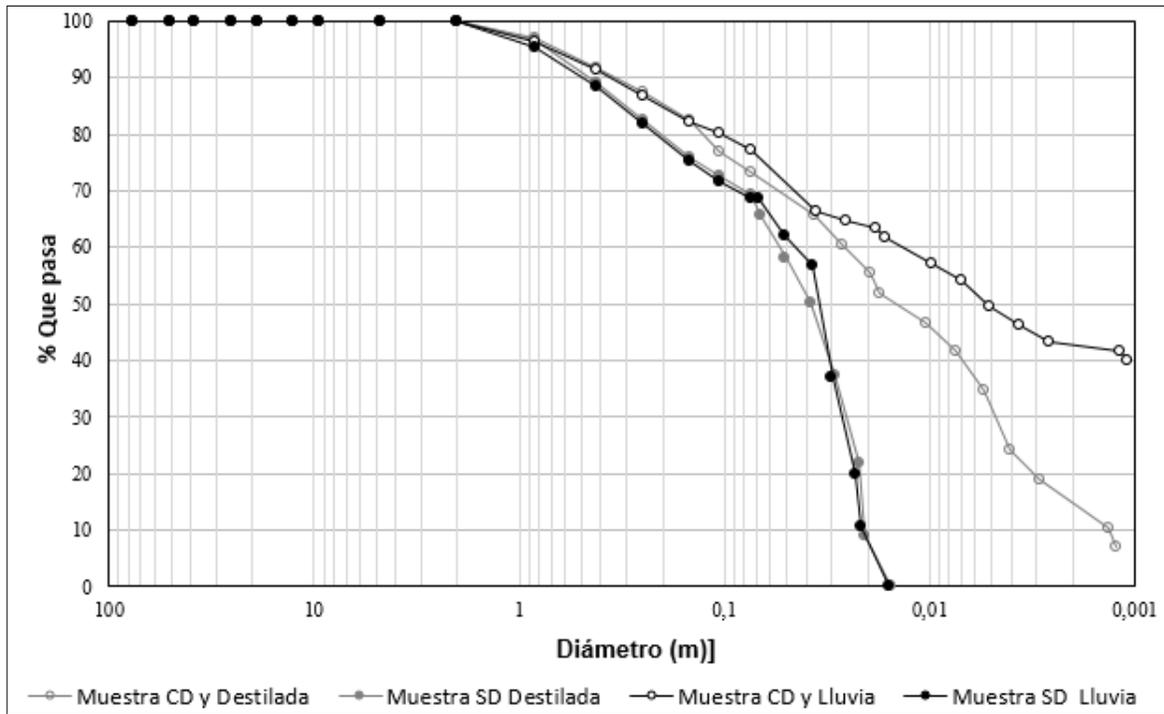
Si bien al efectuar los ensayos de granulometría se estima un alto porcentaje de partículas de tamaño de arcilla, la proporción de limo y de arena es bastante considerable, hecho corroborado con los análisis de DRX (alto porcentaje de cuarzo y moscovita). Por tanto, la clasificación (S.U.C.S) con agua destilada se acerca mucho más a lo obtenido en el ensayo MCT y granulometría con agua lluvia.

**Tabla 6-8:** Clasificación Casagrande.

Tipo de Agua	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Destilada	CL	CL	CL
Lluvia	ML	ML	ML

### 6.2.5 Granulometría por hidrómetro

Como se indicó en el numeral 5.3.5 el ensayo fue realizado de forma combinada granulometría por tamizado (ASTM C136/C136M-14, 2014) y por hidrómetro (ASTM D7928-17, 2017), para medir las partículas grueso granulares y fino granulares. El ensayo por hidrómetro se realizó en 4 condiciones, con defloculante y sin este, disueltos en agua destilada y en agua lluvia.



**Figura 6-5:** Curvas granulométricas

Para identificar el porcentaje de limos y arcillas en la muestra, se tomaron tamaños de partículas entre 0.074 mm y 0.0029 mm para los limos y tamaños menores a 0.0029 mm para las arcillas.

**Tabla 6-9:** Porcentaje de material CD, SD con agua destilada y lluvia .

Material	Agua Destilada		Agua Lluvia	
	CD	SD	CD	SD
% Arena	26.85	30.84	22.76	31.35
% Limo	54.13	60.13	34.19	58.16
% Arcilla	19.02	9.03	43.06	10.50

En la prueba del hidrómetro las partículas menores a 0.074 mm presentan diferencias entre las muestras SD y CD, el agente defloculante genera una mayor desagregación en las partículas, condición que se asemeja en la realidad a exponer el suelo a un agua residual, mostrando mayor contenido de material fino que en el ensayo realizado sin el agente dispersante. Adicionalmente, también se observa una variación entre las dos muestras ensayadas con defloculante, donde la del agua lluvia obtiene una desagregación mayor respecto a la del agua destilada, debido a que el agua lluvia en presencia de Na<sup>+</sup> como el hexametáfosfato de sodio del defloculante (Bragado, 2017), en contacto con el suelo

genera una dispersión fuerte de las partículas (Lenntech, 1998), obteniéndose una cantidad superior de tamaño arcilla del 24% Tabla 6-9.

### 6.2.6 Miniatura compactada tropical (M.C.T)

El ensayo se realiza mediante la metodología (Nogami & Villibor, 1995), ejecutando tres pruebas por cada tipo de agua. Los resultados clasifican los suelos dentro del grupo N, suelos de comportamiento no laterítico ubicados superficialmente.

El ensayo ejecutado con agua destilada clasifica el suelo como NA'/NS' y en agua lluvia como NS'-NA', correspondientes respectivamente a arenas limosas, arenas arcillosas y limos caoliníticos micáceos, originado de rocas ricas en cuarzo, tales como granitos, neis y areniscas; y a arenas limosas y arenas arcillosas, resultante del intemperismo tropical de rocas metamórficas y volcánicas, de constitución predominante de feldespatos, micas y cuarzos. No obstante, la clasificación con agua lluvia es la más acertada debido a que según los ensayos de límites de consistencia y de granulometría el mayor porcentaje de material pasa el tamiz número 200 clasificándolo como un suelo fino granular.

La Tabla 6-10 muestra los resultados de las muestras analizadas utilizando agua destilada y agua lluvia.

**Tabla 6-10:** Resultados miniatura compactada tropical rápida.

Tipo de Agua	Contracción Promedio (mm)	C' (mm)	Penetración Promedio (mm)	Clasificación MCT Rápida
Destilada	0.35	0.61	4.0	NA'/NS'
Lluvia	0.29	0.52	4.0	NS'-NA'

En la Tabla 6-10 se observa como la contracción diametral de la muestra ejecutada con agua destilada es un 2% mayor a la contracción medida del agua lluvia, condición que puede deberse al mismo procedimiento del ensayo, ya que las medias son muy similares (Anexo 1).

A continuación, se presenta un resumen con los resultados con agua destilada y agua lluvia sobre las propiedades físicas del material ya analizadas.

**Tabla 6-11:** Propiedades físicas de las muestras analizadas.

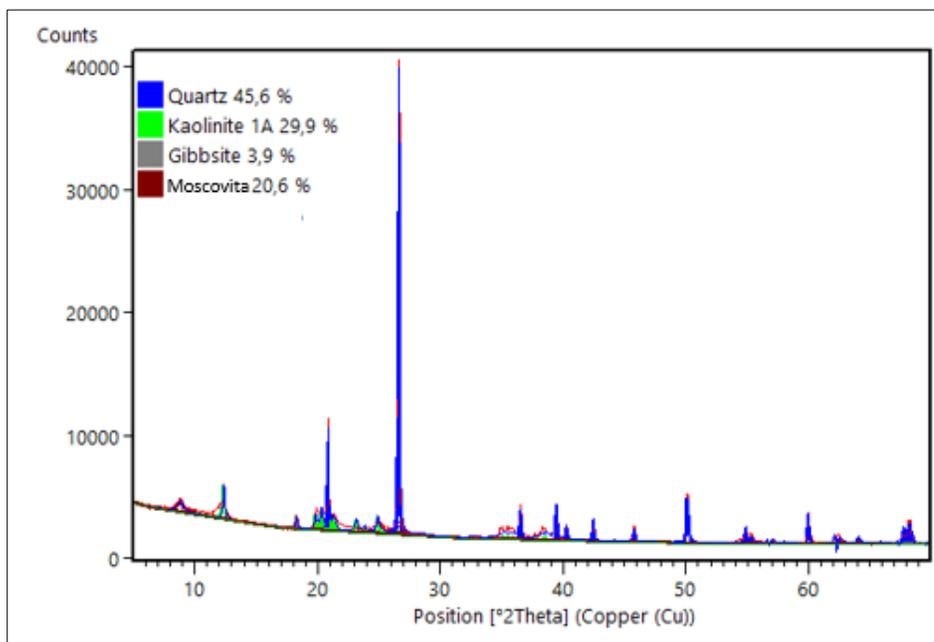
Propiedad	Agua destilada	Agua lluvia
Límite Líquido, LL (%)	46.99	46.94
Límite plástico, LP (%)	24.63	33.67
Índice de plasticidad, IP (%)	22.36	13.27
Contenido de Finos (% pasa tamiz No 200)	73.15	77.25
Clasificación fracción fina USCS	CL	ML

Propiedad	Agua destilada	Agua lluvia
Clasificación MCT	NA'/NS'	NS'-NA'
Gravedad específica, Gs	2.84	2.75
Porosidad, n (%)	61	62
Relación de Vacíos, e	1.56	1.65

## 6.3 Caracterización mineralógica y estructural

### 6.3.1 Difracción de rayos X

Para caracterizar adecuadamente un suelo residual, es importante determinar su composición química, así como su mineralogía; por tanto, el ensayo de difracción de rayos X se torna relevante, ya que permite conocer los minerales presentes en el suelo estudiado.



**Figura 6-6:** Espectro difracción de rayos X

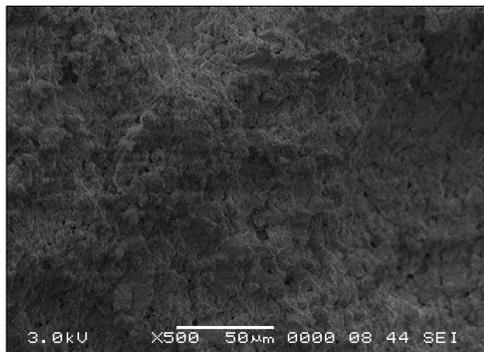
Como se puede observar en el espectro de la Figura 6-6 y partiendo de un análisis semicuantitativo, la muestra está compuesta por cuatro minerales principales como el Cuarzo, Caolinita, Moscovita y una pequeña proporción de Gibbsite. Debido a que el material presenta bajo contenido de Gibbsite clasifica como no laterítico, resultado que es congruente con la clasificación MCT en agua lluvia y con la clasificación S.U.C.S realizada con agua destilada.

La caolinita en el suelo está influenciada por las variaciones del pH y las sales del medio, permitiendo entonces que a menor pH originado por el agua lluvia se produzcan menores capacidades de intercambio catiónico. (Edafología, 2020)

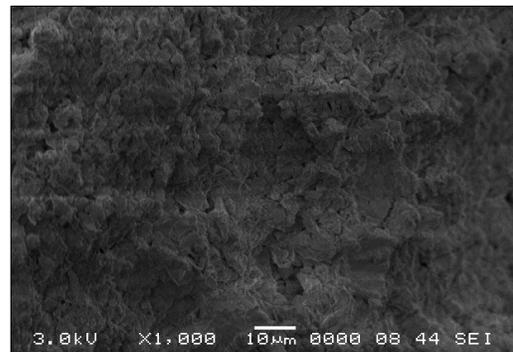
La composición encontrada en el ensayo de difracción de rayos X concuerda con la composición general de un miembro derivado de rocas volcánicas ígneas.

### 6.3.2 Microscopía electrónica de barrido (Scanning electron microscopy)

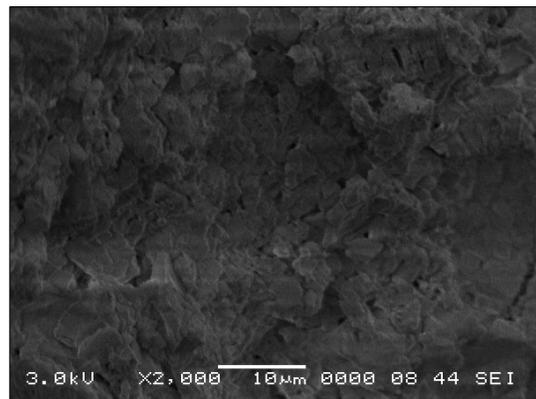
Para tener una visualización mejor detallada de la estructura y microestructura del material, se realiza una prueba con el microscopio electrónico de barrido (SEM) para la muestra de suelo a diferentes niveles de aumento.



a) SEM a 500X



b) SEM a 1000X



c) SEM a 2000X

**Figura 6-7:** Imágenes de la muestra a diferentes niveles de aumento

A pesar de que el material presenta algunas aglomeraciones generadas por las caolinitas con los cuarzos (o moscovitas), en la Figura 6-7 no se evidencia una estructura relevante de macro y microporos, en cambio sí se observa una estructura homogénea debida a la poca meteorización que ha sufrido el suelo (no laterítico).

Las pocas agregaciones confirman los resultados expuestos en la caracterización física y mineralógica permitiendo corroborar que el material se clasifica como un suelo residual joven derivado de rocas volcánicas ígneas.

## 6.4 Caracterización química del suelo

### 6.4.1 Medida del pH

El ensayo de pH es utilizado para determinar el grado de meteorización del suelo, calculando la diferencia entre la medida en H<sub>2</sub>O y KCl; con agua destilada el resultado es negativo indicando que predominan los arcillominerales, Tabla **6-12**. Estos resultados son congruentes con la clasificación S.U.C.S; pero en el caso de usar agua lluvia difieren con la clasificación MCT y con el ensayo DRX, por lo tanto, el resultado de pH con agua destilada es el único que concuerda con los anteriores ensayos, indicando entonces que el ensayo de pH del suelo no es recomendable ejecutarlo con agua lluvia.

El punto de carga cero (PZC) es el valor del pH del suelo en el que la magnitud de las cargas superficiales variables no presenta cambios, debido a las variaciones en la concentración iónica de la solución del suelo. Esta propiedad no solo presenta influencia en los fenómenos electroquímicos que ocurren en el suelo, sino también en el grado de floculación (Lavorenti & Alves, 2005). Las partículas tienden a flocular en medios más ácidos o próximos al PZC y tienden a dispersar en medios más alcalinos que el PZC.

**Tabla 6-12:** Resultados medida pH del Suelo.

Tipo de Agua	pH en KCl	pH en H <sub>2</sub> O	Δ pH	PZC	Carga Neta
Destilada	3.79	4.07	-0.28	3.50	0.57
Lluvia	3.79	3.65	0.14	3.92	-0.27

Como se observa en la Tabla **6-12**, el pH en agua destilada se encuentra cercano al PZC, permitiendo que el material flocule, situación similar al pH con agua lluvia, pero este último con una mayor aproximación PZC del material, permitiendo una mayor floculación.

De la Tabla **6-12** también se puede observar que si el suelo entra en contacto con el agua lluvia, el pH disminuye, y al bajar el pH se producen mayores sales, conductividades eléctricas, floculaciones y disminuye la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Mitchell J. , 1993). A su vez, la mayor floculación también se le puede atribuir al hecho de que por el agua lluvia contener más cationes de calcio (Ca<sup>+2</sup>) y ácidos que liberan H<sup>+</sup> (Bragado, 2017), se genera rechazo de los iones positivos adsorbido hacia las cargadas negativas de las partículas de arcilla, produciendo la floculación (López F, 2000).

## 6.4.2 Análisis químico del suelo

La Tabla 6-13 relaciona los resultados obtenidos a partir del análisis químico de la muestra.

**Tabla 6-13:** Composición química de la muestra.

Propiedad	Composición
M.O (%)	0.05
CICE	2.5
Al (meq/100 g suelo)	2.20
Ca (meq/100 g suelo)	0.13
Mg (meq/100 g suelo)	0.05
K (meq/100 g suelo)	0.13
P (ppm)	2

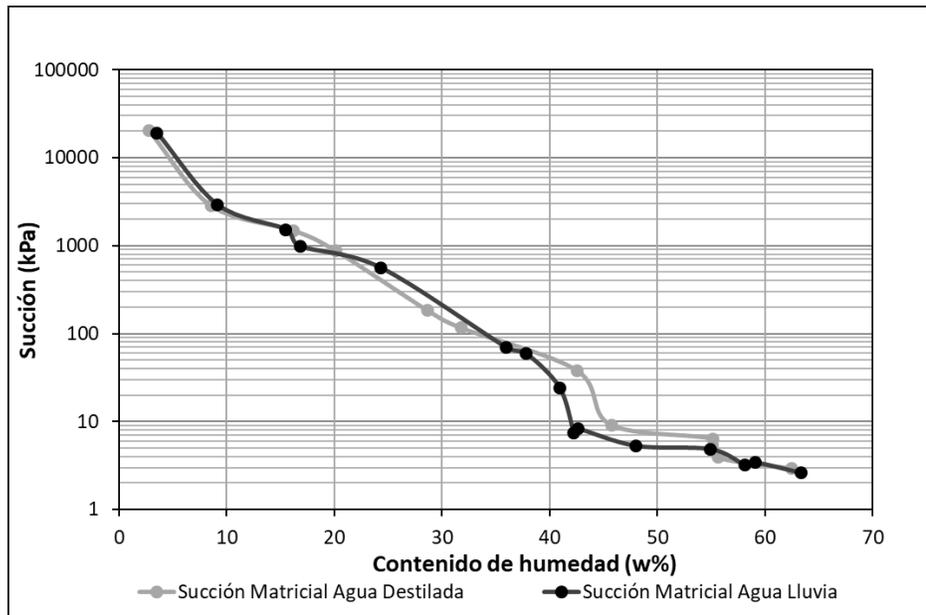
Los resultados comparados con la tabla de interpretación de análisis de suelos de (Molina & Meléndez, 2002), concluye que la concentración de elementos analizados para el suelo en la zona de estudio es baja.

En relación a la capacidad de intercambio catiónico del suelo, se acerca al rango comprendido para la caolinita Tabla 3-1, a su vez, el suelo al entrar en contacto con el agua lluvia, por presentar menor pH, aumenta la acidez, disminuye su capacidad de intercambio catiónico y por ende el índice de plasticidad (Edafología, 2020). Así mismo, el agua lluvia al contener cationes de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y ácidos que liberan  $\text{H}^+$  (Bragado, 2017), generan rechazo de los iones positivos adsorbido hacia las cargadas negativas de las partículas de arcilla, causando la floculación (López F, 2000).

## 6.5 Caracterización mecánica

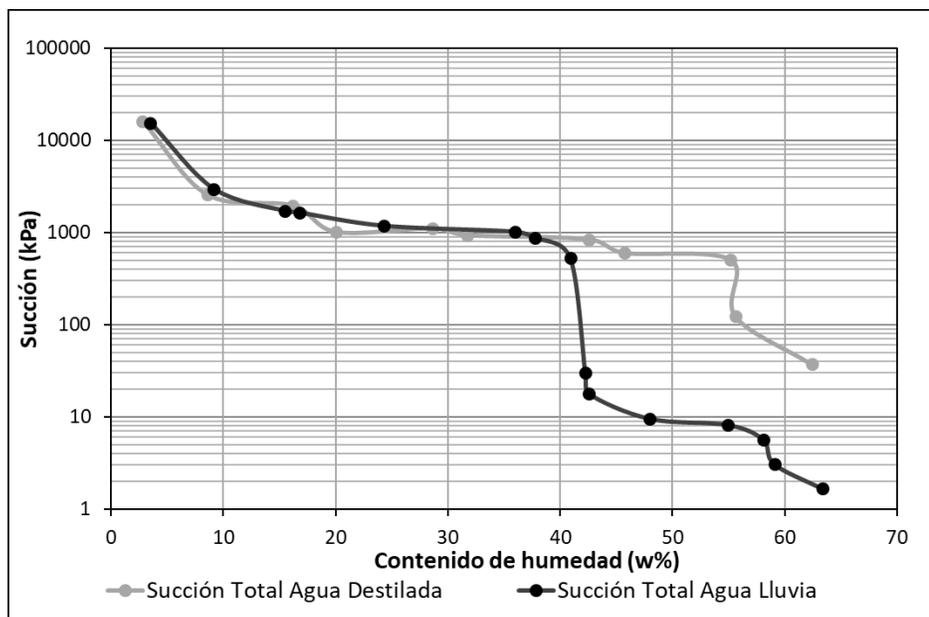
### 6.5.1 Succión método del papel filtro

El ensayo como se especifica en el numeral 5.5.3 se realiza bajo la norma (ASTM D5298-16, 2016) y a su vez siguiendo la metodología de (Marinho, 1994) con agua destilada y con agua lluvia. Se busca mediante la metodología mencionada determinar para cada muestra su contenido de humedad ( $w$ ) y su respectiva succión.



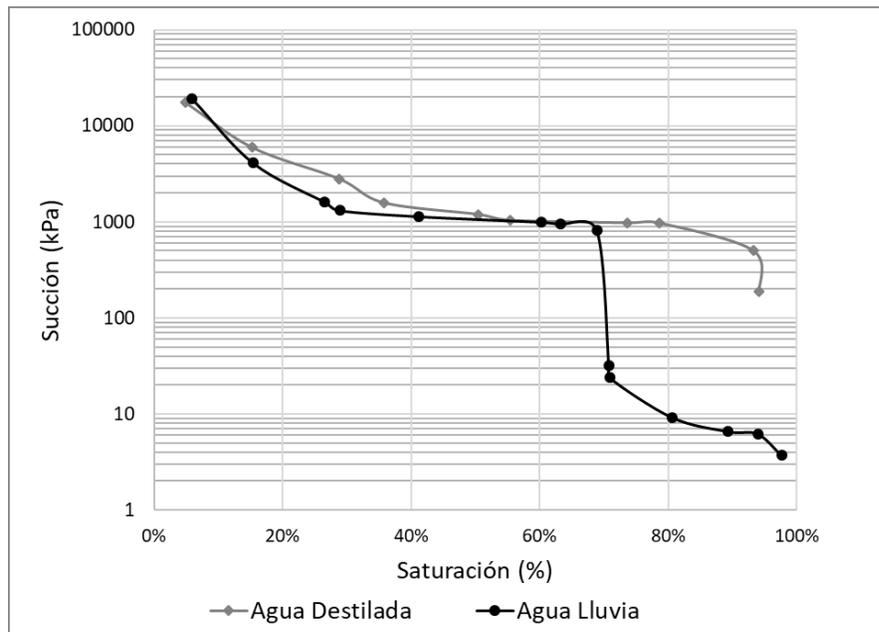
**Figura 6-8:** Curva característica succión Matricial

En la Figura 6-8 se observa que las curvas tienen un comportamiento suavizado que indica una distribución homogénea en el tamaño de los poros del suelo, que es corroborado con la microscopía electrónica de barrido y la clasificación física del suelo joven. A su vez, se presenta una pequeña diferencia en la succión matricial debido a que en agua lluvia se obtuvo un mayor índice de vacíos. La diferencia de agua circundante en la muestra, se visualiza en el caso de la succión osmótica.



**Figura 6-9:** Curva característica succión Total

La succión osmótica se da por diferencias químicas en el suelo, y está directamente relacionada con la composición del agua (Figura 6-9). Comportamiento que se evidencia en los resultados de la curva de fluidez, (Figura 6-2), debido a que para el ensayo, la muestra se encuentra en una condición de alteración y no presenta arreglos estructurales definidos donde puedan existir influencias matriciales; por tanto, las acciones serán netamente químicas.



**Figura 6-10:** Curvas de succión total con grado de saturación

Si se hace una comparación entre las curvas de succión total en términos de saturación (Figura 6-10), en donde se tiene en cuenta la incorporación del índice de vacíos, es evidente que se presenta una diferencia notable principalmente en la región de los macroporos, donde la succión osmótica disminuye con el agua lluvia debido a que interviene la conductividad eléctrica, las sales y el calcio, generando floculación y mayor porosidad en el suelo (Sánchez, Ortega, Can, Galicia, & Camacho, 2019) causando entonces menores succiones.

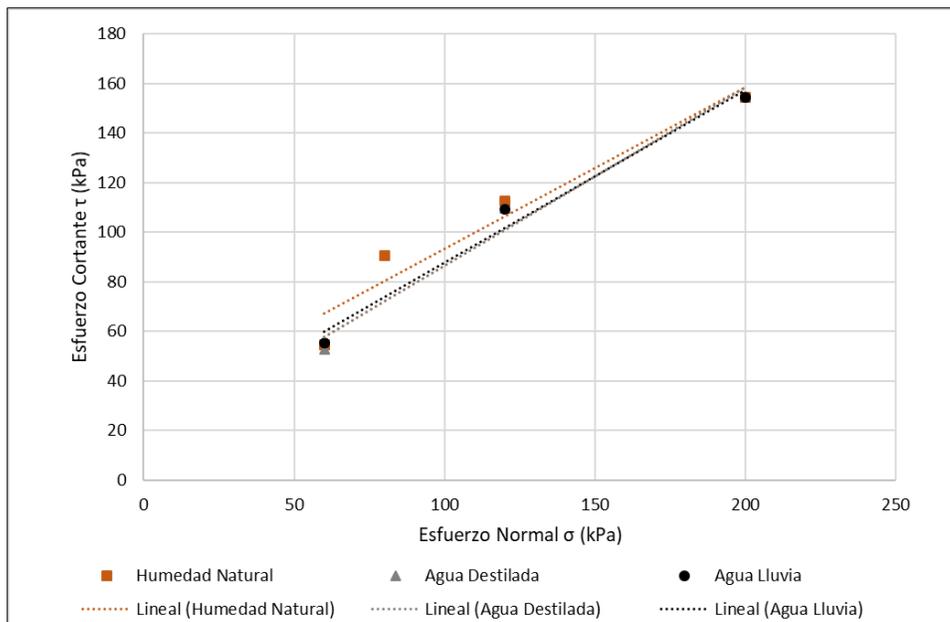
### 6.5.2 Corte directo modalidad consolidado drenado(CD)

Los ensayos fueron realizados en estado natural e inundados con agua destilada y agua lluvia siguiendo el procedimiento de la norma (ASTM D3080M -11, 2011). Para las muestras inundadas a pesar de que fueron sumergidas en agua en la cámara del equipo de corte durante 24 horas antes de la etapa de consolidación, se alcanzó una saturación promedio de 89%, considerando que, para lograr una saturación mayor para una muestra, es indispensable utilizar contrapresión de agua como se logra en el ensayo triaxial.

La Figura 6-11 muestra los resultados de la resistencia a la cortante de los especímenes para cada condición ensayada, en el cual es evidente que la muestra fallada con la humedad natural presenta mayor resistencia respecto a las inundadas. Estas últimas con una resistencia al corte muy similar, sin atribuirle algún efecto a la composición química del agua (Anexo 2).

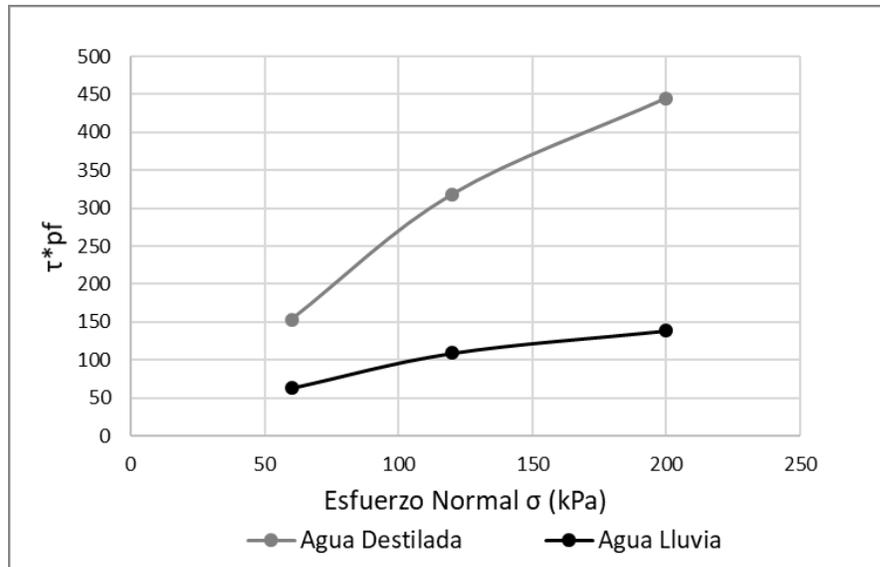
**Tabla 6-14:** Parámetros de resistencia del suelo para condición ensayada.

Condición	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Humedad Natural	28.0	33.0
Agua Destilada	14.5	36.0
Agua Lluvia	18.0	35.0



**Figura 6-11:** Ensayo de corte modalidad consolidado drenado.

Con el objetivo de verificar el efecto de la succión en la resistencia al corte de los materiales, se presenta a continuación la transformación de la resistencia al corte por la influencia de dicho parámetro, graficando el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) multiplicado por la succión matricial en pF, con relación al esfuerzo normal ( $\sigma$ ).

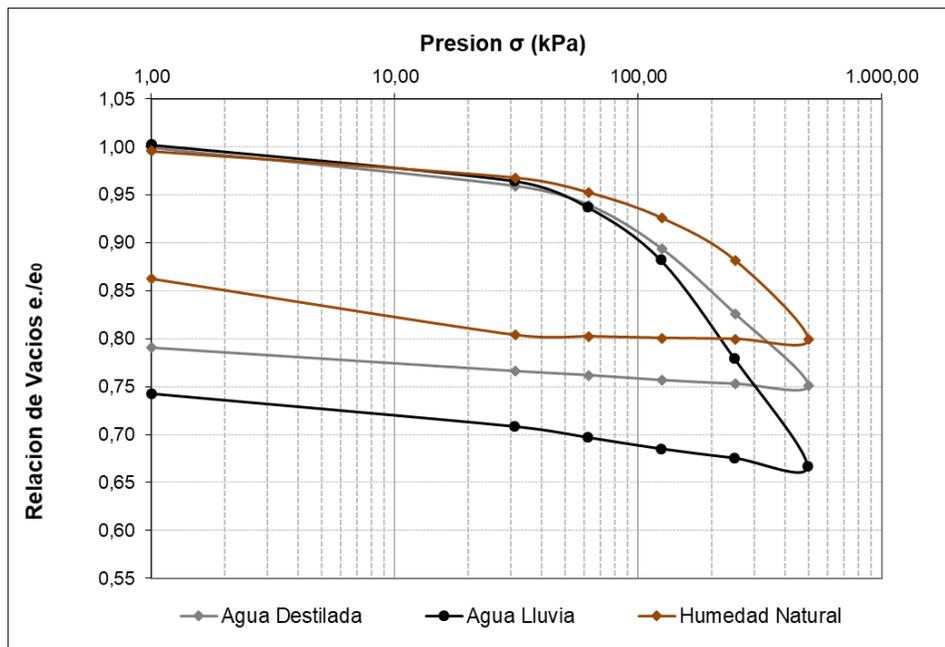


**Figura 6-12:** Relación  $\tau \cdot p_f$  Vs Esfuerzo Normal ( $\sigma$ )

En la Figura 6-12 se evidencia que al multiplicar el cortante ( $\tau$ ) por la succión ( $p_f$ ), se observa una notable diferencia, mostrando mayores resistencias (afectadas por la succión) en el ensayo con agua destilada, que pueden atribuirse a la mayor porosidad que presenta el suelo en agua lluvia.

### 6.5.3 Consolidación duplo edométrico

El ensayo se realizó según las norma (ASTM D2435M-11, 2011) evaluando las dos muestras en estado natural (sin saturación) y en estado saturado (con agua destilada y con agua lluvia), con el fin de analizar posibles variaciones en la compresibilidad de los suelos cuando se varían los estados de humedad y el tipo de agua para diversas presiones.



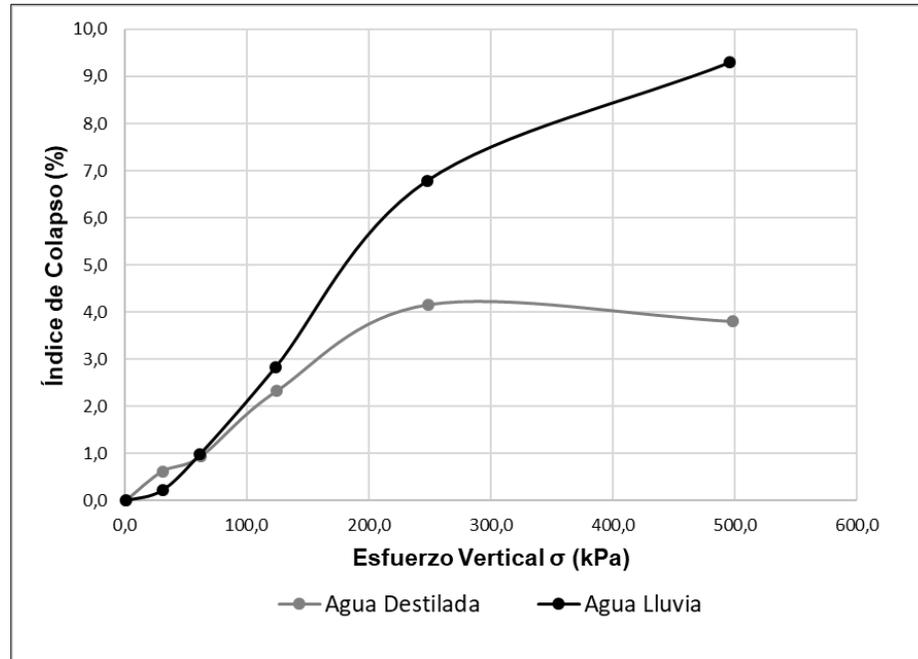
**Figura 6-13:** Curva de consolidación

En la Figura 6-13 se presentan las curvas de consolidación del ensayo duplo-edométrico, donde se observa que al realizar la saturación del suelo con agua lluvia se obtienen mayores deformaciones que al trabajar con agua destilada, lo cual puede deberse al efecto de floculación que producen las sales del agua lluvia en el suelo (Mitchell J. , 1993), la presencia de cationes de calcio ( $Ca^{+2}$ ) y la acidez que libera  $H^+$  (López F, 2000); así mismo esta estructura floculada genera un mayor índice de vacíos y por ende deformaciones mayores (Imai, Komatsu, & Fukue, 2006), lo cual muestra el efecto que se tiene al variar el líquido de inundación recomendado por la norma para este tipo de suelos.

A partir de los resultados del ensayo de consolidación duplo edométrico, se calcula el índice de colapso por la metodología de (Jennings & G Knight, 1957), obteniéndose los resultados que se muestran en Tabla 6-15 y en la Figura 6-14.

**Tabla 6-15:** Índice de Colapso

Esfuerzo vertical (kPa)	Agua destilada		Agua Lluvia	
	IC (%)	Gravedad	IC (%)	Gravedad
1,00	0.00	Nulo	0.00	Nulo
31.20	0,63	Nulo	0,22	Nulo
62.30	0,93	Nulo	0,99	Nulo
124.60	2.32	Moderado	2.84	Moderado
249.20	4.16	Moderado	6.76	Problemático
498.40	3.80	Moderado	9.30	Problemático



**Figura 6-14:** índice de colapso agua destilada y agua lluvia

En la Figura 6-14 se observa que según las tendencias de ambas curvas, se logra deducir que la diferencia entre los índices de colapso podría ser mayor ante mayores cargas cuando se usa agua lluvia, comparado con el uso de agua destilada (Anexo 2).

#### 6.5.4 Desagregación

Del ensayo de desagregación se tiene que durante la prueba con inmersión progresiva en el ensayo con agua lluvia, a una altura de agua 1/3 hay un desprendimiento de partículas de suelo y la aparición de una nube coloidal, la cual puede ser atribuida a las grandes presiones de expansión que llegan a separar las partículas; seguidamente al elevar el nivel del agua, una esquina inferior del cubo sufre un desmoronamiento de su arista, esto podrá estar asociado a que por la alta relación de vacíos, el agua satura rápidamente la muestra y rompe las tensiones que se generan al interior del suelo. Posteriormente, al aumentar el nivel del agua a 2/3 de la altura de la muestra, se desprende una arista superior el cual se le atribuye a la expansión osmótica (Figura 6-15), que se presenta cuando la concentración de iones en la fase sólida es mayor que el que tiene la solución del ambiente, inmediatamente al pasar esto la muestra sufre un fracturamiento y se desintegra en su totalidad formando montículos de suelo. Se resalta que durante el ensayo no fue necesario esperar las 24 horas de observación para que las muestras estuviesen en un estado de equilibrio de presiones, ya que la desagregación de ambas fue rápida y total.

El ensayo con agua destilada tuvo un comportamiento muy similar al ensayo con agua lluvia, porque al realizar inmersión progresiva, a 1/3 y 2/3 del llenado del recipiente, el

material presentaba fracturamiento en las aristas inferiores y una vez transcurrido los 31 minutos la muestra sufrió abatimiento total.

Durante las pruebas en inmersión total las muestras sufrieron abatimiento, en menor tiempo para la muestra sumergida en agua lluvia (Figura 6-16), lo que demuestra que incrementos súbitos en el nivel freático puede causar una mayor erodabilidad.

Como el mecanismo fue dispersión, la desestructuración más rápida en agua lluvia se debe a la concentración de sales y el menor pH del suelo (Mitchell J. , 1993).



a) Cubo con agua destilada

b) Cubo con agua lluvia

**Figura 6-15:** Ensayo de desagregación inmersión parcial.



a) Cubo con agua destilada

c) Cubo con agua lluvia

**Figura 6-16:** Ensayo de desagregación inmersión total.

La ejecución de los ensayos con agua destilada y agua lluvia mostraron ciertas diferencias en los resultados, destacando para las propiedades físicas, que los límites de consistencia con agua lluvia presentan un menor rango de plasticidad respecto al del agua destilada debido a que el pH del agua lluvia es menor, generando aglomeraciones y menor área superficial del suelo; en la granulometría CD y agua lluvia se produce mayor desagregación en el material respecto a la granulometría CD y agua destilada, atribución que se le puede hacer a la presencia del sodio del defloculante, que en contacto con los elementos del agua lluvia generan dispersión en el suelo; para el ensayo de pH con agua destilada el resultado se ajusta más a la clasificación MCT con agua lluvia y a los resultados arrojados en el DRX. Finalmente, para los ensayos de succión total, resistencia al corte (afectada por la succión) y consolidación se observa una mayor incidencia en los resultados al utilizar agua lluvia debido a su composición química (conductividad, sales disueltas, elemento  $\text{Ca}^{+2}$ , liberación de  $\text{H}^+$ ), que generan floculación en el suelo, influenciando la respuesta mecánica.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Recomendaciones para obtener resultados más aproximados a la realidad del suelo en campo

Para obtener una mayor aproximación de los ensayos de laboratorio respecto al material en campo y contemplando los análisis de resultados de la presente investigación, se recomienda para la ejecución de ensayos lo siguiente:

En los límites de consistencia se evidencia que, al ejecutar el ensayo con agua destilada, el suelo ofrece un mayor índice de plasticidad que con agua lluvia, se recomienda entonces realizarlos con agua lluvia para obtener un resultado más próximo a las condiciones a las que estará sometido el material en campo. Adicionalmente, en la práctica es más riesgoso pensar que se cuenta con un material con un rango de plasticidad mayor al que tendrá realmente al incorporársele agua lluvia en campo.

El ensayo de corte directo normalizado con la succión y los resultados de consolidación presentan mayores resistencias y menores deformaciones respectivamente, al ejecutarlos con agua destilada, lo cual es una alerta para el ingeniero con relación a la obtención de parámetros mecánicos del suelo para el cálculo de asentamientos y análisis de estabilidad, que deben entonces ser obtenidos a partir de ensayos ejecutados con agua lluvia, si se quiere presentar un análisis más próximo a las condiciones del suelo *in situ*.

En el ensayo de granulometría por hidrómetro se evidencia que el agua lluvia presenta un efecto desagregador importante y diferente al agua destilada, por lo tanto, es recomendable que el ensayo se ejecute con agua lluvia para simular adecuadamente las condiciones que presentará el material en campo.

En el ensayo MCT a pesar de que se presenta una mayor contracción diametral al ejecutarlo con el agua destilada, condición que es importante, porque el material al entrar en contacto con el agua destilada y secarse puede generar más grietas que son caminos preferenciales para la circulación del agua, en términos de clasificación con agua lluvia es la más acertada, por lo cual se recomienda ejecutar el ensayo con agua lluvia ya que replica las condiciones del material en campo.

En el ensayo de succión por el método del papel filtro es importante considerar el comportamiento de la succión frente al agua que realmente entra al suelo, ya que la

succión se asocia directamente con la respuesta mecánica del material; por tanto, se recomienda ejecutar el ensayo con la misma agua (ya sea agua lluvia o destilada) con que se realizan los ensayos con los cuales se hará dicha asociación.

El ensayo para pH del suelo, en relación al  $\Delta\text{pH}$ , se recomienda ejecutarlo con agua destilada, porque el resultado con agua lluvia no presenta concordancia con la mineralogía del suelo arrojada por el ensayo de difracción de rayos X.

## 7.2 Conclusiones

La química del agua lluvia y el agua destilada presenta características diferentes respecto a la composición de elementos de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), ácidos que liberan  $\text{H}^+$ , conductividad, alcalinidad, dureza total, STD y pH que genera en el suelo floculación o dispersión (Mitchell J. , 1993).

A pesar de que no hay una gran variación en el resultado de los límites líquidos ejecutados con ambas aguas, el índice de plasticidad de las muestras ensayadas con agua lluvia es menor, afectando la clasificación y disminuyendo el rango en el que el suelo presenta un comportamiento plástico; condición que puede obedecer a que por el agua lluvia presentar un menor pH, en relación con el agua destilada, tendría mayor presencia de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y de hidrogeno ( $\text{H}^+$ ) liberado (Bragado, 2017), generando rechazo de los iones positivos adsorbidos hacia las cargadas negativas de las partículas de arcilla, permitiendo aglomeraciones, y por ende menores áreas superficiales (López F, 2000), que se traduce en menores índices de plasticidad. En términos ingenieriles esto es importante, porque si se realiza el ensayo con agua destilada se considera que el material es más plástico de lo que realmente sería al entrar en contacto con el agua lluvia.

El efecto de las cargas negativas del suelo con las cargas negativas del agua lluvia también interviene en el ensayo de la gravedad específica, ya que, por la presencia del calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y la mayor acidez del agua lluvia que libera  $\text{H}^+$  (Bragado, 2017), se genera floculación de las partículas (López F, 2000). Dicha floculación deja mayores espacios entre partículas, con consecuente disminución de la gravedad específica de los sólidos.

Para el análisis granulométrico se destaca que la muestra con agua lluvia presenta mayor contenido de finos respecto a la muestra con agua destilada. Condición que se puede atribuir a que generalmente el agua lluvia en presencia de  $\text{Na}^+$  como el hexametáfosfato de sodio del defloculante (Bragado, 2017), en contacto con el suelo genera una dispersión fuerte de las partículas (Lenntech, 1998).

En la clasificación por la metodología MCT se observa una estrecha diferencia entre ambas aguas debido a que la contracción diametral de la muestra con agua destilada aumentó levemente un 2% con respecto a la del agua lluvia. Variación que se le puede atribuir al procedimiento durante la ejecución del ensayo.

El ensayo de difracción de rayos X confirma lo expuesto en la geología de la zona de estudio que el mineral principal de este material es el cuarzo; además de presentar otros minerales como Caolinita, Moscovita y Gibbsita concluyendo que el material clasifica como un suelo residual originario de miembros volcánicos. Además, la presencia de caolinita hace que el suelo sea mucho más susceptible a las variaciones por el pH del agua (Edafología, 2020).

Las imágenes de la Microscopía Electrónica de Barrido no reflejan una estructura de micro y macro poros, característica de un suelo tropical laterítico de alto grado de meteorización. Se puede apreciar una composición homogénea con ausencia de estructuras heredadas, lo cual concuerda con la forma suavizada de la curva característica de retención de agua.

La caracterización química del suelo muestra que la concentración de los elementos bases (Al, Ca, Mg, K y P) es bajo. Como era de esperarse, es evidente una disminución del pH del suelo en agua lluvia debido a la liberación  $H^+$  (Bragado, 2017), y a los componentes presentes en el agua, que lo tornan más ácido, aumentando la conductividad eléctrica, las sales, la floculación y disminuyendo la capacidad de intercambio catiónico (Edafología, 2020). Todo esto, permite una mayor atracción con las cargas negativas de los arcillominerales generando floculación (López F, 2000).

Con relación al ensayo de pH, en el caso del  $\Delta pH$  del suelo para la determinación de dominio de minerales, teniendo en cuenta el material encontrado en campo y los minerales arrojados en el resultado del DRX, se ajusta mejor el ensayo con agua destilada. Para el análisis del PZC, el valor del pH del suelo con agua lluvia presenta una mayor aproximación al PZC, mostrando una floculación mayor que con el agua destilada.

En el ensayo de succión se valida el comportamiento homogéneo del tamaño de los poros del suelo evidenciado en las imágenes de la MEB. Además, la curva de fluidez del suelo con agua lluvia se encuentra por encima de la curva con agua destilada, permitiendo relacionar el comportamiento químico del agua con la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos, la floculación y por ende la succión osmótica, la cual disminuye con el agua lluvia en la región de los macroporos.

La composición química de las aguas no muestra influencia en las pendientes de la envolvente de falla en el ensayo de corte directo, se presentó una variación del 24% en el resultado de la cohesión aparente entre el agua lluvia y destilada y al normalizar el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) por la succión pF se tiene una variación del 68% disminuyendo la resistencia del suelo inundado con agua lluvia. Condición que puede obedecer a que el suelo ensayado con agua lluvia presenta una estructura más abierta, entonces, la tensión superficial tendrá que ejercer menos fuerza de empuje para el agua entrar en los poros del suelo ofreciendo succiones y resistencias menores.

El ensayo de consolidación muestra que al efectuarlo con agua lluvia se obtiene mayores deformaciones que con agua destilada, debido a la floculación que genera el agua lluvia y a su vez los mayores índices de vacíos, por presentar mayores concentraciones de sales,

cationes de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y  $\text{H}^+$  liberados (Bragado, 2017). En términos de colapso es claro que, al someter el suelo a mayores cargas, hay un aumento en la susceptibilidad de colapso cuando se encuentra saturado con agua lluvia.

Durante la realización del ensayo de desagregación con los dos tipos de agua, se observó que luego de media hora de la ejecución, las muestras sometidas a inmersión parcial y en inmersión total, presentaron una desagregación total, desagregando primero la muestra con agua lluvia respecto a la muestra con agua destilada, debido a la mayor concentración de sales y menor pH del suelo (Mitchell J. , 1993), lo cual permite concluir que el suelo es altamente erodable debido a la desintegración sufrida al entrar en contacto con agua.

En el caso de los ensayos de desagregación, MCT, resistencia al corte directo sin afectación por la succión, el comportamiento de la muestra de suelo fue similar para ambas aguas. Para el pH del suelo no se recomienda ejecutarlo con agua lluvia porque difiere de la clasificación MCT y DRX, los demás resultados presentan diferencias al ejecutarlos con agua destilada y agua lluvia: 3% en la gravedad específica, 9 % en el límite plástico, 11% en el índice de plasticidad, 24% en la cantidad de arcillas determinadas por granulometría, alrededor de 182 kPa de succión total en la región de los macroporos y hasta un 5.5% en el índice de colapso. Estas diferencias se le atribuyen principalmente a la composición química del agua lluvia, ya que presenta mayor conductividad eléctrica y mayores STD que generan gran cantidad de sales disueltas, a su vez, contenidos mayores de cationes de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y  $\text{H}^+$  liberados (Bragado, 2017), provocando rechazo de los iones positivos adsorbidos hacia las cargadas negativas de las partículas de arcilla, produciendo la floculación (López F, 2000). Estas diferencias en los resultados brindan una alerta al ingeniero sobre la forma cómo deben ser efectuados estos ensayos para representar el comportamiento del material lo más próximo a la realidad, previniendo futuros problemas en las obras de ingeniería.

Si bien los ensayos de límite líquido, MCT, resistencia al corte directo, desagregación no mostraron variaciones significativas al utilizar agua lluvia, los ensayos de gravedad específica, granulometría por hidrómetro, límite plástico, succión y consolidación si muestran un efecto relevante; en tales casos, sería por tanto ideal utilizar el agua lluvia para la ejecución de los ensayos, ya que es el agua que representaría la condición más crítica y a su vez real, a la que estaría expuesto el suelo de manera natural, reflejando con mayor exactitud lo que puede sucederle al material en campo ante la circulación de agua lluvia.

### **7.3 Recomendaciones a futuras investigaciones**

Una de las principales variables que influyen en la variación de las propiedades del suelo es el pH del agua. En este estudio, aunque se midió el pH para el agua destilada y agua lluvia con 4 repeticiones para cada una, se recomienda antes de cada ensayo realizar esta medida, ya que el pH del agua puede variar bajo ciertas condiciones, como altos cambios

de temperatura; así como el CO<sub>2</sub> del aire, que se disuelve con el agua y aumenta su acidez, lo cual puede afectar las propiedades del suelo.

Si bien la química del agua lluvia depende del grado de contaminación presente en la atmósfera, el lugar de estudio elegido para esta investigación es una zona donde se ubica gran parte de las empresas e industrias que abastecen a la ciudad de Medellín, además de realizarse explotación de carbón. Se recomienda para investigaciones futuras efectuar los estudios en zonas donde se produzca menor grado de contaminación para estimar si las diferencias en los resultados de los ensayos de laboratorio se conservan igual o hay menor variación respecto a la presente investigación.

A pesar de las recomendaciones que presenta la norma internacional ASTM sobre el tipo de agua a utilizar para realizar los ensayos de laboratorio para suelos (agua destilada), muchos laboratorios de empresas consultoras del entorno ejecutan los ensayos con agua del grifo. Evento entonces que conlleva a recomendar para investigaciones futuras además de realizar los ensayos con agua destilada y agua lluvia, incorporar también el agua de grifo.

## Referencias

- 2320 B. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- 2340 C. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- 2510 B. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- 2540C. (2017). *Total dissolved solids dried at 180°C*. Washington: Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- 3500 Ca B. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- 4500 CL-B. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington: Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- 4500 SO4 2-. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington: Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- Alcaldía de Caldas, A. (11 de Julio de 2019). *Alcaldía de Caldas, Antioquia*. Obtenido de <https://www.caldasantioquia.gov.co>
- Álvarez, J. (1995). *Geología del complejo Ofiolítico de Pácora y secuencias relacionadas de Arco de Islas (Complejo Quebradagrande)*. Bogotá: Ingeominas.
- Amézquita, E. (1990). Fundamentos para la interpretación de análisis del suelo, plantas y aguas para riego. *Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo*, 178.

- Ann, M., Choi, J., & Douglas, M. (2018). *Biology 2e*. Houston.
- APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water*. New York: 23 RD Edition.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2006). *Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado*. Medellín.
- ASTM C136/C136M-14. (2014). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D2216-19. (2019). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D2435M-11. (2011). *Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading*. Westh Conshohocken, PA.
- ASTM D2487-17. (2017). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080M -11. (2011). *Standard test method fot direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318-17e1. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D4972-19. (2019). *Standard test method for pH of soils*. Westh Conshohocken, PA.
- ASTM D5298-16. (2016). *Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filterp paper*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D-7015. (2018). *Standar practices for obtaining intact block (cubical and cylindrical) samples of soils*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D7928-17. (2017). *Standard test method for particle-size distribution (Gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (Hydrometer) analysis*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D854-14. (2014). *Standar test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. West Conshohocken,PA.
- B.A, M. (1961). *Gaseous composition of the atmosphere and its analysis*. Moskvu.
- Bakhshipour, Z., Asadi, A., Huat, B., A, S., & Kawasaki, S. (2016). Effect of acidrain on geotechnical properties of residual soils. *Soils and Foundations*, 1008-1019.

- Benna , M., Kbir Ariguib, N., Clinars, C., & Bergaya, F. (2002). Card house microestructura of purified sodium montmorillonite gels evidenced by filtration properties at different pH. 204-210.
- Botero, G. (1963). *Contribución al conocimiento de la geología de la zona Central de Antioquia*. Medellín.
- Bowders, J., & Daniel, D. (1987). Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. 1432-1448.
- Bragado, R. (29 de 03 de 2017). *Tiloom*. Obtenido de <https://www.tiloom.com/agua-de-lluvia/>
- California Environmental Protection Agency. (2013). *Folleto informativo conductividad eléctrica/ Salinidad*. Folleto informativo 3.1.3.0.
- Camapum de Carvalho, J. (2015). *Solos ñao saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Camapum de Carvalho, J., Martines, M., Moreira, M., & Da Silva, M. (2006). *Processos erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Brasília: Ed. FINATEC.
- Carbajal, A., & González, M. (2003). Funciones biológicas del agua en relación con sus características físicas y químicas. *Academia española de gastronomía*, 249-256.
- Chandler, R., & Gutierrez, C. (1986). The filter paper method of suction measurement . *Technical Report, Geotechnique*.
- CL-B, 4. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington: Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
- Conti, M. (2000). *Principios de edafología*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Denman, K., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P., Dickinson, R., . . . Jacob, D. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Clim Change*, 541-584.
- Doria A, C. (2017). Metales Pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en la Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 37-44.
- Du Nouy. (1979). *Surface tension with the ring method*.
- Edafología. (17 de abril de 2020). *Edafología-net*. Obtenido de <http://www.edafologia.net/introeda/tema05/ccc.htm>

- Estadística para todos. (2008). *Estadística para todos*. Obtenido de <http://www.estadisticaparatodos.es/software/excel/ejer5.html>
- Fertilizer, S. (12 de Febrero de 2020). *Smart fertilizer*. Obtenido de <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/electrical-conductivity/>
- Fookes. (2004). *Suelos residuales tropicales*. Medellín: Hombre nuevo editores.
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons.
- Goldstein, J. (1984). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Saltador.
- González, H. (1980). *Geología de las planchas 167 Sonsón y 187 Salamina del mapa geológico de Colombia*. Bogotá.
- Google. (2019). Google Earth.
- Gratchev, I., & Towhata, I. (2015). Compressibility of soils containing kaolinite in acidic environments. *Civil Engineering*, 1-8.
- Grosse, E. (1926). *Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia*. Berlin.
- Group, G. S. (1997). *Tropical Residual Soils*. London: Peter G. Fookes.
- Hernández, J. O. (23 de Noviembre de 2015). *Microlabindustrial*. Obtenido de <http://www.microlabindustrial.com/blog/los-solidos-en-el-agua>
- Huat, B., & David G. (2013). *Tropical Residual Soils Engineering*. Taylor & Francis Group,.
- Imai, G., Komatsu, Y., & Fukue, M. (2006). Consolidation yield stress of Osaka-Bay pleistocene clay with reference to calcium carbonate contents. *J ASTM*, 1-19.
- Jenkins, D. (2002). *Química del agua*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- Jennings, J., & G Knight, K. (1957). The prediction of total heave from the double oedometer test. *Trans. Symp on expansive clays, South African Institution of civil engineers*, 13-19.
- Júarez, E., & Rico, A. (2005). *Fundamentos de la mecánica de suelos*. México D.F: Limusa.
- Kamon M, Y. C. (1997). Effect of acid rain on physicochemical and engineering properties of soils. *Soil and Foundations*, 23-32.
- Keller, J. (1964). The origin of High-alumina clay minerals - a review. *Clays and Clay minerals*.
- Lambe, T., & Whitman, R. (1969). *Mecánica de suelos*. Ed. Limusa.

- Langelier, W. (1936). The analytical control of anti-corrosión water treatment.
- Lavorenti, A., & Alves, M. E. (2005). Point of zero salt effect: Relationships with Clay Mineralogy of representative Soils of the Sao Paulo State, Brazil. *Science Press, Beijing*, 545-553.
- Lenntech, B. (1998). *Lenntech*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/riego/sar/riesgo-sodio-en-regadios.htm>
- López F, Y. (2000). *Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera*. Cali: División de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Maines, A. G. (2007). Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on. *Géotechnique*, 687-699.
- Marinho, F. (1994). Medição de sucção com o método do papel filtro. *X Congreo Brasileiro de meçânica dos solos e engenharia de fundações*, 515-522.
- Maya, M., & González, H. (1995). *Unidades Litodémicas de la cordillera central de colombia*. Medellín: Ingeominas.
- McCarthy, D. F. (1993). *Essentials of soil mechanics: Basic geotechnics*. New Jersey: Pearson New International Edition.
- Mesa, M., & Solano, J. (2004). *Influencia de las fases minerales y sus relaciones microestructurales en las tendencias del comportmaiento mecánico: Resistencia y compresibilidad en suelos tropicales del stock de San Diego*. Medellín.
- Meseguer, S. (19 de 10 de 2017). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=5wlq8xZ1JSg>
- Mitchell, J. (1976). *Fundamentals of soil behavior*. New York: Wiley John .
- Mitchell, J. (1993). *Fundamentals of soils behavior*. California: Jhon Wiley and sons.
- Molina, E., & Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. *Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica*.
- Montenegro, J. (19 de 09 de 2011). *Caracterización física del suelo para el riego*. Obtenido de Civilgeeks Ingeniería y Construcción: <https://civilgeeks.com/2011/09/19/caracterizacion-fisica-del-suelo-para-el-riego/>
- Morales, M. M. (2006). *Tensión Superficial:Fenómeno sencillo, fenómeno mas que observado, pero tantas veces desconocido por su nombre*. Buenos Aires.
- Nogami, J., & Villibor, D. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Editora Vilibor.

- NTC - 4981. (2001). *Determinación del contenido de fósforo. Método espectrofotométrico*. Bogotá: Incontec.
- NTC - 5263. (2017). *Determinación de la acidez, aluminio e hidrogeno*. Bogotá: Incontec.
- NTC- 5268. (2014). *Determinación de la capacidad de intercambio catiónico*. Bogotá: Incontec.
- NTC-3651. (2012). *Determinación del pH*. Bogotá: Incontec.
- NTC-5151. (2003). *Determinación de los contenidos de calcio, Cobre, Hierro, Magnesio, Manganeso, Potasio, Sodio y Zinc. Método usando espectrometría de absorción atómica*. Bogotá: Incontec.
- Padilla, K., & Garritz, A. (2007). *Química un proyecto de la American Chemical Society*. Barcelona: Reverté.
- Piñeiro, A., Cerana, L., & Panigatti, J. (1973). *Suelos salinos y sódicos*.
- Press, F., & Siever, R. (1994). *Tropical weathered in situ materials*. Nueva York.
- Quintero , A. (2016). *Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en las propiedades geotécnicas de un suelo tropical*. Medellín.
- Quintero, A., & Valencia, Y. (2017). Variación de las propiedades geotécnicas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos en un suelo tropical. *Boletín de ciencias de la tierra*, 40-47.
- Raffino, M. E. (15 de 01 de 2019). *Concepto.de*. Obtenido de <https://concepto.de/agua-destilada/>.
- Rhoades, J. (1981). Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. *Advances in agronomy, Vol 49*, 201-251.
- Richards, L. (1985). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. México: Limusa.
- Sánchez, I., Ortega, H., Can, A., Galicia, M., & Camacho, M. (2019). Evaluación de potenciales osmóticos en suelos y aguas costeros de Oaxaca, México, mediante ecuaciones de predicción. *Acta Universitaria 29*, 1-22.
- Sassa, I. B. (2009). Cyclic Behavior of Fine-Grained Soils at Different pH Values. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 271-279.
- Schellmann, W. (1981). Considerations on the definition and classification of laterites. In Lateritisation processes. *A.A. Balkema, Rotterdam*, 1-10.
- Seinfeld J, P. S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics from air pollution to climate Change*. USA: Wiley - Interscience.

- Sridhar, M., & Rami, C. (1984). Surface tension of polluted waters and treated. *Environmental Pollution*, 49-69.
- Strakhov, N. (1967). *The principles of Lithogenesis*. Edinburgh: Oliver & Boyd, Ed.
- Sunil, B., Nayak, S., & Shrihari, S. (2006). Effect of pH on the geotechnical properties of laterite. *Engineering Geology*, 197-203.
- Towhata, I. G. (2015). Compressibility of Soils Containing Kaolinite in Acidic Environments. *Geotechnical Engineering*, 1-8.
- UNE 103301-94. (1994). *Determinación de la densidad de un suelo, Método de la balanza hidrostática*. España.
- Van Olphen, H., & Hsu, P. (1978). An introduction to clay colloid chemistry. *Soil Science*.
- Villalaz. (2016). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México D.F: Limusa.

# Anexos

## Anexo 1: Análisis de varianza

Para confirmar si los ensayos con agua destilada y agua lluvia presentan variabilidad en sus resultados; se realiza un análisis de hipótesis, suponiendo varianzas iguales y estimando una confiabilidad del 95% para los resultados (Estadística para todos, 2008).

### Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales pH agua

pH del Agua	Destilada	Lluvia
Media	6.36	4.36
Varianza	0.03	0.0
Observaciones	4.0	4.0
Varianza agrupada	0.01	-
Diferencia hipotética de medias	0.0	-
Grados de libertad	6.0	-
Estadístico (t)	23.45	-
P ( $T \leq t$ ) una cola	0.0	-
Valor crítico de t (una cola)	1.94	-
P ( $T \leq t$ ) dos colas	0.0	-
Valor crítico de t (dos colas)	2.45	-

Los resultados presentan un (t) tabulado igual a 2.45, siendo este menor al (t) estadístico (23.45), permitiendo negar la hipótesis ya que las medias son diferentes.

### Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales gravedad específica

Gravedad Específica	Destilada	Lluvia
Media	2.84	2.75
Varianza	0.0	0.0
Observaciones	4.0	4.0
Varianza agrupada	0.0	-
Diferencia hipotética de medias	0.0	-
Grados de libertad	6.0	-
Estadístico (t)	8.64	-

<b>Gravedad Específica</b>	<b>Destilada</b>	<b>Lluvia</b>
P ( $T \leq t$ ) una cola	0.0	-
Valor crítico de t (una cola)	1.94	-
P ( $T \leq t$ ) dos colas	0.0	-
Valor crítico de t (dos colas)	2.45	-

Los resultados presentan un (t) tabulado igual a 2.45, siendo este menor al (t) estadístico (8.45), permitiendo negar la hipótesis ya que las medias son diferentes.

### **Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales Límite Líquido**

<b>Límite Líquido</b>	<b>Destilada</b>	<b>Lluvia</b>
Media	46.99	46.94
Varianza	0.89	1.80
Observaciones	3.0	3.0
Varianza agrupada	1.34	-
Diferencia hipotética de medias	0.0	-
Grados de libertad	4.0	-
Estadístico (t)	0.05	-
P ( $T \leq t$ ) una cola	0.48	-
Valor crítico de t (una cola)	2.13	-
P ( $T \leq t$ ) dos colas	0.96	-
Valor crítico de t (dos colas)	2.78	-

Los resultados presentan un (t) tabulado igual a 2.78, siendo este mayor al (t) estadístico (0.05), permitiendo corroborar la hipótesis que las medias son iguales.

### **Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales Límite Plástico**

<b>Límite Plástico</b>	<b>Destilada</b>	<b>Lluvia</b>
Media	24.63	33.67
Varianza	5.32	2.20
Observaciones	3.0	3.0
Varianza agrupada	3.76	-
Diferencia hipotética de medias	0.0	-
Grados de libertad	4.0	-
Estadístico (t)	5.71	-
P ( $T \leq t$ ) una cola	0.0	-
Valor crítico de t (una cola)	2.13	-
P ( $T \leq t$ ) dos colas	0.0	-
Valor crítico de t (dos colas)	2.78	-

Los resultados presentan un (t) tabulado igual a 2.78, siendo este menor al (t) estadístico (5.71), permitiendo negar la hipótesis ya que las medias son diferentes.

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales índice Plástico**

<b>Índice Plástico</b>	<b>Destilada</b>	<b>Lluvia</b>
Media	22,37	13,37
Varianza	2,68	5,33
Observaciones	3.0	3.0
Varianza agrupada	4,0	-
Diferencia hipotética de medias	0.0	-
Grados de libertad	4.0	-
Estadístico (t)	5,51	-
P ( $T \leq t$ ) una cola	0.0	-
Valor crítico de t (una cola)	2.13	-
P ( $T \leq t$ ) dos colas	0.01	-
Valor crítico de t (dos colas)	2.78	-

Los resultados presentan un (t) tabulado igual a 2.78, siendo este menor al (t) estadístico (5.51), permitiendo negar la hipótesis ya que las medias son diferentes.

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales contracción diametral MCT**

<b>Contracción MCT</b>	<b>Destilada</b>	<b>Lluvia</b>
Media	0.35	0.29
Varianza	0.01	0.02
Observaciones	3.0	3.0
Varianza agrupada	0.01	-
Diferencia hipotética de medias	0.0	-
Grados de libertad	4.0	-
Estadístico (t)	0.62	-
P ( $T \leq t$ ) una cola	0.29	-
Valor crítico de t (una cola)	2.13	-
P ( $T \leq t$ ) dos colas	0.57	-
Valor crítico de t (dos colas)	2.78	-

Los resultados presentan un (t) tabulado igual a 2.78, siendo este mayor al (t) estadístico (0.62), permitiendo corroborar la hipótesis que las medias son iguales.

**Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales pH del suelo**

<b>pH del suelo</b>	<b>Destilada</b>	<b>Lluvia</b>
Media	4.07	3.65
Varianza	0.0	0.0

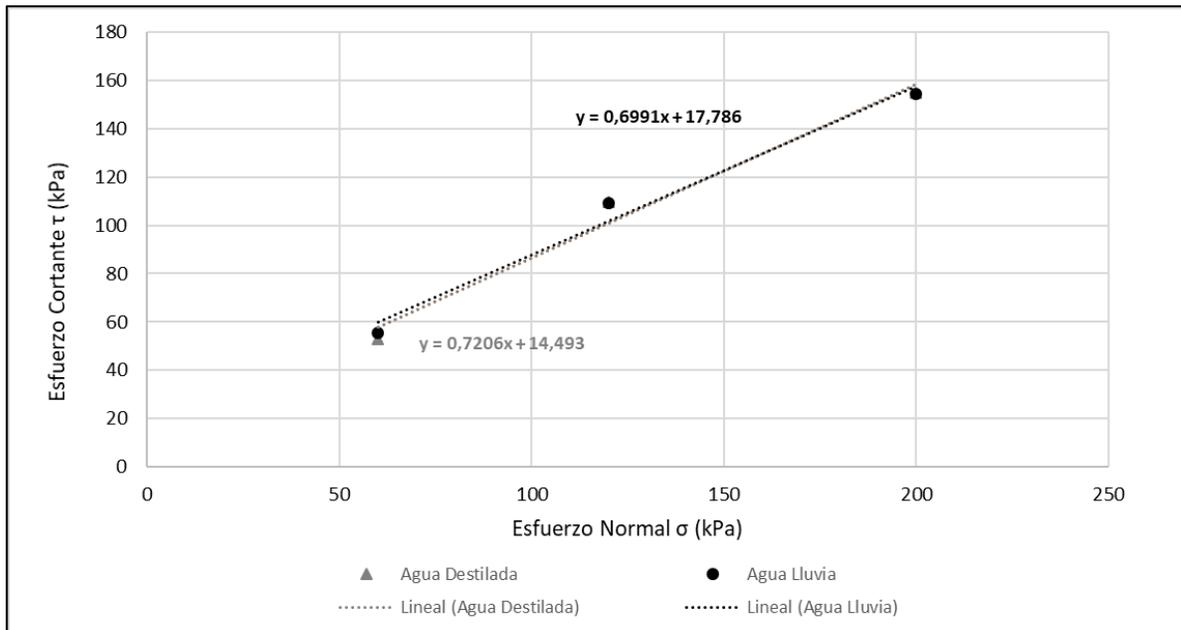
pH del suelo	Destilada	Lluvia
Observaciones	4.0	4.0
Varianza agrupada	0,0	-
Diferencia hipotética de medias	0.0	-
Grados de libertad	6.0	-
Estadístico (t)	27.96	-
P ( $T \leq t$ ) una cola	0.0	-
Valor crítico de t (una cola)	1.94	-
P ( $T \leq t$ ) dos colas	0.0	-
Valor crítico de t (dos colas)	2.45	-

Los resultados presentan un (t) tabulado igual a 2.45, siendo este menor al (t) estadístico (27.96), permitiendo negar la hipótesis ya que las medias son diferentes.

## Anexo 2: Ensayos estadísticos para comparar las pendientes de dos rectas

Para confirmar si los ensayos con agua destilada y agua lluvia presentan variabilidad en sus resultados; se realiza un análisis estadístico de comparación de dos rectas, suponiendo varianzas homogéneas y estimando una confiabilidad del 95% para los resultados (Meseguer, 2017).

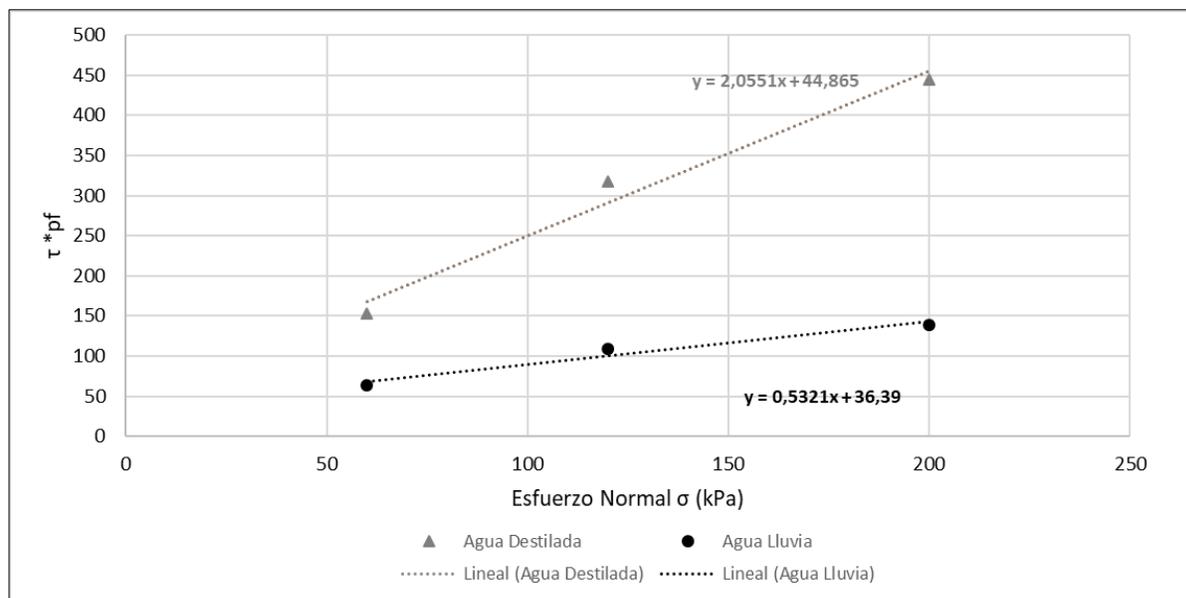
### Prueba regresión varianzas homogéneas Corte directo



Tipo de Agua	Varianza ( $S^2$ )	$F_{\text{Calculado}} (S^2_{b1}/S^2_{b2})$	n	Grados de Libertad	m	$F_{\text{Tabulado 95\%}}$	$t_{\text{Calculado}}$	$t_{\text{Tabulado 95\%}}$
Destilada	0.012	1.311	3	1	0.721	647.8	0.150	2.78
Lluvia	0.009		3	1	0.699			

Los resultados presentan un (F) calculado igual a 2.311, siendo este menor al (F) tabulado (647.8), permitiendo corroborar la hipótesis que las varianzas son homogéneas. A su vez, el (t) calculado es 0.150, menor que el (t) tabulado (2.78), concluyendo que las pendientes son estadísticamente similares.

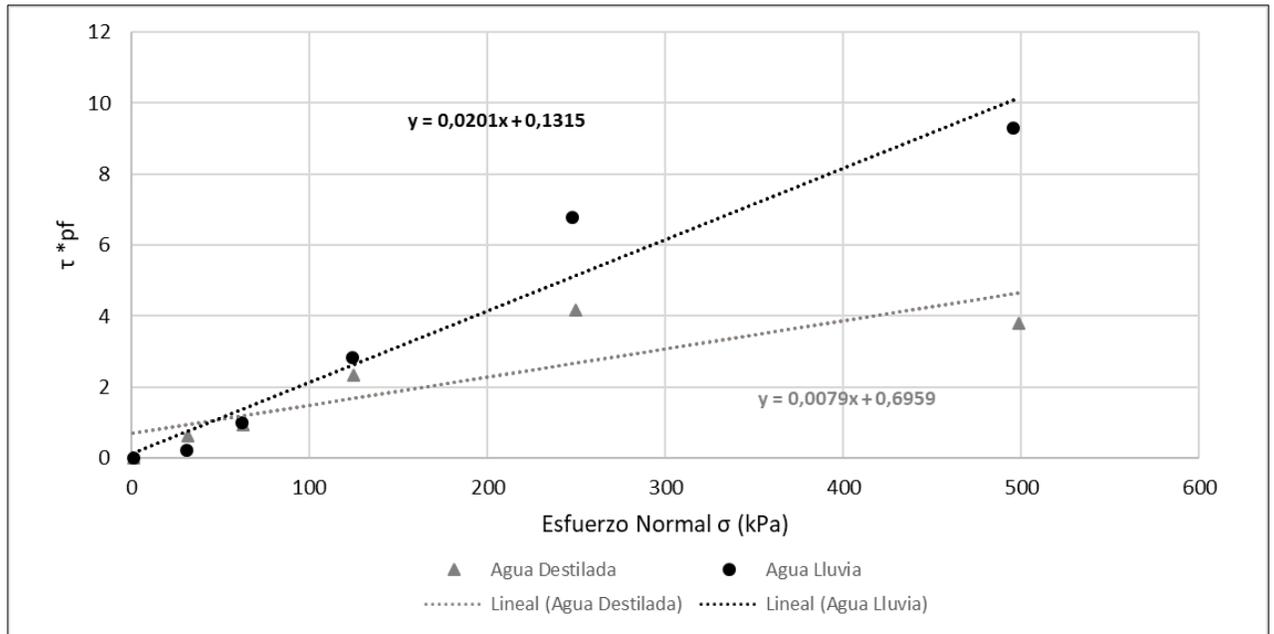
### Prueba regresión varianzas homogéneas $\tau^*pf$



Tipo de Agua	Varianza ( $S^2$ )	$F_{\text{Calculado}} (S^2_{b1}/S^2_{b2})$	n	Grados de Libertad	m	$F_{\text{Tabulado 95\%}}$	$t_{\text{Calculado}}$	$t_{\text{Tabulado 95\%}}$
Destilada	0.108	8.611	3	1	2.055	647.8	4.391	2.78
Lluvia	0.013		3	1	0.532			

Los resultados presentan un (F) calculado igual a 8.611, siendo este menor al (F) tabulado (647.8), permitiendo corroborar la hipótesis que las varianzas son homogéneas. A su vez, el (t) calculado es 4.391, mayor que el (t) tabulado (2.78), concluyendo que las pendientes son estadísticamente diferentes.

### Prueba regresión varianzas homogéneas colapso



Tipo de Agua	Varianza ( $S^2$ )	$F_{\text{Calculado}} (S^2_{b1}/S^2_{b2})$	n	Grados de Libertad	m	$F_{\text{Tabulado 95\%}}$	$t_{\text{Calculado}}$	$t_{\text{Tabulado 95\%}}$
Destilada	$5.71 \times 10^{-6}$	1.002	6	4	0.008	9.605	3.611	2.23
Lluvia	$5.69 \times 10^{-6}$		6	4	0.020			

Los resultados presentan un (F) calculado igual a 1.002, siendo este menor al (F) tabulado (9.605), permitiendo corroborar la hipótesis que las varianzas son homogéneas. A su vez, el (t) calculado es 3.611, mayor que él (t) tabulado (2.23), concluyendo que las pendientes son estadísticamente diferentes.