PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

TRABAJO DE DISERTACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERO CIVIL

# CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y GEOMECÁNICA, Y DETERMINACIÓN DE LA MATRIZ DE SUCCIÓN DEL SUBSUELO, EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO SECTOR EL ROCIO DE GUAMANI. COORDENADAS 17M 0771098, 9962442.


AUTOR:

JORGE ANDRÉS ERAZO PILLALAZA

DIRECTOR:

ING. JORGE ALBUJA, M.SC


QUITO, 2020

**AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por enseñarme lo más importante en este mundo, el ayudar al prójimo con respeto, humildad y profesionalismo.

Doy gracias principalmente a mis padres Mauricio y Lucy que con su apoyo incondicional y gran paciencia hemos logrado juntos alcanzar esta meta, a mis abuelitos Andrés y Piedad, por darme todo el cariño y valores que tanto me han servido en la vida, a mi hermana Julia por hacer de mis días interesantes y apoyarme, a Darlyn y Tiffany por ser indispensables en mi vida y darme las fuerzas para seguir.

Agradezco muy especialmente al Ingeniero Jorge Albuja por ser paciente, guiarme y brindarme su apoyo y conocimiento en el transcurso de este trabajo, al Ingeniero Guillermo Realpe por incentivar en mí el interés en el área de suelos con su ímpetu en la materia, al Ingeniero Juan Carlos Montero por ser un gran maestro y un excelente guía.

A todo el personal del laboratorio de suelos de la PUCE que con su imprescindible colaboración, profesionalismo y sabiduría se logró este trabajo.

**RESUMEN**

El presente trabajo contiene la descripción de los métodos y normativas utilizadas para la toma de muestras y la caracterización física y geomecánica del subsuelo en el punto geográfico ubicado en las coordenadas 17M 0771098, 9962442., en el sector de “El Roció de Guamaní” en el Sur de Quito.

Esta investigación se efectúa como parte de un estudio para realizar la microzonificación geotécnica en el Distrito Metropolitano de Quito, en donde es necesario obtener la mayor cantidad de información del subsuelo que lo conforma, uno de estos datos es la succión del suelo, que forma parte del estudio de suelos parcialmente saturados, los cuales alcanzan con el tiempo una mayor importancia en nuestro medio, ya que involucran condiciones diferentes a la mecánica de suelos clásica.

Mediante ensayos de sitio y laboratorio se definió la estratigrafía del subsuelo, su clasificación y sus características físicas en los treinta metros de estudio, además se realizaron ensayos de penetración estática SPT en base al perfil encontrado en un primer sondeo, y se determinó un estrato en específico para realizar el estudio de suelos parcialmente saturados del cual su principal objetivo es determinar una relación entre la capacidad de carga, el módulo de elasticidad y la matriz de succión del suelo en condiciones parcial mente saturadas.

El estrato de estudio de suelos parcialmente saturados se clasifico como un limo arenoso de baja plasticidad (ML) el cual presenta características físicas similares en los 8 metros de estrato. Como siguiente fase se realizaron probetas inalteradas talladas en el suelo extraído de muestreadores Shelby en las cuales se realizaron ensayos de compresión simple y determinación de su matriz de succión con su humedad natural, también se realizaron muestras de suelo reconstituidas utilizando el suelo extraído de una perforación a rotación en las cuales también se realizaron ensayos de compresión simple y determinación de su matriz de succión por el método del papel filtro con diferentes contenidos de humedad con el fin de conformar la curva característica del suelo y el diagrama extendido de Mohr Coulomb presentado por Fredlund (1978),.

Los resultados encontrados nos indican que para especímenes con un contenido de humedad bajo su capacidad de carga es mucho mayor que los especímenes con humedades elevadas, también se puede apreciar la variación que se presenta en los resultados de muestras reconstituidas y especímenes inalterados, en las cuales se observa que la capacidad de carga para muestras reconstituidas se reduce considerablemente en comparación con una muestra de suelo inalterada.

**Palabras clave:** Matriz de Succión, Curva Característica de Succión, Curva Característica del Suelo, Diagrama de Mohr-Coulomb Extendido, suelos parcialmente saturados, módulo de elasticidad, Caracterización del suelo.

**Keywords:** Suction Matrix, Soil-Water Characteristic Curve (SWCC), Extended Mohr-Coulomb Diagram, Unsaturated Soil, Young's modulus, Soil Characterization.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos ..... I

RESUMEN ..... II

Índice de figuras ..... VI

Índice de Graficas ..... VIII

Índice de fotografías ..... X

Índice de tablas ..... XI

1. INTRODUCCIÓN ..... 1

1.1 ANTECEDENTES ..... 1

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 2

1.2.1 Descripción general ..... 3

1.2.2 Geología de Quito ..... 5

1.2.3 Hidrogeología del sur de Quito ..... 7

1.2.4 Infiltración por precipitaciones ..... 9

1.3 OBJETIVOS ..... 11

1.3.1 Objetivo general ..... 11

1.3.2 Objetivos específicos ..... 11

1.4 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN ..... 11

1.4.1 Primera etapa: Trabajo de campo ..... 11

1.4.2 Segunda etapa: Trabajo de laboratorio ..... 13

1.4.3 Tercera etapa: Procesamiento de datos y análisis de resultados ..... 14

2. MARCO TEÓRICO ..... 14

2.1 INTRODUCCIÓN ..... 14

2.1.1 Suelos parcialmente saturados ..... 15

2.1.2 Aplicaciones de la Mecánica de suelos parcialmente saturados ..... 16

2.1.3 Fenómenos asociados al Suelo Parcialmente Saturados ..... 18

2.1 4 Fenómenos de flujo ..... 18
2.1.5 Matriz de succión..... 19
2.1.6 Regímenes de succión y la curva característica del suelo ..... 21
2.1.7 Fenómenos de esfuerzo ..... 25
2.1.8 El Criterio de falla de Mohr Coulomb..... 26
3. TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO..... 34
3.2 ENSAYOS DE CAMPO ..... 34
3.2.1 Exploración del subsuelo..... 34
3.2.2 Primero: Sondeo y prospección..... 35
3.2.3 Segundo: Ensayo de penetración dinámica SPT ..... 40
3.2.4 Tercero: Toma de muestras inalteradas con tubo de pared delgada ..... 43
3.2.5 Descripción de herramientas y maquinaria. ..... 44
3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO..... 45
3.3.1 Relaciones fundamentales ..... 45
3.3.2 Clasificación de suelos ..... 50
3.3.3 Matriz Succión..... 56
3.3.4 Compresión Simple ..... 65
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ..... 68
4.1 Estratigrafía con datos ..... 68
4.2 Resistencia a la compresión..... 70
4.3 Módulos de Elasticidad ..... 85
4.4 Matriz de Succión..... 87
4.5 Diagrama de Mohr Coulomb extendido ..... 89
4.6 Relación del Módulo de elasticidad con la Matriz de succión ..... 93
5. Conclusiones y recomendaciones..... 98
5.1 Conclusiones..... 98

5.2 Recomendaciones ..... 100

6. BIBLIOGRAFÍA ..... 103

7. ANEXOS ..... 107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa del sector El Rocío de Guamaní (Google Earth)..... 3

Figura 2 Ubicación del Pozo PCQ 0002 (Google Earth)..... 4

Figura 3 Identificación del pozo de perforación..... 4

Figura 4 Mapa de Cuencas hidrográficas en el Sur de Quito (Avilés L. , 2013)..... 5

Figura 5 Mapa Geomorfológico del Sur de Quito (Avilés L. , 2013). ..... 6

Figura 6 Leyenda del Mapa Geomorfológico del Sur de Quito (Avilés L. , 2013)..... 6

Figura 7 Deyección en abanico tomada de (http://edafologia.ugr.es/). ..... 6

Figura 8 Columna estratigráfica representativa de la cuenca Sur de Quito (Peñafiel A., 2009). ..... 7

Figura 9 Mapa de Niveles freáticos del Sur de Quito (Avilés, 2013). ..... 9

Figura 10 Distribución temporal de la precipitación para tres estaciones meteorológicas a nivel anual en el D.M.Q período 1981 – 2010 (Bastidas, 2016) ..... 10

Figura 11 Variación mensual de la precipitación en la estación M003 Izobamba del D.M.Q (Bastidas, 2016). ..... 10

Figura 12 Aumento capilar en equilibrio con la distribución de contenido de humedad en una columna de suelo orientada verticalmente. Las curvas mostradas, que describen la relación entre la succión y el contenido de humedad, se denominan comúnmente curva característica del suelo (Lu & Likos, 2007). ..... 19

Figura 13. Ilustración de McQueen and Miller (1974), modelo conceptual del comportamiento general de la SWCC (Lu & Likos, 2007). ..... 23

Figura 14. Recipientes herméticamente sellados para realizar la medición del ensayo de succión total (A), y succión matricial (B) es muestras de suelo. (ASTM D5298, 2016) 24

Figura 15. Calibración de curva de succión-humedad para papel filtro Whatman No. 42, y Schleicher and Schuell No. 589 (ASTM D5298, 2016). ..... 25

Figura 16 Fenómenos de deformación y flujo superficiales en un depósito de suelo expansivo parcialmente saturado (Lu & Likos, 2007). ..... 26

Figura 17 Maquina triaxial. ..... 31

Figura 18 Resultado de interpretación de datos del ensayo de compresión simple. ..... 31

Figura 19 Ensayos triaxiales CD para un limo parcialmente saturado (Blinght, 1967) . 32

Figura 20 Diagrama extendido de Mohr-Coulomb mostrando estados de esfuerzo en la falla de los resultados de ensayos triaxiales en un limo parcialmente saturado (Blight, 1967). ..... 33

Figura 21 Diagrama de Mohr-Coulomb extendido teórico (Meza Ochoa, 2012). ..... 34

Figura 22 Broca de diamantina NW para extracción de núcleos de roca (Ivan, 2009). 36

Figura 23 Media caña o “Cuchara partida” (ASTM 1586, 2011). ..... 41

Figura 24 Tipos de martillo para ensayo Estándar de Penetración SPT (ASTM 1586, 2011). ..... 41

Figura 25 Tubo de parel delgada (Shelby) (ASTM 1587, 2015). ..... 43

Figura 26 Perforadora ACKER ACE. ..... 45

Figura 27 (a) Fases del suelo en estado natural (Real), (b) Fases del suelo por separado (DAS, 2015). ..... 48

Figura 28 Ensayo del hidrómetro (DAS, 2015). ..... 51

Figura 29 Curva de distribución de tamaño de partículas: análisis de tamiz y de hidrómetro (Das, 2015). ..... 52

Figura 30 Límites de Atterberg (DAS, 2015). ..... 53

Figura 31(a) Copa de Casagrande, (b) ranurador (DAS, 2015). ..... 53

Figura 32 Ensayo de limite plástico (Das, 2015). ..... 54

## ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 1 Estratigrafía del pozo PCQ 0002, muestras obtenidas in situ del 13 de agosto al 19 de agosto del 2019 en periodo de precipitaciones bajas según Bastidas (2016). ..... 70

Grafica 2 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 2m, contenido de humedad 26% ..... 71

Grafica 3 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 3m, contenido de humedad 39% ..... 71

Grafica 4 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 4m, contenido de humedad 32% ..... 72

Grafica 5 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 5m, contenido de humedad 32% ..... 72

Grafica 6 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 5m, contenido de humedad 32% ..... 73

Grafica 7 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 6m, contenido de humedad 31% ..... 73

Grafica 8 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 7m, contenido de humedad 28% ..... 74

Grafica 9 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 7m, contenido de humedad 28% ..... 74

Grafica 10 Esfuerzo vs deformación de muestras inalteradas, profundidad 8m, contenido de humedad 30% ..... 75

Grafica 11 Resumen de los ensayos de compresión simple para muestras inalteradas.. 75

Grafica 12 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 8%..... 78

Grafica 13 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 12%..... 78

Grafica 14 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 17%..... 79

Grafica 15 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 22%..... 79

Grafica 16 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 23%..... 80

Grafica 17 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 26%..... 80

Grafica 18Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 31%..... 81

Grafica 19 Resumen de los ensayos de compresión simple para especímenes reconstituidos..... 81

Grafica 20 Módulos de Elasticidad en muestras de suelo reconstituidas..... 85

Grafica 21 Módulos de Elasticidad en especímenes de suelo inalterados..... 86

Grafica 22 Módulo de Elasticidad vs Contenido Volumétrico de Agua..... 86

*Grafica 23 Curva característica del Limo-Arenoso ML comparada con curvas características de diferentes suelos* [10] ..... 87

Grafica 24 curva característica del suelo Succión versus Saturación..... 88

Grafica 25 Resistencia al Corte versus Succión Matricial en muestras de suelo reconstituidas..... 90

Grafica 26 Resistencia al Corte versus Matriz de Succión..... 91

Grafica 27 Diagrama extendido de Mohr Coulomb..... 92

Grafica 28 Diagrama extendido de Mohr coulomb (Cortante vs Succión)..... 92

Grafica 29 Diagrama extendido de Mohr coulomb (Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal)..... 93

Grafica 30 Módulo de elasticidad vs Matriz de succión..... 96

Grafica 31 Esfuerzo Ultimo vs Saturación..... 97

Grafica 32 Esfuerzo Ultimo vs Succión..... 97

Grafica 33 Profundidad de sondeo vs Matriz de succión..... 98

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 0 al 4, fecha 13/08/2019. ..... 37

Fotografía 2. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 4 al 8, fecha 13/08/2019. ..... 38

Fotografía 3. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 8 al 12, fecha 13/08/2019. ..... 38

Fotografía 4. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 12 al 16, fecha 13/08/2019. ..... 38

Fotografía 5. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 16 al 20, fecha 13/08/2019. ..... 39

Fotografía 6. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 20 al 24, fecha 13/08/2019. ..... 39

Fotografía 7. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 24 al 28, fecha 13/08/2019. ..... 39

Fotografía 8. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 28 al 30, fecha 13/08/2019. ..... 39

Fotografía 9 Recipiente disecador ..... 57

Fotografía 10 Alisado de las caras de una probeta de suelo para el ensayo de matriz de succión ..... 57

Fotografía 11 Frasco de Cristal con Muestra de suelo para realizar ensayo de matriz de succión ..... 58

Fotografía 12 Almacenamiento de los frascos de Cristal para realizar ensayo de matriz de succión ..... 58

Fotografía 13 Medición de los Papeles filtro para realizar ensayo de matriz de succión 59

Fotografía 14 Suelo utilizado para realizar probetas reconstituidas ..... 60

Fotografía 15 Bolsas plásticas utilizadas para almacenar el suelo seco para la conformación de probetas reconstituidas ..... 62

Fotografía 16 Mescla del suelo y agua para conformar las probetas..... 63

Fotografía 17 Molde utilizado en la compactación de las muestras reconstituidas para el ensayo de matriz de succión ..... 63

Fotografía 18 Equipo utilizado en la compactación de las muestras reconstituidas para el ensayo de matriz de succión ..... 64

Fotografía 19 Equipo utilizado en la compactación de las muestras reconstituidas para el ensayo de matriz de succión ..... 64

Fotografía 20 Muestras de suelo Reconstituidas para el ensayo de matriz de succión .. 65

Fotografía 21 Ensayo Harvard Miniatura ..... 67

Fotografía 22 Equipo para el ensayo Harvard Miniatura ..... 67

Fotografía 23Equipo para el ensayo Harvard Miniatura ..... 67

Fotografía 24 Maquina triaxial del laboratorio de suelos de la PUCE ..... 68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango aproximado de medición de succión para varias técnicas de medición. 23

Tabla 2 Resultado de los cálculos para conformar probetas de suelo reconstituido para el ensayo de matriz de succión ..... 62

Tabla 3 Resultado de los cálculos para conformar probetas de suelo reconstituido para el ensayo de compresión simple ..... 66

Tabla 4 Resultados de ensayos de compresión simple para muestras de suelo inalteradas ..... 77

Tabla 5 Datos obtenidos de los ensayos de compresión simple en muestras de suelo reconstituido con diferentes contenidos de humedad. ..... 84

Tabla 6 Datos completos para Muestras de suelo Reconstituidas ..... 94

Tabla 7 Datos completos para especímenes de suelo inalterados ..... 95

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

Esta tesis nace como un aporte a la investigación que se realiza en un convenio por parte del distrito metropolitano de Quito (DMQ), la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) y la Escuela Politécnica Nacional (EPN), la misma está destinada a la actualización de la microzonificación sísmica de Quito, su importancia es relevante debido a la necesidad de: procesos dinámicos de investigación, la utilización de nuevas técnicas y tecnologías y ajustes de investigaciones anteriores.

Quito se encuentra ubicado en una zona altamente sísmica, por lo que cada cierto periodo de tiempo hay sismos que afecta significativamente a las obras civiles llegándolas a destruir en muchos casos, en definitiva en todos los siglos hay uno o más sismos con características alarmantes o destructivas en el sistema de fallas geológicas de Quito (Yepes 2014)

Se realiza esta investigación en el sur de Quito ya que se observa un crecimiento poblacional importante en los últimos años y a medida que se conforman los asentamientos poblacionales, con éstos, se proyectan obras especiales como son vías, hospitales, centros comerciales, etc., Para todos estos proyectos civiles se necesita ser más preciso y ahondar en los detalles que se tiene del suelo en esta parte de la ciudad (Cortez 2015).

De acuerdo con el conocimiento que se tiene hasta el momento de la conformación del subsuelo del sur de Quito en términos geológicos, se lo define como un sub-valle encerrado en dos francos, uno es el sistema volcánico Pichincha - Atacazo y el segundo son pequeñas elevaciones al sur (La loma de Puengasi). Estos francos generan el sub-valle del sur de Quito que es en donde se han depositado y acumulado sedimento por arrastre debido al comportamiento hidrogeológico de la zona, este suelo por lo general es blando, es decir que tiene complicaciones en sus características geomecánicas tanto para condiciones estáticas como dinámicas en su estructura (Avilés 2013).

Al englobar todas las características importantes en el sur de Quito, se destaca el importante crecimiento poblacional, su ubicación en una zona altamente sísmica, condiciones hidrogeológicas particulares y la conformación de esta mini cuenca por

material piroclástico y de arrastre de flujos depositados en varios estratos con diferentes niveles de consistencia (Alvarado et al. 2014), de este análisis se desprende la necesidad de evaluar el comportamiento mecánico del suelo desde el punto de vista de una condición más real del sitio con lo cual la aplicación de la mecánica de suelos parcialmente saturados posibilita este objetivo.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante muchos años hasta la actualidad los asentamientos o hundimientos que afectan a las viviendas en el sur de Quito no se han estudiado a fondo debido a la complejidad de su suelo, en sectores como Turubamba y Solanda se han visto afectadas cientos de viviendas las cuales en varios casos se declararon con un alto grado de vulnerabilidad lo que causó su inmediata demolición, esto significa pérdidas económicas para el Municipio de Quito y un impacto social negativo (Lagla 2016).

Hasta el momento se cuenta con información de la caracterización geológica-geotécnica como parte de un estudio de Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMAPS) realizado por la Universidad Central del Ecuador (UCE), en donde se recomienda actualizar, ampliar y profundizar este estudio ya que se obtuvieron datos muy superfluos (Avilés 2013).

La zona del sur de Quito es muy compleja desde varios puntos de vista como su conformación hidrológica es decir el arrastre de los sedimentos debido al agua, sus condiciones volcánicas, su ubicación en una zona de alta actividad sísmica, el uso de suelo que se le dio en el pasado como zona agrícola (Anónimo 2011). etc., todo esto configura la condición que se tiene actualmente, además una característica importante es que en el sur de la ciudad existe una mayor precipitación pluvial que en el norte de Quito según los resultados del INAMI estudiados en “Guía climática agroecoturística para el cantón Quito-provincia de Pichincha 2014 (Bastidas 2016).

La plataforma donde se asienta la ciudad de Quito está formada por sedimentos de origen volcánico en su mayoría flujos piroclásticos, pero lo que diferencia el sur del norte es su comportamiento hidrogeológico, estratificación y morfología esto hace que el arrastre de sedimentos sea especial, conformado así suelos blandos los cuales se encuentran con mayor frecuencia en el sur de Quito.

Los suelos Blandos como los encontrados en el subsuelo del sur de Quito se encuentran en condiciones saturadas o parcialmente saturadas, al hablar de una condición parcialmente saturada se estudia un área de la mecánica de suelos diferente a la convencional por lo que las teorías convencionales utilizadas en suelos comunes no se ajustan a este tipo de suelo, este punto es en dónde irradia el problema y abre un gran campo a la investigación cuyo objetivo es llegar a predecir con mayor precisión el comportamiento de este tipo de suelo.

## 1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

### 1.2.1 Descripción general

El lugar de estudio específico se encuentra ubicado en las coordenadas UTM 17 M 0771098, 9962442 en el sector El Rocío de Guamaní, con una elevación de 3182 m.s.n.m, Entre las calles S57D y Oe7F se ubica una cancha deportiva (ver figura 1 y 2), en el lugar se realizaron los trabajos en campo mediante diferentes métodos de perforación, el nombre del sitio de perforación es PCQ 0002. Para una mejor ubicación del lugar obsérvese el siguiente mapa.

*Figura 1 Mapa del sector El Rocío de Guamaní (Google Earth)*

*Figura 2  Ubicación del Pozo PCQ 0002 (Google Earth)*

En el lugar se realizaron cuatro perforaciones por tres métodos diferentes, para la ubicación más exacta de dónde se realizaron dichas perforaciones se fundió en el campo un cilindro de hormigón en el cual se identifica el número de pozo y el nivel desde donde se tomaron las muestras (ver figura 3).

*Figura 3 Identificación del pozo de perforación*

1.2.2 Geología de Quito

Quito se encuentra en un valle el cual llega a altitudes desde los 2700 m.s.n.m en zonas bajas como El Condado y hasta los 3100 m.s.n.m en zonas elevadas como el Rocío de Guamaní, la figura alargada que tiene la capital se debe a su ubicación entre dos sistemas montañosos de la cordillera de los Andes observando al Este las Lomas de Puengasí, Guanguiltagua e Itchimbía y al oeste pertenecientes al volcán pichincha el Guagua Pichincha, Rucu Pichincha y Cóndor Güachana. Como parte de este sistema montañoso se encuentran al suroeste el complejo volcánico Atacazo Ninahuiulca que de igual manera confina la ciudad. Todos estos volcanes, cerros, lomas etc., junto con el régimen climático y fenómenos naturales ocurridos en el pasado han conformado el relieve y subsuelo de Quito (Avilés 2013).

El Pozo PCQ 0002 se ubica por debajo del punto más alto de la cuenca del Rio Caupicho ver Figura 4.

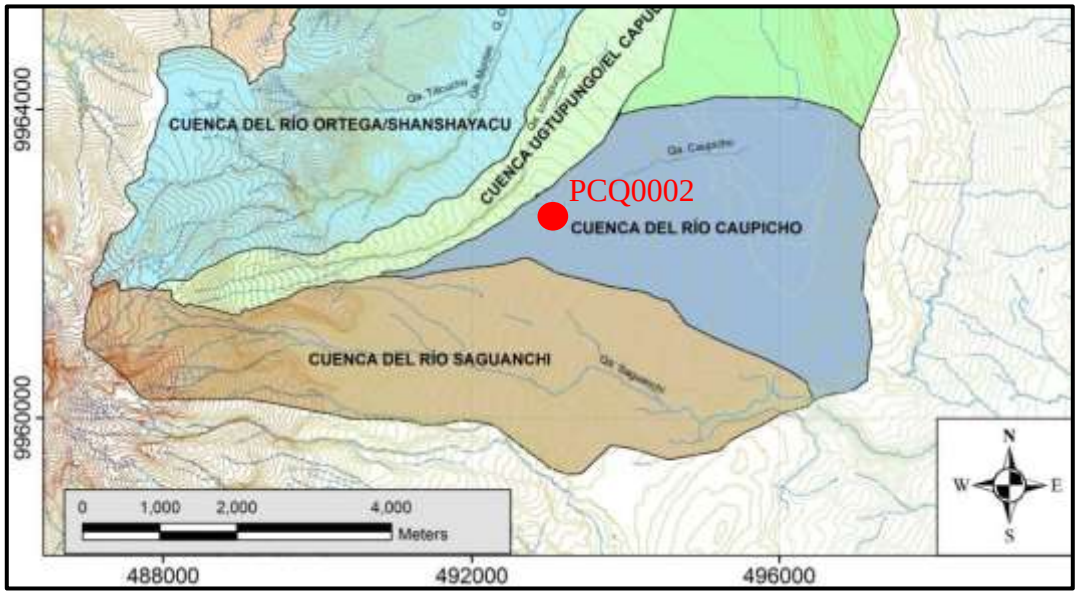



*Figura 4 Mapa de Cuencas hidrográficas en el Sur de Quito (Avilés L. , 2013).*

Al observar el mapa geomorfológico y ubicar el punto de análisis (Ver Figura 5 y 6) se ubica en la región del valle interandino, su sistema es una cuenca interandina, un subsistema de relieves de denudación y depósitos de origen aluvial es decir que la pendiente varia en el terreno y se forma por el arrastre de sedimento debido a la acción de corrientes de agua, la pendiente del terreno es suave con características de torrente y cono de deyección en abanico (Figura 7).

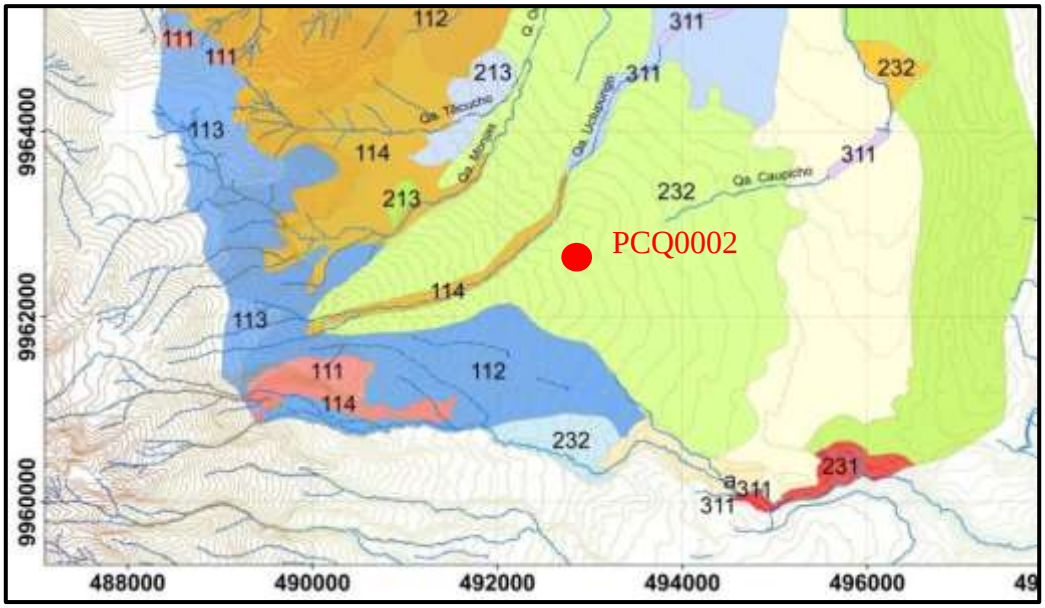



*Figura 5 Mapa Geomorfológico del Sur de Quito (Avilés L. , 2013).*

| Región | Sistema | Subsistema | Simbolo | Color | Pendiente | Unidades |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | pie de monte |
| Valle interandino | Cuenca Interandina (2) | Lomas estructurales alargadas (22) | 221 | | 5 – 15% Suave | • Flancos occidentales de la Loma Puengasí |
| | | Relieves de denudación y depositación de origen aluvial (23) | 231 | | 45 – 75 % Muy abrupta | • Canales de disección de aguas encauzadas |
| | | | | | 15 – 25 % Moderada | |
| | | | 232 | | 24 – 45 % Abrupta | • Torrente, cono de deyección en abanico |
| | | | | | 15 – 25 % Moderada | |
| | | | | | 5 – 15% Suave | |
| | Relieves de Origen Antrópico (3) | | 311 | | | • Cortes y rellenos artificiales |

*Figura 6 Leyenda del Mapa Geomorfológico del Sur de Quito (Avilés L. , 2013).*

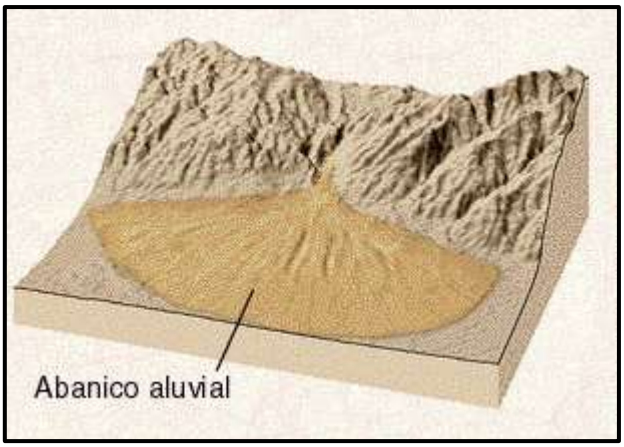



*Figura 7 Deyección en abanico tomada de (http://edafologia.ugr.es/).*

Villagómez como se citó en (Avilés 2013), afirma que la cuenca del sur de Quito se encuentra constituida por dos formaciones geológicas: Formación Machángara (Pleistoceno Tardío) y Formación Cangahua (Holoceno). La formación Machángara se encuentra conformada por el Miembro Basal y el Miembro Quito, el Miembro Basal a su vez constituido por la unidad volcánica Atacazo, la unidad volcánica Pichincha y volcánicos indiferentes que constituyen el basamento de la subcuenca del sur de Quito. El miembro Quito se encuentra formado por la unidad Fluvio lacustre El Pintado y la unidad volcánica sedimentaria Guamaní, que forma una franja alargada con pendientes muy suaves (Avilés 2013). (ver Figura 8)

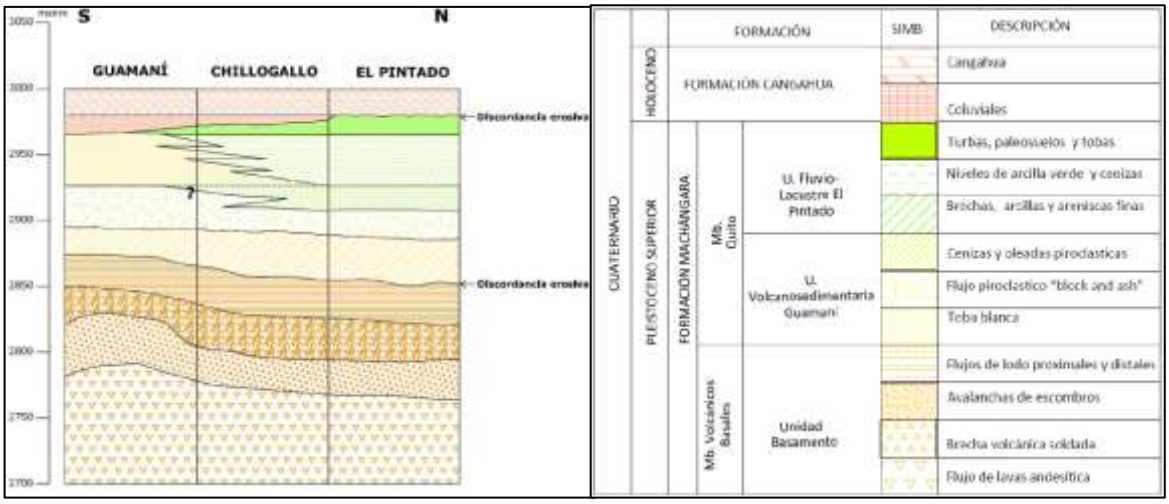



*Figura 8 Columna estratigráfica representativa de la cuenca Sur de Quito* (Peñafiel A. 2009).

El estrato que conforma el sector y profundidad de estudio de 30 metros es el de Guamaní conformado en su gran mayoría en la edad geológica del Cuaternario Holoceno en donde se han depositado cangahuas y coluviales, esto se lo podrá ratificar con el suelo extraído de las perforaciones realizadas para este trabajo, no se llegará a estudiar el material conformado en el pleistoceno superior.

### 1.2.3 Hidrogeología del sur de Quito

Los estudios hidrogeológicos son de especial interés no solo para la provisión de agua a la población sino también para consideraciones geotécnicas debido a que tanto las aguas superficiales, como aguas subterráneas, dan lugar a procesos de meteorización física y química, provocando cambios en el relieve, movimientos del terreno, movimientos como

deslizamientos, cambios en las propiedades geomecánicas de los materiales (Avilés 2013).

En la ciudad de Quito existen dos acuíferos distintos: uno en la parte Norte y el otro en el Sur, los dos son independientes y separados con una zona impermeabilizada al nivel del Panecillo. Los límites son al Norte el Panecillo, al Sur La Joya, al oeste el Atacazo y al este el valle de los Chillos, el acuífero Sur se subdivide en dos subsectores caracterizados por distintas litologías: Yacimiento el Pintado y Yacimiento Guamaní (Avilés 2013).

El Yacimiento Guamaní Presenta 3 niveles, un acuitardo, un acuífero superior y un acuífero inferior. El acuitardo se encuentra presente en la formación Cangahua, su nivel estático se encuentra entre 2865 y 2993 m.s.n.m. En el barrio Guamaní, el nivel freático se encuentra casi superficial, tiene una dirección N-NE y descarga en el Río Machángara. El acuífero superior es un acuífero multicapa y semiconfinado tiene un espesor aproximadamente de 48m. Su nivel freático está entre 2790 y 3030 m.s.n.m. La dirección está NE-E. El inferior es un acuífero confinado con artesianismo fluyente, se encentra hasta 120 m de profundidad y tiene un espesor de más de 50 m (Avilés 2013).

Uno de los datos más importantes que se requiere en este trabajo es el nivel freático, el cual está parcialmente controlado por la topografía, por la naturaleza de las rocas próximas a la superficie y por las condiciones climáticas locales (Avilés 2013).

Encima del nivel freático los poros del suelo pueden contener aire o agua, por lo cual se la llama zona de aireación. En la zona freática, por debajo del nivel freático, los intersticios están llenos de agua por lo cual se la llama también zona de saturación. En la zona de aireación encontramos agua higroscópica (adherida en una capa delgada alrededor de los granos del suelo) y agua capilar ubicada en los poros más pequeños y también en una franja que comprende la región por encima del nivel freático (tensión capilar). El agua en tránsito dentro de los intersticios más gruesos del suelo es el agua gravitacional, la que se encuentra mayormente en la zona de saturación. El elemento variante más importante del suelo en la zona de aireación es por lo tanto el agua capilar (Avilés 2013).

En la investigación de (Avilés 2013) se realizó el mapa de zonificación de niveles freáticos (Ver Figura 9) con los datos de 115 perforaciones, este mapa describe niveles freáticos desde superficiales hasta los 10 metros.

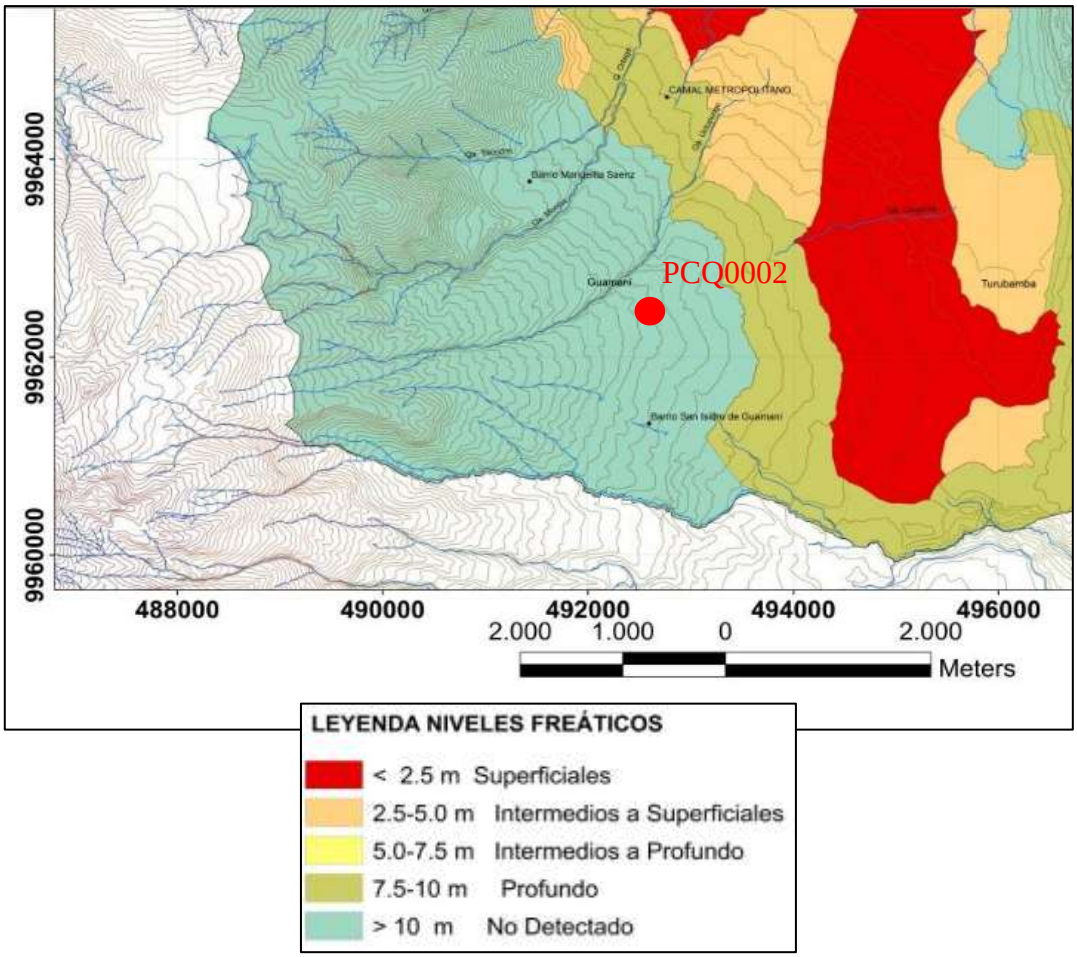



*Figura 9 Mapa de Niveles freáticos del Sur de Quito* (Avilés 2013).

Al ubicar en el mapa la zona de perforación podemos observar que el nivel freático no se lo encuentra a los 10m de profundidad, al igual que en los sondeos realizados en los 30 m de las 3 perforaciones en el trabajo en campo.

### 1.2.4 Infiltración por precipitaciones

En la investigación realizada por (Bastidas 2016) se observa en la (Figura 10) la variabilidad interanual de la precipitación para el área del D.M.Q dando un rango espacio temporal de 400 mm como mínimo y 2.200 mm como máximo en promedio multianual, se observa que la zona con más lluvia es la zona sur representada por la estación meteorológica Izobamba (M003); la zona con menor precipitación es la zona Nororiental representada por la estación meteorológica La Tola (M002) y la zona Centro Norte

(M024) tiene una precipitación media representada por la estación Iñaquito (Bastidas 2016).

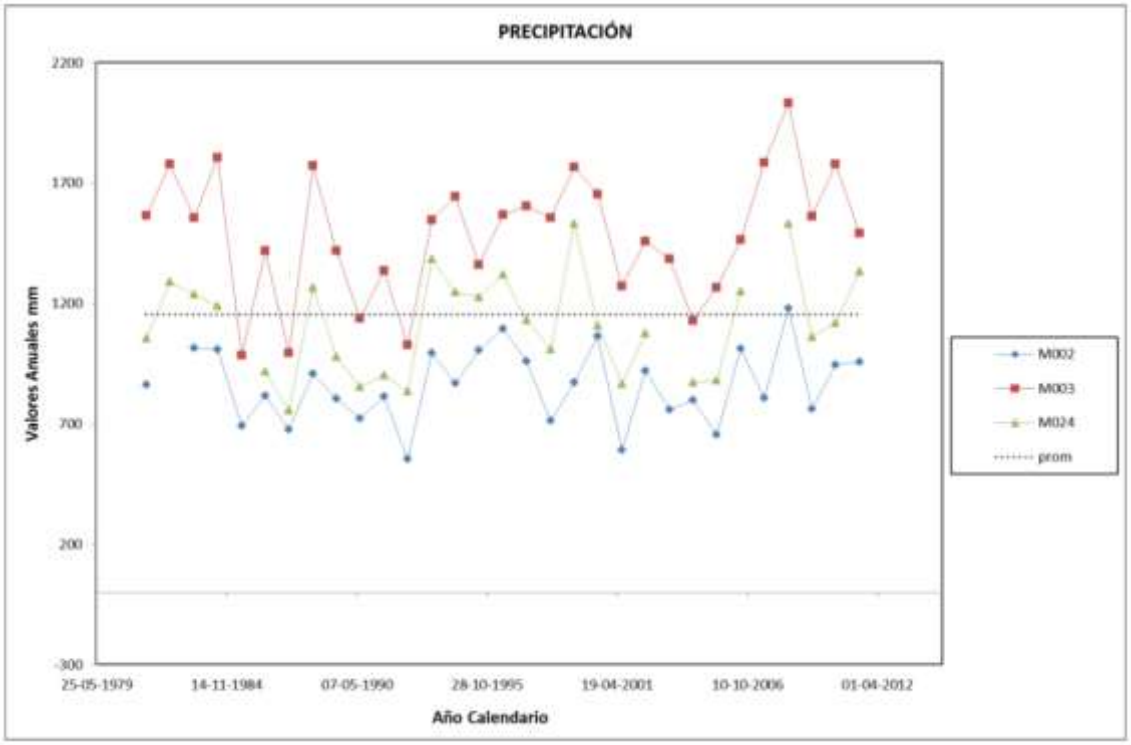



*Figura 10 Distribución temporal de la precipitación para tres estaciones meteorológicas a nivel anual en el D.M.Q período 1981 – 2010* (Bastidas 2016).

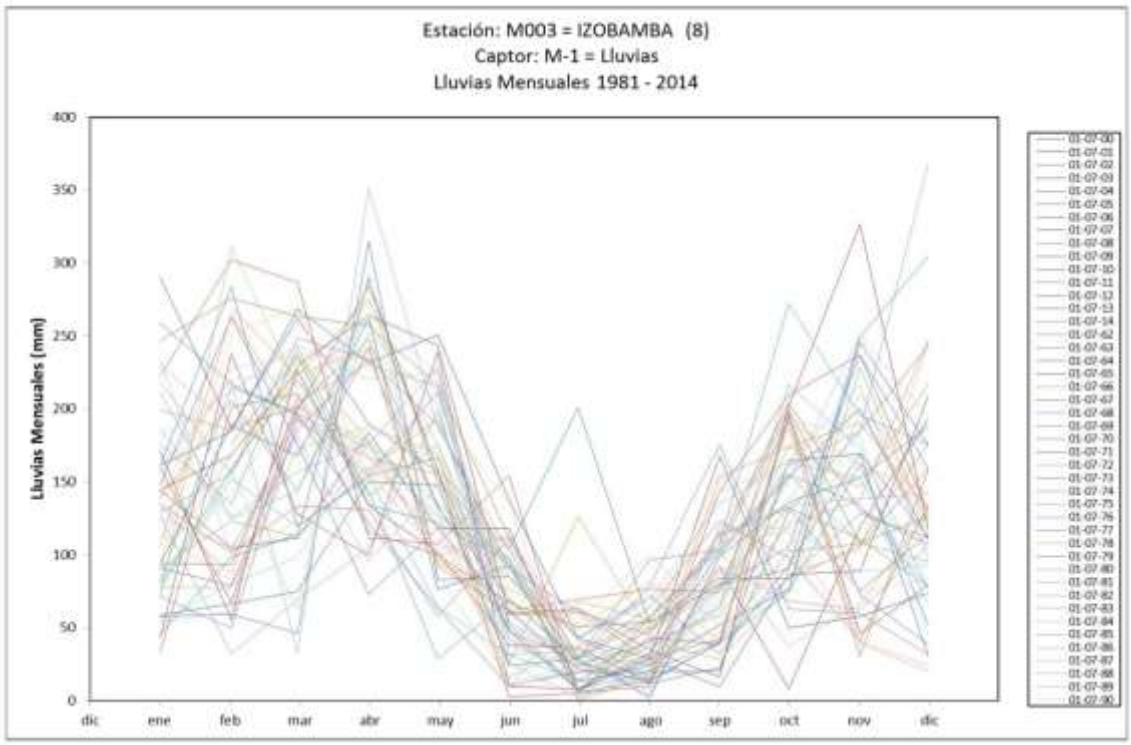



*Figura 11 Variación mensual de la precipitación en la estación M003 Izobamba del D.M.Q* (Bastidas 2016).

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo general

La caracterización física y geomecánica, y la determinación de la matriz de succión del subsuelo, en el Distrito Metropolitano de Quito sector el Rocío de Guamaní.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Definir la estratigrafía del suelo sobre la base del perfil continuo del sector mediante el ensayo manual visual.
- De la información obtenida de los ensayos de campo y laboratorio en un mismo sector a 30 metros de profundidad aplicando las normativas vigentes en el Ecuador, definir las características físicas tales como: Granulometría, contenido de humedad, densidad, relación de vacíos, porosidad, gravedad específica, límites Atterberg.
- Obtener la resistencia a la compresión mediante el ensayo de compresión simple para diferentes grados de saturación.
- Definir el módulo de elasticidad en base a los datos obtenidos de los ensayos de compresión simple.
- Determinar la matriz de succión mediante el método del papel filtro aplicando la norma ASTM D5298-16.
- Establecer una posible relación de la matriz de succión con el Módulo de elasticidad de suelos parcialmente saturados.

## 1.4 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para poder realizar esta investigación se ha debido seguir los siguientes procesos ordenados, los cuales se describen a continuación.

### 1.4.1 Primera etapa: Trabajo de campo

Se realizaran tres procedimientos en el campo, el primero un sondeo y prospección que permite la obtención de muestras de manera continua, permite la extracción de todo el

perfil estratigráfico de una muestras completas alteradas, el segundo es una perforación con ensayos de penetración SPT cada metro y toma de muestras inalteradas, el tercer procedimiento es una perforación con toma de muestras inalteradas igual que el segundo, pero con diferentes métodos de extracción, entre los dos últimos procedimientos se pretende obtener mayor información y más precisa, los sondeos se realizan hasta treinta metros de profundidad.

La primera muestra (punto A) no se utiliza para realizar algún proceso en laboratorio ya que es una muestra contaminada por su forma de extracción. Este tipo de sondeo (diamantina) se lo realiza con agua, si el estrato presenta una consistencia muy alta o similar a una roca, con poca influencia del contacto con agua, la muestra podría considerarse no alterada. En la segunda y tercera perforación del punto B y C se realizará el sondeo rotación percusión con toma de muestras inalteradas con tubos de pared delgada cuando se trate de materiales blandos y un tubo de pared doble para suelos de mayor resistencia. La decisión del número de muestras con cualquiera de los dos métodos será según el perfil encontrado en la primera perforación.

El trabajo en campo consta de la toma de muestras alteradas e inalteradas in situ, su correcto almacenamiento y su transporte al laboratorio en donde se continuará con la segunda etapa, todos estos procesos se realizan siguiendo la normativa norteamericana ASTM la cual es una recopilación de conocimientos y experiencias de varios expertos de todo el mundo.

Los ensayos realizados en campo para fines de esta tesis son:

- ASTM D1586 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Sampling of Soils.
- ASTM 1587 Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes.
- ASTM 2113 Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Exploration.
- ASTM D4220 Standard Practices for Preserving and Transporting Soil.
- ASTM D2488 Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedures).

### 1.4.2 Segunda etapa: Trabajo de laboratorio

Una vez que las muestras extraídas en campo llegan al laboratorio se procede a realizar los ensayos respectivos, lo ideal es no esperar demasiado tiempo para ensayar las muestras de suelo en especial cuando el contenido de humedad es un factor importante, esto por lo general en suelos sobre el nivel freático o suelos parcialmente saturados.

De las muestras alteradas obtenidas del ensayo de SPT se realiza la clasificación de acuerdo al Sistema de clasificación Unificada Americana (SUCS), según la granulometría, límites de consistencia o límites de Atterberg (Limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad).

- ASTM D4318 Standard Test Methods for liquid limit, plastic limit and Plasticity Index of Soils.
- ASTM D854 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- ASTM D 2216 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- ASTM D6913 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.
- ASTM D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- ASTM D7263 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimen.

Con las muestras “inalteradas” válidas obtenidas del tubo de pared delgada se realizará ensayos de compresión simple siguiendo la norma correspondiente, además se realizan ensayos para la determinación de la matriz de succión mediante el método del papel filtro.

- ASTM D2166 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.
- ASTM D 5298 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper
- ASTM D698 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)).

- ASTM D7263 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimen.
- STP479 Suggested Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using Harvard Compaction Apparatus.

### 1.4.3 Tercera etapa: Procesamiento de datos y análisis de resultados

Una vez que los datos en bruto obtenidos de los ensayos de laboratorio sean digitalizados se procede a la depuración de estos, es decir observar que tengan concordancia o sentido unos con otros. Si algún dato, posiblemente sea erróneo se deberá descartar. Esto puede ocurrir por posibles descuidos en la ejecución o alteración de la muestra, durante el ensayo.

De ser necesario aumentar el número de ensayos por la falta de datos para el análisis estadístico, se los deberá realizar con el material almacenado en laboratorio o de ser posible realizar una nueva perforación para obtener nuevas muestras. Una vez que los datos estén completos y validados se puede establecer la estratigrafía de la zona de ensayo, la clasificación del suelo en los 30 metros de estudio, y establecer las relaciones entre la *succión versus saturación*, *succión versus la resistencia a la compresión* y *succión versus módulo de elasticidad*, estas relaciones se las realiza tanto en las muestras de suelo inalteradas como reconstituidas.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Los ingenieros civiles estudian las propiedades de los suelos desde su origen, distribución de tamaño de grano, la capacidad de drenar el agua, compresión, resistencia al corte y la capacidad de soporte de carga, todo esto para poder aplicar los datos obtenidos en la resolución de problemas prácticos (Das 2015).

Es importante conocer el origen y formación de un suelo ya que sus características geomecánicas dependerán de esta estructura, además las propiedades físicas se establecen principalmente por los minerales que constituyen las partículas del suelo, esto quiere decir la mineralogía de su origen (Das 2015). En el caso particular de este trabajo, como se expuso en el capítulo de geología, el origen de los sedimentos es volcánico, esto debe ser

considerado siempre ya que puede intervenir en el comportamiento mecánico del suelo estudiado.

### 2.1.1 Suelos parcialmente saturados

En el año 1943 Karl Terzaghi publica su *Theoretical Soil Mechanics* en donde define a la mecánica del suelo como “la aplicación de las leyes de la mecánica e hidráulica a los problemas de Ingeniería relacionados con los sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas producidas por la desintegración mecánica y química de las rocas”, esto independientemente de si tiene o no una mezcla de componentes orgánicos.

La apreciación emergente del suelo parcialmente saturado en la práctica de ingeniería geotécnica y la educación requiere un refinamiento de la definición de la mecánica de suelos de Terzaghi. Los materiales tratados en problemas de mecánica de suelos parcialmente saturados son posiblemente los mismos que en la mecánica de suelos de Terzaghi, pero bajo una condición muy específica de "no saturados". El calificativo " no saturado " tiene el mismo significado que su alternativa " parcialmente saturado" y simplemente indica que el grado de saturación de poros del agua es cualquier valor menor que la unidad o, más específicamente, que se introduce una tercera fase en el sistema bifásico de suelo saturado. En el moderno entorno educativo y profesional de ingeniería geotécnica, donde el énfasis ha sido históricamente limitado al ámbito de los materiales cohesivos saturados y los materiales sin cohesión completamente secos o saturados, el calificativo "parcialmente saturado" es realmente significativo (Lu and Likos 2007).

Al tratar con suelos parcialmente saturados, se requieren no sólo los principios de la mecánica y la hidráulica, sino también de ***la física interfacial fundamental*** la cual se refiere principalmente a los principios termodinámicos que describen el equilibrio entre las fases gaseosa, sólida y líquida, la transición de la materia de una fase a otra y la adsorción o desorción de una fase de la materia hacia o desde una fase adyacente de materia diferente, las fuerzas y energías asociadas con estas interacciones multifase, por su propia naturaleza, separan el comportamiento del suelo no saturado del comportamiento del suelo saturado (Lu and Likos 2007).

La referencia de Terzaghi a los problemas de ingeniería se desarrolló a raíz de un período de gran incertidumbre en la comprensión básica del comportamiento del suelo. Su

formalización de la mecánica del suelo proporcionó una base racional para abordar muchos de los problemas de ingeniería apremiantes de la época, especialmente la capacidad de carga, consolidación y asentamiento, estabilidad de taludes, presión lateral de la tierra y problemas relacionados con la filtración. Además de estos problemas tradicionales de ingeniería geotécnica, los problemas prácticos de interés en la actualidad también pueden incluir problemas geo ambientales, sísmicos, de recuperación de tierras y otros desafíos que han salido a la luz en los últimos 30 años. Estos problemas emergentes han creado importantes subdisciplinas dentro del campo más general de la ingeniería geotécnica, que a menudo se benefician de una comprensión profunda de los principios físicos y termodinámicos que rigen el comportamiento del suelo parcialmente saturado (Lu and Likos 2007).

Extendiendo la definición clásica de Terzaghi, por lo tanto, la mecánica de suelos parcialmente saturados podría definirse como "la aplicación de las leyes de la mecánica, la hidráulica y la física interfacial a los problemas de ingeniería relacionados con suelos parcialmente saturados".

### 2.1.2 Aplicaciones de la Mecánica de suelos parcialmente saturados

La historia de la mecánica del suelo parcialmente saturado está incrustada en la historia de la hidrología, la mecánica del suelo y la física del suelo. Los problemas de ingeniería que involucran suelos parcialmente saturados abarcan numerosas subdisciplinas y prácticas dentro del campo general de la ingeniería civil. Los hidrólogos, por ejemplo, han reconocido desde hace mucho tiempo que el modelado de los sistemas y ciclos regionales o locales de aguas superficiales y subterráneas debe considerar los procesos de infiltración, evaporación y transpiración que ocurren en la zona del suelo parcialmente saturado cercano a la superficie. La evaluación cuantitativa del flujo de humedad en el límite entre la atmósfera y el subsuelo requiere no solo el conocimiento de las propiedades relevantes del agua del suelo y los poros, sino también las condiciones ambientales predominantes en la interfaz suelo-atmósfera. El suelo parcialmente saturado a menudo comprende materiales de cobertura o barrera para vertederos e instalaciones de almacenamiento de desechos peligrosos de interés para la comunidad geo ambiental. El transporte de contaminantes y los procesos de lixiviación son a menudo fenómenos de transporte de fluidos estrictamente insaturados, que ocurren en muchos casos como problemas de transporte multifásico. A medida que la política nacional e internacional

con respecto a la salud del medio ambiente se está volviendo cada vez más regulada, el reconocimiento de este tipo de problemas geo ambientales y el desarrollo de soluciones a partir de un marco de mecánica de suelos parcialmente saturados se está volviendo cada vez más común (Blight 2013).

Muchos de los problemas de ingeniería geotécnica más tradicionales también caen total o parcialmente en la categoría de problemas de mecánica de suelos parcialmente saturados.

La compactación, por ejemplo, una aplicación clásica que involucra suelo parcialmente saturado, ha sido una práctica rutinaria para mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo desde mucho antes de la formación de la ingeniería civil como disciplina formal a mediados del siglo XIX. El suelo compactado que comprende los muchos movimientos de tierra construidos en todo el mundo se considera más apropiadamente desde un marco de suelos parcialmente saturados (Blight 2013).

Desde hace tiempo se reconoce que los suelos expansivos representan una grave amenaza para la infraestructura de ingeniería civil, como carreteras, viviendas e instalaciones de transporte a nivel nacional e internacional. Las formaciones de suelo expansivos sólo en los Estados Unidos son responsables de miles de millones de dólares en costos de daños cada año, una cantidad superior a la de todos los demás riesgos naturales combinados, incluidos terremotos, inundaciones, incendios y tornados (Jones y Holtz, 1973). Los suelos expansivos han sido objeto, si no la fuerza impulsora, de la investigación de suelos parcialmente saturados desde las primeras etapas de la formulación de los principios de mecánica de suelos parcialmente saturados.

Los suelos colapsables también representan una amenaza significativa en muchas áreas del mundo. Estos suelos problemáticos, que se caracterizan por los depósitos masivos de loess (arcillas de origen eólico) en el centro de los Estados Unidos, están marcados por un tejido estructuralmente sensible débilmente cementado por una pequeña fracción de arcilla. Tras el humedecimiento, que generalmente ocurre como un evento de precipitación repentina o un proceso gradual asociado con la urbanización y el desarrollo, los enlaces de cementación se debilitan y el tejido inicialmente flojo se colapsa y se densifica, lo que a menudo resulta en un asentamiento dramático y perjudicial. Cualquier enfoque fundamental para mitigar los riesgos de colapso del suelo requiere una comprensión del papel de las interacciones de los poros con el agua en la escala

microscópica de la interfaz sólido-líquido, un sello distintivo de la mecánica del suelo parcialmente saturados (Lu and Likos 2007).

### 2.1.3 Fenómenos asociados al Suelo Parcialmente Saturados

Si bien el desarrollo de la teoría y las técnicas en mecánica de suelos parcialmente saturados requiere principios extraídos de la mecánica, la hidráulica y la física interfacial, es conveniente clasificar los diversos problemas de ingeniería geotécnica que involucran suelos insaturados en tres fenómenos generales, específicamente, fenómenos de flujo, fenómenos de esfuerzo y fenómenos de deformación. Cabe señalar, sin embargo, que la generalización de esta manera es principalmente para propósitos de comprensión y para la conveniencia de presentar los principios, no para establecer límites entre los diferentes problemas geotécnicos. La mayoría de los problemas prácticos de ingeniería generalmente involucran los tres fenómenos al mismo tiempo y de manera conjunta. Una teoría efectiva que describa el comportamiento de deformación del suelo expansivo, por ejemplo, bien podría requerir la aplicación de los principios de esfuerzo, deformación y flujo en medios porosos altamente deformables (Lu and Likos 2007).

### 2.1 4 Fenómenos de flujo

Los fenómenos de flujo requieren principalmente la aplicación de principios hidráulicos y de física interfacial, un ejemplo bien conocido es el flujo capilar, la búsqueda de la fuerza impulsora del flujo capilar había sido objeto de investigación durante muchos años. Ya en la década de 1900, Buckingham (1907) estudió sistemáticamente el aumento y el drenaje capilar en columnas de suelo de laboratorio como el ilustrado en la figura 12. Los primeros datos proporcionaron evidencia de los importantes efectos del tipo de suelo, el tamaño de grano y las propiedades del tamaño de poro en el aumento de capilaridad y la retención de agua en el suelo parcialmente saturado. Como parte de este trabajo inicial, los términos potenciales capilar y conductividad capilar se introdujeron como la fuerza impulsora y la variable de control del material, respectivamente, para el flujo de fluido capilar. Más tarde, otros renombraron el término general como *potencial químico*, para incluir componentes del potencial hídrico de los poros como resultado de especies químicas disueltas, gravedad, capilaridad y efectos fisicoquímicos de corto alcance que ocurren en la interfaz de fase sólido (Lu and Likos 2007).

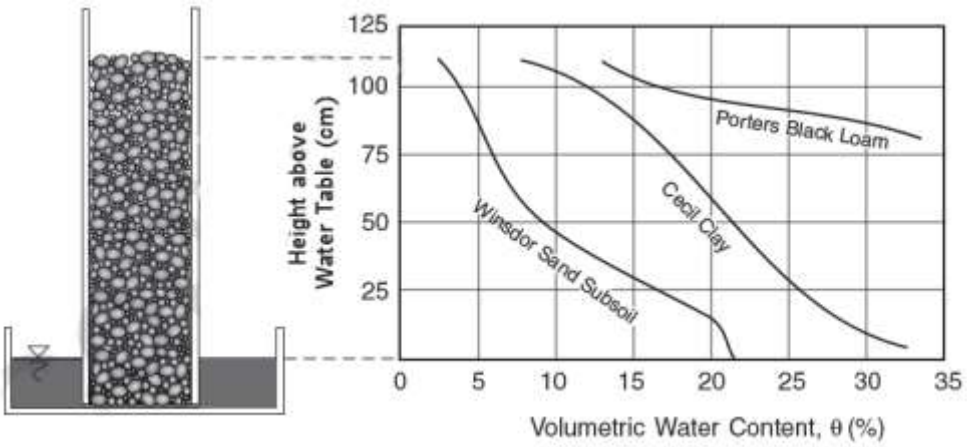



*Figura 12 Aumento capilar en equilibrio con la distribución de contenido de humedad en una columna de suelo orientada verticalmente. Las curvas mostradas, que describen la relación entre la succión y el contenido de humedad, se denominan comúnmente curva característica del suelo* (Lu and Likos 2007).

### 2.1.5 Matriz de succión

Para poder comprender mejor el concepto de la matriz de succión primero se debe comprender el concepto de succión total y potencial del agua en los poros del suelo, la succión total del suelo cuantifica el potencial termodinámico del agua de poro del suelo en relación con un potencial de referencia del agua libre. El agua libre se define como agua que no contiene solutos disueltos, que no tiene interacciones con otras fases (interfaz aire-agua) y que no tiene fuerzas externas distintas a la gravedad (Murray 2010).

Descuidando la temperatura, la gravedad y los efectos de inercia, los mecanismos principales que disminuyen el potencial del agua de los poros del suelo incluyen los efectos capilares, los efectos de adsorción de corto alcance (interacción de partículas y poros) y los efectos osmóticos. El primer mecanismo es exclusivo del suelo insaturado, los dos últimos pueden ocurrir en condiciones saturadas o insaturadas (Murray 2010).

Los efectos de adsorción de corto alcance surgen principalmente de los campos de fuerza eléctricos y de van der Waals (fuerzas de atracción o repulsión entre moléculas) que se producen cerca de la interfaz sólido-líquido y son más importantes para los suelos de grano fino. Los campos eléctricos emanan de la carga negativa neta en la superficie de los minerales arcillosos. Los campos de van der Waals surgen de las interacciones a escala atómica entre las moléculas que comprenden la superficie de la fase sólida (es decir, las partículas del suelo) y las moléculas que comprenden la fase líquida (es decir, el agua de los poros) y ocurren para todo tipo de suelo. El efecto de cada uno de estos campos es

más pronunciado para el agua adsorbida por partículas de arcilla, que posee una carga superficial neta significativa y un área superficial relativamente grande. La fuerza de los campos eléctricos y de van der Waals disminuye rápidamente a medida que aumenta la distancia desde la superficie de la partícula. En consecuencia, los efectos de adsorción de corto alcance son más relevantes con un contenido de agua relativamente bajo o un grado de saturación cuando el agua de poro adsorbida está principalmente en forma de películas delgadas que recubren las superficies de las partículas (Murray 2010).

Los efectos osmóticos son el resultado de solutos disueltos en el agua de los poros que pueden surgir de dos fuentes: como solutos introducidos externamente (por ejemplo, a través de procesos de lixiviación natural), o como solutos naturales adsorbidos por las superficies minerales del suelo (por ejemplo, cationes intercambiables adsorbidos por partículas de arcilla). La hidratación y la solvatación (estabilización del soluto en la solución) de tales solutos disueltos y el ordenamiento estructural asociado de las moléculas de agua vecinas reduce el potencial químico del agua de poro en un grado dependiente de la concentración de soluto disuelto (Murray 2010).

La succión que surge de los efectos combinados de capilaridad y adsorción de corto alcance generalmente se agrupa bajo el término más general de *succión matricial*, que puede designarse en unidades de presión como $\psi_m$. El término *matricial* refleja el uso anterior del término matriz, que tenía la intención de describir el componente de succión que surge de las interacciones entre el agua de poro y los sólidos del suelo, o matriz del suelo. La succión que surge de la presencia de solutos disueltos se denomina succión osmótica, u $\psi_o$. La succión total del suelo $\psi_t$ generalmente se considera la suma algebraica de los componentes matriciales y osmóticos, que se puede escribir de la siguiente manera (Lu and Likos 2007) :

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o$$

Potencial del agua en los poros

La mejor manera de describir el estado energético del agua en los poros del suelo es considerando el cambio de una condición de referencia para el agua libre. El cambio total en el potencial hídrico de los poros $\Delta\mu_t$ resultante de los diversos mecanismos de succión

físicos y fisicoquímicos en el suelo no saturado se puede escribir de la siguiente manera (Lu and Likos 2007):

$$\Delta\mu_t = \Delta\mu_c + \Delta\mu_o + \Delta\mu_e + \Delta\mu_f$$

Donde:

Δμt: cambio total en el potencial del agua en los poros

Δμc: es el cambio en el potencial debido a la curvatura en la interfaz aire agua (es decir, efectos capilares)

Δμo: es el cambio en el potencial debido a efectos del soluto disuelto (osmóticos)

Δμe: es el cambio en el potencial debido a la presencia de campos eléctricos

Δμf: es el cambio en el potencial debido a los campos de fuerza van der Waals

Todos estos términos describen a un valor negativo ya que representan la disminución en el potencial químico, pero la succión de suelo es un valor positivo porque representa esta disminución para un potencial de referencia para el agua libre igual a 0.

### 2.1.6 Regímenes de succión y la curva característica del suelo

La importancia relativa de los mecanismos físicos y fisicoquímicos individuales responsables de la succión del suelo depende del contenido de agua del sistema parcialmente saturado suelo-agua-aire, a valores relativamente bajos de contenido de agua corresponden valores altos de succión, donde el agua de poro está principalmente en forma de películas delgadas en las superficies de las partículas, los mecanismos dominantes que contribuyen a la succión son los efectos de adsorción de rango relativamente corto gobernados por las propiedades de la superficie de los sólidos del suelo. Por otro lado, a valores de contenido de agua relativamente altos corresponden valores de succión bajos, el mecanismo dominante de retención de agua de poros se convierte en capilaridad, gobernada principalmente por la estructura de partículas y poros

y la distribución del tamaño de poros. La succión osmótica es constante en todo el rango de contenido de agua a menos que cambie la concentración de solutos disueltos (Blight 2013).

La transición entre el régimen de succión alta dominado por mecanismos de adsorción de corto alcance y el régimen de succión baja dominado por mecanismos capilares depende en gran medida del tipo de suelo. En materiales de grano fino como las arcillas, por ejemplo, se requiere una cantidad mucho mayor de agua en los poros para satisfacer las energías de hidratación de la superficie relativamente grandes asociadas con el régimen de alta succión. Sin embargo, en las arenas, se absorbe muy poca agua bajo los mecanismos iniciales de hidratación de la superficie y los efectos capilares dominan sobre la mayoría del rango de contenido de agua insaturada. La curva característica del suelo o Soil-Water Characteristic Curve (SWCC), describe la relación constitutiva correspondiente entre la succión del suelo y su contenido de humedad (Fredlund, Rahardjo, and Fredlund 2012).

La forma general de la SWCC para varios suelos refleja la influencia predominante de las propiedades del material, incluida la distribución del tamaño de poro, la distribución del tamaño de grano, la densidad, el contenido de material orgánico, el contenido de arcilla y la mineralogía. Comprender el comportamiento general de la SWCC y su relación con las propiedades físicas del suelo que describe, es un componente crítico de la mecánica del suelo parcialmente saturados. McQueen y Miller como se sito en (Lu and Likos 2007) desarrollaron un modelo conceptual instructivo basado en evidencia empírica para describir la forma general y el comportamiento del SWCC. (Ver figura 13), se sugirió que cualquier SWCC podría aproximarse como un compuesto de tres segmentos de línea recta en un gráfico semilogarítmico de succión versus contenido de humedad que varía de cero a saturación. Estos segmentos incluyen uno que se extiende desde $10^6$ hasta $10^4$ kPa designado como segmento de fuerte absorción, un segundo que se extiende desde $10^4$ kPa hasta aproximadamente 100kPa designado como segmento de película adsorbida, y un tercero que se extiende desde 100 hasta 0 kPa (saturación) designado como segmento capilar. Cada segmento se caracteriza por un cambio en la pendiente en los puntos de transición.

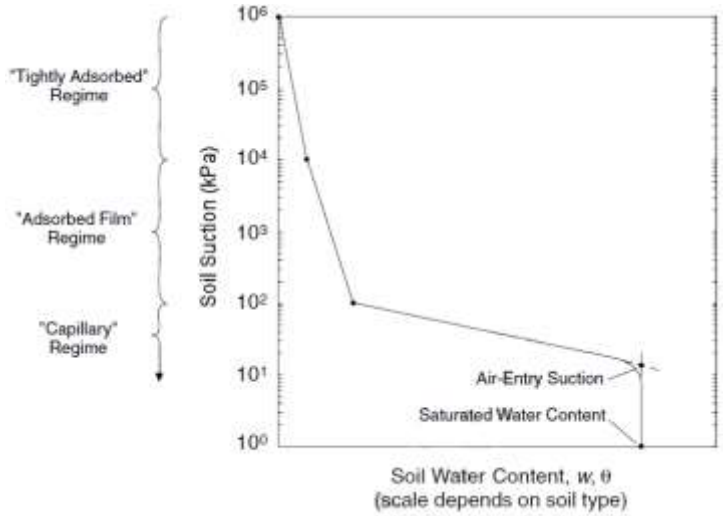



*Figura 13. Ilustración de McQueen and Miller (1974), modelo conceptual del comportamiento general de la SWCC* (Lu and Likos 2007).

Existen varios métodos para poder determinar la succión del suelo como, por ejemplo, para medir la succión matricial ψm, investigadores han empleado tensiómetros de inserción, tensiómetros de alto rendimiento, aparatos de placa de presión / extractores de membrana de presión, sensores de conductividad térmica y centrifugadoras, mientras que la succión total ψ se ha medido empleando instrumentos como psicrómetros de transistores o termopares, papel de filtro y un potenciómetro de punto de rocío (Sreedeep and Singh 2011). Cada uno de los diferentes métodos tiene un rango limitado de medición de la succión ver tabla 2

| Componente de succión medida | Técnica/sensor | Rango de succión medido en kPa | Ensayo de campo o laboratorio |
|---|---|---|---|
| Succión matricial | Tensiómetros | 0-100 | Campo y laboratorio |
| | Técnicas de traslación de ejes | 0-1,500 | Laboratorio |
| | Sensores de conductividad eléctrica y conductividad térmica | 0-400 | Campo y laboratorio |
| | Papel filtro en contacto | Rango completo | Campo y laboratorio |
| Succión total | Psicrómetros termopares | 100-8,000 | Campo y laboratorio |
| | Técnica de espejo enfriado | 1,000-450,000 | Laboratorio |
| | Papel filtro en "no contacto" | 1,000-500,000 | Campo y laboratorio |

*Tabla 1. Rango aproximado de medición de succión para varias técnicas de medición (Meza Ochoa 2012).*

El método específico utilizado en este trabajo es el método del papel filtro el cual esta descrito por la normativa ASTM D 5298, la cual nos aclara que es un método que puede ser utilizado en campo o laboratorio para evaluar la matriz de succión o la succión total

de un suelo, o lo que es lo mismo mide la energía liberada de la presión de poros o el esfuerzo de tensión ejercido por la presión de poro de la matriz del suelo.

El método se basa en medir el contenido de humedad del papel filtro que se encuentra en contacto directo con el suelo (matriz de succión) ver figura 14.A  o los que se encuentra en equilibrio con la presión parcial de vapor en el aire (succión total) ver figura 14.B en un recipiente herméticamente sellado de preferencia vidrio, a este recipiente se lo deja sellado con las muestras y los papeles filtro por un tiempo de equilibrio de 7 días, en este tiempo la presión parcial de vapor en el aire se equilibra con la presión de vapor de agua en los poros del espécimen de suelo y de los papeles filtro.

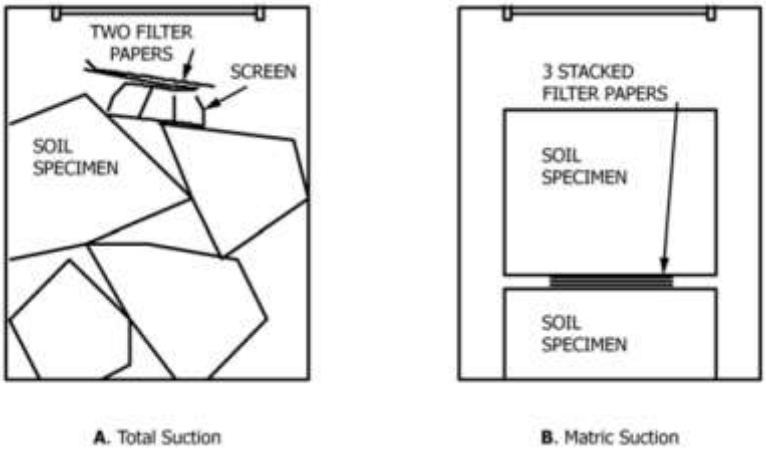
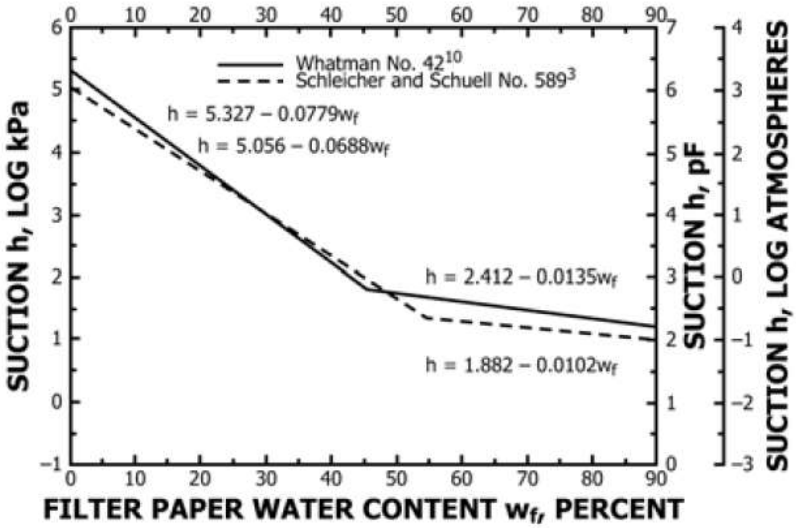



*Figura 14. Recipientes herméticamente sellados para realizar la medición del ensayo de succión total (A), y succión matricial (B) es muestras de suelo.* (ASTM D5298 2016)

Para cualquier papel filtro que se utilice se debe realizar su respectiva calibración para evaluar tanto la matriz de succión como la succión total, esta calibración consiste en obtener dos ecuaciones las cuales se utilizarán para calcular la succión, la normativa presenta estas ecuaciones calibradas para dos tipos de papeles filtros estos son: Whatman No. 42, y Schleicher and Schuell No. 589.




NOTE 1—Coefficient of determination r >0.99.

*Figura 15. Calibración de curva de succión-humedad para papel filtro Whatman No. 42, y Schleicher and Schuell No. 589* (ASTM D5298 2016).

### 2.1.7 Fenómenos de esfuerzo

Los problemas que requieren la consideración del equilibrio mecánico y químico se clasifican como fenómenos de esfuerzo, incluyen problemas tradicionales de ingeniería geotécnica, como presión lateral de tierra, capacidad de carga y análisis de estabilidad de taludes, para cada uno de estos problemas, la resistencia del suelo en su estado límite es la principal preocupación, el análisis de la distribución del esfuerzo dentro de la masa del suelo y su resistencia correspondiente se vuelve críticamente importante. El análisis de límites desarrollado ampliamente desde la década de 1930 para aplicaciones de suelo saturado formó la base para resolver la mayoría de estos tipos de problemas. El desarrollo de teorías elasto-plásticas para el suelo se convirtió en el foco de gran parte de la actividad de investigación en geomecánica durante los años setenta y ochenta. En los últimos 20 años se han desarrollado y aplicado potentes métodos numéricos para resolver las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes para el equilibrio de tensiones en condiciones estáticas o dinámicas (Lu and Likos 2007).

En los últimos años ha quedado claro que una mejor solución a muchos problemas de ingeniería geotécnica relacionados con el esfuerzo requiere nuevas teorías a lo largo de un enfoque microscópico para describir el esfuerzo efectivo en condiciones multifásicas. El esfuerzo efectivo de Terzaghi, que es la piedra angular de la mecánica del suelo en

condiciones saturadas, se vuelve ineficaz o inapropiado para describir completamente las distribuciones de esfuerzo o las condiciones de falla en el suelo parcialmente saturado. Se ha reconocido que las teorías para describir los estados de esfuerzo y falla en el suelo parcialmente saturado requieren la consideración de las propiedades termodinámicas del agua en los poros del suelo en términos de succión del suelo, variables del material como el tamaño de grano y la distribución del tamaño de grano, variables de estado como el grado de saturación, y las consiguientes fuerzas interpartículas, como el esfuerzo efectivo inducido por succión o el esfuerzo por succión (Lu and Likos 2007).

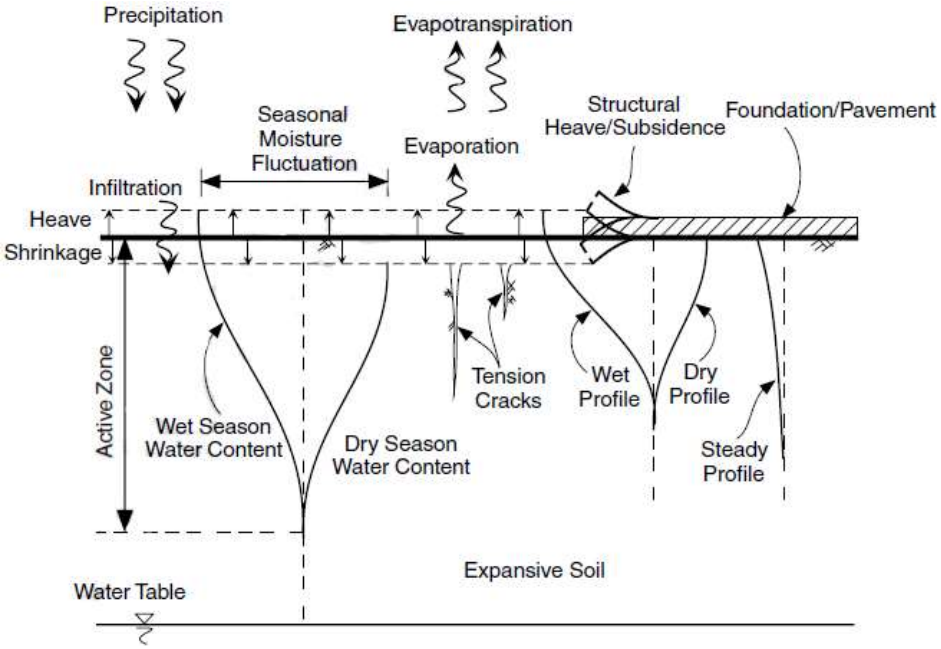



*Figura 16 Fenómenos de deformación y flujo superficiales en un depósito de suelo expansivo parcialmente saturado* (Lu and Likos 2007).

### 2.1.8 El Criterio de falla de Mohr Coulomb

La resistencia al cortante de un suelo es la resistencia por unidad de área que la masa de suelo ofrece a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior, es importante comprender el concepto de la resistencia al corte o cizallamiento del suelo ya que en los problemas como capacidad de carga de cimentaciones superficiales, la estabilidad de taludes naturales y antrópicos, estimación de la presión lateral de tierra (diseño de estructuras de retención de tierras) y capacidad de carga de pilotes y pozos perforados (Das 2015), es uno de los datos principales para poder resolverlos.

La resistencia al corte suele estar en función de 3 parámetros en la mecánica de suelos clásica, estos son: La cohesión entre las partículas del suelo, la resistencia a la fricción

entre las partículas sólidas del suelo y la presión del agua intersticial en la masa del suelo (Das 2015). Pero en el estudio de suelos parcialmente saturados estas condiciones cambian.

El Criterio de falla de Mohr Coulomb nos presenta una teoría de falla de los materiales la cual sostiene que un material falla por la combinación critica del esfuerzo normal y cortante, por lo que, esta relación se puede expresar de la siguiente manera (Das 2015).

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

τf: esfuerzo córtate en el plano de falla

$\sigma$: esfuerzo normal en el plano de falla

$c$: cohesión

$\phi$: ángulo de fricción interna

Para suelo saturado el esfuerzo normal total en un punto es la suma del esfuerzo efectivo y la presión del agua intersticial, es decir:

$$\sigma = \sigma' + u$$

Por lo que se reescribe el criterio de falla de Mohr-Coulomb ya que el esfuerzo efectivo (σ') es decir el esfuerzo que realizan los sólidos es el esfuerzo normal total menos la presión del agua intersticial.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Donde

$c'$: esfuerzo de cohesión efectivo

$\phi'$: ángulo de fricción efectivo

Para poder determinar los parámetros de esta ecuación existen varios ensayos que se pueden realizar en laboratorio los cuales se seleccionan dependiendo de las necesidades del estudio, entre los métodos están corte directo, ensayos triaxiales y compresión simple.

Este trabajo se enfoca en la obtención y el análisis del esfuerzo último y del módulo de elasticidad, mediante el ensayo de compresión simple, el cual se lo realiza utilizando la norma ASTM D2166, 2013 (Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil).

El parámetro de fricción se lo calcula utilizando el criterio de falla de Mohr- Coulomb del cual se obtiene la siguiente expresión:

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2}$$

Donde:

$\theta$: es el ángulo que forma el plano de falla con el plano principal mayor (figura 17), este plano lo medimos de las muestras de suelo ensayadas.

$\phi$': es el ángulo de fricción

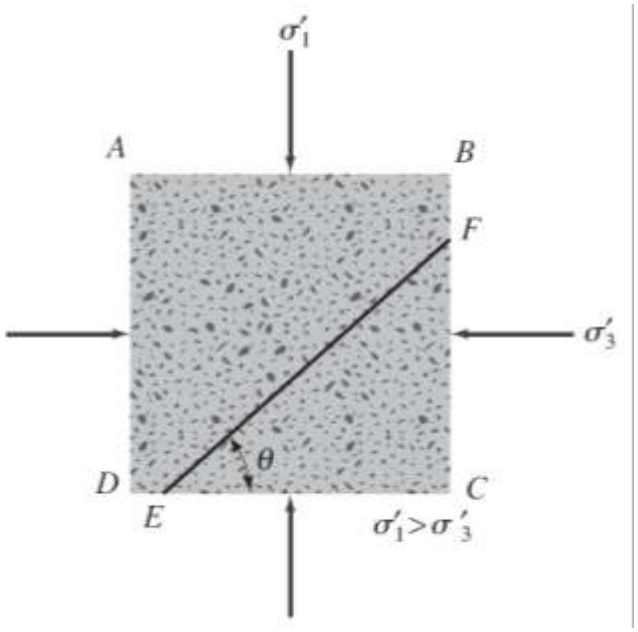



*Figura 17 Representación del ángulo que forma el plano de falla con el plano principal mayor en una probeta sometida a un esfuerzo vertical y de confinamiento* (Das 2015).

Con estos datos podemos obtener la envolvente de falla como se muestra en la figura (18) la cual nos describe la combinación de esfuerzo cortante y normal que actúan en el plano de falla cuando se produce la falla. Para una mayor exactitud en la obtención del ángulo de fricción y cohesión efectivos es necesario realizar ensayos triaxiales confinados drenados.

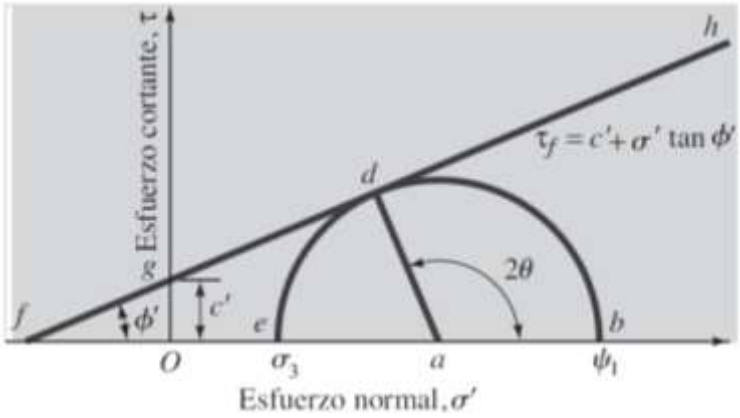



*Figura 18 Representación del diagrama de Mohr Coulomb* (Das 2015)

Para obtener el parámetro de cohesión no drenada Cu debemos realizar ensayos de compresión simple con especímenes saturados, es decir con fricción igual a cero, por lo tanto, el valor de cohesión no drenada será igual al esfuerzo de corte ver figura (19), este parámetro no se debería incluir en el diagrama extendido de Mohr-Coulomb ya que trata especialmente para suelos parcialmente saturados.

$$\tau_f = c_u$$

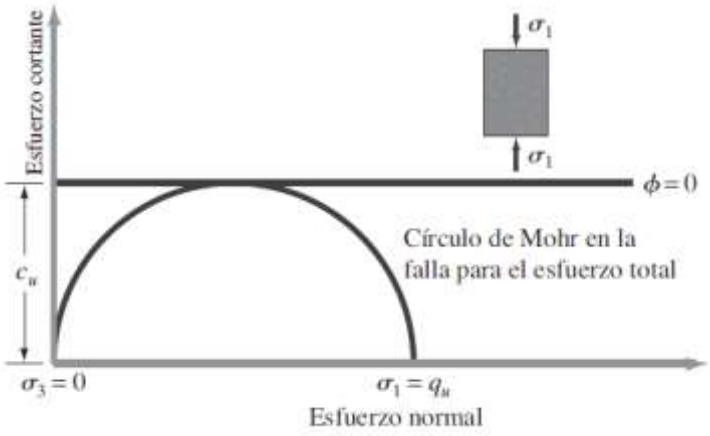



*Figura 19 Circulo de Mohr en muestras de suelos saturadas no confinadas no drenadas* (Das 2015)

Módulo de elasticidad: Se obtiene de la curva esfuerzo deformación generada al realizar el ensayo de compresión simple, este módulo de elasticidad por lo general se representa por una línea tangente en el primer tramo recto de la curva esfuerzo deformación.

$$Es = \sigma/\epsilon$$

Donde:

Es: es el módulo de elasticidad del suelo

σ: es el esfuerzo que resiste el espécimen en la zona elástica

ε: es la deformación unitaria axial

El método de compresión simple se utiliza para obtener un valor aproximado de la resistencia de suelos cohesivos en términos de un esfuerzo total bajo condiciones no confinadas, el método consiste en colocar un espécimen cilíndrico el cual puede ser inalterado, remodelado o reconstituido, en una maquina especial para este trabajo (ver figura 20) la máquina mide la fuerza y deformación que es soportada por el espécimen mientras se aplica una carga con una velocidad normada, se realizan mediciones en lapsos de tiempo predeterminados de la fuerza y la deformación con lo que se genera un gráfico (ver figura 21), con estos datos se puede calcular el esfuerzo último en condiciones no confinadas, para suelos parcialmente saturados la resistencia al corte se calcula como el punto en su plano de falla.

*Figura 20 Maquina triaxial del laboratorio de suelos de la PUCE*

*Figura 21 Resultado de interpretación de datos del ensayo de compresión simple.*

Los estudios experimentales modernos sobre la resistencia al corte del suelo no saturado se remontan a los años 50 y 60. Las pruebas de laboratorio se han llevado a cabo con mayor frecuencia utilizando equipos de prueba de corte directo o triaxiales modificados para incorporar control de presión de aire de poro y un disco de cerámica de alta entrada de aire (HAE) para el control de la succión matricial. Al controlar o medir directamente el esfuerzo normal total, la presión de aire de poro $u_a$ y la presión de agua de poro $u_w$ bajo

varios estados de esfuerzo y condiciones de drenaje, el esfuerzo normal neto ($\sigma$- $u_a$) y succión matricial ($u_a$ - $u_w$) puede ser evaluada (Lu and Likos 2007).

Blight como se presenta en (Lu and Likos 2007) la figura (22) muestra un ejemplo de datos obtenidos de una serie de seis pruebas triaxiales consolidadas y drenadas (CD) para muestras de limo parcialmente saturado. Todas las muestras fueron compactadas inicialmente por el método estándar de la Asociación Estadounidense para la Organización de Carreteras y Transportes del Estado (AASHTO) con un contenido de agua gravimétrica de moldeo de 16.5%. La Figura (19.A) muestra los resultados del esfuerzo desviador versus deformación axial para tres muestras con un esfuerzo de confinamiento neto $\sigma$3-Ua = 13.8 kPa y para tres niveles de succión matricial: 6.9, 68.9 y 137.9 kPa. La Figura (19.B) indica resultados para tres muestras adicionales con un esfuerzo de confinamiento neto ligeramente mayor de 27.6 kPa y los mismos tres niveles de succión matricial.

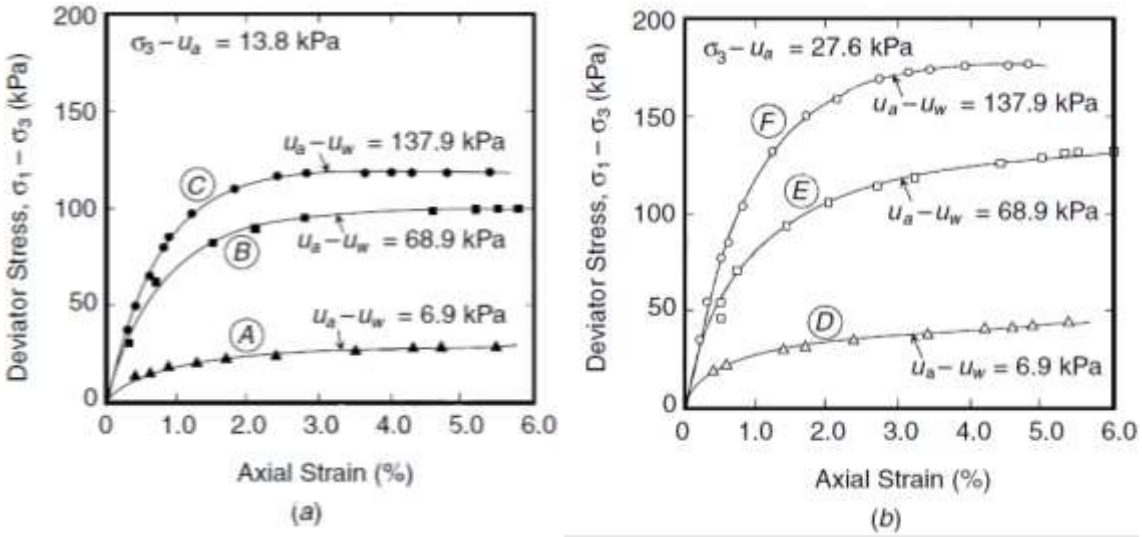



*Figura 22 Ensayos triaxiales CD para un limo parcialmente saturado (Blinght, 1967)*

Se puede expresar estos resultados en un diagrama de Mohr-Coulomb al cual se agrega el eje Z donde se representa la succión matricial, este eje es ortogonal al plano que genera en el eje de las abscisas el esfuerzo normal neto y en el eje de las ordenadas el esfuerzo de corte ver figura (23).

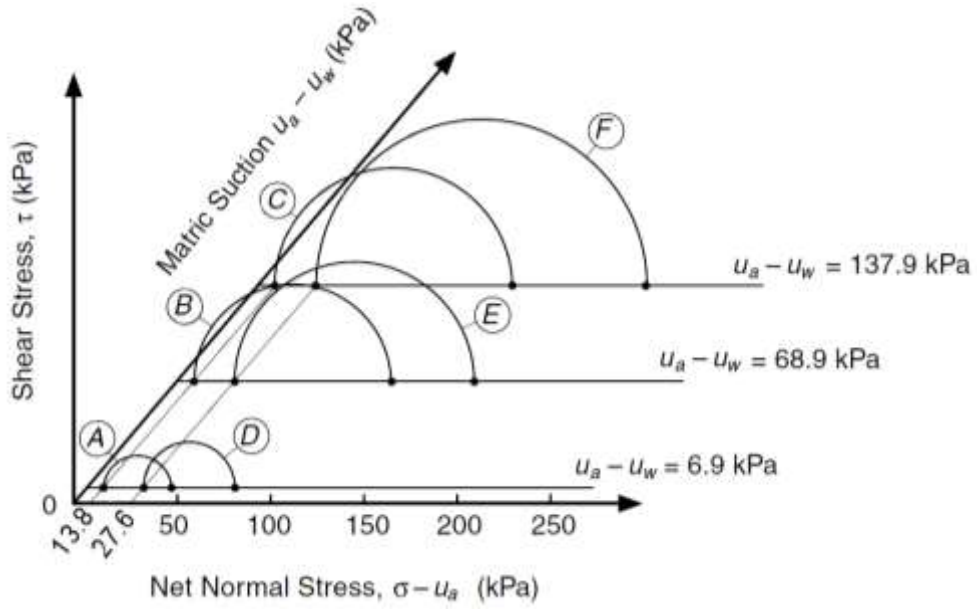



*Figura 23 Diagrama extendido de Mohr-Coulomb mostrando estados de esfuerzo en la falla de los resultados de ensayos triaxiales en un limo parcialmente saturado (Blight, 1967).*

Fredlund y Morgenstern como se citó en (Meza Ochoa 2012) para los suelos parcialmente saturados propusieron una ecuación de resistencia al corte, en términos de la Succión Matricial (ua − uw), esfuerzo normal neto (σ–ua) y algunas propiedades del suelo independientes, esta ecuación es una extensión de la ecuación de resistencia de Mohr-Coulomb, se expresa de la siguiente forma:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$$

Donde:

τ: resistencia al corte del suelo parcialmente saturado.

c´: cohesión efectiva a succión cero (del suelo saturado)

ϕ´: ángulo de fricción interna efectivo (del suelo saturado)

$\phi^b$: ángulo que define la tasa de incremento de resistencia al corte con respecto a la succión del suelo.

(σ–ua): esfuerzo normal neto sobre el plano de falla, en la falla.

(ua − uw): succión matricial del suelo en el plano de falla.

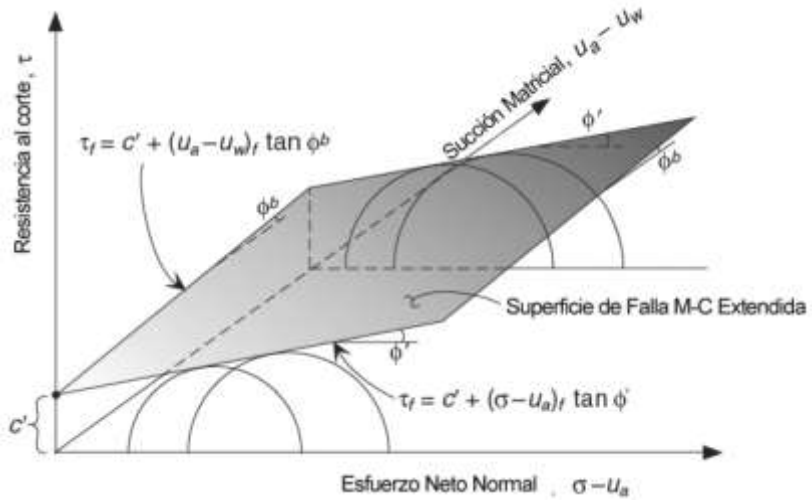



*Figura 24 Diagrama de Mohr-Coulomb extendido teórico* (Meza Ochoa 2012).

Al trabajar con muestras de suelo reconstituidas se tiene que tomar en cuenta la sensitividad del suelo, esto por lo general se suele tratar en suelos de grano fino cohesivos ya que como menciona en (Burland 1990) las propiedades de estos suelos reconstituidos se denominan “Intrínsecas”, ya que son inherentes al suelo e independientes del estado natural, la influencia de la estructura del suelo natural (tejido y unión) en la resistencia para la mayoría de este tipo de suelos suele estar muy por encima de la resistencia intrínseca. Esta diferencia proviene de la influencia de la micro y macroestructura refiriéndose a estructura como la combinación de la disposición de partículas y unión entre partículas.

# 3. TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO

## 3.2 ENSAYOS DE CAMPO

### 3.2.1 Exploración del subsuelo

El proceso de identificar los estratos que conforman el subsuelo y sus características físicas se refiere generalmente como exploración del subsuelo. El propósito de la exploración del subsuelo es obtener información que ayude al ingeniero en geotecnia en la implementación de correctos métodos constructivos y diseño una obra civil considerando todos los problemas geotécnicos que se puedan generar (Suelos colapsables, expansivos, rellenos, etc.) (Das 2015). En el particular caso de este proyecto que en el

cual se investiga los suelos parcialmente saturados se requiere un estudio detallado de campo y laboratorio con la mayor cantidad de datos que se pueda obtener del subsuelo, entre estos datos están el N del SPT, CPT, DMT velocidades de ondas, clasificación del suelo y relaciones fundamentales.

### 3.2.2 Primero: Sondeo y prospección

Como se mencionó anteriormente el primer sondeo consistirá en la extracción de un perfil continuo de los 30 metros del subsuelo, éste proceso se ha ejecutado mediante la introducción de un barril por rotación siguiendo las recomendaciones de la practica normalizada ASTM D2113, 2019. Este procedimiento ha sido eficaz en el sector de estudio debido a las características del suelo predominantes y condiciones de consistencia en algunos casos y compacidad en otras. El barril (ver figura 25), con impregnaciones de diamante, tungsteno, carburos u otros materiales abrasivos cortan la roca mediante rotación y recuperan en su interior la muestra, uno de los indicadores que se obtiene del ensayo es el porcentaje de recuperación que es igual a la longitud total de todos los pedazos recuperados sobre la longitud teórica de maniobra, uno de los problema con este método es que produce tracción por rotación y los elementos pueden fracturarse, así que la recuperación de las muestras no siempre suele ser la misma que se predice, en el caso de suelos con aparente litificación y sin ésta, se incluye el problema del lavado del material o pérdida de testigos debido a la acción del agua empleada para enfriar la broca de perforación. En la zona de estudio, la consistencia de varios estratos permitió la obtención de muestras continuas, útiles para la caracterización geológica y clasificación geotécnica, con relativa representatividad de muestras inalteradas. Las muestras de tobas volcánicas y suelos blandos cohesivos obtenidas con este procedimiento no pueden ser catalogadas como inalteradas a pesar de tener un 100% de recuperación. El RQD en el caso de rocas es el parámetro principal que se obtiene en este tipo de sondeo que significa la designación de la calidad de roca (RQD) y es igual a (Das 2015):

$$RQD = \frac{\Sigma longitud\ de\ los\ pedazos\ recuperados\ iguales\ o\ mayores\ que\ 101mm}{longitud\ teórica\ del\ núcleo\ de\ roca\ recuperadada}$$

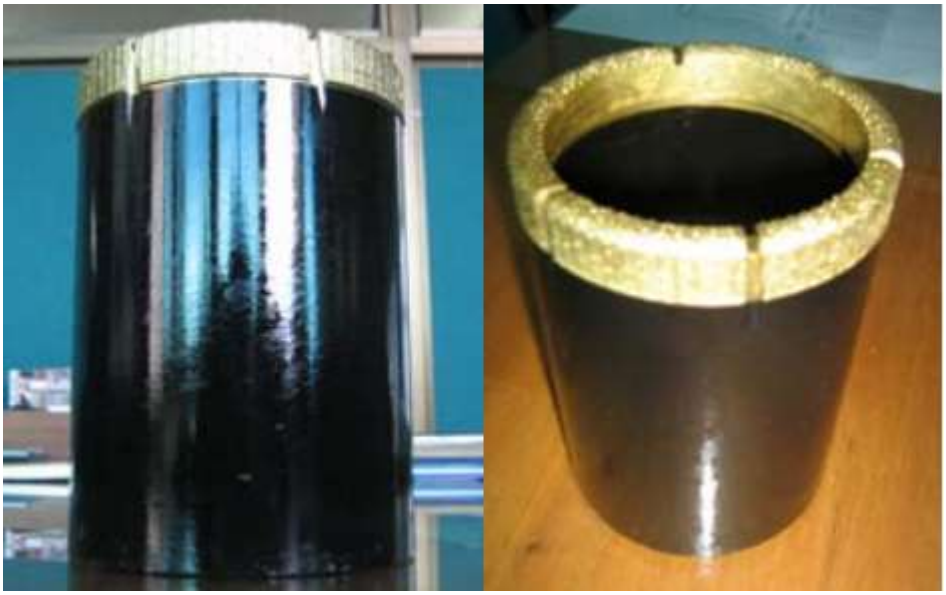


*Figura 25  Broca de diamantina NW para extracción de núcleos de roca* (Ivan 2009).

Resumen del primer sondeo

En la extracción, se observó un estrato de suelo cohesivo predominantemente fino de color negro, sin olor, húmedo, con material orgánico (presencia de raíces) hasta el metro 3. Porcentaje de recuperación del 100%.

Desde el metro 3 hasta el 9 se encontró un material predominantemente fino de color negro, sin olor, húmedo, con presencia de pómez en la masa global del suelo, dilatancia lenta, tenacidad media, plasticidad media y consistencia firme, dando como resultado del ensayo manual visual un limo de baja plasticidad. Se obtuvo un porcentaje de recuperación del 100%.

Se observa entre el metro 9 y 11 un estrato pequeño de arena de grano medio, húmeda, con características drenantes. No se puede recuperar muestras completas de este tipo ya que el material se lava por la acción del agua, porcentaje de recuperación de 70%.

A partir del metro 11 al 19 se observa un suelo de color marrón claro, predominantemente fino, sin olor, húmedo, con presencia de pómez y gravillas en la masa global del suelo, dilatancia lenta, tenacidad alta, plasticidad medía, consistencia dura, dando como resultado del ensayo manual visual un limo de baja plasticidad. Se obtuvo un porcentaje de recuperación del 90%.

En el metro del 19 al 20 se encuentra arena de grano medio, mezclada con limo del estrato anterior, con presencia grava. Porcentaje de recuperación del 60%.

Del metro 20 al 21 se encuentran arenas limosas con grava. Porcentaje de recuperación del 30%.

Del metro 21 al 27 se encuentran, gravas y arena de grano fino y medio. Porcentaje de recuperación del 30%.

Del metro 27 al 30 se encuentra gravas de gran tamaño, no se localiza el nivel freático hasta el metro 30. Porcentaje de recuperación del 30%.

Se precisó con la Clasificación Manual Visual de acuerdo a la normativa (ASTM D2488 2000) y se realizó el ensayo con un intervalo de 10cm obteniendo una serie de datos cuyo objetivo es determinar pequeñas variaciones entre los estratos para poder tomarlos en cuenta en el segundo sondeo, a esta serie de datos que representa un resumen de la clasificación manual visual cada 10cm del estrato del proyecto se la denominó “Sabana”, las muestras de suelo extraído se almacenaron en cajas especialmente diseñadas para preservarlas y transportarlas de forma segura, cada caja puede transportar 4m de perforación de suelo.

*Fotografía 1. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 0 al 4, fecha 13/08/2019.* .

*Fotografía 2. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 4 al 8, fecha 13/08/2019.*

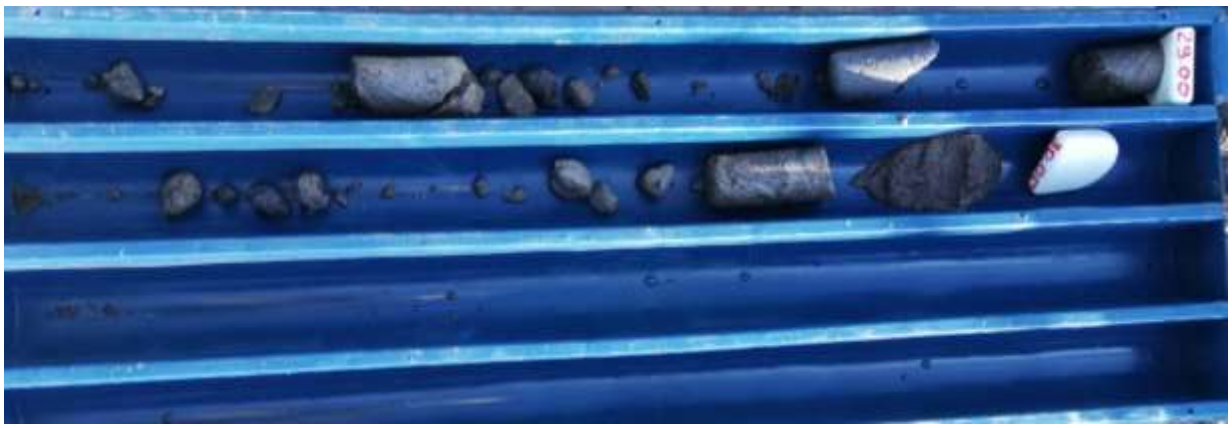
*Fotografía 3. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 8 al 12, fecha 13/08/2019.*

*Fotografía 4. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 12 al 16, fecha 13/08/2019.*

*Fotografía 5. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 16 al 20, fecha 13/08/2019.*

*Fotografía 6. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 20 al 24, fecha 13/08/2019.*

*Fotografía 7. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 24 al 28, fecha 13/08/2019.*



*Fotografía 8. Registro fotográfico Perfil del suelo extraído de forma continua del metro 28 al 30, fecha 13/08/2019.*

### 3.2.3 Segundo: Ensayo de penetración dinámica SPT

En el siguiente sondeo se realizaron ensayos de penetración dinámica bajo la norma ASTM D1586. Para este ensayo son utilizados muestreadores de media caña o de "cuchara partida" (ver figura 26) en campo para poder obtener muestras de suelo en estado alterado, estas muestras son útiles para realizar ensayos como clasificación, gravedad específica, granulometría, etc. La dinámica del ensayo empieza por implantar un nivel predeterminado de donde se parte para poder realizar el muestreo con la sonda "Cuchara partida", la cual se introduce en el suelo utilizando un martillo que impacta el eje al que se conecta esta herramienta (Ver figura 27), se realizan varios golpes, con energía de impacto controlada, para poder introducir la sonda 45cm en el suelo, el número de golpes es registrado cada 15 cm que la herramienta penetra, teniendo así en total tres registros de los cuales se suman los dos últimos, a este dato se lo conoce como N que es el número de golpes necesarios para introducir los últimos 30 cm la Cuchara partida en el suelo (Das 2015).

*Figura 26 Media caña o "Cuchara partida"* (ASTM D1586 2018).

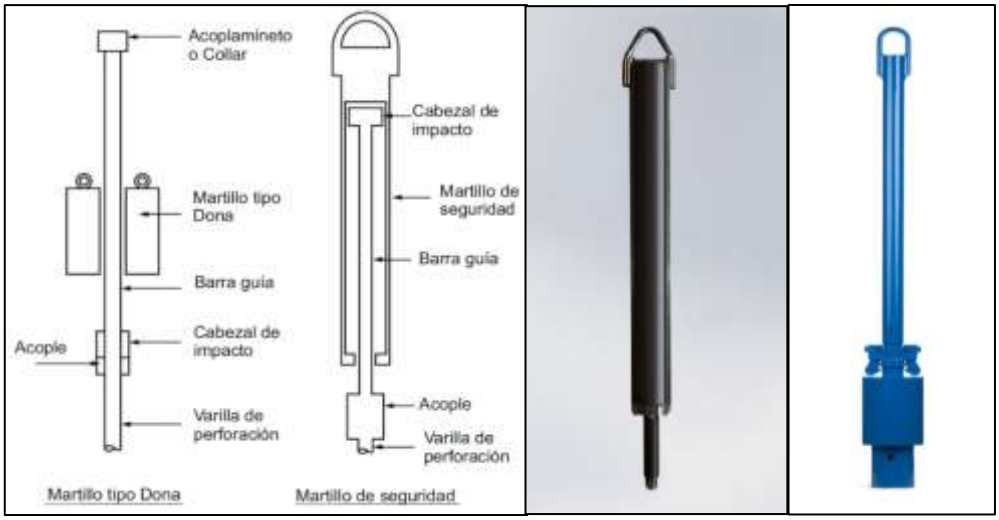



*Figura 27 Tipos de martillo para ensayo Estándar de Penetración SPT* (ASTM D1586 2018).

Las dimensiones y especificaciones para realizar este ensayo se encuentran en la guía ASTM D1586 Standard Penetración Test por sus siglas en ingles SPT. Esta norma menciona la variación que puede generarse en el N debido a varios factores como la eficiencia del martillo, el diámetro de perforación, por el tipo de muestreador y por la longitud de la tubería, es por esto que se debe corregir el N del SPT basado en la energía que se entrega al principio y su disipación a lo largo del ensayo, todo esto con el fin de tener un valor del N universal.

La expresión para la corrección de este parámetro es:

$$N_{corregido} = N\eta_H\eta_B\eta_S\eta_R$$

Donde:

$N_{corregido}$: es el número de penetración estándar corregido

N: es el número de golpes o penetración del equipo en campo

$\eta_H$: es la eficiencia del martillo (Energía)

$\eta_B$: es la corrección para el diámetro de la perforación

$\eta_S$: es la corrección del muestreador

$\eta_R$: es la corrección para la longitud de la varilla

Estos factores dependerán de varios detalles los cuales deberán ser utilizados dependiendo de las observaciones realizadas en campo, para este proyecto se corrigió únicamente por profundidad y energía.

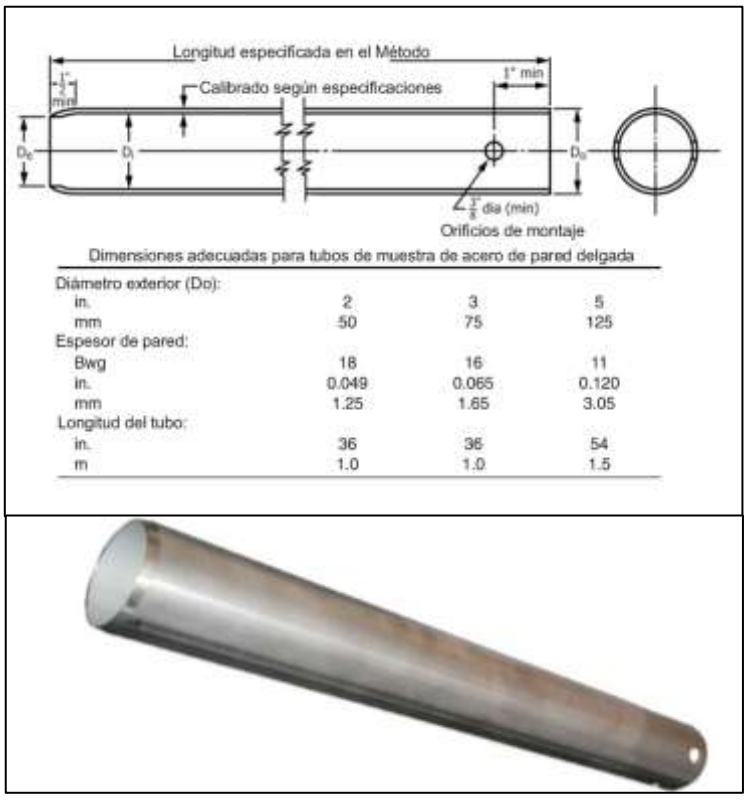
En el sondeo realizado en campo los ensayos estándar de penetración fueron posibles hasta el metro 19, de los cuales entre el metro 1 y el 8 el N corregido fue bajo de entre 5 y 10 golpes, del metro 9 al metro 13 se registró un N corregido alto de entre 40 a 50, en el metro 14 y 15 se registró un N corregido bajo entre 5 y 10 golpes, en los metros del 16 al 18 se registró un N corregido de entre 20 y 30, y en el metro 19 se registró un N

corregido de 8. En los siguientes metros no se realizó el ensayo debido a que en el primer sondeo se observa la presencia de un aluvial en el cual los bloques o gravas generan un obstáculo para el ensayo, con las muestras de suelo extraídas en la Cuchara Partida se realiza ensayos de laboratorio como contenido de humedad natural, límites de Atterberg y clasificación de suelos.

### 3.2.4 Tercero: Toma de muestras inalteradas con tubo de pared delgada

También se los conoce como tubos Shelby (Ver figura 28) los cuales están hechos de una aleación de acero especial para que sea resistente y anticorrosivo, son cilindros huecos con un espesor muy delgado, de un extremo afilado, fácilmente desmontables del eje principal, se utiliza para obtener muestras inalteradas de suelo por lo general cohesivos, el muestreo consiste en introducir a presión este cilindro hueco en el suelo para posteriormente retirarlo con la muestra de suelo y sellarlo por ambas caras para mantener lo mejor posible la integridad de la muestra (Das 2015).

Las dimensiones y especificaciones para realizar este ensayo se encuentran en la guía (ASTM D1587 2015) Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes.




Dimensiones adecuadas para tubos de muestra de acero de pared delgada

| | | | |
|---|---|---|---|
| Diámetro exterior (Do): | | | |
| in. | 2 | 3 | 5 |
| mm | 50 | 75 | 125 |
| Espesor de pared: | | | |
| Bwg | 18 | 16 | 11 |
| in. | 0.049 | 0.065 | 0.120 |
| mm | 1.25 | 1.65 | 3.05 |
| Longitud del tubo: | | | |
| in. | 36 | 36 | 54 |
| m | 1.0 | 1.0 | 1.5 |

*Figura 28 Tubo de parel delgada (Shelby)* (ASTM D1587 2015).

Se ha utilizado esta técnica en el estrato superior el que se ubica entre el metro 0 y 8 ya que brinda las características necesarias para poder realizar la toma de muestras, además que en el estrato se presentan condiciones con las cuales el suelo se puede mantener parcialmente saturado, esto se debe a factores como la ubicación y pendiente del terreno los cuales permiten que el agua de precipitaciones no se estanque e infiltre, también tiene una característica importante y es que el estrato inmediatamente inferior tiene características drenantes lo cual permite que el agua subterránea fluya y el suelo en ese nivel se mantenga humedecido por capilaridad.

Las muestras extraídas, aunque se consideran inalteradas pueden tener problemas ya que cuando se introduce el tubo en el suelo este se puede compactar en un principio, es por eso que se descarta un tramo del material obtenido del tubo y se utiliza especialmente el material central que se obtiene, también se pueden presentar problemas por una mala manipulación en el proceso de extracción del tubo Shelby ya que se lo realiza por procesos mecánicos que pueden dañar las muestras, de cualquier forma una vez extraída la muestra se la debe inspeccionar y descartar cualquier tramo que tenga fisuras.

### 3.2.5 Descripción de herramientas y maquinaria.

Se utilizó una perforadora ACKER ACE (figura29) para realizar los sondeos, las especificaciones de esta máquina se obtuvieron de (ACKER DRILL COMPANY 2019):

> Esta máquina es de deslizamiento, resistente y liviana (1361 kg), la cabeza del taladro jira 360 grados.
>
> Su motor es a Diesel de marchas manuales con un arranque eléctrico de 12 voltios, 31 HP, 3000RPM, el taladro hidráulico tiene un recorrido de 76 cm, cuatro marchas con 204, 422, 772, y 1302 RPM respectivamente.
>
> Como implemento se acopla una polea que recoge hasta 22.8 metros de cable utilizado para extraer muestras u otros fines.

*Figura 29 Perforadora ACKER ACE.*

Según la calibración de energía dinámica de penetración realizada en esta máquina el porcentaje promedio de relación energía que entrega la maquina ACKER a través de martillo Safety es del 77% y un factor de corrección de energía de 1.28 por lo que se obtendría un $N_{77}$ corregido a partir de este valor (Ocaña 2019).

Para la extracción continua del perfil (sondeo 1) se utilizó tuberías de acero de 3 pulgadas de diámetro y distintos metros de largo, tuberías para revestimientos de 4 pulgadas de diámetro, helicoidal para la limpieza del pozo, y brocas de diamante. Para el ensayo SPT se utilizó, cuchara Partida, eje de 2 pulgadas y martillo (Safety Hammer) y para la toma de muestras inalteradas se utilizo tubos Shelby.

## 3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

### 3.3.1 Relaciones fundamentales

Se realizaron los ensayos de densidad y gravedad específica del metro 3 al 17, ya que en estos metros se podía obtener muestras que mantengan su forma, los metros siguientes corresponde a material suelto en su gran parte arenas y gravas.

**Gravedad específica**

Se define gravedad específica en la norma (ASTM D864 2010) como la relación de masa por unidad de volumen en la fase solida de un suelo con masa del mismo volumen de agua libre de gas disuelto a 20°C, se obtiene la gravedad específica como:

$$Gs = \frac{\Upsilon_{material}}{\Upsilon_{agua\ a\ 20°C}}$$

Donde:

Gs: es la gravedad específica

$\Upsilon_{material}$: es el peso específico del material (Suelo)

$\Upsilon_{agua\ a\ 20°C}$: es el peso específico del agua libre de gas disuelto a 20°C

Siempre y cuando el volumen sea el mismo se puede expresar la anterior ecuación de la siguiente manera:

$$Gs = \frac{W_s/V}{W_w/V}$$

El problema consiste en obtener el volumen de un peso conocido de granos de suelo y dividirlo por el peso del mismo volumen de agua, el volumen de un peso de partículas de suelo puede obtenerse utilizando un recipiente de volumen conocido y el principio de Arquímedes, según el cual un cuerpo sumergido dentro de una masa de agua desplaza un volumen de agua igual al del cuerpo sumergido (Bowles 1981).

La gravedad específica de los sólidos del suelo se utiliza en varios de los cálculos en la mecánica de suelos como la relación de vacíos, grado de saturación, la densidad de la fase solidad del suelo, además se la determina con mucha precisión en el laboratorio.

**Densidad**

La densidad de un material es la relación de su peso sobre su volumen, para un mismo suelo podemos definir dos densidades, la Densidad Bulk que es el peso del suelo húmedo sobre su volumen y la densidad seca que es el peso del suelo seco sobre su volumen.

Se puede obtener la densidad de suelos alterados, inalterados, remoldeados, reconstituidos o compactados, la obtención de la muestra de suelo puede ser con tubo de pared delgada, calicata, muestras de suelo alteradas, etc.

El desarrollo del método para la obtención de la densidad se especifica en la normativa (ASTM D7263 2009), en donde se describe dos formas para la obtención de este parámetro, el método A (desplazamiento de agua) se prepara una muestra de suelo la cual debe ser cuidadosamente tratada de manera que no pierda humedad y no se altere su

forma, si es necesario se debe cortar las caras de la muestra esto cuando sus superficies sean demasiado irregulares, éstas deben ser lo más lizas posibles. Una vez obtenido el espécimen se determina la masa, para luego cubrir con una parafina de densidad conocida, se pesa la muestra de suelo con la parafina luego, se pesa la misma muestra sumergida en agua, finalmente se determina el contenido de humedad del suelo ensayado retirando con mucho cuidado la parafina, la expresión para calcular la densidad del suelo es la siguiente:

$$\rho_m = \frac{M_t}{\left[\left(\frac{M_c - M_{sub}}{\rho_w}\right) - \left(\frac{M_c - M_t}{\rho_p}\right)\right]}$$

Donde:

$M_t$: masa de la muestra al aire

$M_c$: masa de la muestra más la parafina al aire

$M_{sub}$: masa de la muestra más la parafina sumergida

$\rho_p$: densidad de la parafina

$\rho_w$: densidad del agua depende de la temperatura

$\rho_m$: densidad total o densidad bulk

El método B (directo) puede ser utilizado en probetas o muestras de suelo cilíndricas las cuales tengan como finalidad realizar un ensayo de compactación o compresión, se puede tomar un cilindro extraído de un tubo de pared delgada o un cilindro moldeado en laboratorio el cual debe tener sus caras superior e inferior lizas con el suelo procedente de este alisado se obtiene el contenido de humedad, se toman las medidas del diámetro del cilindro utilizando un calibrador al menos 4 medidas en los extremos y en el centro del cilindro también se mide la altura del cilindro al menos 3 alturas, con esto se puede calcular el volumen del espécimen, luego pesamos el cilindro y podemos aplicar la fórmula para determinar la densidad (ASTM D7263 2009).

$$\rho_m = \frac{Mt}{V}$$

Donde:

Mt: masa total

V: volumen calculado del cilindro

Una vez calculada la densidad bulk y el contenido de humedad se puede calcular la densidad seca, su expresión es la siguiente:

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{\frac{1+w}{100}}$$

Donde:

$\rho_d$: es la densidad seca

w: es contenido de humedad

**Relaciones volumétricas**

Para fines prácticos se observa en la figura (30 a) una muestra de suelo en estado natural la cual se compone de tres fases, fase liquida, fase gaseosa y fase sólida cada fase es contenida por un volumen como se puede apreciar en la figura (30b) en donde se separan los elementos.

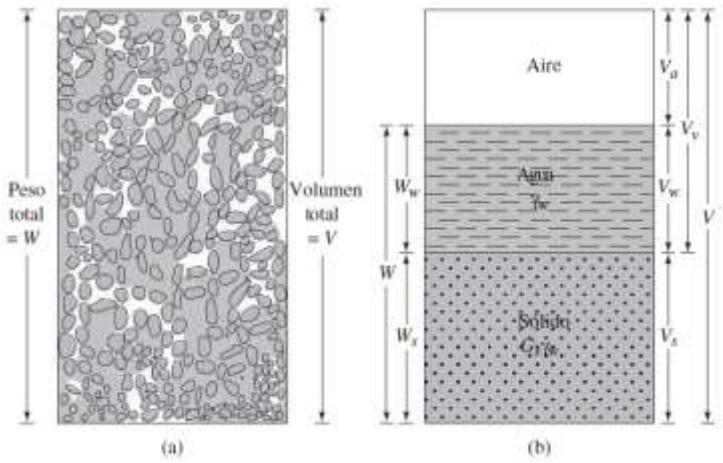



*Figura 30 (a) Fases del suelo en estado natural (Real), (b) Fases del suelo por separado (DAS, 2015).*

Para poder analizar el suelo es necesario comprender las definiciones de los parámetros que lo describen, como lo son: su porosidad, saturación, relación de vacíos etc., para esto se supone que el peso del aire en el suelo es despreciable, por lo que no se toma en cuenta, de esta forma podemos decir que el peso total del suelo estará dado tan solo por el peso de su fase sólida y líquida. (Das 2015) expresa lo siguiente:

> La porosidad es la relación del volumen que ocupan los vacíos en el suelo sobre el volumen total del suelo, se la denomina con la letra ***n*** y se la expresa en porcentaje

$$n = \frac{V_v}{V} 100$$

Donde:

n: porosidad

$V_v$: volumen de vacíos

V: volumen total

La relación de vacíos es la relación del volumen de vacíos dividido para el volumen que ocupa la fase solida del suelo, se identifica con la letra ***e*** y es adimensional.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Donde:

e: relación de vacíos

$V_s$: Volumen de los sólidos del suelo

También tenemos el grado de saturación que es la relación del volumen de agua sobre el volumen de vacíos, se identifica con la letra S y se expresa en porcentaje.

$$S = \frac{V_w}{V_v} 100$$

Donde:

S: saturación

$V_w$: volumen de agua

$V_v$: volumen de vacíos

El porcentaje de saturación es muy importante para el estudio de la matriz de succión ya que estos parámetros están directamente relacionados, además es el dato comparativo y descriptivo que más se utiliza en la mecánica de suelos parcialmente saturados.

3.3.2 Clasificación de suelos

Para realizar la clasificación del suelo en los 30 metros del estrato es necesario realizar ensayos de granulometría, Límites de Atterberg y Contenido de humedad, estos ensayos se realizaron con el material obtenido del ensayo de SPT hasta el metro 19 de perforación, para los 11 metros faltantes se extrajo material con un barril por rotación.

**Granulometría**

Es un proceso de análisis mecánico del suelo en el cual se utilizan diferentes tamices, los cuales retienen partículas mayores a las aberturas de cada tamiz. Este análisis por tamizado se realiza para partículas mayores a 0.075mm de diámetro, es decir que, retengan en tamiz 200. La granulometría por tamizado se realiza según la norma ASTM D6913 la cual es usada para determinar la distribución del tamaño de las partículas (gradación) de una muestra de suelo.

Un resumen del procedimiento para el tamizado es el siguiente; antes del tamizado, el material se lavará para eliminar las partículas finas y se secará al horno, el material para tamizar se colocará en el tamaño de tamiz más grueso de cada juego de tamices y se agitará mecánicamente luego se determinará la masa de partículas retenidas en cada tamiz. La serie utilizada corresponde a: 4, 10, 40 y 200 (para identificar gravas se utiliza tamices mayores al 4, arenas de grano grueso, medio y fino tamices del 4 al 200 y finos

menores al 200). Los resultados producirán una tabulación de tamaños de tamiz versus porcentaje que pasa, esto se puede representar gráficamente como una curva de gradación (una gráfica del porcentaje que pasa versus el registro del tamaño de partícula en mm) (ASTM D6913 2004).

Para suelos con importante presencia de material fino, esto es, partículas menores a 0.075 mm y mayores a 0.2μm se realiza una granulometría por hidrómetro este análisis se basa en el principio de la sedimentación de los granos del suelo en agua, cuando se coloca una muestra de suelo en agua las diferentes partículas que lo componen descienden a diferentes velocidades dependiendo de su tamaño, forma y peso, para realizar el ensayo se supone que todas las partículas son esféricas y se utiliza la ley de Stokes la cual, calcula la velocidad de caída de esferas en un fluido y por medio de ésta, la estimación del diámetro de la partícula (Das 2015).

Se utiliza la normativa ASTM D7928 como base del ensayo, en donde a un cilindro de sedimentación se le coloca un fluido especial junto con la muestra de suelo previamente preparado se agita para que las moléculas se dispersen, luego se coloca el hidrómetro en la solución y se mide la distancia del centro de gravedad del hidrómetro a la superficie del agua (L) en intervalos de tiempo normalizados (t) (ver figura 31), con el desplazamiento de las partículas en diferentes tiempos se determina la velocidad de caída de las partículas más pequeñas en cada intervalo de tiempo.

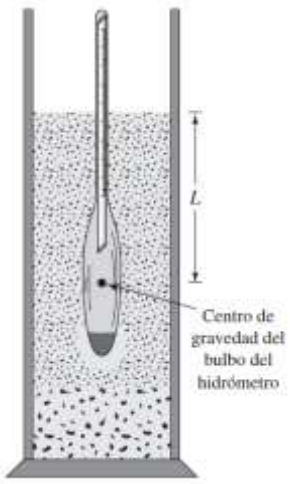



*Figura 31 Ensayo del hidrómetro (DAS, 2015).*

Tanto los resultados del análisis granulométrico por hidrómetro y tamizado se presentan en un gráfico semilogarítmico de porcentaje de material versus el diámetro de los granos, los resultados de los dos ensayos pueden combinarse ver figura (32), estos

resultados aparte de ser indispensables para clasificar el suelo son especialmente útiles para describir la gradación del suelo con lo cual se conoce más de sus propiedades físicas y mecánicas.

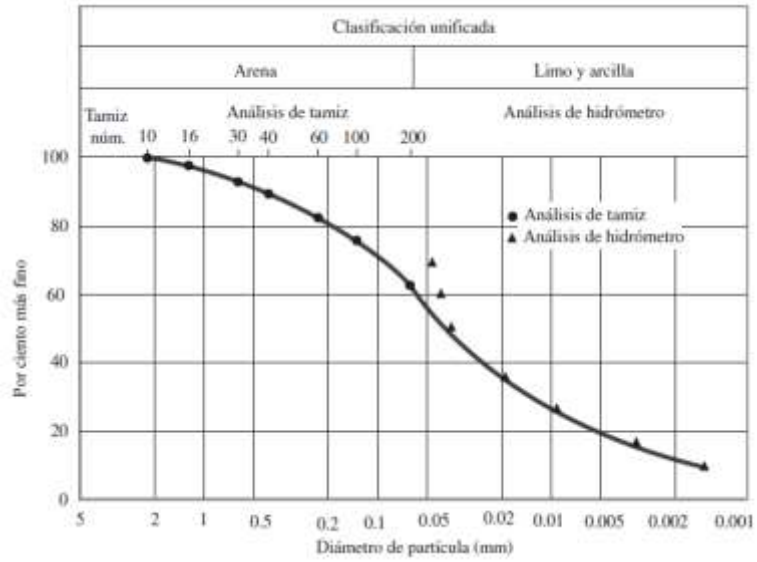



*Figura 32 Curva de distribución de tamaño de partículas: análisis de tamiz y de hidrómetro* (Das 2015).

**Límites de Atterberg**

Los límites que propuso el científico sueco experto en agricultura Albert Mauritz Atterberg, fueron cinco de los cuales, se utilizan en la mecánica de suelos los siguientes tres: límite líquido, límite plástico y límite de contracción (Bowles 1981).

Los limites líquido y plástico se utilizan principalmente para la clasificación de los suelos, el límite de contracción ha sido útil en áreas geográficas donde el suelo sufre grandes cambios de volumen entre su estado seco y su estado húmedo. El problema de potencial de volumen puede ser detectado muy a menudo de los resultados de los límites líquido y plástico, también pueden utilizarse para correlacionar varios parámetros físicos del suelos como: la densidad máxima seca, contenido óptimo de humedad, entre otros, así como para la identificación del mismo (Bowles 1981). Para entender mejor cómo se comporta el suelo según estos límites observe la siguiente imagen (figura 33).

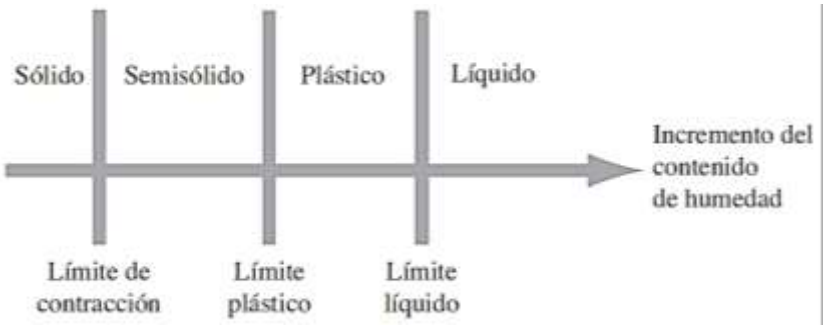



*Figura 33 Límites de Atterberg (DAS, 2015).*

El límite líquido (LL) se determina según la norma ASTM D4318, en donde se detalla el procedimiento en el cual utiliza el material que pase por el tamiz N °40 con el que se realiza pruebas en las que una porción de la muestra se extiende en una copa de latón o copa de Casagrande (ver figura 34(a)), luego se la divide en dos por una herramienta de ranurado (ver figura 34 (b)), y luego se permite que el suelo se junte, debido a los golpes causados por la caída repetitiva de la copa en un dispositivo mecánico estándar.

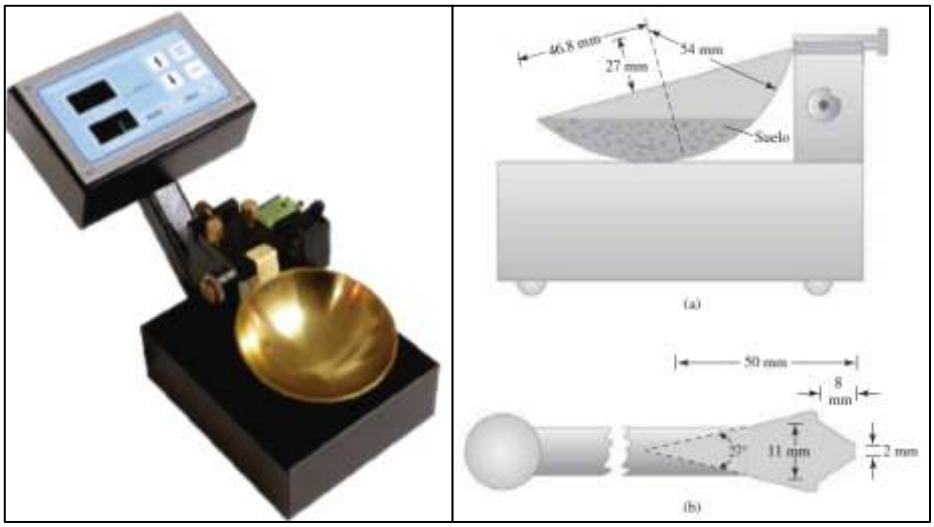



*Figura 34(a) Copa de Casagrande, (b) ranurador (DAS, 2015).*

Para este trabajo se utilizó el método A (Multipunto) para encontrar el límite líquido requiere que se realicen tres o más pruebas en un rango de golpes de los cuales se obtendrá su contenido de humedad, los datos de las pruebas se grafican o calculan para establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido mismo que se define como el contenido de humedad a los 25 golpes.

El límite plástico (PL) se determina presionando y enrollando una muestra de suelo para formar pequeños cilindros de 3,2 mm (1⁄8 pulgadas) de diámetro hasta que su contenido

de agua se reduzca a un punto en el que el hilo se desmorone y no pueda ser amasado para formar nuevamente los cilindros (ver figura 35). El contenido de humedad del suelo en este punto se lo conoce como límite plástico (Das 2015).

*Figura 35 Ensayo de limite plástico* (Das 2015).

El índice de plasticidad (IP) se calcula como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP).

$$IP = LL - LP$$

**Contenido de humedad**

La determinación del contenido de humedad de un suelo se la realiza para la mayoría de los ensayos, tanto antes como después de haber realizado el mismo, se define el contenido de humedad de un suelo como la cantidad de agua presente en un suelo relacionada al peso del sólido del suelo en seco de este, se expresa en porcentaje con la siguiente formula:

$$w = \frac{W_w}{W_s} 100 \quad \text{por ciento}$$

Donde

w: es el contenido de humedad

$W_w$: es el peso del agua de la muestra

$W_s$: es el peso del sólido del suelo= de la muestra

También se puede expresar el contenido volumétrico de agua, que no es más que la relación del volumen de agua con el volumen total de la muestra de suelo, se lo expresa de la siguiente manera:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t}$$

Donde

Θ: Contenido volumétrico de agua

$V_{w:}$ volumen del agua en la muestra

$V_t$: volumen total de la muestra

En la mecánica de suelos parciamente saturados el contenido volumétrico de agua se utiliza mucho para realizar gráficos y tablas comparativas. Se puede expresar la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$\theta = w\Upsilon_s$$

Donde

w= contenido de humedad de la muestra

$\Upsilon_s$= densidad seca de muestra

El procedimiento utilizado para obtener el contenido de humedad del suelo se describe en la normativa (ASTM D2216 2010), un resumen del ensayo dice, que se debe secar al horno la muestra de suelo a una temperatura de 110 ± 5 °C. La pérdida de masa debido al secado es considerada como la masa de agua y la masa de la muestra sólida es la que queda luego del secado, como consideraciones generales se debe tomar en cuenta si el suelo tiene contenido orgánico ya que si es así se debe colocar la muestra en el horno a una temperatura de 60±5 °C.

**Clasificación de suelos**

En la actualidad existen varios métodos para la clasificación de los suelos como los son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO), el Sistema del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el Sistema de la ASTM y el Sistema de la Agencia Federal de Aviación (FAA) entre los más populares. Se realiza una clasificación manual visual en campo, posteriormente en el laboratorio se efectúan los límites de consistencia o límites de Atterberg y la granulometría con lo cual se puede clasificar al suelo (Das 2015) mediante el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo SUCS norma (ASTM D2487 2006).

Se realizó la clasificación SUCS de las muestras alteradas, extraídas del segundo sondeo, también se realizaron ensayos para clasificación en puntos específicos en los que se distinguía cambios de estratos.

En el perfil estratigráfico obtenido de la clasificación SUCS se observa que hasta el metro 7.45 se tiene un suelo cohesivo, limos arenosos ML, limos arenosos de alta plasticidad MH y arcillas arenosas CL.

Del metro 7.45 al 11.45 se encontró arena arcillosa SC y arena limosa SM, este estrato se lo considera como drenante por su alto contenido de arena, el agua circula con mayor facilidad.

Del metro 11.45 al 14.45 son limos con arena ML, limos arenosos ML y arcilla arenosa CL.

Del metro 14.45 al 15.45 son arenas limosas con grava SM

Del metro 15.45 al 18.45 son limos ML y arcillas arenosa CL, limo arenoso ML

Del metro 18.45 al 19.45 arena limosa SM con presencia de rocas.

Del metro 19.45 al 30 son rocas fragmentadas con arena y grava, el material en este último estrato es insuficiente para clasificarlo.

3.3.3 Matriz Succión

Se realizó ensayos de matriz de succión por el método del papel filtro según la norma ASTM D5298, para muestras de suelo inalteradas del metro 2 al 8, por cada metro se

ensayó al menos 2 muestras dependiendo del material disponible, además se hizo especímenes reconstituidos con el suelo extraído del primer sondeo, los especímenes fueron reconstituidos con diferentes contenidos de humedad para poder realizar la Curva Característica del Suelo.

**Procedimiento del ensayo de Matriz de Succión**

**Muestras Inalteradas**

Se secan los papeles filtro en un horno a 110°C por un periodo de al menos 16 horas, una vez transcurrido este tiempo se los debe colocar en un disecador (recipiente que contenga gel de sílice o sulfato de calcio anhidro) para evitar que los papeles absorban humedad.

*Fotografía 9 Recipiente disecador*

Se tallan las muestras obtenidas de los tubos Shelby de tal forma que puedan entrar en un recipiente de cristal de entre 200 a 400 ml de capacidad, se alisa una de las caras de las dos piezas las cuales deberán estar en contacto con los papeles filtro.

*Fotografía 10 Alisado de las caras de una probeta de suelo para el ensayo de matriz de succión*

Se coloca en medio de 2 papeles filtro un tercero con un diámetro de 2 a 3 mm menor previamente cortados con tijeras, luego se colocan los 3 papeles filtro en medio de las dos

muestras de suelo las cuales deben hacer contacto con las caras lisas y se coloca todo dentro del recipiente de vidrio el cual debe ser sellado con una tapa y cinta aislante.

*Fotografía 11 Frasco de Cristal con Muestra de suelo para realizar ensayo de matriz de succión*

El recipiente se lo deja por un periodo de 7 días dentro de un contenedor de espuma aislante en el cual se mantenga la temperatura ideal en su interior de 20 °C con una variación de máximo ±1°C, para cambios de temperatura exterior de ±3 °C, esto con el fin de evitar la condensación del vapor de agua en el interior del frasco de vidrio.

*Fotografía 12 Almacenamiento de los frascos de Cristal para realizar ensayo de matriz de succión*

Trascurrido el periodo de equilibrio se retira el papel filtro central y se lo coloca inmediatamente dentro de una bolsa plástica que pueda sellarse herméticamente, se debe registrar la masa de esta bolsa antes de usarla, esta maniobra tiene que durar menos de 5 segundos desde que se expone el papel filtro al ambiente sobre todo cuando se trate de muestras de suelo con bajos contenidos de humedad, inmediatamente luego de colocar el

papel filtro en la bolsa se lo pesa en una balanza con una precisión de 0.0001 g, es recomendable encerar la balanza con un contenedor en el cual se pueda colocar la bolsa de plástico con el papel filtro para tomar una medida más precisa.

*Fotografía 13 Medición de los Papeles filtro para realizar ensayo de matriz de succión*

Luego colocar el papel filtro en un horno a 110°C por un periodo de 2 horas, al mismo tiempo colocar dentro de la bolsa plástica un papel filtro seco para absorber cualquier residuo de humedad.

Se retira el papel filtro del horno y se lo coloca en el disecador por un tiempo de 15 min, luego se lo coloca en la bolsa de plástico y se registra la masa de la bolsa y el papel filtro seco, a continuación, se retira el papel filtro de la bolsa plástica y se registra la masa de la bolsa nuevamente.

**Probetas reconstituidas**

Para conformar las probetas reconstituidas se secó el material tomado del metro 3 al 7, como representativo del estrato superior, una vez seco y suelto se lo tamizó por el tamiz número 4 y se lo homogenizó.

*Fotografía 14 Suelo utilizado para realizar probetas reconstituidas*

Se realizaron los cálculos para conformar probetas con una densidad seca de 1.5 g/cm3, esta densidad fue tomada debido a la facilidad para moldear las probetas, ya que la densidad seca promedio de 1.36 g/cm3 (promedio de las densidades obtenidas del estrato superior en especímenes inalterados) es muy baja y resulta complicado realizar probetas iguales con esta misma densidad seca.

Para poder conformar la curva característica del suelo se debe escoger un rango de humedades para poder realizar muestras con saturaciones desde 100% hasta 0% de ser posible, para esto tenemos los siguientes datos obtenidos de los anteriores ensayos Gs=2.52, $\rho_s$=1.5 g/cm3 y porcentaje de saturación S=100%

Cálculo de la relación de vacíos

$$\rho_s = \frac{Gs * \rho_w}{1 + e} \quad (Das, 2013)\ Ecuacion\ (3.22)$$

Despejamos e

$$e = \frac{Gs * \rho_w}{\rho_s} - 1$$

Donde:

e: es el contenido de vacíos

Gs: es la gravedad especifica del suelo

$\rho_s$: es la densidad del suelo seco

$\rho_w$: es la densidad del agua (1 g/cm3)

$$e = \frac{2.52 * 1\ g/cm3}{1.5\ g/cm3} - 1$$

$$e = \ 0.68$$

Cálculo del contenido de humedad para la saturación de la probeta.

$$S * e = w * Gs \qquad (Das, 2013)\ Ecuacion\ (3.19)$$

Se despeja w

$$w = \frac{S * e}{GS}$$

$$w = \frac{100 * 0.68}{2.52}$$

$$w = 26.98\ \approx 27\%$$

Con estos datos sabemos que el suelo se satura con un contenido de humedad w≈27% por lo que se escoge contenidos de humedad desde un 30 % para ensayar muestras saturadas, 25, 20, 15, 10, 5 y 3 por ciento de contenidos de humedad para obtener la mayor cantidad de datos posibles.

El molde fabricado para realizar las probetas tiene un diámetro interno promedio de 6.52cm y una altura de 9.01 cm su volumen es de 300.82cm3, con estos datos se calcula el peso del suelo seco necesario para conseguir la densidad de 1.5 g/cm3

$$\rho_s = Wss/V$$

Donde:

$\rho_s$: es la densidad seca

Wss: es el peso del suelo seco

V: volumen del molde

$$Wss = \rho_s * V$$

$$Wss = 1.5 \frac{g}{cm^3} * 300.82\ cm^3$$

$$Wss = 451.23\ gr$$

Para cada probeta se calculó el peso del agua necesaria para obtener el contenido de humedad necesario.

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde

w: contenido de humedad en porcentaje

$W_w$: es el peso del agua de la muestra

$W_s$: es el peso del suelo seco de la muestra

$$W_w = wW_s/100$$

*Tabla 2 Resultado de los cálculos para conformar probetas de suelo reconstituido para el ensayo de matriz de succión*

| w (%) | Peso del suelo (g) | Volumen Agua (ml) |
|---|---|---|
| **3** | 451.23 | 13.5369 |
| **5** | 451.23 | 22.5615 |
| **10** | 451.23 | 45.123 |
| **15** | 451.23 | 67.6845 |
| **20** | 451.23 | 90.246 |
| **25** | 451.23 | 112.8075 |
| **30** | 451.23 | 135.369 |

Una vez registrados los datos de peso y volumen se procede a pesar el suelo y colocarlo en fundas marcadas con el porcentaje de humedad requerido y el número de la muestra, se realizarán 3 muestras por cada contenido de humedad.

*Fotografía 15 Bolsas plásticas utilizadas para almacenar el suelo seco para la conformación de probetas reconstituidas*

A continuación, se mide en una probeta los ml de agua destilada requeridos, se mezcla el agua y el suelo de las fundas en un recipiente con la ayuda de una espátula.

*Fotografía 16 Mescla del suelo y agua para conformar las probetas*

Se recomienda colocar nuevamente el suelo mezclado con agua en su respectiva funda para su correcta hidratación, por al menos 3 días.

Se compacta el suelo en el molde con la ayuda del martillo del ensayo Proctor Estándar, este proceso se realizó en 4 capas midiendo con una regla que cada capa ocupe el volumen que le corresponde.

*Fotografía 17 Molde utilizado en la compactación de las muestras reconstituidas para el ensayo de matriz de succión*

*Fotografía 18 Equipo utilizado en la compactación de las muestras reconstituidas para el ensayo de matriz de succión*

Una vez compactado el material se lo retira del molde mediante una prensa manual especialmente diseñada para este trabajo.

*Fotografía 19 Equipo utilizado en la compactación de las muestras reconstituidas para el ensayo de matriz de succión*

La probeta extraída se la guarda en una bolsa plástica para evitar pérdidas de humedad hasta realizar el ensayo de Matriz de Succión por el método del Papel Filtro.

*Fotografía 20 Muestras de suelo Reconstituidas para el ensayo de matriz de succión*

Terminado el ensayo de Matriz de Succión se debe obtener el contenido de humedad para calcular el valor exacto de densidad con el cual se realizó el ensayo, estos valores deben ser comprobados ya que en la práctica siempre existe una pequeña diferencia con los cálculos.

Una vez obtenidos los datos de succión y humedades de las muestras de suelo reconstituido podremos realizar la curva característica de este suelo para analizar y comparar los resultados con los de especímenes inalterados, así como establecer una relación con resultados de ensayos de compresión simple.

### 3.3.4 Compresión Simple

Se hicieron ensayos de compresión simple tanto para especímenes inalterados como para probetas de suelo reconstituido, los ensayos en especímenes inalterados se tallaron con material extraído de los tubos Shelby se realizaron del metro 2 al 8, dos ensayos por metro dependiendo de la cantidad de material disponible.

Para los ensayos en muestras reconstituidas se realizó probetas con el ensayo Harvard Miniatura en base a la guía STP479 de Shannon and Wilson, 1970, debido a que no se contaba con el material suficiente para poder realizar pobretas más grandes como las que se ensayaron en los especímenes inalterados, se tomó el material extraído del primer sondeo y se lo tamizó por el tamiz No 10 ya que el cilindro obtenido del ensayo de Harvard Miniatura tiene un diámetro de 33.22 mm y una altura de 71.03 mm las partículas de suelo no podían ser mayores a una décima parte del diámetro de la muestra las que pasan por el tamiz No 10 según ASTM D2166.

Los resultados obtenidos del ensayo Harvard Miniatura se utilizan para generar el diagrama de Mohr-Coulomb Extendido junto con los ensayos de la Matriz de Succión, es por esto que se requieren probetas con diferentes contenidos de humedad, se seleccionó 5, 10, 15, 20, 25, 30 por ciento de contenido de humedad para realizar los ensayos.

Se calcula el peso del suelo requerido para una densidad de 1.5 gr/cm3 y un volumen del molde del ensayo Harvard Miniatura de 61.46 cm3.

$$Wss = \rho_s * V$$

$$Wss = 1.5 \frac{g}{cm^3} * 61.46\ cm^3$$

$$Wss = 92.19\ gr$$

Se calcula el volumen de agua en ml para cada contenido de humedad.

*Tabla 3 Resultado de los cálculos para conformar probetas de suelo reconstituido para el ensayo de compresión simple*

| w (%) | Peso del suelo (g) | Peso del Agua (ml) |
|---|---|---|
| 5 | 92.19 | 4.6095 |
| 10 | 92.19 | 9.219 |
| 15 | 92.19 | 13.8285 |
| 25 | 92.19 | 23.0475 |
| 30 | 92.19 | 27.657 |

Se mezcla el agua destilada con el suelo en un recipiente, se lo almacena en una funda plástica marcada con el porcentaje de humedad y el número de nuestra, se realizó 3 muestras por cada contenido de humedad.

Se coloca el suelo en el molde y se lo compacta capa por capa, con un total de 5 capas, controlando con una regla que cada capa ocupe el volumen que le corresponde, se debe utilizar la balanza para pesar exactamente cuánto suelo se deberá colocar en cada capa.

*Fotografía 21 Ensayo Harvard Miniatura*

*Fotografía 22 Equipo para el ensayo Harvard Miniatura*

Se extrae la probeta de suelo del molde en su respectiva máquina.

*Fotografía 23Equipo para el ensayo Harvard Miniatura*

Se procede a ensayar la probeta en la máquina de compresión simple (ASTM D2166 2013).

*Fotografía 24 Maquina triaxial del laboratorio de suelos de la PUCE*

Terminado el ensayo de Compresión Simple se debe realizar inmediatamente se determina el contenido de humedad para obtener el valor exacto de la humedad de cada probeta.

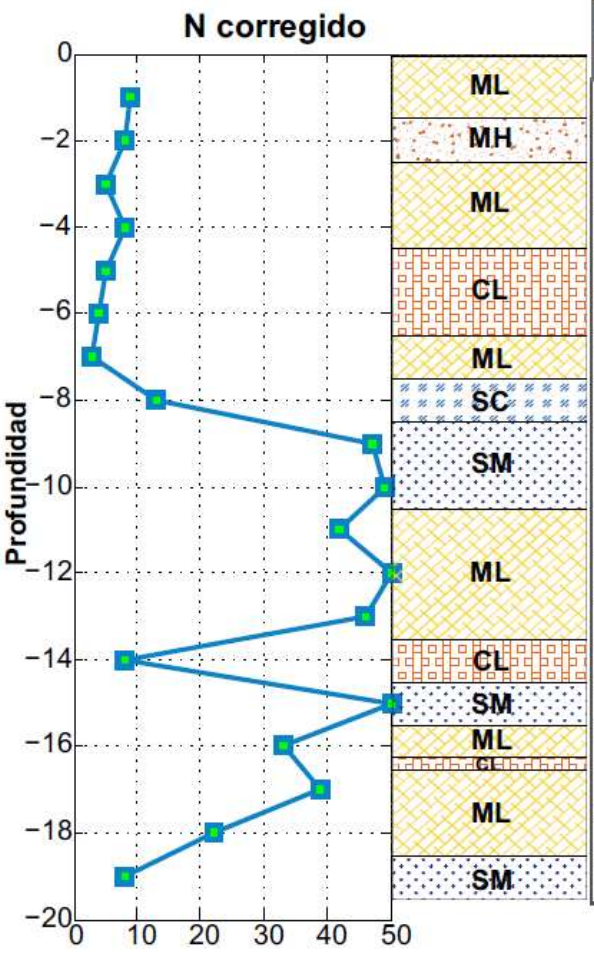
## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La investigación de datos hidrogeológicos y geológicos, así como los ensayos in situ y de laboratorio realizados en de la zona del Roció de Guamaní son de suma importancia para comprender con mayor exactitud la conformación de los suelos que forman los diferentes estratos , además se tendrá una clara idea de cómo cada estrato interviene en la hidratación del perfil ya que se tiene estratos saturados, estratos poco permeables, estratos drenantes y sobre todo estratos que se mantengan parcialmente saturados, la identificación de cada uno de estos estratos se logra utilizando toda esta información.

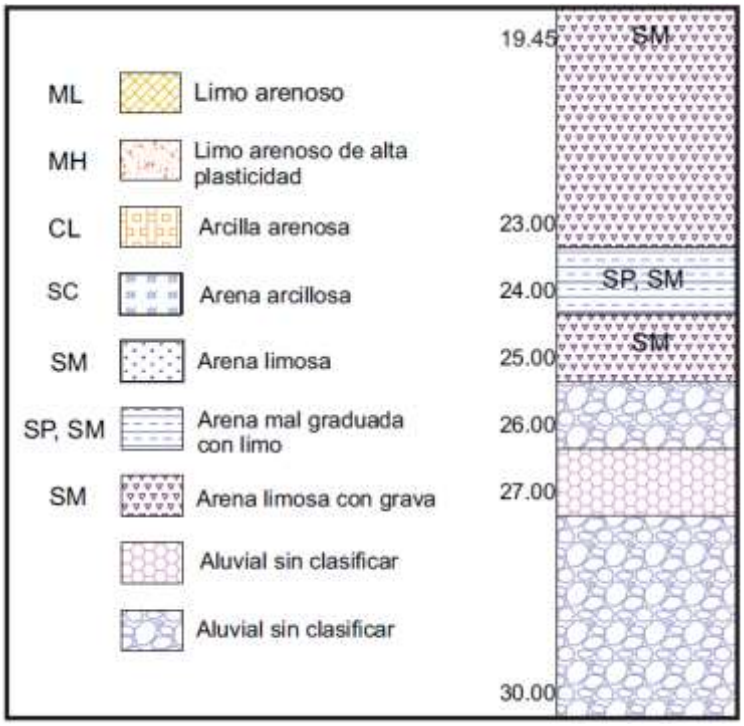
### 4.1 ESTRATIGRAFÍA CON DATOS

La estratigrafía que a continuación se presenta, se realizó en base a los datos obtenidos en campo y laboratorio, en ella se observan datos relevantes como contenido de humedad, densidad, gravedad específica, saturación, límites Atterberg, clasificación de suelos, y el

ensayo de campo SPT, para suelos no plásticos (NP) sólo se realizó su clasificación, no se encontró el nivel freático en los 30 metros de perforación.




| %w | Ds (g/cm3) | %S | Gs | LI | Lp | IP |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 31 | _ | _ | _ | 43 | 34 | 9 |
| 42 | 1.18 | 57 | 2.52 | 54 | 42 | 12 |
| 35 | 1.15 | 82 | 2.52 | 41 | 37 | 4 |
| 40 | 1.33 | 92 | 2.54 | 42 | 35 | 6 |
| 37 | 1.25 | 81 | 2.52 | 37 | 24 | 14 |
| 31 | 1.40 | 100 | 2.52 | 33 | 22 | 12 |
| 35 | 1.44 | 94 | 2.55 | 41 | 29 | 12 |
| 26 | 1.36 | 93 | 2.63 | 33 | 22 | 12 |
| 29 | 1.51 | 100 | 2.66 | 28 | 25 | 4 |
| NP | | | | | | |
| 40 | 1.40 | 100 | 2.59 | 42 | 33 | 10 |
| 33 | 1.39 | 64 | 2.60 | 39 | 29 | 11 |
| 35 | _ | _ | 2.60 | 34 | 25 | 9 |
| 32 | 1.51 | 100 | 2.57 | 27 | 18 | 9 |
| 37 | 1.22 | 69 | 2.60 | 36 | 28 | 8 |
| 33 | 1.25 | 80 | 2.6 | 31 | 20 | 11 |
| 36 | 1.29 | 90 | 2.7 | 37 | 31 | 6 |
| 53 | _ | _ | _ | 41 | 32 | 9 |
| NP | | | | | | |



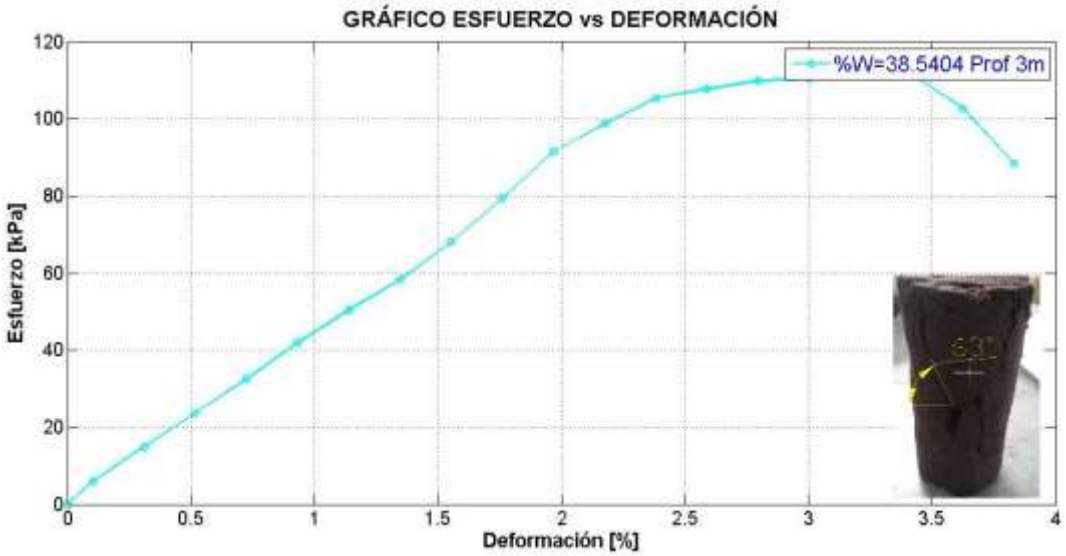

*Grafica 1 Estratigrafía del pozo PCQ 0002, muestras obtenidas in situ del 13 de agosto al 19 de agosto del 2019 en periodo de precipitaciones bajas según Bastidas (2016).*

Se observa en el perfil estratigráfico un estrato superior que llega hasta el metro 7 con material predominantemente fino en su mayoría limos arenosos además en el primer metros de este estrato no se obtuvieron datos ya que se lo considero como un relleno, entre el metro 7 y 11 se clasifica al suelo como arenas limosas y arcillosas lo que nos indica la presencia de un posible estrato drenante, después encontramos del metro 11 al 15 un material clasificado en su mayoría como limos arenosos y aunque se clasifique igual que el primer estrato este material es completamente distinto no sólo en su color sino también en su mayor resistencia ya que en este material se obtuvo valores altos del N corregidos en el ensayo del SPT, en el metro 15 se encuentra nuevamente un estrato pequeño de arena limosa, del metro 16 al 18 tenemos un material en su gran mayoría limo arenoso con características similares a las del 3er estrato pero con un N corregido más bajo.

## 4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Gráficos esfuerzo versus deformación de los ensayos de compresión simple para especímenes de suelo inalterados, en cada gráfico se puede apreciar la curva esfuerzo deformación, así como la profundidad a la que se extrajo la muestra, el contenido de humedad y una foto de la muestra después de ser ensayada.

*Grafica 2 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 2m, contenido de humedad 26%*



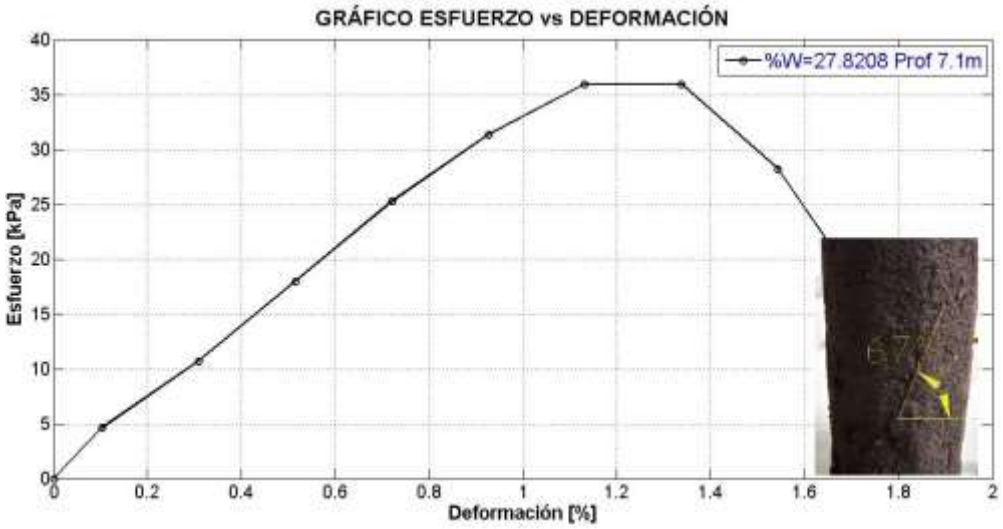

*Grafica 3 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 3m, contenido de humedad 39%*

*Grafica 4 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 4m, contenido de humedad 32%*

*Grafica 5 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 5m, contenido de humedad 32%*

*Grafica 6 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 5m, contenido de humedad 32%*

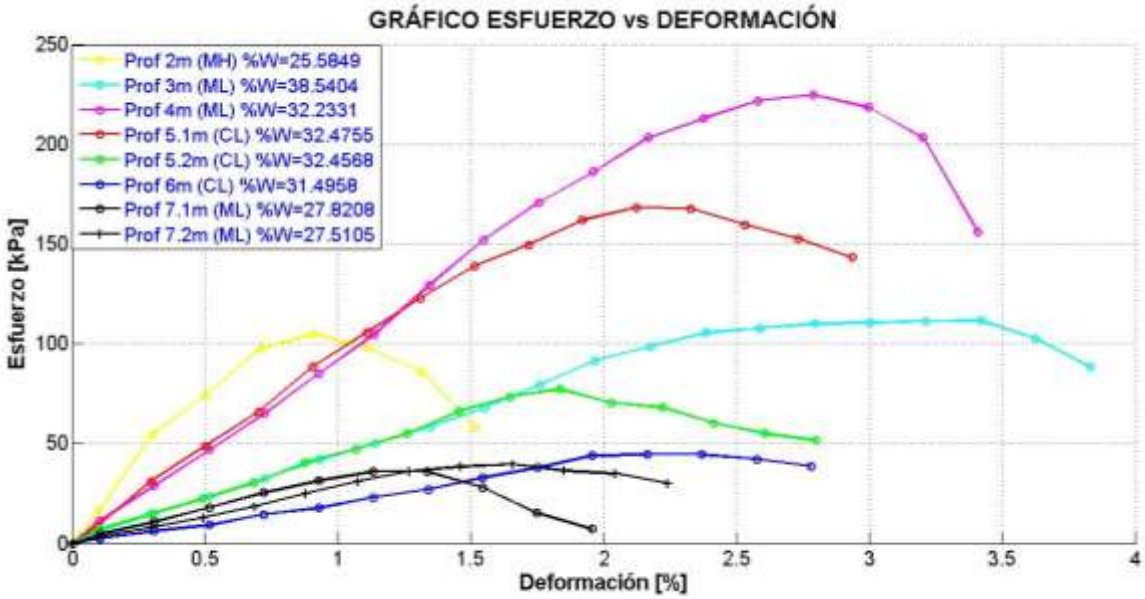
*Grafica 7 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 6m, contenido de humedad 31%*




*Grafica 8 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 7m, contenido de humedad 28%*

*Grafica 9 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 7m, contenido de humedad 28%*

*Grafica 10 Esfuerzo vs deformación de especímenes inalterados, profundidad 8m, contenido de humedad 30%*




*Grafica 11 Resumen de los ensayos de compresión simple para especímenes inalteradas*

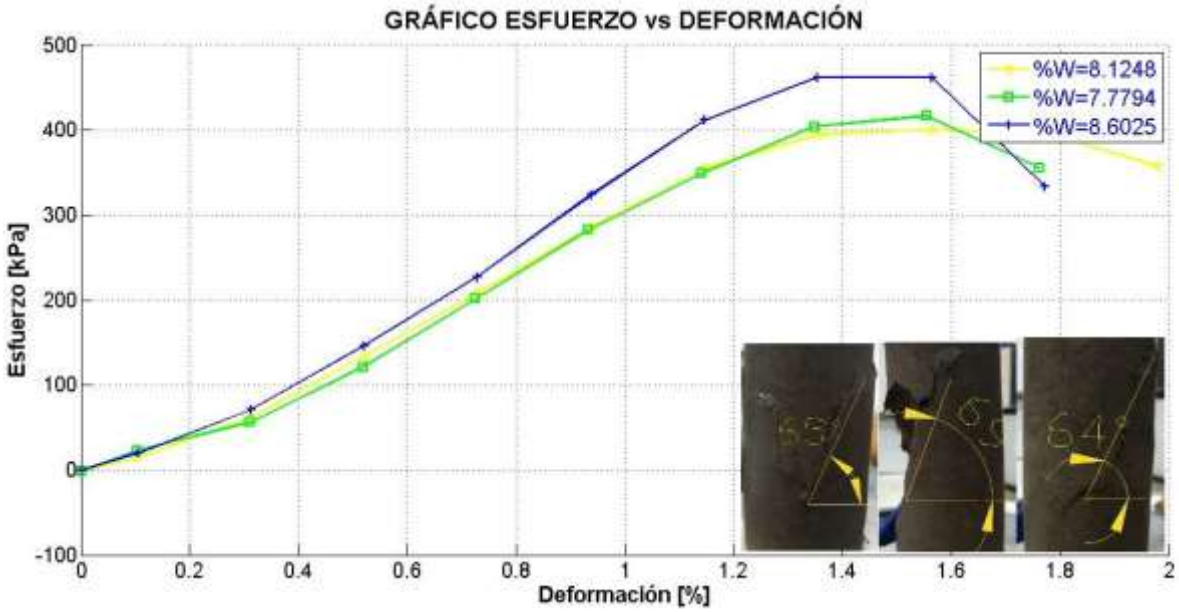
En la siguiente tabla tenemos los resultados obtenidos de los ensayos de compresión simple en especímenes de suelo inalterados como sus características físicas, el esfuerzo de resistencia ultimo ($q_u$). Además, se calculó el esfuerzo normal y la resistencia al corte sobre el plano de falla midiendo el ángulo en el cual la probeta falló, esto para las probetas en las que se podía apreciar una falla por corte bien definida.

En esta tabla podemos darnos cuenta de que, aunque la densidad del suelo en los primeros cinco metros del estrato es menor a las densidades de los siguientes metros, su resistencia a la compresión es mayor, esto podría deberse a que en los primeros cinco metros los porcentajes de saturación no son tan altos como en los metros finales.

*Tabla 4 Resultados de ensayos de compresión simple para muestras de suelo inalteradas*

| Prof | Densidad Bulk (g/cm3) | w (%) | Densidad Seca (g/cm3) | θ (Contenido volumétrico de agua) | Saturación (%) | e | Gs | Esfuerzo Normal (KPa) | Resistencia al corte (KPa) | qu (KPa) | Modulo de Young (MN/m2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.00-2.50 | 1.48 | 26 | 1.180 | 0.302 | 57 | 1.135 | 2.52 | _ | _ | 105.0 | 16.04 |
| 3.00-3.50 | 1.59 | 39 | 1.146 | 0.442 | 82 | 1.198 | 2.54 | 23.0 | 45.1 | 111.4 | 5.75 |
| 4.00-4.50 | 1.76 | 32 | 1.332 | 0.429 | 92 | 0.893 | 2.54 | 34.3 | 80.8 | 224.7 | 10.87 |
| 5.00-5.50(1) | 1.66 | 32 | 1.253 | 0.407 | 81 | 1.010 | 2.52 | 42.1 | 72.9 | 168.3 | 9.18 |
| 5.00-5.50(2) | 1.62 | 32 | 1.223 | 0.397 | 77 | 1.060 | 2.52 | 19.3 | 33.5 | 77.3 | 6.96 |
| 6.00-6.50 | 1.84 | 31 | 1.396 | 0.440 | 100 | 0.806 | 2.55 | 6.2 | 15.4 | 44.4 | 2.28 |
| 7.00-7.50(1) | 1.84 | 28 | 1.436 | 0.399 | 94 | 0.755 | 2.55 | 5.5 | 12.9 | 36.0 | 4.48 |
| 7.00-7.50(2) | 1.88 | 28 | 1.473 | 0.405 | 99 | 0.711 | 2.55 | 3.0 | 10.5 | 39.8 | 3.13 |
| 8.00-8.50 | 1.77 | 30 | 1.361 | 0.409 | 93 | 0.852 | 2.63 | 8.1 | 14.1 | 32.6 | 5.59 |

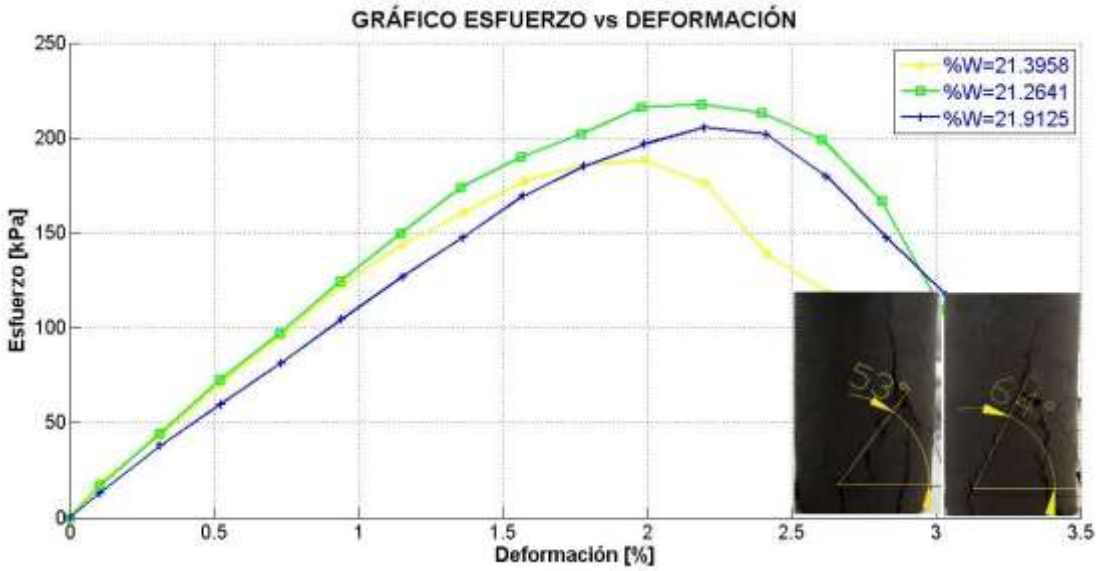
Gráficos esfuerzo versus deformación de los ensayos de compresiones simple para muestras de suelo reconstituido, en cada gráfico se puede apreciar la curva esfuerzo deformación de las muestras de suelo reconstituidas con contenidos de húmeda similares, se muestra el contenido de humedad de cada curva y una foto de cada muestra después de ser ensayada.



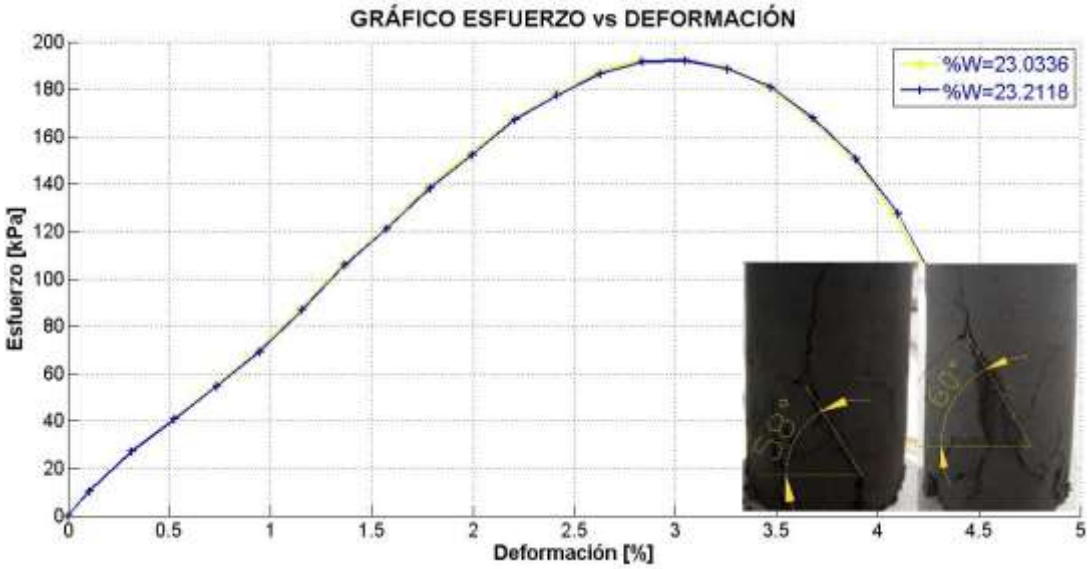

*Grafica 12 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 8%*

*Grafica 13 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 12%*

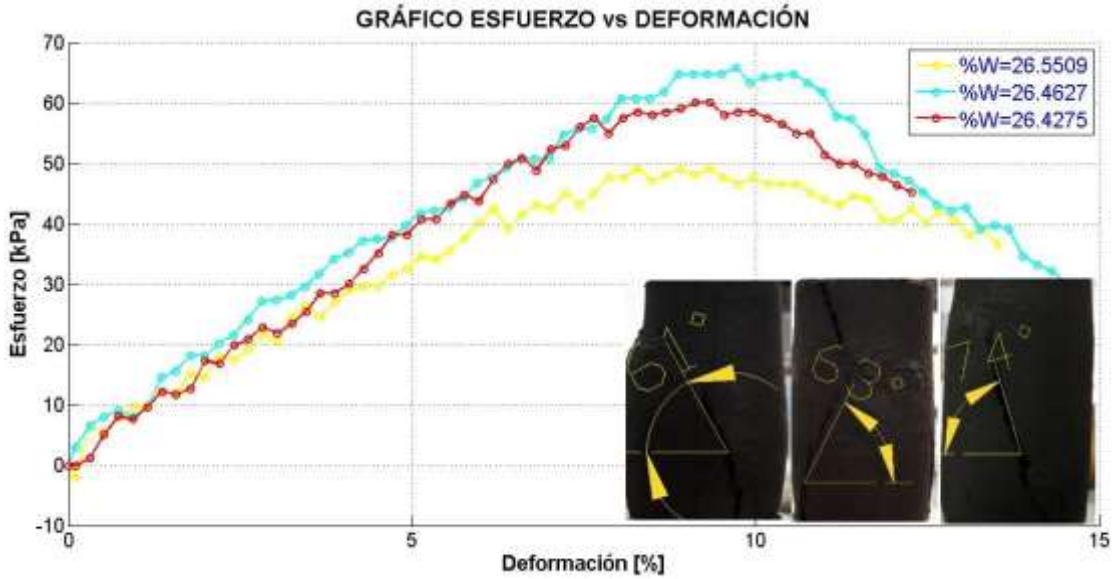
*Grafica 14 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 17%*



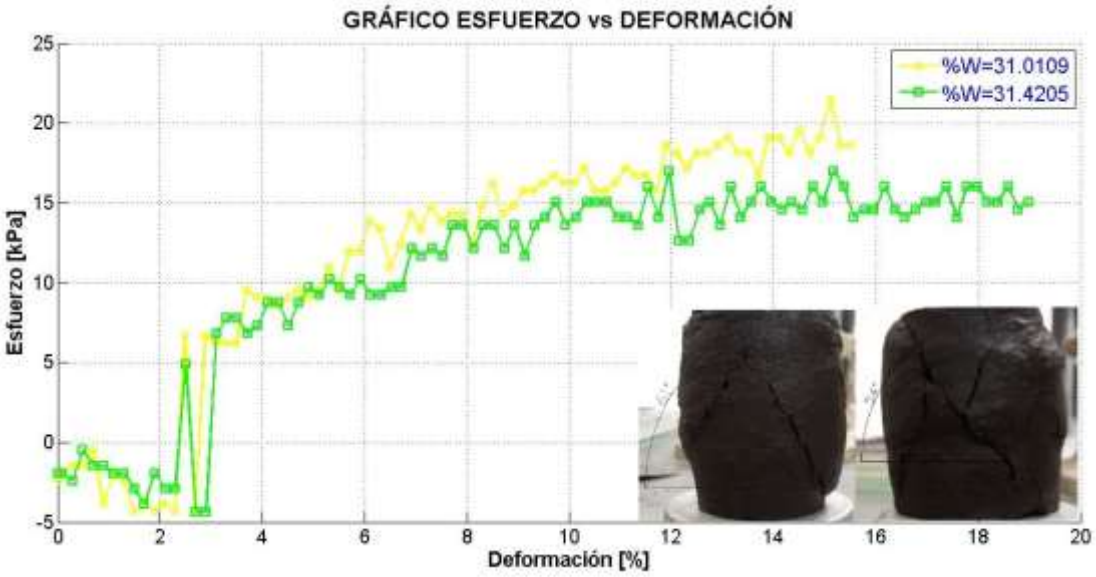

*Grafica 15 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 22%*




*Grafica 16 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 23%*




*Grafica 17 Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 26%*




*Grafica 18Esfuerzo vs deformación de muestras reconstituidas contenido de humedad promedio 31%*

*Grafica 19 Resumen de los ensayos de compresión simple para especímenes reconstituidos*

De los gráficos esfuerzo versus deformación en muestras de suelo reconstituidas podemos apreciar claramente que su resistencia a la compresión se reduce a medida que el contenido de humedad aumenta y mientras la deformación aumenta.

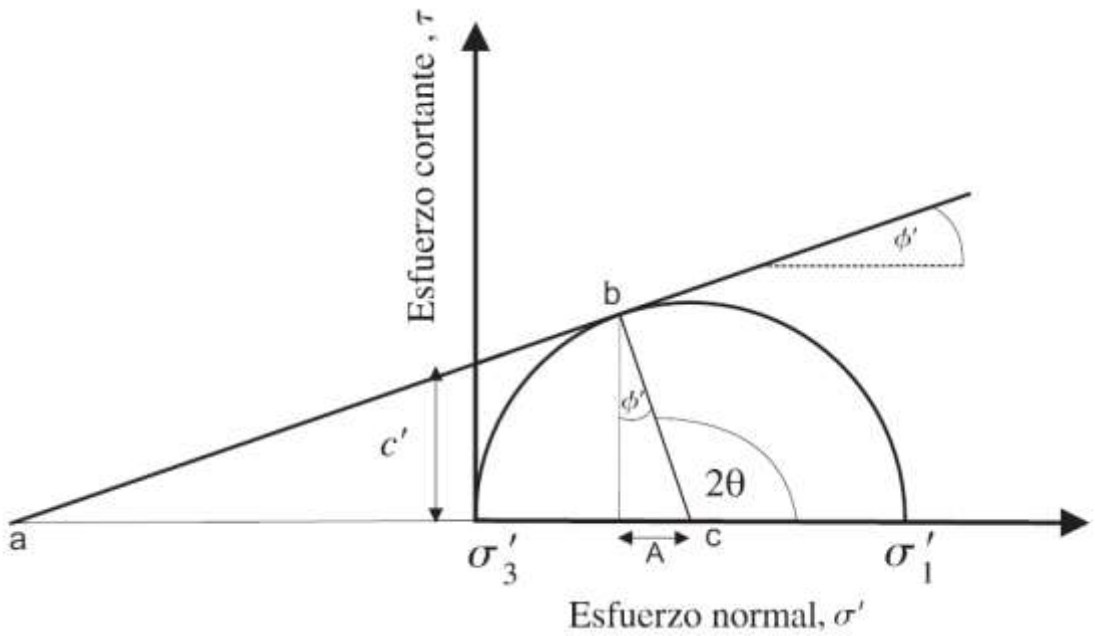
En la siguiente tabla tenemos los resultados obtenidos de los ensayos de compresión simple en muestras de suelo reconstituidas como: sus características físicas, el esfuerzo de resistencia ultimo ($q_u$), el esfuerzo normal y la resistencia al corte calculado en base a la medida del ángulo en el cual la probeta falló, esto para las probetas en las que se podía apreciar una falla por corte bien definida.

Ejemplo: Calcular el esfuerzo normal y la resistencia al corte de la Probeta “5% (1)”, el ángulo de falla medido en laboratorio es de 65° y su resistencia a la compresión (qu) es de 400.5 kPa.

Obtenemos el ángulo de fricción con la siguiente formula

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2}$$
$$\phi' = (\theta - 45) * 2$$
$$\phi' = 40$$

Trazamos el diagrama de Morh Coulomb en el cual el esfuerzo de confinamiento es 0 y el esfuerzo desviador es 400.5kPa, el punto b indica la combinación de esfuerzo normal y cortante con la que la muestra falla.




Para calcular la resistencia al corte en el punto b se obtiene la siguiente ecuación por geometría:

$$cos(\phi') = \frac{\tau}{\frac{qu}{2}}$$

$$\tau = \cos(\phi')\, x \frac{qu}{2}$$

$$\tau = 153.4\ kPa$$

Para calcular el esfuerzo normal en el punto b se obtiene la siguiente ecuación por geometría:

$$(1) \qquad sen(\phi') = \frac{A}{\frac{qu}{2}}$$

$$(2) \qquad \frac{qu}{2} - A = \sigma$$

$$(1) en\ (2) \qquad \sigma = \frac{qu}{2} - sen(\phi') x \left(\frac{qu}{2}\right)$$

$$\sigma = \left(1 - sen(\phi')\right) x \frac{qu}{2}$$

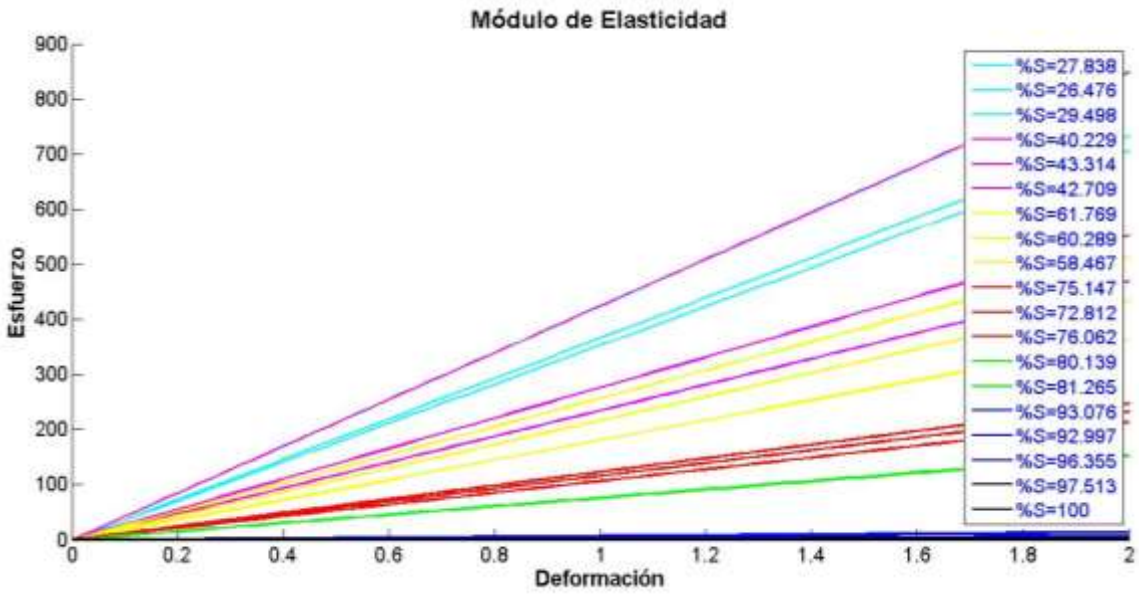
$$\sigma = 71.5 kPa$$

*Tabla 5 Datos obtenidos de los ensayos de compresión simple en muestras de suelo reconstituido con diferentes contenidos de humedad.*

| Nombre de Probeta | Densidad Bulk (g/cm3) | w (%) | Densidad Seca (g/cm3) | θ (Contenido volumétrico de agua) | e | Saturación (%) | Gs | Esfuerzo Normal (KPa) | Resistencia al corte (KPa) | qu (KPa) | Modulo de Young (MN/m2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5% (1) | 1.570 | 8 | 1.452 | 0.118 | 0.735 | 28 | 2.52 | 71.5 | 153.4 | 400.5 | 35.31 |
| 5% (2) | 1.561 | 8 | 1.448 | 0.113 | 0.740 | 26 | 2.52 | 53.5 | 139.5 | 416.9 | 36.61 |
| 5%(3) | 1.577 | 9 | 1.453 | 0.125 | 0.735 | 29 | 2.52 | 82.5 | 177.0 | 462.1 | 42.40 |
| 10% (1) | 1.620 | 12 | 1.449 | 0.171 | 0.739 | 40 | 2.52 | 170.4 | 196.0 | 395.8 | 27.63 |
| 10% (2) | 1.647 | 12 | 1.466 | 0.181 | 0.719 | 43 | 2.52 | 115.1 | 152.7 | 317.8 | 23.47 |
| 10% (3) | 1.658 | 12 | 1.482 | 0.176 | 0.700 | 43 | 2.52 | 112.7 | 180.4 | 401.3 | 42.45 |
| 15% (1) | 1.737 | 17 | 1.483 | 0.254 | 0.699 | 62 | 2.52 | 128.2 | 170.1 | 353.9 | 25.67 |
| 15% (2) | 1.720 | 17 | 1.469 | 0.252 | 0.716 | 60 | 2.52 | 116.6 | 154.7 | 321.9 | 21.65 |
| 15% (3) | 1.696 | 17 | 1.448 | 0.249 | 0.741 | 58 | 2.52 | 73.6 | 117.8 | 262.1 | 18.11 |
| 20.1 (1) | 1.781 | 21 | 1.467 | 0.314 | 0.717 | 75 | 2.52 | 44.2 | 79.8 | 188.2 | 11.62 |
| 20.1 (2) | 1.760 | 21 | 1.452 | 0.309 | 0.736 | 73 | 2.52 | 75.1 | 103.4 | 217.5 | 12.35 |
| 20.1 (3) | 1.780 | 22 | 1.460 | 0.320 | 0.726 | 76 | 2.52 | 31.4 | 73.9 | 205.5 | 10.67 |
| 22.5 (1) | 1.798 | 23 | 1.461 | 0.337 | 0.724 | 80 | 2.52 | 54.1 | 86.6 | 192.6 | 7.64 |
| 22.5 (2) | 1.805 | 23 | 1.465 | 0.340 | 0.720 | 81 | 2.52 | 45.1 | 81.4 | 192.0 | 7.58 |
| 25% (1) | 1.855 | 27 | 1.466 | 0.389 | 0.719 | 93 | 2.52 | 11.5 | 20.8 | 49.1 | 0.64 |
| 25% (2) | 1.856 | 26 | 1.468 | 0.388 | 0.717 | 93 | 2.52 | 5.0 | 17.4 | 65.8 | 0.72 |
| 25% (3) | 1.883 | 26 | 1.489 | 0.394 | 0.693 | 96 | 2.52 | 11.5 | 23.7 | 60.1 | 0.32 |
| 30% (1) | 1.833 | 31 | 1.399 | 0.434 | 0.801 | 98 | 2.52 | 5.1 | 9.1 | 21.5 | 0.13 |
| 30% (2) | 1.875 | 31 | 1.427 | 0.448 | 0.766 | 100 | 2.52 | 5.9 | 8.1 | 17.0 | 0.10 |

## 4.3 MÓDULOS DE ELASTICIDAD

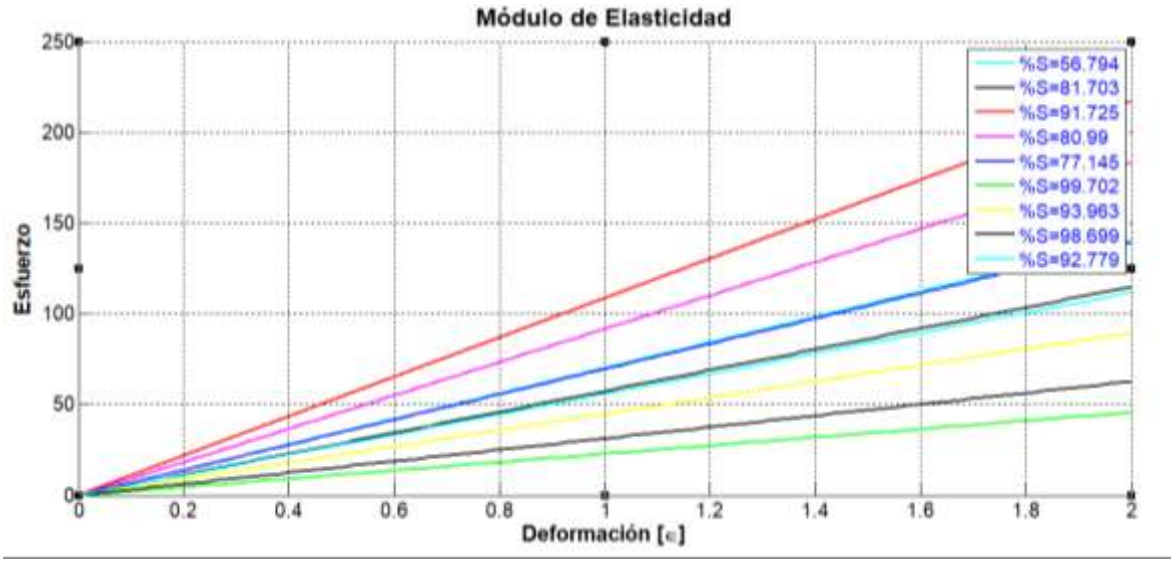
Se calculan los módulos de elasticidad para los datos obtenidos de los ensayos de compresión simple y se los grafica como una recta que representa la pendiente tangente en los tramos rectos iniciales de cada gráfico tanto para muestras de suelo reconstituido como especímenes de suelo inalterado, en los gráficos se puede apreciar la saturación de cada probeta.




*Grafica 20 Módulos de Elasticidad en muestras de suelo reconstituidas*

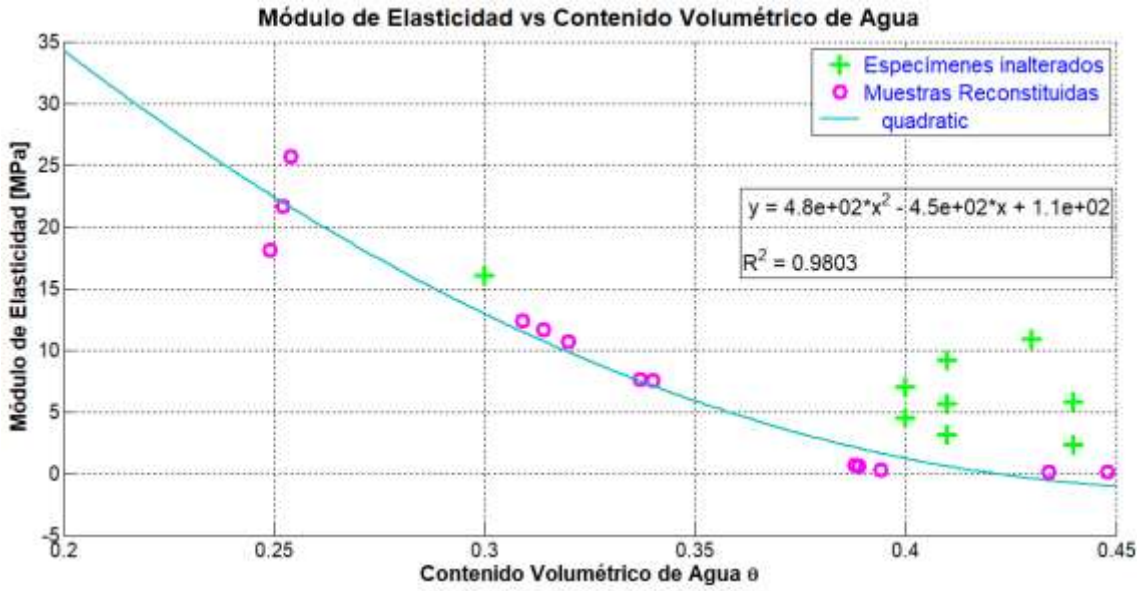
En la gráfica (20) podemos observar la comparación de los módulos de elasticidad para los diferentes estados de saturación de las muestras de suelo reconstituidas, la gráfica nos muestra como los módulos de elasticidad se reducen a medida que la saturación aumenta.

En la gráfica (21) de módulos de elasticidad en especímenes de suelo inalterado no se observa una clara relación de los módulos de elasticidad con la saturación de suelo esto debido a que en estas muestras no se controla sus aspectos físicos que hay que tomar en cuenta.




*Grafica 21 Módulos de Elasticidad en especímenes de suelo inalterados*

En el siguiente gráfico observamos la magnitud calculada del módulo de elasticidad con su respectivo contenido volumétrico de agua (θ) este parámetro es de suma importancia ya que en la mayoría de investigaciones es utilizado para generar la Curva Característica del Suelo, además uno de nuestros principales objetivos es estableces una relación del Módulo de Elasticidad con la Matriz de Succión del Suelo lo cual resulta de especial utilidad para establecer una relación entre estos dos parámetros.



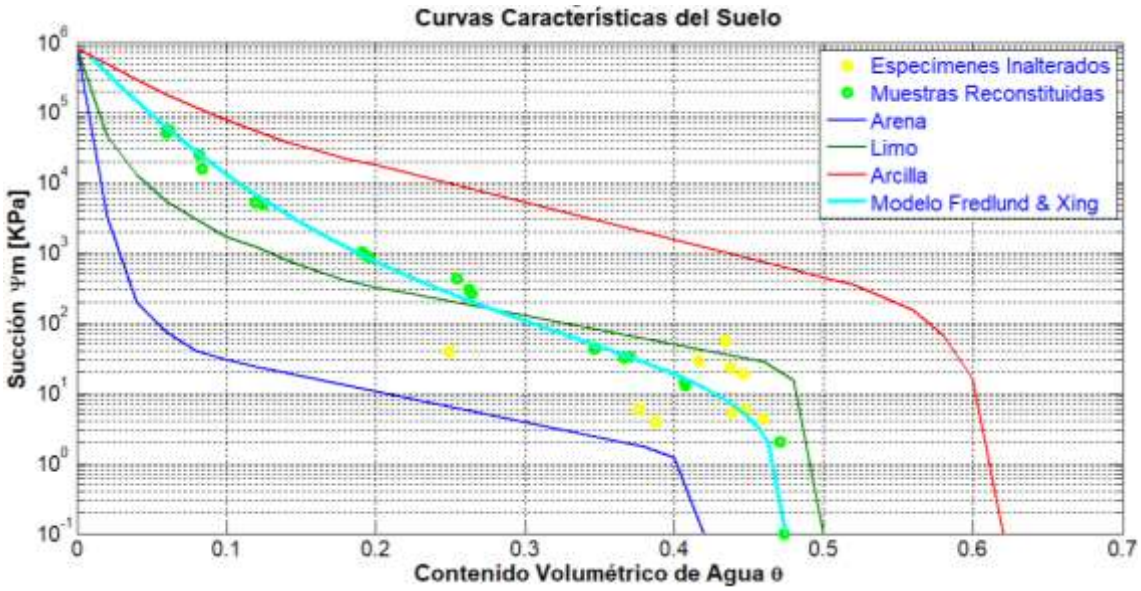

*Grafica 22 Módulo de Elasticidad vs Contenido Volumétrico de Agua*

En el grafico (22) se puede apreciar la relación que se tiene del Módulo de Elasticidad con el contenido volumétrico de agua tanto para muestras reconstituidas como especímenes inalterados, en las muestras de suelo reconstituido los datos tienen como tendencia una curva cuadrática mientras que los datos de los especímenes inalterados se encuentran muy dispersos y no generan ningún patrón o tendencia.

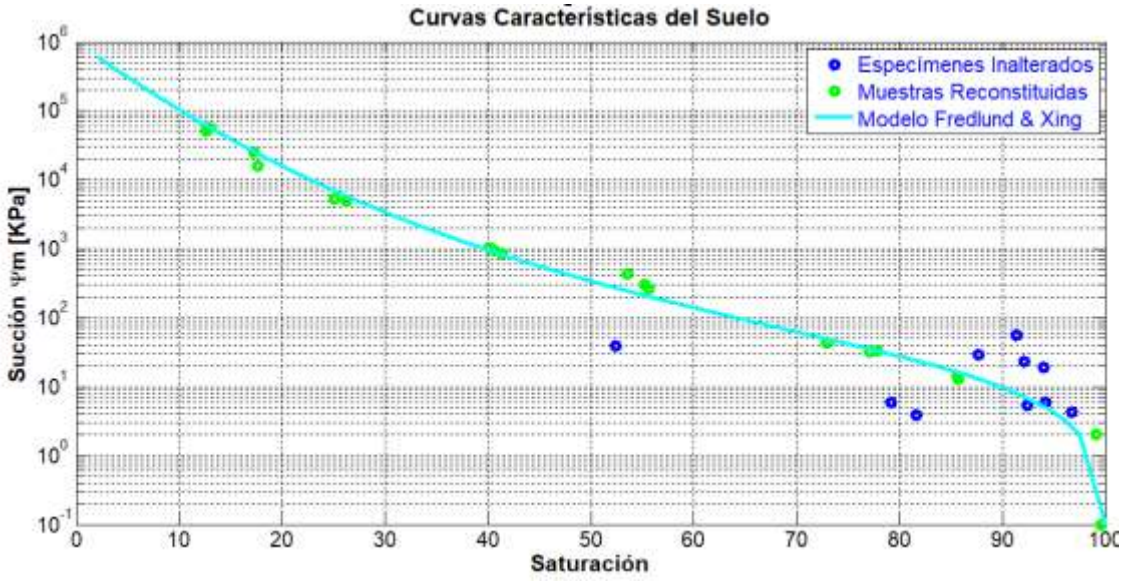
## 4.4 MATRIZ DE SUCCIÓN

Con los datos obtenidos de los ensayos de Matriz de Succión en muestras de suelo reconstituidas, podemos realizar la Curva Característica del Suelo, en específico para este tipo de suelo Clasificado como un limo arenoso (ML).

En el gráfico (23) observamos la curva característica del suelo típicas para arenas, limos y arcillas, además se grafican los datos de matriz de succión obtenidos de los ensayos tanto para muestras reconstituidas como especímenes inalterados y la curva característica del suelo para los datos de muestras reconstituidas.




*Grafica 23 Curva característica del Limo-Arenoso ML comparada con curvas características de diferentes suelos* (Lu and Likos 2007)




*Grafica 24 curva característica del suelo Succión versus Saturación.*

Con los datos obtenidos de los ensayos de Matriz de Succión de los especímenes reconstituidos, podemos realizar la Curva Característica del Suelo, utilizando como modelo empírico el propuesto por Fredlum & Xign (1994) ya que es un modelo matemático el cual se adapta con facilidad a esta serie de puntos.

$$\theta = C(\psi)\theta_s \left[ \frac{1}{\ln\left(e^1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m$$

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

Donde:

θ: Es el contenido Volumétrico de agua

ψ: Es la succión en el suelo en kPa

C(ψ): Función de corrección

θs: Contenido volumétrico de agua del suelo en estado saturado

e: Base del logaritmo natural (2.71828…)

α: succión relacionada con el valor de entrada de aire (punto de inflexión de la curva)

n: Parámetro del suelo relacionado con la pendiente de la curva en el punto de inflexión

m: Parámetro de ajuste relacionado con los resultados cerca del contenido residual de agua.

Para determinar la curva que mejor se adaptara a la serie de puntos, se analizaron todos los datos que se han obtenido y se determinaron los siguientes parámetros por tanteo.

ψ: 50 kPa

θs: 0.475

α: 12

n: 1.1

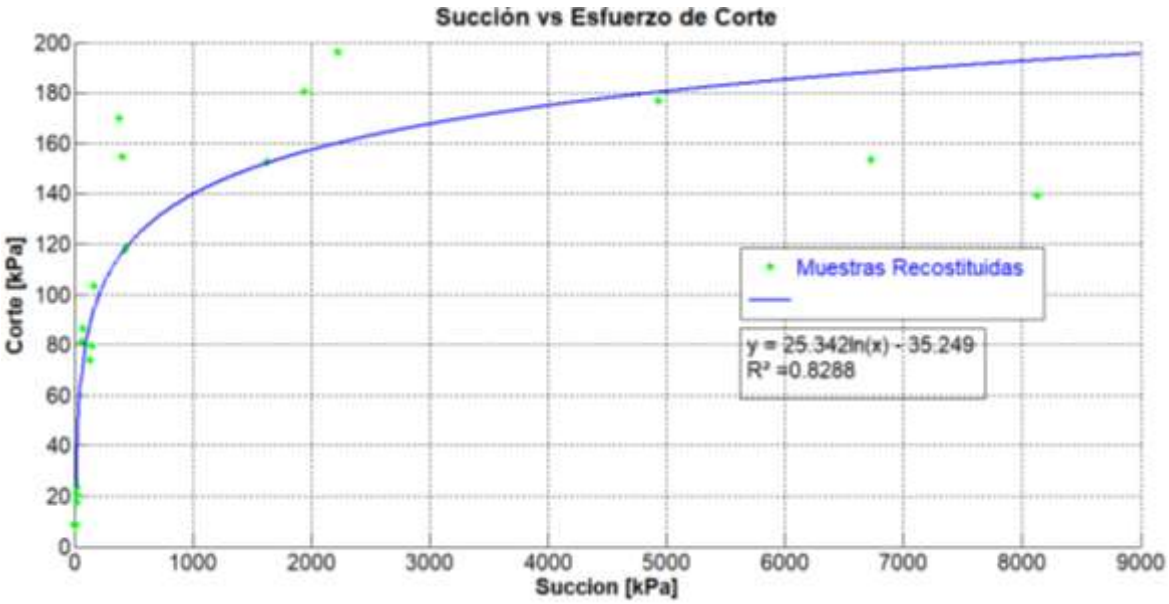
m: 0.34

## 4.5 DIAGRAMA DE MOHR COULOMB EXTENDIDO

Para poder generar el diagrama de Mohr Coulomb extendido debemos establecer la relación que existe entre la Matriz de Succión y la resistencia al corte, por lo que al analizar los datos y generar el gráfico de Matriz de Succión vs Resistencia al Corte (ver la gráfica 25) para muestras de suelo reconstituido y especímenes inalterados, se observa que la tendencia del ángulo $\phi^b$ no es constante y disminuye a medida que la succión aumenta. Por lo tanto, aplicar la ecuación de la resistencia de Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados no se ajusta a este modelo, como se mencionó en el capítulo 2 “El Criterio de falla de Mohr Coulomb para suelos parcialmente saturados”, el ángulo $\phi^b$ representa la pendiente de la relación lineal que existe entre la resistencia al corte y la succión del suelo, en el mismo capítulo se habla también que para un rango mayor que la

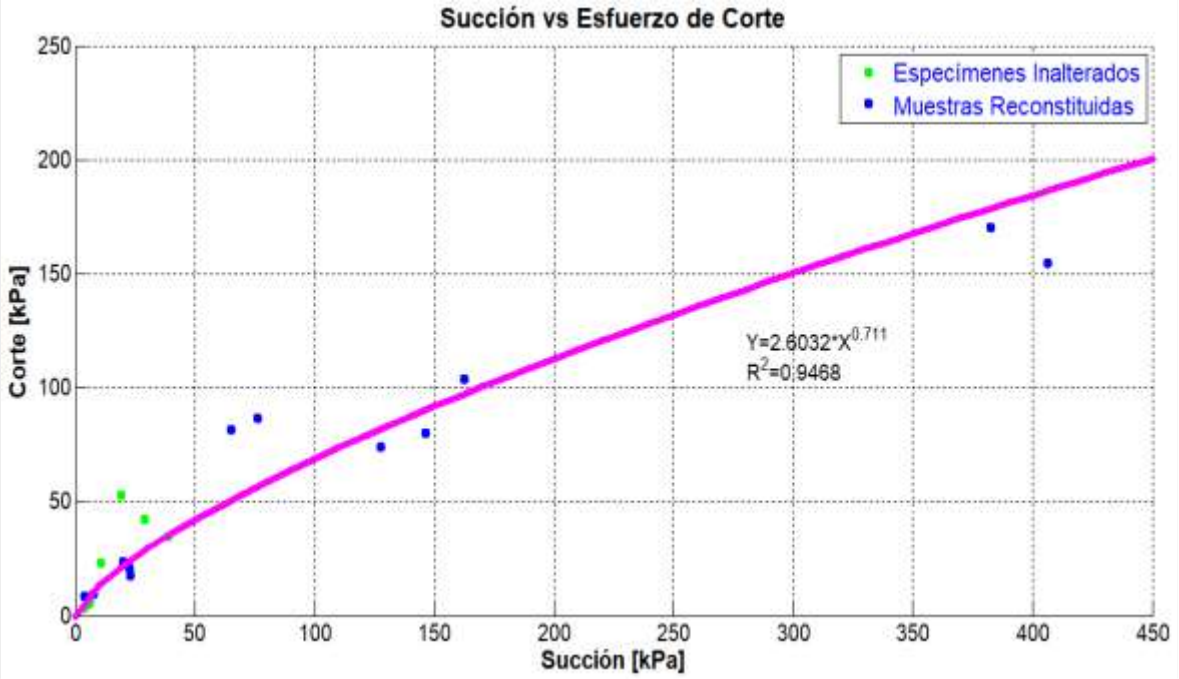
succión capilar es decir entre 100kPa y 0kPa este ángulo disminuye por lo que se propone obtener una ecuación que se ajuste a esta serie de puntos y no limitarnos a utilizar este parámetro, para este fin nos ayudamos con el programa Matlab.

Si se utiliza el rango completo de succión de la curva característica de este suelo observamos que la serie de puntos tienden a una función logarítmica.




*Grafica 25 Resistencia al Corte versus Succión Matricial en muestras de suelo reconstituidas*

Pero si se toma en cuenta que el sector donde se realizaron los estudios jamás tendrá humedades tan bajas que generen succiones tan altas, por lo que se utiliza un rango de succiones más realistas y que se ajusten mejor a una ecuación, el rango para este fin es de 0 a 450kPa, tomando en cuenta esto se tiene como resultado una ecuación de 2do grado.




*Grafica 26 Resistencia al Corte versus Matriz de Succión*

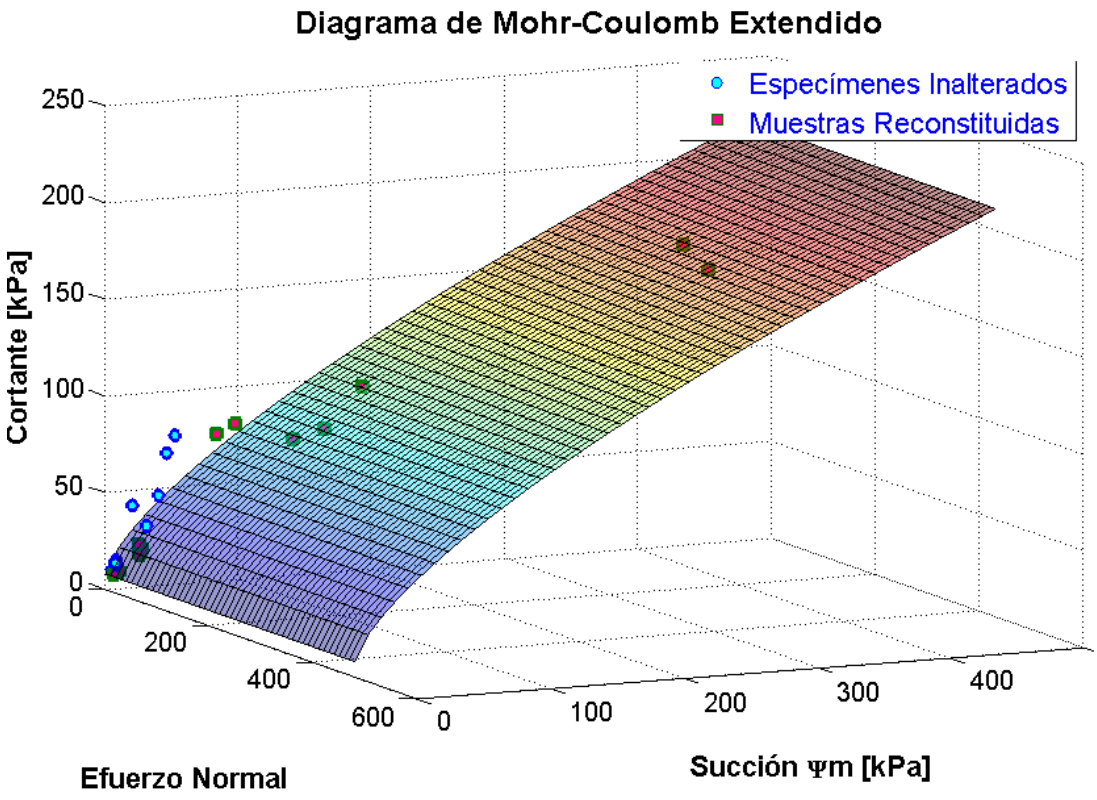
En este caso la ecuación que más se ajusta para realizar el diagrama de Mohr-Coulomb extendido a la serie de datos disponibles para un Limo Arcilloso (ML) en un rango de succión en el que se encuentra el suelo natural, como el que se estudia en este trabajo, es la siguiente:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + 2.6032 * \psi m^{0.711}$$

Para obtener el dato de ángulo de fricción exacto se debe realizar varios ensayos triaxiales con muestras de suelo a diferentes estados de saturación y al menos dos estados de confinamiento. Por lo que en este trabajo se limita a utilizar un ángulo de fricción de 0.

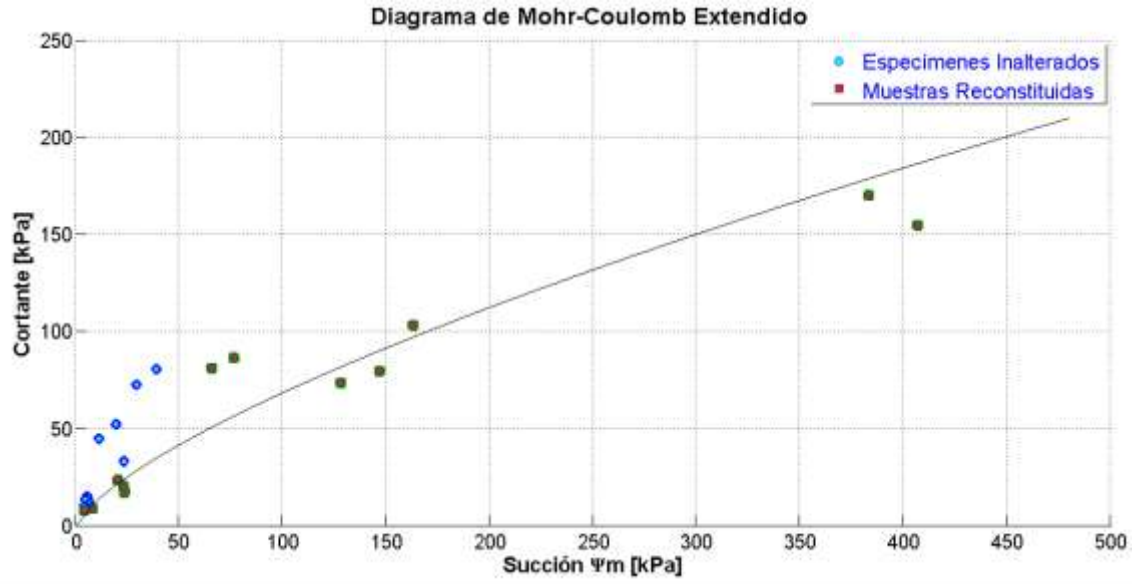
$$\tau_f = c' + 2.6032 * \psi m^{0.711}$$

Al generar el plano utilizando la formula antes descrita, y ubicar los puntos de los datos tanto de los especímenes inalterados como saturados obtenemos la gráfica (27).



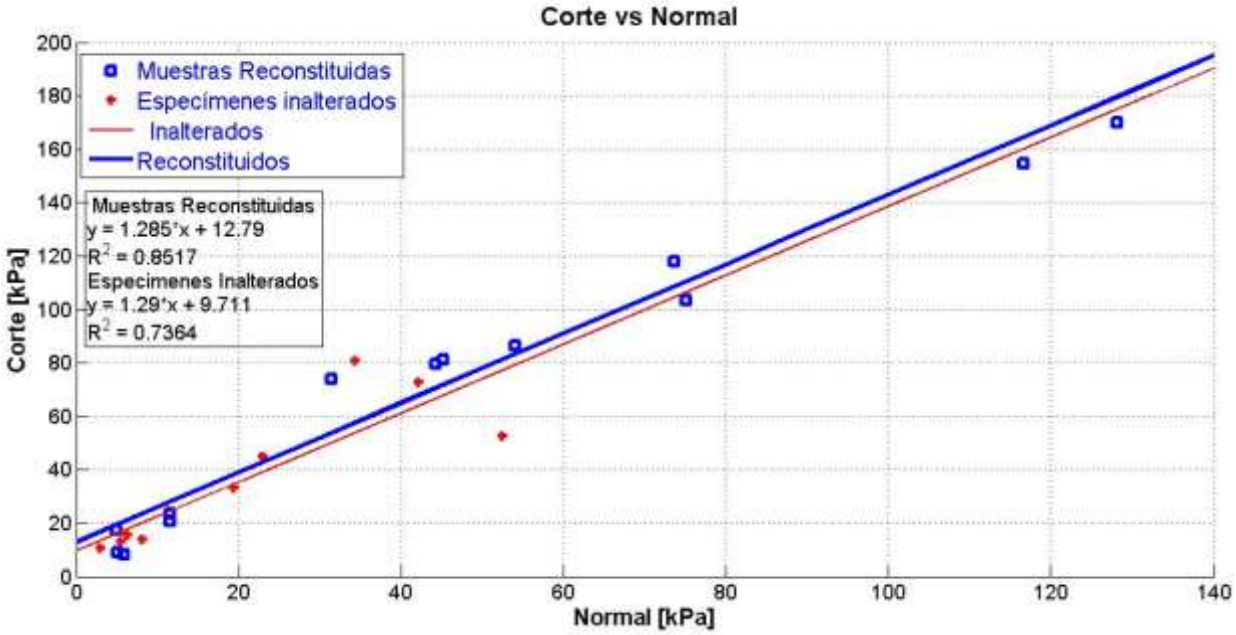

*Grafica 27 Diagrama extendido de Mohr Coulomb*

Al analizar el diagrama de Mohr Coulomb apreciamos sobre todo la carencia de un ángulo de fricción en el plano del Esfuerzo de Corte versus Esfuerzo Normal, esto debido a que se necesita realizar más ensayos para determinarlo, por otro lado, vemos en la gráfica (28) En el plano Esfuerzo de Corte vs Matriz de Succión.




*Grafica 28 Diagrama extendido de Mohr coulomb (Cortante vs Succión)*

En estas graficas podemos observar que un plano de falla generado por muestras de suelo reconstituido no se ajusta a los datos que se tiene de las muestras de suelo inalterado, ya que se nota una clara diferencia en las muestras de suelo inalterado de tener mayor resistencia al corte que las muestras de suelo reconstituidas.




*Grafica 29 Diagrama extendido de Mohr coulomb (Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal)*

En la gráfica (29) se observan los datos de Esfuerzo de Corte vs Esfuerzo Normal calculados en base a un ángulo de fricción teórico medido en el plano de falla de las probetas (datos inexactos), de todas formas, se analizaron estos datos los cuales parecerían estar creando una gráfica de Mohr Coulomb teórica. Para una futura investigación se recomienda realizar ensayos triaxiales y obtener varios ángulos de fricción los cuales deberían ser iguales sin importar el grado de saturación de la muestra ya que este parámetro es inherente a las características físicas de las partículas sólidas del suelo.

## 4.6 RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD CON LA MATRIZ DE SUCCIÓN

Para poder calcular la Matriz de Succión en los ensayos de compresión para muestras de suelo reconstituidas se utilizó la curva característica del suelo realizada mediante el método del Papel filtro, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 6 Datos completos para Muestras de suelo Reconstituidas*

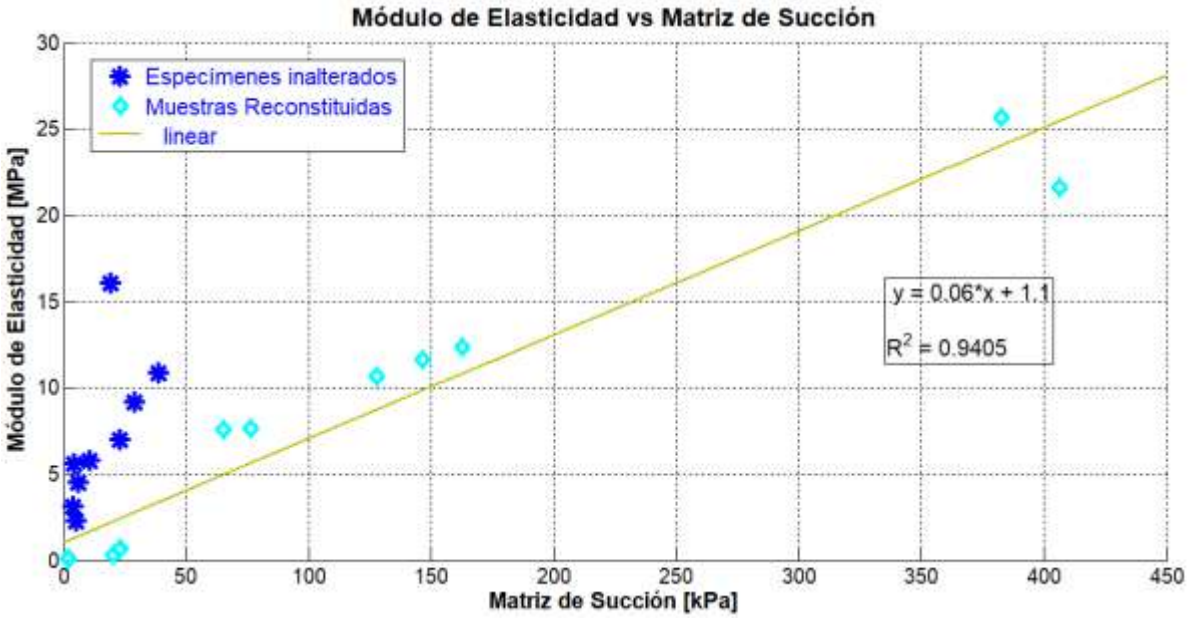
| Nombre de Probeta | Densidad Bulk (g/cm3) | w (%) | Densidad Seca (g/cm3) | θ (Contenido volumétrico de agua) | Succión Matricial Calculada (kPa) | e | Saturación (%) | Gs | Esfuerzo Normal (KPa) | Resistencia al corte (KPa) | qu (KPa) | Modulo de Young (MN/m2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5% (1) | 1.570 | 8 | 1.452 | 0.118 | 6722.300 | 0.735 | 28 | 2.52 | 71.5 | 153.4 | 400.5 | 35.31 |
| 5% (2) | 1.561 | 8 | 1.448 | 0.113 | 8126.690 | 0.740 | 26 | 2.52 | 53.5 | 139.5 | 416.9 | 36.61 |
| 5%(3) | 1.577 | 9 | 1.453 | 0.125 | 4933.277 | 0.735 | 29 | 2.52 | 82.5 | 177.0 | 462.1 | 42.40 |
| 10% (1) | 1.620 | 12 | 1.449 | 0.171 | 2228.222 | 0.739 | 40 | 2.52 | 170.4 | 196.0 | 395.8 | 27.63 |
| 10% (2) | 1.647 | 12 | 1.466 | 0.181 | 1629.978 | 0.719 | 43 | 2.52 | 115.1 | 152.7 | 317.8 | 23.47 |
| 10% (3) | 1.658 | 12 | 1.482 | 0.176 | 1940.889 | 0.700 | 43 | 2.52 | 112.7 | 180.4 | 401.3 | 42.45 |
| 15% (1) | 1.737 | 17 | 1.483 | 0.254 | 382.792 | 0.699 | 62 | 2.52 | 128.2 | 170.1 | 353.9 | 25.67 |
| 15% (2) | 1.720 | 17 | 1.469 | 0.252 | 406.376 | 0.716 | 60 | 2.52 | 116.6 | 154.7 | 321.9 | 21.65 |
| 15% (3) | 1.696 | 17 | 1.448 | 0.249 | 431.343 | 0.741 | 58 | 2.52 | 73.6 | 117.8 | 262.1 | 18.11 |
| 20.1 (1) | 1.781 | 21 | 1.467 | 0.314 | 146.527 | 0.717 | 75 | 2.52 | 44.2 | 79.8 | 188.2 | 11.62 |
| 20.1 (2) | 1.760 | 21 | 1.452 | 0.309 | 162.788 | 0.736 | 73 | 2.52 | 75.1 | 103.4 | 217.5 | 12.35 |
| 20.1 (3) | 1.780 | 22 | 1.460 | 0.320 | 127.941 | 0.726 | 76 | 2.52 | 31.4 | 73.9 | 205.5 | 10.67 |
| 22.5 (1) | 1.798 | 23 | 1.461 | 0.337 | 76.220 | 0.724 | 80 | 2.52 | 54.1 | 86.6 | 192.6 | 7.64 |
| 22.5 (2) | 1.805 | 23 | 1.465 | 0.340 | 65.396 | 0.720 | 81 | 2.52 | 45.1 | 81.4 | 192.0 | 7.58 |
| 25% (1) | 1.855 | 27 | 1.466 | 0.389 | 22.783 | 0.719 | 93 | 2.52 | 11.5 | 20.8 | 49.1 | 0.64 |
| 25% (2) | 1.856 | 26 | 1.468 | 0.388 | 23.238 | 0.717 | 93 | 2.52 | 5.0 | 17.4 | 65.8 | 0.72 |
| 25% (3) | 1.883 | 26 | 1.489 | 0.394 | 20.234 | 0.693 | 96 | 2.52 | 11.5 | 23.7 | 60.1 | 0.32 |
| 30% (1) | 1.833 | 31 | 1.399 | 0.434 | 1.720 | 0.801 | 98 | 2.52 | 5.1 | 9.1 | 21.5 | 0.13 |
| 30% (2) | 1.875 | 31 | 1.427 | 0.448 | 2.030 | 0.766 | 100 | 2.52 | 5.9 | 8.1 | 17.0 | 0.10 |

Para poder calcular la Matriz de Succión en los ensayos de compresión simple para especímenes de suelo inalterados se utilizó los resultados de ensayos individuales de matriz de succión por el método del papel filtro en muestras inalteradas tomadas del mismo tubo Shelby de donde se obtuvieron las muestras para realizar los ensayos de compresión simple, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 7 Datos completos para especímenes de suelo inalterados*

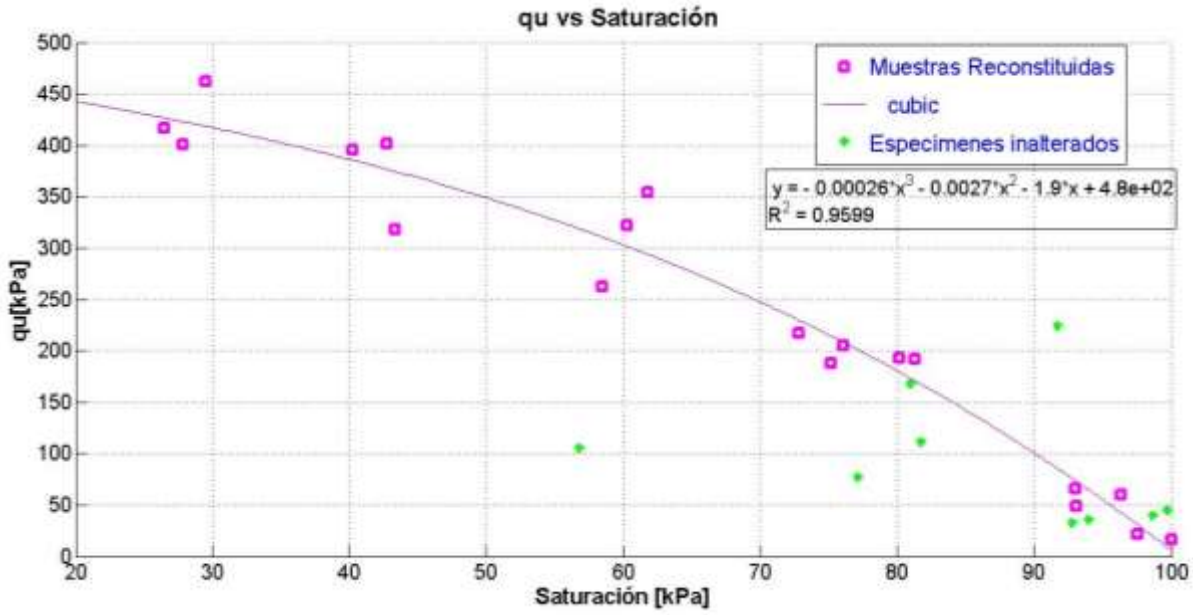
| Prof | Densidad Bulk (g/cm3) | w (%) | Densidad Seca (g/cm3) | θ (Contenido volumétrico de agua) | Succión Matricial Calculada (kPa) | Saturación (%) | e | Gs | Esfuerzo Normal (KPa) | Resistencia al corte (KPa) | qu (KPa) | Modulo de Young (MN/m2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.00-2.50 | 1.48 | 26 | 1.180 | 0.302 | 19.223 | 57 | 1.135 | 2.52 | _ | _ | 105.0 | 16.04 |
| 3.00-3.50 | 1.59 | 39 | 1.146 | 0.442 | 11.055 | 82 | 1.198 | 2.54 | 23.0 | 45.1 | 111.4 | 5.75 |
| 4.00-4.50 | 1.76 | 32 | 1.332 | 0.429 | 38.719 | 92 | 0.893 | 2.54 | 34.3 | 80.8 | 224.7 | 10.87 |
| 5.00-5.50(1) | 1.66 | 32 | 1.253 | 0.407 | 29.097 | 81 | 1.010 | 2.52 | 42.1 | 72.9 | 168.3 | 9.18 |
| 5.00-5.50(2) | 1.62 | 32 | 1.223 | 0.397 | 23.065 | 77 | 1.060 | 2.52 | 19.3 | 33.5 | 77.3 | 6.96 |
| 6.00-6.50 | 1.84 | 31 | 1.396 | 0.440 | 5.344 | 100 | 0.806 | 2.55 | 6.2 | 15.4 | 44.4 | 2.28 |
| 7.00-7.50(1) | 1.84 | 28 | 1.436 | 0.399 | 5.971 | 94 | 0.755 | 2.55 | 5.5 | 12.9 | 36.0 | 4.48 |
| 7.00-7.50(2) | 1.88 | 28 | 1.473 | 0.405 | 3.886 | 99 | 0.711 | 2.55 | 3.0 | 10.5 | 39.8 | 3.13 |
| 8.00-8.50 | 1.77 | 30 | 1.361 | 0.409 | 4.318 | 93 | 0.852 | 2.63 | 8.1 | 14.1 | 32.6 | 5.59 |

Al graficar los resultados de módulo de elasticidad vs matriz de succión podemos observar que para los datos de muestras de suelo reconstituidas existe una relación de estos dos parámetros con una ecuación lineal, de igual forma se puede observar que el módulo de elasticidad para especímenes inalterados es mucho mayor que para muestras reconstituidas en un rango de succión pequeño.



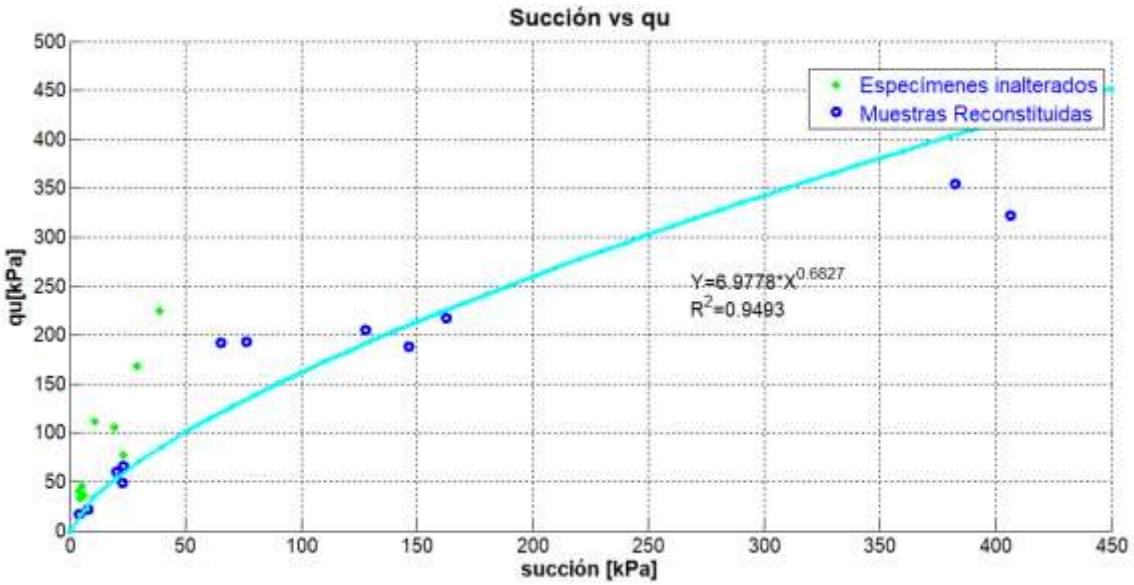

*Grafica 30 Módulo de elasticidad vs Matriz de succión*

Se realiza también el gráfico (31) de Resistencia última versus saturación en este gráfico podemos darnos cuenta que para muestras de suelo reconstituidas la resistencia baja a medida que la muestra se satura, además muestra que para especímenes inalterados la saturación no es el principal parámetro que indica la resistencia del suelo, en la gráfica observamos los resultados dispersos ya que cada espécimen inalterado tiene una conformación física particular por lo que se debe tomar en cuenta otros factores para describir esta resistencia.



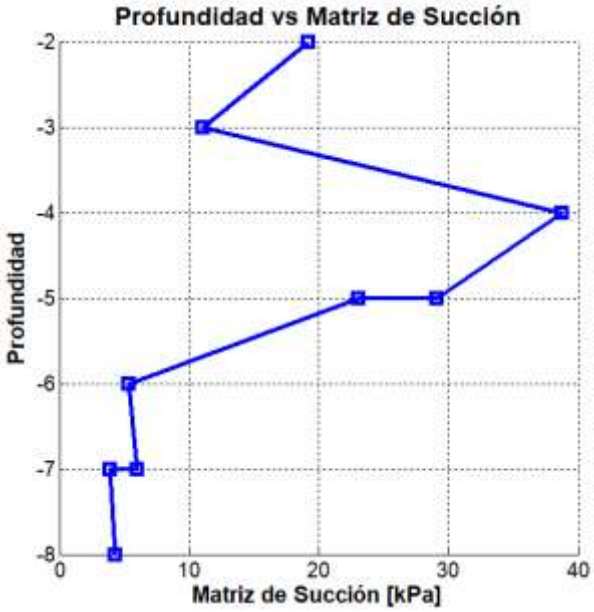

*Grafica 31 Esfuerzo Ultimo vs Saturación*

Pero si observamos el gráfico (32) de esfuerzo último versus su matriz de succión tanto los datos de las muestras de suelo reconstituidas como los especímenes inalterados parecen mantener una relación más próxima, también podríamos decir que un parámetro para describir la resistencia de un suelo puedes ser la succión, ya que en el gráfico (32) a diferencia del gráfico (31) la resistencia del suelo si aumenta con la succión en todos los casos esto puede ser porque la succión involucra tanto los aspectos físicos como químicos del suelo.




*Grafica 32 Esfuerzo Ultimo vs Succión*

En la gráfica (33) podemos observar los resultados de la matriz de succión en los diferentes niveles de perforación esta gráfica nos indica en qué nivel se encuentra la mayor succión.




*Grafica 33 Profundidad de sondeo vs Matriz de succión*

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Se determinó un perfil estratigráfico en el cual su estrato superior consta de material predominantemente fino con contenido orgánico hasta el metro 3 de perforación y N corregido de entre 5 y 10, luego se encuentra un estrato entre el metro 3 y 7 con material predominantemente fino en su mayoría limos arenosos con un N corregido de entre 5 y 10. Entre el metro 7 y 11 se clasifica al suelo como arenas limosas y arcillosas, lo que nos indica la presencia de un posible estrato drenante con un N corregido que varía de 15 a 40, del 11 al 15 un material clasificado en su mayoría como limos arenosos y un N corregido de 40 hasta rechazo. En el metro 15 se encuentra nuevamente un estrato pequeño de arena limosa, del metro 16 al 18 tenemos un material en su gran mayoría limo arenoso y un N corregido de 40 hasta rechazo, los estratos siguientes resulta difícil clasificarlos ya que se encuentran rocas y gravas de gran tamaño.

De los resultados de los ensayos de compresión simple para muestras de suelo reconstituidas, se logra apreciar inmediatamente la variación de la resistencia a la compresión respecto su contenido de humedad, en los resultados se observa como la resistencia a la compresión se reduce considerablemente al aumentar el contenido de humedad. Sin embargo, esto no es evidente en especímenes de suelo inalterados, ya que en estos sus condiciones físicas son diferentes, y aunque el material se clasifique igual su resistencia a la compresión no sugiere una relación con su contenido de humedad.

Los módulos de elasticidad para muestras de suelo reconstituidas son más altos conforme su contenido volumétrico de agua desciende, esto es evidente ya que el suelo se vuelve más rígido a medida que disminuye el agua, para especímenes de suelos inalterados sus módulos de elasticidad superan en magnitud a los módulos de elasticidad de las muestras reconstituidas, sin importar que estas tengan una mayor densidad seca.

Se realizo la curva característica del suelo de una muestra tomada entre el metro 4 y 7 del estrato estudiado en este trabajo la cual representa a un suelo clasificado según la normativa ASTM D2487 como un limo arenoso de baja plasticidad (ML), gravedad especifica 2.52, contenido de finos mayor al 50%, no contiene arcillas según granulometría con hidrómetro. La medición de la matriz de succión para realizar esta curva se hizo por el método del Papel Filtro (método indirecto), al comparar la curva obtenida con curvas características de diferentes tipos de suelos observamos una pendiente mayor a las demás, esto podría deberse a los factores de los que depende la succión en especial a la estructura atómica del material que conforma el suelo, la cual es sensible especialmente en suelos finos, al romperse esta estructura remoldeando el suelo.

La relación que existe entre los datos de Resistencia al corte versus Matriz de succión no es lineal, y se representan mejor por una curva, observamos que cuando la succión aumenta la resistencia al corte también lo hace. Esto se nota con mayor claridad si comparamos la saturación con la resistencia al corte en donde si la muestra se encuentra al 100% saturada se obtiene una resistencia al corte de tan solo 8 kPa, en cambio si la muestra se encuentra tan solo al 93% de saturación su resistencia incrementa hasta 21 kPa, si se encuentra a un porcentaje de saturación del 80% su resistencia se eleva hasta 86kPa, esto demuestra claramente que pequeñas variaciones de humedad pueden aumentar o disminuir la resistencia del suelo significativamente.

Al comparar la resistencia al corte de las muestras inalteradas con la resistencia al corte de las muestras reconstituidas de los gráficos de resistencia al corte versus matriz de succión podemos darnos cuenta que la resistencia al corte de las muestras reconstituidas es mucho menor que la resistencia al corte de muestras inalteradas, esto se podría dar principalmente por el proceso de remoldeado del suelo, al método de compactación y uniformidad de la muestra, ya que se pierde la estructura natural del mismo y su unión entre partículas a nivel micro estructural. El alcance de esta tesis no incluye el estudio de la resistencia al corte del suelo sin embargo se ha pretendido realizar una estimación de esta resistencia para indicar su importancia y estudiarla en futuras investigaciones.

Se determina una relación entre el módulo de elasticidad y la matriz de succión para muestras de suelo reconstituidas la cual presenta un comportamiento que obedece a una ecuación cuadrática como se observa en el grafico (31). Por otra parte, se observa el comportamiento de los módulos de elasticidad de los especímenes inalterados los cuales para una misma succión son mucho mayores, esto podría darse por las razones antes mencionadas.

Al comparar el esfuerzo ultimo de compresión con respecto a la matriz de succión, se observa que las muestras de suelo reconstituidas, al igual que en todas las gráficas su resistencia, aumenta al aumentar la succión y de igual forma se observa que en especímenes inalterados su resistencia es mayor que en las muestras reconstituidas.

El parámetro de succión es un indicador de resistencia, lo cual se evidencia al comparar la gráfica (31) y (32), de donde se puede concluir que la resistencia de un suelo no es función directa de su saturación o humedad, pero sí de su matriz de succión.

Por lo antes descrito se puede analizar el gráfico (33) y concluir que en el metro 4 existe una capacidad de carga superior que es atribuible a su matriz de succión, ya que, si observamos los datos con anterioridad, su densidad no es la mayor del estrato y su saturación tampoco es la menor, estos datos podrían dar una impresión errónea de resistencia.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Con respecto a los ensayos de laboratorio en la determinación de la matriz de succión por el método del papel filtro, se recomienda que transcurrido el tiempo de secado de los papeles filtros en el horno se los coloque inmediatamente en el recipiente disecador con

el fin de que no absorba humedad ambiental, además se los debe utilizar en el transcurso del día posterior al secado ya que la humedad en el papel de filtro antes de la prueba expande las fibras y altera el espacio vacío del papel de filtro, lo que puede provocar un cambio en la curva de calibración del papel de filtro.

Se recomienda evaluar el estado in situ del suelo, su estructura y sus propiedades mecánicas en muestras inalteradas mediante una nueva investigación que profundice el tema, ya que existe un comportamiento mecánico diferente a las propiedades intrínsecas del suelo, lo que quiere decir que un factor externo no estudiado en este trabajo está generándolo.

Realizar ensayos de permeabilidad ayudará a analizar con mayor precisión la hidratación de los estratos del suelo lo cual puede ayudar a predecir la succión en estos, ya que un estudio ideal de la matriz de succión se lo debería hacer en la época más lluviosa del año en donde se sugiere la succión será menor por consiguiente también la resistencia del suelo será la menor, se sugiere para este fin realizar ensayos de permeabilidad para correlacionarlos con la matriz de succión.

Los resultados mostrados indican la importancia de mantener la humedad del subsuelo al mínimo para fines estructurales ya que se obtiene una mayor resistencia del suelo con niveles de humedad bajos, por lo que se recomienda estudiar métodos de impermeabilización en suelos para mantener sus propiedades de resistencia en estado parcialmente saturado.

Se recomienda profundizar los estudios en especímenes de suelo inalterados utilizando diferentes equipos de medición para determinar su Potencial de Succión, esto para poder estimar la confiabilidad en los resultados obtenidos.

Se recomienda realizar los siguientes ensayos para obtener información más completa y exacta de la succión en suelos parcialmente saturados:

- D1125 Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water
- D4542 Test Methods for Pore Water Extraction and Determination of the Soluble Salt Content of Soils by Refractometer

- D6836 Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge
- E337 Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures)

## 6. BIBLIOGRAFÍA


ACKER DRILL COMPANY. 2019. “FEaturing the Acker ACE Versatile, Shallow Exploration Drill.”

Alvarado, A. et al. 2014. “Active Tectonics in Quito, Ecuador, Assessed by Geomorphological Studies, GPS Data, and Crustal Seismicity.” *Tectonics* 33(2): 67–83.

Anónimo. 2011. “En Turubamba Piden Atención Al Hundimiento de Sus Casas.” https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/quito/1/en-turubamba-piden-atencion-al-hundimiento-de-sus-casas.

ASTM D1586. 2018. “Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.” *ASTM Standard Test Method* D1586-11: 1–9. papers2://publication/uuid/35B85424-852A-4B25-8883-63D2F4EF206B.

ASTM D1587. 2015. “Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes.” i: 1–10.

ASTM D2113. 2019. “Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Exploration.” *ASTM Standard Test Method* i: 1–20.

ASTM D2166. 2013. “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.” *ASTM International* (January): 1–7.

ASTM D2216. 2010. “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water ( Moisture ) Content of Soil and Rock by Mass.” *ASTM International* (November 1988): 1–7. www.astm.org.

ASTM D2487. 2006. “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).” *ASTM Standard Guide* D5521-05: 1–5. papers2://publication/uuid/C11F6EBF-AB1A-430C-A29E-4026ADB45B44%5Cnpapers2://publication/uuid/62E9559B-7B0E-4956-966E-F0A6E6043AE1%5Cnpapers2://publication/uuid/1C9626D0-A798-4BEC-B22E-2230C8679156%5Cnpapers2://publication/uuid/034B2307-A847-4B0A-B023-5DD.

ASTM D2488. 2000. “Standard Practice for Description and Identification of Soils ( Visual-Manual Procedures).” *Changes* 04: 1–13.

ASTM D4318. 2010. “Standard Test Methods for Liquid Limit , Plastic Limit , and Plasticity Index of Soils.” 04: 1–14. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572234085/D4318(limites).pdf.

ASTM D5298. 2016. “Standard Test Method for Measurement of Soil Potential.” : 1–6.

ASTM D6913. 2004. “Standard Test Methods for Particle-Size Distribution ( Gradation ) of Soils Using Sieve Analysis.” *ASTM International, West Conshohocken, PA,* 04(Reapproved 2009): 1–35.

ASTM D7263. 2009. “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens.” *ASTM International* 09(Reapproved 2018): 1–7.

ASTM D864. 2010. “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.” 2458000(C): 1–7.

Avilés, Lucía. 2013. “CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DEL SUR DE LA CIUDAD DE QUITO.”

Bastidas, Wellington. 2016. “‘Guía Climática Agroecoturística Para El Cantón Quito-Provincia de Pichincha 2014.’” : 107.

Blight, Geoffrey. 2013. “Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice.”

Bowles, Joseph. 1981. 23 Cuadernos de Filología Italiana *Manual de Laboratorio de Suelos En Ingeniería Civil*.

Burland, J. B. 1990. “On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays.” *Geotechnique* 40(3): 329–78.

Cortez, Richard. 2015. “Conozca Cómo Ha Sido La Expansión Urbana de Quito y a Cuántos Más Acogerá La Ciudad.” https://www.elcomercio.com/actualidad/expansion-urbana-quito-data-poblacion.html.

Das, Braja M. 2015. *Fundamentos de IMS Fundamentos de IMS*.

Fredlund, D, H Rahardjo, and M Fredlund. 2012. "Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice."

Ivan, Vergara. 2009. "NOTAS SOBRE TRABAJO EN PERFORACION CON PROPOSITOS DE INGENIERIA EN GEOTECNIA." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53(9): 1689–99.

Lagla, Alfredo. 2016. "Cuatro Casas Serán Demolidas En El Sector de Turubamba Alto, En El Sur de Quito." https://www.elcomercio.com/actualidad/quito-casas-demolicion-turubambaalto-hundimientos.html.

Lu, Ning, and William Likos. 2007. 13 Environmental and Engineering Geoscience *Unsaturated Soil Mechanics*.

Meza Ochoa, Victoria. 2012. "Unsaturated Soils, From Research To the University Lecture." *Boletín de Ciencias de la Tierra* (31): 23–38.

Murray, E. 2010. "Unsaturated Soils."

Ocaña, Doménica. 2019. "IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN DE LA ENERGÍA DE PENETRACIÓN DINÁMICA SEGÚN LA NORMATIVA ASTM D4366-16, CON APLICACIÓN AL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN SUELOS GRANULARES EN UNA ZONA ESPECÍFICA DE MANABÍ." 53(9): 287.

Peñafiel A., Lilia A. 2009. "Geología y Análisis Del Recurso Hídrico Subterráneo de La Subcuenca Del Sur de Quito." *Tesis, EPN*: 169.

Shannon and Wilson. 1970. "Suggested Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using Harvard Compaction Apparatus." *Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes: Fifth Edition*: 108-108–3.

Sreedeep, S., and Devendra N. Singh. 2011. "Critical Review of the Methodologies Employed for Soil Suction Measurement." *International Journal of Geomechanics* 11(2): 99–104.

Yepes, Hugo A. 2014. “Breve Reseña de Los Sismos Provenientes de La Falla Geológica de Quito Que Han Afectado a La Capital Este Contenido Ha Sido Publicado Originalmente Por Diario EL COMERCIO En La Siguiente Dirección: Https://Www.Elcomercio.Com/Actualidad/Resena-Sismos-Falla.” http://www.elcomercio.com/actualidad/resena-sismos-falla-geologica-quito.html.

## 7. ANEXOS

Ensayos de Matriz de succión por el método del papel filtro en Muestras reconstituidas.

| Cálculo de Matriz de Succión mediante el Método del Papel Filtro. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fecha de inicio del Ensayo: | | 08-11-19 | | Papel Filtro utilizado: | | whatman filter paper 42 | |
| Fecha de finalización del Ensayo: | | 15-11-19 | | unidades: | | gr | |
| Nombre de la Muestra | 0% (1) | 0% (2) | 3% (1) | 3% (2) | 5% (1) | 5% (2) | 10% (1) |
| Profundidad | | | | | | | |
| Masa predeterminada de la bolsa (Tc) | 0.6967 | 0.6777 | 0.6738 | 0.7077 | 0.6718 | 0.6526 | 0.6869 |
| Masa del papel filtro Humedo + bolsa (M1) | 0.8974 | 0.878 | 0.8884 | 0.9192 | 0.909 | 0.881 | 0.9401 |
| Masa del papel filtro seco + bolsa (M2) | 0.884 | 0.8634 | 0.8656 | 0.8924 | 0.8679 | 0.842 | 0.8814 |
| Masa final de la bolsa (Th) | 0.6972 | 0.6777 | 0.6739 | 0.7077 | 0.6718 | 0.6527 | 0.6869 |
| Masa del papel filtro seco (Mf) | 0.1868 | 0.1857 | 0.1917 | 0.1847 | 0.1961 | 0.1893 | 0.1945 |
| Masa de agua en el Papel filtro (Mw) | 0.0139 | 0.0146 | 0.0229 | 0.0268 | 0.0411 | 0.0391 | 0.0587 |
| Porcentaje de humedad | 7.44111349 | 7.862143242 | 11.94574857 | 14.51001624 | 20.95869454 | 20.6550449 | 30.1799486 |
| Valor de la succion (h) Log kPa | 4.747337259 | 4.714539041 | 4.396426187 | 4.196669735 | 3.694317695 | 3.717972 | 2.97598201 |
| **kPa** | **55890.40531** | **51824.96786** | **24913.00911** | **15727.86362** | **4946.724174** | **5223.62512** | **946.197955** |
| Peso de Capsula | 17.79 | 16.73 | 17.78 | 18.55 | 17.91 | 18.1 | 18.46 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 77.1 | 66.61 | 69.94 | 69.24 | 68.61 | 69.12 | 63.66 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 74.78 | 64.66 | 67.25 | 66.57 | 64.73 | 65.45 | 58.55 |
| Humedad Higroscópica | | | | | 65.49 | 66.2 | 59.23 |
| **Humedad 1.1** | **4.0709** | **4.0684** | **5.4376** | **5.5602** | **8.2871** | **7.7508** | **12.7463** |
| **Humedad 1.2** | **2.1409** | **2.1384** | **3.5076** | **3.6302** | **6.5574** | **6.0707** | **10.8658** |
| Peso de Capsula | 16.81 | 16.07 | 17.52 | 18.51 | 16.59 | 18.14 | 18.49 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 68.78 | 66.62 | 69.93 | 68.3 | 67.73 | 69 | 63.64 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 66.74 | 64.65 | 67.24 | 65.69 | 63.84 | 65.22 | 58.52 |
| Humedad Higroscópica | | | | | 64.63 | 66.01 | 59.19 |
| **Humedad 2.1** | **4.0857** | **4.0552** | **5.4103** | **5.5320** | **8.2328** | **8.0289** | **12.7904** |
| **Humedad 2.2** | **2.1557** | **2.1252** | **3.4803** | **3.6020** | **6.4530** | **6.2461** | **10.9337** |
| Ds | 1.510 | 1.482 | 1.463 | 1.467 | 1.477 | 1.479 | 1.480 |
| **w** | **4.0783** | **4.0618** | **5.4240** | **5.5461** | **8.2599** | **7.8898** | **12.7684** |
| **w(hidroscópica)** | **2.1483** | **2.1318** | **3.4940** | **3.6161** | **6.5052** | **6.1584** | **10.8997** |
| **ϴ** | **0.061582403** | **0.060195875** | **0.079348594** | **0.081369449** | **0.122029063** | **0.11666346** | **0.18896697** |

Cálculo de Matriz de Succión mediante el Método del Papel Filtro.

Fecha de inicio del Ensayo: 08-11-19 Papel Filtro utilizado: whatman filter paper 42
Fecha de finalización del Ensayo: 15-11-19 unidades: gr

| Nombre de la Muestra | 10% (2) | 10% (3) | 15% (1) | 15% (2) | 15% (3) | 20% (1) | 20% (2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Profundidad | | | | * | | | |
| Masa predeterminada de la bolsa (Tc) | 0.677 | 0.6767 | 0.6937 | 0.7035 | 0.6541 | 0.6494 | 0.6808 |
| Masa del papel filtro Humedo + bolsa (M1) | 0.9334 | 0.9367 | 0.9552 | 0.9653 | 0.9295 | 0.9654 | 0.9984 |
| Masa del papel filtro seco + bolsa (M2) | 0.873 | 0.8777 | 0.8842 | 0.8981 | 0.8561 | 0.85 | 0.884 |
| Masa final de la bolsa (Th) | 0.677 | 0.6771 | 0.6937 | 0.7035 | 0.6543 | 0.6494 | 0.6808 |
| Masa del papel filtro seco (Mf) | 0.196 | 0.2006 | 0.1905 | 0.1946 | 0.2018 | 0.2006 | 0.2032 |
| Masa de agua en el Papel filtro (Mw) | 0.0604 | 0.0594 | 0.071 | 0.0672 | 0.0736 | 0.1154 | 0.1144 |
| Porcentaje de humedad | 30.8163265 | 29.6111665 | 37.2703412 | 34.5323741 | 36.4717542 | 57.5274177 | 56.2992126 |
| Valor de la succion (h) Log kPa | 2.92640816 | 3.02029013 | 2.42364042 | 2.63692806 | 2.48585035 | 1.63537986 | 1.65196063 |
| **kPa** | **844.127722** | **1047.82831** | **265.240855** | **433.439072** | **306.09085** | **43.1896675** | **44.8704712** |
| Peso de Capsula | 17.86 | 18.44 | 18.47 | 17.66 | 18.25 | 16.89 | 17.93 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 63.17 | 63.08 | 64.32 | 67.45 | 66.08 | 64.7 | 70.8 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 57.95 | 58.1 | 57.49 | 60.32 | 59 | 55.8 | 60.96 |
| Humedad Higroscópica | 58.62 | 58.76 | 58.16 | 60.99 | 59.63 | 56.44 | 61.67 |
| **Humedad 1.1** | **13.0207** | **12.5567** | **17.5038** | **16.7135** | **17.3742** | **22.8733** | **22.8678** |
| **Humedad 1.2** | **11.1629** | **10.7143** | **15.5203** | **14.9088** | **15.5872** | **20.8850** | **20.8733** |
| Peso de Capsula | 16.53 | 17.79 | 17.93 | 18.01 | 16.53 | 18.44 | 16.91 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 62.07 | 62.15 | 63.22 | 68.04 | 64 | 66.69 | 69.53 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 56.84 | 57.15 | 56.48 | 60.79 | 56.97 | 57.66 | 59.67 |
| Humedad Higroscópica | 57.55 | 57.81 | 57.11 | 61.52 | 57.63 | 58.32 | 60.35 |
| **Humedad 2.1** | **12.9744** | **12.7033** | **17.4838** | **16.9472** | **17.3838** | **23.0240** | **23.0589** |
| **Humedad 2.2** | **11.0190** | **10.8446** | **15.5947** | **14.9851** | **15.4988** | **20.9880** | **21.1326** |
| Ds | 1.463 | 1.446 | 1.493 | 1.451 | 1.473 | 1.465 | 1.468 |
| **w** | **12.9976** | **12.6300** | **17.4938** | **16.8304** | **17.3790** | **22.9486** | **22.9634** |
| **w(hidroscópica)** | **11.0910** | **10.7794** | **15.5575** | **14.9470** | **15.5430** | **20.9365** | **21.0030** |
| **ϴ** | **0.1901448** | **0.18261647** | **0.26124553** | **0.244184** | **0.255909** | **0.33608622** | **0.33718317** |

Cálculo de Matriz de Succión mediante el Método del Papel Filtro.

Fecha de inicio del Ensayo: 08-11-19 Papel Filtro utilizado: whatman filter paper 42
Fecha de finalización del Ensayo: 15-11-19 unidades: gr

| Nombre de la Muestra | 20% (3) | 25% (1) | 25% (2) | 25% (3) | 30% (1) | 30% (2) | 30% (3) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Profundidad | | | | | | | |
| Masa predeterminada de la bolsa (Tc) | 0.6797 | 0.6847 | 0.6856 | 0.657 | 0.6632 | 0.6576 | 0.663 |
| Masa del papel filtro Humedo + bolsa (M1) | 0.9869 | 0.9999 | 1.0808 | 1.0332 | 1.0016 | 1.1766 | 1.1603 |
| Masa del papel filtro seco + bolsa (M2) | 0.8741 | 0.8741 | 0.8899 | 0.8491 | 0.8652 | 0.8563 | 0.8574 |
| Masa final de la bolsa (Th) | 0.6798 | 0.6848 | 0.686 | 0.6571 | 0.6633 | 0.6576 | 0.663 |
| Masa del papel filtro seco (Mf) | 0.1943 | 0.1893 | 0.2039 | 0.192 | 0.2019 | 0.1987 | 0.1944 |
| Masa de agua en el Papel filtro (Mw) | 0.1129 | 0.1259 | 0.1913 | 0.1842 | 0.1365 | 0.3203 | 0.3029 |
| Porcentaje de humedad | 58.1060216 | 66.5081881 | 93.8205002 | 95.9375 | 67.6077266 | 161.197786 | 155.812757 |
| Valor de la succion (h) Log kPa | 1.62756871 | 1.51413946 | 1.14542325 | 1.11684375 | 1.49929569 | 0.23582989 | 0.30852778 |
| **kPa** | **42.4198089** | **32.6692723** | **13.9772987** | **13.0871099** | **31.5715345** | **1.72119428** | **2.03482834** |
| Peso de Capsula | 18.13 | 18.31 | 17.81 | 11.62 | 11.57 | 17.89 | 18.04 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 64.27 | 66.45 | 76.15 | 57.87 | 68.68 | 79.51 | 74.39 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 55.69 | 56.95 | 63.81 | 48.15 | 57.54 | 64.89 | 60.96 |
| Humedad Higroscópica | 56.31 | 57.6 | 64.58 | 48.7 | 57.87 | 65.61 | 61.6 |
| **Humedad 1.1** | **22.8435** | **24.5859** | **26.8261** | **26.6083** | **24.2332** | **31.1064** | **31.2908** |
| **Humedad 1.2** | **20.8486** | **22.5248** | **24.7381** | **24.7303** | **23.3477** | **29.1282** | **29.3618** |
| Peso de Capsula | 18.93 | 16.62 | 16.78 | 18.12 | 17.77 | 19.94 | 17.81 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 64.59 | 64.53 | 74.8 | 63.15 | 74.38 | 76.89 | 73.95 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 56.04 | 55.13 | 62.46 | 53.49 | 63.33 | 63.33 | 60.54 |
| Humedad Higroscópica | 56.65 | 55.78 | 63.24 | 54.07 | 64.06 | 64.03 | 61.21 |
| **Humedad 2.1** | **23.0396** | **24.4092** | **27.0140** | **27.3113** | **24.2537** | **31.2514** | **31.3831** |
| **Humedad 2.2** | **21.0498** | **22.3442** | **24.8816** | **25.2573** | **22.2942** | **29.1676** | **29.3548** |
| Ds | 1.480 | 1.454 | 1.486 | 1.451 | 1.460 | 1.457 | 1.443 |
| **w** | **22.9415** | **24.4976** | **26.9200** | **26.9598** | **24.2435** | **31.1789** | **31.3369** |
| **w(hidroscópica)** | **20.9492** | **22.4345** | **24.8098** | **24.9938** | **22.8210** | **29.1479** | **29.3583** |
| **ϴ** | **0.33959753** | **0.35612614** | **0.39989896** | **0.39107301** | **0.35389521** | **0.45432949** | **0.45220366** |

Ensayos de Matriz de succión por el método del papel filtro en especímenes inalterados.

Cálculo de Matriz de Succión mediante el Método del Papel Filtro.

Fecha de inicio del Ensayo: 18-09-19 Papel Filtro utilizado: whatman filter paper 42

Fecha de finalización del Ensayo: 26-09-19 unidades: gr

| Nombre de muestra | 2.00-2.50 (1) | 2.00-2.50 (2) | 3.00-3.50 | 4.00-4.50 | 5.00-5.50 (2) | 5.00-5.50 (3) | 5.00-5.50 (1) | 6.00-6.50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Masa predeterminada de la bolsa (Tc) | 0.6304 | 0.6316 | 0.631 | 0.6659 | 0.6774 | 0.6392 | 0.6348 | 0.6811 |
| Masa del papel filtro Humedo + bolsa (M1) | 0.9801 | 0.923 | 0.9999 | 0.9809 | 1.0051 | 0.974 | 0.9657 | 1.1124 |
| Masa del papel filtro seco + bolsa (M2) | 0.8235 | 0.8281 | 0.8186 | 0.8615 | 0.8769 | 0.8282 | 0.8234 | 0.8771 |
| Masa final de la bolsa (Th) | 0.633 | 0.6335 | 0.6354 | 0.6659 | 0.6844 | 0.6398 | 0.6374 | 0.6852 |
| Masa del papel filtro seco (Mf) | 0.1905 | 0.1946 | 0.1832 | 0.1956 | 0.1925 | 0.1884 | 0.186 | 0.1919 |
| Masa de agua en el Papel filtro (Mw) | 0.1592 | 0.0968 | 0.1857 | 0.1194 | 0.1352 | 0.1464 | 0.1449 | 0.2394 |
| Porcentaje de humedad | 83.56955381 | 49.7430627 | 101.364629 | 61.0429448 | 70.2337662 | 77.7070064 | 77.9032258 | 124.752475 |
| Valor de la succion (h) Log kPa | 1.283811024 | 1.74046865 | 1.04357751 | 1.58792025 | 1.46384416 | 1.36295541 | 1.36030645 | 0.72784158 |
| **kPa** | **19.22255108** | **55.0134212** | **11.0554776** | **38.7186535** | **29.0967281** | **23.0651038** | **22.9248473** | **5.34369404** |
| Peso de Capsula | 11.71 | 16.81 | 18.5 | 17.46 | 11.6 | 11.41 | 16.69 | 18.43 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 41.06 | 44.47 | 50.3 | 54.77 | 46.83 | 43.75 | 49.97 | 49.83 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 33.55 | 37.6 | 41.27 | 48.35 | 38 | 34.65 | 41.54 | 42.34 |
| **Humedad 1** | **34.3864** | **33.0447** | **39.6574** | **20.7834** | **33.4470** | **39.1566** | **33.9235** | **31.3258** |
| Peso de Capsula | 18.02 | 16.76 | 17.91 | 18.55 | 17.98 | 17.77 | 11.58 | 18.65 |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 47.32 | 44.42 | 49.71 | 55.86 | 53.2 | 50.11 | 44.87 | 50.02 |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 40.01 | 37.6 | 40.68 | 49.09 | 44.32 | 41.12 | 36.63 | 42.85 |
| **Humedad 2** | **33.2424** | **32.7255** | **39.6574** | **22.1676** | **33.7130** | **38.5011** | **32.8942** | **29.6281** |
| Ds | 1.32 | 1.32 | 1.32 | 1.16 | 1.24 | 1.24 | 1.31 | 1.44 |
| **Ww/Ws** | **33.8144** | **32.8851** | **39.6574** | **21.4755** | **33.5800** | **38.8288** | **33.4089** | **30.4770** |
| **ϴ** | **0.446350277** | **0.43408372** | **0.52347826** | **0.24911623** | **0.41639171** | **0.48147772** | **0.43765628** | **0.43886811** |

Cálculo de Matriz de Succión mediante el Método del Papel Filtro.

Fecha de inicio del Ensayo: 18-09-19 Papel Filtro utilizado: whatman filter paper 42
Fecha de finalización del Ensayo: 26-09-19 unidades: gr

| Nombre de muestra | 7.00-7.50 (1) | 7.00-7.50 (2) | 8.00-8.50 (1) | 8.00-8.50 (2) | 9.00-9.50 | 11.00-11.50 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Masa predeterminada de la bolsa (Tc) | 0.6316 | 0.627 | 0.6884 | 0.6323 | 0.6342 | 0.6938 | |
| Masa del papel filtro Humedo + bolsa (M1) | 1.0472 | 1.0554 | 1.1046 | 1.031 | 0.935 | 0.9575 | |
| Masa del papel filtro seco + bolsa (M2) | 0.8206 | 0.8211 | 0.8747 | 0.8139 | 0.8456 | 0.8967 | |
| Masa final de la bolsa (Th) | 0.6327 | 0.6388 | 0.695 | 0.6337 | 0.6342 | 0.6938 | |
| Masa del papel filtro seco (Mf) | 0.1879 | 0.1823 | 0.1797 | 0.1802 | 0.2114 | 0.2029 | |
| Masa de agua en el Papel filtro (Mw) | 0.2277 | 0.2461 | 0.2365 | 0.2185 | 0.0894 | 0.0608 | |
| Porcentaje de humedad | 121.18148 | 134.997257 | 131.608236 | 121.254162 | 42.2894986 | 29.9655002 | |
| Valor de la succion (h) Log kPa | 0.77605003 | 0.58953703 | 0.63528881 | 0.77506881 | 2.03264806 | 2.99268753 | |
| **kPa** | **5.97104063** | **3.8863063** | **4.31806141** | **5.95756532** | **107.807273** | **983.303377** | |
| Peso de Capsula | 18.54 | 11.4 | 16.99 | 17.51 | 15.75 | 18.28 | |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 60.87 | 44.31 | 43.38 | 47.63 | 56.12 | 41.31 | |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 51.52 | 36.88 | 37.31 | 40.92 | 48.88 | 37 | |
| **Humedad 1** | **28.3505** | **29.1601** | **29.8720** | **28.6630** | **21.8533** | **23.0235** | |
| Peso de Capsula | 18.32 | 18.72 | 17.77 | 14.73 | 17.82 | 16.65 | |
| Peso de Capsula + suelo húmedo | 60.7 | 51.63 | 50.15 | 44.85 | 58.19 | 39.68 | |
| Peso de la Capsula + suelo seco | 51.38 | 44.21 | 42.86 | 38.13 | 51.09 | 35.23 | |
| **Humedad 2** | **28.1912** | **29.1095** | **29.0554** | **28.7179** | **21.3405** | **23.9505** | |
| Ds | 1.33 | 1.33 | 1.56 | 1.56 | 1.59 | 1.4 | |
| **Ww/Ws** | **28.2708** | **29.1348** | **29.4637** | **28.6905** | **21.5969** | **23.4870** | |
| **ϴ** | **0.37600219** | **0.38749271** | **0.45963409** | **0.44757112** | **0.34339112** | **0.32881792** | |