

# UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL

ESCUELA DE FORMACION PROFESIONA DE INGENIERIA CIVIL



**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

“EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA  
CURVA CARACTERÍSTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA”

**PRESENTADO POR:**

Bach. RICHARD CABALLERO CONDORI

**ASESOR:**

Mg Sc. Ing. ANGEL HUGO VILCHEZ PEÑA

Ayacucho-Perú

2018

## **Dedicatoria**

A

*aquellas personas que me ayudaron a realizar  
mis sueños, a mis padres que siempre  
estuvieron conmigo y a toda mi familia.*

## **Agradecimiento**

Agradezco a mi alma mater la “Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga” por haberme albergado en sus aulas durante mi travesía en la universidad.

A mi gran amigo y asesor, el Mg Sc. Ing. Ángel Hugo Vílchez peña, por el tiempo y la paciencia en el desarrollo de la Tesis, y por estar en esos momentos más difíciles que uno pasa en la vida, y a mis amigos del barrio y de la universidad por estar siempre conmigo.

A mis padres: Enrique y Celsa, que con sus ejemplos me enseñaron a luchar y soñar, a mis hermanos que me han acompañado y apoyado incondicionalmente en esta aventura de mi carrera.

**RESUMEN**

El principal objetivo de este proyecto es la determinación de la curva característica en arcillas para poder evaluar el potencial de la succión en la localidad de Mayoc-Huancavelica apoyado en modelos matemáticos.

Los estudios sobre la succión de arcillas son escasos en nuestro país. La falta de información y estudios acerca de la influencia de la succión en el comportamiento de suelos y especialmente en arcillas, han impedido abordar con criterio los problemas generados por tal influencia en este tipo de suelos, estos problemas generan patologías estructurales como las deformaciones en cimentaciones, colapso de las estructuras viales, inestabilidad de taludes, entre otros.

La metodología que se utilizó para obtener los datos de análisis, consiste en el método de investigación de campo que es por medio de sondeos y experimental que se realizará en el laboratorio.

Esta investigación se plantea como un estudio que pueda otorgar la pauta para realizar otros estudios relacionados con este tema; ya que el estudio de la influencia de la succión en suelos no saturados, además de ser amplio y complejo, permita extender el estudio a toda la región.

**SUMARY**

The main objective of this project is the determination of the characteristic curve in clays to be able to evaluate the potential of the suction in the locality of Mayocc-Huancavelica supported in mathematical models.

Studies on the suction of clays are scarce in our country. The lack of information and studies about the influence of suction on the behavior of soils and especially on clays, have prevented to address with criteria the problems generated by such influence in this type of soil, these problems generate structural pathologies such as deformations in foundations , collapse of road structures, slope instability, among others.

The methodology that was used to obtain the analysis data consists of the field research method that is by means of sounding and experimental that will be carried out in the laboratory.

This research is proposed as a study that can provide the guidelines for other studies related to this topic; since the study of the influence of suction on unsaturated soils, besides being wide and complex, allows extending the study to the whole region.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
<b>Portada</b>	i
<b>Dedicatoria</b>	ii
<b>Agradecimientos</b>	iii
<b>Resumen</b>	iv
<b>Summary</b>	v
<b>Índice de Contenidos</b>	vi
<b>Índice de Cuadros</b>	xii
<b>Índice de figuras</b>	xiv
<b>Índice de siglas</b>	xxiv
<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación e importancia.....	2

1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	Objetivos Generales.....	4
1.4.2	Objetivos Específicos.....	4
1.5	Hipótesis.....	4
1.5.1	Hipótesis Generales.....	4
1.5.2	Hipótesis Específicos.....	5
1.6	Organización del estudio.....	5

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

2.1	Naturaleza de la arcilla.....	7
2.1.1	Origen de la arcilla.....	7
2.1.1.1	Estructura de la arcilla.....	7
2.1.1.2	Clasificación de la arcilla.....	9
2.2	Propiedades Índice.....	10
2.2.1	Fases del suelo.....	11
2.2.1.1	Relación de volúmenes.....	12
2.2.1.2	Relación de pesos.....	12
2.2.1.3	Relación de peso y volumen.....	13
2.2.2	Granulometría.....	14
2.2.2.1	Análisis mecánico por tamices.....	14

2.2.2.2 Análisis mecánico por hidrometría.....	14
2.2.3 Límites de consistencia.....	15
2.2.3.1 Límite líquido (L.L).....	15
2.2.3.2 Límite plástico (L.P).....	16
2.2.3.3 Límite de contracción (L.C).....	16
2.2.4 Actividad.....	17
2.3 Introducción a los suelos no saturados.....	18
2.3.1 Generalidades.....	18
2.3.2 Influencia del clima en suelos no saturados.....	20
2.3.3 Influencia de la vegetación en suelos no saturados.....	23
2.3.4 Perfiles típicos de suelos no saturados.....	23
2.3.5 Suelos no saturados en la práctica.....	24
2.3.6 Fases de los suelos no saturados.....	25
2.4 Mecánica de suelos no saturados.....	26
2.4.1 Succión del suelo.....	26
2.4.1.1 Succión matricial.....	28
2.4.1.2 Succión osmótica.....	29
2.4.2 Curva característica del suelo.....	30
2.4.3 Capilaridad y tensión superficial.....	35

2.4.4 Metodologías para determinar la succión.....	37
2.4.4.1 Tensiómetros.....	38
2.4.4.2 Técnicas de traslación de ejes.....	40
2.4.4.3 Sensor de conductividad térmica.....	41
2.4.4.4 Método de la placa de succión.....	43
2.4.4.5 Método de la centrifugación.....	44
2.4.4.6 Método de la membrana de presión .....	45
2.4.4.7 Sicrómetro de termopar.....	46
2.4.4.8 Método del papel filtro.....	48
2.4.5 Modelación y ajustes de la curva característica.....	51
2.4.5.1 Modelo de Gardner.....	52
2.4.5.2 Modelo de Van Genuchten.....	53
2.4.5.3 Modelo de la proporcionalidad natural.....	55
2.4.5.4 Modelo de Fredlung y Xing.....	55
2.4.5.5 Modelo de Zapata.....	56
2.4.6 Ajuste de modelos a resultados experimentales de la curva característica....	59

### **CAPÍTULO III: METODOLOGIA Y DESARROLLO DE LA TESIS**

3.1 Ubicación de la zona de estudio.....	60
3.2 Metodología para la caracterización geotécnica.....	61

3.2.1 Toma de muestras .....	61
3.2.2 Contenido de humedad( $\omega$ ).....	61
3.2.3 Limite líquido (L.L).....	61
3.2.4 Limite plástico (L.P).....	62
3.2.5 Limite de contracción (L.C).....	63
3.2.6 Gravedad especifica de solidos ( $G_s$ ).....	65
3.2.7 Análisis granulométrico por tamizado.....	67
3.2.8 Análisis granulométrico por sedimentación.....	67
3.2.9 Clasificación del material fino.....	69
3.3 Metodología para determinar indirectamente la succión matricial por el método del papel filtro.....	70
3.4 Herramientas computacionales.....	81
 <b>CAPÍTULO IV: RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN Y DISCUSIÓN</b>	
4.1 Caracterización geotécnica del suelo utilizado.....	86
4.2 Determinación de la curva característica por desecamiento de la arcilla estudiada..	90
4.2.1 Determinación de la curva característica experimentalmente.....	90
4.2.2 Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten..	91
4.2.3 Determinación de la curva característica por el modelo de Gardner.....	94

4.2.4 Determinación de la curva característica por el modelo de proporcionalidad natural.....	95
4.2.5 Determinación de la curva característica por el modelo de Fredlung y Xing..	96
4.2.6 Determinación de la curva característica por el modelo de Zapata.....	97
4.2.7 Superposición de los modelos estudiados para la determinación de la curva característica.....	99
4.3 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica por desecamiento de la arcilla estudiada gráficamente.....	101
4.3.1 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Van Genuchten-Burdine-Mualem.....	101
4.3.2 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Gardner.....	103
4.3.3 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Fredlung y Xing.....	104
4.3.4 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de la proporcionalidad natural.....	105
4.3.5 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Zapata.....	106

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Conclusiones y recomendaciones.....	114
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>123</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Valores de límites de Atterberg para minerales arcillosos (Mitchel y Soga, 2005).....	16
Cuadro 2.2: Actividad de las arcillas (Duque y Escobar, 2016).....	17
Cuadro 2.3: Dispositivo para determinar la succión total y matricial (Lu y Likos, 2004).....	37
Cuadro 3.1: Datos obtenidos del ensayo por el método del papel filtro (Elaboración propia, 2018).....	80
Cuadro 3.2: Valores iniciales de los parámetros de ajuste (SoilVision®, RETC, IMT).....	82
Cuadro 4.1: Propiedades geotécnicas del suelo (Elaboración propia, 2018).....	86
Cuadro 4.2: Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Van Genchuten-Burdine-Mualem (Elaboración propia, 2018).....	94
Cuadro 4.3: Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Van Gardner (Elaboración propia, 2018).....	95
Cuadro 4.4: Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de la proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).....	96

Cuadro 4.5: Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).....97

Cuadro 4.6: Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Zapata-Van Genuchten-Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).....99

Cuadro 4.7: Valores de los puntos de inflexión de la curva característica de la arcilla estudiada (Elaboración propia, 2018).....109

Cuadro 4.8: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla estudiada para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  (Elaboración propia, 2018).....109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Disposición en lámina silícica (Sposito, 2008).....	8
Figura 2.2: Disposición en lámina alumínica (Sposito, 2008).....	8
Figura 2.3: División de elementos en fase (Lambe y Whitman, 1972).....	11
Figura 2.4: Definición de los límites de atterberg (Das, 2013).....	15
Figura 2.5: División de la mecánica del suelo (Zeballos, 2004).....	18
Figura 2.6: Visualización de la mecánica del suelo (Charles & Menzies, 2007).....	20
Figura 2.7: Modelo conceptual del perfil de variación de la succión con la profundidad en suelos no saturados (Lu y Likos ,2004).....	22
Figura 2.8: Fases de un suelo no saturado (Yoshimi & Osterberg ,1963).....	26
Figura 2.9: Agua en un suelo no saturado, sujeta a la capilaridad y a la adsorción, que en combinación producen la succión matricial (Pousada, 1984).....	29
Figura 2.10: Curva característica típica con tres estados de saturación y los dos puntos de inflexión (Cho & Santamarina, 2001).....	30
Figura 2.11: Estados de saturación en suelos no saturados.(a)Estado pendular (b) Estado funicular (c) Estado capilar(Schubert et al, 1975).....	32
Figura 2.12: Curva característica típica para arena, limo y arcilla (Lu y Likos ,2004).....	33
Figura 2.13: Histéresis en la curva característica (Lu y Likos ,2004).....	34

Figura 2.14: Diagrama de cuerpo libre del menisco capilar formado en la interfaz aire-agua en un tubo capilar (Bear, 1972).....	36
Figura 2.15: Tensiómetro (www.agua.uji.es/pdf/presentacionHQ5.pdf).....	39
Figura 2.16: Esquema de la sección transversal de la interfase suelo no saturado-disco de cerámica. Medición de la succión matricial por medio de la técnica de traslación de ejes (Lu y Likus, 2004).....	40
Figura 2.17: Conductividad térmica del suelo según su contenido de agua (Rojas, 2007).....	42
Figura 2.18: Sección transversal de un sensor de conductividad térmica AGWA (Fredlund y Rahardjo ,1993).....	43
Figura 2.19: Método de la placa de succión para determinar la succión (Zepeda ,2004).....	44
Figura 2.20: Procedimiento de la centrifugación para determinar la succión (Zepeda ,2004).....	45
Figura 2.21: Aparato de la membrana de la presión (Zepeda ,2004).....	47
Figura 2.22: Circuito eléctrico que ilustra el efecto Seebeck (Zepeda ,2004).....	47
Figura 2.23: Circuito eléctrico que ilustra el efecto Peltier (Zepeda ,2004).....	47
Figura 2.24: Curvas de calibración para papel filtro Whatman #42 y Scheleider&Schull#589(ASTMD5298) (Lu y Likos, 2004).....	50
Figura 2.25: Determinación de la succión total y matricial (Beltrán, 2009).....	51
Figura 3.1: Ubicación de la extracción de la muestra (Google Earth).....	60

Figura 3.2: Ensayo de límite líquido (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....	62
Figura 3.3: Rollitos de suelo para limite plástico (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....	63
Figura 3.4: Ensayo para límite de contracción (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....	65
Figura 3.5: Peso del picnómetro, agua y el suelo (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....	66
Figura 3.6: Herramientas para el ensayo sedimentación (Geotecnia & Ingeniería, 2017) .....	69
Figura 3.7: Ensayo por sedimentación (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....	70
Figura 3.8: Papel filtro whatman#42 (MTL Geotecnia, 2018).....	71
Figura 3.9: Secado del papel filtro en el horno (MTL Geotecnia, 2018).....	71
Figura 3.10: Papel filtro dentro del desecador (MTL Geotecnia, 2018).....	72
Figura 3.11: Preparación del espécimen del suelo (MTL Geotecnia, 2018).....	72
Figura 3.12: Extracción del papel filtro del desecador (MTL Geotecnia, 2018).....	73
Figura 3.13: Colocación del papel filtro (3 unidades) entre dos especímenes del suelo (MTL Geotecnia, 2018).....	74
Figura 3.14: Sellado de la muestra con cinta aislante (MTL Geotecnia, 2018).....	74
Figura 3.15: Sellado de la muestra con bolsa hermética (MTL Geotecnia, 2018).....	75
Figura 3.16: Sellado de la muestra con papel vinipel (MTL Geotecnia, 2018).....	75
Figura 3.17: Almacenamiento de los recipientes con las muestras en el interior y control de temperatura en la cámara hermética (MTL Geotecnia, 2018).....	76

Figura 3.18: Extracción de la muestra de la cámara hermética (MTL Geotecnia, 2018).....	77
Figura 3.19: Peso del papel filtro en la balanza de precisión de 0.0001 gr, después de extraer del recipiente sellado (MTL Geotecnia, 2018).....	78
Figura 3.20: Peso del papel filtro en la balanza de precisión de 0.0001 gr, después de extraer del horno (MTL Geotecnia, 2018).....	78
Figura 3.21: Saturación de la muestra por capilaridad (MTL Geotecnia, 2018).....	79
Figura 3.22: Parámetros del Solver (Elaboración propia, 2018).....	83
Figura 3.22: Ventana con los resultados del Solver (Elaboración propia, 2018).....	84
Figura 3.23: Curva de ajuste obtenida con los parámetros obtenidos con el Solver (Elaboración propia, 2018).....	85
Figura 4.1: Carta de plasticidad SUCS modificado con la clasificación del suelo en estudio (Elaboración propia, 2018).....	87
Figura 4.2: Carta de plasticidad AASHTO modificado con la clasificación del suelo en estudio (Elaboración propia, 2018).....	87
Figura 4.3: Curva granulométrica por sedimentación (Elaboración propia, 2018).....	89
Figura 4.4: Curva característica en términos grado de saturación y succión de la arcilla por desecamiento obtenida experimentalmente (Elaboración propia, 2018).....	90

Figura 4.5: Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión de la arcilla por desecamiento obtenida experimentalmente (Elaboración propia, 2018).....91

Figura 4.6: Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....92

Figura 4.7: Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Van Genuchten y Burdine (Elaboración propia, 2018).....92

Figura 4.8: Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Van Genuchten y Mualem (Elaboración propia, 2018).....93

Figura 4.9: Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Gardner (Elaboración propia, 2018).....94

Figura 4.10: Curva característica en términos de succión y grado de saturación por desecamiento simulada con la ecuación del modelo de la proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).....95

Figura 4.11: Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).....96

Figura 4.12: Curva característica en términos de grado de saturación y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Zapata basada en la ecuación de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....97

Figura 4.13: Curva característica en términos de grado de saturación y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Zapata basada en la ecuación de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....98

Figura 4.14: Superposición de los ocho modelos estudiados para determinar la curva característica en términos del grado de saturación y succión por desecamiento en la arcilla estudiada (Elaboración propia, 2018).....100

Figura 4.15: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....101

Figura 4.16: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Van Genuchten-Burdine (Elaboración propia, 2018).....102

Figura 4.17: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Van Genuchten-Mualem (Elaboración propia, 2018).....103

Figura 4.18: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Gardner (Elaboración propia, 2018).....104

Figura 4.19: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).....105

Figura 4.20: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de la proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).....106

Figura 4.21: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Zapata-Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....107

Figura 4.22: Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Zapata-Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).....108

Figura 4.23: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....110

Figura 4.24: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Van Genuchten-Burdine (Elaboración propia, 2018).....110

Figura 4.25: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Van Genuchten-Mualem (Elaboración propia, 2018).....111

Figura 4.26: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Gardner (Elaboración propia, 2018)..111

Figura 4.27: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).....112

Figura 4.28: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Fredlung-Xing (Elaboración propia, 2018).....113

Figura 4.29: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de zapata-Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....113

Figura 4.30: Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Zapata-Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).....113

Figura A.1: Resultados de la granulometría por tamizado (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....124

Figura A.2: Resultados del límite líquido y limite plástico (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....125

Figura A.3: Resultados de clasificación por SUCS y AASTHO (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....126

Figura A.4: Resultados del límite de contracción (Geotecnia & Ingeniería, 2017)..... 127

Figura A.5: Resultados del contenido de humedad y gravedad específica (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....128

Figura A.6: Resultados del análisis granulométrico por sedimentación (Geotecnia & Ingeniería, 2017).....129

Figura A.7-1: Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).....130

Figura A.7-2: Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).....131

Figura A.7-3: Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).....132

Figura A.7-4: Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).....133

Figura A.7-5: Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).....134

Figura A.8: Determinación de la curva característica por el modelo de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).....135

Figura A.9: Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).....136

Figura A.10: Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten y Burdine (Elaboración propia, 2018).....137

Figura A.11: Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten y Mualem (Elaboración propia, 2018).....138

Figura A.12: Determinación de la curva característica por el modelo de Gardner (Elaboración propia, 2018).....139

Figura A.13: Determinación de la curva característica por el modelo de proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018)..... 140

Figura A.14: Determinación de la curva característica por el modelo de Zapata y Van Genuchten (Elaboración propia, 2018)..... 141

Figura A.15: Determinación de la curva característica por el modelo de Zapata, Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018)..... 142

Figura A.16: Superposición de los modelos realizados para la determinación de la curva característica (Elaboración propia, 2018)..... 143

**ÍNDICE DE SIGLAS**

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

LC = Límite de contracción

IP = Índice plástico

A = Actividad

RNE = Reglamento nacional de edificaciones

V<sub>a</sub> = Volumen del aire

V<sub>w</sub> = Volumen del agua

V<sub>s</sub> = Volumen de sólidos

V<sub>m</sub> = Volumen de la muestra

W<sub>a</sub> = Masa del aire

W<sub>w</sub> = Masa del agua

W<sub>s</sub> = Masa de sólidos

W<sub>m</sub> = Masa de la muestra

n = Porosidad/parámetro de ajuste relacionado con la pendiente

e = Índice de vacíos o relación de vacíos

ω = Humedad natural

$G_s$  = Gravedad específico de solidos

$\Upsilon$  = Peso específico total o peso volumétrico

$\Upsilon_d$  = Peso específico seco

$\Upsilon_w$  = Peso específico del agua

NTP = Norma técnica peruana

ASTM = American Society of Testing Materials

$\Psi_t$  = Succión total

$\Psi$  = Succión matricial

$\Psi_o$  = Succión Osmótica

$u_a$  = Presión de al aire

$u_w$  = Presión de poros o del agua intersticial

$S_r$  = Saturación residual

VEA = Valor de entrada del aire

$P_c$  = Presión capilar

$T_s$  = Tensión superficial

$R$  = Radio de la curvatura del menisco

$\alpha$  = Angulo de contacto/parámetro de ajuste relacionado con el valor de entrada del aire.

$\omega_f$  = Contenido de agua o humedad del papel filtro

$S$  = Grado de saturación

$\theta$  = Contenido de humedad volumétrica

$\theta_s$  = Contenido de humedad en saturación

$\theta_r$  = Contenido de humedad residual

$m$  = Parámetro de ajuste relacionado con la simetría del modelo

$\gamma$  = Coeficiente de proporcionalidad

$\Psi^*$  = Succión característica

$\Psi_r$  = Succión residual

$w$  = Porcentaje que pasa la malla # 200

$w.IP$  = Índice de plasticidad ponderada

SSR = Suma de residuos cuadráticos

$w_i$  = Factor de peso

$S_i$  = Grado de saturación medida experimentalmente para un determinado nivel de succión

$\hat{S}_i$  = Grado de saturación calculada para el mismo nivel de succión

INV = Instituto Nacional de Vías

ASSTHO = American Association of State Highway and Transportation Officials

SUCS = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

RETC = Retention Curve Computer Program

IMT = Instituto Mexicano de Transportes

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

La mecánica de suelos se ha desarrollado, fundamentalmente, para el caso saturado y seco. El caso más general, el de suelos no saturados, ha sufrido un desarrollo notablemente más lento, el caso no saturado plantea mayores problemas de tratamiento. El estudio del suelo no saturado, respectó al suelo saturado, implica el tratamiento de nuevas variables de esfuerzo, como la succión, que pueden afectar considerablemente a su comportamiento, planteando problemas de flujo no lineales y de compleja solución con tres fases, solida, liquida y gaseosa.

A lo largo de la historia de la mecánica de suelos numerosos investigadores han estado interesados en entender y predecir el comportamiento de las distintas estructuras del suelo. La primera contribución importante a la mecánica de suelos se atribuye a Coulomb (1776), quien publicó un tratado sobre el análisis del fallo del terreno, posteriormente Rankine (1857) publicó un artículo sobre los estados de esfuerzo en el suelo, otra contribución fue el desarrollo de la teoría de la mecánica de suelos que fue hecha por Karl Terzagui (1936), que estudio la influencia de la presión del agua de poro en su comportamiento mecánico. La curva característica del suelo es una función importante en la mecánica de suelos no saturados para el análisis y diseño alguna estructura de tierra, Richard. (1965).

La relación existente entre el grado de saturación y la succión del suelo es una propiedad básica del suelo y una parte esencial de la caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo, da una importancia tal que justifica el nombre curva característica suelo, humedad característica, curva de retención o curva de presión capilar, refleja la capacidad de un suelo para retener el agua en función de la succión (tensión) ejercida.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Los suelos arcillosos al someterse a procesos de secado, con agentes del microclima donde hay mayor evaporación que precipitación o la vegetación que absorbe el agua existente en el suelo, sufren presiones de poros negativas debida a la capilaridad generada entre los intersticios del suelo, estas presiones de poros, comúnmente conocida como succión matricial, son las que generan los cambios volumétricos y el agrietamiento del suelo. Los estudios sobre la succión de arcillas son escasos en nuestro país. La falta de información y estudios acerca de la influencia de la succión en el comportamiento de suelos y especialmente en arcillas han impedido abordar con criterio los problemas generados por tal influencia en este tipo de suelos, estos problemas generan patologías estructurales como las deformaciones en cimentaciones, colapso de las estructuras viales, inestabilidad de taludes, entre otros.

La ausencia de conocimiento sobre la succión de los suelos arcillosos en nuestro país constituye un campo de gran interés ya que al determinar en detalle las curvas características, se lograra un mayor entendimiento del comportamiento de los materiales en situaciones prácticas.

## **1.3 Justificación e importancia**

Los tamaños comunes del suelo estudiado están por el orden de  $2 \mu\text{m}$ , lo que permite la existencia del fenómeno de capilaridad sobre el nivel freático del mismo,

admitiendo así el ascenso continuo de agua a través de los espacios libres que dejan sus partículas sólidas; cuando el suelo es sometido a procesos constantes de secado y humedecimiento, se producen esfuerzos en el esqueleto mineral del suelo que ayudado por la succión matricial del mismo generan fisuras y grietas de tamaños considerables, grandes cambios volumétricos y deformaciones excesivas que concluyen con la pérdida de estabilidad estructural de estos materiales y las estructuras de tipo ingenieril que se ubican sobre estos.

Es poco práctico emprender rigurosos y costosos ensayos comunes en la ingeniería geotécnica sobre suelos que enfrenten grandes procesos de desecación, uno de los métodos indirectos más confiables para estimar las propiedades de los mismos tiene que ver con las curvas características, ya que es relativamente fácil para su medición y en los últimos tiempos ha llegado a ser la llave para obtener información acerca de las propiedades de suelos desecados. Varios procedimientos experimentales se han usado sobre materiales con problemas de humedad, tales como permeabilidad, esfuerzo cortante, cambios volumétricos entre otros, pero todos ellos han ido acompañados de la determinación de las propiedades de la curva característica. Las funciones de propiedades desecadas se pueden relacionar sin problema con las curvas características, porque las variaciones en las propiedades de suelos con problemas de humedad son principalmente una función de la cantidad de agua presente en el suelo. El coeficiente de permeabilidad de un suelo desecado es función del volumen de agua en el suelo mientras el comportamiento del esfuerzo de corte y el cambio de volumen son principalmente función del área de agua sobre una sección transversal imparcial. La naturaleza de las curvas características tiene gran influencia sobre las tendencias de algunas propiedades de suelos que se ubican sobre el nivel freático de gran importancia en prácticas ingenieriles, como es el caso de la resistencia y la rigidez;

debido a que los cambios de volumen y el agrietamiento por desecación en materiales finos como las arcillas presentan relación directa con las variaciones de humedad y principalmente con las de succión a las cuales está sometido el suelo

Una vez determinadas las curvas características se obtendrán parámetros que permitan comprender el comportamiento que experimenta este tipo de material arcilloso, con lo cual se podrá implementar mejoras en los diseños de prácticas ingenieriles minimizando ciertas patologías en las estructuras.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivos Generales**

- Determinar la curva característica por desecamiento aplicada a arcillas en Mayocc-Huancavelica.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Determinar experimentalmente la curva característica por desecamiento en arcillas con el método del papel filtro.
- Realizar la caracterización geotécnica y composicional del material objeto de estudio
- Realizar el ajuste matemático de la curva característica por desecamiento establecidas experimentalmente.

## **1.5 Hipótesis**

### **1.5.1 Hipótesis Generales**

- Al determinar la curva característica en arcillas se evalúa el potencial de la succión en Mayocc-Huancavelica, con fines de implementar mejoras en las practicas ingenieriles

### **1.5.2 Hipótesis Específicos**

- Al realizar los ensayos de laboratorio del material en estudio se realiza su caracterización geotécnica y composicional.
- Con el método del papel filtro se determina la curva característica en arcillas en Mayocc -Huancavelica.
- Al determinar los datos de la succión medidos indirectamente por el método del papel filtro se realizará el ajuste matemático de la curva característica por desecamiento establecidas experimentalmente.

### **1.6 Organización del estudio**

La presente tesis se ha organizado de tal manera siga la secuencia de campo, laboratorio, procesamiento y resultados. Para iniciar con el estudio se ha realizado sondeos y extracciones de muestra inalterada sellada para evitar las pérdidas de su humedad natural y las propiedades se alteren y dejen de ser representativas.

La secuencia seguida es la siguiente:

- En el **Capítulo 1**, se expone como surge el interés de realizar la presente tesis, la sustentación del problema de investigación. La justificación y la importancia de estudio. Asimismo se hace un planteamiento final de los objetivos y las hipótesis que persigue la tesis.
- En el **Capítulo 2**, presenta los conceptos fundamentales para determinar la curva característica de la arcilla por el método del papel filtro aplicando modelos matemáticos para realizar su respectivo ajuste matemático, y su respectiva la caracterización geotécnica del material en estudio.
- El **Capítulo 3**, presenta la descripción de los equipos necesarios para la caracterización geotécnica y la determinación de la curva característica por el método del papel filtro, así también se detalla la metodología seguida para

la determinar la caracterización geotécnica y la curva característica aplicando el método del papel filtro.

- El **Capítulo 4**, aborda la ubicación, extracción de muestras de la zona en estudio. Aborda también de los resultados y discusiones de la caracterización geotécnica, y la determinación de la curva característica.
- El **Capítulo 5** se ocupa de las conclusiones y recomendaciones con respecto a las investigaciones y resultados obtenidos en la presente investigación.
- La **Bibliografía** presenta una lista detallada del material bibliográfico utilizado.
- En el **Anexo** se adjunta los diferentes resultados de clasificación en hoja de Excel, la determinación de la curva característica realizados en hoja de Excel, plano de ubicación.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Naturaleza de la Arcilla.**

##### **2.1.1 Origen de la arcilla.**

Las arcillas los podemos encontrar en la naturaleza originados por la descomposición química de las rocas en forma de sedimentos o depósitos de minerales naturales que se han depositado en los lechos de lagos y mares por la acción de arrastre de los ríos.

Las arcillas son agregados de partículas microscópicas y sub-microscópicas derivados de la descomposición química que sufren los constituyentes de las rocas. Las arcillas son plásticas cuando están dentro de los límites en contenido de humedad y cuando las arcillas se encuentran secas son duros, sin que sea posible despegar polvo de una pasta frotando con los dedos, además tienen una permeabilidad extremadamente muy baja (Terzagui y Peck, 1973).

##### **2.1.1.1 Estructura de la arcilla.**

Las arcillas se producen debido a la descomposición química de minerales (principalmente silicatos), que se encuentran en las rocas. Las arcillas están constituidas fundamentalmente por silicatos de aluminio hidratados, además de

silicatos de magnesio, hierro y otros metales, también hidratados, cuya estructura cristalina está bien definida (Campos y Guardia, 2005).

La disposición en lámina silícica está constituida por un átomo de silicio y cuatro de oxígeno ordenados en forma de tetraedro, como muestra la Figura. (2.1.a), que se agrupan en unidades hexagonales las cuales se repiten indefinidamente constituyendo una redícula laminar. La unión entre cada tetraedro se realiza por medio de un átomo de oxígeno, como ilustra la Figura. (2.1.b).

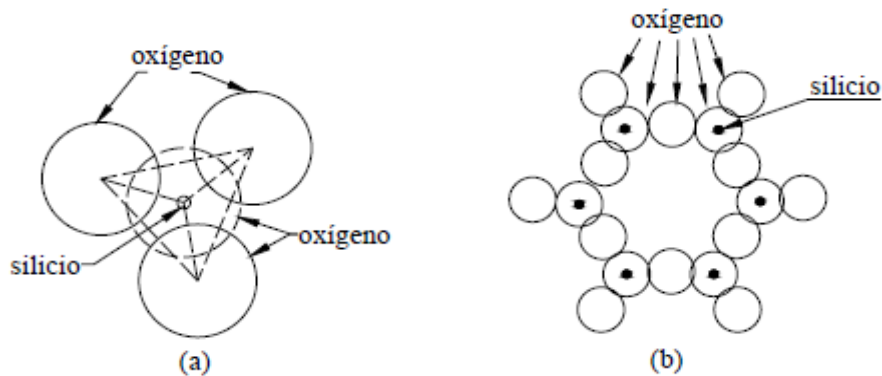


Figura 2.1 Disposición en lámina silícica (Sposito, 2008).

En la disposición en láminas alumínicas, un átomo de aluminio está rodeado por seis de oxígeno formando un octaedro. El enlace de unión que forma la redícula es un átomo de oxígeno (Fig. 2.2).

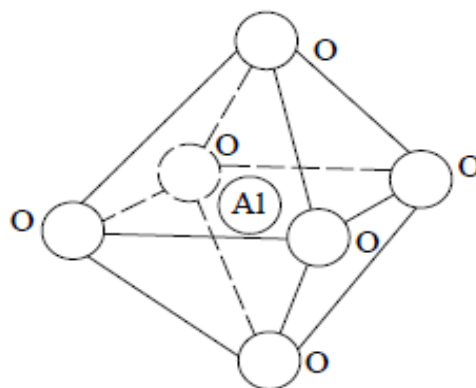
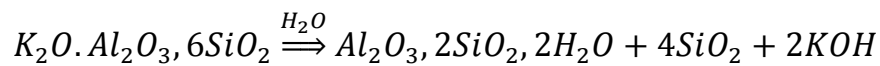


Figura 2.2 Disposición de una lámina alumínica (Sposito, 2008).

La Arcilla es una asociación de minerales arcillosos (silicatos complejos hidratados de aluminio), de pequeño tamaño de partícula originada por la alteración hidrotermal de rocas (granitos, riolitas, dioritas, basaltos) que, bajo condiciones propias de presión, temperatura, acidez, etc., desilicifican a minerales arcillosos sílice libre y alcalies que se lixivian según la conocida reacción:



La forma de la estructura de las arcillas proporciona a las partículas un área superficial muy grande, la que será la responsable del grado de cohesión de estos suelos.

La estructura interna que presentan los suelos es un aspecto de gran importancia en el comportamiento mecánico de éstos. Así, por ejemplo, bajo mismas condiciones de carga, para un suelo con una estructura abierta se produce un colapso durante el mojado del suelo, sin embargo, para el mismo suelo y condiciones de carga, pero con una estructura más compacta se puede producir una expansión al mojarlo (Beltrán, 2009).

#### **2.1.1.2 Clasificación de la arcilla.**

Atendiendo a los minerales que con mayor frecuencia se encuentran en las arcillas naturales y de acuerdo a su estructura cristalina (De Pablo Galán, 1964), se puede hacer la siguiente clasificación:

**Caolinitas (estables).** Se forman por superposición indefinida de láminas alumínicas y silícicas. La unión entre partículas es muy fuerte de tal modo que no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas. Presentan poca actividad

superficial y sus propiedades coloidales no son favorables para su uso como fluidos de perforación.

**Illitas (colapsables).** Estas arcillas se forman por las superposiciones indefinidas de una lámina alumínica entre dos silícicas. En su constitución interna se forman grumos de material que ocasionan una reducción del área expuesta al agua, lo que limita su propiedad de expandirse, las arcillas illíticas se comportan mecánicamente más favorables para el ingeniero.

**Montmorillonitas (expansivas).** Su estructura es análoga a la de las illitas, pero su unión es más débil de modo que se permite la introducción de agua en su estructura, lo que ocasiona un aumento en el volumen de los cristales que se traduce en una expansión del suelo. Las montmorillonitas poseen una gran actividad superficial en sus partículas coloidales, lo que puede variar sus propiedades físicas de un tipo a otro, como en el caso de la montmorillonita cálcica y sódica.

## **2.2 Propiedades Índices.**

Existe una gran variedad de suelos con características diferentes, por lo que se los clasifica en diferentes categorías y tipos. Las propiedades índice del suelo, se refiere a las características particulares que identifican a un suelo en una misma categoría, estas son: granulometría, consistencia, cohesión y estructura. Conociendo toda esta información del suelo, se puede anticipar a su comportamiento y la metodología que se seguirá al tratar con aquel tipo de suelo (Campos y Guardia, 2005).

Sowers (como se citó en Beltrán, 2009) una propiedad índice es cualitativamente fácil de medir en suelos y rocas tanto en campo como en laboratorio mediante la cual se puede inferir un comportamiento más complejo de un suelo.

Las propiedades índices son un primer acercamiento hacia los suelos y debe servir como una orientación para profundizar el estudio a través de ensayos más elaborados; es decir, su uso debe limitarse a la etapa preliminar y a un estimado diseño.

### 2.2.1 Fases del suelo

La masa del suelo, es un sistema discontinuo de partículas compuesto de tres fases en esencia, una sólida o partículas mineralogías, la gaseosa o vacíos existentes entre los sólidos y la líquida o agua retenida entre las partículas. Esta composición se puede representar en la Figura 2.3 representando las 3 fases presentadas en un suelo natural. (Lambe y Whitman, 1972),

Las tres fases que compone un suelo, interactúan de forma tal que la variación de alguna de ellas influyen en el comportamiento mecánico del suelo, por ello se ha definido un sistema que permita explicar estas tres fases y su interacción, la Figura 2.3 representa el esquema empleado, a la izquierda se ha definido la interacción del suelo en términos del volumen y a la derecha términos de peso o masa.

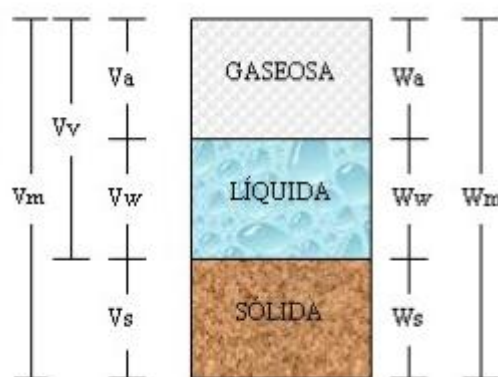


Figura 2.3 División de elementos en fases (Lambe y Whitman, 1972).

Las relaciones de fase, se entiende como las relaciones existentes entre algunas fases del suelo con otras, para ello se pueden clasificar relaciones de volúmenes, pesos

y peso-volumen, de las cuales se obtienen ecuaciones, ayudando a entender este comportamiento en términos cuantitativos.

### 2.2.1.1 Relación de volúmenes

#### Porosidad (n)

Es entendida como la relación existente entre el volumen de vacíos del suelo respecto a su volumen total, determinando así de forma decimal o porcentual el grado de espacios vacíos del suelo.

$$n = \frac{V_v}{V_m} \quad (\%) \quad (2.1)$$

#### Relación de vacíos (e)

La relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos de un suelo es el grado de arreglo de las partículas del suelo, dándonos la idea de grado de compactación que ha sufrido el suelo.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

#### Grado de saturación(S)

Es el grado en que los vacíos del suelo se encuentran con agua.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (\%) \quad (2.3)$$

### 2.2.1.2 Relación de pesos.

#### Humedad natural ( $\omega$ )

La humedad natural o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como porcentaje, del peso del agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas dadas.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad (\%) \quad (2.4)$$

### 2.2.1.3 Relación de peso y volumen.

#### Peso específico total ( $\Upsilon$ )

El peso específico total se define como la masa del suelo contenida en una unidad de volumen

$$\Upsilon = \frac{W}{V} \quad (\text{gr/cm}^3) \quad (2.5)$$

#### Peso específico seco ( $\Upsilon_d$ )

$$\Upsilon_d = \frac{W_s}{V} \quad (\text{gr/cm}^3) \quad (2.6)$$

#### Peso específico del agua ( $\Upsilon_w$ )

$$\Upsilon_w = \frac{W_w}{V_w} \quad (\text{gr/cm}^3) \quad (2.7)$$

#### Gravedad específico de solidos ( $G_s$ )

La gravedad específica es la relación del peso específico del suelo respecto al peso específico del agua y nos ayuda a comprobar los cálculos de las relaciones de fases

$$G_s = \frac{\Upsilon}{\Upsilon_w} \quad (2.8)$$

Con las ecuaciones del 2.1 al 2.8 se obtiene las características iniciales del suelo e igualmente saber el comportamiento del suelo en términos de peso y volumen cuando este está seco, parcialmente saturado y totalmente saturado.

## **2.2.2 Granulometría.**

El análisis granulométrico comprende todos los métodos para la separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños. De tales métodos existen dos: el análisis mecánico por tamices y el análisis mecánico por hidrometría (Juárez y Rico, 1976).

### **2.2.2.1 Análisis mecánico por tamices.**

Según la norma NTP 339.128(ASTM D 422) el análisis mecánico por tamices se usa para obtener las fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo; generalmente se llega así hasta el tamaño correspondiente a la malla N° 200(0.075 mm).La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas descendentes, hasta el complemento a 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por la malla en cuestión. Así se obtiene un punto de la curva acumulativa correspondiente a cada abertura.

### **2.2.2.2 Análisis mecánico por hidrometría.**

El suelo que queda retenido en los tamices cuya abertura sea superior al tamiz número 200 pueden tener su análisis granulométrico respectivo (pudiéndose identificar claramente el agregado grueso del agregado fino).

Así mismo, según la NTP 339.128(ASTM D 422), también se puede identificar el análisis granulométrico de las fracciones de suelo que superan el tamiz número 200 (0.075mm), con lo cual se puede conocer fácilmente la cantidad tanto de limos como arcillas presentes en el material estudiado.

### 2.2.3 Límites de consistencia.

Atterberg (1911), realizó una serie de experimentos con suelos finos haciendo variar su contenido de humedad, con el objetivo de encontrar la relación que existe entre el contenido de humedad y la consistencia del suelo. Este investigador observó que para ciertos contenidos de humedad el suelo presentaba uno de los cuatro estados distintos de consistencia, que son: sólido, semisólido, plástico y líquido, y de ella se estableció arbitrariamente tres límites para los cuatro estados como se muestra en la figura 2.4.

#### 2.2.3.1 Límite Líquido (L.L)

Es el contenido de humedad requerido para que la muestra, en el aparato de Casagrande cierre una ranura de  $\frac{1}{2}$ " de espesor, a los 25 golpes generados a la cápsula de bronce, con un ritmo de dos golpes por minuto. (Duque y Escobar 2002).

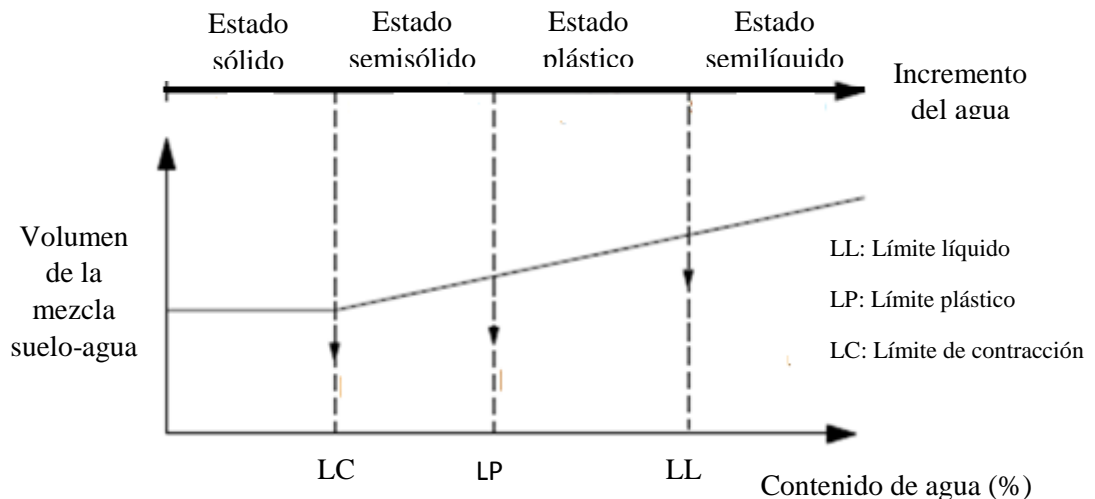


Figura 2.4. Definición de los límites de atterberg (Das, 2013).

### 2.2.3.2 Limite Plástico (L.P)

Es el menor contenido de humedad para el cual el suelo se deja moldear. Esto se dice cuándo, tomando bolas de suelo húmedo, se pueden formar rollitos de 1/8” sobre una superficie plana, lisa y no absorbente. (Duque y Escobar 2002).

### 2.2.3.3 Limite de contracción (L.C)

Se define el límite de contracción como el máximo contenido de agua al cual una reducción en humedad no produce una disminución o aumento en el volumen de la masa de suelo. (Duque y Escobar 2002,).

El límite de contracción se determina mediante una muestra de suelo que contenga un 10% más de humedad correspondiente al límite líquido (suelos plásticos), este se deja en un molde circular, se seca la muestra y se mide el nuevo volumen de la muestra seca, se calcula la diferencia de la humedad de la muestra humedad y la relación de la diferencia de volúmenes respecto al peso de la muestra seca (Fratta, et al, 2007).

En el cuadro 2.1 se muestran valores característicos de los límites de Atterberg para algunos minerales de arcilla comúnmente encontrados en los suelos finos

Cuadro 2.1. Valores de límites de Atterberg para minerales arcillosos (Mitchel y Soga, 2005).

Mineral	LL(%)	LP(%)	LC(%)
Montmorillonita	100-900	50-100	8.5-15
Nontronita	37-72	19-27	
Illita	60-120	35-60	25-29
Caolinita	30-110	25-40	
Halosyta hidratada	50-70	47-60	
Halosyta deshidratada	35-55	30-45	
Atalpigita	160-230	100-120	
Clorita	44-37	36-40	

### 2.2.4 Actividad.

Basándose en los límites de Atterberg, Skempton (1953) definió lo que llamó actividad (A) de los suelos arcillosos tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{IP}{\text{Fracción de arcilla}(\% < 2\mu\text{m})} \quad (2.9)$$

Dónde:

IP=es el índice de plasticidad y la fracción de arcilla que pasa en porcentaje del tamaño menores a 2 $\mu\text{m}$ (0.002 m), se obtiene del análisis de granulometría por sedimentación de acuerdo a la norma técnica peruana NTP 339.128.

Cuadro 2.2. Actividad de las arcillas (Duque y Escobar, 2016).

Grupo de arcilla	Actividad (Skempton-1953)	IP(%)	LL(%)
Montmorillonita	0.5-7.2	>50	Tixotrópico
Illita	0.3-0.9	33-50	60-90
Caolinita	0.1-0.4	1--40	30-75

La actividad de las arcillas(A) es necesario para clasificar un suelo arcillosos y mediante ella identificar sus propiedades y poder realizar la clasificación de la arcilla y a que grupo pertenece según se indica en el cuadro 2.2, la mayoría de las arcillas son tixotropicas<sup>1</sup> en mayor o menor grado de acuerdo a su límite líquido.

<sup>1</sup>Tixotrópicas: Es una propiedad específicamente de algunos fluidos, y consiste en que estos pierden su resistencia, o disminuyen su viscosidad al someterlos a una fuerza cortante a medida que pasa el tiempo.

## 2.3 Introducción a los Suelos no saturados

### 2.3.1 Generalidades

El desarrollo de la mecánica de suelos no saturados comenzó alrededor de dos o tres décadas después del comienzo del estudio de la mecánica del suelo para suelos saturados. Los principios básicos relacionados con la comprensión de la mecánica del suelo no saturado se formularon principalmente en la década de 1970 (Getahun, 2010). El desarrollo de la mecánica clásica del suelo ha llevado a dar mayor énfasis en tipos de suelos particulares como son arenas saturadas, limos y arcillas, y arenas secas. El campo general de la mecánica del suelo se puede subdividir en la parte que trata con los suelos saturados y la parte que trata con los suelos no saturados (Figura 2.5)

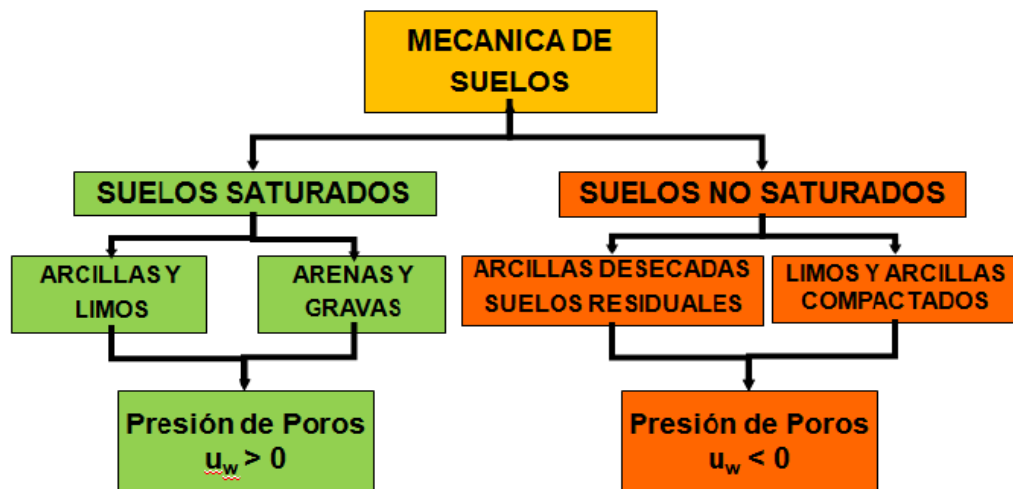


Figura 2.5 División de la mecánica de suelos (Zeballos ,2004).

La diferenciación entre suelos saturados y no saturados se vuelve necesaria debido a las diferencias básicas en su naturaleza y comportamiento de ingeniería. Un suelo no saturado tiene más de dos fases, y la presión del agua intersticial es negativa en relación con la presión del aire poroso. Cualquier suelo cerca de la superficie del suelo, presente en un ambiente relativamente seco, estará sujeto a presiones negativas

de poro-agua y posible desaturación. Los suelos no saturados recientemente han ganado amplia atención en muchos estudios y trabajos de construcción en todo el mundo, ya que muchos suelos cerca de la superficie del suelo se consideran no saturados y también los suelos compactados que comprenden los muchos terraplenes construidos en todo el mundo se consideran más apropiadamente de suelos no saturados. (Atkinson & Bransby, 1989). La mecánica clásica del suelo y la ingeniería geotécnica a menudo se han enseñado con la suposición de que el suelo está seco y saturado (Fredlund & Rahardjo, 1993). El comportamiento del suelo se rige únicamente por el principio de esfuerzo efectivo de Terzaghi (Terzaghi, 1936). De hecho, los estados secos y saturados son solo dos extremos y limitan las condiciones de un suelo. En otras palabras, las condiciones secas y saturadas son solo dos casos especiales de un suelo no saturado que tiene un grado de saturación que se encuentra entre 0 y 100 por ciento.

Sin embargo, en muchos problemas de ingeniería, un suelo a menudo no está saturado ni seco. Relativamente, se han realizado investigaciones limitadas en suelos no saturados. Claramente, hay una necesidad urgente de mejorar la comprensión del comportamiento y la mecánica de un suelo no saturado (Charles & Menzies, 2007). Como se mencionó líneas arriba, por conveniencia, el campo general de la mecánica clásica del suelo a menudo se subdivide en parte que trata con suelos saturados y la parte que trata con suelos no saturados. Aunque esto puede demostrarse que la división artificial entre suelos saturados y no saturados es innecesaria, puede ser útil para hacer uso de los conocimientos adquiridos de los suelos saturados como referencia y luego extenderlo al mundo no saturado más amplio como se muestra en la Figura 2.6, que proporciona una ayuda visual para el mundo generalizado de la mecánica del suelo.

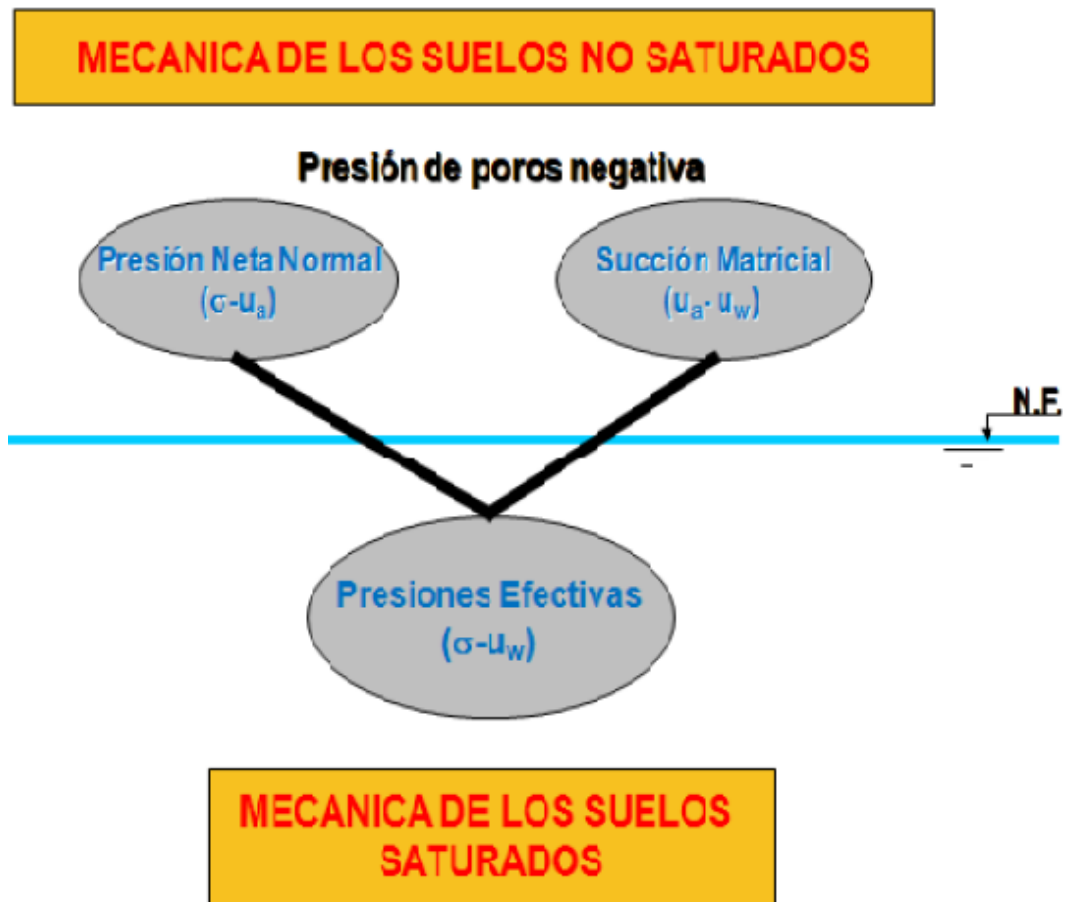


Figura 2.6 Visualización de la mecánica de suelo (Charles & Menzies ,2007).

Para simplificar, este mundo del suelo la mecánica está dividida por el nivel freático. Debajo del nivel freático, el comportamiento del suelo se rige por esfuerzo efectivo ( $\sigma - u_w$ ) mientras que el suelo no saturado por encima del nivel freático está gobernado por dos variables de esfuerzos independientes, esfuerzo neto normal ( $\sigma - u_w$ ) y succión matricial o mátrica ( $u_a - u_w$ ) (Fredlund & Morgenstern, 1977).

### 2.3.2 Influencia del clima en suelos no saturados.

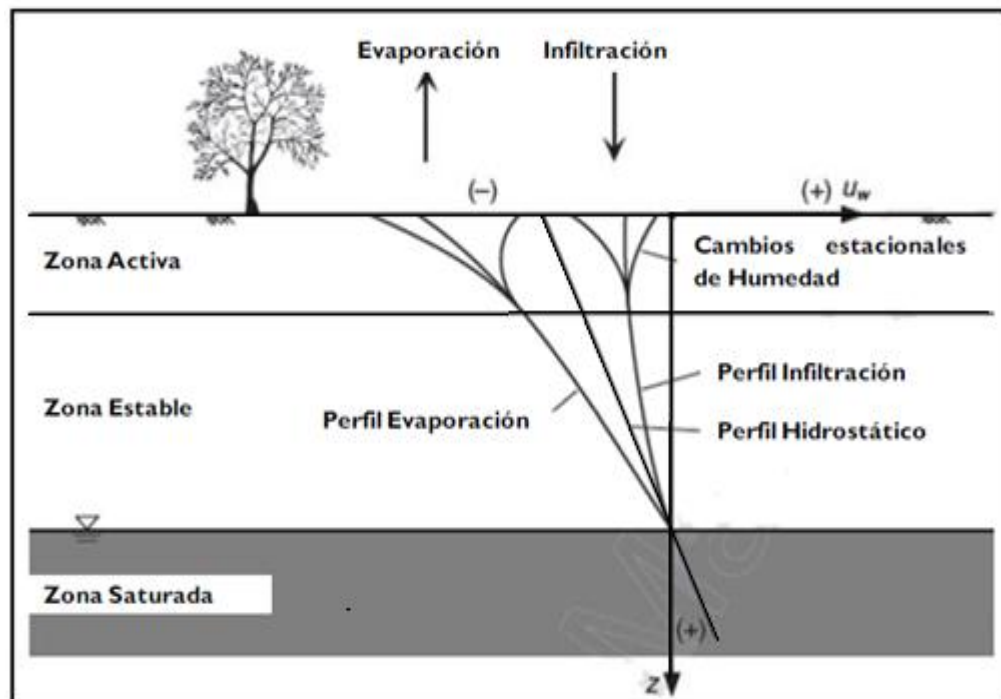
El clima juega un papel importante en, si un suelo está saturado y no saturado. El agua se elimina del suelo ya sea por evaporación de la superficie del suelo o por evapotranspiración de una cubierta vegetal. Estos procesos producen un flujo ascendente de agua fuera del suelo. Por otro lado, la lluvia y otras formas de

precipitación proporcionan un flujo descendente en el suelo. Un flujo neto hacia arriba produce un secado gradual, agrietamiento y desecación de la masa del suelo, mientras que un flujo neto descendente finalmente satura la masa del suelo (Charles & Menzies ,2007).

Las áreas significativas de la superficie de la tierra se clasifican como zonas áridas, la evaporación anual de la superficie del suelo en estas regiones excede la precipitación anual, que alrededor del 33% de la superficie de la tierra se considera árida y semiárida (Dregne, 1976) como es el caso de la zona de estudio para esta tesis en Mayocc-Huancavelica. Árido y las áreas semiáridas generalmente tienen una capa freática profunda. Los suelos ubicados sobre el nivel freático son desaturado debido a la evaporación y evapotranspiración excesivas y tienen presiones de poros negativos. El clima tiene un posible efecto adicional sobre las propiedades de los suelos residuales, tropicales, incluso en áreas tropicales subhúmedas, los niveles freáticos suelen ser más profundos de 5 a 10 metros y los efectos de la no saturación como la desecación y el rehumedecimiento estacional deben tomarse en cuenta en el diseño geotécnico (Blight,1997).

Estos cambios estacionales ocurren en los suelos existentes por encima del nivel freático, en la zona más próxima a la superficie, en donde experimentan procesos de humedecimiento y secado en períodos relativamente cortos, que ocasionan a su vez, variaciones importantes en los valores de humedad natural del suelo. En general, estos suelos se encuentran en condición parcialmente saturada. En el perfil de estos suelos se puede identificar dos zonas bien definidas: una zona activa, la cual corresponde a la máxima profundidad en donde se observan fluctuaciones estacionales de humedad (épocas de invierno y verano), que a su vez generan cambios en la succión del suelo;

y una zona estable, en donde los cambios de succión son independientes del tiempo y están controlados por factores tales como el tipo de suelo, la velocidad de recarga estacional, la topografía del terreno, y la localización del nivel freático(Lu y Likos,2004)



*Figura 2.7* Modelo conceptual del perfil de variación de la succión con la profundidad en suelos no saturados (Lu y Likos ,2004).

Muchos suelos muestran hinchazón o expansión extrema cuando se mojan. Otros suelos son conocidos por su pérdida significativa de resistencia al corte al humedecerse. Cambios en las presiones negativas de poro-agua asociados con fuertes lluvias son la causa de numerosas fallas de taludes. Reducciones en la capacidad de carga y el módulo elástico de los suelos también están asociados con aumentos en las presiones de agua subterránea. Estos fenómenos indican el importante papel que las presiones negativas del agua intersticial juegan en el control del comportamiento mecánico de los suelos no saturados (Fredlund & Rahardjo ,1993).

### **2.3.3 Influencia de la vegetación en suelos no saturados.**

Beltrán(1979) hace referencia en arboles ornamentales traídos de regiones donde las condiciones ambientales son totalmente diferentes, tales como arboles originarios de Asia, Australia y Europa, entre los cuales podemos encontrar el sauce, el eucalipto, el pino y entre otros; donde sus regiones de origen son secas y suelos con altos contenidos de arenas, al llegar a Sudamérica encuentran un ambiente totalmente húmedo y una extensa capa vegetal con estratos de arcilla, este ambiente es totalmente propicio para que las especies traídas presenten un rápido crecimiento; estos árboles consumen 450 litros al día, obteniendo esta cantidad de agua a través de sus raíces, las cuales aplican succiones de 1500 kPa para la obtención del agua. Un problema que encuentra los árboles, para la obtención del agua, son materiales impermeables, tales como el pavimento, edificaciones o colectores de aguas lluvias; obligando al árbol a extender sus raíces y extraer la máxima cantidad de agua posible del suelo, esto genera desecaciones y cambios volumétricos del suelo. Los movimientos de estas raíces han creado problemas como hundimientos locales, fallas en el pavimento y cambios en el comportamiento del suelo.

### **2.3.4 Perfiles típicos de suelos no saturados.**

Las condiciones microclimáticas en un área son los principales factores que causan que un depósito de suelo sea no saturado. Por lo tanto, suelos no saturados o suelos con presiones negativas de poro pueden ocurrir en prácticamente cualquier depósito geológico, como suelo residual, un depósito lacustre y suelos en zonas áridas y semiáridas con capas freáticas profundas (Fredlund & Rahardjo ,1993). Como resultado de los procesos físicos y químicos de intemperismo controlados en gran medida por factores ambientales en la superficie del suelo, la roca madre se erosiona

con un perfil de suelo residual de distintos horizontes y composición química (Lu & Likos, 2004).

La mayoría de los conceptos clásicos relacionados con las propiedades del suelo y el comportamiento del suelo se han desarrollado para suelos de zonas templadas y ha habido dificultades para modelar con precisión los procedimientos y condiciones a los que se someterán los suelos residuales. Los ingenieros parecen estar reconociendo lentamente que los suelos residuales son generalmente suelos con presiones negativas “in situ” de agua intersticial y que gran parte del comportamiento inusual exhibido durante las pruebas de laboratorio se relaciona con un cambio de succión matricial en el suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993). Existe la necesidad de un diseño de ingeniería confiable asociado con los suelos residuales. Cuando el grado de saturación de un suelo es mayor de aproximadamente 85%, se pueden aplicar principios de mecánica de suelo saturado. Sin embargo, cuando el grado de saturación es inferior al 85%, se hace necesario aplicar principios de mecánica del suelo no saturados (Thamer et al, 2006).

### **2.3.5 Suelos no saturados en la práctica**

Los suelos no saturados fueron ignorados en el diseño de ingeniería civil y en los análisis de construcción o fueron abordados inapropiadamente desde el marco tradicional de la mecánica de suelos saturados. Los primeros cincuenta años de la historia de la mecánica del suelo se han centrado principalmente en los suelos saturados de agua y la mayoría de los principios de la mecánica del suelo desarrollados en ese período se aplican únicamente a los suelos saturados. Esta deficiencia es en realidad una de las principales fuerzas motrices para el tema emergente de la mecánica del suelo no saturado. Otra fuerza impulsora importante se debe a las distintas características de

volumen, resistencia y flujo de ciertos suelos cuando se vuelven no saturados con agua (Sheng et al, s.f). El rápido avance en nuestra comprensión del comportamiento del suelo no saturado durante los últimos 40 a 50 años, sin embargo, ha llevado al ingeniero civil de hoy en día a darse cuenta de que ahora hay una oportunidad de abordar los problemas que involucran los suelos no saturados sobre una base mucho más. La expansión de la base de conocimientos sobre los principios fundamentales de la mecánica del suelo no saturada se está incorporando cada vez más en una amplia gama de problemas prácticos de ingeniería (Mitchell & Sitar, 1982).

### **2.3.6 Fases de los suelos no saturados.**

El suelo no saturado es un sistema multifásico compuesto por tres fases de la materia: gas, líquido y sólido. La fase gaseosa generalmente está limitada por el espacio de poro no ocupado por el líquido. La materia dentro de este espacio de poro puede ser cualquier gas, vapor o combinación de los mismos. La fase líquida generalmente está limitada por el espacio de poro no ocupado por el gas. Compuesta por el agua almacenada en los poros, químicamente esta agua se puede clasificar en tres tipos: el agua higroscópica, adsorbida en la partícula o formando parte de la doble capa difusa, que no puede ser separada por acciones hidrodinámicas; el agua capilar, condicionada por la fuerzas capilares del suelo; y el agua libre gravitacional, que puede ser separada en condiciones de drenaje libre por gravedad. La fase sólida consiste en los granos o partículas del suelo y puede variar desde materiales de grano relativamente fino como limos y arcillas, hasta material orgánico, hasta materiales de grano relativamente grueso como arena o grava (Lu & Likos, 2004). Estudios han demostrado que existen interacciones entre las fases líquidas y gaseosas, donde se

relacionan la presión de vapor y la presión del líquido en estado de equilibrio. Ver figura 2.8

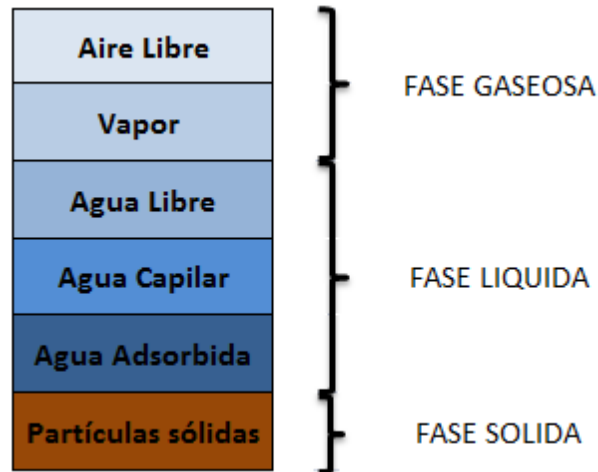


Figura 2.8 Fases de un suelo no saturado (Yoshimi & Osterberg ,1963).

## 2.4 Mecánica de suelos no saturados

### 2.4.1 Succión del suelo

La succión es una propiedad física característica de los suelos no saturados. La misma que describe el potencial con el cual un suelo, con una estructuración y contenido de humedad determinado, adsorbe y retiene agua en los poros. La succión total del suelo se define conceptualmente como la capacidad del suelo no saturado para atraer o retener agua (o cualquier líquido) y se expresa en términos de presión (por ejemplo, KPa). Termodinámicamente, la succión del suelo cuantifica el potencial del agua intersticial del suelo en relación con la referencia potencial de agua libre. El agua libre se define como aquella que no contiene solutos disueltos, no tiene interacción con las otras fases que definen la curvatura en la interface aire-agua, y no posee otras fuerzas externas más que la gravedad. Si la gravedad, la temperatura y los efectos de inercia se descuidan, los mecanismos responsables de la succión del suelo son la

capilaridad, la adsorción de corto alcance y efectos osmóticos. Mientras que los dos últimos mecanismos pueden ocurrir bajo condiciones saturadas o en condiciones no saturadas, el mecanismo de capilaridad es exclusivo del suelo no saturado. (Lu & Likos, 2004).

La mayoría de los materiales porosos tienen una fundamental habilidad para retener y liberar agua, la existencia de esta propiedad en los suelos se describe en términos de ingeniería como succión, esfuerzos negativos en el agua de poro. (Beltrán, 2009).

Según (Bonsch & Lempp, 2007) debido a la interacción entre las fases sólidas, líquidas y gaseosas se presentan fuerzas adicionales en sistemas de poros no saturados. Un suelo no saturado tiene la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación, si el suelo tiene determinado grado de saturación se requiere cierta fuerza para remover el agua del espacio poroso y disminuir el grado de saturación del suelo, estos efectos se pueden explicar mediante la succión, el cual consiste en dos partes, la capilar y la adsorbente. La capilar depende de la distribución y tamaño de poro, la parte adsorbente está en función de la composición mineralógica de la parte sólida así como también de la composición química del líquido.

El término succión o potencial de agua designa a la integrante del estado de esfuerzo que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Sin su participación resulta imposible definir el estado de esfuerzo y entender la respuesta deformacional de un suelo no saturado. Para Blight (1965), el efecto de la succión en un suelo no saturado es equivalente al de la presión exterior aplicada

La succión total, cuantitativamente, se considera la suma algebraica de la succión matricial y la succión osmótica:

$$\Psi_t = \Psi + \Psi_o \quad (2.10)$$

Dónde:

$\Psi_t$  : es la succión total (KPa);  $\Psi_o$  : es la succión osmótica (KPa); y  $\Psi$ : es la succión matricial (KPa). La succión matricial se expresa como la diferencia entre las presiones del aire poroso y del agua intersticial:

$$\Psi = u_a - u_w \quad (2.11)$$

Dónde:

$u_a$  : es la presión del aire poroso, y  $u_w$ : es la presión del agua intersticial.

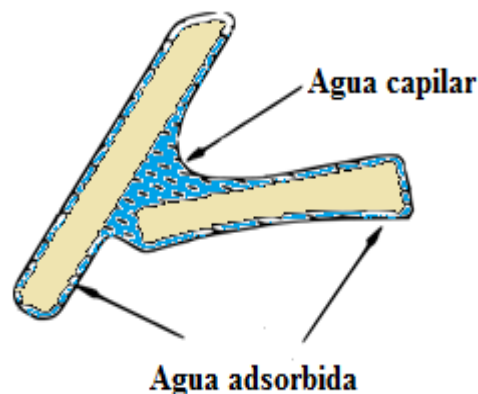
Los efectos de la capilaridad y los mecanismos de adsorción de corto alcance se combinan para formar la succión matricial, mientras que la presencia de solutos disueltos forma la succión osmótica. Por lo tanto, succión matricial y la succión osmótica se origina a partir de efectos de interacción física y efectos de interacción química, respectivamente.

#### **2.4.1.1 Succión matricial ( $\Psi$ ).**

Cuando el agua del suelo se encuentra bajo presión hidrostática mayor que la atmosférica, se considera que su potencial de presión es positivo. Cuando la presión hidrostática es menor que la atmosférica el potencial de presión es negativo. Este potencial de presión negativo se denomina “potencial matricial” o “succión matricial”,

la cual resulta de las fuerzas capilares y de absorción debido a la matriz del suelo. (Beltrán, 2009).

La presencia de agua adsorbida y la formación de los meniscos cóncavos son muy importante en suelos arcillosos y en altas succiones. La succión matricial es consecuencia, en general, tanto del fenómeno capilar como de la adsorción. Estos dos mecanismos (Figura 2.9) no pueden separarse fácilmente; además uno con el otro se encuentran en equilibrio interno y no puede cambiarse uno sin afectar al otro. Para Pousada (1984) definió a la succión matricial ( $u_a - u_w$ ) como la diferencia entre la presión de aire de poros y la presión de agua de poros, Ésta depende de los efectos capilares del agua (tensión superficial y el radio de curvatura del menisco) y de las fuerzas de adsorción (los campos de fuerzas eléctricas y las fuerzas de van der Waals). La succión matricial es ejercida en las partículas sólidas que forman la estructura del suelo denominada “matriz”.



*Figura 2.9* Agua en un suelo no saturado, sujeta a la capilaridad y a la adsorción, que en combinación producen la succión matricial (Pousada, 1984).

#### 2.4.1.2 Succión osmótica ( $\Psi_o$ ).

La presencia de sales en el agua del suelo afecta sus propiedades termodinámicas y disminuye su energía potencial. En particular las sales bajan la

presión de vapor del agua del suelo. Esto no puede afectar el flujo del líquido en forma significativa, lo que nos lleva a que si se tiene una membrana o barrera de difusión, se transmite más fácilmente agua que sales. El efecto osmótico es importante en la interacción entre las raíces de las plantas y el suelo, así como en el proceso que involucra la difusión de vapor. (Beltrán 2009).

#### 2.4.2 Curva característica del suelo

Una de las relaciones constitutivas más importantes y fundamentales en la mecánica del suelo no saturado es la relación entre la succión matricial y el grado de saturación (o contenido de humedad). Esta relación se denomina curva característica de humedad del suelo o curva de retención de humedad del suelo, cuya representación esquemática se muestra en la Figura 2.10.

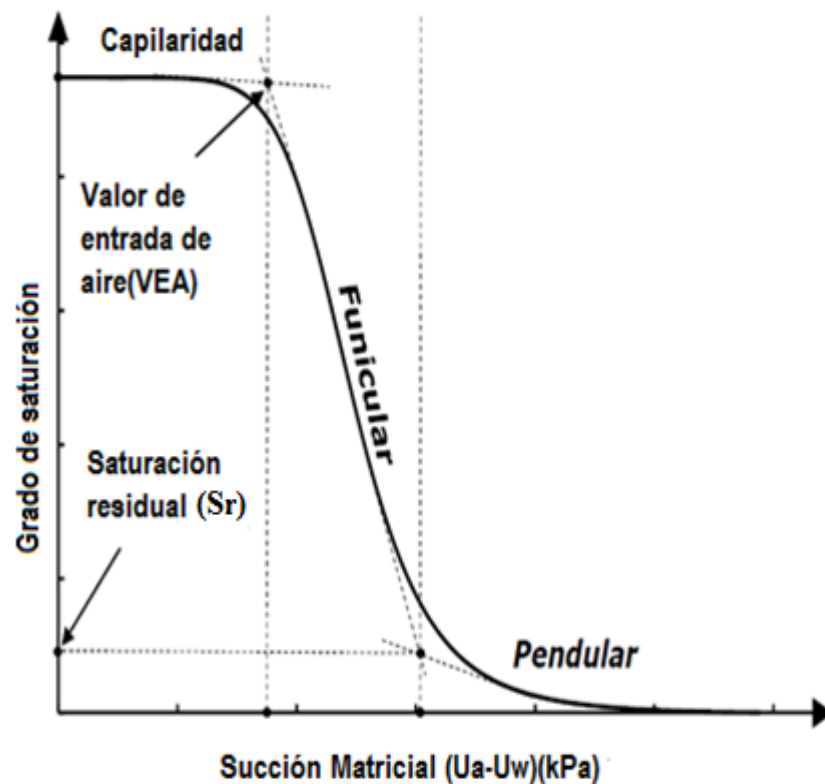
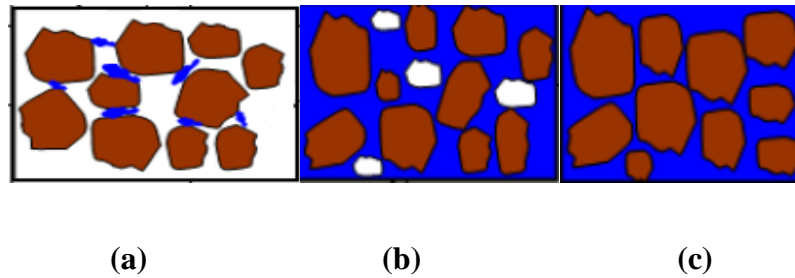


Figura 2.10 Curva característica típica con tres estados de saturación y los dos puntos de inflexión (VEA y  $S_r$ ) (Cho & Santamarina, 2001).

Considere un medio de suelo completamente saturado sometido a un ciclo de secado (evaporación o drenaje). A medida que comienza el drenaje, se dice que el medio del suelo está en estado capilar (zona capilar), cuando la presión del líquido se vuelve más baja que la presión del aire y la succión matricial se vuelve positiva. Más allá del estado capilar, la succión matricial aumenta rápidamente a medida que los meniscos líquidos en los límites se tiran hacia adentro debido a la evaporación o el drenaje. En un valor particular de succión, la fase de aire se rompe en el medio del suelo y se describe como el valor de entrada de aire (VEA) o presión burbujeante. VEA es inversamente proporcional al tamaño de poro, por lo tanto, más finas las partículas, más alto es el VEA. VEA generalmente ocurre a niveles de saturación de 90% (Cho & Santamarina, 2001). A medida que la fase del aire comienza a entrar en los medios del suelo, se produce un estado de no saturación las alambiques líquidos establecidos pero porosos forman una fase continua. Este es el estado funicular (zona de desaturación), como el contenido líquido disminuye, la presión de succión aumenta gradualmente, siguiendo un proceso casi lineal tendencia. En un punto, cuando la mayoría de los huecos están llenos de aire, y el resto del líquido forma una película delgada alrededor de los puntos de contacto entre partículas de suelo adyacentes, se dice que el sistema alcanza el estado pendular (zona residual). En el estado pendular, un pequeño cambio del contenido líquido da como resultado un cambio relativamente grande en la succión matricial, incluso a valores muy altos de succión matricial, alguna cantidad de líquido presente en forma de películas muy delgadas alrededor de las partículas del suelo o adsorbida en superficie de las partículas del suelo. Esto se describe como saturación residual. La figura 2.11 muestra una representación esquemática de los tres estados de saturación en suelos no saturados.



*Figura 2.11 Estados de saturación en suelos no saturados. (a) Estado pendular (zona residual) (b) Estado Funicular (zona de desaturación) (c) Estado capilar (Schubert et al, 1975).*

La curva característica, es representada en un gráfico semilogarítmico de succión y humedad(o grado de saturación) comprendida entre cero y la saturación, puede aproximarse mediante una función lineal en tramos. Estos segmentos lineales incluyen; un primer tramo comprendido entre  $1 \times 10^6$  y  $1 \times 10^4$  kPa denominado zona pendular o zona residual, otro entre  $1 \times 10^4$  y 100 kPa designado como zona funicular o zona de desaturación, y un tercer tramo que se extiende de 100 a 0 kPa que corresponde a la zona capilar. (Mcqueen & Miller, 1974).

La curva característica suelo agua define la relación entre contenido de humedad y succión del suelo en suelos saturados y no saturados. El contenido de humedad del suelo puede ser expresado de las tres maneras siguientes: contenido de agua gravimétrico ( $w$ ), contenido de agua volumétrico (porosidad) ( $\theta_w$ ), o grado de saturación ( $S$ ). Esta relación también representa la capacidad de un suelo por retener agua bajo un cierto valor de succión aplicada. (Pérez ,2006).

En la Figura 2.12 se ilustran tres curvas características suelo-agua típico, estas corresponden a una arena, un limo y una arcilla, se puede apreciar la tendencia de cada tipo de material.

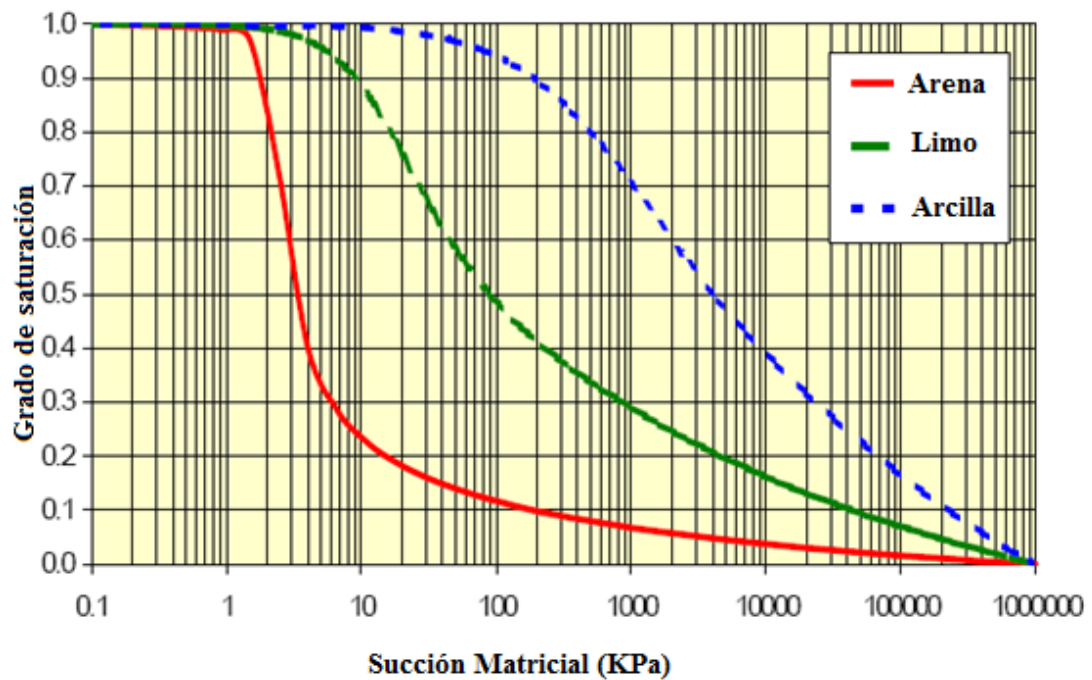


Figura 2.12 Curva característica típica para arena, limo y arcilla (Lu y Likus, 2004).

La curva característica es de naturaleza histerética y hay una diferencia pronunciada entre el humedecimiento y el desecamiento (desechado o secado) Para el mismo nivel de saturación, el suelo en el ciclo de secado tiene una mayor succión en comparación con el suelo en el ciclo de humedecimiento. Este efecto se muestra en la Figura 2.13. Como se discutió antes, el ciclo de secado comienza desde el estado completamente saturado hasta el estado de la saturación residual. Todos las tres zonas de saturación se pueden definir claramente por VEA y saturación residual. En el ciclo de humedecimiento, la curva característica comienza desde el estado seco y el suelo se humedece hasta la saturación total. A estados de saturación más altos, la fase de aire se vuelve discontinua y muchas burbujas de aire ocluidas se pueden encontrar entre las fases líquidas continuas. Como resultado, la determinación de la parte superior límite de saturación del estado funicular (zona de desaturación) se vuelve difícil y la relación

entre la succión matricial y el grado de saturación no se puede definir para un rango completo de saturación (Fredlund & Rahardjo 1993).

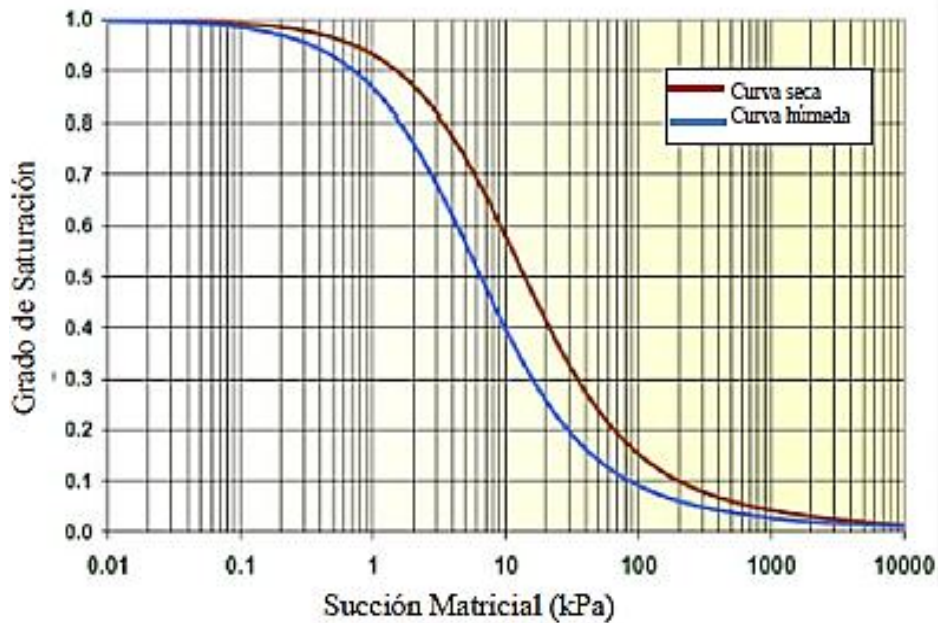


Figura 2.13 Histéresis en la curva característica (Lu y Likus, 2004).

Para expresar la cantidad de agua que tiene un suelo en función de la fuerza con la que está retenida se utiliza la curva característica (Figura 2.10). Esta relación es importante ya que el comportamiento del suelo depende en gran medida de la fuerza con la que el agua está retenida a las partículas. La forma de la curva refleja en gran medida una serie de características del suelo, como pueden ser, la granulometría, el tipo de suelo, la porosidad, la plasticidad, etc. (Aiassa, 2008). Esta relación se utiliza con frecuencia en la mecánica de suelos no saturados con diferentes propósitos. Por ejemplo, cuando se requiere predecir la resistencia al esfuerzo cortante de suelos no saturados, al modelar problemas geotécnicos como infiltración, problemas de estabilidad de taludes y resistencia al corte.

La succión utilizada para determinar la curva característica suelo-agua es la succión matricial aunque la succión total es ocasionalmente utilizada también, debido que la succión osmótica no contribuye significativamente a la resistencia al corte, al contrario dichas resistencias disminuyen al aumentar está componente a la succión.

### 2.4.3 Capilaridad y tensión superficial

Un modo muy conveniente para visualizar el fenómeno capilar en un suelo no saturado es colocar agua en un tubo capilar dentro de un contenedor de agua (fase de agua), el agua sube el tubo hasta que las fuerzas capilares y las fuerzas gravitacionales estén en equilibrio. Esto resulta en una formación de interfaz curvo aire-agua. El aumento capilar es proporcional a la tensión superficial del agua, coseno del ángulo de contacto e inverso del radio del tubo capilar. La diferencia de presión justo debajo de la interfaz aire-agua mostrada en la figura 2.14 viene dada por (Bear, 1972):

$$P_c = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos\alpha}{R} \quad (2.12)$$

Dónde:

$P_c$  : es la presión capilar;  $T_s$  es la tensión superficial del agua;  $\alpha$  es el ángulo de contacto; y  $R$  es el radio de curvatura del menisco capilar formado en la interfaz aire-agua.

Cuando  $R \rightarrow \infty$ ,  $u_a = u_w$  lo que significa que no hay diferencia de presión en el interfaz aire-agua y la interfaz es plana. Si se considera la condición atmosférica,  $u_a = 0$  y la presión capilar llega a ser igual a la presión negativa del agua intersticial, es decir,

$$P_c = -u_w$$

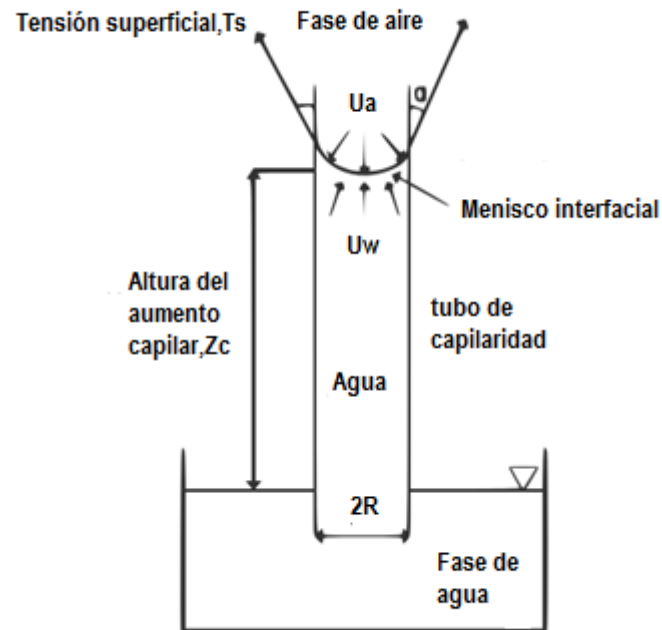


Figura 2.14 Diagrama de cuerpo libre del menisco capilar formado en la interfaz aire- agua en un tubo capilar. (Bear, 1972).

En un sistema trifásico de suelo no saturado, equilibrio mecánico de la interfaz aire-agua se mantiene por la presión del aire poroso, la presión del agua intersticial y la tensión superficial del agua fase. La tensión superficial de la fase de aire puede ignorarse prácticamente. Una interfaz curvada aire-agua es una indicación de diferencia de presión entre las dos fases. Por lo general, la fase con menor presión tiende a expandirse dando como resultado una interfaz cóncava hacia el lado de mayor presión. Este cambio en la geometría de la interfaz lo induce la tensión superficial, que en última instancia mantiene el equilibrio. En la mayoría de las circunstancias prácticas, para el suelo no saturado, el lado cóncavo es asociado con la fase de aire ya que la presión del agua del poro es menor que la presión del aire del poro. El modelo de tubo capilar proporciona una conceptualización útil de la presión capilar en suelos no saturados. Sin embargo, el modelo y las ecuaciones anteriores pueden no estar

directamente aplicado a suelo real, debido a la compleja geometría de los poros y su distribución.

#### 2.4.4 Metodologías para determinar la succión.

Los métodos utilizados para determinar la succión en suelos, pueden ser directos e indirectos; estos dependen del tipo de técnica que se utilice, energética o termodinámica. Los métodos directos utilizan la técnica de traslación de ejes; con ésta técnica sólo se determina la succión matricial, mientras que los métodos indirectos utilizan la técnica termodinámica; en ésta se pueden determinar tanto la succión matricial como la succión total. Para esta tesis se usara el método indirecto (el método del papel filtro). En el cuadro 2.3 se muestran los dispositivos para determinar la succión tanto directa como indirecta y del cual definiremos algunas en el siguiente apartado.

Cuadro 2.3. Dispositivos para determinar la succión total y matricial (Lu y Likos, 2004).

<b>SUCCIÓN A MEDIR</b>	<b>TECNICA/SENSOR</b>	<b>RANGO SUCCIÓN PRÁCTICA (KPa)</b>	<b>LAB/CAMPO</b>
<b>SUCCIÓN MATRICIAL</b>	Tensiómetro	0-100	Lab y Campo
	Ejes trasladados	0-1500	Lab
	Sensores de conductividad térmica y eléctrica	0-400	Lab y Campo
	Papel filtro de contacto	0-1000000	Lab y Campo

<b>SUCCIÓN TOTAL</b>	Psicómetro	100-8000	Lab y Campo
	Higrómetros	1000-450000	Lab
	Sensores de capacitancia	0-1000000	Lab
	Control de humedad Isopiéstica	10000-600000	Lab
	Control de humedad a dos presiones	10000-600000	Lab
	Papel filtro sin contacto	1000-500000	Lab y Campo

#### 2.4.4.1 Tensiómetros

El tensiómetro es un equipo que mide directamente la tensión (succión) del agua que se encuentra adherida a las partículas de suelo. El concepto de tensión ha sido ampliamente usado en agricultura, ya que este valor proporciona información sobre el esfuerzo que realizan las raíces de las plantas para extraer el agua que necesitan para sobrevivir. Una vez que la tensión en el agua es muy alta (suelo muy seco en donde las fuerzas de agarre entre partículas de suelo y agua son muy altas), las plantas no pueden extraer el líquido del suelo y alcanzan lo que se llama “punto de marchitamiento”. Asimismo, también se puede determinar cuándo deberá de regarse cierto cultivo y la cantidad de agua necesaria.

En ingeniería geotécnica, este equipo se utiliza para medir la tensión del agua en el suelo para relacionarla con otras propiedades como son la resistencia al esfuerzo cortante, la permeabilidad, la compresibilidad. Cuando se coloca un tensiómetro en un

suelo parcialmente saturado, el suelo extrae el agua del tensiómetro produciendo un vacío que queda reflejado en un manómetro. Cuanto más seco esté el suelo, mayor será el valor registrado por el manómetro. Cuando el suelo está saturado, los poros del suelo se encuentra llenos de agua, las presiones del agua son positivas y el agua puede moverse libremente, sin embargo, cuando el contenido de agua de los poros disminuye (por evaporación o algún otro fenómeno), los vacíos comienzan a ser ocupados por aire y el suelo cambia a una condición de saturación parcial. A medida que el suelo cambia su condición de saturado a parcialmente saturado, la fuerza con la que el agua es atraída a las partículas de suelo es mucho mayor, por lo tanto, la fuerza requerida para remover el agua de la partículas se incrementa.

El tensiómetro está compuesto por una copa de cerámica colocada en el extremo inferior, un tubo de almacenamiento de agua, un manómetro y el tapón. La copa de cerámica regula el flujo de agua hacia adentro o fuera del tensiómetro; dicho flujo se equilibra con la tensión del agua del suelo. El tubo de almacenamiento mantiene el agua necesaria para la operación del tensiómetro y el tapón permite que la tensión del agua se mantenga dentro del tensiómetro. Finalmente, el manómetro es el que mide la tensión del agua (Figura 2.15).

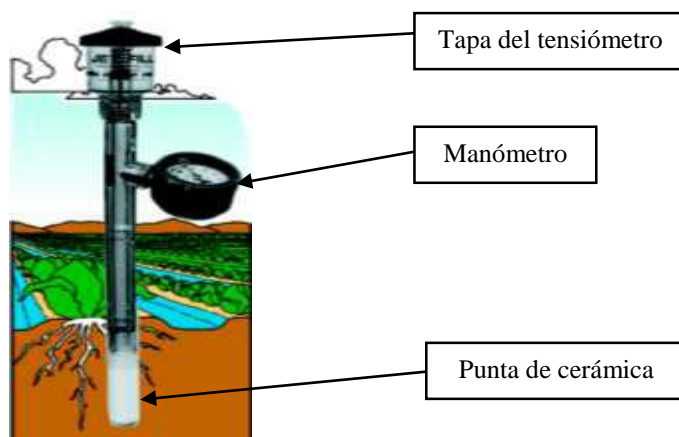


Figura 2.15 Tensiómetro ([www.agua.uji.es/pdf/presentacionHQ5.pdf](http://www.agua.uji.es/pdf/presentacionHQ5.pdf))

En ingeniería geotécnica, el rango de medición de los tensiómetros no es el adecuado, ya que generalmente los niveles de succión que se encuentran en el campo son mayores a los que se pueden medir con este instrumento.

#### 2.4.4.2 Técnicas de traslación de ejes

La técnica de traslación de ejes es método directo y se fundamenta en la técnica desarrollada por Hilf en 1956, en donde el concepto de succión matricial se define como la sobrepresión de aire respecto a la presión de agua. Esta técnica considera que al aplicar incrementos de presión sobre la fase gaseosa, se inducen incrementos idénticos sobre la fase líquida y de esta manera se pueden medir presiones de agua positivas (Fredlund y Rahardjo, 1993 y Lu y Likos, 2004).

En la técnica de traslación de ejes se separan las fases de aire y de agua del suelo por medio de los poros diminutos del disco de cerámica, siempre y cuando la presión aplicada no exceda el valor de entrada de aire del disco de cerámica (Lu y Likos, 2004). La Figura 2.16 muestra la sección transversal de un espécimen de suelo no saturado que está colocado sobre el disco de cerámica saturado.

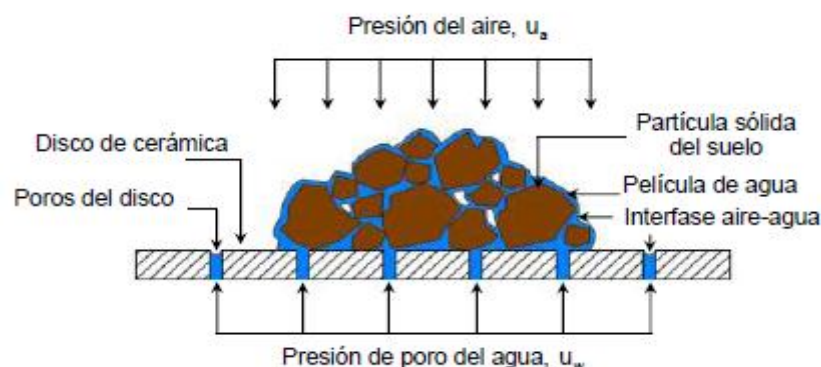


Figura 2.16 Esquema de la sección transversal de la interfase suelo no saturado-disco de cerámica. Medición de la succión matricial por medio de la técnica de traslación de ejes (Lu y Likus, 2004).

Durante la aplicación de la técnica de translación de ejes pueden presentarse los tres casos siguientes:

- El agua fluye de la muestra hacia el compartimento de la celda hasta que se presenta el equilibrio. En este caso la succión que presenta la muestra es inferior a la impuesta
- El agua fluye del compartimento hacia la muestra hasta lograr el equilibrio. Esto indica que la succión de la muestra es superior a la impuesta.
- El agua no fluye en ningún sentido, lo cual indica que la succión impuesta y la que se tiene en la muestra son las mismas.

Se establece que el tiempo de equilibrio al imponer la succión con esta técnica se logra en algunos días y depende de factores tales como:

- El espesor del disco de cerámica o membrana y su permeabilidad
- Grado de saturación del suelo
- La conductividad del agua en el suelo, y
- El contacto entre el suelo y el disco de cerámica

Esta técnica es utilizada por todas las celdas de presión, ya sea las que usan disco de alto valor de entrada de aire o las de membrana.

#### **2.4.4.3 Sensor de conductividad térmica**

Es un método indirecto para medir la succión, e indica que la energía térmica contenida en el agua de un bloque poroso puede determinarse a partir de sus propiedades térmicas (la conductividad térmica, la capacidad calorífica y la difusividad térmica). Además, definen a la conductividad térmica en un suelo como la cantidad de

calor que se transfiere a través de un área de sección transversal unitaria por unidad de tiempo bajo un gradiente de temperatura (Fredlund y Rahardjo ,1993).

Cuando el suelo tiene bajos contenidos de agua (estado seco) la transferencia de calor se produce a través de las partículas sólidas del suelo por medio del agua adsorbida, ya que alrededor de ellos existe un espacio vacío de aire y a medida que aumenta el contenido de agua, las capas de agua alrededor de las partículas sólidas comienzan a formar anillos de agua alrededor de los puntos de contacto, creando una interfaz agua-aire (Figura 2.17). A partir de este punto, la conductividad térmica se incrementa rápidamente al aumentar el contenido de agua hasta llenar casi todo el espacio ocupado por el aire, es decir, hasta que el suelo se satura (Rojas, 2007).

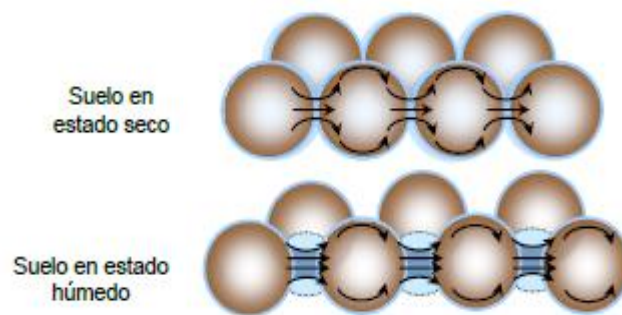
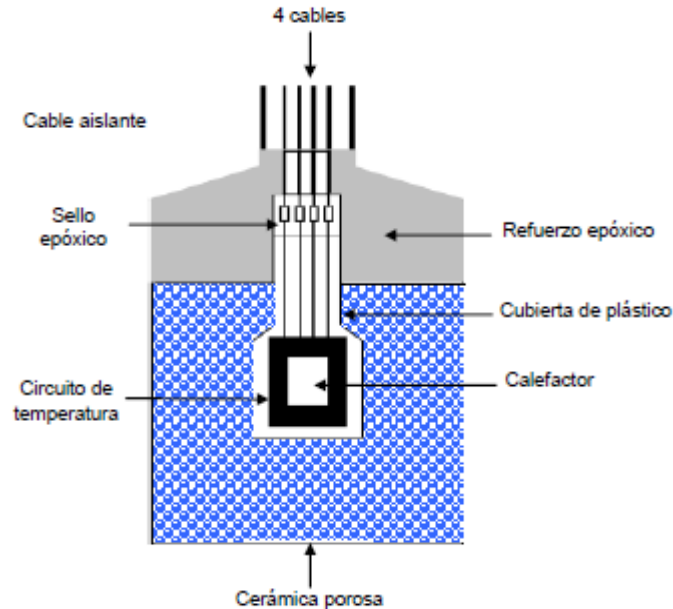


Figura 2.17 Conductividad térmica del suelo según su contenido de agua (Rojas, 2007).

El principio básico de los sensores de conductividad térmica (Figura 2.18) consiste en la presencia de un gradiente de succión matricial entre el suelo y el bloque poroso, originando un flujo de agua hasta que sus respectivos valores de succión sean iguales. La conductividad térmica en el bloque poroso reside en la conductividad térmica del sólido, la cual depende de la distribución de los espacios porosos en el

bloque y del contenido de agua que llena todos sus vacíos. Cuando el contenido de agua en el bloque aumenta también lo hace la conductividad térmica.



*Figura 2.18* Sección transversal de un sensor de conductividad térmica AGWA (Fredlund y Rahardjo ,1993)

Las mediciones obtenidas por bloques porosos no se ven afectadas por las sales disueltas en el agua del suelo o por las variaciones en la temperatura ambiente (Fredlund y Rahardjo 1993). En la actualidad los sensores de conductividad térmica tienen la capacidad de determinar mediciones de hasta los 1 500 kPa de succión del suelo.

#### 2.4.4.4 Método de la placa de succión

Con este método ver figura 2.19 no puede medirse valores mayores de succión a 98.1 KPa, pues el agua entra en la cavitación, además, el vidrio poroso debe tener un valor de entrada de aire superior a la succión que queremos medir en el suelo.

Por medio de una bomba de vacío genera una succión la cual corresponderá a la suma de la altura de la columna de mercurio  $h_{Hg}$  y la del agua,  $h$ . una vez logrado el equilibrio se determina la humedad del suelo. Para obtener la curva característica, puede repetirse el ensayo para diversas succiones (Zepeda, 2004).

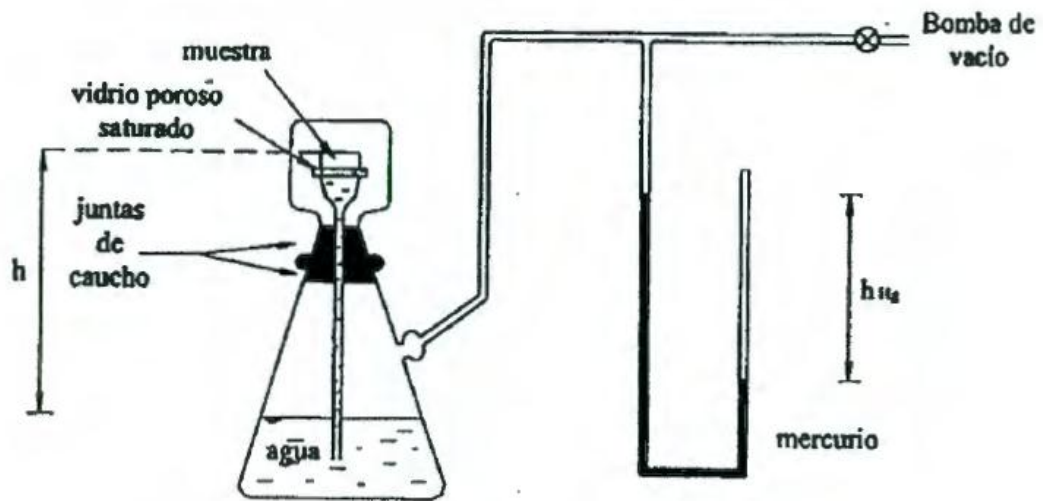


Figura 2.19 Método de la placa de succión para determinar la succión (Zepeda, 2004)

#### 2.4.4.5 Método de la centrifugación

Este método se puede utilizar para valores de succión entre 98.1 y 7382 KPa. En un recipiente cilíndrico con contenido de agua en su parte inferior, se coloca un cilindro poroso saturado sobre el cual reposa la muestra de suelo por intermedio de una placa porosa también saturada, figura 2.20. Una limitación importante de este aparato es que en las centrifugas normales solo se puede colocar una muestra de 1.5 cm de diámetro por 0.5 cm de espesor como máximo. Por estos motivos Coleman (1959) considera que este método no es adecuado para ensayos de rutina (Zepeda, 2004).



*Figura 2.20* Procedimiento de la centrifugación para determinar la succión (Zepeda, 2004)

#### 2.4.4.6 Método de la membrana de presión

Por medio del método de la membrana de presión, figura 2.21, se puede medir valores de succión entre 9.81 a 98100 KPa. La muestra se coloca dentro de una cámara de presión que estanca al aire, en contacto con una membrana de celulosa saturada, permeable al agua, pero muy poco al aire. El agua se mantiene durante todo el ensayo a la presión atmosférica mediante una comunicación con agua libre, la presión del aire dentro de la cámara se eleva lo más pronto posible tras la colocación de la muestra a una presión determinada, con ello aumenta en la misma cantidad de la presión del aire en los poros del suelo (Zepeda, 2004).

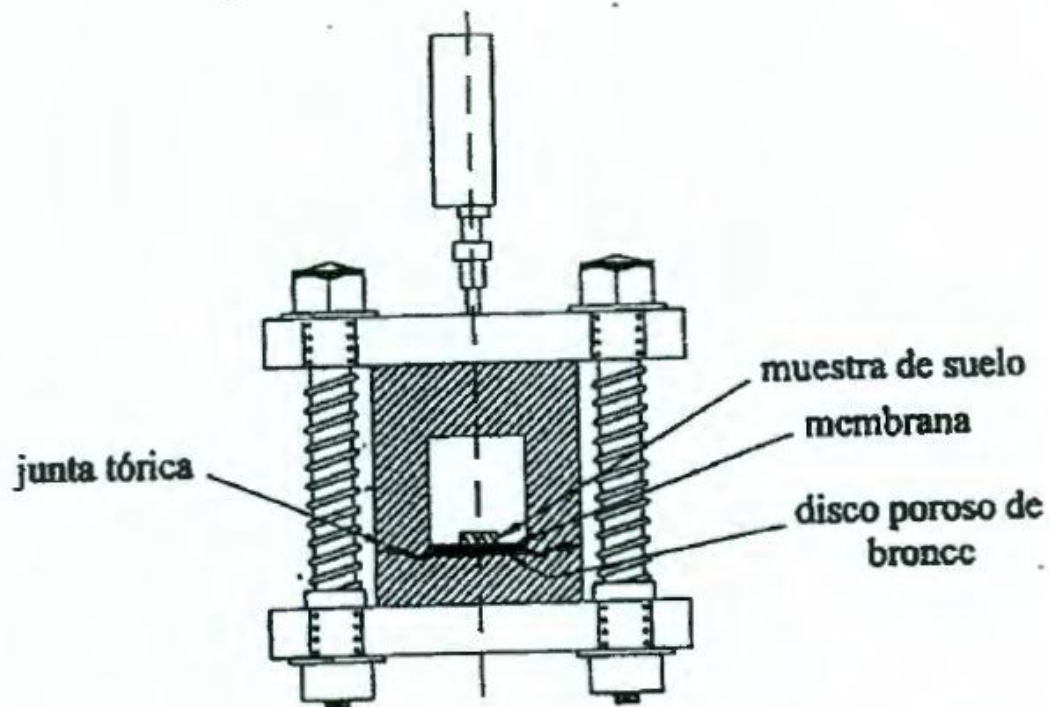


Figura 2.21 Aparato de la membrana de la presión (Zepeda ,2004)

#### 2.4.4.7 Sicrómetro de termopar

La determinación de la succión por medio del sicrometro de termopar representa un enfoque energético en el que la succión se evalúa por mediciones de humedad relativa dentro del suelo. En los sicrómetros se usan dos efectos adoptados de la teoría de termopares. Seebeck (1821) encontró que cuando dos conexiones de un circuito termopar se mantienen a diferente temperatura, se induce una corriente eléctrica. El efecto Seebeck, figura 2.22, es la base para la medición de temperaturas usando termopares. Peltier (1834) descubrió a su vez, que cuando se induce una corriente eléctrica en un circuito termopar por una batería, una conexión del circuito tiende a enfriarse y la otra calentarse, figura 2.23, (Zepeda, 2004).

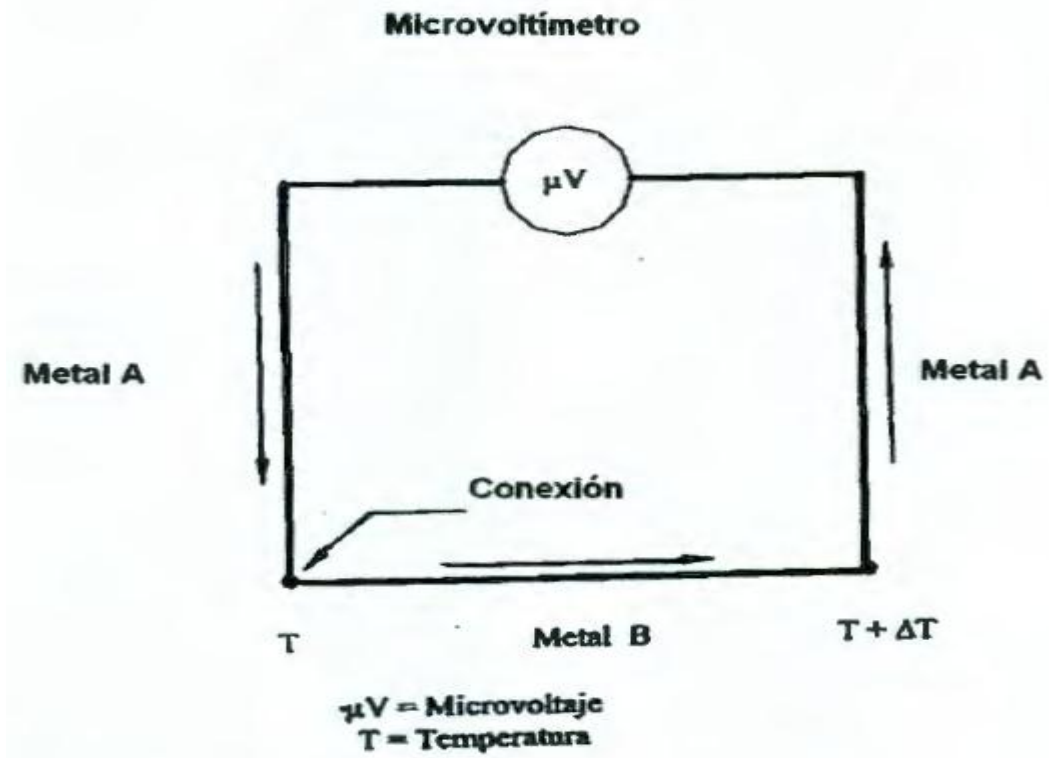


Figura 2.22 Circuito eléctrico que ilustra el efecto Seebeck (Zepeda ,2004)

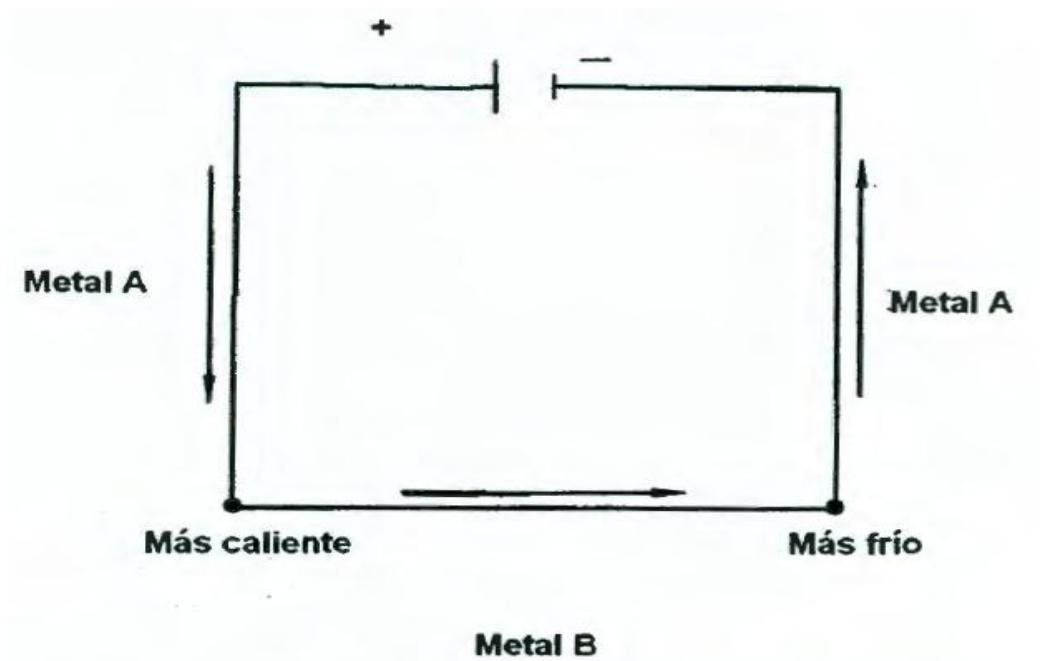


Figura 2.23 Circuito eléctrico que ilustra el efecto Peltier (Zepeda ,2004)

#### **2.4.4.8 Método del papel filtro**

Es un método indirecto, el método del papel filtro, el cual fue desarrollado en Europa en el año 1920 y llegó a los Estados Unidos en 1937 con Gardner desde entonces, el método del papel filtro ha sido utilizado y desarrollado por numerosos investigadores (Fawcett y Collis-George 1967; McQueen y Miller 1968; Al-Khafaf y Hanks 1974; McKeen 1980; Hamblin 1981; Chandler y Gutierrez 1986; Houston et al.1994; Swarbrick 1995), quienes han discutido diferentes aspectos del método del papel filtro.

El "papel filtro" se usa principalmente en laboratorios analíticos para filtrar soluciones heterogéneas. Normalmente está constituido por derivados de celulosa y permite el manejo de soluciones con pH entre 0 y 12 y temperaturas de hasta 120°C. Normalmente tienen un área aproximada de 10 cm<sup>2</sup> y un peso aproximado desde 80 hasta 130 g/m<sup>2</sup>. Actualmente se pueden conseguir papeles filtro de diferentes rugosidades y diámetros de poro. Dentro de los diferentes tipos de papeles filtro existen los cuantitativos, son utilizados principalmente para el análisis gravimétrico como es el caso del papel filtro Whatman N°42, es un papel filtro estándar mundialmente usado para análisis gravimétricos críticos con la retención de partículas más finas de todos los papeles de filtro de celulosa Whatman.. El papel Whatman N°42 presenta las siguientes características: papel filtro cuantitativo, de celulosa, para el análisis gravimétrico de alta pureza, resistentes a químicos o soluciones ácidas o álcalis, de porosidad fina, de flujo lento, partícula de retención o poro: 2.5 µm, fabricado con linters de algodón, con alto contenido de alfa celulosa (prácticamente 100 %), bajo en cenizas 0.06 % y otros contaminantes, retiene precipitados finos, plano. Diámetro: 125 mm ([www.ins.gob.pe/fichasins/ficha\\_tecnica.asp?codart=INS1700007541](http://www.ins.gob.pe/fichasins/ficha_tecnica.asp?codart=INS1700007541)).

El método del papel filtro es una técnica para determinar indirectamente la succión en suelos; es un método de prueba experimental de laboratorio relativamente simple, con el cual se puede determinar indirectamente la succión matricial y total.

El procedimiento para determinar indirectamente la succión total y matricial se detalla en la norma ASTM D 5298, en este método el papel filtro permite equilibrar el contenido de humedad con un espécimen de suelo dentro de un recipiente hermético y sellado. El equilibrio del contenido de humedad del papel filtro corresponde a la succión del espécimen del suelo. El valor de la succión es obtenido de los datos de calibración del papel filtro. Para la calibración del papel filtro Whatman #42 y Schleicher & Schuell #589 ya ha sido determinada y empleadas por la norma ASTM D5298, las curvas de los dos papeles filtro, visualizada en la Figura 2.17, muestra un punto de inflexión que describen entre los mecanismos de adsorción y capilaridad, que para efectos prácticos se presenta dos ecuaciones de acuerdo al contenido de humedad del papel y las dos son aplicables para la medición de succión matricial. La ecuación 2.13 y 2.14 se usa para el papel filtro Whatman N°42 y la ecuación 2.15 y 2.16 se usara para el papel filtro Schleicher y Schuell N° 589.

$$\text{Log}_{10}\Psi(\text{kPa})=5.327-0.00779\omega_f \quad ; \quad \omega_f < 45.3 \quad (2.13)$$

$$\text{Log}_{10}\Psi(\text{kPa})=2.412-0.0135\omega_f \quad ; \quad \omega_f > 45.3 \quad (2.14)$$

$$\text{Log}_{10}\Psi(\text{kPa})=5.056-0.0688\omega_f \quad ; \quad \omega_f < 54 \quad (2.15)$$

$$\text{Log}_{10}\Psi(\text{kPa})=1.882-0.0102\omega_f \quad ; \quad \omega_f > 54 \quad (2.16)$$

El procedimiento para determinar la succión con el método del papel filtro consiste en colocar un espécimen de suelo junto con el papel filtro dentro de un contenedor hermético durante siete días, tiempo suficiente para que la presión del vapor de agua de poro en el espécimen, la presión del vapor de agua de poro en el papel filtro, y la presión parcial del vapor de agua en el aire que se encuentra dentro del

contenedor alcancen el equilibrio. Subsecuentemente se determina la masa del papel filtro y la succión del espécimen también se determina a partir de las relaciones de calibración del contenido de agua del papel filtro con la succión aplicable al tipo de papel filtro y el procedimiento de este método de ensaye.

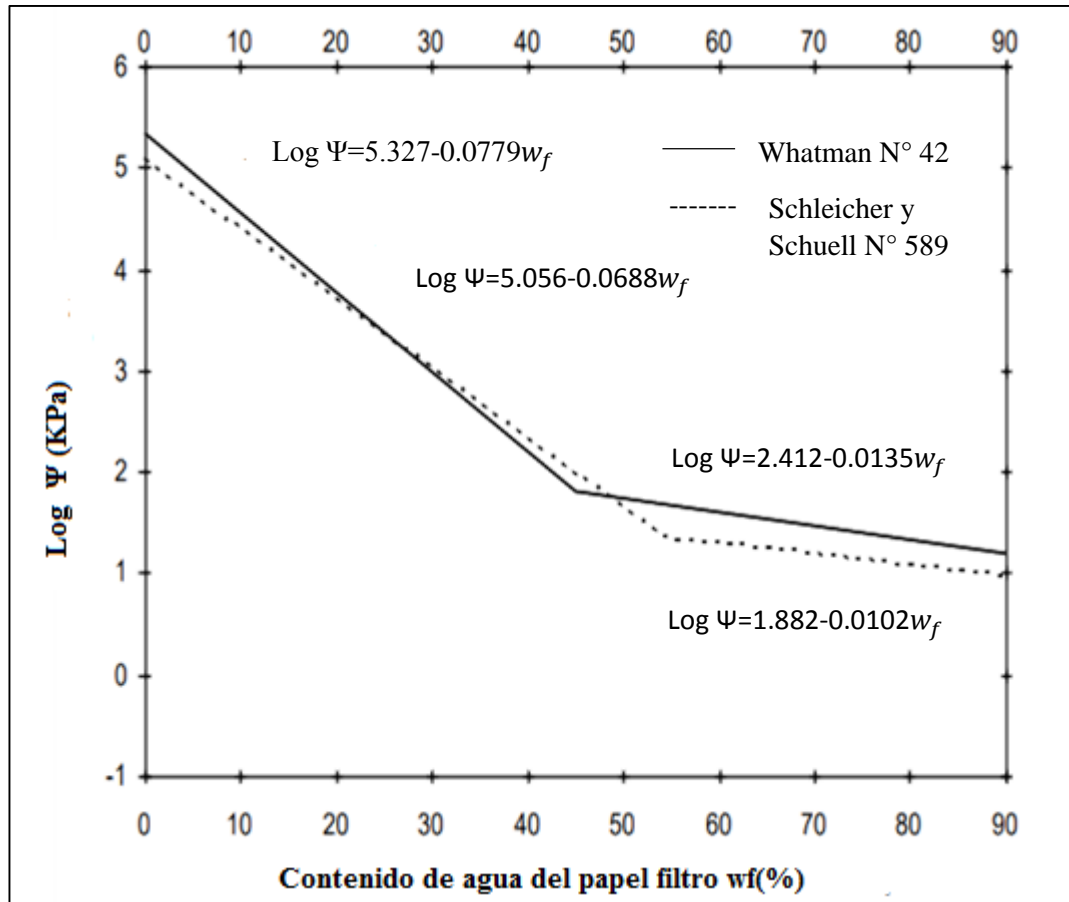


Figura 2.24 Curvas de calibración para papel filtro Whatman #42 y Schleicher & Schull #589(ASTM D5298). (Lu y Likos, 2004).

La succión total se medirá si el papel filtro no está en contacto con el espécimen de suelo, la transferencia de humedad se limitará a la transferencia de vapor a través del aire dentro del contenedor; la succión matricial se medirá si el papel filtro está en contacto físico con el espécimen, el contacto físico entre el suelo y el papel filtro debe

permitir la transferencia del fluido incluya las sales que puedan estar disueltas en el agua de poro, como se muestra en la figura 2.20

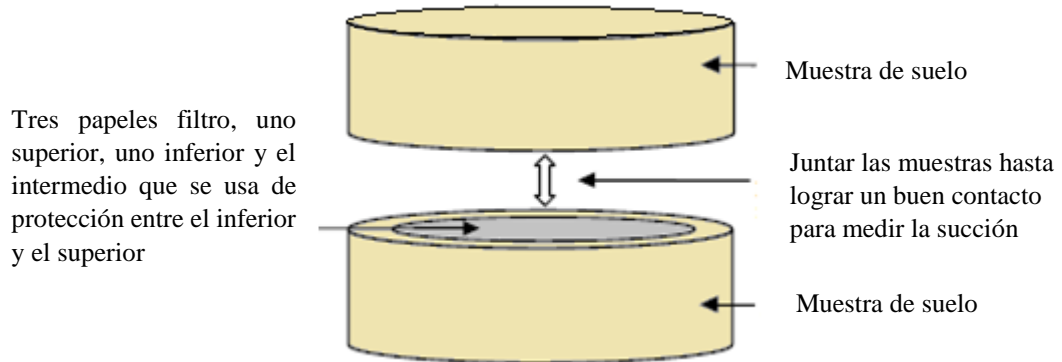


Figura 2.25 Determinación de la succión matricial (Beltrán, 2009).

#### 2.4.5 Modelación y ajustes de la curva característica.

En esta sección se describen los principales modelos, de base teórica y empírica, utilizados para ajustar resultados experimentales, y se presenta un análisis de los parámetros involucrados. Los parámetros involucrados en los modelos matemáticos de curvas características incluyen puntos fijos y constantes empíricas. Los puntos fijos se establecen como un contenido de humedad o succión para una condición específica, tales como saturación, humedad residual y presión de entrada de aire. Por otro lado, los modelos incluyen dos o más constantes empíricas de ajuste, las cuales se seleccionan para capturar la forma general de la curva característica entre los puntos fijos establecidos. Los modelos que presentan más de dos constantes resignan simplicidad matemática respecto a los de dos constantes, pero resultan de mayor flexibilidad para ajustar resultados experimentales en un amplio rango de succiones.

En muchos modelos, se emplea la humedad volumétrica normalizada o grado de saturación,  $S$ , como variable de referencia, debido a que la misma resulta adimensional y cubre una variación entre 0 y 1, todo el rango significativo de succión, en este caso, el grado de saturación se relaciona con la humedad saturada y el residual (Aiassa, 2008):

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.17)$$

Donde:

$\theta$  = contenido de humedad volumétrico,  $\theta_r$  = contenido de humedad residual,  $\theta_s$  = contenido de humedad en saturación  $S$  = grado de saturación (%).

Los modelos que se realizaron para el ajuste de la curva característica obtenidas experimentalmente en esta investigación son:

#### **2.4.5.1 Modelo de Gardner**

El modelo de Gardner (1958) corresponde a uno de los primeros modelos empleados para representar la curva característica suelo-agua. El mismo corresponde a una función continua, la cual fue desarrollada originalmente para representar el coeficiente de permeabilidad de suelos no saturados, y posteriormente adaptada para modelar la curva característica. Este modelo resulta ampliamente utilizado en aplicaciones geotécnicas, debido a la simple formulación que el mismo presenta. La ecuación contiene dos parámetros de ajuste, designados como  $\alpha$  y  $n$ . El parámetro  $\alpha$  se relaciona con la inversa de la presión de entrada de aire, y el parámetro  $n$  con la distribución de tamaños de poros. Con incrementos en el valor de  $\alpha$ , se reduce la presión de entrada de aire, mientras que la pendiente del tramo central permanece constante. Por otro lado, los incrementos de  $n$ , provocan en la curva característica una

pendiente mayor o más abrupta para el tramo central, con ligeros incrementos en la presión de entrada de aire (Gardner, 1958).

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + \alpha \Psi^n} \quad (2.18)$$

Adecuando la ecuación 2.17 se obtiene la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\theta}{\theta_s} = \frac{1}{1 + \alpha \Psi^n} \quad (2.19)$$

Donde:

$\alpha$  = parámetro de ajuste de la curva que se encuentra relacionado con la presión de entrada de aire,  $n$  = parámetro de ajuste relacionado con la pendiente en el punto de inflexión de la curva característica,  $\theta$ =contenido de humedad volumétrico,  $\theta_s$  = contenido de humedad en saturación,  $S$ =grado de saturación (%), y  $\Psi$ =succión matricial (KPa).

#### 2.4.5.2 Modelo de Van Genuchten

El modelo de van Genuchten (1980) corresponde a una función continua, y el mismo ajusta la relación succión-humedad para el rango completo de succión en el suelo. El modelo utiliza tres parámetros de calibración, designados como  $\alpha$ ,  $m$  y  $n$ . El parámetro  $\alpha$  se relaciona con la inversa de la presión de entrada de aire, el parámetro  $n$  se relaciona con la distribución de tamaños de poro del suelo y el parámetro  $m$  con la simetría del modelo (Van Genuchten, 1980). La ecuación del modelo corresponde a

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \Psi)^n)^m} \quad (2.20)$$

Adecuando la ecuación 2.20 se obtiene la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + (\alpha\Psi)^n)^m} \quad (2.21)$$

Donde:

$\alpha$  = parámetro de ajuste de la curva que se encuentra relacionado con la presión de entrada de aire,  $n$  = parámetro de ajuste relacionado con la distribución de tamaño de poros,  $m$  = parámetro de ajuste relacionado con la simetría del modelo,  $\theta$  = contenido de humedad volumétrico,  $\theta_r$  = contenido de humedad residual,  $\theta_s$  = contenido de humedad en saturación,  $S$  = grado de saturación (%), y  $\Psi$  = succión matricial (kPa).

El modelo de van Genuchten (1980) presenta la ventaja de poseer mayor flexibilidad respecto de las otras propuestas, con lo que permite ajustar con mayor precisión resultados experimentales de diferentes tipos de suelo. Esta mayor flexibilidad, es proporcional al número de parámetros de ajuste.

Este modelo puede combinarse con el propuesto por Burdine (1953), donde se plantea una relación entre los parámetros  $m$  y  $n$ , reduciendo la cantidad de parámetros de tres a dos. La ecuación de relación propuesta corresponde a,

$$m = 1 - \frac{2}{n} \quad (2.22)$$

Por otro lado, el modelo de van Genuchten (1980) puede combinarse con el modelo propuesto por Mualem (1976). En este caso, la ecuación propuesta para la relación entre parámetros corresponde a,

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.23)$$

### 2.4.5.3 Modelo de la proporcionalidad natural

En México, el Dr. Eulalio Juárez Badillo ha propuesto el modelo de proporcionalidad natural para modelar varios fenómenos. En este caso se derivó una expresión hecha por el Instituto Mexicano del Transporte para modelar la curva característica asumiendo que el valor máximo que puede alcanzar la succión en el suelo es de 1 000 000 KPa y el grado de saturación varía entre 0 y 1 (Pérez et al, 2013). La ecuación del modelo corresponde a:

$$S = \frac{1}{\left(\frac{\Psi^* 1000000 - \Psi}{\Psi 1000000 - \Psi^*}\right)^\gamma + 1} \quad (2.24)$$

Donde:

$\gamma$  = coeficiente de proporcionalidad,  $\Psi^*$  = succión característica (KPa),  $S$ =grado de saturación (%), y  $\Psi$ =succión matricial (kPa).

### 2.4.5.4 Modelo de Fredlund y Xing

El modelo de Fredlund y Xing (1994) resulta flexible, y sus parámetros producen efectos independientes sobre la curva característica. Adicionalmente, el modelo contempla un factor de corrección, para garantizar que la función tenga un límite en el dominio de succión igual  $10^6$  kPa. Este límite, posibilita una mejor reproducción del comportamiento en los sectores de altos valores de succión, o zona próxima a la humedad nula. En este caso, la ecuación resulta,

$$S = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (2.25)$$

$$\theta = C \left( \frac{\theta_s}{\ln(e + (\frac{\Psi}{\alpha})^n)^m} \right) \quad (2.26)$$

$$C = 1 - \left( \frac{\ln(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{\Psi_r})} \right) \quad (2.27)$$

Adecuando la ecuación 2.26 y reemplazando la ecuación 2.25 se obtiene la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\theta}{\theta_s} = C \left( \frac{1}{\ln(e + (\frac{\Psi}{\alpha})^n)^m} \right) \quad (2.28)$$

Donde:

$\alpha$  = parámetro de ajuste de la curva que se encuentra relacionado con la presión de entrada de aire,  $n$  = parámetro de ajuste relacionado con la distribución de tamaño de poros,  $m$  = parámetro de ajuste relacionado con la simetría del modelo,  $\theta$  = contenido de humedad volumétrico,  $\theta_s$  = contenido de humedad en saturación,  $S$  = grado de saturación (%),  $\Psi$  = succión matricial (KPa), y  $\Psi_r$  = es la succión residual (puede asumirse igual a 3000 KPa).

#### 2.4.5.5 Modelo de Zapata

Los 190 puntos de datos utilizados por Zapata, en el desarrollo de su modelo fueron clasificados en dos tipos según el Índice de Plasticidad; 70 suelos con valores de índice de plasticidad mayores a cero (suelos plástico) y 120 suelos con índice de plasticidad valores iguales a cero (suelos no plásticos). Las propiedades del suelo obtenidas en el laboratorio permitió una estimación de los mejores parámetros de ajuste

de la curva característica mediante el uso de SoilVision® (software creado por SoilVision System Ltd).

Para suelos plásticos (suelos con  $IP > 0$ ), Zapata usó dos factores para encontrar los modelos para los parámetros de ajuste de la curva característica con el modelo de Van Genuchten: el primer factor es el porcentaje que pasa la malla # 200 y los límites de Atterberg( específicamente el índice de plasticidad)básicamente, el índice de plasticidad ponderada o factor de “wIP” y el segundo factor es la relación de vacío inicial “e” que afecta al valor de entrada de aire(VEA) y el grado de saturación residual, cuanto menor es la relación de vacíos inicial “e” mayor es el VEA y mayor es el grado de saturación residual, el valor de entrada de aire es un parámetro importante para suelos no saturados ya que el grado de la saturación comienza a decaer rápidamente cuando la succión excede el VEA en otras palabras cuanto más denso es el suelo mayor es el VEA (Zapata et al,2000). Las ecuaciones propuestas por Zapata en base al modelo de Van Genuchten se definen de la siguiente manera:

$$S = \frac{1}{(1 + (\frac{\Psi}{a})^b)^c} \quad (2.29)$$

$$a = 0.0015(w.IP)^3 + 0.1028(w.IP)^2 + 0.5871(w.IP) + 4.118(1-w) \left( \frac{1}{\ln(0.75+e)} \right) + 11.813 \quad (2.30)$$

$$b = 0.00011(w.IP)^2 + 0.01358(w.IP) + 1.76987 \quad (2.31)$$

$$c = -0.000005(w.IP)^2 - 0.00014(w.IP) + 0.376(1-w)(\ln(0.75+e)) + 0.14745 \quad (2.32)$$

Donde:

w = porcentaje que pasa la malla # 200(en decimal), IP = índice de plasticidad (%), e= relación de vacíos inicial, S=grado de saturación (%), y  $\Psi$ =succión matricial (KPa).

Para suelos plásticos (suelos con  $IP > 0$ ), Zapata (como se citó en Torres, 2011) usó un solo factor para encontrar los modelos para los parámetros de ajuste de la curva característica basado en el modelo de Fredlung y Xing, y ese es el índice de plasticidad ponderada o factor de “wIP” fue el principal concepto geotécnico utilizado en su modelo para este tipo de suelo. Las ecuaciones propuestas por Zapata en base al modelo de Fredlung y Xing se definen de la siguiente manera:

$$a = \frac{0.00364(w.IP)^{3.35} + 4(w.IP) + 11}{6.895} \quad (2.33)$$

$$\frac{b}{c} = -2.313(w.IP)^{0.14} + 5 \quad (2.34)$$

$$c = 0.0514(w.IP)^{0.465} + 0.5 \quad (2.35)$$

$$\frac{\Psi_r}{a} = 32.44e^{0.0186(w.IP)} \quad (2.36)$$

Donde:

w = porcentaje que pasa la malla # 200(en decimal), IP = índice de plasticidad (%), S=grado de saturación (%),  $\Psi_r$ = es la succión residual (KPa) y  $\Psi$ =succión matricial (KPa).

En el planteamiento de las expresiones anteriores se considera que el valor del índice de plasticidad ponderado w.IP se encuentra en un rango de 0.1 y 50.

#### 2.4.6 Ajuste de modelos a resultados experimentales de la curva característica.

El ajuste de los parámetros de diferentes modelos matemáticos a resultados experimentales correspondientes a relaciones succión-humedad, puede realizarse mediante el empleo de algoritmos no lineales de iteración, no obstante los modelos de dos parámetros pueden ajustarse adecuadamente mediante simple observación visual (Lu y Likos, 2004). En cualquier caso, debe verificarse la calidad de ajuste del modelo mediante el cálculo de la suma de residuos cuadráticos,

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (S_i - \hat{S}_i)^2 \quad (2.37)$$

Donde:

$w_i$  = factor de peso,  $S_i$  = grado de saturación medida experimentalmente para un determinado nivel de succión,  $\hat{S}_i$  = grado de saturación calculada para el mismo nivel de succión.

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA TESIS

#### 3.1 Ubicación de la zona de estudio

El estudio se realizó en los terrenos de Mayooc-Huancavelica con coordenadas de ubicación en UTM son E: 575,310.00 N: 8'772,553.00 se adjunta plano de ubicación en el Anexo 17.



Figura 3.1. Ubicación de la extracción de la muestra (Google Earth).

## **3.2 Metodología para la caracterización geotécnica.**

### **3.2.1 Toma de muestras**

Para la realización de los diferentes ensayos que permitan obtener una caracterización geotécnica más adecuada del suelo, se tomaron muestras inalteradas a una altura de 3.00 m, determinando que el suelo era homogéneo y con pocas variaciones en sus características. La calicata de la cual se extrajo la muestra tenía dimensiones de 1.80x1.80x3.00 m de profundidad, las muestras extraídas se depositaron en bolsas impermeables selladas, para luego trasladarlos al laboratorio para realizar los ensayos correspondientes para tal fin.

### **3.2.2 Contenido de humedad ( $\omega$ )**

Se determinó el parámetro utilizando la metodología de la NTP 339.127(ASTM D-2216). Se determina el peso del agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ . El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas sólidas. La pérdida de peso debido al secado es considerado como el peso del agua, cuyo resultados se adjuntó en el anexo 05. Los equipos y/o materiales usados son:

- Horno con control de temperatura ( $^\circ\text{C}$ ).
- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.01$  gr.
- Recipientes de aluminio o latón.

### **3.2.3 Límite líquido (L.L)**

Procedimiento desarrollado bajo la NTP 339.129( ASTM D 4318). Para la determinación del límite líquido (Figura 3.1) se utilizó la copa de Casagrande esta prueba consiste en depositar material que pasa la malla # 40 en la copa de Casagrande y ranurarla, una vez ranurada se golpea la capsula, dejándole caer desde una altura de

1 cm, hasta que la ranura en el suelo se cierre una longitud de 1.27 cm, una vez que el material se haya cerrado se determinara el contenido de humedad de la muestra, esta prueba se realiza tres veces, con diferentes humedades, para obtener valores entre los 6 y los 35 golpes, mediante una gráfica se busca la humedad correspondiente a 25 golpes, cuyo resultados se adjuntó en el anexo 02. Los equipos y/o materiales usados son:

- Horno con control de temperatura (°C).
- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.01$  gr.
- Recipientes de aluminio o latón.
- Copa de Casagrande y acanalador.
- Espátula.
- Tamiz N° 40.



*Figura 3.2. Ensayo de límite líquido (Geotecnia & Ingeniería, 2017).*

#### **3.2.4 Limite plástico (L.P)**

El procedimiento realizado en el laboratorio se basa en la NTP 339.129 (ASTM D 4318). Para la determinación del límite plástico se hace formando rollitos de 3mm

de espesor hechos de una pasta de suelo, estos se hacen una y otra vez hasta alcanzar los 3 mm sin desmoronarse (Figura 3.2). En ese momento se dice que llegó a su límite plástico. De igual forma este proceso se realiza tres veces, de tal forma que el valor del límite plástico sea el promedio de estas tres pruebas, cuyos resultados se adjuntó en el anexo 02. Los equipos y/o materiales usados son:

- Horno con control de temperatura (°C).
- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.01$  gr.
- Recipientes de aluminio o latón.
- Vidrio grueso esmerilado.



*Figura 3.3. Rollitos de suelo para límite plástico (Geotecnia & Ingeniería, 2017).*

### **3.2.5 Limite de contracción**

El procedimiento realizado en el laboratorio se basa en la NTP 339.140 (ASTM D 424), Para la determinación del límite de contracción (Figura 3.3) se utiliza el suelo pasado por la malla N° 40, se amasa y se lleva a un contenido de humedad similar o algo superior al límite líquido, recubrir el interior de la capsula de evaporación con una capa fina de grasa (vaselina), llenar la capsula de evaporación en tres capas, compactar cada capa dando golpes suaves sobre una superficie fina para eliminar las

burbujas de aire, luego de completar la tercera capa se enrasa utilizando la espátula, se toma el peso de la capsula con el suelo húmedo para determinar el contenido de humedad y se lleva al horno, luego del secado se retira y se halla el peso seco, ahí se observa la variación del volumen por secado, luego se determina el volumen de la muestra de suelo seco, se utiliza el desplazamiento por mercurio, se coloca la pastilla de suelo sobre un recipiente enrasado con mercurio y se introduce con la ayuda de una placa plástica de tres puntas: Se recoge en un recipiente el volumen del mercurio desplazado y se coloca en la probeta graduada para determinar su volumen. Luego determinar el volumen inicial que será igual al volumen de la capsula, de igual forma se vierte el mercurio dentro de la capsula, luego se coloca en la probeta para hacer la lectura correspondiente, cuyos resultados se adjuntó en el anexo 04. Los equipos y/o materiales usados son:

- Horno con control de temperatura (°C).
- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.01$  gr.
- Recipiente volumétrico de vidrio para medir la cantidad de volumen del suelo.
- Plato de evaporación.
- Mercurio.
- Tamiz N° 40.
- Espátula.
- Grasa lubricante (vaselina).
- Placa plástica con tres apoyos.
- Probeta graduada de 25 ml.



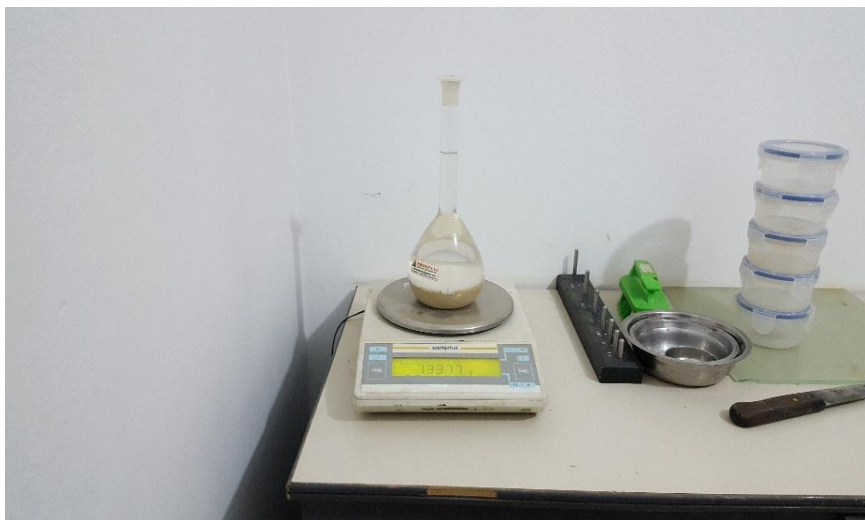
*Figura 3.4.* Ensayo para límite de contracción (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

### **3.2.6 Gravedad específica de sólidos ( $G_s$ ).**

El procedimiento realizado en el laboratorio se basa en la NTP 339.131 (ASTM D 854), se requiere calibrar los picnómetro a utilizar, esta calibración consiste en llenar dos picnómetro con agua y calentar a una temperatura de 60 °C aproximadamente, posteriormente se extrae el aire atrapado mediante una bomba de vacíos. Se mide la temperatura del agua contenida de un picnómetro, con aproximación de 0.1 °C y con una pipeta se completa el volumen con agua de modo que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase. Se pesa el picnómetro lleno con aproximación de 0.001 gr y se registra la temperatura y el peso del picnómetro con agua para cada decremento de 5 °C aproximadamente, para finalmente obtener una gráfica de temperaturas contra peso del picnómetro de agua. Después de calibrar se seca el suelo en estudio al horno, se deja enfriar y se pesa una cantidad de material entre 50 y 100 gr, se vierte agua al picnómetro hasta la mitad de la parte curva, se vacían los sólidos empleando para esto un embudo, se extrae el aire atrapado en el suelo, empleado la bomba de vacíos o llevando el conjunto a la estufa por un periodo de 15min; el material con el agua se agita a intervalos adecuados de a fin de eliminar los todos los vacíos, se repite el paso anterior unas 5 veces, se completa la capacidad del picnómetro con

agua hasta la marca de aforo, de tal manera que la parte inferior del menisco coincida con la marca (500 ml), se pesa el picnómetro + agua + sólidos(Figura 3.4), se toma la temperatura de la suspensión, con ésta, se entra a la curva de calibración del matraz y se obtiene el peso del matraz + agua hasta la marca de aforo, se sustituyen los valores obtenidos en la fórmula y se obtiene la gravedad específica, cuyos resultados se adjuntó en el anexo 05. Los equipos y/o materiales usados son:

- Horno con control de temperatura (°C).
- Matraz (picnómetro).
- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.01$  gr.
- Pipeta.
- Termómetro graduado.
- Capsula de evaporación.
- Tamiz N° 4 y N° 8.
- Guantes de asbesto.
- Baño de agua (Baño maría).



*Figura 3.5.* Peso del picnómetro, agua y el suelo (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

### **3.2.7. Análisis granulométrico por tamizado.**

Para la obtención de la curva granulométrica se utilizó la metodología de la NTP 339.128(ASTM D-422). Para la determinación de este ensayo se consideró una muestra representativa por cuarteo, se recogió del cuarteo una cantidad, se registró el peso de la muestra, luego se lavó la muestra a través de la malla N°200(al lavarlos se elimina los limos),después secamos el material retenido( 24 hr en el horno),secado la muestra procedemos a pesarla en la balanza digital, a continuación vertimos la muestra en el juego de cernidores, zarandamos manualmente y mecánica las mallas con mucho cuidado de manera de no perder material de la muestra, luego retiramos la primera malla, el material retenido en esta malla se registra su peso, nuevamente se zarandó el material y se retiró la segunda malla, se vació la muestra y se registra su peso, se repite este procedimiento hasta la última malla, cuyos resultados se adjuntó en el anexo 01. Los equipos y/o materiales usados son:

- Horno con control de temperatura (°C).
- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.01$  gr.
- Recipientes de aluminio o latón.
- Juego de tamices (3",2",1 1/2",1",3/4",3/8", N°4, N°10, N° 20, N° 30, N°40, N°60, N°100, N°200).
- Escobilla.

### **3.2.8. Análisis granulométrico por sedimentación.**

Para la obtención de la curva granulométrica se utilizó la metodología de la NTP 339.128(ASTM D-422). Para la determinación de este ensayo se secó la muestra en el horno, se tomó 50(o 34) gr de muestra, luego se realizó la preparación de la solución el cual consiste pesar 5 gr de floculante y se midió 125 ml de agua destilada

para luego mezclar ambos componentes, después se realizó la mezcla de la solución con la muestra y lo dejamos y dejar reposar la dicha mezcla para que el de floculante penetre en la muestra(para nuestro caso en arcillas se deja reposar 24 horas),luego batir la muestra el cual consiste en colocar la mezcla en el cilindro de la batidora y añadir 125 ml de agua destilada para la luego batir l mezcla(en nuestro caso para arcillas durante 15 min),después colocar el hidrómetro el cual consiste en verter la mezcla en el cilindro de sedimentación luego añadimos agua destilada hasta completar los 1000 ml para luego agitar el cilindro con la mano por un minuto(90 ciclos por ese tiempo) luego colocar el hidrómetro y se inicia la toma de datos y en cada lectura se lee la temperatura y este procedimiento se realizó para 0.25 min,0.5 min, 1 min, 2 min,5 min,10 min,15 min ,30 min,60 min,240 min, 1440 min. También se requieren como datos adicionales la lectura del hidrómetro solo con agua, con agua y con de floculante, cuyos resultados se adjuntó en el anexo 06. Los equipos y/o materiales usados son:

- Horno con control de temperatura (°C).
- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.01$  gr.
- Aparato agitador.
- Tamices N° 200.
- Termómetro.
- Cronometro.
- Pipeta.
- Frasco volumétrico de vidrio.
- Cilindro de sedimentación de 1000 cm<sup>3</sup>
- Agente dispersivo (hexametafosfato de sodio).
- Hidrómetro ASTM 151H.



Figura 3.6. Herramientas para el ensayo por sedimentación (Geotecnia & Ingeniería, 2017).



Figura 3.7. Ensayo por sedimentación (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

### 3.2.9. Clasificación del material fino.

Se realizó el tamizado de la muestra lavada y retenida por la malla # 200, como el mayor porcentaje de las partículas de las muestras pasaron por la malla #200, la poca cantidad retenida nos permito realizar la clasificación por medio de su granulometría. Se optó por el método de clasificación de materiales finos que dependen más de sus límites de consistencias por medio de cartas de plasticidad. Una vez obtenido los valores de límite líquido (L.L) y limite plástico (L.P) se determinó el

índice de plasticidad (IP) que es de la diferencia de Límite líquido (L.L) con límite plástico (L.P). Teniendo los valores de LL e LP se fue a la carta de plasticidad y se tomó como coordenadas los valores de LL e IP para determinar a qué grupo de suelos finos pertenece según la clasificación por método SUSC y AASHTO cuyos resultados se adjuntó en el anexo 03.

Con los resultados obtenidos del ensayo por sedimentación (hidrometría) que se adjunta en el anexo 06, se pudo determinar el porcentaje de arcillas que contiene la muestra de arcilla en estudio y conociendo el índice plástico, se determinó la actividad de la arcilla.

### **3.3 Metodología para determinar indirectamente la succión matricial por el método del papel filtro.**

Para la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro se utilizó la metodología de la norma ASTM D 5298(INV E 157). Se realizó el ensayo del método de papel filtro por desecamiento con el objeto de determinar indirectamente la succión matricial de la arcilla, en el cual se distribuyen las humedades desde la condición saturada hasta la condición seca, lo cual se logró dejando secar al aire libre. Este ensayo se realizó por el método sugerido por Fredlund, el cual consiste en dejar una muestra de suelo en contacto con el papel filtro, en este caso se usó papel filtro Whatman # 42 , calibrado por diversos autores y adaptado por normas como la ASSTHO, ASTM e INVE como se muestra en la Figura 3.8.



Figura 3.8. Papel filtro whatman #42 (MTL Geotecnia, 2018).

Para la determinación de este ensayo se realizó el secado de los papeles filtro seleccionados colocándolos en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C dentro de un recipiente a tapa abierta (Figura 3.9) para las pruebas al menos 16 horas en el horno por la noche, luego se coloca el papel filtro en un desecador, después del secado para almacenarlo antes de usarlo. (Figura 3.10).



Figura 3.9. Secado del papel filtro en el horno (MTL Geotecnia, 2018).

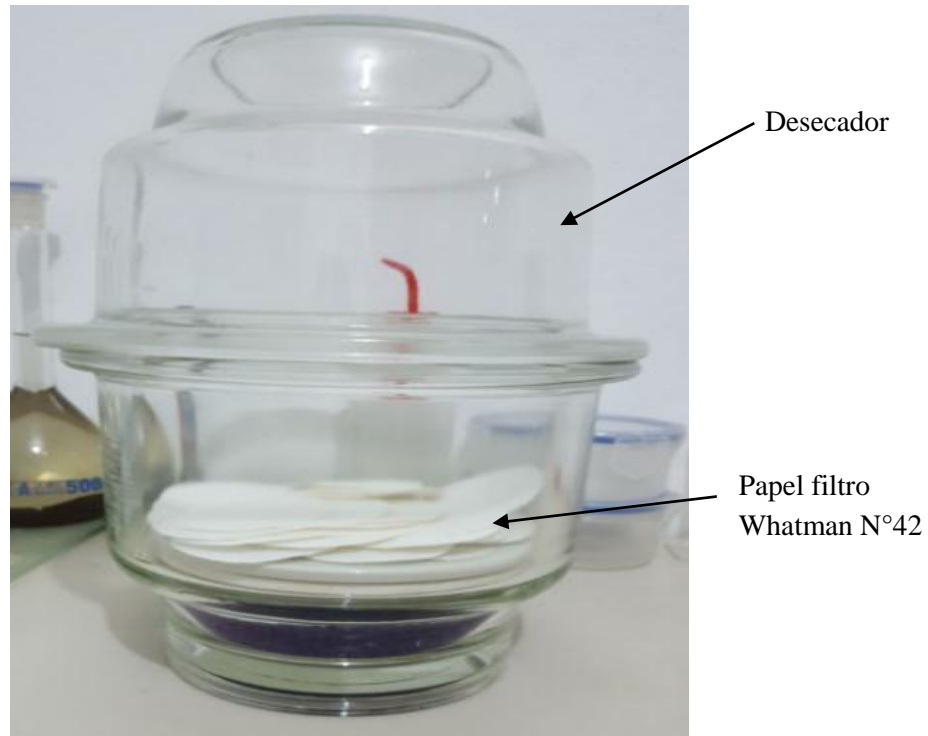


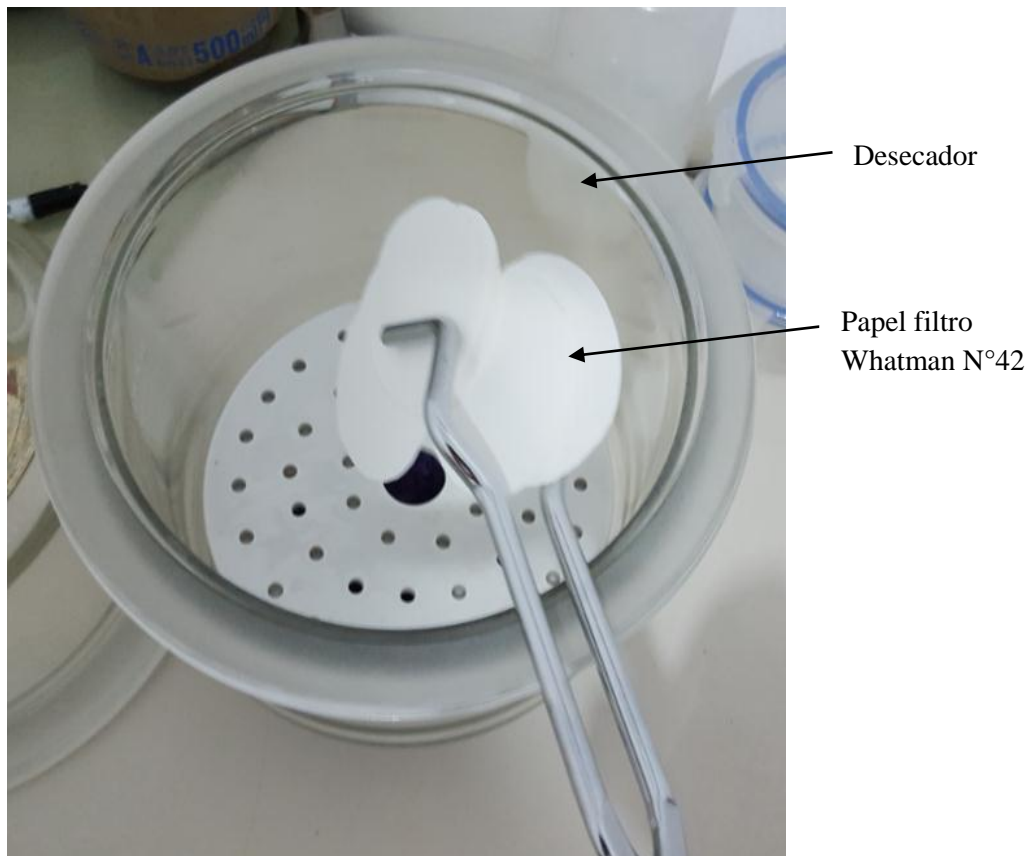
Figura 3.10. Papel filtro dentro del desecador (MTL Geotecnia, 2018).

Se prepararon los especímenes del suelo o fragmentos de la muestra de suelo, con un diámetro de 5.5 cm (Figura 3.11) y cortando la muestra en cilindros de unos 25mm (1”) de espesor. Esta operación se realizó lo más rápido posible, en un área en la que la temperatura se mantenga constante.



Figura 3.11. Preparación del espécimen del suelo a ensayar (MTL Geotecnia, 2018).

Se removerán del desecador tres papeles filtro (Figura 3.12) e inmediatamente se colocarán en contacto físico con el espécimen del suelo tal como se indica en la Figura 3.13. La succión matricial se determina cuando el papel filtro está en contacto con el espécimen del suelo, el espécimen del suelo al estar en contacto con el papel filtro se genera una diferencia de humedad por equilibrio de vapor, cierta cantidad de agua de la muestra de suelo se transfiere al papel filtro, este papel es especial para este laboratorio debido a la homogeneidad de sus poros, permitiendo medir la succión matricial ejercida por la muestra del suelo.



*Figura 3.12.* Extracción del papel filtro del desecador (MTL Geotecnia, 2018).

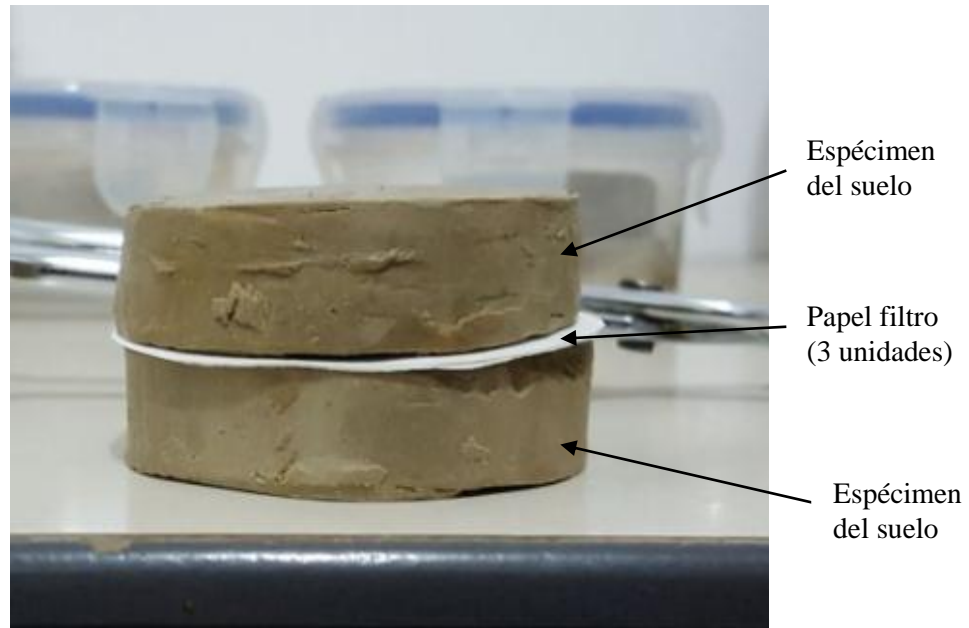


Figura 3.13. Colocación del papel filtro (3 unidades) entre dos especímenes del suelo (MTL Geotecnia, 2018).

Para permitir que se genere el equilibrio de vapor, es necesario controlar el espécimen del suelo, por ello éstas se sellaron con cinta aislante (Figura 3.14) y luego éstas se envolvieron con bolsas herméticas (Figura 3.15), con el fin de no dejar variar la humedad interior y no se deseeque la muestra por agentes externos, y finalmente se envolvieron en papel vinipel. (Figura 3.16).

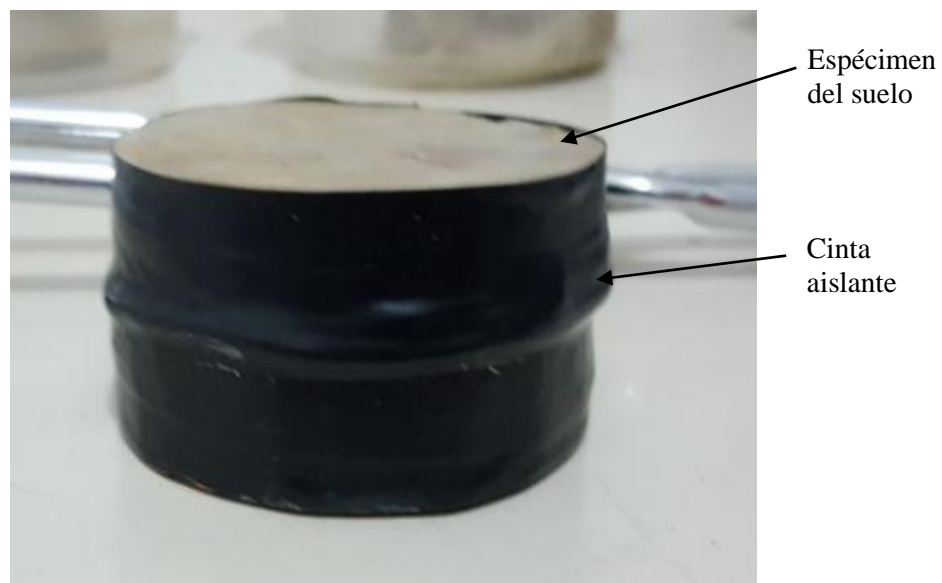


Figura 3.14. Sellado de la muestra con cinta aislante (MTL Geotecnia, 2018).

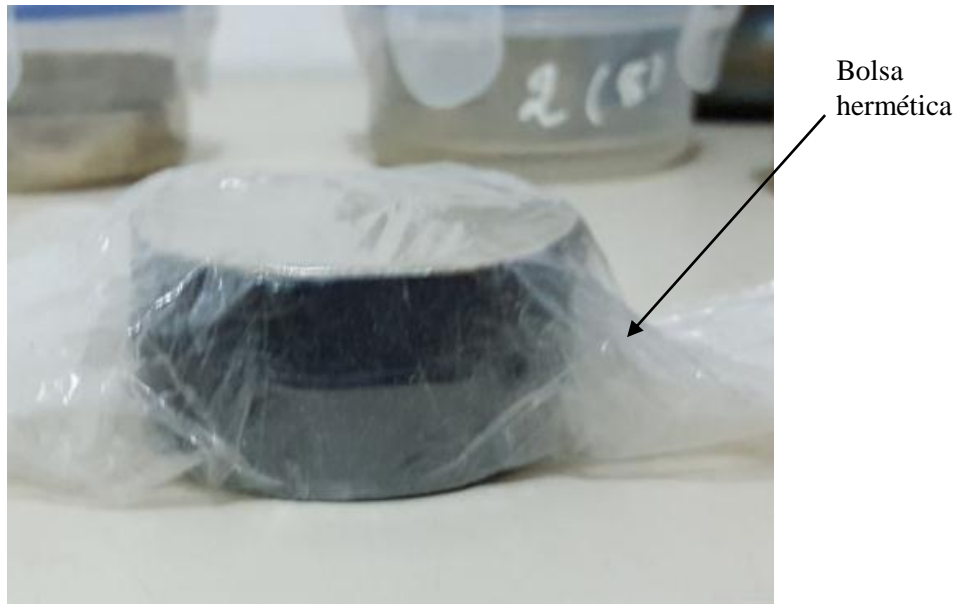


Figura 3.15. Sellado de la muestra con bolsa hermética (MTL Geotecnia, 2018).

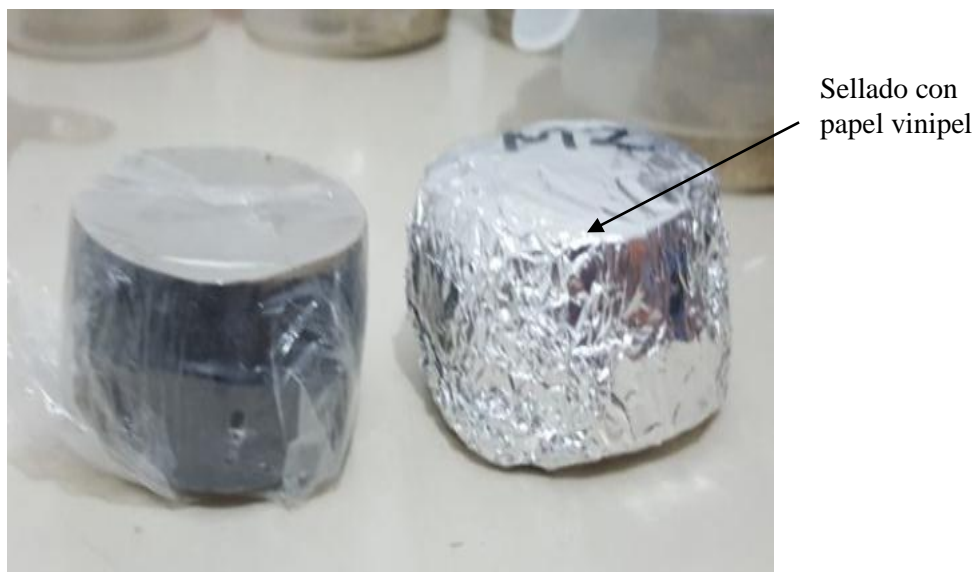


Figura 3.16. Sellado de la muestra con papel vinipel (MTL Geotecnia, 2018).

Estas muestras se almacenan en recipientes sellados que ayuda a mantener la temperatura constante y finalmente éstas se almacenaron en una cámara hermética de control de temperatura con la cual se tenía mayor control de la humedad y temperatura (a una temperatura constante de  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ), estas temperaturas deberán mantenerse

constantes por un lapso de 7 días, para permitir el equilibrio entre el suelo, el papel filtro y el aire. (Figura 3.17).



Figura 3.17. Almacenamiento de los recipientes con las muestras en el interior y control de la temperatura en la cámara hermética (MTL Geotecnia, 2018).

Estas muestras después de dejarlo en equilibrio de vapor aproximadamente 7 días, luego se hace el proceso contrario, se saca el recipiente sellado de la cámara hermética para luego extraer la muestra (Figura 3.18), se extrae el papel filtro y a éste se le determina la humedad, cuidadosamente el papel filtro se pesa en una balanza de precisión de 0.0001 gr (Figura 3.19) y éste se seca a una temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ ,

un tiempo aproximado de 2 horas, igualmente se supervisa el secado debido a la fácil calcinación del papel, para luego extraer el papel filtro del horno y determinar su humedad con la una balanza de precisión de 0.0001 gr (Figura 3.20).



*Figura 3.18.* Extracción de la muestra de la cámara hermética (MTL Geotecnia, 2018).

Después del tiempo de equilibrio se extraen los papeles filtro superior e inferior del espécimen del suelo y se les determina la humedad gravimétrica para el papel filtro superior y para el papel filtro inferior extraído del espécimen de suelo mediante diferencias entre el peso húmedo y peso seco al horno. Una vez determinada la humedad gravimétrica del papel filtro tanto superior como inferior, se determina la succión matricial del suelo con la ecuación (2.13) y la ecuación (2.14) dependiendo si la humedad gravimétrica o contenido de humedad del papel filtro ( $\omega_f$ ) es mayor o menor a 45.3 %, hallado la succión tanto para la parte superior e inferior se sacó el promedio y con ello se determina la succión para el espécimen de suelo determinado. Los resultados de los 18 puntos ensayados se adjuntaron en el anexo 07.



*Figura 3.19.* Peso del papel filtro en la balanza de precisión de 0.0001 gr, después de extraer del recipiente sellado (MTL Geotecnia, 2018).



*Figura 3.20.* Peso del papel filtro en la balanza de precisión de 0.0001 gr, después de extraer del horno (MTL Geotecnia, 2018).

Para esta investigación se trabajó haciendo variar las humedades, partiendo de la humedad natural inicial ( $\omega=40.20\%$  con un grado de saturación de  $S=87.92\%$ ) primeramente haciéndolo llegar hasta la saturación total del material, esto se realizó dejando el material en un recipiente con el agua requerida para su saturación por capilaridad como se muestra en la figura 3.21 en un cuarto de temperatura constante para llegar al grado de saturación que se deseaba para luego realizar el ensayo de succión por el método de papel filtro descrito anteriormente para ese espécimen de suelo y hallar la succión para ese espécimen de suelo y luego hallar su humedad (o grado de saturación) de dicho espécimen para generar el primer punto de la curva característica.



*Figura 3.21.* Saturación de la muestra por capilaridad (MTL Geotecnia, 2018).

Para generar el resto de los puntos de la curva característica por desecamiento (o secado), se dejaron secar los especímenes del suelo preparados al aire libre para diferentes tiempos (6,12,18,24,32,40,48,56,64,72,84,96,108,120,144,168,192 horas), hasta llegar al grado de saturación mínima, para luego realizar el ensayo del método del papel filtro para determinar indirectamente la succión descrito anteriormente para

el resto de especímenes de suelo preparados, luego calcular la humedad(o grado de saturación) de los especímenes de suelo preparados por gravimetría, para así encontrar el resto de puntos para generar la curva característica por desecamiento. Para esta investigación se obtuvieron 18 puntos, y el resumen de los resultados de estos ensayos se muestra en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Datos obtenidos del ensayo por el método del papel filtro  
(Elaboración propia, 2018).

<b>N° DE PUNTOS</b>	<b>PRUEBA N°</b>	<b>HUMEDAD (%)</b>	<b>GRADO DE SATURACION (S)</b>	<b>SUCCIÓN (kPa)</b>
1	P16	6.077	0.246	32722.944
2	P18	8.378	0.321	15938.847
3	P15	9.485	0.354	8432.031
4	P17	14.981	0.496	4047.3583
5	P1	19.386	0.589	2297.559
6	P2	21.383	0.626	1860.983
7	P3	23.850	0.669	1973.491
8	P4	26.483	0.710	1427.356
9	P5	29.037	0.747	1125.269
10	P6	31.102	0.775	1332.775
11	P7	34.850	0.821	787.650
12	P8	38.142	0.858	516.952
13	P9	40.036	0.878	120.065
14	P10	42.087	0.898	59.724
15	P11	44.381	0.919	44.982
16	P12	46.023	0.933	31.156
17	P13	46.856	0.941	39.225
18	P14	47.848	0.949	39.776

Los equipos y/o materiales usados son:

- Equipos para medir el contenido de humedad (espátula, tinas, balanza, horno, hojas de cálculo, etc.).
- Balanza analítica con lecturas de hasta 0,0001 g, capacidad mínima 10 g.

- Recipientes de aluminio o latón.
- Termómetro 0-40° C, con una precisión de 0,1°.
- Papeles de filtro Whatman N° 42 de 125 mm de diámetro.
- Alternativa de bolsa de plástico.
- Papel vinipel.
- Recipiente sellado, impermeable, para guardar las muestras.
- Bolsa pequeña de polietileno con cierre hermético.
- Pinzas.
- Cepillo.
- Lápiz de grafito, marcador indeleble.
- Cinta aislante.
- Cámara hermética.
- Desecador.

### **3.4 Herramientas computacionales.**

Las herramientas computacionales para realizar la caracterización geotécnica se usó la hoja de cálculo de Microsoft Excel. Para la determinación de la curva característica se usó el Solver de Microsoft Excel, es una herramienta para resolver y optimizar las ecuaciones mediante el uso de técnicas numéricas. Permite optimizar funciones de una o más variables, con o sin restricciones.

En esta investigación se diseñó una hoja de cálculo, en donde se designaron ciertas columnas para datos de laboratorio de succión y grado de saturación, grado de saturación a predecir, parámetros de ajuste, función objetivo, expresión matemática del modelo propuesto y gráfica en donde aparecen tanto los datos de laboratorio como la curva de ajuste obtenida con el modelo. Una vez se introducen los datos de

laboratorio y los valores iniciales de los parámetros (ver cuadro 3.2), se presiona el botón de la función objetivo y resuelve de tal forma que se obtengan los valores de los parámetros que ajustan mejor los datos de laboratorio.

Cuadro 3.2. Valores iniciales de los parámetros de ajuste (SoilVision®, RETC, IMT).

VALORES INICIALES DE LOS PARAMETROS DE AJUSTE								
MODELOS	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	m	$\gamma$	$\Psi^*$	$\Psi_r$
Van Genuchten	0.068	0.38	0.008	1.09	0.08256	-	-	-
Van genuchten - Burdine	0.068	0.38	0.008	2.05	0.02439	-	-	-
Van genuchten - Mualem	0.068	0.38	0.008	1.09	0.0741	-	-	-
Gardner	-	0.38	0.008	1.09	-	-	-	-
Fredlung y Xing	-	-	80	0.7	0.8	-	-	3000
Proporcionalidad natural	-	-	-			-1	1000	

La celda denominada función objetivo hace uso de la función de EXCEL llamada “sumaxmenosy2”, la cual suma los cuadrados de la diferencia en dos rangos: la matriz\_X, que está conformada por todos los valores del grado de saturación obtenidos en las mediciones y la matriz\_Y, formada por los valores de grado de saturación pronosticados con el modelo empírico, cuando se ejecuta la función objetivo del Solver se optimiza la distancia entre los datos de medición y los datos pronosticados para que se generen los parámetros óptimos del modelo.

Para ejecutar la “función objetivo” de Solver, se presiona la celda objetivo y ésta muestra una ventana llamada “Parámetros de Solver” con las siguientes opciones: “Establecer objetivo”, en ella se coloca la ubicación de la celda objetivo; después aparece una condición con tres sugerencias: Máx, Mín y Valor de. Se selecciona Mín porque se requiere la mínima diferencia entre los datos de medición y los del modelo. Después se asignan las celdas donde se localizan los parámetros del modelo y por último, el método de resolución: Se selecciona GRG Nonlinear (Método Numérico del Gradiente Reducido Generalizado) para problemas de Solver no lineales suavizados, LP Simplex, para problemas de Solver lineales y Evolutionary para problemas de

Solver no lineales no suavizados, para nuestro caso se seleccionó GRGNonlinear (Figura 3.21). Se presiona resolver y a continuación aparece una pantalla denominada “Resultados de Solver” describiendo lo siguiente: “Solver encontró una solución. se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas” (Figura 3.22). Se selecciona aceptar y Solver proporciona los parámetros para los cuales la diferencia entre los puntos de medición y los descritos por el método coinciden en su mínima diferencia (Figura 3.23).

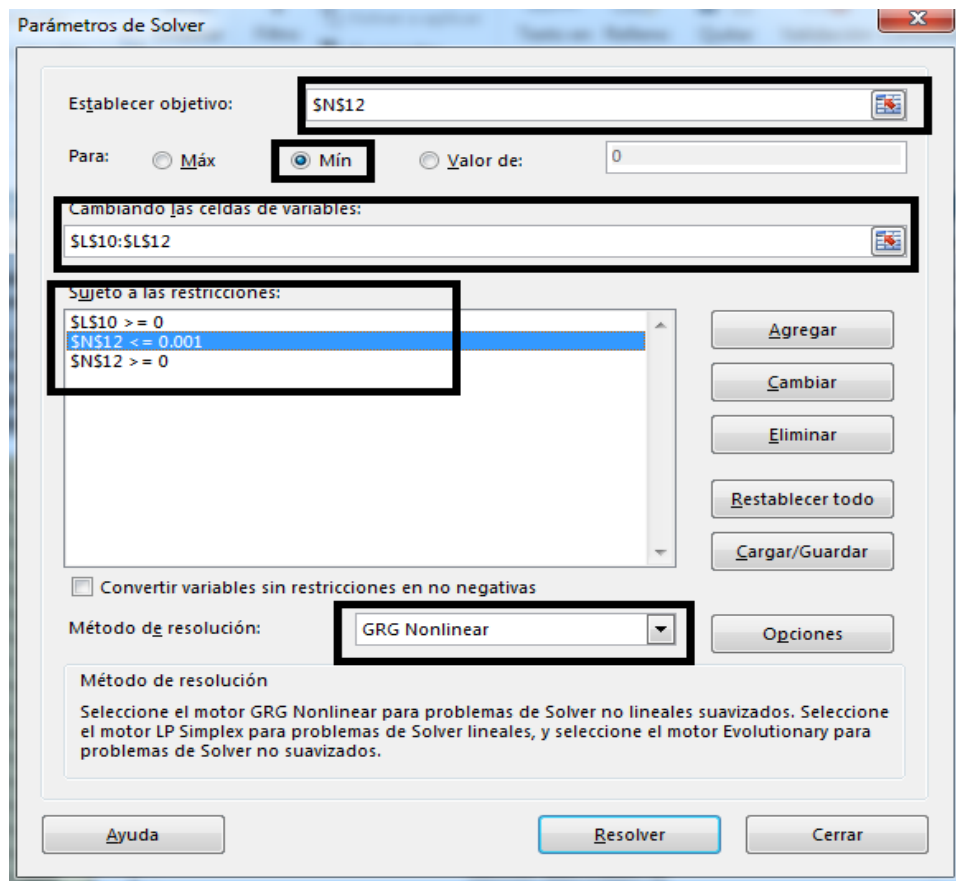


Figura 3.22. Parámetros del Solver (Elaboración propia, 2018).

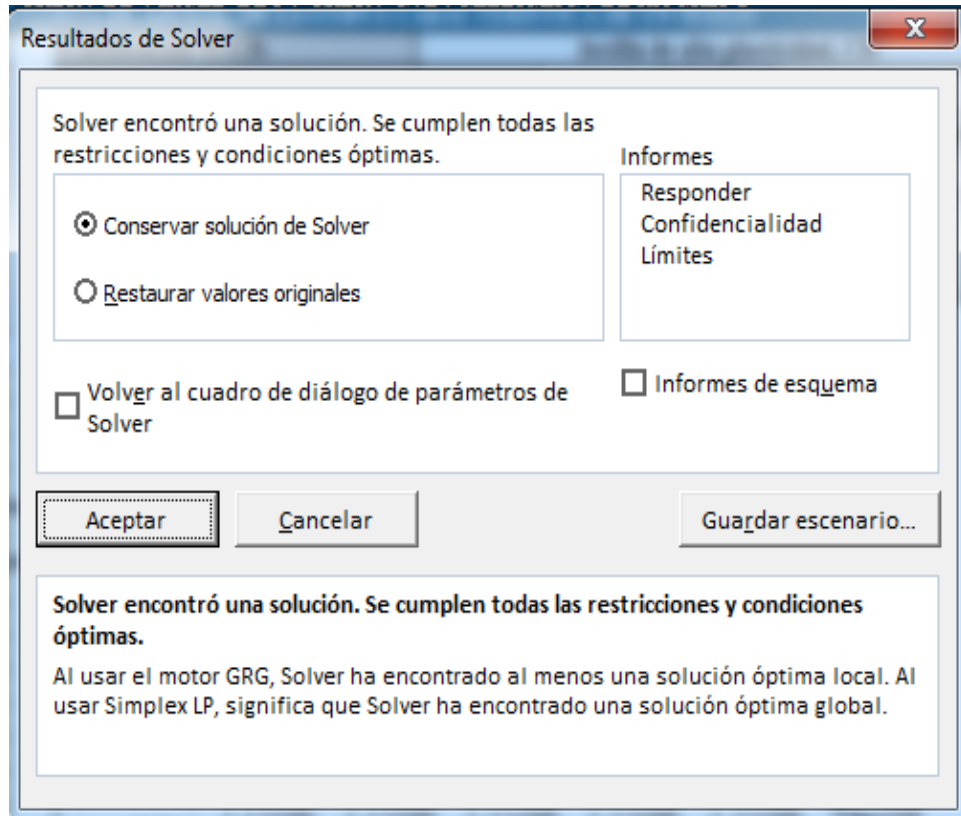


Figura 3.23. Ventana con los resultados del Solver (Elaboración propia, 2018).

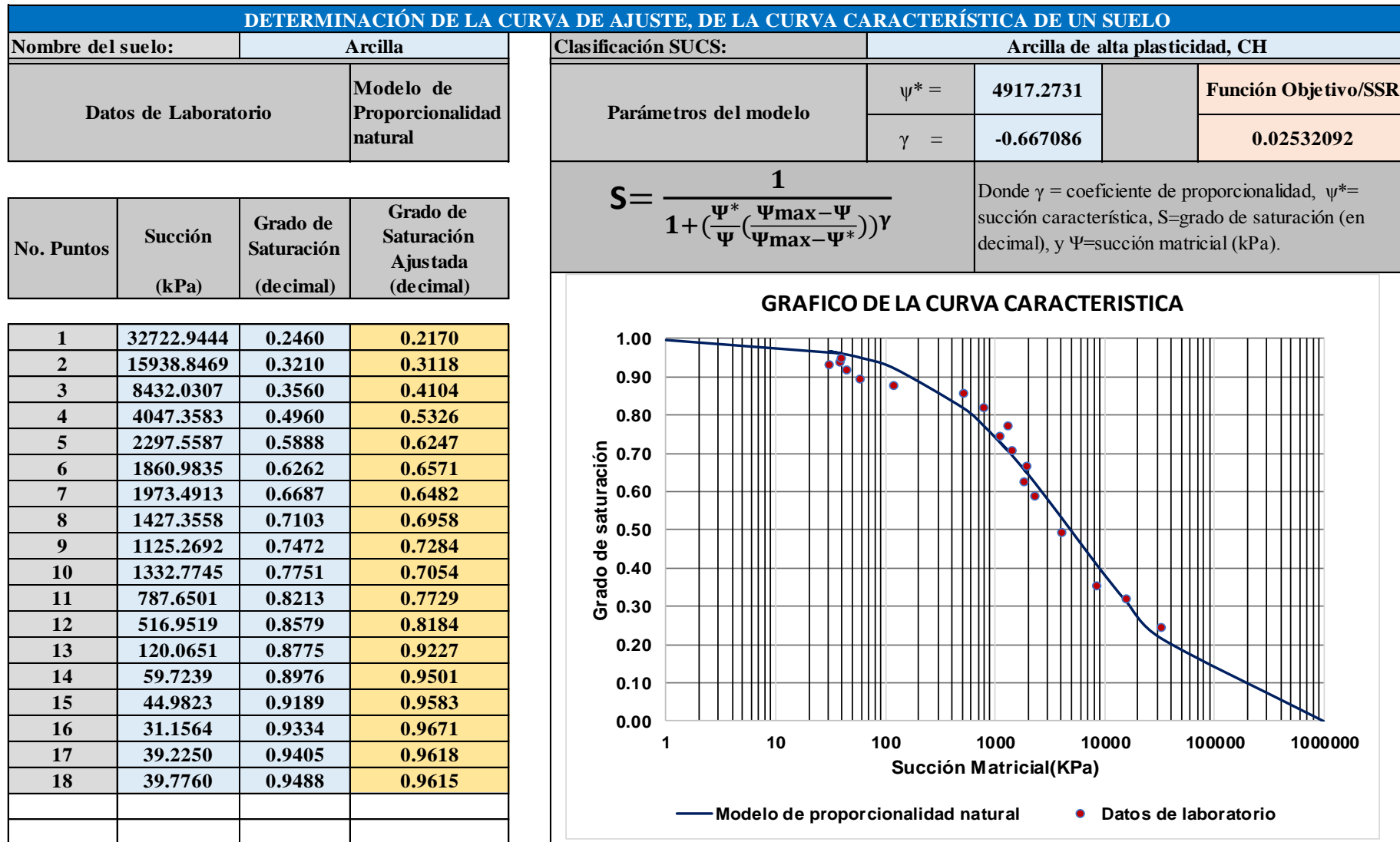


Figura 3.24. Curva de ajuste obtenida con los parámetros obtenidos con el Solver (Elaboración propia, 2018).

## CAPITULO IV

### RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Caracterización geotécnica del suelo utilizado

La caracterización del suelo de Mayocc-Huancavelica, se inició con el muestreo *in situ*, la profundidad de muestreo. En un estudio geotécnico convencional se elige de acuerdo al material requerido. En este caso fue una profundidad de 3.00 para esta investigación se tomaron varias muestras de suelo inalterado en Mayocc-Huancavelica. Las muestras obtenidas fueron tratadas con bolsas herméticas selladas y se almacenaron en un cuarto de humedad para su preservación según recomienda la norma debidamente etiquetadas para su posterior identificación.

Cuadro 4.1. Propiedades geotécnicas del suelo (Elaboración propia, 2018).

Propiedad	Valor
Límite Líquido(%)	99.24
Límite Plástico(%)	37.46
Índice Plástico(%)	61.78
Límite de contracción(%)	9.1
Gravedad específica	2.466
Humedad natural(%)	40.2
Finos(%)	97.88
Arenas(%)	2.12
Gravas(%)	0
Peso volumétrico(gr/cm <sup>3</sup> )	1.63
Grado de saturación(%)	87.92
% de arcilla(%)	87.60

Con estas muestras se realizaron pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades geotécnicas e índice; las cuales son reportadas en el cuadro 4.1.

Las propiedades índice (LL, LP, IP y humedad natural) reportadas en el cuadro 4.1 permiten a los ingenieros darse una idea muy buena del tipo de suelo con el que se trabaja (Figura 4.1 y Figura 4.2).

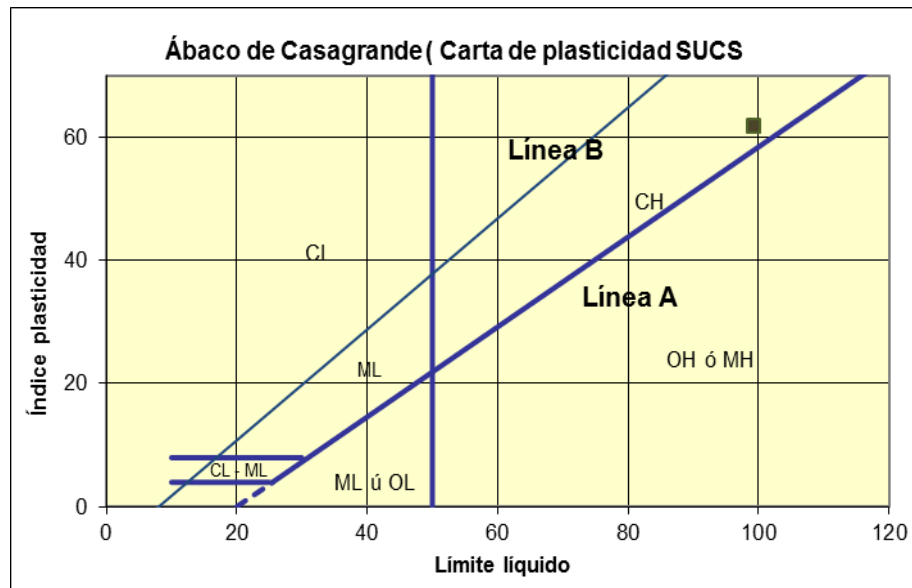


Figura 4.1. Carta de plasticidad SUCS modificado con la clasificación del suelo en estudio (Elaboración propia, 2018).

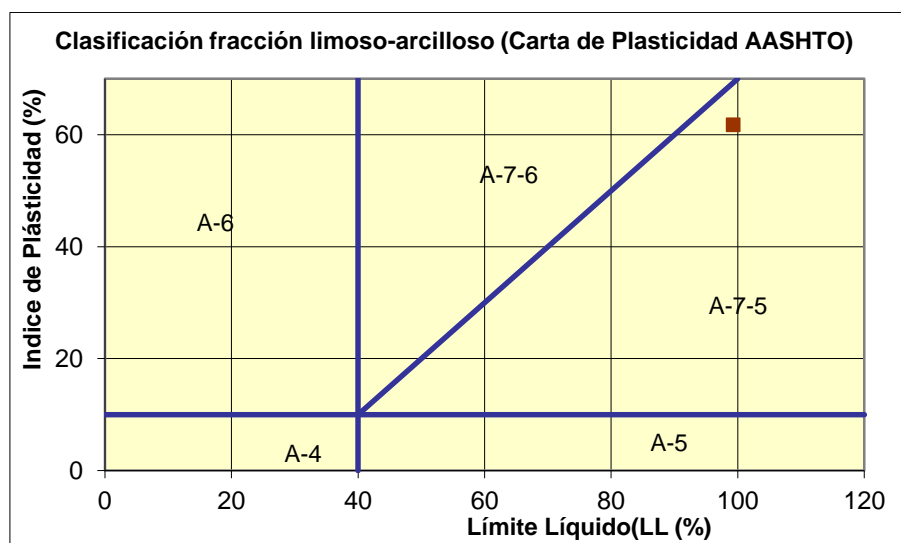


Figura 4.2. Carta de plasticidad AASHTO modificado con la clasificación del suelo en estudio (Elaboración propia, 2018).

De acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), el suelo estudiado se trata de una arcilla inorgánica (CH) y para el AASHTO se trata de una arcilla de alta plasticidad (A-7-5), en otras palabras se trata de una arcilla inorgánica de alta plasticidad debido a que su LL es mayor a 50%, esto significa que en condiciones extremas de humedad, puede retener enormes cantidades de agua por lo que se deduce que es un suelo que puede llegar a tener una gran porosidad. El suelo se encuentra en estado parcialmente saturado o no saturado y su grado de saturación es alta.

Los límites de consistencia reportadas en el cuadro 4.1 definen la cantidad de minerales arcillosos que posee un suelo, a mayor cantidad de minerales arcillosos el suelo se comporta de manera más fluida, deformándose continuamente y perdiendo propiedades como resistencia al corte, está fuertemente ligada al contenido de agua además sus granos finos generan grandes superficies específicas con respecto a otros materiales. Los datos obtenidos experimentalmente se ajustan a los rangos de límite líquido y plástico (Cuadro 2.1) presentados para el mineral montmorillonita y illita. Es un mineral arcilloso con mayor capacidad para expandirse y contraerse. Por otra parte un alto índice de plasticidad indica que la arcilla necesita un alto cambio en su contenido de agua para cambiar de estado semisólido a plástico.

El límite de contracción se evaluó para encontrar la posibilidad del desarrollo de grietas en el material cuyo valor está reportado en el cuadro 4.1. Los límites de contracción altos, mayores a 6%, representan suelos arcillosos de granos finos altamente activos o indican la susceptibilidad para transformarse en un fluido viscoso, el límite de contracción del material estudiado para esta investigación es alto.

Se hizo indispensable mirar el comportamiento de las arcillas y determinar la distribución de tamaño de partícula finas por medio del ensayo de granulometría por sedimentación (Figura 4.3), para esta muestra representativa del material se obtuvo que el 87.60% de las partículas tenían tamaño de partículas correspondientes a arcilla y el resto es material limoso.

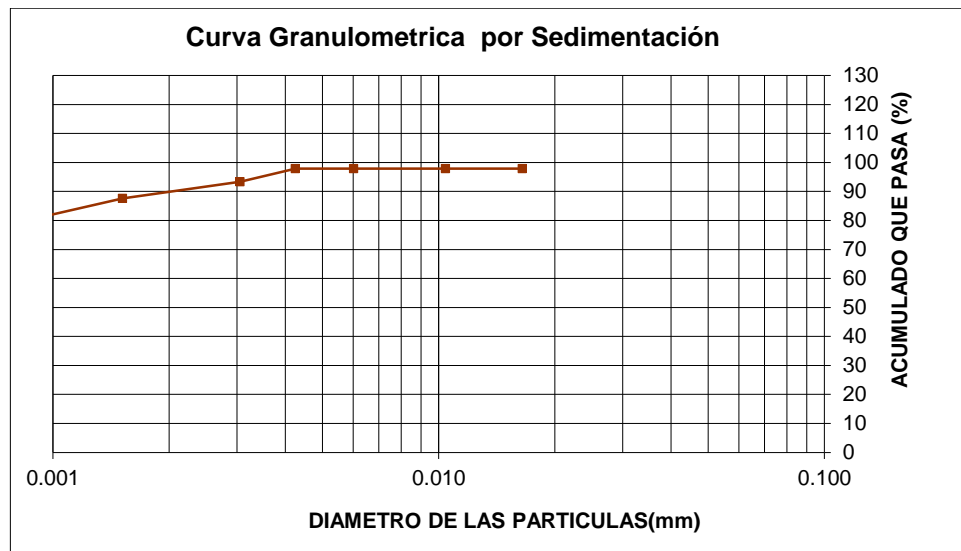


Figura 4.3. Curva granulométrica por sedimentación (Elaboración propia, 2018).

Los minerales arcillosos se caracterizan por tener suficiente potencial para retener contenidos de agua y desarrollar así su plasticidad. La actividad de Skempton, es un concepto que relaciona el índice de plasticidad y el porcentaje de partículas arcillosas del material menor a  $2\mu\text{m}$  (0.002 mm). De esta forma, para el 87.6% de contenido de arcilla obtenido en la curva granulométrica por sedimentación realizada y el IP calculado y reportado en el cuadro 4.1, la arcilla presenta una actividad de 0.705 calculada con la ecuación 2.9, actividad típica para montmorillonita o presenta las propiedades características de una arcilla del tipo montmorillonita según lo reporta la literatura (Cuadro 2.2).

#### 4.2 Determinación de la curva característica por desecamiento de la arcilla estudiada.

La curva característica de la arcilla obtenida por medio de la prueba de papel filtro para medir la succión se realizó con el papel filtro Wathman N° 42 con el tamaño de 5.5 cm de diámetro indicado en la norma ASTM D 5298. Los resultados del ensayo se muestran en el cuadro 3.1 y se adjunta en el anexo 07. En este apartado se muestran las diferentes curvas características por desecamiento obtenidas para esta tesis,

##### 4.2.1 Determinación de la curva característica experimentalmente.

Podemos observar a continuación en la figura 4.4 la curva característica experimental obtenida en términos de succión contra grado de saturación en la figura

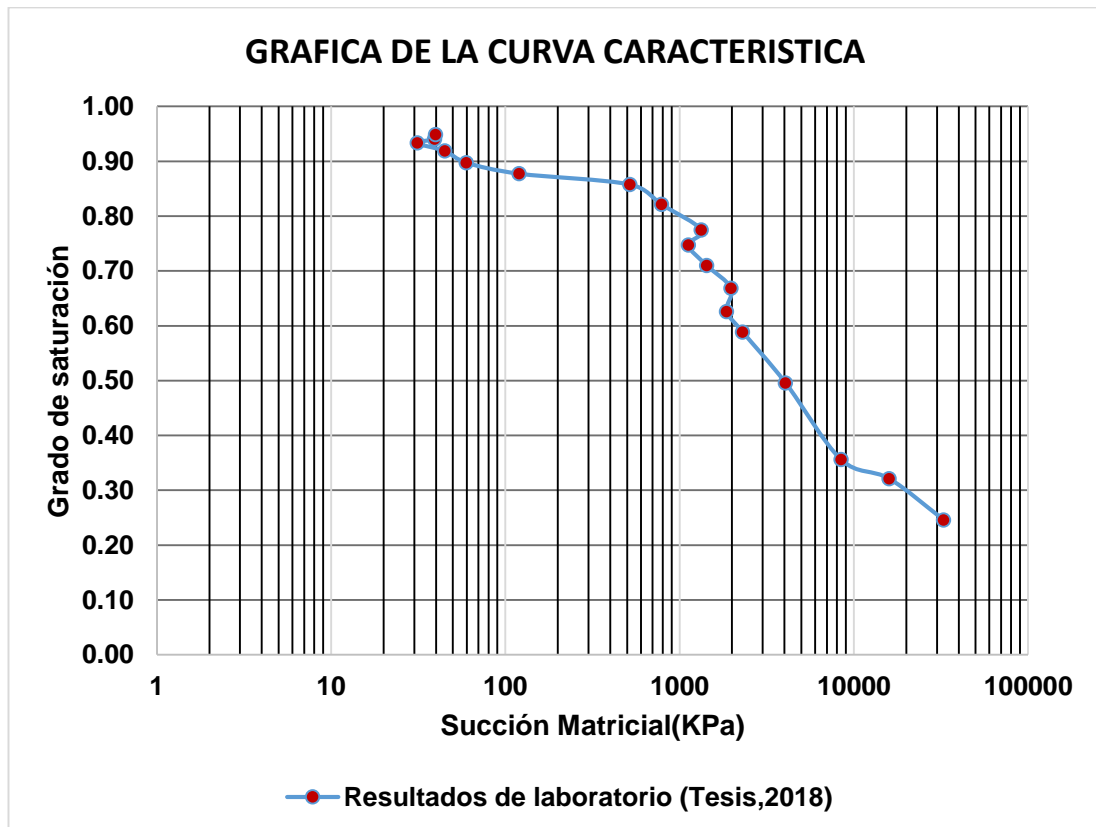


Figura 4.4. Curva característica en términos grado de saturación y succión de la arcilla por desecamiento obtenida experimentalmente (Elaboración propia, 2018).

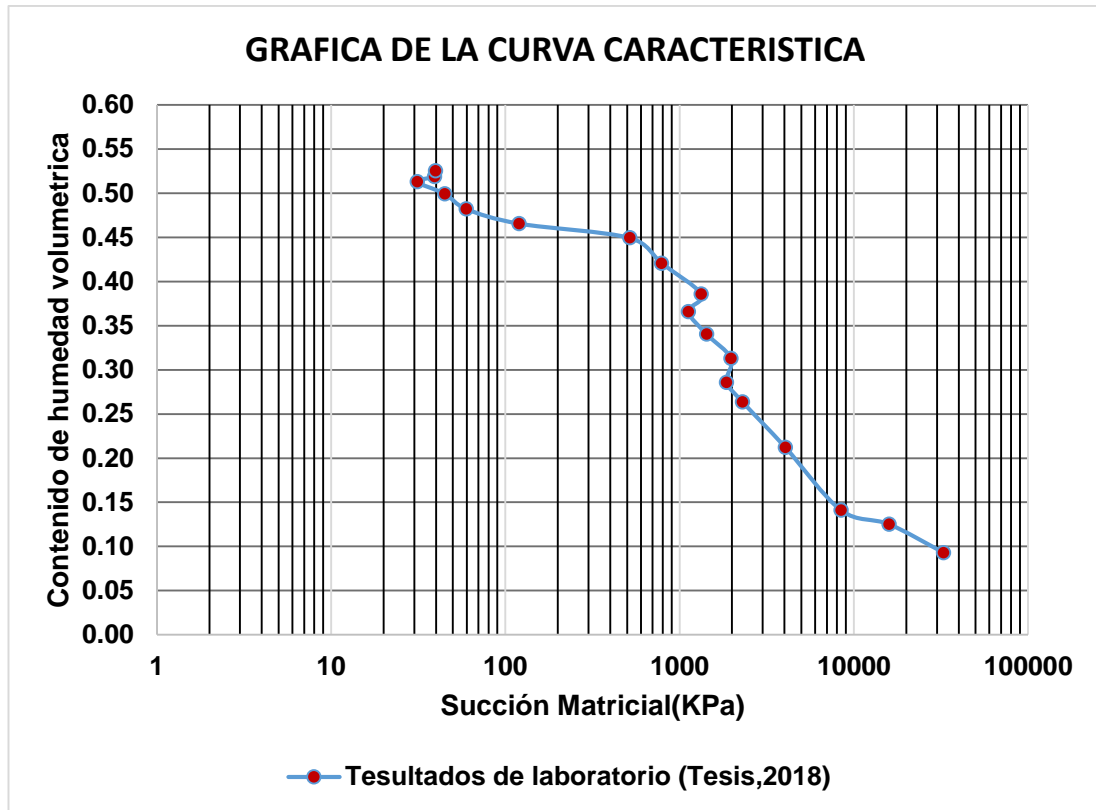


Figura 4.5. Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión de la arcilla por desecamiento obtenida experimentalmente (Elaboración propia, 2018).

4.5 la curva característica experimental obtenidas en términos de contenido de humedad volumétrica, del cual se observa que los valores encontrados para la arcilla estudiada en este trabajo de investigación de la succión matricial se encuentran entre 30 kPa y 30 000 kPa.

#### 4.2.2 Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten.

En este apartado se muestra la curva característica por desecamiento simulada por la ecuación de Van Genuchten explicadas en el ítem 2.4.5.2, obtenidas en términos de succión contra contenido de humedad volumétrica como se muestra en la figura 4.6 y se adjuntó en el anexo 09, también se realizó la simulación de la curva característica

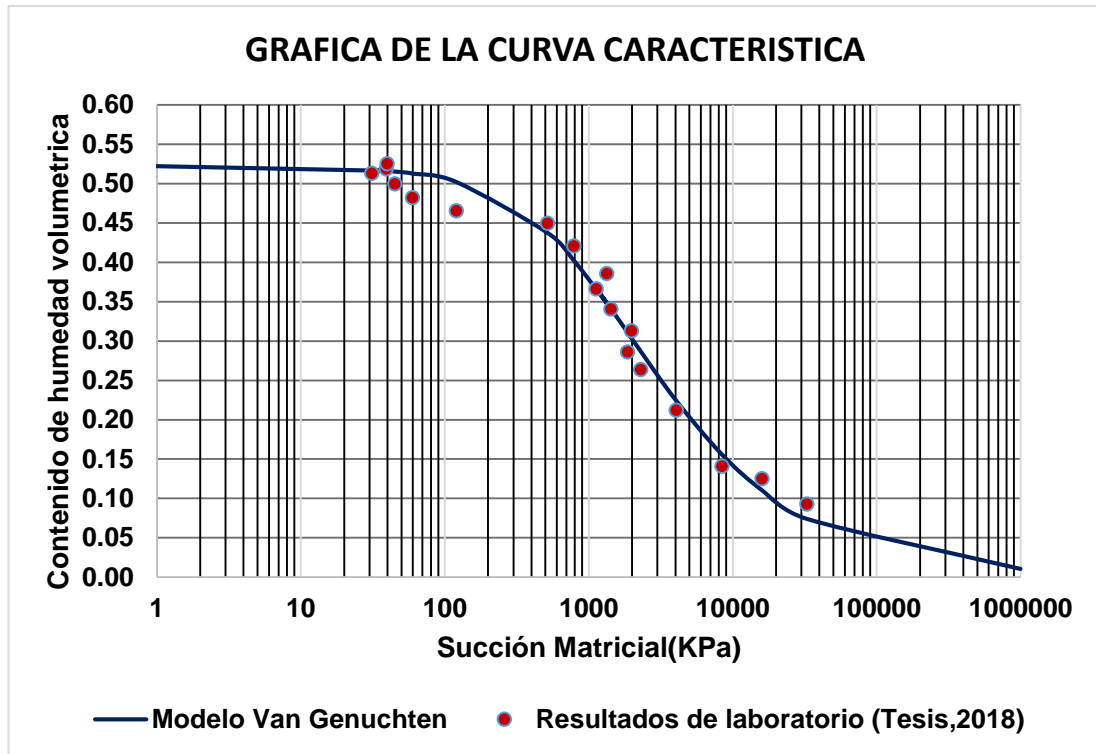


Figura 4.6. Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).

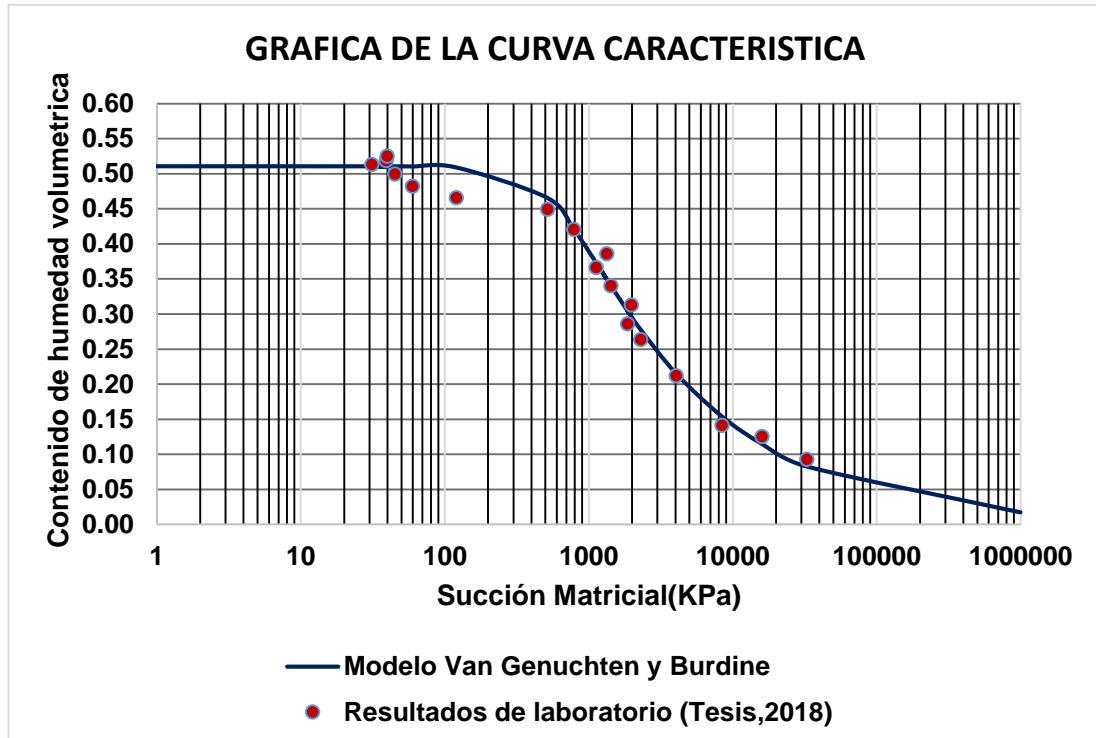


Figura 4.7. Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Van Genuchten y Burdine (Elaboración propia, 2018).

por desecamiento con la ecuación de Van Genuchten combinada con la ecuación propuesta por Burdine (ecuación 2.19) como se muestra en la figura 4.7 y se adjuntó en el anexo 10, además se realizó la simulación de la curva característica por desecamiento con la ecuación de Van Genuchten combinada con la ecuación propuesta por Mualem (ecuación 2.20) como se muestra en la figura 4.8 y se adjuntó en el anexo 11.

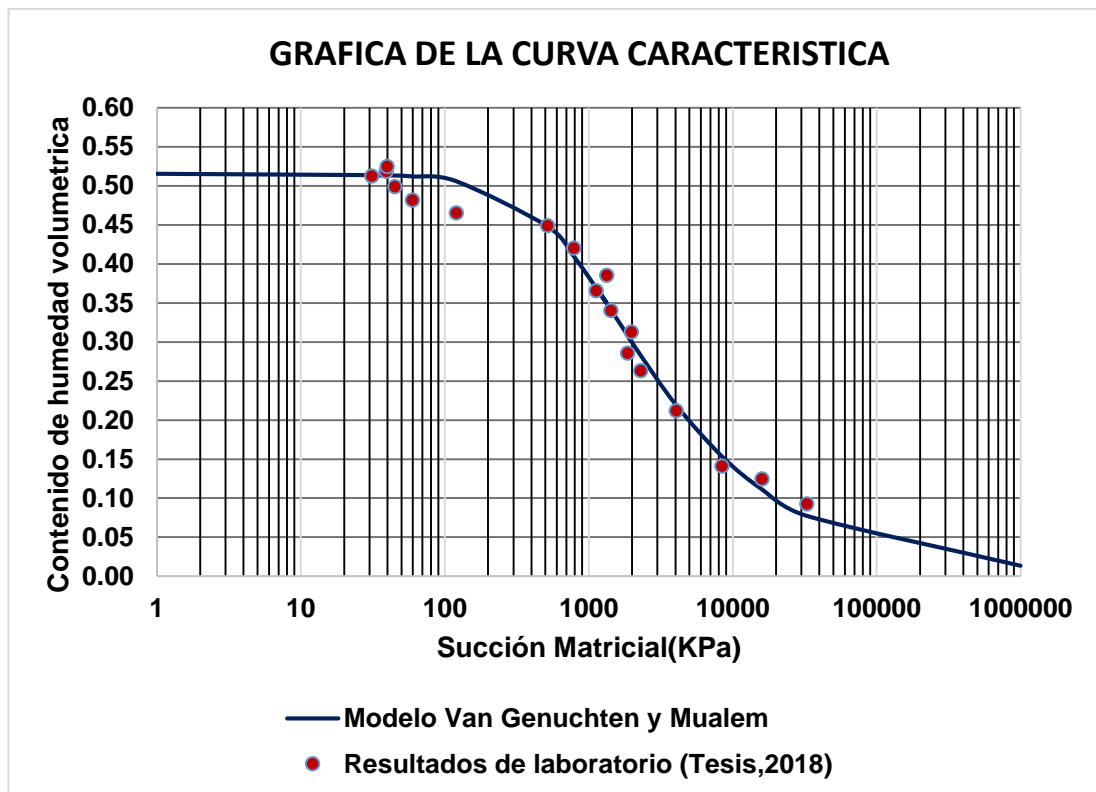


Figura 4.8. Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Van Genuchten y Mualem (Elaboración propia, 2018).

En el cuadro 4.2 se muestran los parámetros de ajuste o modelación de la curva característica obtenidas por el modelo de Van Genuchten -Burdine-Mualem, del cual observamos que de los tres modelos, el que mejor se ajusta es el modelo de Van Genuchten, ya que la SRR (suma de residuos cuadráticos) es la menor de las tres.

Cuadro 4.2. Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Van Genuchten-Burdine-Mualem (Elaboración propia, 2018).

Modelo	$\alpha$	n	m	SSR
Van Genuchten	0.0009	1.1274	0.5123	9.53E-03
Van genuchten y Burdine	0.0016	2.4592	0.1867	1.03E-02
Van genuchten y Mualem	0.0012	1.5114	0.3384	9.64E-03

#### 4.2.3 Determinación de la curva característica por el modelo de Gardner

En este apartado se muestra la curva característica por desecamiento simulada por la ecuación de Gardner explicadas en el ítem 2.4.5.1, obtenidas en términos de succión contra contenido de humedad volumétrica como se muestra en la figura 4.9 y se adjuntó en el anexo 12.

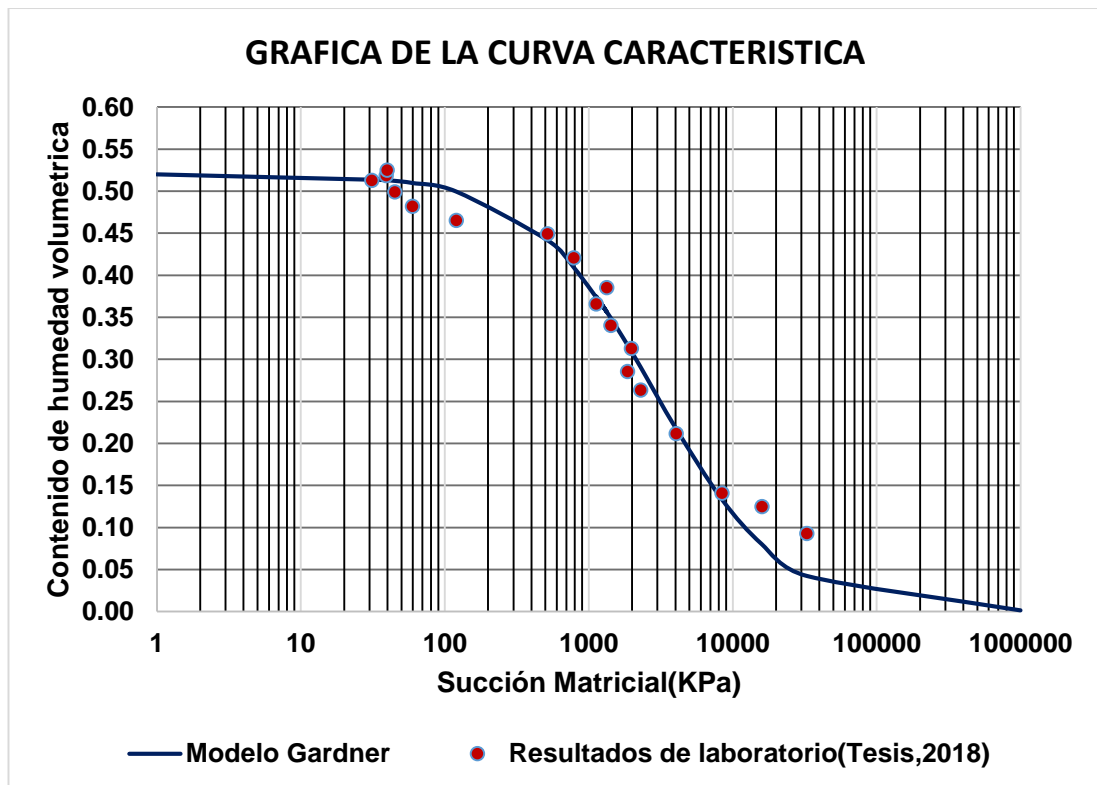


Figura 4.9. Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Gardner (Elaboración propia, 2018).

En el cuadro 4.3 se muestran los parámetros de ajuste o modelación de la curva característica obtenidas por el modelo de Gardner.

Cuadro 4.3. Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Gardner (Elaboración propia, 2018).

Modelo	$\alpha$	n	SSR
Gardner	0.0006	1.07	1.28E-02

#### 4.2.4 Determinación de la curva característica por el modelo de la proporcionalidad natural

En este apartado se muestra la simulación de la curva característica por desecamiento con la ecuación del modelo de la proporcionalidad natural explicada en el ítem 2.4.5.3, en términos de la succión y grado de saturación tal como se muestra en la figura 4.10 y se adjuntó en el anexo 13.

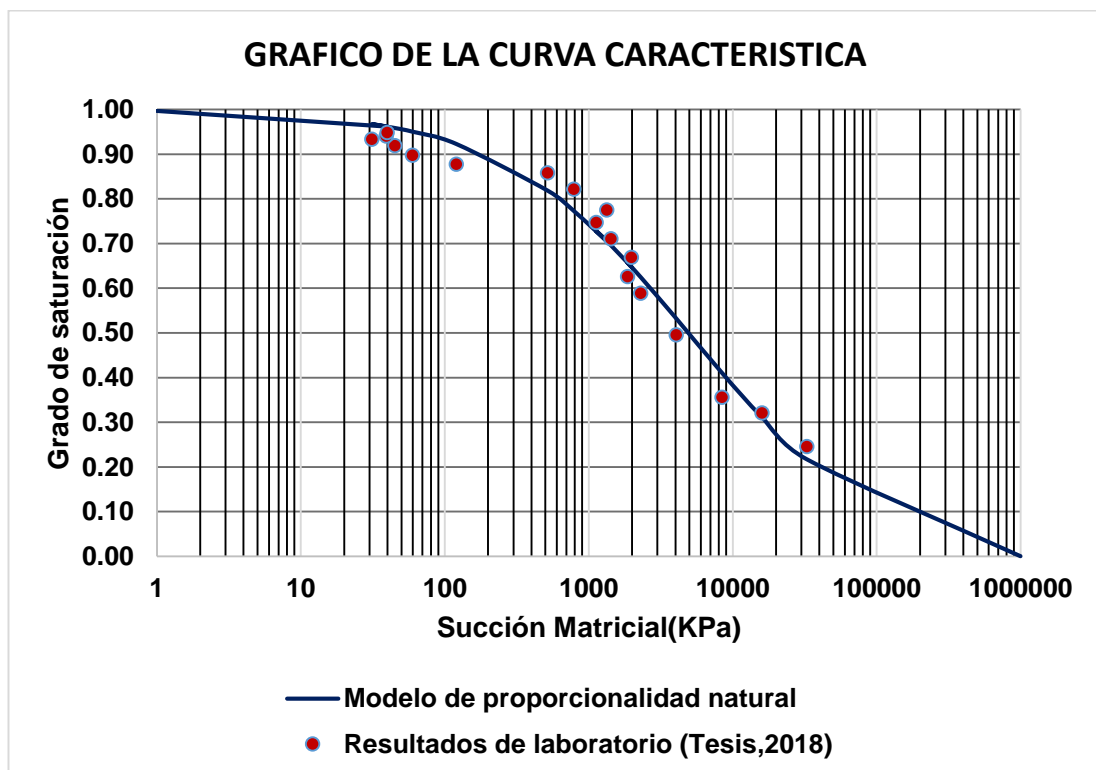


Figura 4.10. Curva característica en términos de succión y grado de saturación por desecamiento simulada con la ecuación del modelo de la proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).

En el cuadro 4.4 se muestran los parámetros de ajuste o modelación de la curva característica obtenidas por el modelo de la proporcionalidad natural.

Cuadro 4.4. Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de la proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).

Modelo	$\psi^*$ (kPa)	$\gamma$	SSR
Proporcionalidad natural	4917.2731	-0.6671	2.53E-02

#### 4.2.5 Determinación de la curva característica por el modelo de Fredlung y Xing

En este apartado se muestra la curva característica por desecamiento simulada por la ecuación de Fredlung y Xing explicada en el ítem 2.4.5.4, obtenidas en términos de succión contra contenido de humedad volumétrica como se muestra en la figura 4.11 y se adjuntó en el anexo 08.

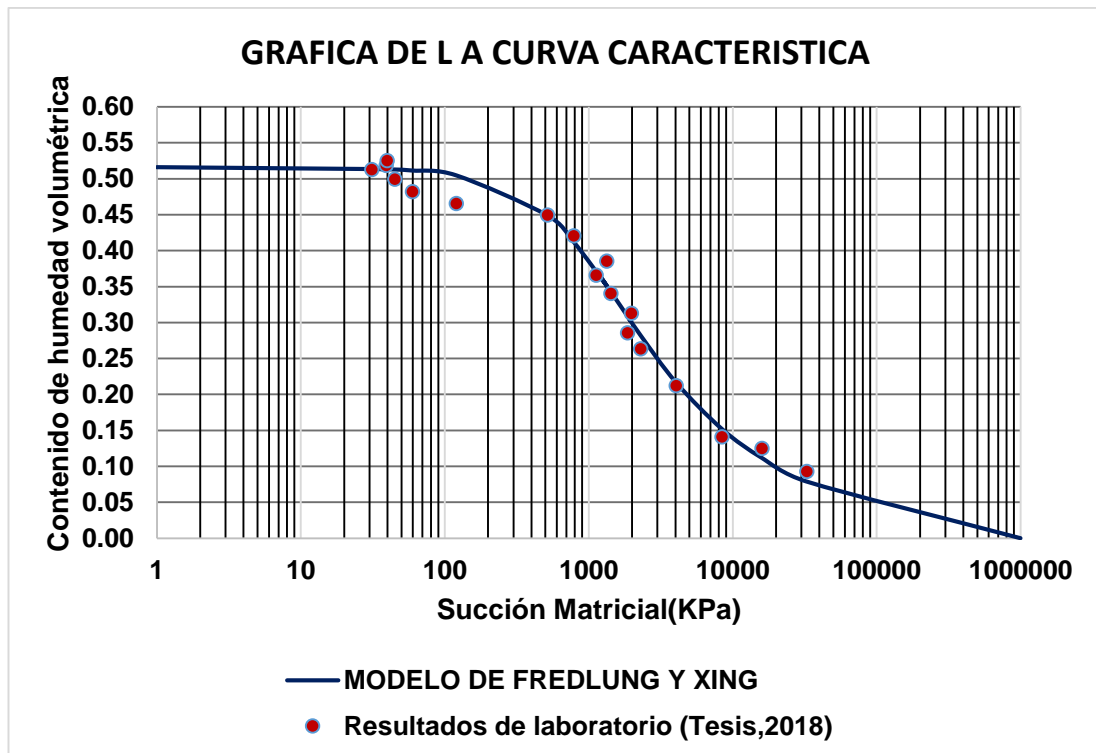


Figura 4.11. Curva característica en términos de contenido de humedad volumétrica y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

En el cuadro 4.5 se muestran los parámetros de ajuste o modelación de la curva característica obtenidas por el modelo de Fredlung y Xing.

Cuadro 4.5. Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

Modelo	$\alpha$	n	m	SSR
Fredlung y Xing	924.6107	1.4381	0.8078	8.97E-03

#### 4.2.6 Determinación de la curva característica por el modelo de Zapata

En este apartado se muestra la simulación de la curva característica por desecamiento hecha por la ecuación de Zapata explicada en el ítem 2.4.5.5, la ecuación de zapata presenta dos modelos uno es basado en la ecuación de Van Genuchten en términos de la succión y grado de saturación tal como se muestra en la figura 4.12 y

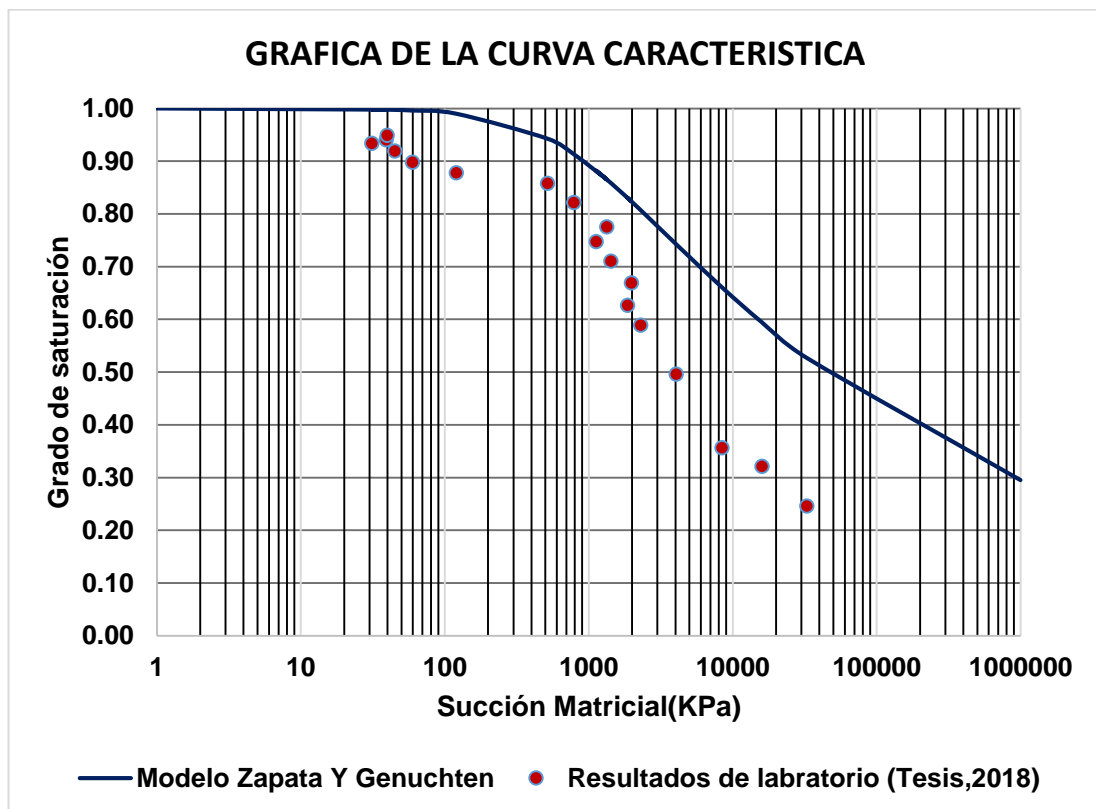


Figura 4.12. Curva característica en términos de grado de saturación y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Zapata basada en la ecuación de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).

se adjuntó en el anexo 14, y el otro está basado en la ecuación de Fredlung y Xing tal como se muestra en la figura 4.13 y se adjuntó en el anexo 15.

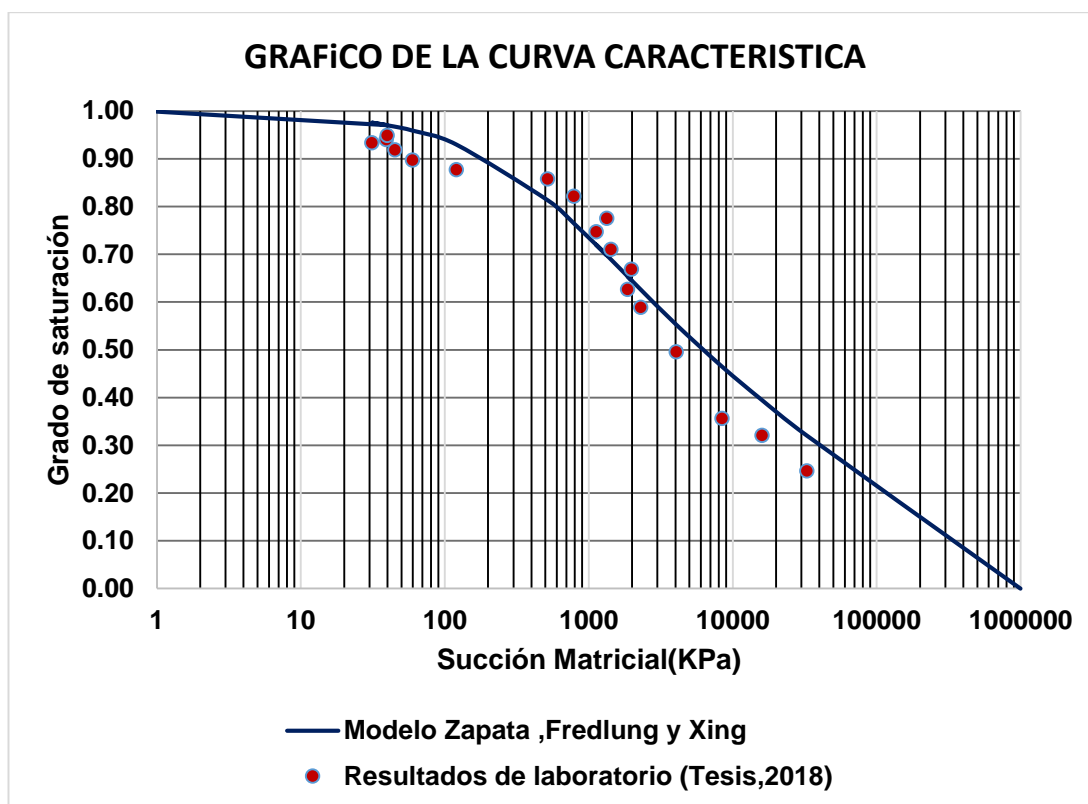


Figura 4.13. Curva característica en términos de grado de saturación y succión por desecamiento simulada con la ecuación de Zapata basada en la ecuación de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

En el cuadro 4.6 se muestran los parámetros de ajuste o modelación de la curva característica obtenidas por el modelo de Zapata-Van Genuchten-Fredlung y Xing, del cual observamos que de los dos modelos, el que mejor se ajusta es el modelo de Zapata-Fredlung y Xing, ya que la SRR (suma de residuos cuadráticos) es la menor de las dos, pero de acuerdo a lo que se menciona en el apartado 2.4.5.5 el factor de índice de plasticidad ponderada ( $w_{IP}$ ) para este modelo debe estar en el rango de 0.1 -50, en esta tesis el factor de índice de plasticidad ponderada es 60.47 lo cual está fuera del rango mencionado anteriormente, en conclusión el modelo de Zapata ya sea basada en la ecuación de Van Genuchten o basada en la ecuación de Fredlung y Xing para

determinar la curva característica solo se usará en cálculos iniciales de algún proyecto que la requiera.

Cuadro 4.6. Parámetros obtenidos de la modelación de la curva característica usando la ecuación de Zapata-Van Genuchten-Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

Modelo	a	b	c	SSR
Zapata y Van Genuchten	755.0354	1.3509	0.1257	5.23E-01
Zapata Fredlung y xing	527.2814	0.7552	0.8462	5.31E-02

#### 4.2.7 Superposición de los modelos estudiados para la determinación de la curva característica.

En este apartado se realizó la superposición de los ocho modelos simulados para determinar la curva característica en términos de grado de saturación y succión por desecamiento de la arcilla en estudio (Figura 4.14) para poder realizar una adecuada observación visual y ver qué modelo se ajusta mejor a los datos experimentales determinados en el laboratorio.

Los parámetros propuestos por los diversos autores, mencionados anteriormente, están en función a la inversa del valor de entrada del aire (VEA) del suelo, está en función de la tasa de extracción de agua una vez se ha superado el valor de entrada del aire y está relacionado con las condiciones de agua residual, en el cuadro 4.2, cuadro 4.3, cuadro 4.4, cuadro 4.5 y cuadro 4.6 se muestra los parámetros de ajuste de las curvas características determinados para la arcilla en estudio con su respectivo verificador de la calidad de ajuste(SSR) de las curvas visualizadas anteriormente.

De los ocho modelos simulados y del cuadro 4.2, cuadro 4.3, cuadro 4.4, cuadro 4.5 y cuadro 4.6 se determina que el modelo de Fredlung-Xing y el modelo de Van Genuchten son los que mejor se ajustan a los datos experimentales.

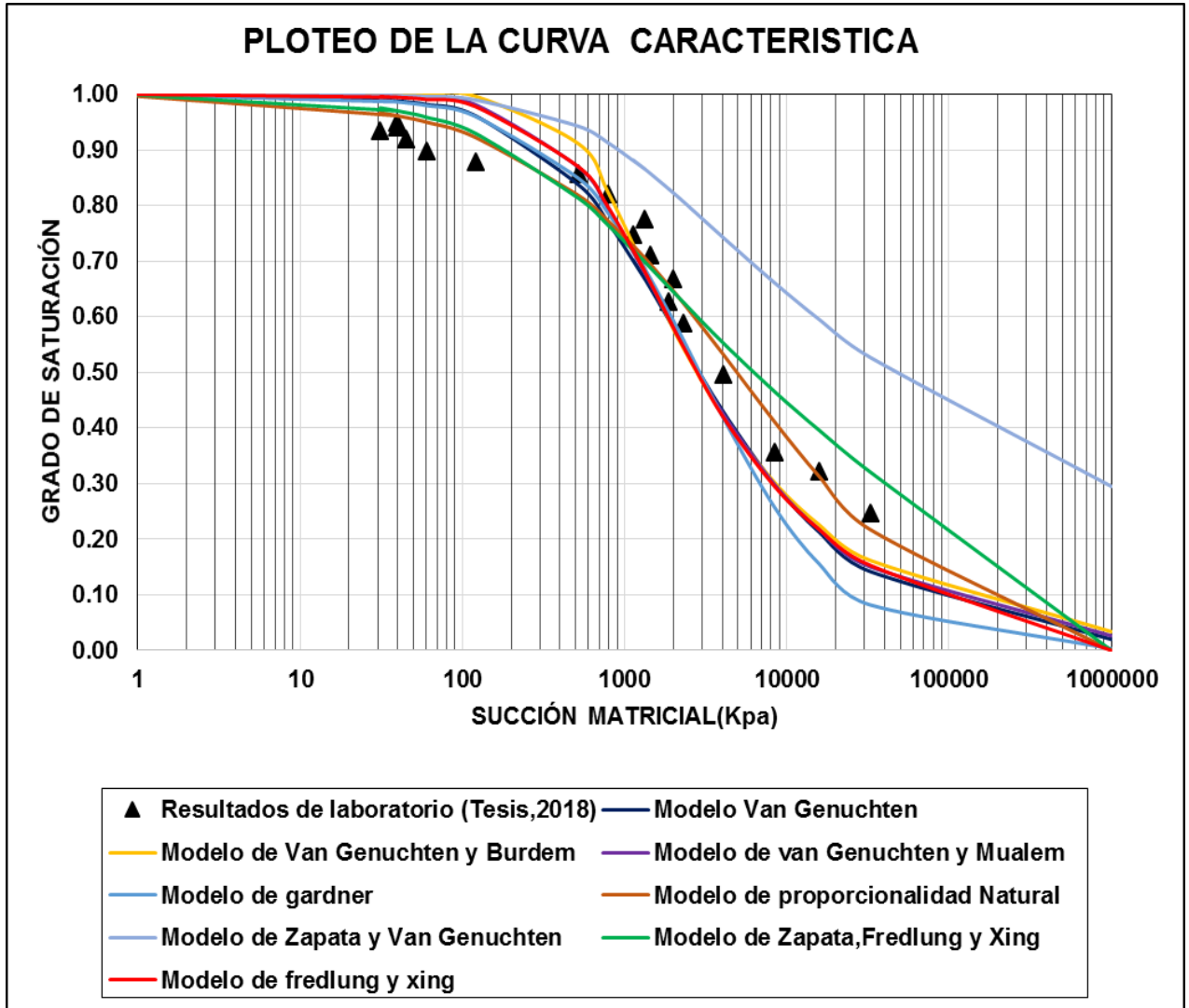


Figura 4.14. Superposición de los ocho modelos estudiados para determinar la curva característica en términos del grado de saturación y succión por desecamiento en la arcilla estudiada (Elaboración propia, 2018).

### 4.3 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica por desecamiento de la arcilla estudiada gráficamente

#### 4.3.1 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Van Genuchten-Burdine-Mualem

En este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de Van Genuchten como se podrá ver en la figura 4.15, del cual se observa que el primer punto de inflexión, el valor de entrada de aire (VEA) es aproximadamente 300 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) es aproximadamente 0.16.

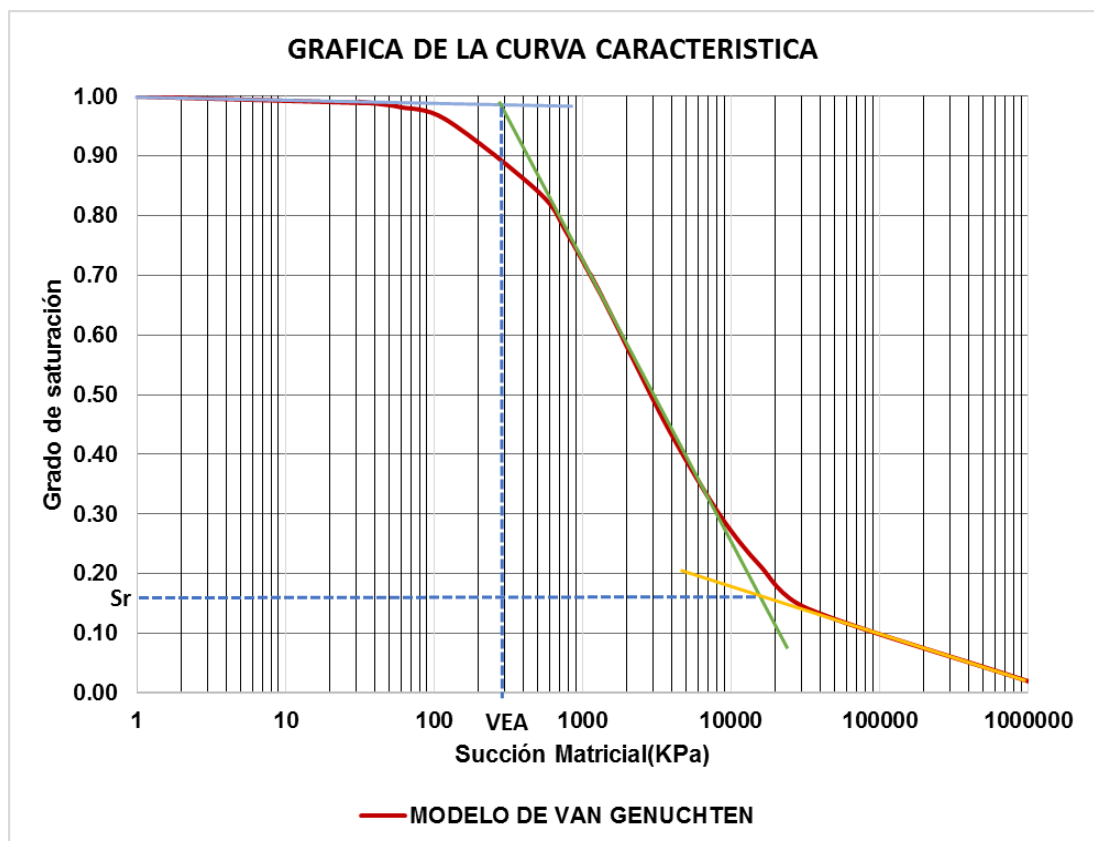


Figura 4.15. Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).

También en este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de Van Genuchten-Burdine como se podrá ver en la figura 4.16, del cual se observa que el primer punto de inflexión, el valor de entrada de aire (VEA) es aproximadamente 400 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) es aproximadamente 0.21.

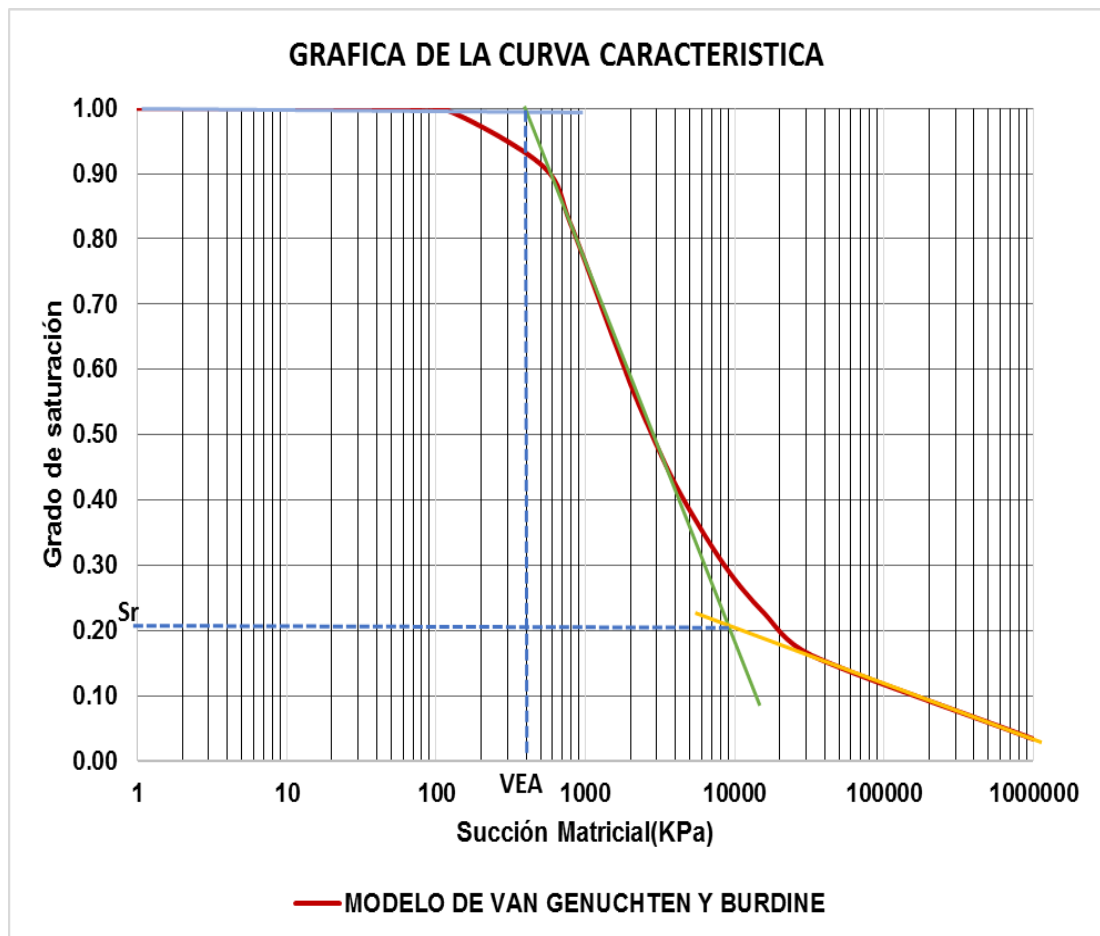


Figura 4.16. Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Van Genuchten-Burdine (Elaboración propia, 2018).

Además en este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de Van Genuchten-Mualem como se podrá ver en la figura 4.17, del cual se

observa que el primer punto de inflexión, el valor de entrada de aire (VEA) es aproximadamente 350 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) es aproximadamente 0.18.

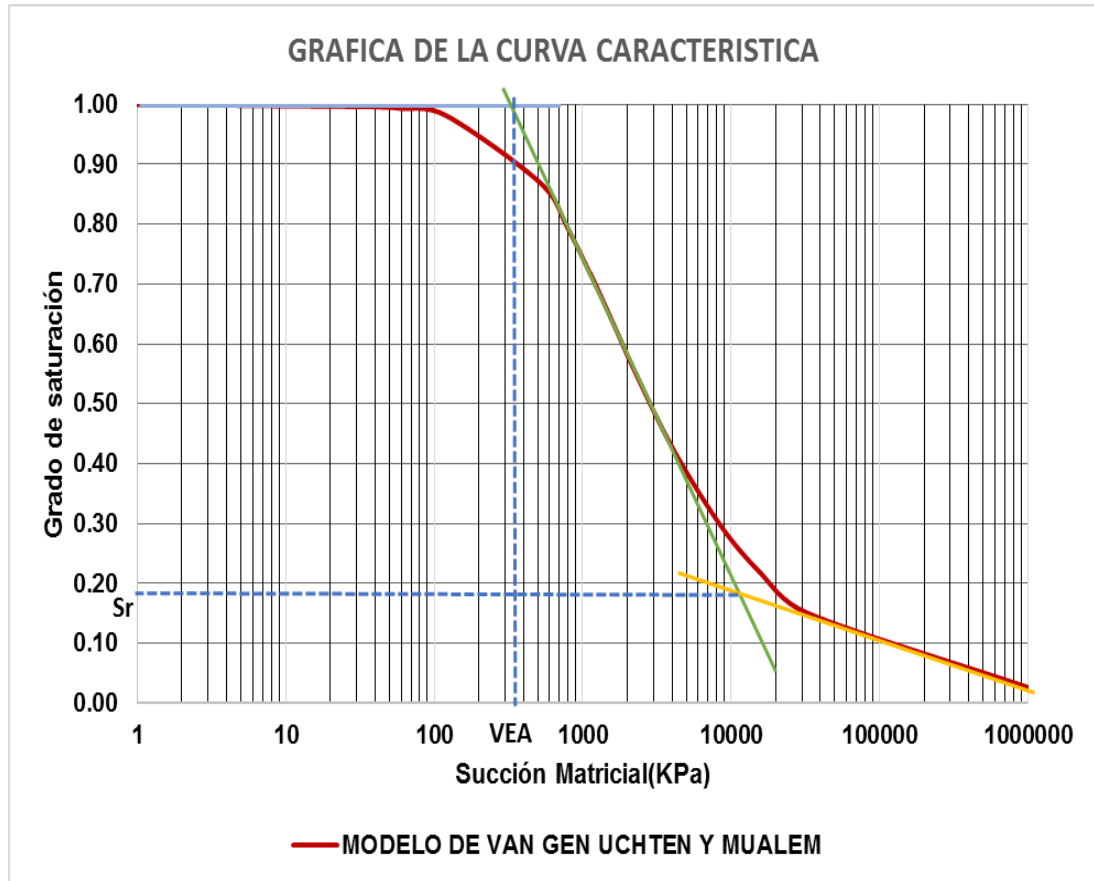


Figura 4.17. Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Van Genuchten-Mualem (Elaboración propia, 2018).

#### 4.3.2 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Gardner

En este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de Gardner como se podrá ver en la figura 4.18, del cual se observa que el

primer punto de inflexión, el valor de entrada de aire (VEA) es aproximadamente 400 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) es aproximadamente 0.09.

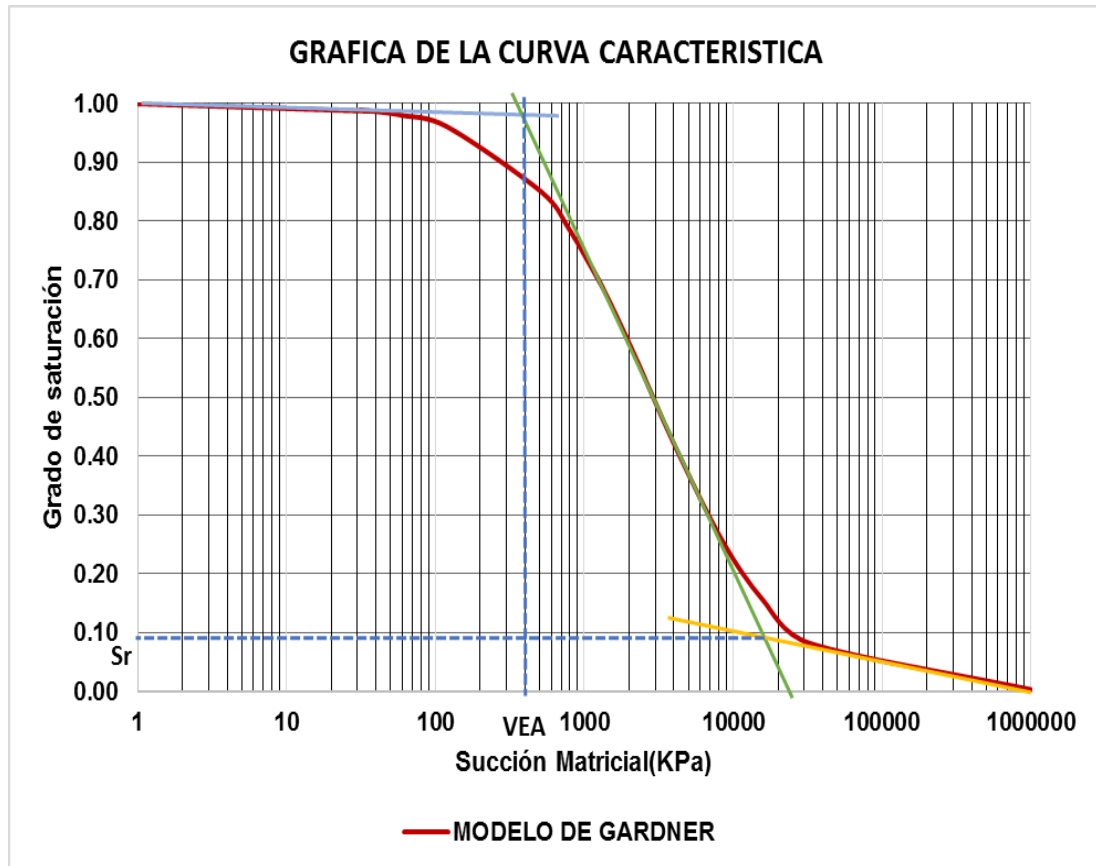


Figura 4.18. Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Gardner (Elaboración propia, 2018).

#### 4.3.3 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Fredlung y Xing

En este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de Fredlung y Xing como se podrá ver en la figura 4.19, del cual se observa que el primer punto de inflexión, el valor de entrada de aire (VEA) es

aproximadamente 350 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) es aproximadamente 0.20.

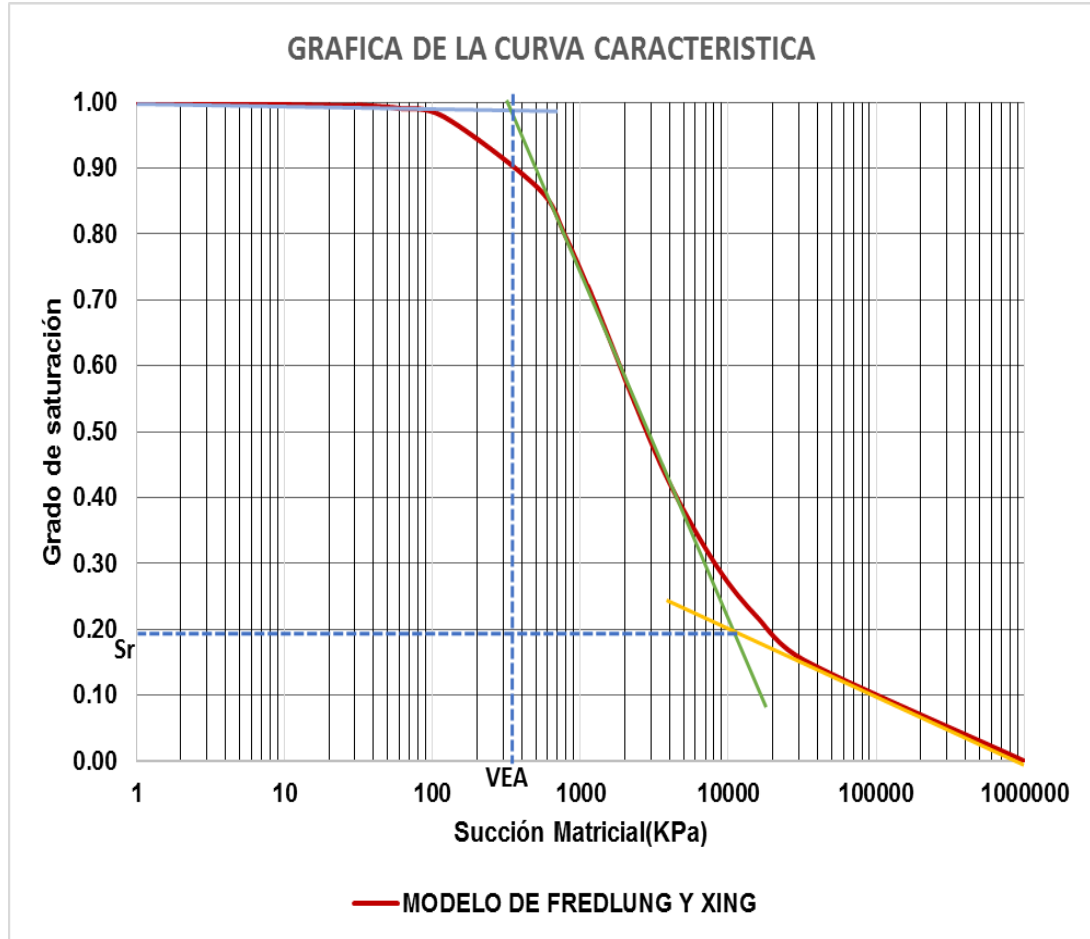


Figura 4.19. Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

#### 4.3.4 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de la proporcionalidad natural.

En este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de la proporcionalidad natural como se podrá ver en la figura 4.20, del cual se observa que el primer punto de inflexión, el valor de entrada de aire (VEA) es

aproximadamente 320 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) es aproximadamente 0.22.

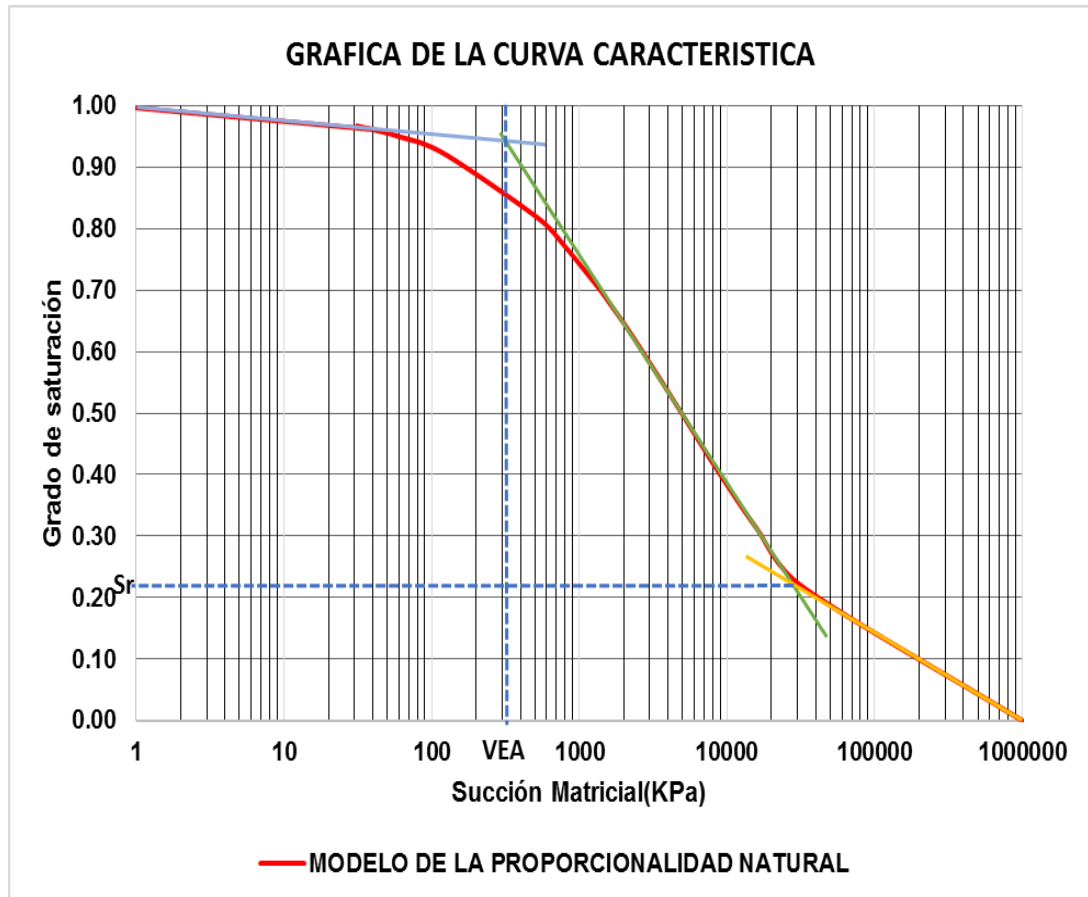


Figura 4.20. Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de la proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).

#### 4.4.5 Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica para el modelo de Zapata.

En este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de Zapata basado en la ecuación de Van Genuchten como se podrá ver en la figura 4.21, del cual se observa que el primer punto de inflexión, el valor de entrada

de aire (VEA) es aproximadamente 420 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) no se pudo determinar.

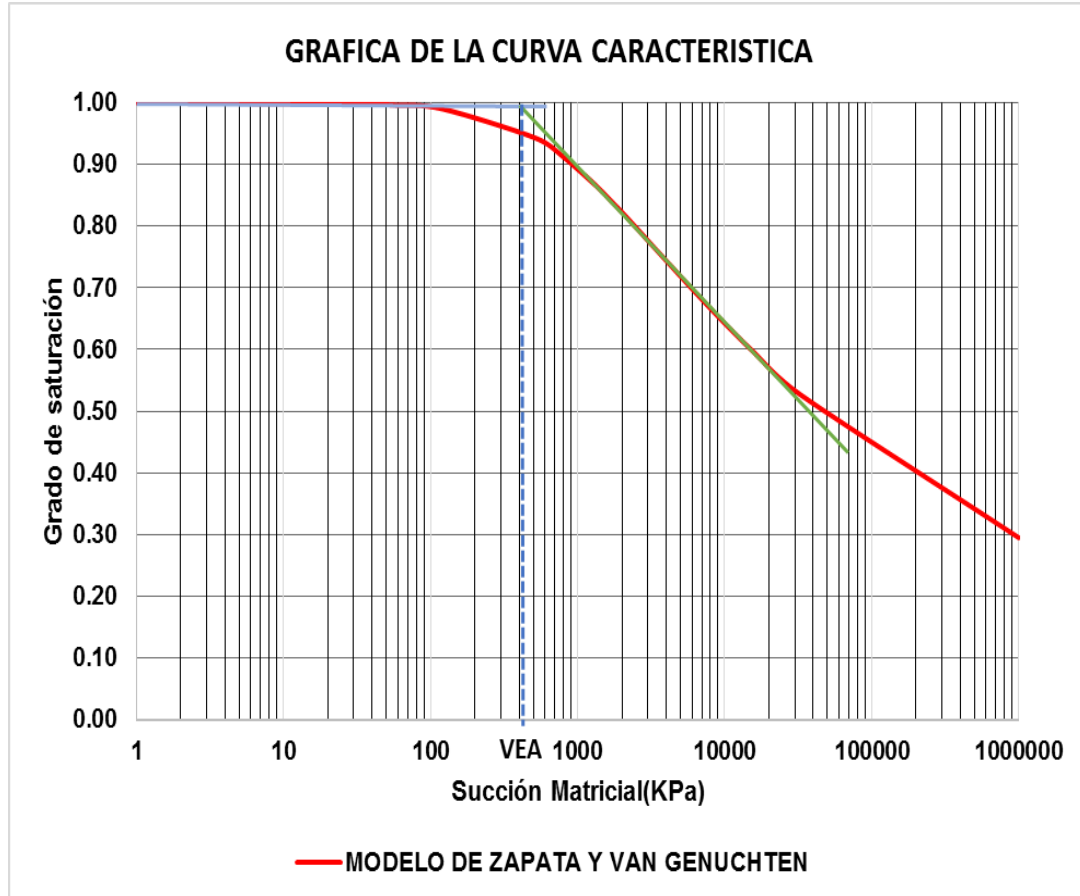
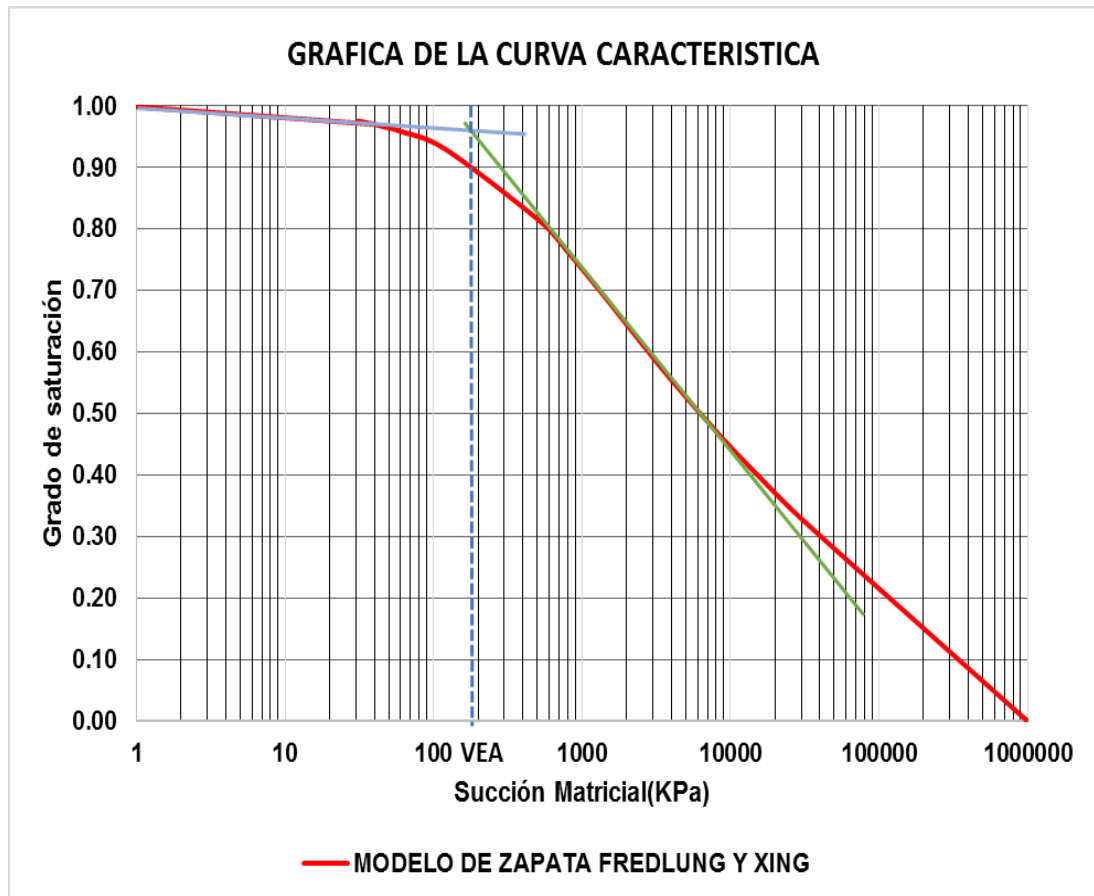


Figura 4.21. Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Zapata-Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).

También en este apartado se realizó la determinación aproximada de los puntos de inflexión (VEA y la saturación residual) de la curva característica gráficamente para el modelo de Zapata basado en la ecuación de Fredlung y Xing como se podrá ver en la figura 4.22, del cual se observa que el primer punto de inflexión, el valor de entrada de aire (VEA) es aproximadamente 190 kPa, y el otro punto de inflexión, la saturación residual ( $S_r$ ) no se pudo determinar.



*Figura 4.22.* Determinación de los puntos de inflexión de la curva característica en términos de grado de saturación y succión para el modelo de Zapata-Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

En el cuadro 4.7 se presentan el resumen de los valores determinados gráficamente de los puntos de inflexión de la curva característica de la arcilla estudiada para los ocho modelos vistos en esta tesis, del cual al realizar el promedio de todos los modelos sin considerar el modelo de zapata por lo mencionado anteriormente, nos proporciona un VEA que es igual 353 kPa y  $S_r$  que es igual a 0.18, ya que los modelos de zapata se utilizan solo para cálculos preliminares. Como se vio anteriormente que los modelos que mejor se ajustaban a los datos experimentales son el modelo de

Fredlung y Xing con un VEA=350 kPa, Sr=0.20 y el modelo de Van Genuchten con un VEA=300 kPa, Sr=0.16.

Cuadro 4.7. Valores de los puntos de inflexión de la curva característica de la arcilla estudiada (Elaboración propia, 2018).

MODELOS	VEA(kPa)	Sr
Van Genuchten	300	0.16
Van Genuchten - Burdine	400	0.21
Van Genuchten - Mualem	350	0.18
Gardner	400	0.09
Fredlung y Xing	350	0.20
Proporcionalidad natural	320	0.22
Zapata - Van Genuchten	420	-
Zapata -Fredlung y Xing	190	-

En el cuadro 4.8 se presentan el resumen de algunos puntos determinados de la curva característica de la arcilla estudiada (para S=0.10, S=0.50 y S=0.90) para los ocho modelos vistos en esta tesis y se adjuntan en la figura 4.23, figura 4.24, figura 4.25, figura 4.26, figura 4.27 figura 4.28, figura 4.29 y figura 4.30.

Cuadro 4.8. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla estudiada para S=0.10, S=0.50 y S=0.90 (Elaboración propia, 2018).

MODELOS	SUCCIÓN(Kpa)		
	S=0.10	S=0.50	S=0.90
Van Genuchten	71000	2850	290
Van genuchten - Burdine	121000	2700	550
Van genuchten - Mualem	94000	2900	390
Gardner	24000	2900	310
Fredlung y Xing	95000	2800	390
Proporcionalidad natural	180000	4900	180
Zapata - Van Genuchten	-	3500	930
Zapata -Fredlung y Xing	95000	6200	190

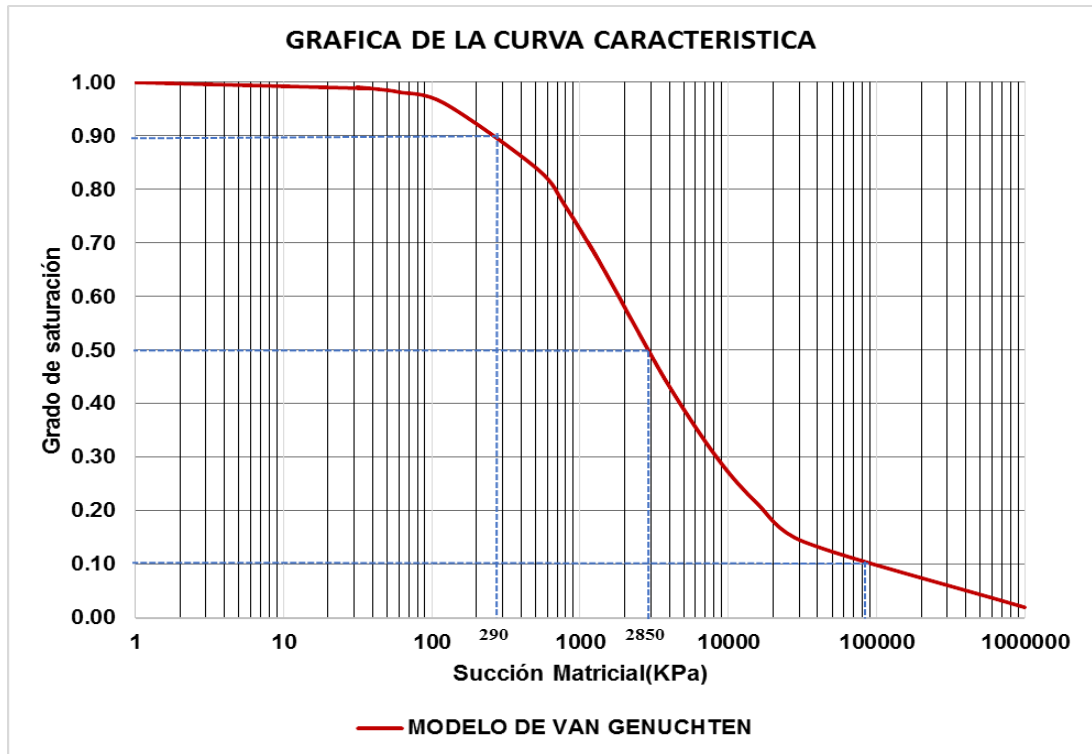


Figura 4.23. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).

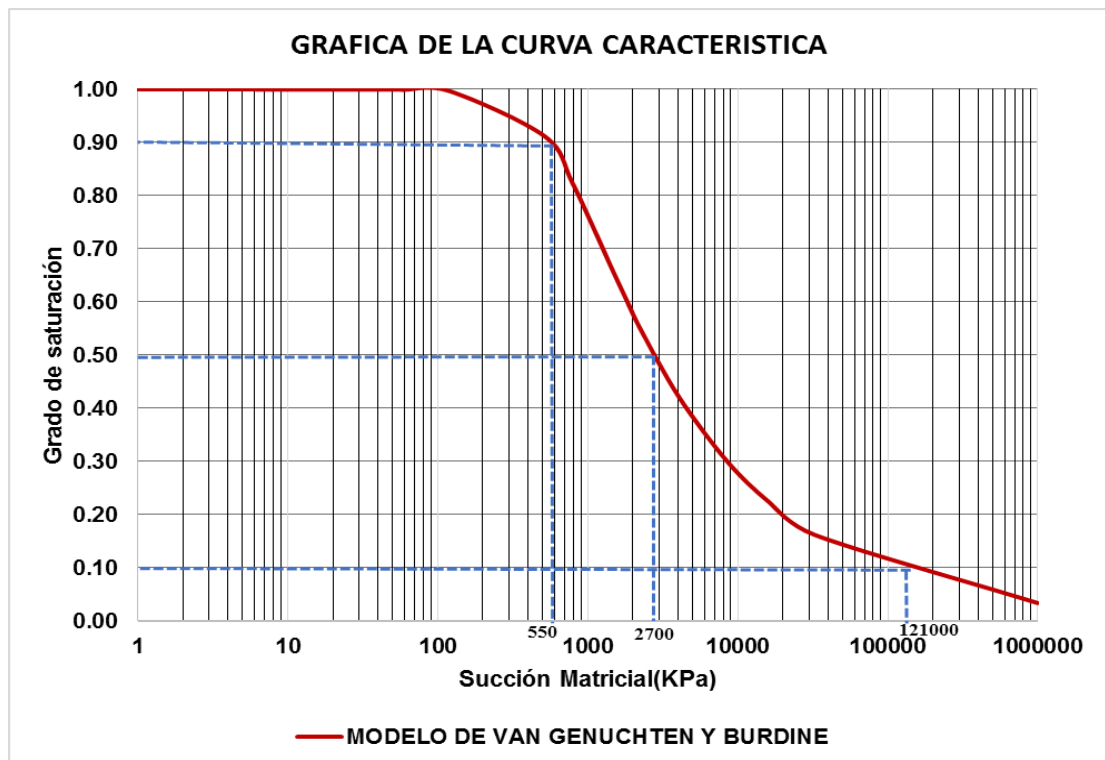


Figura 4.24. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Van Genuchten-Burdine (Elaboración propia, 2018).

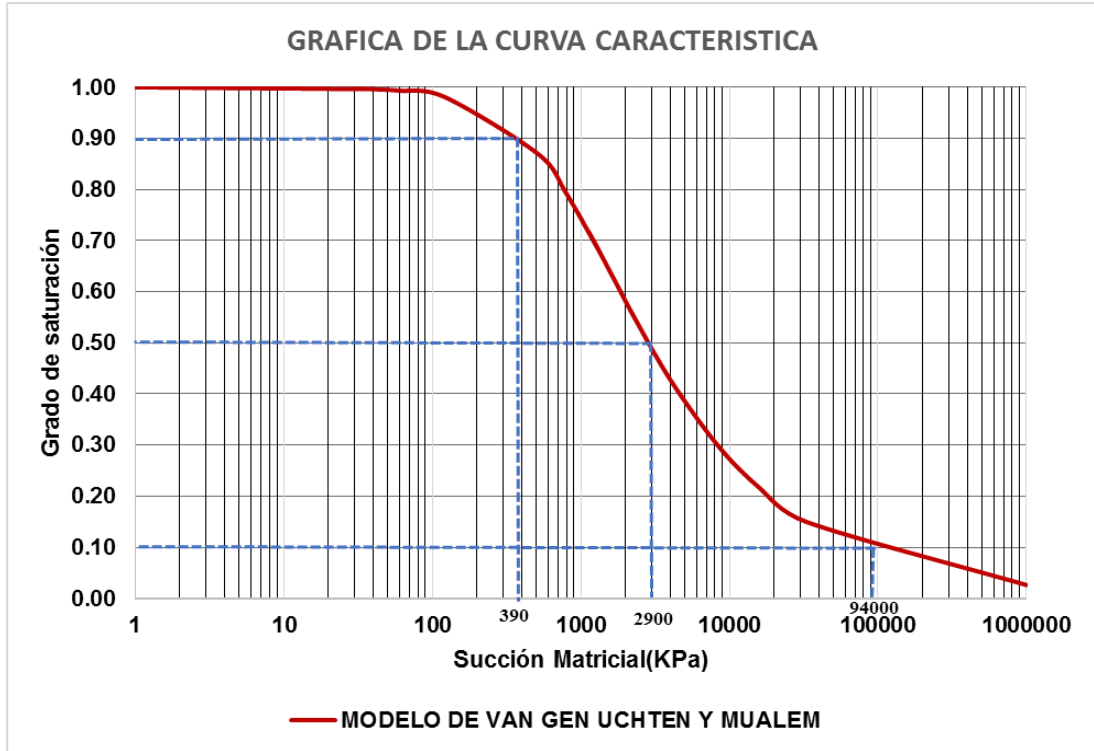


Figura 4.25. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Van Genuchten-Mualem (Elaboración propia, 2018).

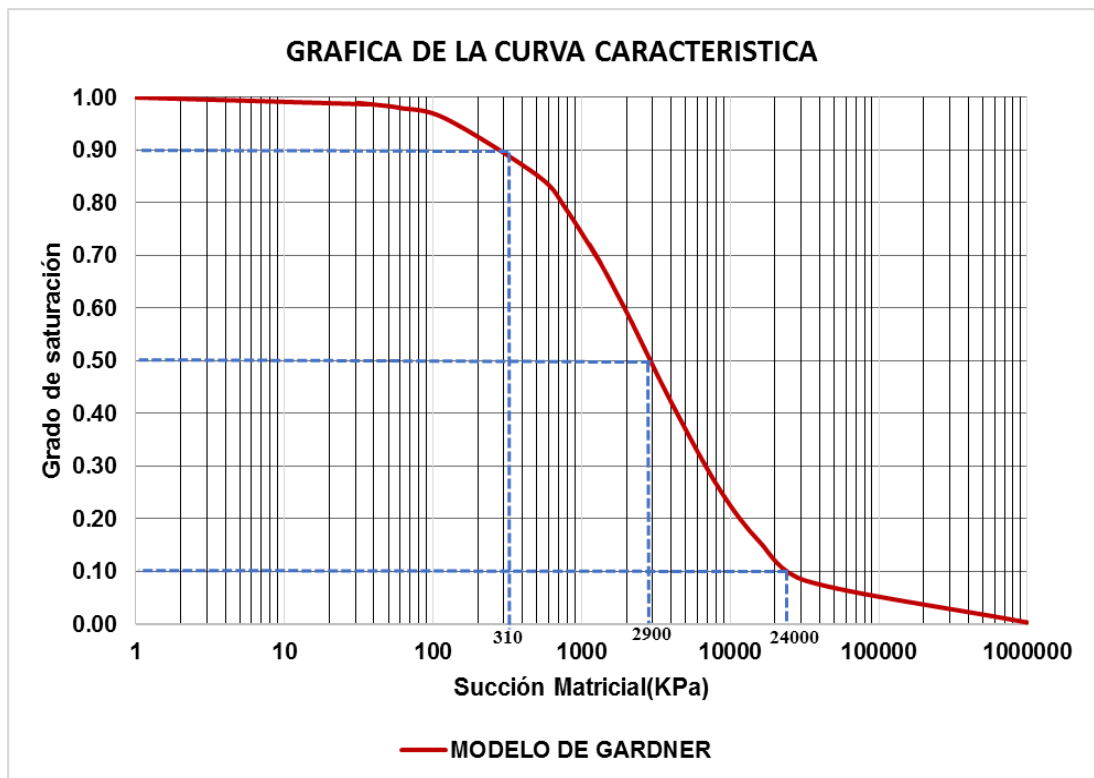


Figura 4.26. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Gardner (Elaboración propia, 2018).

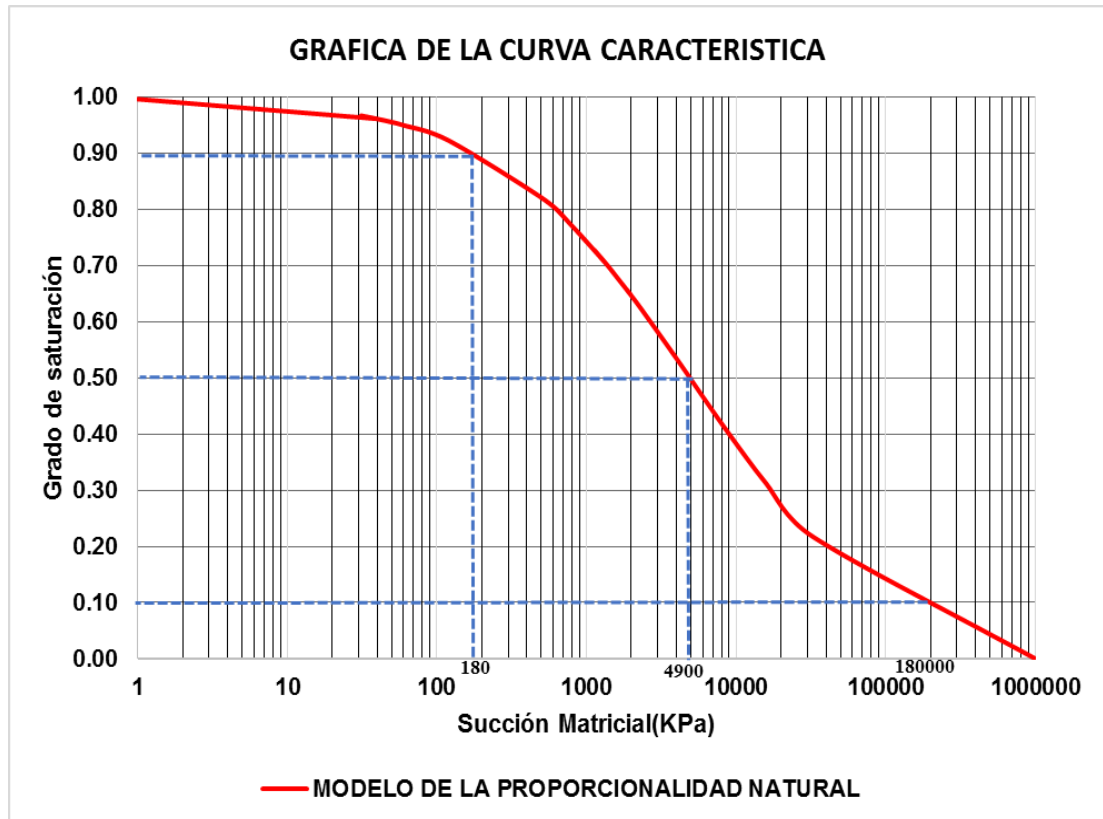


Figura 4.27. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).

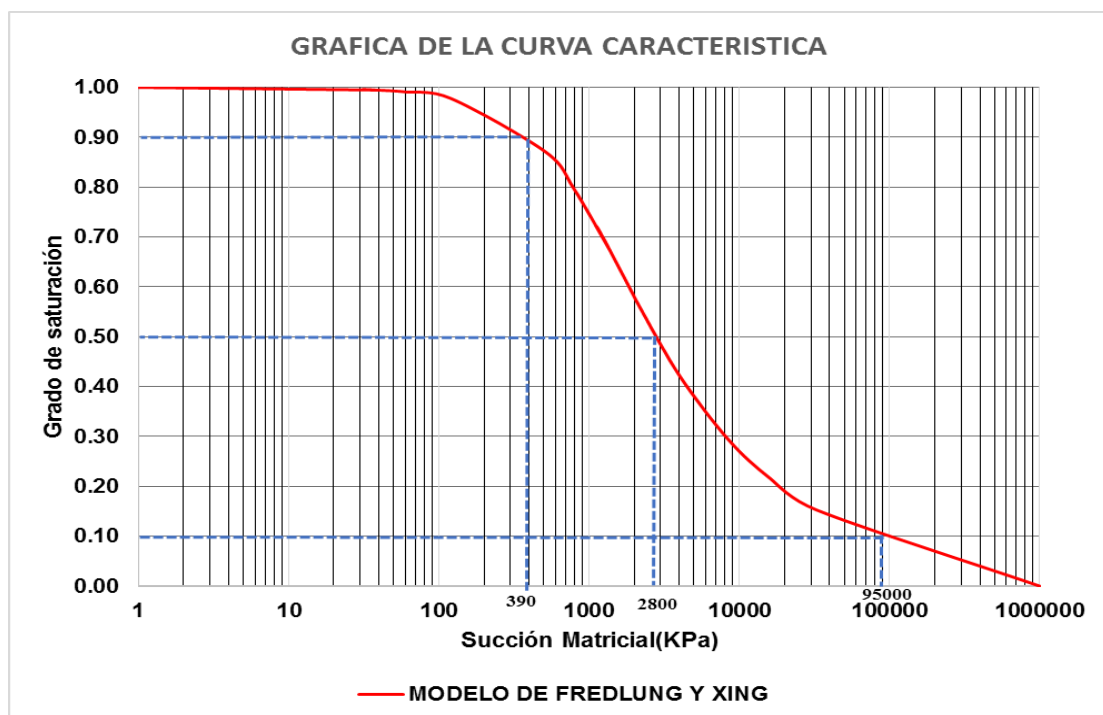


Figura 4.28. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Fredlung-Xing (Elaboración propia, 2018).

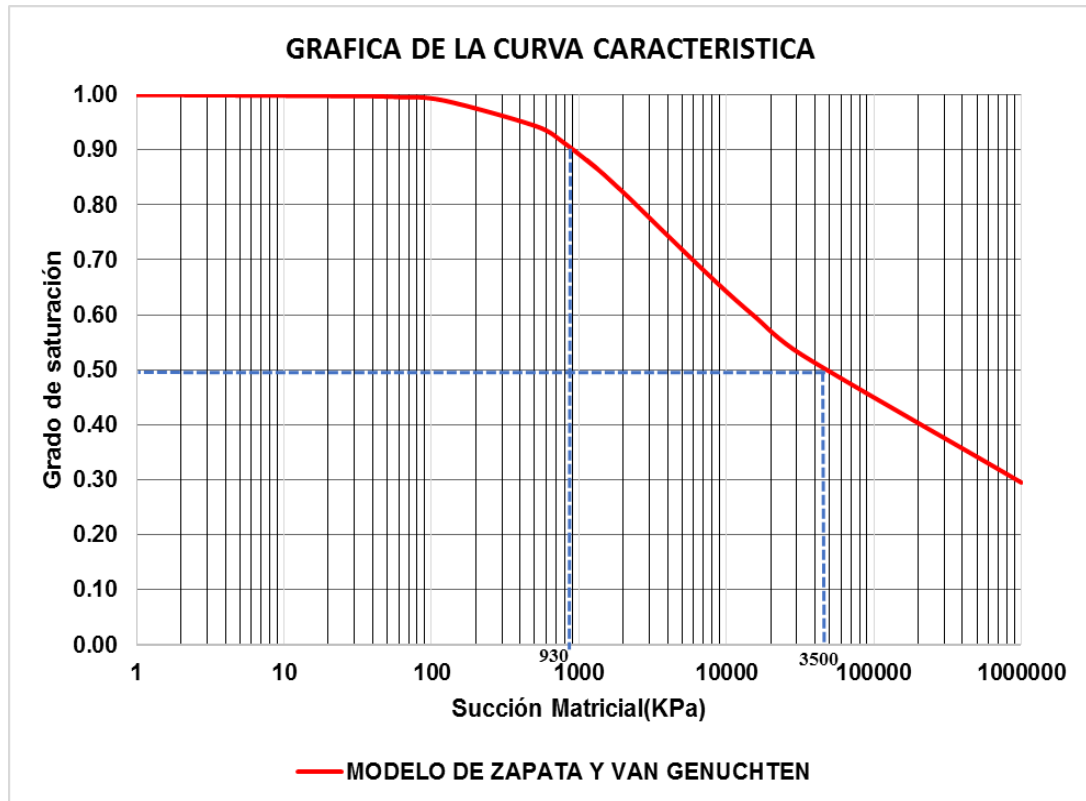


Figura 4.29. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de zapata-Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).

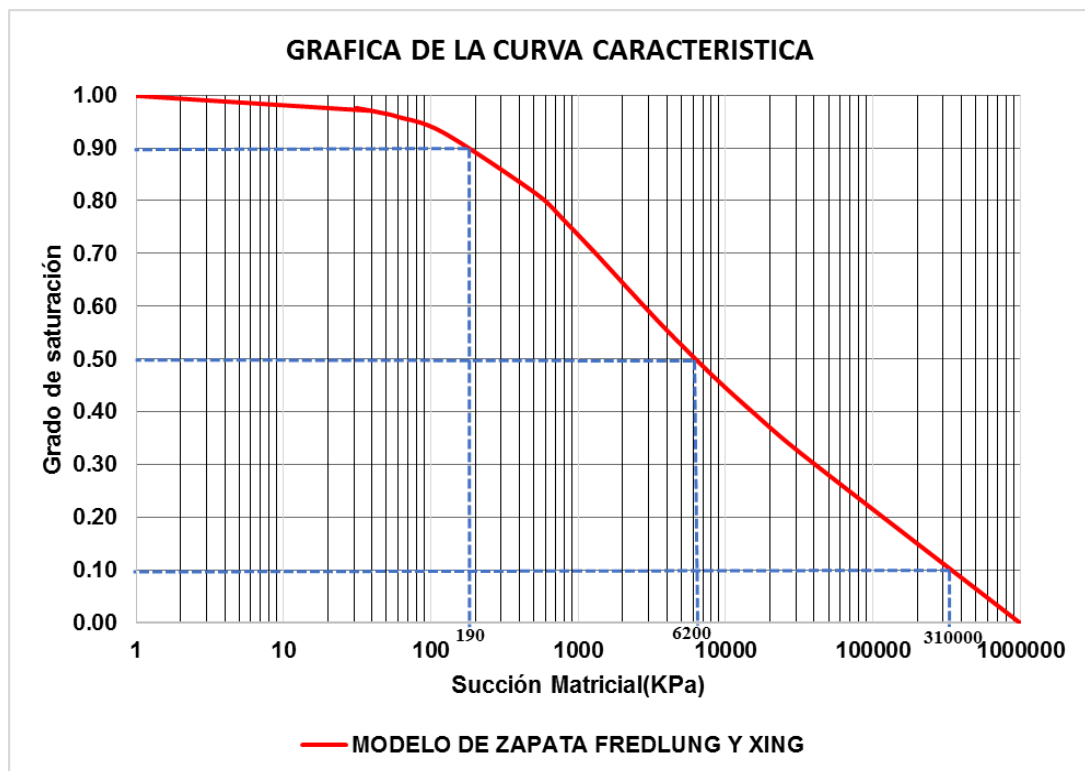


Figura 4.30. Valores de los puntos de la curva característica de la arcilla para  $S=0.10$ ,  $S=0.50$  y  $S=0.90$  para el modelo de Zapata-Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- En esta tesis se determinó la curva característica por desecación por el método del papel filtro que puede presentar la arcilla de Mayocc-Huancavelica, debido a cambios de humedad, que a su vez generan cambios de succión, cuya magnitud se estimó con base en las curvas características aplicando modelos para realizar su ajuste matemático correspondiente.
- El clima en la zona de Mayocc-Huancavelica presenta un clima de estepa local (semiárido), según Dregne (1976) estas zonas presentan una capa freática profunda por lo tanto los suelos ubicados sobre el nivel freático son suelos no saturados.
- El material utilizado en los ensayos es una arcilla de alta plasticidad (CH) de acuerdo con la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, proveniente de la zona de Mayocc-Huancavelica.
- El suelo de la arcilla de Mayocc-Huancavelica se compone esencialmente de arcilla en estado parcialmente saturado, por inspección visual presenta contenido de materia orgánica y raíces a menos de 2 m de profundidad; este tipo de suelos generan esfuerzos en sus intersticios conocido como succión, causando la disminución de la resistencia al corte y la rigidez del suelo afectando en el comportamiento volumétrico y causando la aparición de grietas a medida que aumenta la succión la cual está en función del grado de

saturación, a raíz de esta problemática se generan asentamientos diferenciales no establecidas en estructuras livianas, deformaciones en las vías, entre otras, alterando el servicio de las mismas.

- La evaluación de la actividad del material nos permitió caracterizar la arcilla, ya que el tipo de suelo estudiado presenta características de una montmorillonita (ver cuadro 2.2), el cual es un mineral arcilloso que permite la introducción del agua en su estructura lo que ocasiona un aumento en el volumen lo cual lo hace potencialmente expansivo a este tipo de suelos, debido a que el suelo está parcialmente saturado se generan esfuerzos negativos en los poros, también conocida como succión, alterando las propiedades tales como la resistencia o la rigidez, lo cual originan la formación de grietas cuando disminuye la humedad, alterando las obras civiles.
- La succión inicial del suelo depende del grado de humedad que este presenta, se encontró que el suelo se encuentra inicialmente en la zona de desaturación o en un régimen de absorción con una succión aproximada de 516 KPa superando al VEA del aire que viene a ser 353 KPa.
- Las curvas características representan la variación de la humedad del suelo de acuerdo a dos puntos de inflexión con la variación de la succión, para ello se divide en tres regímenes en que trabaja el suelo, el primer régimen conocido como régimen capilar se presenta antes de que el suelo alcance succiones mayores al valor de entrada de aire (V.E.A), en este caso de 353 kPa aproximadamente, a partir de este punto el suelo trabaja en un régimen de desaturación donde alcanza la saturación residual ( $S_r$ ) igual a 0.18 donde se genera el segundo punto de inflexión de la curva entrado a trabajar en un régimen de absorción residual o zona residual.

- El ajuste matemático de las curvas características tiene en cuenta tres variables las cuales determinan el valor de entrada de aire del suelo, la tasa de crecimiento de la succión y las condiciones del contenido de agua residual cruciales para entender el comportamiento de la succión del suelo.
- De los ocho modelos empleados para realizar el ajuste matemático de las curvas características, el que más se ajustó es el de los autores de Van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994).
- Para Cho y Santamarina(2001) manifiestan que el punto de inflexión del VEA ocurre para un  $S=0.90$ , del cuadro 4.8 se determina la succión matricial para el  $S=0.90$  con un valor promedio de 352 KPa (VEA) y comparando con el cuadro 4.7 de donde también determinamos el VEA gráficamente con un valor promedio de 353 KPa, del cual concluimos que para la arcilla estudiada el valor de entrada del aire(VEA) se da para un grado de saturación de (S) de 0.90.
- Un suelo no saturado experimenta cambios de humedad por muchos factores explicados en el capítulo II, lo cual generan variaciones del volumen del suelo y éstas producen deformaciones y grietas en las diferentes obras civiles.
- El modelo de Zapata basada en la ecuación de Van Genuchten y basada en la ecuación de Fredlung y Xing no es aplicable para la arcilla estudiada ya que su índice de plasticidad ponderada ( $w.P$ ) =60.47 es mayor al rango que especifica este modelo (0.1-50).
- Se recomienda usar los datos de laboratorio que se encuentran distribuidos adecuadamente, un modelo de predicción puede proporcionar diferentes curvas de ajuste principalmente en la zona en la que no se tienen mediciones.

- Se recomienda realizar el ensayo de azul de metileno para poder determinar la cantidad de materia orgánica en la arcilla, ya que estos generan esfuerzos en sus intersticios conocidos como succión e influyen en la resistencia y la rigidez.

## BIBLIOGRAFÍA

**Aiassa, G. (2008).** *Caracterización de procesos de infiltración en estado no saturado sobre suelos limosos compactados.* Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba.

**Atkinson, H.J. and Bransby P.L (1989).** *The Mechanics of Soils.* McGraw-Hill Book Company. London.

**Bear, J. (1972).** *Dynamics of fluids in porous media.* American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.

**Beltran M, L. (1979).** *Evaluación de daños producidos por arboles ornamentales en pavimentos de la zona norte de Bogotá.* Tercer simposio Colombiano sobre ingeniería de pavimentos. Cartagena.

**Beltrán, R. (2009).** *Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva.* Tesis de Maestro. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Bonsch, C. and Lempp. (2007).** *Shear strength affected by suction tension in unsaturated fine-grained soils, Experimental unsaturated soil mechanics, berlin, and springer.* Volumen 112, part III.

**Blight, G.E. (1965).** *A study of effective stress for volume change, in Moisture equilibrium and moisture changes in soils beneath covered areas.* Sidney

**Campos, J. y Guardia Niño, M. (2005).** *Apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura de mecánica de suelos I civ-219.* Tesis de Licenciatura. Universidad de San Simon-Cochabamba.

**Charles, W.W. and Menzies, B. (2007).** *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering.* Taylor & Francis, 270 Madison Ave, New York, NY 10016, USA

- Cho, G.C., and Santamarina, J.C. (2001).** *Unsaturated particulate materials - Particle-level studies.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE), 127(1).
- Das, B.M (2013).** *Fundamentos de la ingeniería geotécnica.* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Cengage learning editores S.A. de C.V
- De Pablo Galán, L. (1964).** *Las arcillas: Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales.* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- Duque, G. y Escobar, C.E (2002).** *Mecánica de los Suelos.* Texto para la asignatura de mecánica de suelos I. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- Duque, G. y Escobar, C.E (2016).** *Geo mecánica.* Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- Dregne, H.E. (1976).** *Soils of arid regions.* American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.
- Fratta, D., Aguetant, J., and Smith, L. R. (2007).** *Introduction to Soil Mechanics Laboratory Testing.* Taylor & Francis Group.
- Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977).** *Stress state variables for unsaturated soils.* Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 103,107(GTS).
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993).** *Soil Mechanics for Unsaturated Soils.* John Wiley & Sons Inc. New York.
- Gardner, W.R. (1958).** *Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a watertable.* Soil Science.

- Getahun, W. (2010).** *Unsaturated Shear Strength Characteristics and Stress Strain Behavior of Red Clay Soils of Addis Ababa*. MSc. Thesis, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia.
- Juárez, B.E. y Rico, R.A. (1976).** *Mecánica de Suelos Tomo I*, 3ª edición, ed Limusa, México.
- Lambe, T. W. y Whitman, R.V. (1972).** *Mecánica de suelos*. Centro Regional de Ayuda Técnica.
- Lu, N., and Likos, W. J. (2004).** *Unsaturated soil mechanics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- McQueen, I.S. and Miller, R.F. (1974).** *Approximating soil moisture characteristics from limited data: Empirical evidence and tentative model*. Water Resources Research. 10(3): 521-527 .
- Mitchell, J. K. and Sitar, N. (1982).** *Engineering Properties of Tropical Residual Soils*. in Proc. ASCE Geotech. Eng. Div. Specialty Conf.: Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils, Honolulu, HI.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005).** *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, Inc., Third edition.
- Pérez, N. (2006).** *Development of a protocol for the assessment of unsaturated soil properties*. Thesis of Ph. D: Arizona State university. USA
- Pérez, N., Garnica, P, y Pola, J.C. (2013).** *Predicción de la curva característica con el modelo de proporcionalidad natural*. IMT, Querétaro, México.
- Pousada, E. (1984).** *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX, Madrid, España.

**Rojas, A. (2007).** *Efecto de la humedad del suelo sobre el potencial productivo y la compactación en sistemas de producción ganadero en zonas de laderas en la Tulia, Bolívar (Valle del Cauca).* Tesis para obtener el grado de Magíster en Ciencias Agrarias Área de énfasis Suelo. Universidad Nacional de Colombia.

**Sheng, D., Gens, A., Delwyn, G., Fredlund, D.G, and Scott, W.** *Unsaturated soils: From constitutive modeling to numerical algorithms Centre for Geotechnical and Materials Model.* The University of Newcastle, Australia Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia.

**Schubert, H., Herrmann, W., and Rumpf, H. (1975).** *Deformation behaviour of agglomerates under tensile stress.* Powder technology, 11(2).

**Sposito, G. (2008).** *The chemistry of soils.* Oxford University Press.

**Thamer, A. M., Faisal, H., Ali S.H. and Bujang B.K. (2006).** *Relationship between shear strength and soil water characteristics curve of an unsaturated granite residual soil.* American Journal of Environmental Sciences, 2[4]:142-145, ISSN 1553-345X.

**Terzagui, K. y Peck, R. (1973).** *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica.* El Ateneo. **Terzaghi, K. (1936).** *The shear resistance of saturated soils.* Proc. 1st Int.Conf. Soil Mech. & Fdn. Engrg. Cambridge, Mass., Harvard University.

**Torres, G. (2011).** *Estimating the soil-water Characteristic curve using grain analysis and plasticity index* MSc. Thesis, Arizona State University.

**Van Genuchten, M.T. (1980).** *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.* Soil Science Society of American Journal.

[www.agua.uji.es/pdf/presentacionHQ5.pdf](http://www.agua.uji.es/pdf/presentacionHQ5.pdf).

[www.ins.gob.pe/fichasins/ficha\\_tecnica.asp?codart=INS1700007541](http://www.ins.gob.pe/fichasins/ficha_tecnica.asp?codart=INS1700007541)

**Zapata, C., Houston, W.N., Houston, S.L, and Walsh, K.D., (2000).** *Soil-water Characteristic curve variability*. In: Proceedings of Advances in unsaturated geotechnics, Sessions Geo-Denver 2000

**Zeballos, M. (2004).** *Caracterización y comportamiento de terraplenes en condiciones no saturadas*. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

**Zepeda G., J.A. (2004).** *Mecánica de suelos no saturados*". Editado por José Alfredo Zepeda Garrido; Editorial Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México

## **ANEXOS**

**ANEXO 01**

<b>ENSAYO</b>	<b>GRANULOMETRIA POR TAMIZADO</b>		
<b>Norma</b>	<b>: NTP 339.128 (ASTM D-422)</b>	<b>Fecha:</b>	<b>oct-17</b>
<b>Tesis</b>	<b>:EVALUACION DE LA SUCCION A PARTIR DE LA DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>		

<b>MALLA</b>	<b>ABERTURA (mm)</b>	<b>PESO RETENIDO (gr)</b>	<b>PARCIAL RETENIDO (%)</b>	<b>RETENIDO (acumulado) (%)</b>	<b>PASANTE (acumulado) (%)</b>
3"	75.000	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.000	0.00	0.00	0.00	100.00
N°20	0.850	0.00	0.00	0.00	100.00
N°30	0.600	0.16	0.06	0.06	99.94
N°40	0.425	0.18	0.07	0.13	99.87
N°60	0.250	1.59	0.61	0.75	99.25
N°100	0.150	1.71	0.66	1.41	98.59
N°200	0.075	1.85	0.72	2.12	97.88
FONDO		253.25	97.88	100.00	0.00
<b>TOTAL</b>		<b>258.74</b>			

<b>DISTRIBUCION GRANULOMETRICA</b>	
% FINOS:	97.88
% ARENA:	2.12
% GRAVA:	0.00

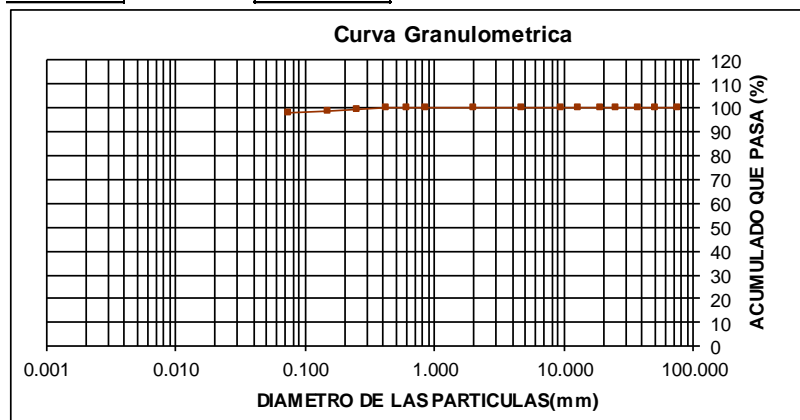


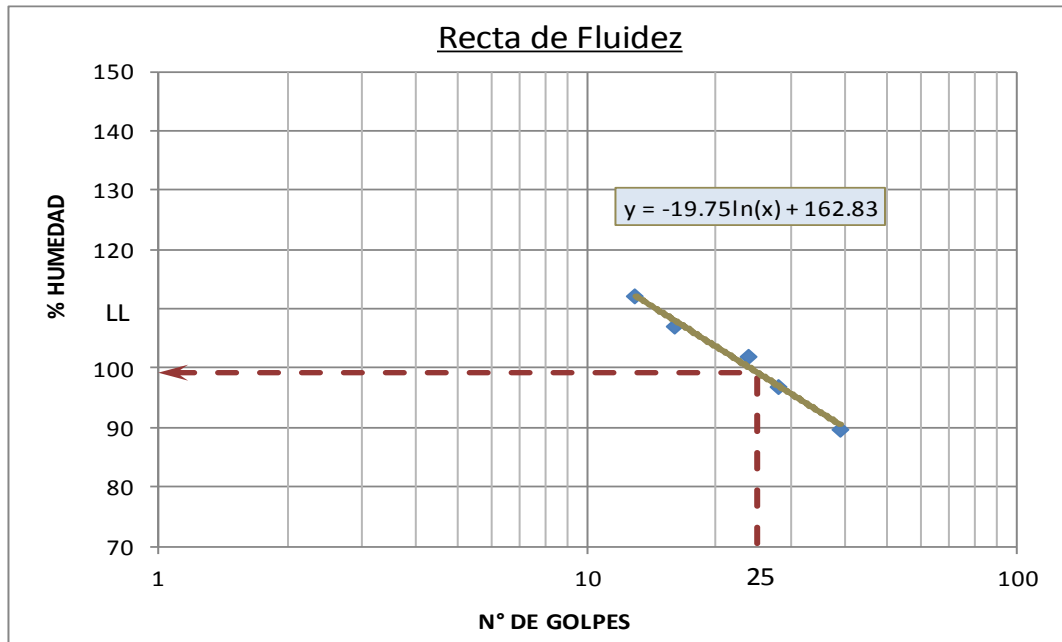
Figura A.1. Resultados de la granulometría por tamizado (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

## ANEXO 02

ENSAYO	LIMITE DE ATTERBERG		
Norma	: NTP 339.129 (ASTMD-4318)	Fecha:	oct-17
Tesis	:EVALUACION DE LA SUCCION A PARTIR DE LA DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA		

### LIMITE LIQUIDO (L.L.)

	1	2	3	4	5
Nro. de Golpes	13	16	24	28	39
Nro. de Recip.	R-12	T-22	T-22	T-15	R-13
Wrecipiente	14.27	14.01	28.75	28.29	13.98
Wrecipiente sw	19.3	18.46	43.25	41.42	19.69
Wrecipiente s	16.64	16.16	35.93	34.96	16.99
Ww	2.66	2.3	7.32	6.46	2.7
Ws	2.37	2.15	7.18	6.67	3.01
W (%)	112.24	106.98	101.95	96.85	89.70



### LIMITE PLASTICO (L.P.)

Nro. de Recip.	T-4	T-5	T-8	R-28	R-30
Wrecipiente	26.72	29.53	30.03	7.12	7.15
Wrecipiente sw	33.56	36.02	35.21	7.26	7.28
Wrecipiente s	31.85	34.47	33.78	7.22	7.24
Ww	1.71	1.55	1.43	0.04	0.04
Ws	5.13	4.94	3.75	0.10	0.09
W (%)	33.33	31.38	38.13	40.00	44.44

<b>Límite Líquido :</b>	<b>Lím. Plástico</b>	<b>Índice de Plasticidad:</b>
99.24 %	37.46 %	61.78 %

Figura A.2. Resultados del límite líquido y límite plástico (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

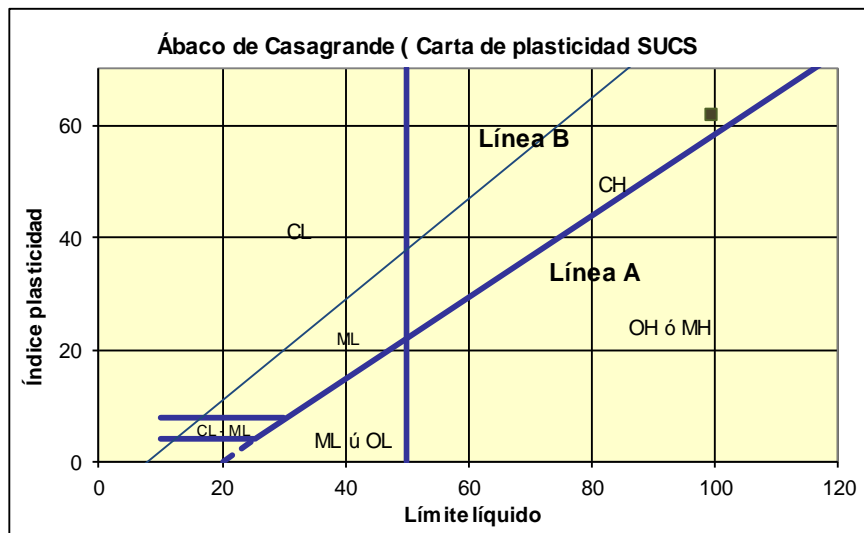
### ANEXO 03

ENSAYO	CLASIFICACION POR SUCS Y AASTHO		
Norma	: NTP 339.134 (ASTM D-422)	Fecha:	oct-17
Tesis	:EVALUACION DE LA SUCCION A PARTIR DE LA DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA		

#### RESUMEN DE PROPIEDADES GEOTECNICOS ( LIMITES DE ATTERBERG Y GRANULOMETRIA)

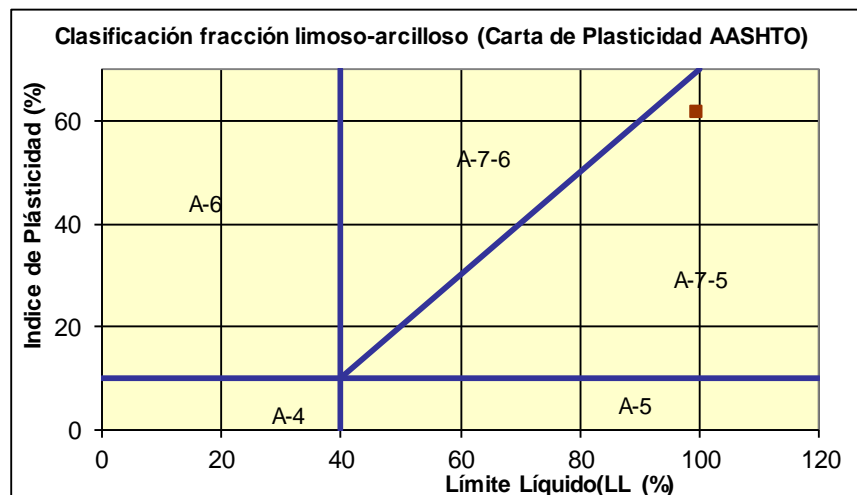
LIMITES DE CONSISTENCIA :	CARACTERISTICAS DE GRADUACION	DISTRIBUCION GRANULOMETRICA
LIMITE LIQUIDO: 99.24	D10= 0.00	% FINOS: 97.88
LIMITE PLASTICO: 37.46	D30= 0.00	% ARENA: 2.12
INDICE DE PLASTICIDAD: 61.78	D60= 0.00	% GRAVA: 0.00
IMITE DE CONTRACCIÓN: 9.10	Cu= 0.00 Cc= 0.00	CONT. HUM.: 40.20

#### CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- SUCS



DENOMINACION SUCS
ARCILLAS INORGANICAS (CH)

#### CLASIFICACIÓN PARA SUELOS FINOS- AASTHO



DENOMINACION AASTHO
ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD (A-7-5)

Figura A.3. Resultados de clasificación por SUCS y AASTHO (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

**ANEXO 04**

ENSAYO	LÍMITE DE CONTRACCIÓN		
NORMA	NTP 339.140(ASTM D 427)	FECHA	nov-17
TESIS :	EVALUACION DE LA SUCCION A PARTIR DE LA DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA		
1	RECIPIENTE DE CONTRACCIÓN	Nº	1
2	PESO DEL RECIPIENTE DE CONTRACCIÓN + PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	77.24
3	PESO DEL RECIPIENTE DE CONTRACCIÓN + PESO DEL SUELO SECO	gr	46.72
4	PESO DEL AGUA CONTENIDA (2) - (3)	gr	30.5
5	PESO DEL RECIPIENTE DE CONTRACCIÓN	gr	14.81
6	PESO DEL SUELO SECO (W <sub>o</sub> ) (3) - (5)	gr	31.91
7	CONTENIDO DE HUMEDAD (w) (4) / (6) * 100	%	95.6
8	VOLUMEN DEL RECIPIENTE DE CONTRACCIÓN (V)	cm <sup>3</sup>	43.45
9	VOLUMEN DE LA TORTA DE SUELO SECO (V <sub>o</sub> )	cm <sup>3</sup>	15.83
10	(V - V <sub>o</sub> ) = (8) - (9)	cm <sup>3</sup>	27.62
11	$((V - V_o) / (W_o)) * 100 = (10) / (6) * 100$	%	86.6
12	LÍMITE DE CONTRACCIÓN (7) - (11)	%	<b>9.1</b>

*Figura A.4.* Resultados del límite de contracción (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

**ANEXO 05**

<b>TESIS :</b>	<b>EVALUACION DE LA SUCCION A PARTIR DE LA DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>			
<b>ENSAYO</b>	<b>CONTENIDO NATURAL DE HUMEDAD</b>			
<b>NORMA</b>	<b>NTP 339.127</b>		<b>FECHA</b>	<b>oct-17</b>
<b>Tara Número</b>	<b>Unidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Peso Tara + Muestra Húmeda</b>	gr	198.80	202.40	196.39
<b>Peso Tara + Muestra Seca</b>	gr	177.20	179.30	179.50
<b>Peso de la Tara</b>	gr	123.10	122.20	137.50
<b>Peso de la Muestra Seca</b>	gr	54.10	57.10	42.00
<b>Peso del Agua</b>	gr	21.60	23.10	16.89
<b>Contenido de Humedad</b>	%	39.93	40.46	40.21
<b>Promedio</b>		<b>40.20</b>		
<b>ENSAYO</b>	<b>PESO ESPECIFICO</b>			
<b>NORMA</b>	<b>NTP 339.131</b>		<b>FECHA</b>	<b>nov-17</b>
<b>Tara Número</b>	<b>Unidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Peso del Suelo Seco</b>	gr	100.00	100.00	100.00
<b>Peso de la fiola</b>	gr	172.50	172.50	172.50
<b>Peso fiola + Agua</b>	gr	670.80	670.80	670.80
<b>Peso fiola + Agua +Suelo</b>	gr	730.30	730.08	730.50
<b>Temperatura del agua</b>	°C	25.60	25.50	25.70
<b>Factor de corrección</b>	Rt	0.9987	0.9987	0.9987
<b>Peso Específico de Sólidos</b>	gr / Cm <sup>3</sup>	2.469	2.456	2.481
<b>Gravedad Específico de Sólidos</b>	gr / Cm <sup>3</sup>	2.466	2.453	2.478
<b>Promedio</b>		<b>2.466</b>		

*Figura A.5. Resultados del contenido de humedad natural y gravedad específica (Geotecnia & Ingeniería, 2017).*

**ANEXO 06**

<b>ENSAYO:</b>	<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACIÓN(HIDROMETRÍA)</b>									
<b>NORMA:</b>	<b>NTP 339.128</b>						<b>FECHA</b>		<b>nov-17</b>	
<b>TESIS :</b>	<b>EVALUACION DE LA SUCCION A PARTIR DE LA DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>									
<b>Corrección por Peso Específico</b>			<b>Corrección por Menisco(Cm)</b>		1.00		<b>Peso de la Muestra Seca</b>		( gr ) 33.00	
a = 1.05			<b>Corrección por Defloculante(Cd)</b>		2.00		<b>Peso Específico de Sólidos</b>		( gr/cm <sup>3</sup> ) 2.47	
Tiempo (minutos)	Temperatura ° C	Corrección por Temperatura	Viscosidad h	Lecturas del Hidrómetro			L	K	Diámetro (mm)	% Q' Pasa
				Primera Lectura	1° Corrección	2° Corrección				
2.00	25.2	1.37	0.00890	31.47	30.84	32.47	10.97	0.0070	0.016	97.88
5.00	25.2	1.37	0.00890	31.47	30.84	32.47	10.97	0.0070	0.010	97.88
15.00	25.2	1.37	0.00890	31.47	30.84	32.47	10.97	0.0070	0.006	97.88
30.00	25.2	1.37	0.00890	31.47	30.84	32.47	10.97	0.0070	0.004	97.88
60.00	25	1.30	0.00894	30.10	29.40	31.10	11.19	0.0071	0.003	93.31
250.00	25	1.30	0.00894	28.30	27.60	29.30	11.49	0.0071	0.002	87.60
1440.00	24.2	1.06	0.00910	25.06	24.12	26.06	12.02	0.0072	0.001	76.55

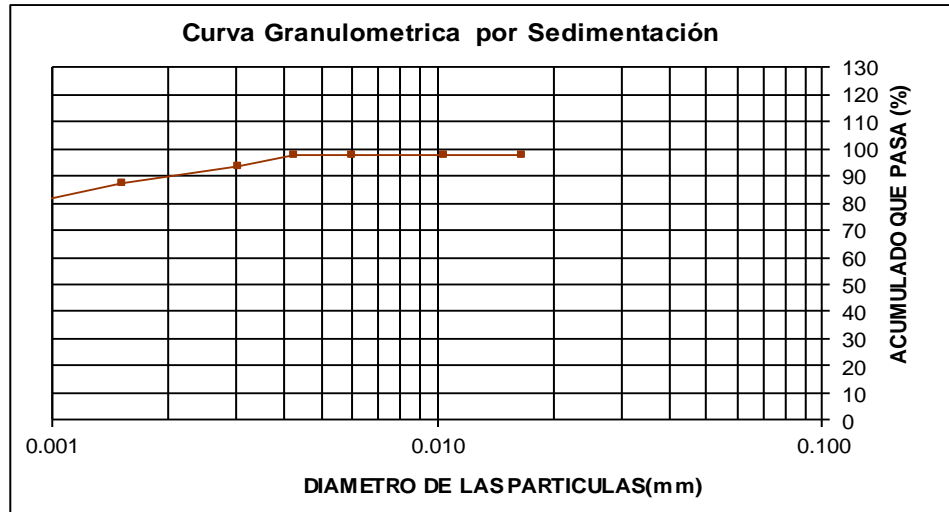


Figura A.6. Resultados del análisis granulométrico por sedimentación (Geotecnia & Ingeniería, 2017).

**ANEXO 07**

<b>ENSAYO:</b>	<b>ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PAPEL FILTRO POR EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO</b>		
<b>NORMA:</b>	ASTMD 5298 / INV E-159	<b>FECHA</b>	<b>ene-18</b>
<b>TESIS :</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>		

<b>N° DE PRUEBA</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>
PESO DE RECIPIENTE	163.7839	172.3628	159.5383	162.8377
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA	184.6383	198.3910	180.2710	189.2832
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA	181.2519	193.8059	176.2785	183.7460
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO (%)</b>	<b>19.39</b>	<b>21.38</b>	<b>23.85</b>	<b>26.48</b>

POCISIÓN DEL PAPEL FILTRO	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR
PESO DE TARA	28.3826	27.8273	29.5738	28.2719	27.7389	29.0273	29.3913	27.9362
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO EN EQUILIBRIO DE HUMEDAD	28.5746	28.0263	29.7392	28.4827	27.9937	29.2673	29.6273	28.1830
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO SECADO AL HORNO	28.5354	27.9867	29.7041	28.4393	27.9396	29.2188	29.5763	28.1287
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PAPEL FILTRO (%)</b>	<b>25.654</b>	<b>24.843</b>	<b>26.938</b>	<b>25.926</b>	<b>26.956</b>	<b>25.326</b>	<b>27.568</b>	<b>28.228</b>
SUCCIÓN (Log kPa)	3.329	3.392	3.229	3.307	3.227	3.354	3.179	3.128
SUCCIÓN kPa	2130.68	2464.44	1692.55	2029.41	1687.15	2259.83	1511.77	1342.94

<b>SUCCIÓN kPa</b>	2297.56	1860.98	1973.49	1427.36
<b>VERIFICACIÓN</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>

T° DE AMBIENTE DE ENSAYO	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C
HUMEDAD RELATIVA DE AMBIENTE DE ENSAYO	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%

Figura A.7-1. Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).

**ANEXO 07**

<b>ENSAYO:</b>	<b>ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PAPEL FILTRO POR EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO</b>		
<b>NORMA:</b>	ASTMD 5298 / INV E-159	<b>FECHA</b>	<b>ene-18</b>
<b>TESIS :</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>		

<b>N° DE PRUEBA</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>
PESO DE RECIPIENTE	155.8784	134.2312	145.8329	142.7827
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA	179.2832	185.2232	201.7492	199.6778
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA	174.0164	173.1261	187.2984	183.9688
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO (%)</b>	<b>29.04</b>	<b>31.10</b>	<b>34.85</b>	<b>38.14</b>

POCISIÓN DEL PAPEL FILTRO	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR
PESO DE TARA	27.9372	28.9283	27.2931	26.7583	28.5473	27.5483	29.0528	28.4829
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO EN EQUILIBRIO DE HUMEDAD	28.1883	29.1038	27.5171	27.6248	28.7946	27.7834	29.2988	28.5925
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO SECADO AL HORNO	28.1317	29.0640	27.4661	27.4391	28.7368	27.7264	29.2359	28.5654
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PAPEL FILTRO (%)</b>	<b>29.100</b>	<b>29.329</b>	<b>29.480</b>	<b>27.277</b>	<b>30.501</b>	<b>32.004</b>	<b>34.353</b>	<b>32.848</b>
SUCCIÓN (Log kPa)	3.060	3.042	3.031	3.202	2.951	2.834	2.651	2.768
SUCCIÓN kPa	1148.39	1102.15	1072.82	1592.73	893.20	682.10	447.63	586.28

<b>SUCCIÓN kPa</b>	1125.27	1332.77	787.65	516.95
<b>VERIFICACIÓN</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>

T° DE AMBIENTE DE ENSAYO	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C
HUMEDAD RELATIVA DE AMBIENTE DE ENSAYO	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%

*Figura A.7-2. Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).*

**ANEXO 07**

<b>ENSAYO:</b>	<b>ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PAPEL FILTRO POR EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO</b>		
<b>NORMA:</b>	ASTMD 5298 / INV E-159	<b>FECHA</b>	<b>ene-18</b>
<b>TESIS :</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>		

<b>N° DE PRUEBA</b>	<b>P9</b>	<b>P10</b>	<b>P11</b>	<b>P12</b>
PESO DE RECIPIENTE	136.3926	129.4000	147.3829	154.7368
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA	165.4738	194.1931	158.3726	217.5742
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA	157.1595	175.0010	154.9945	197.7693
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO (%)</b>	<b>40.04</b>	<b>42.09</b>	<b>44.38</b>	<b>46.02</b>

<b>POCISIÓN DEL PAPEL FILTRO</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
PESO DE TARA	28.8463	29.2947	27.0025	29.0491	28.8493	29.7482	29.0322	30.0041
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO EN EQUILIBRIO DE HUMEDAD	28.9924	29.5492	27.2773	29.2538	29.0342	29.8368	29.3372	30.2056
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO SECADO AL HORNO	28.9501	29.4729	27.1883	29.1890	28.9691	29.8042	29.2125	30.1248
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PAPEL FILTRO (%)</b>	<b>40.751</b>	<b>42.817</b>	<b>47.901</b>	<b>46.319</b>	<b>54.341</b>	<b>58.214</b>	<b>69.163</b>	<b>66.943</b>
SUCCIÓN (Log kPa)	2.152	1.992	1.765	1.787	1.678	1.626	1.478	1.508
SUCCIÓN kPa	142.06	98.07	58.26	61.19	47.69	42.28	30.08	32.23

<b>SUCCIÓN kPa</b>	120.07	59.72	44.98	31.16
<b>VERIFICACIÓN</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>

T° DE AMBIENTE DE ENSAYO	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C
HUMEDAD RELATIVA DE AMBIENTE DE ENSAYO	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%

*Figura A.7-3. Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).*

**ANEXO 07**

<b>ENSAYO:</b>	<b>ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PAPEL FILTRO POR EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO</b>		
<b>NORMA:</b>	<b>ASTMD 5298 / INV E-159</b>	<b>FECHA</b>	<b>ene-18</b>
<b>TESIS :</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>		

<b>N° DE PRUEBA</b>	<b>P13</b>	<b>P14</b>	<b>P15</b>	<b>P16</b>
PESO DE RECIPIENTE	139.5374	143.8192	153.1401	153.1923
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA	202.0075	171.2173	171.2526	171.9926
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA	182.0756	162.3505	169.6835	170.9156
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO (%)</b>	<b>46.86</b>	<b>47.85</b>	<b>9.48</b>	<b>6.08</b>

<b>POCISIÓN DEL PAPEL FILTRO</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
PESO DE TARA	27.9903	28.5726	29.0273	29.1939	28.1381	28.3319	28.9304	28.9418
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO EN EQUILIBRIO DE HUMEDAD	28.2747	28.7011	29.2717	29.2839	28.4821	28.6839	29.2821	29.2839
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO SECADO AL HORNO	28.1660	28.6532	29.1793	29.2503	28.4292	28.6307	29.2492	29.2513
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PAPEL FILTRO (%)</b>	<b>61.867</b>	<b>59.429</b>	<b>60.789</b>	<b>59.574</b>	<b>18.172</b>	<b>17.805</b>	<b>10.320</b>	<b>10.533</b>
SUCCIÓN (Log kPa)	1.577	1.610	1.591	1.608	3.911	3.940	4.523	4.506
SUCCIÓN kPa	37.74	40.71	39.02	40.53	8153.92	8710.15	33348.47	32097.42

<b>SUCCIÓN kPa</b>	39.22	39.78	8432.03	32722.94
<b>VERIFICACIÓN</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>

T° DE AMBIENTE DE ENSA YO	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C	25.5 +/- 0.3°C
HUMEDAD RELATIVA DE AMBIENTE DE ENSA YO	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%	68 +/- 1%

*Figura A.7-4. Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).*

**ANEXO 07**

<b>ENSAYO:</b>	<b>ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PAPEL FILTRO POR EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO</b>			
<b>NORMA:</b>	<b>ASTMD 5298 / INV E-159</b>		<b>FECHA</b>	<b>ene-18</b>
<b>TESIS :</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA</b>			
<b>N° DE PRUEBA</b>				
	<b>P17</b>		<b>P18</b>	
PESO DE RECIPIENTE	139.5021		140.2153	
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA	160.2126		161.2173	
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA	157.5142		159.5938	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO (%)</b>	<b>14.98</b>		<b>8.38</b>	
<b>POCISIÓN DEL PAPEL FILTRO</b>				
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
PESO DE TARA	28.0003	27.1542	28.2387	28.0399
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO EN EQUILIBRIO DE HUMEDAD	28.3921	27.5387	28.5801	29.3924
PESO DE TARA + PAPEL FILTRO SECADO AL HORNO	28.3210	27.4694	28.5374	29.2203
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PAPEL FILTRO (%)</b>	<b>22.170</b>	<b>21.986</b>	<b>14.295</b>	<b>14.580</b>
SUCCIÓN (Log kPa)	3.600	3.614	4.213	4.191
SUCCIÓN kPa	3980.50	4114.22	16345.48	15532.21
<b>SUCCIÓN kPa</b>				
	4047.36		15938.85	
<b>VERIFICACIÓN</b>	<b>CUMPLE</b>		<b>CUMPLE</b>	
<b>T° DE AMBIENTE DE ENSA YO</b>				
	25.5 +/- 0.3°C		25.5 +/- 0.3°C	
<b>HUMEDAD RELATIVA DE AMBIENTE DE ENSA YO</b>				
	68 +/- 1%		68 +/- 1%	

*Figura A.7-5. Resultados de la determinación indirecta de la succión matricial por el método del papel filtro (MTL Geotecnia, 2018).*

**ANEXO 08**

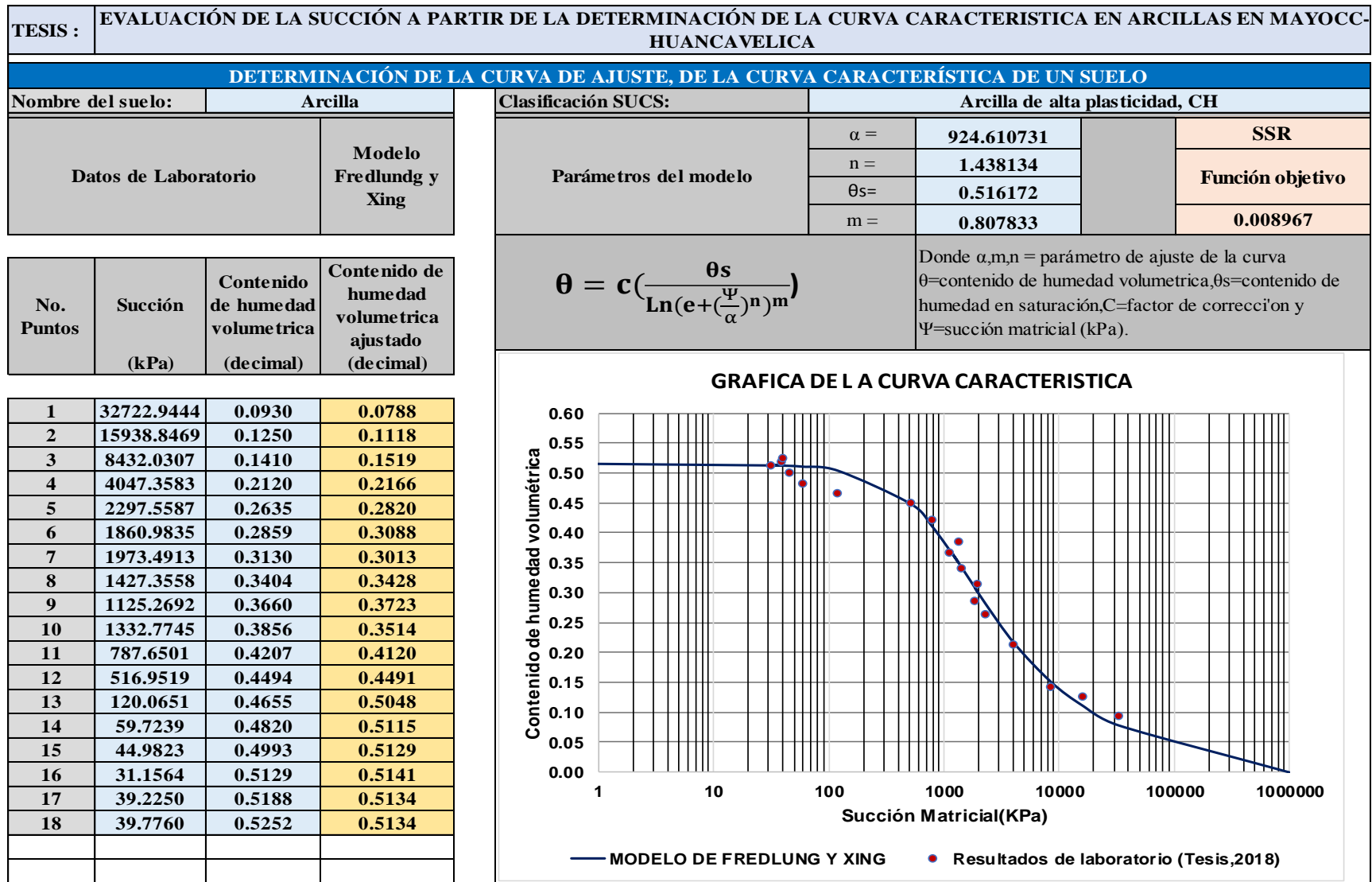


Figura A.8. Determinación de la curva característica por el modelo de Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

**ANEXO 09**

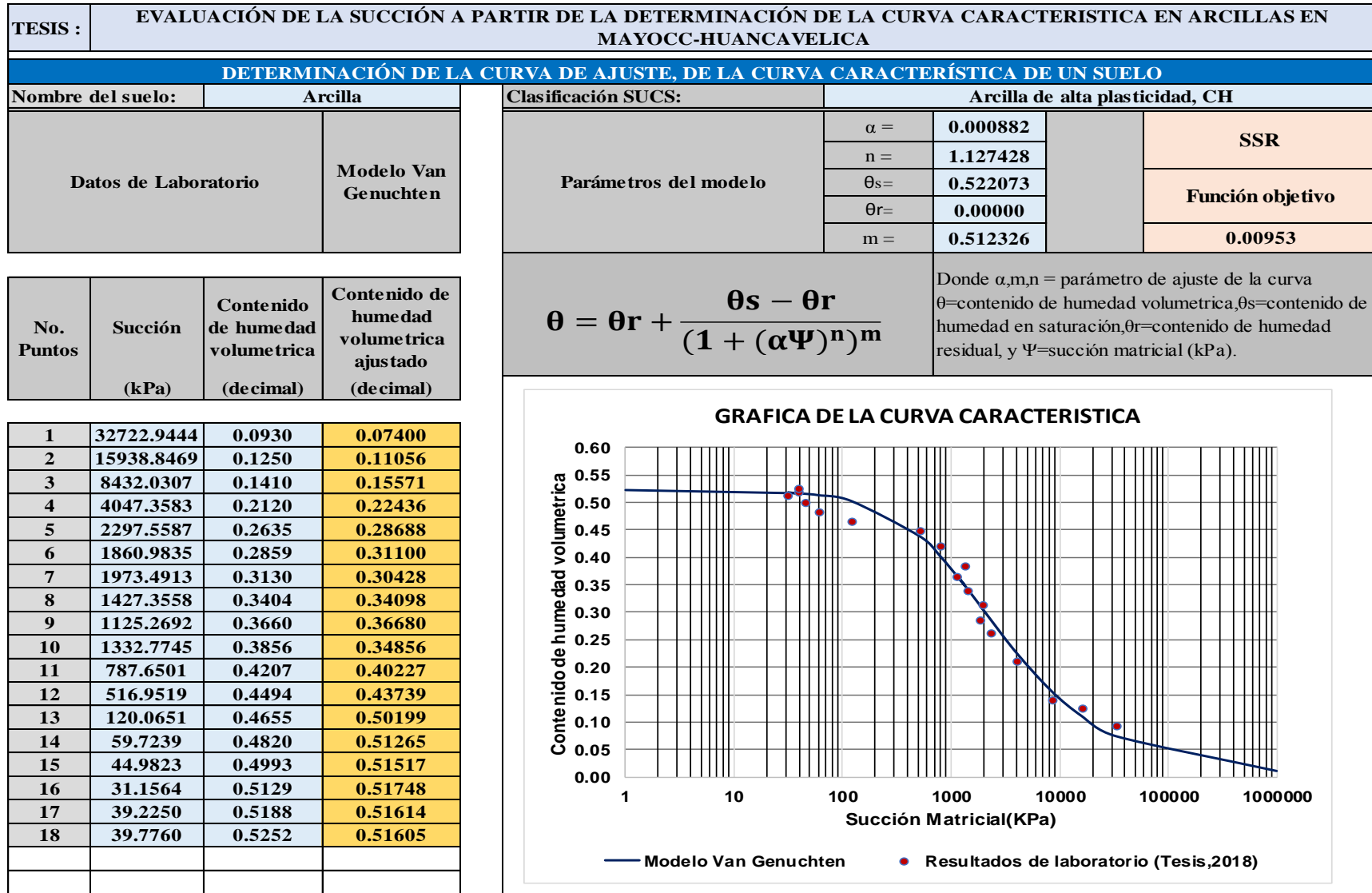


Figura A.9. Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten (Elaboración propia, 2018).

**ANEXO 10**

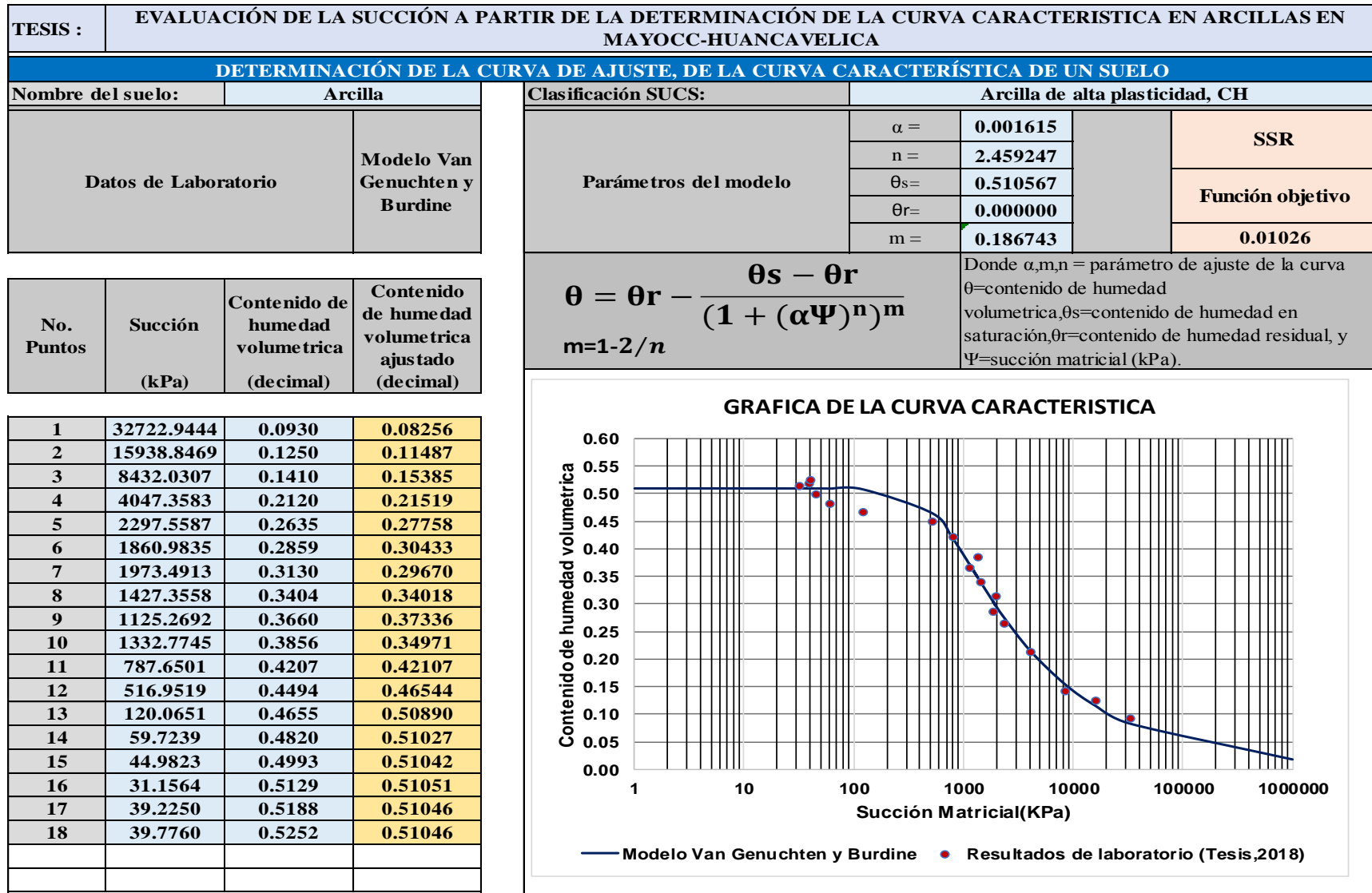


Figura A.10. Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten y Burdine (Elaboración propia, 2018).

**ANEXO 11**

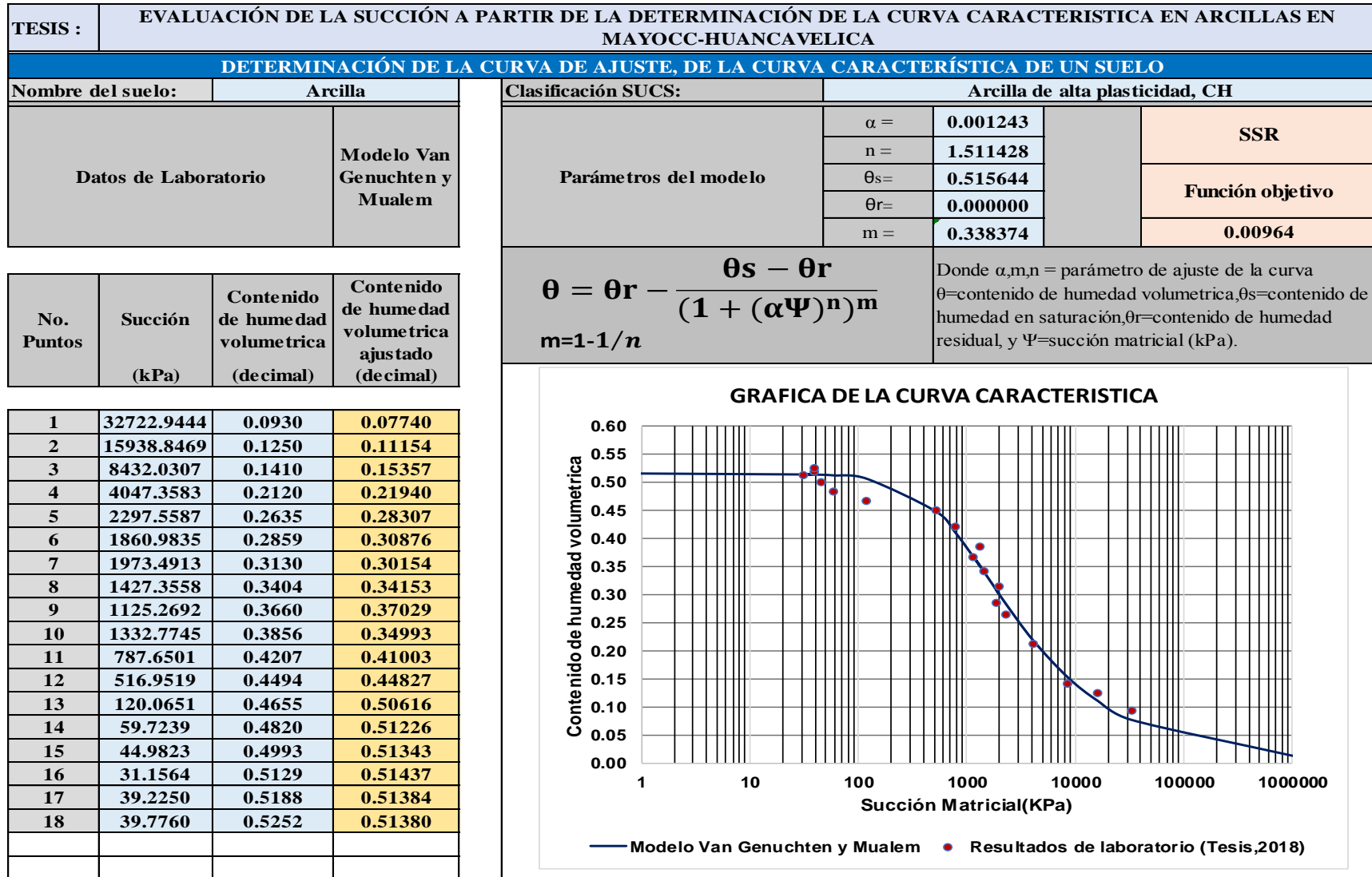


Figura A.11. Determinación de la curva característica por el modelo de Van Genuchten y Mualem (Elaboración propia, 2018).

**ANEXO 12**

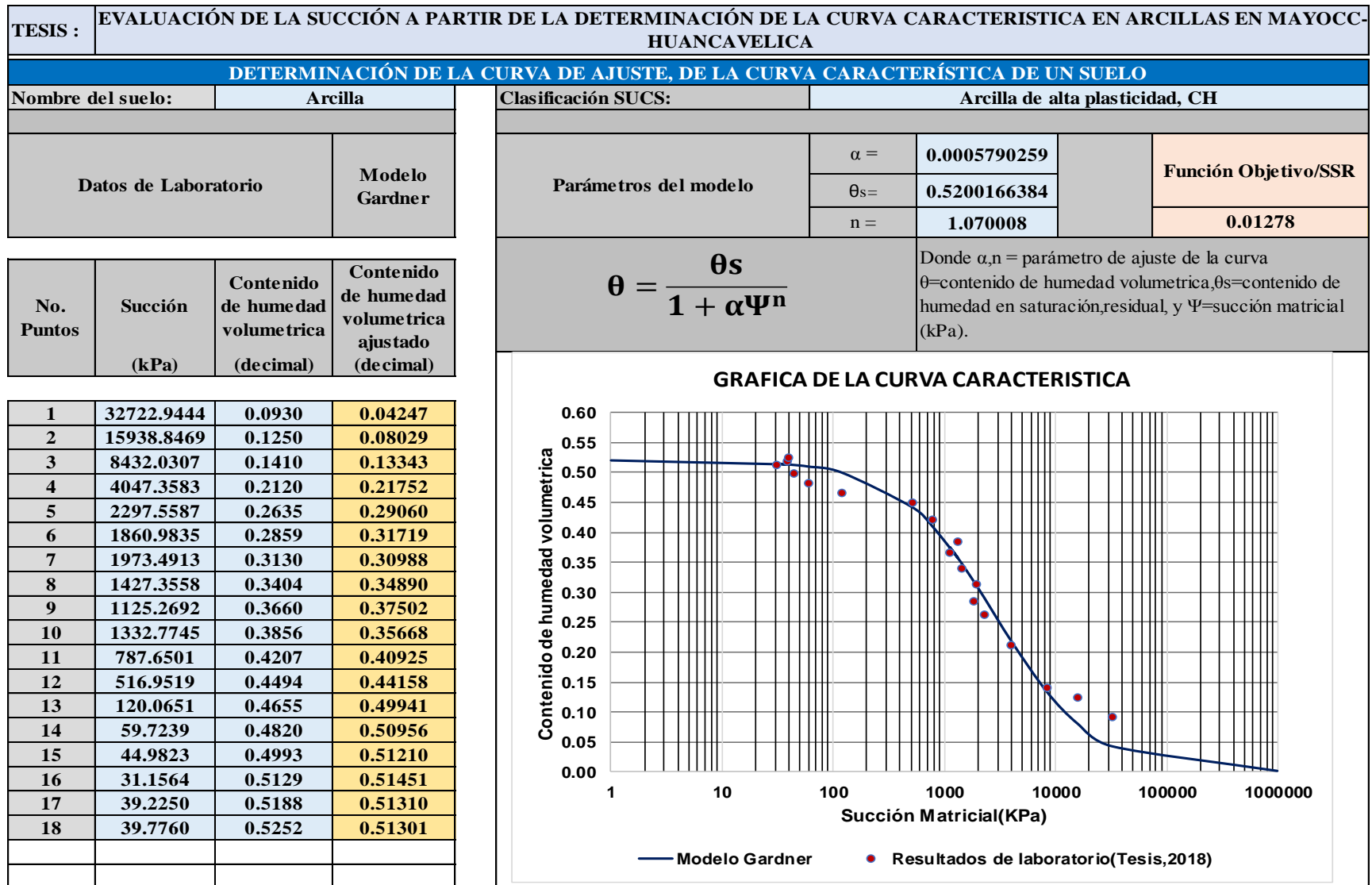


Figura A.12. Determinación de la curva característica por el modelo de Gardner (Elaboración propia, 2018).

### ANEXO 13

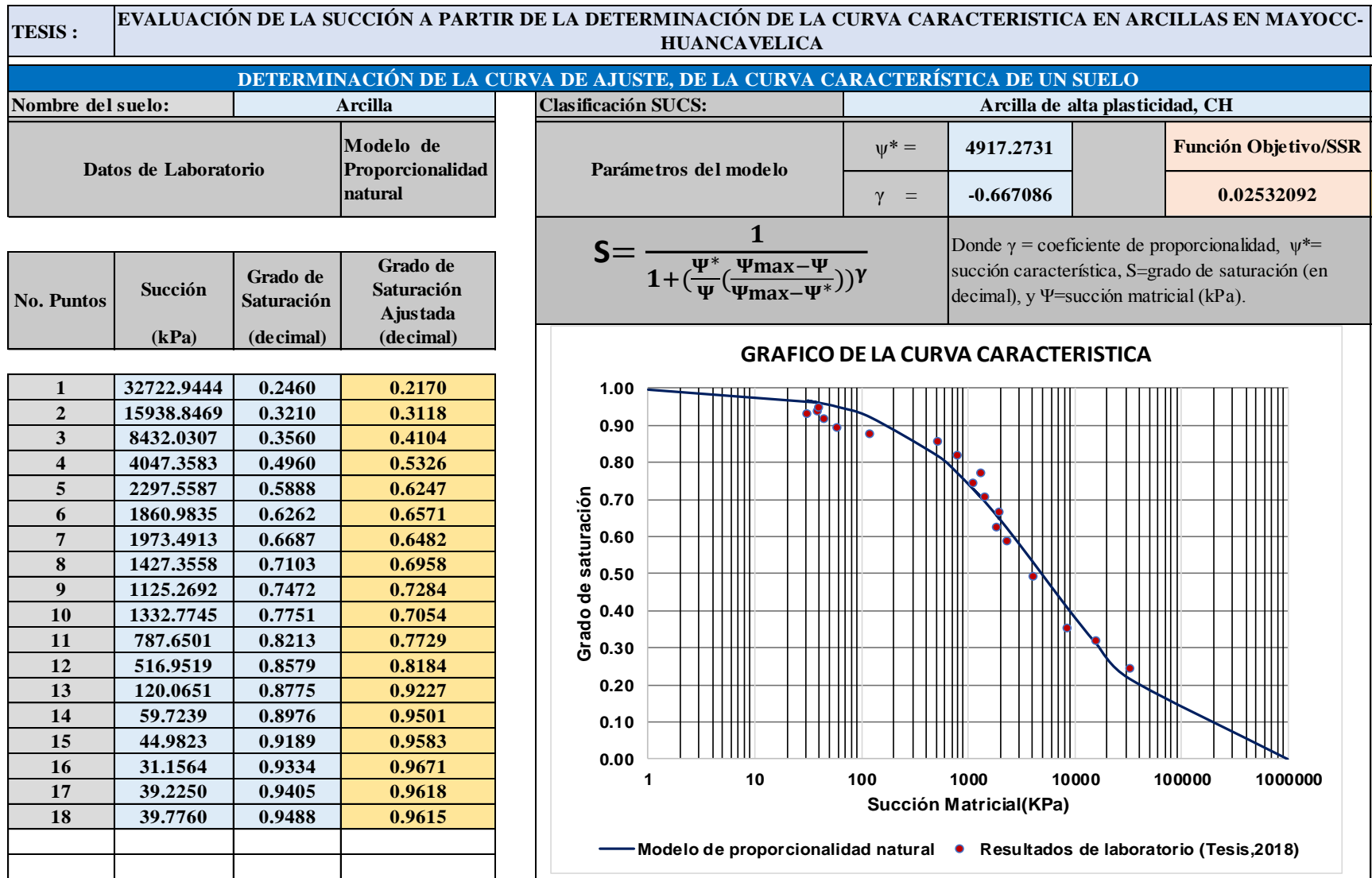


Figura A.13. Determinación de la curva característica por el modelo de proporcionalidad natural (Elaboración propia, 2018).

**ANEXO 14**

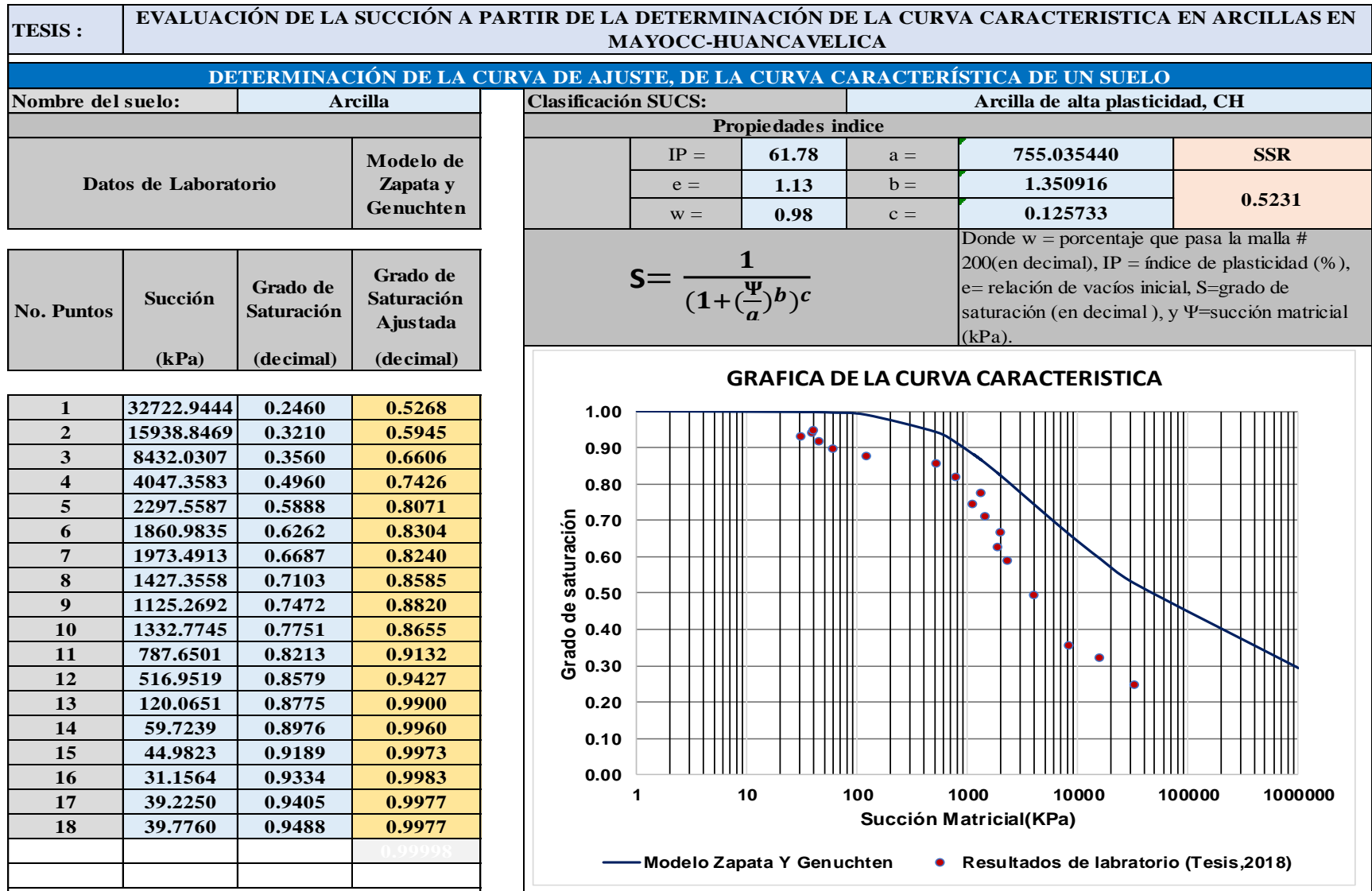


Figura A.14. Determinación de la curva característica por el modelo de Zapata y Genuchten (Elaboración propia, 2018).

**ANEXO 15**

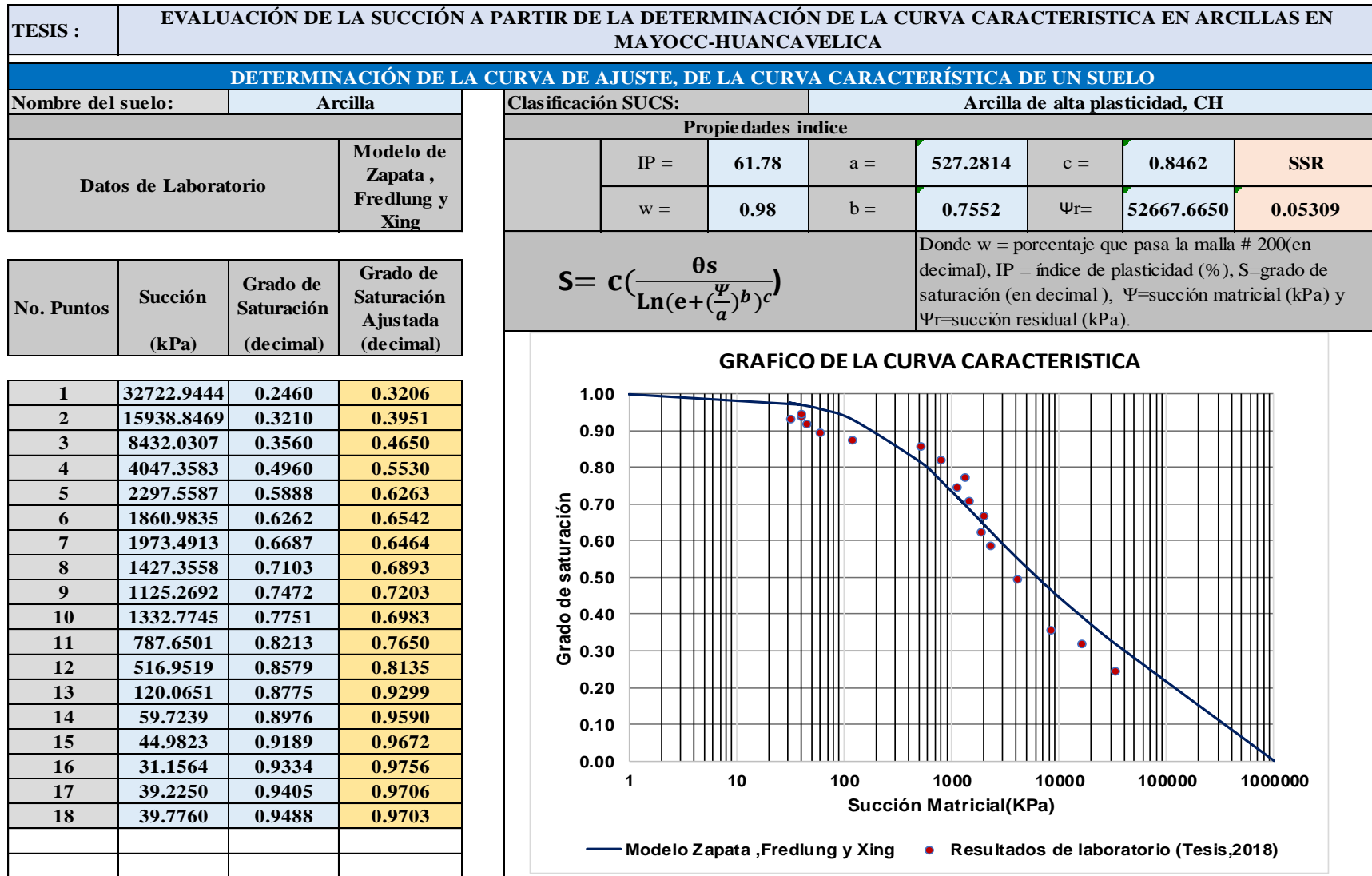
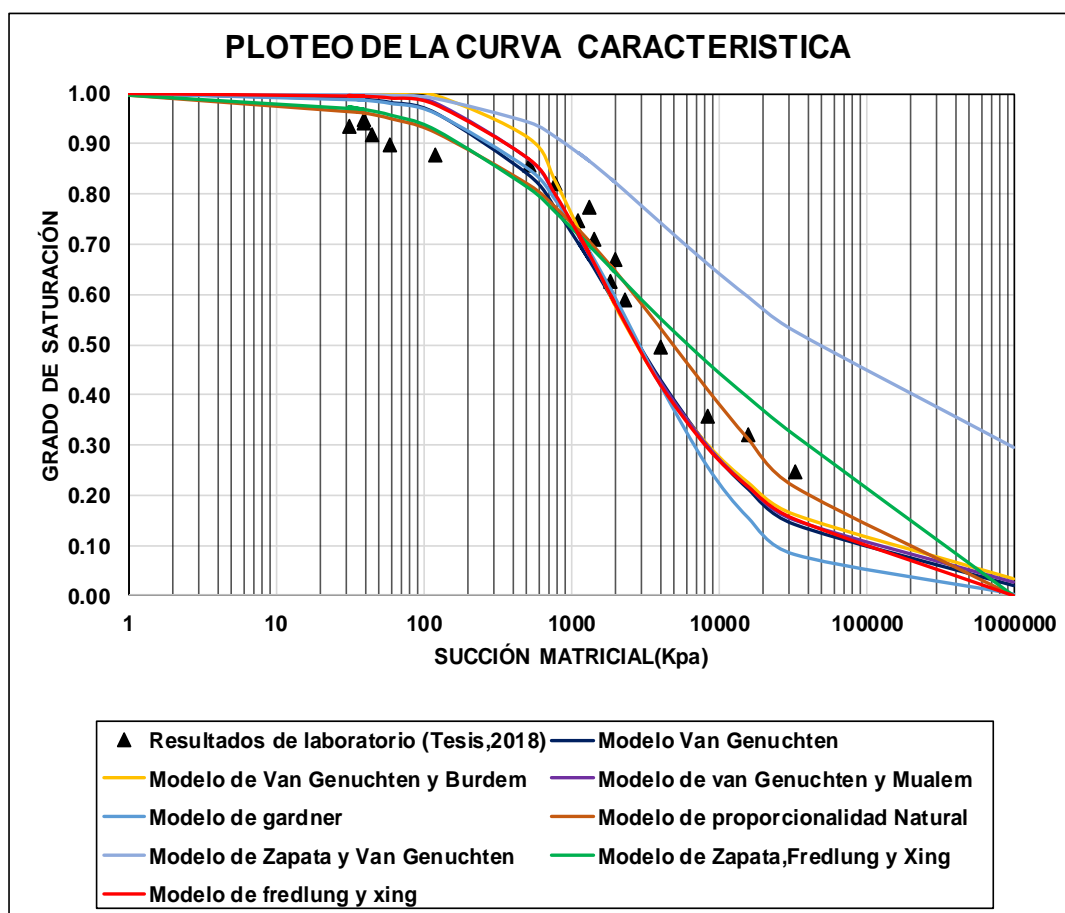


Figura A.15. Determinación de la curva característica por el modelo de Zapata, Fredlung y Xing (Elaboración propia, 2018).

## ANEXO 16

**TESIS : EVALUACIÓN DE LA SUCCIÓN A PARTIR DE LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA EN ARCILLAS EN MAYOCC-HUANCAVELICA**

**SUPERPOSICIÓN DE LOS MODELOS REALIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA**

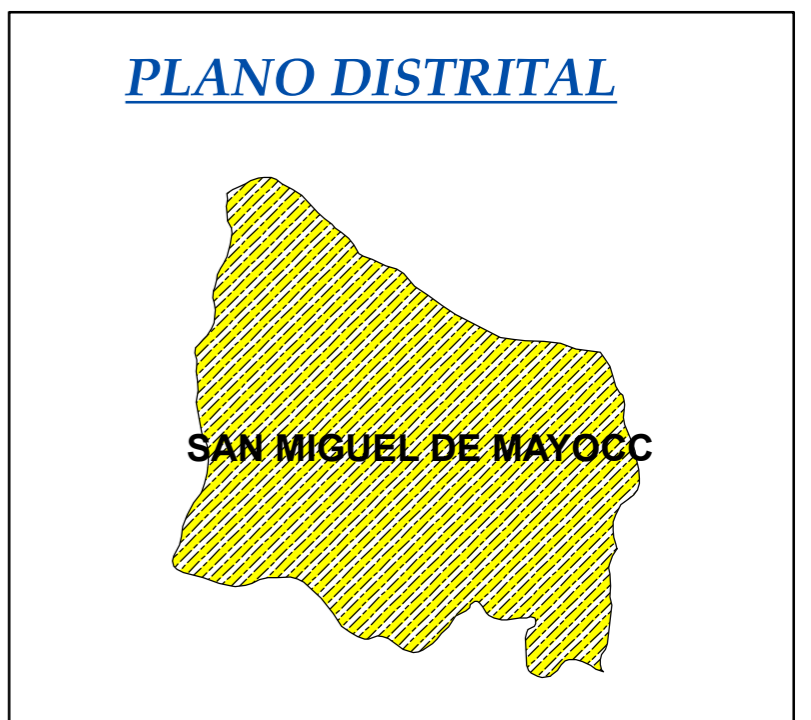


*Figura A.16.* Superposición de los modelos realizados para la determinación de la curva característica (Elaboración propia, 2018).



**PLANO DE UBICACION DE LA EXTRACCION DE LA MUESTRA**

**X=575310.00  
Y=8572553.00**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL		
TESIS: EVALUACION DE LA SUCCION A PARTIR DE LA DETERMINACION DE DE LA CURVA CARACTERISTICA EN ARCILLA EN MAYOCC-HUANCAVELICA		
UBICACION:	PLANO: UBICACION Y LOCALIZACION	
REGION: HUANCAVELICA	TESISTA:	LAMINA:
PROVINCIA: ANGARAES	RICHARD CABALLERO CONDORI	<b>UL-01</b>
DISTRITO: SAN MIGUEL MAYOCC	ESCALA:	
LUGAR: SAN MIGUEL MAYOCC	INDICADA	