



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias Geotecnia

# **IMPACTO EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LA MODIFICACIÓN CON CAL EN SUELOS EXPANSIVOS**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias (Geotecnia)**

Presenta:

**Ing. Ismael Vásquez Nogal**

Dirigido por:

**M. en C. José Roberto Galaviz González**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO., ABRIL 2016.**



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias Geotecnia

**IMPACTO EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LA MODIFICACIÓN CON CAL EN  
SUELOS EXPANSIVOS**

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias (Geotecnia)**

Presenta:  
**Ing. Ismael Vásquez Nogal**

Dirigido por:  
**M. en C. José Roberto Galaviz González**

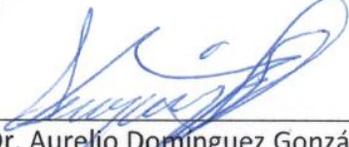
M. en C. José Roberto Galaviz González  
**Presidente**

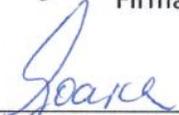
Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
**Secretario**

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
**Vocal**

Dr. Eduardo Rojas González  
**Suplente**

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza  
**Suplente**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

# RESUMEN

---

Los suelos expansivos, reconocidos como problemáticos porque causan fallas en las estructuras civiles debido a los cambios volumétricos producidos por variaciones en su contenido de agua, se han mejorado por medio de la inserción de aditivos como cal, cemento y polímeros. De esta manera, diversos investigadores trabajaron en observar los efectos de la adición de cal en las propiedades geotécnicas, la estabilización en la estructura del suelo y la permeabilidad. Sin embargo, estos resultados no han sido explicados por medio de la Curva de Retención Agua-Suelo (SWRC), utilizada para determinar diversos parámetros que describen el comportamiento de los suelos no saturados, como lo es la función de la conductividad hidráulica (FCH). Este trabajo muestra el impacto en la FCH de un suelo estabilizado con cal, por medio de la construcción de las SWRC naturales y modificadas determinadas por medio de la técnica del papel de filtro, se utilizó un modelo sólido-poroso bidimensional en conjunto con pruebas de porosimetría para explicar el efecto que produce la adición de cal en un suelo expansivo. Los resultados comprueban la formación de partículas (conglomeraciones) de mayor tamaño, provocando el incremento del rango de mesoporos y macroporos. Además, el porcentaje de cal requerido para la estabilización, evidenció un efecto negativo al reducir la interconectividad de los poros contenida en la estructura sólida del suelo. Situación que se evidencia en la disminución del valor del coeficiente de permeabilidad saturado.

**(Palabras clave:** cal, conductividad hidráulica, porosimetría, mejoramiento de suelos, suelo expansivo)

# SUMMARY

---

Expansive soils are recognized as problematic as they cause failures of civilian structures by volumetric changes caused by variations in water content have been stabilized through the inclusion of additives such as lime, Portland cement, and polymers. Thus, many researchers worked to observe the effects of the addition of lime in the geotechnical properties, stabilization in the soil structure and the permeability coefficient. Nevertheless, these results have not been explained through the Soil-Water Retention Curve (SWRC), as this has been used to determine various parameters describing the behavior of unsaturated soils such as the Hydraulic Conductivity Function (HCF). This work shows the impact in the HCF of a stabilized soil, through the construction of natural and modified SWRC determined by the filter paper technique. A bi-dimensional porous model was used along with porosimetry tests in order to explain the effect of the addition of lime in an expansive soil. The results show the formation of larger particles (clusters), resulting in increased range of mesopores and macropores. Also the lime content required to stabilize the soil, shows a negative effect because the reduction of the inter pores connectivity, this effect is evidenced in the permeability coefficient.

**(Key words:** lime, hydraulic conductivity, porosimetry, improvement soils, expansive soils)

# DEDICATORIA

---

Dedico esta tesis a Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, dándome fortaleza para continuar y no desmayar en los problemas que se presentaban.

Para mis padres quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. A mi hermana por el apoyo que siempre me brinda día a día. Es por ellos que soy lo que soy ahora.

# AGRADECIMIENTOS

---

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su culminación. Por esto agradezco a mi director de Tesis, M.C. José Roberto Galaviz González, por haberme confiado este trabajo en persona, por su paciencia, valiosa dirección y apoyo para seguir este camino de tesis y llegar a la conclusión del mismo.

A mis compañeros y amigos Luis, Gustavo y Darío, ya que con ellos he compartido incontables horas de trabajo y buenos ratos. Por todo el tiempo que me han dado, por el respaldo y la amistad.

A la Familia Rico Rodríguez quienes me han recibido muy bien durante mi estancia en Querétaro y por haberme dado la oportunidad de convivir con ellos.

Agradezco a la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, y al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio que se me brindo para poder realizar mis estudios de maestría.

# SIMBOLOGÍA

---

$k_r$ =conductividad hidráulica relativa

$S_e$ =grado de saturación efectivo

$S$ =grado de saturación

$S_r$ =grado de saturación residual

$\delta$ =constante que depende del tipo de suelo

$K_s$  = conductividad hidráulica saturada

$S_e^l$  = parámetro macroscópico de tortuosidad-conectividad

$\psi$ = succión mátrica

$\alpha$ = parámetro de van Genuchten

$m$ = parámetro de van Genuchten

$n$ = parámetro de van Genuchten

$\Theta$  = contenido volumétrico de agua normalizado

$\theta_s$ = contenido volumétrico saturado de agua

$\theta_r$ = contenido residual de agua

$n$  = Numero de intervalos entre  $\theta$  y un contenido volumétrico de agua de cero

$k_s$  = coeficiente de permeabilidad saturado medido (m/s)

$k_{sc}$  = coeficiente de permeabilidad saturado calculado (m/s)

$T_s$  = tensión superficial del agua (kN/m)

$j$  = una esquina desde "i" hasta "m"

$\rho_w$  = densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$\mu_w$  = viscosidad absoluta del agua (N \*s/m<sup>2</sup>)

$p$  = constante que representa la interacción de los poros de varios tamaños

$m$  = número de intervalos entre el contenido volumétrico de agua, y el más bajo contenido volumétrico de agua, en la curva característica experimental agua-suelo

$N$  = número de intervalos calculados entre el contenido volumétrico de agua saturado y cero contenido volumétrico de agua

$A_d$  = constante de ajuste

$\theta$  = contenido de agua

$A_s$  = área superficial

$\text{Å}$  = ångström

$V_m$  = multicapa volumétrica

$N_a$  = número de Avogadro

$\sigma$  = área cubierta por una molécula de nitrógeno

$p/p_0$  = presión relativa

$p_0$  = presión de saturación del adsorbato a la temperatura de adsorción  $T$

$x$  = cantidad de adsorbato adsorbida

$c$  = parámetro relacionado al calor de la adsorción y la licuefacción

$n$  = número de capas que pueden ser formadas en el sólido

$t$  = espesor estadístico de la capa adsorbida

$V_{ads}$  = volumen adsorbido

$\rho_l$  = densidad del líquido adsorbante

$V_p$  = volumen físico de los poros

$r_c$  = radio de poros cilíndricos

$\gamma$  = distancia entre paredes para los poros con forma de hendidura

$w_m$  = volumen molar

$\theta$  = ángulo de contacto

$\varphi$  = potencial de adsorción asociado con una geometría específica de poro.

$t_e$  = límite crítico del espesor de la película adsorbida en el momento en que ocurre la evaporación capilar

$N_n$  = número total de nodos en la cuadrícula

$n_i$  = número de elementos de tamaño  $i$

$R_{b1}$  y  $R_{b2}$  = radios de dos enlaces adyacentes que conectan una cavidad con radio  $R_{st}$ .

$F_{pv}$  = parámetro que representa el factor del volumen relativo que reduce el volumen total de los macroporos

$R_i$  = radio correspondiente del poro  $i$

$\mu_{sm}$  = tamaño medio de microporos

$\sigma_{sm}$  = desviación estándar de los microporos

$\mu_{SMm}$  = tamaño medio de los macroporos

$\sigma_{SM}$  = desviación estándar de los macroporos

$S_s$  = gravedad específica

LL = límite líquido

LP= limite plástico

IP= índice plástico

$\gamma_d$  = peso volumétrico seco máximo

pH= potencial de hidrógeno

N<sub>2</sub> = adsorbato nitrógeno

R<sup>2</sup>= coeficiente de correlación

# TABLA DE CONTENIDO

---

RESUMEN .....	i
SUMMARY .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
SIMBOLOGÍA.....	v
TABLA DE CONTENIDO.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS .....	13
ÍNDICE DE TABLAS .....	17
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....	18
1.1 Antecedentes .....	19
1.2 Planteamiento del problema .....	22
1.3 Justificación .....	23
1.4 Hipótesis.....	24
1.5 Objetivo General .....	24
1.6 Objetivos Particulares .....	25
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. Suelos no saturados .....	27
2.2. Curva de Retención de Agua-Suelo (SWRC).....	29
2.3. Conductividad Hidráulica (k) .....	30
2.4. Métodos para estimar la función de conductividad hidráulica (FCH).....	33
2.4.1. van Genuchten (1980).....	33
2.4.2. van Genuchten (1980) – Mualem (1976) .....	35
2.4.3. Método de Fredlund y Rahardjo (1993).....	35
2.4.4. Galaviz-González et al. (2014a) .....	37
2.5. Estabilización con cal.....	39
2.5.1. Método seco.....	40
2.5.2. Método de lechada .....	40
2.6. Efectos de la estabilización con Cal.....	41
2.7. Porosimetría .....	47
2.7.1. Isotherma de adsorción y desorción de nitrógeno a 77 K.....	48

2.7.2. Método BET (área superficial).....	53
2.7.3. Método t (área superficial, volumen de microporos y mesoporos) .....	55
2.7.4. Método Barret-Joyner-Halenda (BJH) .....	57
2.7.4.1 Modificación de la ecuación de Kelvin según Mayagoitia (1980) .....	58
2.7.4.2 Modificación de la ecuación de Kelvin según Broekhoff y de Boer .....	59
2.7.4.3 Modificación de la ecuación de Kelvin según Kruk-Jaroniec-Sayari (KJS) .....	60
2.8. Distribución de Tamaño de Poros en incrementos de succión .....	60
<b>Capítulo 3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>65</b>
3.1. Localización del suelo a estudiar .....	67
3.2. Trabajo de campo.....	67
3.3. Lugar de ejecución de la experimentación .....	68
3.4. Contenido óptimo de suelo-cal .....	68
3.4.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH) .....	68
3.4.2. Número de repeticiones .....	69
3.5. Caracterización del suelo .....	69
3.5.1 Determinación del peso específico relativo de los sólidos (Ss).....	69
3.5.2. Análisis Granulométrico por mallas .....	69
3.5.3. Límites de Consistencia (Atterberg) .....	70
3.5.4. Determinación del peso específico seco de la masa de suelo ( $\gamma_d$ ).....	70
3.5.5. Grado de compactación .....	70
3.5.6. Coeficiente de permeabilidad saturada ( $k_s$ ).....	71
3.6. Succión .....	71
3.6.1. Curva de Retención de Agua-Suelo (SWRC) .....	73
3.6.2. Contenido de agua .....	73
3.6.3. Nivel de tratamiento .....	73
3.6.4. Número de repeticiones .....	73
3.7. Distribución del tamaño de poro .....	74
<b>Capítulo 4. RESULTADOS, ANÁLISIS Y APLICACIÓN .....</b>	<b>77</b>
4.1. Caracterización Geotécnica.....	78
4.2. Prueba Proctor Estándar, determinación del grado de compactación.....	79
4.3. Potencial de Hidrógeno del suelo (pH) y contenido de cal óptimo .....	80
4.4. Porosimetría con intrusión de nitrógeno (N <sub>2</sub> ) .....	81

4.4.1 Distribución de Tamaño de Poro rama de Adsorción .....	83
4.4.2 Distribución de Tamaño de Poro rama de Desorción .....	85
4.5. Curva de Retención agua-suelo (característica) del suelo de Jurica en estado Natural .....	87
4.6. Curva de Retención Agua-Suelo-Cal (90% de compactación y 7% de cal) .....	89
4.7. Curva de Retención Agua-Suelo modificado con 7% de cal y tiempo de curado de 7 días en condición de humedad.....	92
4.8. Comparativa de las Curvas de Retención Natural (SWRC) y Modificada (SWLRC) .....	94
4.6. Ajuste del modelo sólido-poroso y Distribución de Tamaño de Poro .....	97
4.9. Comportamiento Hidráulico del suelo de Jurica .....	101
4.10. Función de Conductividad Hidráulica, métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-Gonzalez <i>et al</i> (2014a) .....	102
<b>Capítulo 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>108</b>
<b>Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>111</b>
<b>Capítulo 7. ANEXOS .....</b>	<b>117</b>
ANEXO 7-1. Isoterma natural 1 .....	118
ANEXO 7-2. Distribución de Tamaño de Poro natural 1 en rama de adsorción.....	119
ANEXO 7-3. Distribución de Tamaño de Poro natural 1 en rama de desorción .....	120
ANEXO 7-4. Isoterma natural 2 .....	121
ANEXO 7-5. Distribución de Tamaño de Poro natural 2 en rama de adsorción.....	122
ANEXO 7-6. Distribución de Tamaño de Poro natural 2 en rama de desorción .....	123
ANEXO 7-7. Isoterma modificada 1.....	124
ANEXO 7-8. Distribución de Tamaño de Poro modificada 1 en rama de adsorción .....	125
ANEXO 7-9. Distribución de Tamaño de Poro modificada 1 en rama de desorción .....	126
ANEXO 7-10. Isoterma modificada 2.....	127
ANEXO 7-11. Distribución de Tamaño de Poro modificada 2 en rama de adsorción .....	128
ANEXO 7-12. Distribución de Tamaño de Poro modificada 2 en rama de desorción .....	129
ANEXO 7-13. Área superficial BET natural-1 .....	130
ANEXO 7-14. Área superficial BET natural-2 .....	131
ANEXO 7-15. Área superficial BET modificada-1.....	132
ANEXO 7-16. Área superficial BET modificada-2.....	133
ANEXO 7-17. Resumen SWRC .....	134
ANEXO 7-18. Resumen SWRLC.....	135

ANEXO 7-19. Ajuste Fredlund y Rahardjo natural 1.....	136
ANEXO 7-20. FCH Fredlund y Rahardjo natural 1.....	137
ANEXO 7-21. FCH van Genuchten natural 1.....	138
ANEXO 7-22. Ajuste Fredlund y Rahardjo natural 2.....	139
ANEXO 7-23. FCH Fredlund y Rahardjo natural 2.....	140
ANEXO 7-24. FCH van Genuchten natural 2.....	141
ANEXO 7-25. Ajuste Fredlund y Rahardjo modificada 1 .....	142
ANEXO 7-26. FCH Fredlund y Rahardjo modificada 1 .....	143
ANEXO 7-27. FCH van Genuchten modificada 1 .....	144
ANEXO 7-28. Ajuste Fredlund y Rahardjo modificada 2 .....	145
ANEXO 7-29. FCH Fredlund y Rahardjo modificada 2 .....	146
ANEXO 7-30. FCH van Genuchten modificada 2 .....	147
ANEXO 7-31. Ficha técnica de cal hidráulica Del Valle.....	148
ANEXO 7-32. Ajuste Modelo Sólido-Poroso .....	149

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
2-1. Curva de secado para un suelo arenoso, $\theta_s$ , contenido volumétrico saturado de agua; $\theta_r$ . Contenido volumétrico de agua residual. (Fredlund & Xing, 1994). ....	34
2-2. Típica curva característica para la predicción de la función de la permeabilidad. $\theta_f$ Como punto medio del j-ésimo intervalo de contenido de agua; $\psi_f$ corresponde a la succión en $\theta_f$ . (Fredlund & Xing, 1994). ....	36
2-3. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto para determinar la Función de Conductividad Hidráulica.....	38
2-4. Estabilización con cal.....	40
2-5. Equipo de estabilización por vía húmeda con depósito para conglomerante de 25 m <sup>2</sup> (Atienza, 2008).....	41
2-6. Modelos comunes de poros. ....	47
2-7. Tipos de poros. ....	48
2-8. Esquema de términos en la adsorción de gas. ....	48
2-9. Tipos de isothermas de adsorción de nitrógeno (N <sub>2</sub> ).....	50
2-10. Etapas en el llenado-vaciado de un poro cilíndrico abierto en sus extremos. $r_k$ = radio interior de poro, $r_p$ = radio de poro, $t$ = espesor de la capa adsorbida. ....	52
2-11. Tipos de histéresis encontrados en la adsorción de nitrógeno (N <sub>2</sub> ).....	53
2-12. Formas de las isothermas encontrados en la adsorción de nitrógeno en el método $t$ . ....	56
2-13. Construcción de la red rectangular. ....	62
3-1. Metodología propuesta ....	66
3-2. Ensayes previos de la investigación ....	67
3-3. Equipo Quantachrome iQ2 para la determinación de las isothermas de adsorción-desorción.....	75
4-1. Curva de compactación Proctor Estándar del suelo de Jurica. ....	79
4-2. Contenido de cal óptimo para el suelo de Jurica, Contenido de cal (%) vs pH. ...	80

4-3. Isotermas no.1 del Suelo en estado natural y en estado modificado con cal al 7% de la zona de Jurica, Presión relativa vs volumen (cc/g).....	82
4-4. Isotermas no.2 del Suelo en estado natural y en estado modificado con cal al 7% de la zona de Jurica, Presión relativa vs volumen (cc/g).....	83
4-5. Distribución de tamaño de poro no.1 del suelo de Jurica, rama de Adsorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado. ....	84
4-6. Distribución de tamaño de poro no.2 del suelo de Jurica, rama de Adsorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado .....	84
4-7. Distribución de tamaño de poro no.1 del suelo de Jurica, rama de desorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado. ....	86
4-8. Distribución de tamaño de poro no.1 del suelo de Jurica, rama de desorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado .....	86
4-9. SWRC1 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ). .	87
4-10. SWRC1 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado (Sr).....	88
4-11. SWRC2 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ).88	
4-12. SWRC2 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado (Sr).....	89
4-13. SWLRC1 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $w$ ). ....	90
4-14. SWLRC1 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación (Sr).....	90
4-15. SWLRC2 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ).....	91
4-16. SWLRC2 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación (Sr).....	91

4-17. Comparativa de la trayectoria de secado 1 en muestras modificadas con cal, con y sin curado. Succión (kPa) vs Contenido de agua (%). .....	93
4-18. Comparativa de la trayectoria de secado 2 en muestras modificadas con cal, con y sin curado. Succión (kPa) vs Contenido de agua (%). .....	93
4-19. Comparativa SWRC1 y SWLRC1 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ). .....	94
4-20. Comparativa SWRC1 y SWLRC1 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado Sr. ....	94
4-21. Comparativa SWRC2 y SWLRC2 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ). .....	95
4-22. Comparativa SWRC2 y SWLRC2 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado Sr. ....	95
4-23. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo natural-1 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado Sr. ....	98
4-24. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo natural-2 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado Sr. ....	99
4-25. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo modificado-1 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado Sr. ....	99
4-26. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo modificado-2 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado Sr. ....	100
4-27. Comparativa de Curva de retencion Agua-Suelo Ajustadas. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado Sr. ....	100
4-28. Distribución de Tamaño de Poro. Radio (nm) vs Volumen relativo. ....	101
4-29. Ajuste de la Curva Característica natural no.1 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a). ...	103
4-30. Ajuste de la Curva Característica natural no.2 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a). ...	103
4-31. Ajuste de la Curva Característica modificada no.1 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a). ...	104
4-32. Ajuste de la Curva Característica modificada no.2 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a). ...	104

4-33. Función de Conductividad Hidráulica del Suelo Expansivo de Jurica no.1.  
Succión (kPa) vs Conductividad Hidráulica (m/s)..... 106

4-34. Función de Conductividad Hidráulica del Suelo Expansivo de Jurica no.2.  
Succión (kPa) vs Conductividad Hidráulica (m/s)..... 107

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
3-1. Especificaciones del equipo Quantachrome iQ2.....	75
3-2. Resumen de ensayos de laboratorio realizados .....	76
4-1. Caracterización Geotécnica del suelo de Jurica. ....	78
4-2. Área superficial obtenida por el metodo del BET .....	82
4-3. Valores de succión asociados a distintos tamaños de poros .....	96
4-4. Conductividad Hidráulica Saturada .....	101

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Antecedentes

Al-Mukhtar *et al.* (2012) estudiaron los efectos en las propiedades geotécnicas producidas por la adición de cal en suelos arcillosos. Sus estudios mostraron que una arcilla de Francia al ser modificada con cal pierde sus propiedades cohesivas tales como el índice plástico, el cual decrece con la adición de cal y se mantiene constante al alcanzar el 4% de contenido de cal. En cuanto al coeficiente de permeabilidad se vio un aumento en esta misma hasta alcanzar este 4%, pero al sobrepasar este porcentaje se ve reducida debido a la formación de obstrucciones en los poros.

Cuisiner *et al.* (2011) mostraron el impacto de la estabilización con cal en la estructura de un suelo limoso y su conductividad hidráulica saturada, por medio de la intrusión de mercurio, la cual mostró que se formó una nueva clase de poro más pequeño, debajo de  $3 \times 10^3 \text{ \AA}$ . Así, a través de pruebas de compactación mostraron que existe un cambio en el peso específico seco máximo del suelo limoso. Por otro lado, concluyeron que el efecto en la conductividad hidráulica es limitado debido a que ésta es controlada por el volumen de poros más grandes.

Di Sante *et al.* (2014) analizaron el tiempo de las reacciones en un suelo modificado con un contenido de cal de 5% y la influencia de las condiciones de curado en la microestructura del suelo. Un análisis de microscopía reveló que es necesario humedecer las muestras inmediatamente, esto para permitir una reacción uniforme en la formación de la reacción puzolánica. A su vez, el proceso de curado del suelo mejorado hace que disminuya el pH, llegando a mantenerse con el tiempo. Los resultados del análisis de la permeabilidad muestran que los valores con el tiempo decrecen y dependen del lapso que dure el proceso de curado.

Al-Mukhtar *et al.* (2014) estudiaron la absorción de un 10% de contenido de cal en la modificación de suelos arcillosos. Realizaron el estudio en cinco suelos con diferentes proporciones de minerales arcillosos. Encontraron que las reacciones a corto plazo son el intercambio catiónico y la floculación, mientras que

la reacción a largo plazo depende de la cantidad de cal y se acelera conforme se incrementa la temperatura, esto produce que aumente el proceso de curado. Además, mostraron que la cantidad de cal que no reacciona con los minerales arcillosos (consumo de cal) es distinto en temperaturas de 20 °C y 50 °C. Un monitoreo de este consumo explica los mecanismos a corto plazo y largo plazo responsables de la estabilización (intercambio catiónico y reacción puzolánica). Asimismo, especificaron que las velocidades de reacción asociadas al consumo de cal se incrementan exponencialmente con la temperatura y pueden ser explicadas por medio de la ecuación de Arrhenius.

Ciancio *et al.* (2014) realizaron una representación del contenido óptimo de cal para maximizar la resistencia a la compresión y la rigidez en una presa. Lo anterior lo hicieron en especímenes sometidos a un proceso de curado de 28 días. Concluyeron que el proceso de curado es un factor importante que afecta la resistencia del material. Por otra parte, la adición de un contenido de cal en un 4% mostró que la reacción puzolánica está gobernada por la disponibilidad del agua y no del contenido de cal mismo.

Consoli *et al.* (2014) realizaron experimentos para observar el efecto en el tiempo de curado de suelos mejorados con un 3% en el contenido de cal. Utilizaron especímenes que fueron sometidos a compresión en una maquina universal y a través de estos ensayos demostraron que la resistencia crece de forma no lineal conforme se incrementa el contenido de cal. Adicionalmente, realizaron pruebas de succión en los especímenes, posteriormente de haber alcanzado la falla en la prueba de compresión simple. Así, por medio de la obtención de la porosimetría y los resultados de compresión, concluyeron que la resistencia a la compresión aumenta linealmente con la reducción de la porosidad del suelo.

Md Rajibul K., y S.-C.R. L. (2015) Realizaron pruebas oedométricas para obtener el coeficiente de permeabilidad vertical ( $k_v$ ) en suelos mejorados con drenes verticales. Concluyeron que la relación esfuerzo-deformación lineal funciona bien incluso cuando el suelo manifiesta un comportamiento constitutivo

complejo; sin embargo, cuando  $K_v$  es constante y el esfuerzo de consolidación excede cierto valor, el método convencional para estimar  $k$  no funciona bien. Además, realizaron estudios en papel celular para deducir el coeficiente de permeabilidad horizontal ( $k_h$ ). Estos trabajos concluyeron que los métodos convencionales para determinar el coeficiente de permeabilidad no pueden ser comparados con elementos finitos ya que usa modelos no lineales para representar mejor el suelo arcilloso.

Niu *et al.* (2015) mostraron el uso de la conductividad eléctrica en la predicción de la conductividad hidráulica por medio de la determinación del factor de tortuosidad “ $q$ ” usado en los modelos estadísticos. En este estudio se consideró que el flujo del agua y el flujo eléctrico en un medio poroso mejorarían la capacidad predictiva de los modelos estadísticos. El resultado de este análisis demostró que el modelo de conductividad eléctrica puede describir la conductividad hidráulica de suelos no saturados, con una correlación mayor a 97%.

Di Sante *et al.* (2015) estudiaron la influencia del retraso en la compactación en la compresibilidad y conductividad hidráulica en mezclas de suelo arcilloso con un 5% de contenido de cal. A través de la consolidación unidimensional mostraron que se incrementa la compresibilidad con el tiempo de curado y que está asociado con los agregados mayores producidos por la reacción puzolánica. Por medio de ensayos de microscopía electrónica e intrusión de mercurio demostraron la formación de estos agregados en especímenes con y sin proceso de curado durante la reacción puzolánica.

Bayat *et al.* (2015) investigaron la relación entre la curva de conductividad hidráulica y la curva de compresión confinante. Obtuvieron la curva de retención del suelo por medio de regresión lineal y no lineal por medio del software DataFit y redes neuronales. A pesar de haber obtenido correlaciones mayores a 97% tras el uso de redes neuronales con el fin de obtener la conductividad hidráulica con los modelos de Mualem y van Genuchten (1986), recomiendan ser cautos al evaluar suelos arcillosos.

Finalmente, Galaviz-González *et al.* (2014) desarrollaron un modelo computacional para estimar la función de conductividad hidráulica por medio de un algoritmo basado en un arreglo tipo “tabla” que usa métodos de interpolación con incrementos variables. El algoritmo genera un polinomio de grado “n” para cada una de las trayectorias principales de humedecimiento y secado. Este proceso asegura una correlación de 100% entre la curva de retención experimental con la polinómica. Al determinar la curva de retención, la función de conductividad hidráulica es evaluada por medio del modelo propuesto por Fredlund y Rahardjo (1993), los resultados de este análisis fueron comparados con otros métodos existentes, con lo que concluyeron que el procedimiento arroja valores consistentes con los reportados por otros autores.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En la actualidad, la mayor parte de las técnicas utilizadas para mejorar el comportamiento mecánico de un suelo expansivo ha resultado ser la adición de un porcentaje de cal (entre 3% y 8%) con respecto al peso del suelo y a través de suspensiones (lechadas) con distintos proporcionamientos (máximo 6%) con respecto al volumen del fluido utilizado para su disolución (agua).

Se ha establecido y comprobado que el mejoramiento del suelo con cal resulta ser eficaz y económico con respecto a otras técnicas de mejoramiento. Sin embargo, el procedimiento presenta deficiencias cuando el proceso constructivo se ejecuta de manera ineficiente. Este puede generar que la homogenización del porcentaje de cal no sea bien distribuida, generando zonas de suelo mejorado y otros sin mejorar. Además, un daño colateral producido por el proceso constructivo, resulta la mala preparación y colocación de las líneas de agua potable y drenaje, lo cual puede generar que éstas presenten algún tipo de falla provocando fugas de agua que produce un flujo de agua a través del suelo, y como consecuencia incrementa su contenido de agua.

Por lo anterior, surge la inquietud de investigar de qué manera se ve afectada la conductividad hidráulica del suelo no saturado tras haber adicionado cal para mejorar su comportamiento mecánico.

### 1.3 Justificación

Los suelos expansivos han sido considerados por los ingenieros civiles como un problema porque son la causa de varios daños en las estructuras colocadas sobre este tipo de suelos, ya que estos sufren cambios de volumen debido al flujo de agua a través de este. Dicho flujo está regido por la conductividad hidráulica dentro de su comportamiento mecánico. Esto ha llevado al desarrollo de investigaciones que han señalado la importancia de la modificación con cal en suelos expansivos (Al-Mukhtar *et al.*, 2012; Cuisiner *et al.*, 2011) y el efecto del fenómeno de histéresis en los suelos (Galaviz-González *et al.*, 2014). Sin embargo, la gran cantidad de problemas asociados a las edificaciones colocadas sobre suelos expansivos mejorados con cal, provienen del deficiente control de calidad cuando el proporcionamiento de cal es adicionado al suelo mismo, se puede producir carbonatación que esta se deriva de un mal control en la estabilización durante las condiciones de curado e impide la formación de productos cementantes que conllevan a la pérdida de resistencia del material (Ciancio *et al.*, 2014).

Los problemas antes mencionados han llevado a recurrir a soluciones tales como las inyecciones en suelos expansivos estabilizados previamente con cal pero con un deficiente proceso de homogenización y sobre los cuales ya se han colocado estructuras de cimentación. Con las lechadas de cal se busca uniformizar el comportamiento mecánico del suelo (que no fue logrado durante la homogenización del suelo con la cal). El éxito de la intrusión de esta suspensión depende de la conductividad hidráulica de estos suelos mejorados. Sin embargo, el problema recae en el hecho de que los suelos expansivos poseen conductividades hidráulicas muy bajas, por lo cual, este estudio se propuso con el objetivo de evaluar el impacto de la conductividad hidráulica en suelos expansivos

modificados con cal, con el fin de evaluar si las inyecciones son recomendables o no como posibles soluciones a los problemas de las cimentaciones sobre estos suelos.

Los resultados obtenidos de este estudio serán comparados con las de un trabajo anteriormente realizado por Cuisiner *et al.* (2011) quienes demuestran que el impacto en la conductividad hidráulica en suelos limosos es limitado. Estos resultados difieren de los encontrados por Al-Mukhtar *et al.* (2012), ya que encontraron que a partir de un 4% de cal usado como agente estabilizador provoca que la conductividad hidráulica saturada se reduzca debido a la formación de obstrucciones en los poros. Sin embargo, este resultado no ha sido previamente descrito por medio del uso de la curva de retención y los modelos matemáticos usados para obtener la función de la conductividad hidráulica, por lo cual se abordarán estudios sobre el presente tema que tomen la importancia en los ciclos de histéresis, demostrados por Galaviz-González *et al.* (2014) a través de la obtención de las curvas de retención del suelo en estado natural y en estado modificado con cal.

## **1.4 Hipótesis**

La variación de la conductividad hidráulica del suelo expansivo debido a la adición de cal se determina a través de la relación que existe entre la distribución de tamaño de poros y la curva de retención del suelo.

## **1.5 Objetivo General**

En este proyecto de investigación se pretende evaluar la función de conductividad hidráulica tanto en un suelo expansivo en estado natural y estabilizado con cal mediante modelos matemáticos, donde las variaciones de esta función están dadas por los cambios en las curvas de retención de agua-suelo y dependen de la distribución de tamaño de poro y del porcentaje de cal adicionado al suelo.

## 1.6 Objetivos Particulares

- 1) Determinar el comportamiento de la función de conductividad hidráulica de un suelo expansivo en estado natural y estabilizado con cal, mediante los métodos matemáticos propuestos por Fredlund y Rahardjo (1993), van Genuchten (1980) y Galaviz-González *et al.* (2014a).
- 2) Analizar las variaciones en la Función de Conductividad Hidráulica (FCH) debido a cambios en la Curva de Retención de Agua-Suelo (SWRC) mediante variaciones en la Distribución de Tamaños de Poros (DTP) provocados por la adición de cal como agente estabilizador, y por consiguiente evaluar si son recomendables o no las inyecciones de lechadas de cal.
- 3) Analizar el comportamiento de la SWRC del suelo expansivo estabilizado con cal en relación con el mismo suelo en estado natural con el fin de observar las variaciones provocadas por la adición de cal.

# Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

---

## 2.1. Suelos no saturados

El suelo es una estructura esquelética de partículas sólidas en contacto, formando un sistema intersticial de interconexiones entre los espacios vacíos o poros. Los poros están parcial o totalmente llenos de agua (Fredlund & Rahardjo, 1993). Los suelos pueden ser:

- ❖ Suelos saturados con agua y sin aire en los espacios vacíos.
- ❖ Suelos secos sin nada de agua en los espacios vacíos
- ❖ Suelos parcialmente saturados, con agua y aire en sus espacios vacíos.

Durante más de 50 años la mecánica de suelos se desarrolló en el análisis del comportamiento mecánico del suelo seco y saturado; la condición de suelo seco era una suposición implícita en ocasiones, en tanto la condición saturada era comúnmente utilizada con el objeto de conseguir resultados conservadores. La reciente tendencia de la investigación de la mecánica de suelos, iniciada en la década de los 1960, toma en consideración la condición de saturación parcial del suelo, definida como aquella en que las presiones intersticiales son negativas (succión) (Hoyos, 2003).

La principal característica de los suelos no saturados es que se componen de tres fases: sólida, líquida y gaseosa; dentro su clasificación están los suelos expansivos que frecuentemente contienen minerales como la montmorillonita (Pérez *et al.*, 2012) son reconocidos como problemáticos, ya que causan la falla de las estructuras civiles construidas sobre de ellos (Puppala *et al.*, 2013), algunas estructuras con poca carga, edificadas sobre estos suelos pueden desarrollar daño estructural como consecuencia de los cambios en el contenido de agua del suelo debido al flujo de agua a través del mismo (Jahangir *et al.*, 2013).

El principal problema de estos suelos se puede atribuir a la mala comprensión de los cambios de volumen causados por las variaciones en su contenido de agua (Puppala *et al.*, 2013). Estos suelos son capaces de adsorber

agua en su estructura interna provocando un aumento de volumen. Este cambio en el volumen puede ejercer suficiente presión sobre la estructura y puede dañarla. También cuando se secan se contraen y esto puede afectar el soporte de las edificaciones que dan lugar a hundimientos perjudiciales. El proceso de humedecimiento-secado produce ciclos de expansión y contracción que someten a las estructuras a esfuerzos repetitivos (Pérez *et al.*, 2012).

Debido a lo anterior, se han desarrollado técnicas para mejorar el comportamiento mecánico y también evitar los cambios volumétricos del suelo expansivo no saturado mediante la inserción de aditivos como cal, cemento y polímeros, entre otros. Sin embargo, no se ha evaluado con claridad el impacto en la Conductividad Hidráulica ( $k$ ) del suelo debido a la intrusión de dichos aditivos. Por ende, en este trabajo de investigación se busca evaluar dicho impacto, determinando la Función de Conductividad Hidráulica (HCF hydraulic conductivity function) del suelo expansivo a través de la Curva de Retención de Agua-Suelo (SWRC soil water retention curve) en muestras de suelo natural y en la Curva de Retención de Agua-Suelo-Cal (SWLRC) en muestras de suelo mejorado con cal (proporcionamiento óptimo) ya que la adición de esta es la técnica más común para mejorar el comportamiento del suelo.

Magnusson *et al.* (2015) enlistan diversos estudios que han demostrado las ventajas ambientales de reusar un material mejorándolo en el sitio de construcción en comparación con un material importado, donde nos muestra los resultados de Chittori *et al.* (2012) quienes demostraron que es posible obtener una reducción en los costos de manejo de material y por tanto reducir el impacto climático en un 85% derivado de las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El mismo estudio también nos muestra los resultados de Eras *et al.* (2013) quienes por medio de buena planeación en un proyecto industrial utilizando un balance de masas fueron posibles de reusar el 44% del material ( $700\,000\text{ m}^3$ ), lo cual significó una reducción de cerca de 4000 ton de  $\text{CO}_2$ .

## 2.2. Curva de Retención de Agua-Suelo (SWRC)

El agua en el suelo fluye de un punto con mayor energía potencial hacia otro de menor energía potencial. El potencial del agua en un punto cualquiera del suelo, se define como la energía potencial por cantidad unitaria de agua, es decir, es el trabajo requerido para llevar dicha unidad desde un estado de referencia estándar hasta el punto bajo consideración. El agua en el suelo está sujeta a campos de fuerzas que resultan de la atracción de la matriz sólida, la presencia de solutos, la acción de la presión externa, la atracción gravitacional y otro. El potencial gravitacional se mide desde la superficie de los suelos ( $-z$ ) y el de presión es una función del contenido de agua ( $\theta$ ). El potencial de presión se considera positivo si el agua en el suelo está a una presión mayor a la atmosférica y negativo con una presión menor a la atmosférica. Este último es llamado potencial mátrico y, cuando es tomado en valor absoluto se le denomina succión mátrica ( $\psi$ ). Este resulta de las fuerzas capilares y de adsorción debido a la estructura del suelo (Pliego-Díaz, 2012).

La SWRC es fuertemente afectada por la textura y la estructura del suelo, mientras mayor es el contenido de arcilla mayor es la retención de agua por un valor dado de ( $\psi$ ) y la pendiente de la curva es más suave (Pliego-Díaz, 2012). Esto se debe a su distribución de tamaño de poros (PSD pore size distribution) ya que presenta tamaños de poros muy diversos desde muy grandes hasta muy pequeños. Para los suelos arenosos las pendientes son más fuertes, ya que su PSD es más homogénea.

La SWRC no es única para un suelo, su forma y posición no son las mismas, por ejemplo, la trayectoria de humedecimiento y la trayectoria de secado son diferentes, este fenómeno es llamado histéresis (Meza, 2012), dicho proceso se debe a la presencia de poros de diversos tamaños que están interconectados y repartidos de manera aleatoria.

Las SWRC pueden ser usadas para estimar diversos parámetros utilizados para describir el comportamiento del suelo (Fredlund & Xing, 1994) y su

uso se ha convertido en un aspecto importante en la mecánica de suelos no saturados debido a que estos materiales presentan un acoplamiento hidromecánico, es decir, su comportamiento volumétrico y su resistencia dependen no solo del esfuerzo aplicado y la succión, sino también de su grado de saturación ( $S_r$ ) que depende de su contenido de humedad ( $\omega$  ó  $\theta$ ) (Horta, et al., 2013).

Las mediciones en el laboratorio y el campo pueden ser lentas, engorrosas, y difícil de realizar (Galaviz-González *et al.*, 2014b). Por tal motivo, se han desarrollado procedimientos alternos para estimar la SWRC (Rojas, 2008; Bayat *et al.*, 2015) y de estos se han derivado modelos para determinar la conductividad hidráulica del suelo a partir de las SWRC ajustadas.

### **2.3. Conductividad Hidráulica (k)**

La conductividad hidráulica de un suelo no saturado es una función de las variables del material que describen la estructura de poros (la relación de vacíos y porosidad), las propiedades del fluido en el poro (densidad y viscosidad) y la cantidad relativa de fluido del poro en el sistema (contenido de agua y grado de saturación). La conductividad hidráulica no saturada describe la dependencia característica en la cantidad relativa de fluido del poro en el sistema. Se describe en términos de la succión mátrica  $k(\psi)$ , grado de saturación  $k(S_r)$  o contenido de agua volumétrico  $k(\theta)$ . Debido a esto, la conductividad hidráulica está directamente relacionada con la SWRC (Lu & Likos, 2004).

Existen dos técnicas para medir la conductividad hidráulica, directa e indirecta. Los métodos directos pueden ser utilizados en el laboratorio o in-situ. En el laboratorio el instrumento más utilizado es el permeámetro. Con estos equipos es posible determinar la succión a diversos intervalos de tiempo y en diferentes secciones del suelo. Por medio de la SWRC se establece la variación en el contenido de agua de cada sección y al aplicar la ecuación de flujo se obtiene la conductividad hidráulica. En algunos equipos desmontables es posible determinar directamente el contenido de agua de cada sección de tal manera que se puede

obtener al mismo tiempo la SWRC. Sin embargo, estas mediciones requieren varios meses resultando en un proceso muy lento (Chakraborty, 2009).

Entre las técnicas indirectas existen tres tipos de funciones: ecuaciones empíricas o semi-empíricas, modelos macroscópicos y modelos estadísticos (Parent *et al.*, 2011). Las ecuaciones empíricas o semi-empíricas se pueden obtener a partir de análisis combinados con mediciones directas. Estas ecuaciones describen la variación de la permeabilidad con la succión y el contenido de humedad volumétrico. Dentro de esta categoría Chakraborty (2009) enlista diversas ecuaciones entre las cuales se encuentran la de Richards (1931), Wind (1955), Gardner (1958), Richards (1967), Davidson et al. (1969), Cambell (1973), Ahuja (1974), Dane y Klute (1977).

El modelo macroscópico de Leong y Rahardjo es un modelo en el cual un flujo pasa a través de un medio poroso que se supone que es similar al flujo laminar de nivel macroscópico (Chakraborty, 2009).

$$k_r = S_e^\delta \quad (2.1)$$

$$S_e = \frac{(S - S_r)}{(1 - S_r)} \quad (2.2)$$

dónde:  $k_r$ =conductividad hidráulica relativa,  $S_e$ =grado de saturación efectivo,  $S$ =grado de saturación,  $S_r$ =grado de saturación residual y  $\delta$ =constante que depende del tipo de suelo. Según Brooks y Corey este modelo fue hecho sin considerar el efecto de la distribución de tamaño de poro y condujo a controversias en el valor de  $\delta$  (Chakraborty, 2009).

En modelos estadísticos la conductividad hidráulica es determinada de la SWRC. Mualem (1986) incorporó un modelo estadístico basado en algunas suposiciones. Uno fue el tamaño de poro de radio “ $r$ ” que se distribuye al azar en los medios porosos y la segunda fue la de incorporar la velocidad de flujo promedio (Chakraborty, 2009).

Nasta *et al.* (2013) nos presentaron la expresión general propuesta por Mualem (1976) expresando  $K$  como función del grado de saturación, la cual fue descrita por Kosugi *et al.* (2002) como:

$$K_r(S_e) = \frac{K(S_e)}{K_s} = S_e^l \left\{ \frac{\int_0^{S_e} \frac{1}{[h(S_e)]^\chi} dS_e}{\int_0^1 \frac{1}{[h(S_e)]^\chi} dS_e} \right\}^\xi \quad (2.3)$$

donde:  $K_s (L T^{-1})$  = conductividad hidráulica saturada.  $S_e^l$  Representa el parámetro macroscópico de tortuosidad-conectividad. Basado en datos del suelo de 45 tipos, Mualem (1976) sugirió un valor óptimo de 0.5 para el parámetro  $l$ .

Estudios previos de Niu *et al.* (2015) mostraron el uso de la conductividad eléctrica en la predicción de la curva característica y su conductividad hidráulica por medio de la determinación del factor de tortuosidad  $q$  usado en los modelos estadísticos, considerando que el flujo del agua y el flujo eléctrico en un medio poroso mejoraría la capacidad predictiva de los modelos estadísticos.

Algunos de los problemas de estas técnicas es que es difícil señalar el contenido de humedad residual, puede haber difusión de aire a través de la piedra porosa que perturbe la precisión del volumen de agua, conforme el suelo se contrae a alta succión, la determinación del volumen se vuelve errónea y también afecta la exactitud de la SWRC (Chakraborty, 2009). Debido a las dificultades implicadas en la determinación directa e indirecta de la conductividad hidráulica, resulta práctico estimarlas indirectamente basado en procedimientos que utilizan la SWRC (Horta *et al.*, 2013). Así, se encuentra una relación entre la SWRC ( $\psi$ ,  $\theta$ ), la HCF ( $\psi$ ,  $k$ ) donde la primera representa la relación entre el contenido de agua ( $\omega$  ó  $\theta$ ) con la presión de agua en el suelo (succión  $\psi$ ), la segunda la conductividad hidráulica ( $k$ ) con la misma presión del agua ( $\psi$ ) (Maqsoud *et al.*, 2012). De esta manera, obteniendo la SWRC con muestras de suelo natural y mejorada con cal podremos conocer la HCF del suelo natural y la del suelo mejorado con cal y verificar cual ha sido el impacto en esta.

## 2.4. Métodos para estimar la función de conductividad hidráulica (FCH)

Los modelos están agrupados en dos categorías: empíricos y físicos. Con los modelos empíricos, la diferencia en las ecuaciones de la SWRC están relacionadas con uno o más de los siguientes parámetros: densidad relativa de los sólidos, porcentaje de arena, materia orgánica y otras propiedades del suelo usando un análisis de regresión estadístico (Maqsoud *et al.*, 2012). Entre las expresiones matemáticas más usadas para describir la SWRC se encuentran las desarrolladas por van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994).

### 2.4.1. van Genuchten (1980)

La forma matemática de la SWRC de van Genuchten (1980) es una de las más usadas. Fue en 1980 cuando van Genuchten mostró como su ecuación podría ser usada para estimar una función de la conductividad hidráulica (FCH). Como consecuencia está apegada a su ecuación para modelar o ajustar la SWRC y es referida a una ecuación de tres parámetros la cual toma la siguiente forma para representar el contenido de agua como una función de la succión de los suelos:

$$w(\psi) = \frac{w_s}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad (2.4)$$

Esta ecuación puede ser reacomodada para resolver la succión en términos del contenido de agua:

$$\psi = \frac{1}{a} \left[ \left( \frac{w_s}{w} \right)^{1/m} - 1 \right]^{1/n} \quad (2.5)$$

$$k_r(\psi) = \frac{\{1 + (a\psi)^{n-1} [1 + (a\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (a\psi)^n]^{m/2}} \quad (2.6)$$

Si los parámetros  $a$ ,  $m$  y  $n$  son conocidos así como el contenido saturado de agua  $w_s$ , la succión del suelo puede ser calculada. El uso de esta ecuación se limita a un rango entre el valor de entrada de aire y la succión residual de un suelo, esto debido a la naturaleza asintótica de la ecuación, como puede observarse en la Figura 2-1.

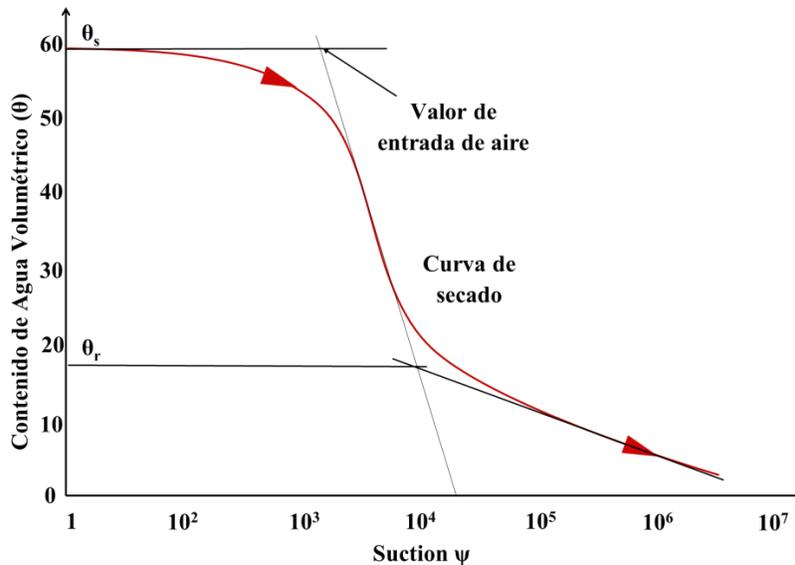


Figura 2-1. Curva de secado para un suelo arenoso,  $\theta_s$ , contenido volumétrico saturado de agua;  $\theta_r$ . Contenido volumétrico de agua residual. (Fredlund & Xing, 1994).

El contenido volumétrico de agua es usada en su forma normalizada, y referida al grado relativo de saturación.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.7)$$

donde:  $\Theta$  = contenido volumétrico de agua normalizado o grado relativo de saturación,  $\theta_s$ = contenido volumétrico saturado de agua y  $\theta_r$ = contenido residual de agua.

### 2.4.2. van Genuchten (1980) – Mualem (1976)

En 1976 Mualem sugirió que los parámetros  $m$  y  $n$  en la curva característica soportaban una relación con  $m = (n - 1)/n$ , esta sugerencia reduce la ecuación de van Genuchten en una ecuación que depende de dos parámetros:

$$w(\psi) = \frac{w_s}{[1 + (a\psi)^n]^{(1-1/n)}} \quad (2.8)$$

La ecuación de van Genuchten (1980) – Mualem (1976) puede ser rescrita en términos del contenido de agua:

$$\psi = \frac{1}{a} \left[ \left( \frac{w_s}{w} \right)^{n/(n-1)} - 1 \right]^{1/n} \quad (2.9)$$

$$k_r(\theta) = S_e^{0.5} \left( 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right)^2 \quad \left( m = 1 - \frac{1}{n}; 0 < m < 1 \right) \quad (2.10)$$

Las mismas limitaciones que para la ecuación de van Genuchten (1980) aplican para esta ecuación.

$n$  = Numero de intervalos entre  $\theta$  y un contenido volumétrico de agua de cero.

$$S_e = 2^{-m} \quad (2.11)$$

### 2.4.3. Método de Fredlund y Rahardjo (1993)

De acuerdo con Fredlund y Rahardjo (1993) la FCH se obtiene a partir de la SWRC una función de permeabilidad que se deriva de la ecuación de Poiseuille. La siguiente FCH tiene una forma similar a la presentada por Kunze *et al.* (1968) y ha sido levemente modificada para usarse con unidades del sistema internacional y la succión mátrica, una curva característica típica para la predicción de la conductividad hidráulica se puede observar en la Figura 2-2.

$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} \frac{T_s^2 \rho_w g}{2\mu_w} \frac{\theta_s^p}{N^2} \sum_{j=i}^m \{ (2j + 1 - 2i)(u_a - u_w)_j^{-2} \} \quad (2.12)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$k_{sc} = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^p}{2\mu_w N^2} \sum_{j=i}^m \{(2j + 1 - 2i)(u_a - u_w)_j^{-2}\} \quad (2.13)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

donde:  $j$  = una esquina desde “i” hasta “m”,  $k_s$  = coeficiente de permeabilidad saturado medido (m/s),  $k_{sc}$  = coeficiente de permeabilidad saturado calculado (m/s),  $T_s$  = tensión superficial del agua (kN/m),  $\rho_w$  = densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $\mu_w$  = viscosidad absoluta del agua (N \*s/m<sup>2</sup>),  $\theta_s$  = contenido volumétrico de agua en la saturación,  $p$  = constante que representa la interacción de los poros de varios tamaños; su magnitud puede ser asumida como 2.0 (Green y Corey, 1971a),  $m$  = número de intervalos entre el contenido volumétrico de agua, y el más bajo contenido volumétrico de agua, en la curva característica experimental agua-suelo,  $N$  = número de intervalos calculados entre el contenido volumétrico de agua saturado y cero contenido volumétrico de agua (nota:  $N = m(\theta_s/\theta_s - \theta_L)$ ,  $m \leq N$ , y  $m=N$  cuando  $\theta_L = 0$ ),  $(u_a - u_w)_j$  = succión mátrica (kPa) correspondiente al punto medio del  $j$ -ésimo intervalo (Fredlund, et al., 1994).

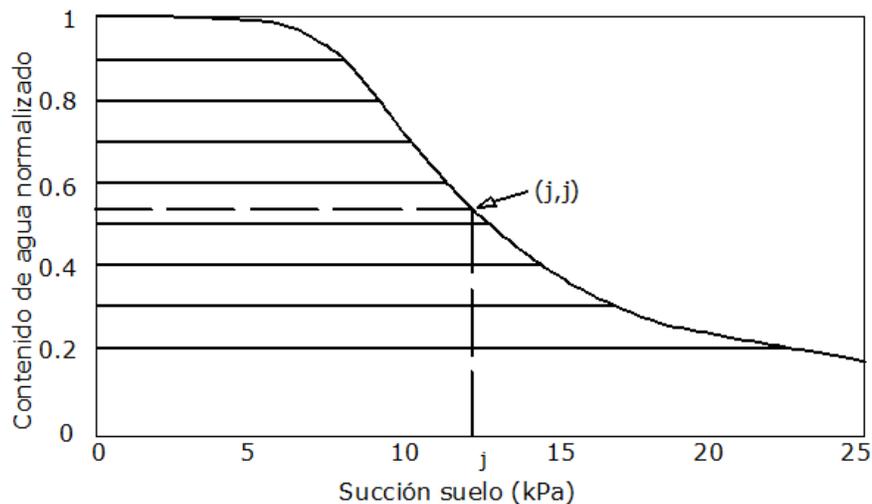


Figura 2-2. Típica curva característica para la predicción de la función de la permeabilidad.  $\theta_f$  Como punto medio del  $j$ -ésimo intervalo de contenido de agua;  $\psi_f$  corresponde a la succión en  $\theta_f$ . (Fredlund & Xing, 1994).

Entonces la expresión (2.12) puede ser escrita como:

$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=i}^m \{(2j + 1 - 2i)(u_a - u_w)_j^{-2}\} \quad (2.14)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

donde:  $A_d$  es una constante de ajuste y equivale a:

$$A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^p}{2\mu_w N^2} \quad (2.15)$$

#### **2.4.4. Galaviz-González et al. (2014a)**

El procedimiento requiere como datos el número de puntos experimentales ( $\psi$ ,  $\theta$ ) de la SWRC que se ingresarán de ambas trayectorias principales; los contenidos de agua saturada ( $\theta_s$ ) y residual ( $\theta_r$ ). Con estos datos, es posible construir la SWRC experimental en las trayectorias de humedecimiento y secado principal. El procedimiento se realiza en tres etapas.

Para la primera etapa se requiere ingresar la cantidad de puntos que serán introducidos en ambas trayectorias. Seguidamente se ingresan los puntos de la SWRC experimental en la trayectoria de secado ( $\psi_{di}$ ,  $\theta_{di}$ ), posteriormente, se introducen los puntos de la SWRC experimental en la trayectoria de humedecimiento ( $\psi_{wi}$ ,  $\theta_{wi}$ ), ambas con la cantidad de puntos experimentales que se deseen, finalizando con la construcción de la gráfica que plasma la SWRC.

Finalizando la primera etapa, los puntos se almacenan en un arreglo llamado “tabla” donde se guardan los valores de succión ( $\psi$ ), grados de saturación ( $S_r$ ), contenido de agua ( $\theta$ ) en columnas distintas. Con esta tabla se puede determinar un polinomio de grado ( $n$ ) para cada una de las curvas principales de la SWRC. Esto permite determinar (interpolando) los valores del grado de saturación ( $S_r$ ) para cualquier valor de la succión ( $\psi$ ) en cada una de las trayectorias principales, esto sin excluir los puntos experimentales de la SWRC.

En la segunda etapa, los ciclos secundarios de histéresis son evaluados tomando en cuenta el planteamiento proporcionado por Zhou *et al.* (2012) con ciertas modificaciones, ya que el procedimiento propuesto no utiliza el ajuste de van Genuchten (1980), por el contrario, se utilizan los polinomios de las curvas principales generados por el arreglo “tabla” para determinar los parámetros solicitados.

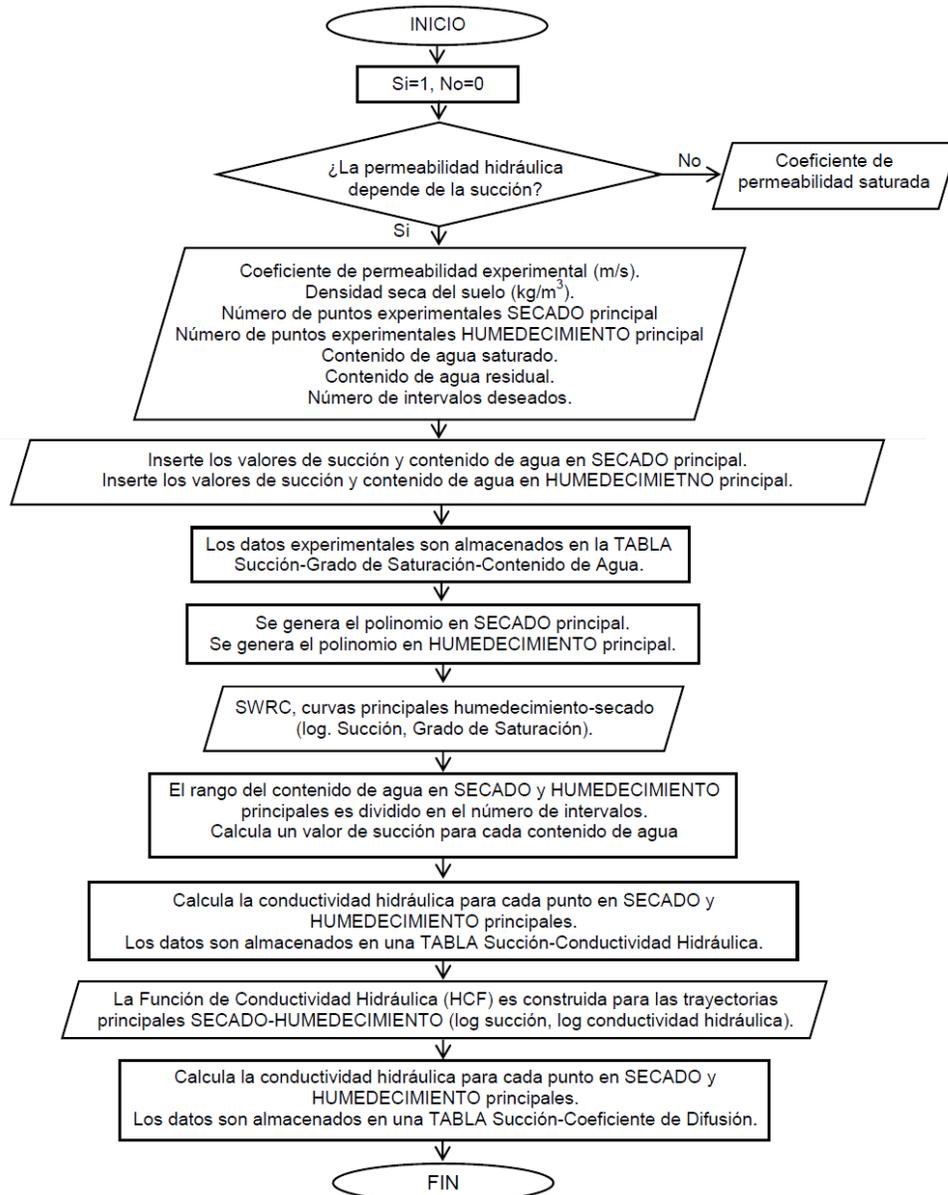


Figura 2-3. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto para determinar la Función de Conductividad Hidráulica

Para los ciclos secundarios es necesario indicar el grado de saturación inicial y final, así, el algoritmo identifica la trayectoria del proceso de manera automática (si  $Sr_i < Sr_f$  el proceso es humedecimiento, en caso contrario Secado). Este primer ciclo iniciará en el grado de saturación ( $Sr_i$ ) y en el valor de succión correspondiente a la curva principal (según sea su trayectoria), es decir, no inicia en un punto arbitrario (interno) como en los métodos de Han-Chen *et al.* (2005) y Zhou *et al.* (2012). Posteriormente, calcula la pendiente y el valor de succión ( $\psi$ ) correspondiente a la curva principal (según sea su trayectoria) para el mismo grado de saturación ( $Sr_i$ ) del punto inicial ( $\psi_i, Sr_i$ ). Finalmente, encuentra el diferencial del grado de saturación correspondiente a su valor de succión y construye el ciclo secundario.

La etapa tres consiste en evaluar el ciclo secundario siguiente (humedecimiento o secado) partiendo del punto final del ciclo inmediato anterior. Finalizando, si ya no se requiere determinar un nuevo ciclo interior, el proceso termina y construye la SWRC con sus curvas principales y el  $i$ -ésimo ciclo de histéresis. La

Figura 2-3 muestra el diagrama de flujo del procedimiento propuesto para determinar la Función de Conductividad Hidráulica.

## 2.5. Estabilización con cal

Para estabilizar un suelo, el conglomerado empleado debe ser cemento si el suelo es poco plástico, mientras que si es fino y cohesivo debe utilizarse cal, aunque en ocasiones puede convenir un tratamiento mixto, primero con cal para restar plasticidad y después con cemento, para aumentar la capacidad de soporte o alcanzar resistencias. El esparcido de cal debe ser uniforme en un porcentaje específico y comprende dos métodos: método seco y método de lechada.

### **2.5.1. Método seco**

Las aplicaciones en seco abarcan la colocación de cal en bolsas sobre la cama del camino. La cal nunca debe esparcirse cuando hay viento y se recomienda rociar el camino ligeramente para reducir el polvo.

La cal debe aplicarse en áreas donde se pueda mezclar con el suelo durante el mismo día de su aplicación, debiendo cubrirse y mezclarse en un máximo de 6 horas después de su aplicación.

El equipo por utilizar generalmente son camiones tanque de auto-descarga de granel como se observa en la Figura 2-4.



Figura 2-4. Estabilización con cal.

### **2.5.2. Método de lechada**

En este método, la cal hidratada y el agua son mezcladas. La lechada se esparce sobre la cama escarificada del camino, por gravedad o por barras aspersores de presión. Se debe cuidar que no se asienten los sólidos de cal en el camión.

Una relación típica de lechada de cal es una tonelada de cal por 1895 litros de agua, esta lechada puede ser preparada de dos maneras: en un tanque central se realiza un mezclado con paletas, o bien agregar una cantidad específica de agua y cal a los camiones tanque y mezclarlo en tránsito.

Este método tiene su desventaja en que se limita a trabajos que requieren pequeñas cantidades de cal (4% o menos) debido a la cantidad de agua necesaria para llevar la cal en suspensión (López-Lara, 2002).

Los equipos de fabricación y dosificación de lechada disponen de un depósito de agua y de un silo para el cemento o la cal. La dosificación del aglomerante dentro del mezclador (tipo centrífugo) para fabricar la lechada se realiza en peso, a través de un tornillo sin fin pesador. Por otra parte, la dosificación del agua es volumétrica. Finalmente, la lechada es fabricada, mediante el uso de una bomba regulada por un microprocesador que ajusta el caudal de lechada a la velocidad de desplazamiento instantánea del equipo (Atienza, 2008).



Figura 2-5. Equipo de estabilización por vía húmeda con despósito para conglomerante de 25 m<sup>2</sup> (Atienza, 2008)

## 2.6. Efectos de la estabilización con Cal

La estabilización del suelo tiene un efecto positivo en las propiedades de suelos expansivos, desde el momento en que se incorpora a un suelo arcilloso, la cal provoca un intercambio iónico de los cationes que estabilizan la estructura laminar de las arcillas. Como consecuencia de ello aparecen fuerzas de unión (Fuerzas de Van der Waals) que dan lugar a su floculación (Atienza, 2008), estos efectos se traducen en el mejoramiento de muchas de las propiedades usadas en la ingeniería (Al-Mukhtar *et al.*, 2014): una reducción en el contenido de agua y su potencial de expansión, así como la pérdida sus propiedades cohesivas, resultando en un comportamiento similar a un material granular, reducción del

índice plástico y un aumento en la conductividad hidráulica saturada (Al-Mukhtar *et al.*, 2012; Consoli *et al.*, 2014; Di Sante *et al.*, 2015).

La presión de expansión se ve reducida considerablemente en los primeros días de la adición de cal y se mantienen en el tiempo, situación atribuida a la limitada cantidad de agua absorbida por el suelo estabilizado (Al-Mukhtar *et al.*, 2012).

La estabilización con cal conduce a cambios en la estructura y textura de suelos arcillosos y cambios irreversibles en el comportamiento hidromecánico. Las reacciones de la estabilización pueden ser descritas en reacción a corto y largo plazo como:

- ❖ **Intercambio catiónico:** reacción a corto plazo que toma lugar cuando la cal se encuentra en presencia de agua y el suelo. Esta reacción produce iones de  $\text{Ca}^{++}$  y conduce a un incremento del pH en la mezcla de suelo-cal. Estudios de Di Sante *et al.* (2014) mostraron que el pH aumenta en las primeras horas añadida la cal, pero causando una reducción por efecto de la reacción puzolánica, llegando a estabilizarse después de la cementación.
- ❖ **Reacción puzolánica:** es una reacción a largo plazo que provoca la floculación de la partícula, reduciendo la plasticidad del suelo. Este fenómeno resulta en el mejoramiento del comportamiento del suelo después de la compactación (Cuisinier *et al.*, 2011). Ya que induce la formación de compuestos cementantes a través de una reacción puzolánica que unen las partículas de suelo y mejoran sus características mecánicas. Además esta reacción depende de la cantidad de cal y se acelera aumentando la temperatura propiciando un aumento del proceso de esta reacción (Al-Mukhtar *et al.*, 2014; Ciancio *et al.*, 2014).
- ❖ **Carbonatación:** toma lugar cuando la cal reacciona con el dióxido de carbono presente en el aire, mayormente asociado con climas cálidos y áridos donde el curado es difícil. Es un fenómeno que debe ser evitado

porque inhibe la formación de productos cementantes, que reduce así la resistencia del material (Ciancio *et al.*, 2014).

Se ha demostrado que el tiempo de curado tiene un efecto en el desarrollo de la compresibilidad sin poner en compromiso el desarrollo de la reacción puzolánica, y desde un punto de vista práctico una compactación rápida es recomendable después de añadir cal. Esto se debe al hecho de que una compactación tardía en un suelo estabilizado resulta en un suelo más compresible que uno con compactación rápida, debido a su relación de vacíos inicial, ya que a medida que aumenta el tiempo de curado se produce un aumento en los tamaños de los agregados. Este hecho hace que se requiera de un mayor esfuerzo para alcanzar el mismo valor de relación de vacíos que el que presenta un suelo sin compactación tardía (Di Sante *et al.*, 2015).

Para determinar las proporciones de cal requeridas para modificar las características del suelo e introducir una adecuada capacidad y durabilidad se han establecido en la última década diversas metodologías. De esta manera, Consoli *et al.* (2014) especifican algunas, tal y como lo mostraron los investigadores: Hilt y Davidson (1960), Eades y Grim (1966) y Rogers *et al.* (1997), con lo cual concluyeron que el 3% era el mínimo porcentaje de contenido de cal requerido para la estabilización.

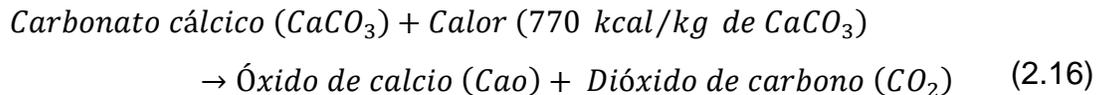
Podemos encontrar distintos tipos de cales, entre los más importantes se encuentran las cales aéreas y las cales hidráulicas.

Las cales aéreas se componen principalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, los cuales endurecen lentamente al aire por la acción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera. No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua y se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95%.

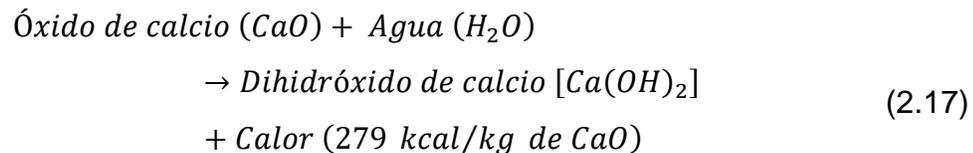
Las cales hidráulicas a diferencia de las cales aéreas, endurecen en contacto con el agua. Se obtienen a partir de calizas que contienen arcillas (sílice

y alúmina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos que son los que confieren las propiedades hidráulicas.

La cal aérea se obtiene a partir de rocas calizas, compuestas mayoritariamente por carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ). Mediante la calcinación de la caliza, previamente machacada y clasificada, a unos 950-1000 °C en un horno industrial especial, se logra la descomposición del carbonato cálcico según la siguiente reacción química:



Posteriormente, el óxido de calcio o cal viva (CaO) se puede combinar con agua en un proceso industrial controlado de hidratación, para dar lugar al dihidróxido de calcio o cal apagada o hidratada [ $\text{Ca(OH)}_2$ ]:



donde: el calor desprendido en la hidratación de la cal viva es de 279 kcal/kg de cal viva, el calor generado por la hidratación de un kg de cal viva permite calentar 2.79 kg de agua de 0 °C a 100 °C.

La utilización de cal apagada, actúa sobre la humedad, pero únicamente como consecuencia del aporte de materia seca, es decir, reduce a humedad del material resultante. Por lo tanto, la disminución total solo es del orden del 0.3% de humedad del suelo por cada 1% de cal apagada aportada.

El uso de la cal para la estabilización puede realizarse con cal viva o hidratada, y es conveniente, por su mayor estabilidad el empleo de la cal apagada, pues es más sencilla de manipular y almacenar en los laboratorios. El hecho de emplear uno y otro tipo de cal no implica que luego, en obra, deba emplearse la misma (Atienza, 2008).

En el caso de estructuras en contacto permanente con el agua de ríos, diques, canales, etc., conjunto con el mejoramiento mecánico del suelo, el efecto de la cal en la conductividad hidráulica es algo a considerar. Aún y cuando este tipo de tratamiento para mejorar el suelo es extensamente usado tanto en las vías terrestres como en la construcción de estructuras, se conoce muy poco de las consecuencias que el mejoramiento tiene en la conductividad hidráulica, desde puntos de vista cualitativos y cuantitativos. Tran *et al.* (2014) especificaron que se han reportado en la literatura incrementos en la conductividad hidráulica de un suelo estabilizado, tal y como lo reportaron Brandl (1981), Nalbantoglu y Tuncer (2001), mientras algunos muestran un decremento, siendo el caso de Terashi *et al.* (1980). Reportándose además en otros trabajos que muestran que la conductividad hidráulica incrementa en el inicio y luego decrece después de varios días después del curado (Locar *et al.* 1996; Merelková *et al.* 2011; Di Sante *et al.* 2014).

Debido a que los suelos estabilizados envejecen y tal parece indicar que a partir de 10 años aproximadamente, la formación de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) termina, lo que equivaldría al final de la reacción suelo-cal. Además, las formas adoptadas para estos tiempos son aglomerados que se unen entre sí para formar otros de mayor tamaño, que en su conjunto se vuelven a unir de tal forma que dan la apariencia de ser un solo aglomerado (López-Lara, 2002). Situación que muy probablemente tiene que ver con el desarrollo de la reacción suelo-cal y su aumento de resistencia en el tiempo, puede explicar el hecho de la disminución en la conductividad hidráulica.

A su vez, la conductividad hidráulica depende de su microestructura, y de su distribución de tamaño de poros, más aún la distribución de los poros es una función directa de las condiciones de compactación (Cuisinier *et al.*, 2011; Noureddine y Ezzeddine, 2012).

Le Runigo *et al.* (2011) han reportado que suelos compactados en seco exhiben una permeabilidad superior y muestran un decremento significativo cuando son expuestos a la circulación de agua, caso contrario a suelos

compactados con el óptimo contenido de agua que presentan una permeabilidad más baja y el más pequeño decremento en la resistencia con la circulación de agua, resultados realizados por McCallister (1990), en el cual sugirió que la durabilidad de la estabilización puede depender no solo de la cantidad de cal añadido en el curado sino también en la permeabilidad y por tanto en el estado inicial del suelo donde son ambos cercanamente correlacionados.

Resultados reportados por Cuisiner *et al.* (2011) demostraron que el impacto en la conductividad hidráulica en suelos limosos es limitado, estos resultados difieren de los encontrados por Al-Mukhtar *et al.* (2012), ya que encontraron que a partir de un 4% de cal usado como agente estabilizador indica que la conductividad hidráulica saturada se reduce debido a que parece formarse una obstrucción en los poros. Sin embargo, este resultado no ha sido previamente descrito por medio del uso de la curva de retención ya que estas últimas han sido utilizadas para describir diversos parámetros del suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993) y a partir de modelos matemáticos que utilicen las curvas de retención se puede determinar la función de la conductividad hidráulica tanto en un proceso de humedecimiento como de secado, donde se manifiesta el fenómeno de histéresis, considerado por Galaviz-Gonzalez *et al.* (2014) debido a que la relación esfuerzo-deformación es distinta en ambos procesos.

Se ha observado además que el proporcionamiento óptimo para mejorar las propiedades mecánicas de un suelo expansivo se alcanza entre el 3% y 6% de contenido de cal (Bell, 1996; Al-Mukhtar *et al.*, 2010; Seco *et al.*, 2010; Cuisinier *et al.*, 2011; Consoli *et al.*, 2014; Di Sante *et al.*, 2014), siendo un mínimo de 3% para activar el intercambio catiónico, y un 6% para casi eliminar la expansión del suelo (Al-Mukhtar *et al.*, 2010).

## 2.7. Porosimetría

Los poros se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño como (ISASA Instrumentación, 2012):

- ❖ Microporos < 2 nm
- ❖ Mesoporos 2 nm < tamaño < 50 nm
- ❖ macroporos > 50 nm

Los microporos se pueden dividir en ultramicroporos, menores a 0.7 nm y supermicroporos en el rango de 0.72 nm y 2 nm. Esta clasificación toma en cuenta la forma de la isoterma de adsorción de nitrógeno a su temperatura de ebullición a 77K.

Los poros pueden tener formas regulares o irregulares, siendo la última la que se presenta con más frecuencia. Las formas cilíndricas se pueden presentar en casos de tratarse de óxidos como el aluminio o el magnesio. En forma de hendedura se presenta en arcillas, y en forma de vacíos entre esferas conectadas en sólidos obtenidos a partir de geles (Leofanti *et al.*, 1998), tal y como se muestran en la Figura 2-6:

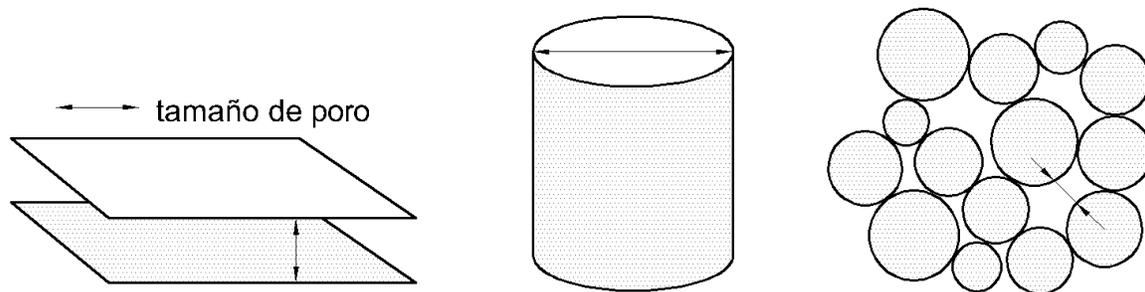


Figura 2-6. Modelos comunes de poros.

Los modelos para representar la forma de los poros, asumen que cada poro tiene un tamaño uniforme a través de su longitud, pero es usual encontrarlos en forma de botella (su longitud es más grande que el diámetro del poro) o en forma de embudo, también pueden ser cerrados, abiertos en un solo o ambos

sentidos, y pueden estar conectados o no con otros poros. Estos poros se pueden observar en la Figura 2-7 mostrada a continuación:

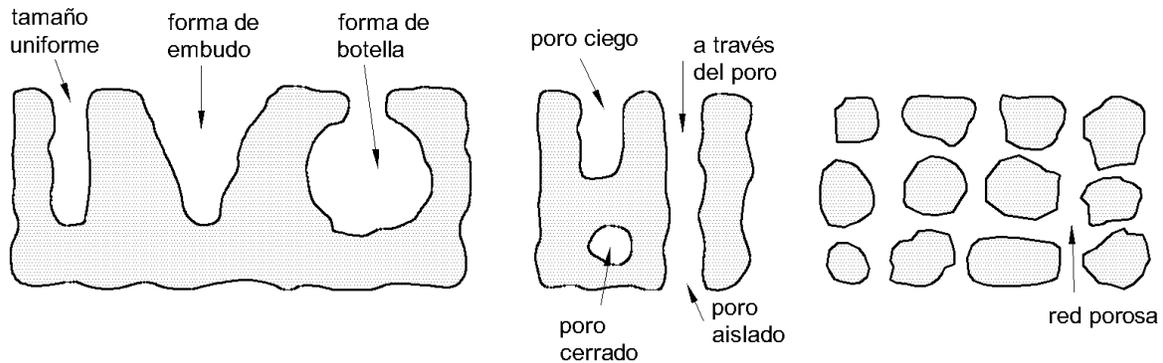


Figura 2-7. Tipos de poros.

Las características morfológicas de interés en el estudio del sólido son el área superficial, el volumen del poro y las distribuciones de área y tamaño de poro, razón por la cual existen una gran variedad de técnicas para determinar estas características. La elección de la técnica depende del tipo de poro y del uso que se le dará a los datos.

### 2.7.1. *Isoterma de adsorción y desorción de nitrógeno a 77 K*

Se suele utilizar el término adsorbente para referirse al sólido y adsorbato al material realmente adsorbido por el sólido, el adsortivo es el material en la fase gas que es potencialmente capaz de ser adsorbido (López, 2004), la Figura 2-8 muestra un esquema de estos términos y es mostrada a continuación:

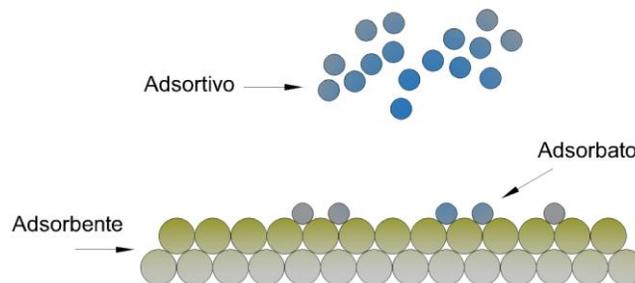


Figura 2-8. Esquema de términos en la adsorción de gas.

Cuando un sólido poroso es expuesto en un recipiente cerrado a un gas a una presión dada, el sólido comienza a adsorber el gas. El proceso es acompañado de un aumento en el peso del sólido y una disminución de la presión. Esto continúa hasta que la presión se estabiliza en un valor  $p$  y el peso del sólido alcanza su valor máximo. Conociendo los volúmenes de la muestra y el recipiente y utilizando la ley del gas ideal es posible determinar la cantidad de gas adsorbido, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$x = f\left(\frac{p}{p_0}\right)_T \quad (2.18)$$

donde:  $x$  es la cantidad adsorbida y  $p/p_0$  la presión relativa del adsorbato ( $p_0$  es la presión de saturación del adsorbato a la temperatura de adsorción  $T$ ). La representación gráfica de  $x$  frente a  $p/p_0$  constituye una isoterma de adsorción (Martín-Martínez, 1990).

La adsorción de nitrógeno a 77 K es la técnica más usada para determinar el área y caracterizar la textura porosa del suelo. El punto inicial es la determinación de la isoterma de adsorción (el nitrógeno adsorbido vs presión relativa), de acuerdo a la clasificación de IUPAC (La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) podemos encontrar 6 tipos distinguibles de isotermas de adsorción y desorción mostrados a continuación en la Figura 2-9.

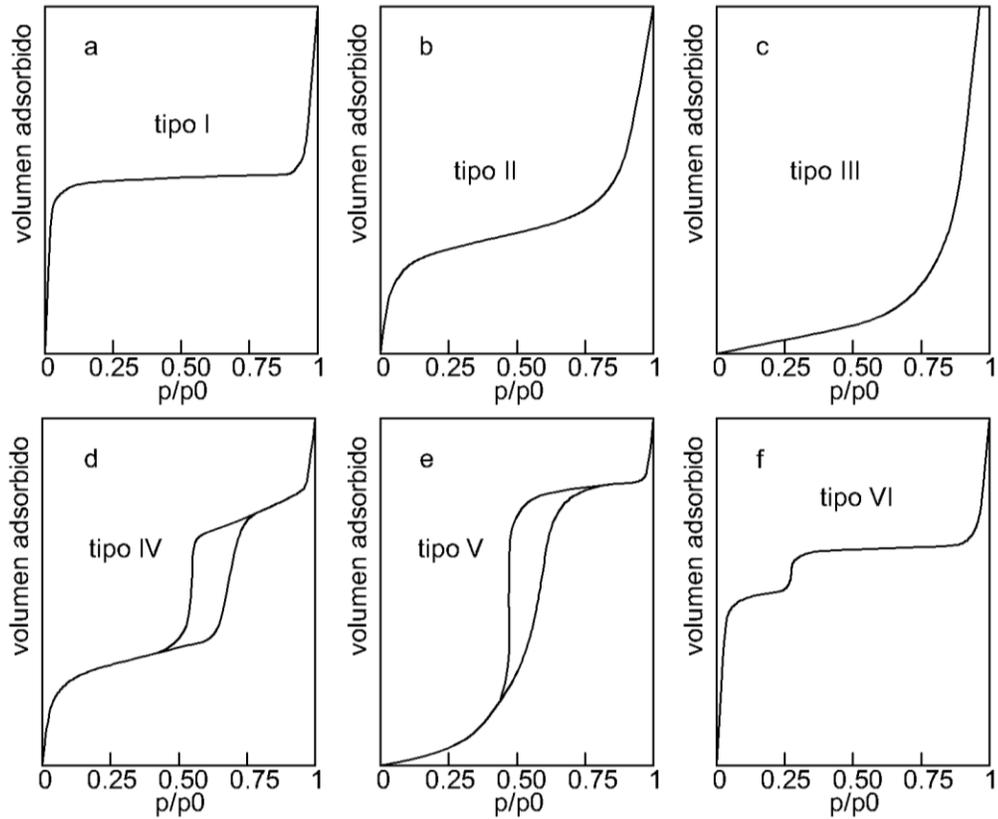


Figura 2-9. Tipos de isothermas de adsorción de nitrógeno (N<sub>2</sub>).

Tipo I o tipo Langmuir (Figura 2-9a): corresponde a isothermas que se caracterizan por tener sólidos microporosos. La alta energía de adsorción de los microporos produce que el gas se adsorba a bajas presiones, la isoterma permanece a un valor casi constante sobre un amplio rango de presiones una vez que se ha completado el llenado de los microporos. Es el caso típico de los carbones activos.

Tipo II (Figura 2-9b): corresponde a isothermas que se característicos de adsorbentes macroporosos y sólidos no-porosos como el caso de los grafitos no porosos. La ausencia del lazo de histéresis es una condición que se cumple en este tipo de isoterma. A bajas presiones la isoterma es cóncava al eje de la presión relativa y el espesor de la capa adsorbida se incrementa a medida que aumenta la presión.

Tipo III (Figura 2-9c): es característico de interacciones bajas entre adsorbente y el adsorbato, la forma de la isoterma es convexo respecto al eje de la presión relativa en todo el rango de presión. El estudio de estas isotermas es bastante difícil, debido a que no existe prácticamente una interacción superficial sólido-gas. Ejemplos típicos son muchos óxidos metálicos.

Tipo IV (Figura 2-9d): representan isotermas de adsorción con histéresis, que es atribuida a la condensación capilar. Es característica de sólidos mesoporosos. Su parte inicial es semejante a la de la isoterma tipo II, pero a presiones medias comienza la condensación capilar en mesoporos. A partir de la rama de desorción de estas isotermas se puede determinar la distribución de tamaños de los poros. Las sílices y alúminas son ejemplos representativos.

Tipo V (Figura 2-9e): esta isoterma es poco común y las de más difícil interpretación. La afinidad del adsorbente por el adsorbato es baja, nunca se obtienen superficies específicas, ni de distribuciones de tamaños de poros que sean fiables. Es típica de la adsorción de vapor de agua por carbones a temperaturas cercanas a la ambiente.

Tipo VI (Figura 2-9f): isoterma escalonada, este tipo de isoterma no fue incluido en la clasificación Brunauer y es la menos común de todas las isotermas. Se trata de procesos de adsorción cooperativos que contribuyen a que cada capa actúe positivamente a la formación de la siguiente mediante interacciones laterales de las propias moléculas. La gran mayoría de las adsorbentes utilizados suelen ser altamente homogéneas respecto del adsorbato, no obstante la adsorción de Kr sobre grafitos exfoliados constituyen ejemplos típicos (Martín-Martinez, 1990; López, 2004).

El primer proceso es la saturación de los poros, seguido por una desorción. Si consideramos un poro cilíndrico debido a su geometría la condensación tiende a darse desde el núcleo por la capa adsorbida sobre las paredes del poro y la forma del menisco será cilíndrica (Figura 2-10a). En cambio la evaporación del poro tomará lugar desde los extremos del cilindro, en donde los

meniscos son hemisféricos (Figura 2-10d), por lo que el interior del poro se evaporará a una presión menor a la presión de condensación y en consecuencia se formara el ciclo de histéresis (Cohan, 1938; Leofanti *et al.*, 1998).

Cuando más pequeño sea el radio interno del poro, menor será la presión a la que evaporara el poro y por lo tanto el ciclo de histéresis será más ancho y siendo este clásico concepto microscópico (Sangwichien *et al.*, 2002).

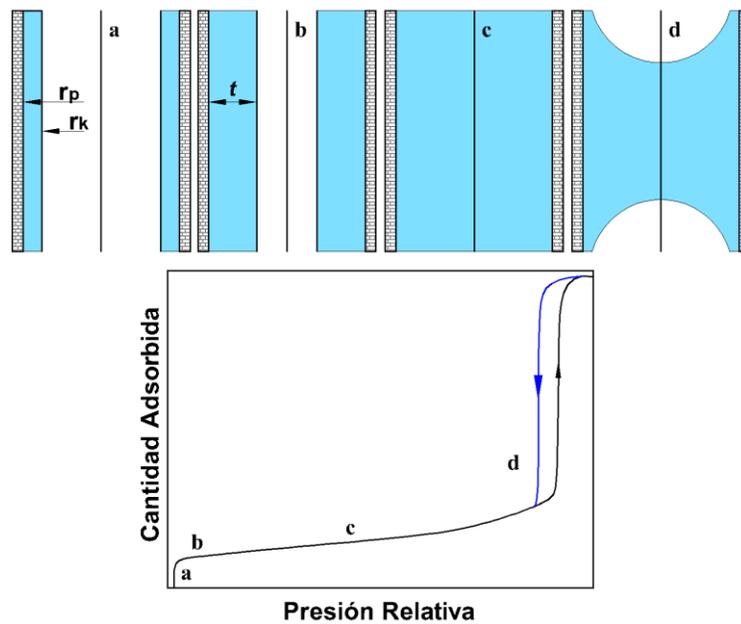


Figura 2-10. Etapas en el llenado-vaciado de un poro cilíndrico abierto en sus extremos.  $r_k$  = radio interior de poro,  $r_p$  = radio de poro,  $t$  = espesor de la capa adsorbida.

Debido a lo anterior podemos encontrar cuatro tipos de forma de histéresis en las isothermas, como se puede observar en la Figura 2-11 mostrada a continuación:

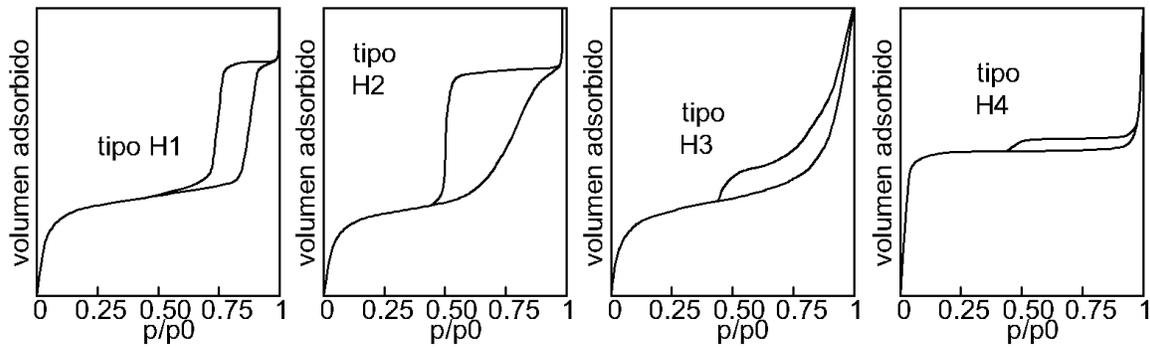


Figura 2-11. Tipos de histéresis encontrados en la adsorción de nitrógeno (N<sub>2</sub>).

➤ Tipo H1 y H2: son característicos de sólidos formados de partículas con canales casi cilíndricos o formados por agregados o aglomerados de partículas esféricas. En cualquier caso pueden tener tamaño y forma uniforme (tipo H1) o forma y tamaño no uniforme (tipo H2). La histéresis es atribuida al diferente tamaño de la boca del poro y el cuerpo del poro, o a un diferente comportamiento en la adsorción y desorción.

➤ Tipo H3 y H4: se encuentran usualmente en cuerpos de consistencia solida de agregados o aglomerados de partículas tipo hendiduras, con forma y tamaño uniforme (H4) o no uniforme (H3).

➤ Sin histéresis: es el caso de poros con forma de cono, cuña.

El cierre de la histéresis toma lugar a una presión relativa de 0.42 para el nitrógeno, independientemente del adsorbente y de la distribución de tamaño de poro y es atribuido a las propiedades del líquido adsorbante.

### 2.7.2. Método BET (área superficial)

Este modelo desarrollado por Brunauer, Emmet y Teller en la década de los 1940, sigue siendo la herramienta más utilizada para determinar la multicapa volumétrica ( $V_m$ ) del adsorbato y el área superficial ( $A_s$ ) de los sólidos con la ecuación:

$$A_s = \left( \frac{V_m}{22414} \right) N_a \sigma \quad (2.19)$$

donde:  $N_a$  es el número de Avogadro y  $\sigma$  es el área cubierta por una molécula de nitrógeno, su valor es de  $0.162 \text{ nm}^2$ .  $V_m$  Puede ser estimado por tres parámetros de la ecuación del BET, desarrollada asumiendo que:

- 1) El calor de la adsorción de la primera monocapa es constante (la superficie es uniforme en lo que se refiere a la adsorción)
- 2) La interacción lateral de las moléculas adsorbidas es despreciable
- 3) Las moléculas adsorbidas pueden actuar como una superficie de adsorción y el proceso se puede repetir
- 4) El calor de la adsorción de las monocapas excepto la primera es igual al calor de la condensación

La ecuación tomando los tres parámetros del BET tiene la forma siguiente:

$$V_{ads} = V_m \frac{cp/p_0}{1 - p/p_0} \frac{1 - (n + 1)(p/p_0)^n + n(p/p_0)^{n+1}}{1 + (c - 1)(p/p_0) - c(p/p_0)^{n+1}} \quad (2.20)$$

donde:  $V_{ads}$  es el volumen adsorbido y depende de la presión relativa  $p/p_0$ ,  $c$  es un parámetro relacionado al calor de la adsorción y la licuefacción (valores altos indican una interacción fuerte de adsorbente y adsorbato),  $n$  es relacionado al número de capas que pueden ser formadas en el sólido.

Si  $n$  tiende a infinito la ecuación adquiere la siguiente forma:

$$V_{ads} = V_m \frac{cp/p_s}{(1 - p/p_0)[1 + (c - 1)p/p_0]} \quad (2.21)$$

Esta ecuación es adecuada para  $n > 6$ . Para  $n \leq 6$  la ecuación anterior da valores de área superficial menores (arriba del 20%) que la ecuación de tres parámetros.

El uso de este método es puramente académico (Leofanti *et al.*, 1998; van Erp y Martens, 2011). A altas presiones el BET falla por la incapacidad de tener en cuenta el estado líquido no uniforme que se forma a esas presiones. A presiones

muy bajas las suposiciones del BET no son adecuadas, como lo son las interacciones laterales, defectos, ancho de poros moleculares, etc. (van Erp & Martens, 2011).

### **2.7.3. Método t (área superficial, volumen de microporos y mesoporos)**

Este método fue desarrollado por DeBoer y colaboradores en la década de los 1960 y es basado en que para una variedad de sólidos microporosos, el volumen adsorbido por unidad de superficie (espesor estadístico  $t$  de la capa adsorbida) contra la presión seguida de una curva independiente del sólido, graficando  $V_{ads}$  de un sólido macroporoso vs  $t$  se obtiene una línea pasando del origen de los ejes, su pendiente  $m$  es proporcional al área superficial del sólido.

$$A_s = \left( \frac{m}{22414} \right) t_m N_a \sigma \quad (2.22)$$

Si se trata de un sólido microporoso, la superficie de adsorción y la pendiente decrecen hasta que el llenado ha terminado, como se observa en la Figura 2-12, la pendiente de la línea recta corresponde al área superficial de los microporos. Si se prolonga para  $t = 0$ , interceptará en el volumen adsorbido necesario para llenar los microporos. La área superficial total no puede ser medida en la presencia de ultramicroporos, de hecho la fuerte interacción entre el adsorbato y la pared del poro en conjunto con la baja relación tamaño de poro/tamaño molecular del adsorbato hace que la adsorción sea muy diferente de la observada en superficies abiertas.

Si se trata de un sólido mesoporoso se presentará una desviación de la pendiente hacia arriba, después de completarse el llenado una nueva pendiente se observará y corresponderá a superficie externa inferior. La prolongación de esta pendiente con la ordenada proporciona el mesoporo, y si está presente el volumen de microporos, desafortunadamente en la mayoría de los casos la pendiente recta es demasiado corta, impidiendo el cálculo.

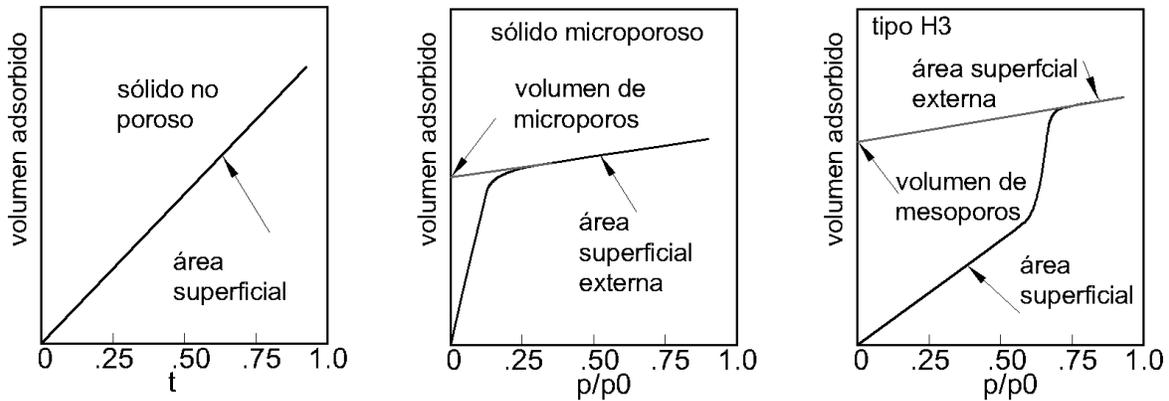


Figura 2-12. Formas de las isothermas encontrados en la adsorción de nitrógeno en el método  $t$ .

Para calcular el volumen físico de los poros  $V_p$  es necesario conocer la densidad del adsorbato dentro de los poros. De acuerdo a la denominada regla Gurvitsch, la densidad del adsorbato es generalmente parecida a la del líquido  $\rho_l$  en la temperatura de medición aun para microporos sólidos, ese volumen está dado por:

$$V_p = \left( \frac{V_f}{22414} \right) \left( \frac{M}{p_l} \right) \quad (2.23)$$

En la actualidad el método  $t$  es el más adecuado para calcular el volumen total de microporos. Su éxito radica en la elección de la isoterma de referencia. La representación matemática de las isothermas de referencia es:

$$t = 3.54(5/\ln p/p_0)^{1/3} \text{ (Halsey)} \quad (2.24)$$

$$t = [13.99/(0.034 - \log p/p_0)]^{1/2} \text{ (Harkins - Jura)} \quad (2.25)$$

$$t = 3.7(5/\ln p/p_0)^{1/3} + p/p_0^{1/2} - 0.8 \text{ (Cranston - Inkley)} \quad (2.26)$$

#### 2.7.4. Método Barret-Joyner-Halenda (BJH)

Este método es ampliamente usado y es designado como la norma ASTM D 4641/87 para realizar el cálculo en mesoporos. Es posiblemente el método más empleado para el cálculo de distribuciones de tamaños de poro en el rango de los mesoporos con geometría cilíndrica. Suele acompañarse de la corrección desarrollada por Kruk-Jaroniec-Sayari (KJS) para evitar subestimación de tamaños.

En la región de condensación capilar correspondiente a presión relativa menor a 0.4, cada incremento en la presión causa un aumento en el ancho de la capa adsorbida en las paredes de los poros y la condensación capilar en poros con tamaño de núcleo  $r_c$  está definido con la ecuación de Kelvin como:

$$\ln(p/p_0) = -(2\gamma w_m \cos\theta)/(RT r_c) \quad (2.27)$$

donde:  $r_c$  representa el radio de poros cilíndricos,  $\gamma$  = distancia entre paredes para los poros con forma de hendidura,  $w_m$  = volumen molar,  $\theta$  = ángulo de contacto.

La aceptación de un modelo geométrico permite el cálculo de la contribución del espesor de la película adsorbida del total adsorbido y del volumen del núcleo. A partir de estos resultados y de la geometría del poro es posible transformar el volumen del núcleo en volumen de poro y del tamaño del poro cilíndrico en tamaño de poro. De esta manera examinando paso a paso la isoterma en el rango  $0.42 < p/p_0 < 0.98$  es posible obtener la distribución de tamaño de poro y el volumen de mesoporos (Leofanit *et al.*, 1998).

Errores en las mediciones de la presión pueden tener un efecto que se incrementa al acercarse a la saturación, la incertidumbre en la temperatura se convierte progresivamente mayor cuando  $p/p_0 \rightarrow 1$ . Desafortunadamente la necesidad de elección de un modelo geométrico (cilíndrico o en forma de hendidura) afecta la superficie obtenida más que en el caso de volumen de poro. Se ha demostrado que este método subestima el tamaño de poro, debido a que la ecuación de Kelvin en la que se basa este modelo, no tiene en cuenta las

interacciones adsorbente-adsorbato (Serra *et al.*, 2008). Si bien el método clásico pese a dar tamaños algo inferiores a los reales, permite tener una idea aproximada de la distribución de tamaños de poros.

En el presente, dependiendo del sistema en estudio es común el uso de geometrías de poros de placas paralelas y empaquetamiento de esferas, al adoptar la aproximación clásica del método BJH se debe asumir que:

- a) La ecuación de Kelvin es completamente aplicable en todo el rango de los mesoporos.
- b) La curvatura del menisco es controlada por la forma del poro y  $\theta = 0$ .
- c) Las paredes de los poros son rígidas y de una geometría bien definida.
- d) La distribución de tamaño de poro está confinada en el rango de los mesoporos.
- e) El llenado de un poro es independiente de su ubicación dentro de la red porosa.

Esparza (2008) nos enlista diversas correcciones de la ecuación de Kelvin dentro de las que encontramos a Kroekhoff y de Boer (1968), Mayagoitia (1980) y KJS.

#### **2.7.4.1 Modificación de la ecuación de Kelvin según Mayagoitia (1980)**

Mayagoitia (1980) ha propuesto una modificación a la ecuación de Kelvin adicionándole el término de potencial que depende de la geometría del poro en cuestión y es dada por la siguiente expresión:

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{2\gamma w_m \cos\theta}{RT} \frac{1}{r_m - t} - \varphi \quad (2.28)$$

donde:  $\varphi$  es el potencial de adsorción asociado con una geometría específica de poro.

### 2.7.4.2 Modificación de la ecuación de Kelvin según Broekhoff y de Boer

La condensación capilar en poros cilíndricos abiertos por ambos extremos, ocurre cuando el menisco cilíndrico, formado en las paredes de dicho poro alcanza un valor crítico denotado  $t_c$ . Este parámetro está íntimamente asociado con el radio de poro ( $r$ ) donde se forma y con la presión relativa ( $p/p_0$ ) mediante la siguiente expresión de Kelvin modificada y que fue propuesta por Broekhoff y de Boer:

$$RT \ln \left( \frac{p_0}{p} \right) = - \frac{\gamma w_m \cos \theta}{r_c - t} - \varphi \quad (2.29)$$

donde:  $r_c$  es un radio de un poro cilíndrico,  $t$  es la magnitud del espesor de la capa adsorbida dentro de las paredes del poro antes de que ésta pierda su estabilidad y  $\varphi$  es la contribución al potencial de adsorción debido a las fuerzas atractivas que ejercen las paredes del adsorbente sobre las moléculas del adsorbato. En el caso de adsorción de nitrógeno a 77 K sobre una superficie plana,  $\varphi$  puede expresarse de la siguiente manera:

$$\varphi = RT \ln(10) x (13.99/t^2 - 0.034) \quad (2.30)$$

Debido al potencial de adsorción, durante el proceso de desorción conforme la presión del sistema disminuye el menisco se elonga hasta el punto en que llega al estado crítico (evaporación capilar), en este caso la ecuación de Kelvin adopta la siguiente expresión:

$$RT \ln(p/p_0) = \frac{2\gamma w_m \cos \theta}{r_c - t_e} + \frac{\int_{t_e}^{r_c} 2(r_c - t)F(t)dt}{(r_c - t_e)^2} \quad (2.31)$$

donde:  $t_e$  representa el límite crítico del espesor de la película adsorbida en el momento en que ocurre la evaporación capilar. Por otro lado, la condición crítica de la evaporación capilar ocurre cuando se cumple la siguiente condición:

$$\left. \frac{d(RT \ln(p_0/p_d))}{dt} \right|_{t=t_e} = 0 \quad (2.32)$$

La solución de este sistema de ecuaciones proporciona el valor del espesor crítico asociado con la presión relativa a la cual, en un poro de tamaño  $r$ , ocurrirá el proceso de la evaporación capilar.

### **2.7.4.3 Modificación de la ecuación de Kelvin según Kruk-Jaroniec-Sayari (KJS)**

La metodología propuesta por Kruk-Jaroniec-Sayari (KJS) consiste en utilizar la ecuación de Kelvin modificada, que considera la formación de un menisco hemisférico durante el proceso de adsorción, esta ecuación toma la siguiente forma:

$$r = -\frac{2\gamma w_m \cos\theta}{RT \ln(p/p_0)} + t + 0.3 \text{ nm} \quad (2.33)$$

donde:

$$t = 0.1 \left[ \frac{60.65}{0.03071 - \log(p/p_0)} \right]^{0.3968} \quad (2.34)$$

## **2.8. Distribución de Tamaño de Poros en incrementos de succión**

Debido a que la estructura interna del poro y las Curvas de Retención Agua-Suelo están íntimamente ligadas, ha habido esfuerzos de simular el comportamiento hidráulico de suelos a través de las ecuaciones que inducen esos parámetros y dependen de la Distribución de Tamaño de Poro.

A su vez la distribución de tamaño de poro se modifica durante los incrementos de succión y de carga, debido a que mientras la succión incrementa, los macroporos reducen su volumen y el pico de los macroporos se mueve a poros más pequeños, en otras palabras cuando el volumen de los macroporos se reduce el de los microporos aumenta. Una reducción en la succión induce expansión o colapso en la estructura, ya que el suelo es inundado, el menisco de agua se destruye y un rebote elástico es observado (Arroyo *et al.*, 2015).

La forma de relacionar el comportamiento de retención agua-suelo (succión mátrica) con el suelo es por medio de la humedad relativa del medio a través de la ecuación de Kelvin o al tamaño de los poros por medio de la ecuación de Laplace ( $s = \frac{2 T_s}{R}$ ), donde R representa el radio de un poro y  $T_s$  es coeficiente de tensión interfaz de aire-agua (Dao *et al.*, 2008; Nowamooz y Masrouri, 2010; Zhou *et al.*, 2014; Arroyo *et al.*, 2015).

El modelo sólido-poroso propuesto por Rojas (2008) incluye dos tipos de entradas: sitios y enlaces. Los sitios o cavidades son los poros más grandes que representan la mayoría del volumen de los poros y están unidos por medio de los enlaces, como se observa en la Figura 2-13. El volumen de los enlaces es despreciable si se compara con el de las cavidades. La DTP es propuesta a partir del ajuste de 8 variables, donde el tamaño medio ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) son los parámetros necesarios para describir la distribución (4 variables para humedecimiento y 4 variables para secado).

El procedimiento para construir una estructura porosa bidimensional se escoge aleatoriamente el número de elementos para colocar dentro de una cuadrícula., que serán posicionados en coordenadas aleatorias, debido a que los suelos son estructuras complejas, la aleatoriedad es un parámetro de importancia, sin embargo, algunas limitaciones deben considerarse en la construcción de la red para que sea físicamente posible. Rojas *et al.* (2009) propone la siguiente restricción para evitar la superposición de enlaces concurrentes encontrados a 90° de la cavidad.

$$R_{st} \geq \sqrt{R_{b1}^2 + R_{b2}^2} \quad (2.35)$$

donde:  $R_{b1}$  y  $R_{b2}$  son los radios de dos enlaces adyacentes que conectan una cavidad con radio  $R_{st}$ . Esta ecuación también asegura que los enlaces son siempre más pequeños que los sitios a los cuales conectan.

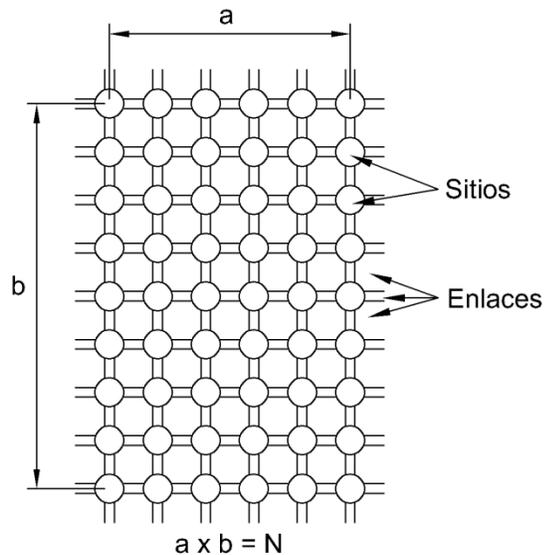


Figura 2-13. Construcción de la red rectangular.

El número de elementos  $n_i$  de cada tamaño es obtenido con la relación:

$$n_i = f_i \times N_n \quad (2.36)$$

donde:  $N_n$  es el número total de nodos en la cuadrícula y  $f_i$  es el valor inicial de la función de distribución de frecuencia

Una vez construida la red, los procesos de secado y humedecimiento son simulados y las curvas de retención Agua-Suelo pueden ser construidas. El proceso de humedecimiento es simulado, empezando con una cuadrícula completamente llena de aire donde la succión es reducida en pasos. Los poros más pequeños son los primeros en llenarse con agua. En un cierto punto, el límite

de tamaño de poro que puede ser saturado es evaluado por medio de la ecuación de Laplace y es conocido como radio crítico.

Los enlaces se saturan cuando se cumplen dos condiciones:

- a) Al menos uno de los sitios conectado a un enlace está lleno de agua
- b) El radio del sitio es más pequeño o igual en tamaño al radio crítico obtenido en la ecuación de Laplace

Los sitios o cavidades de manera similar son saturados cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- a) Al menos uno de los enlaces conectados debe estar lleno de agua
- b) El radio del sitio debe ser menor o igual al radio crítico

Durante el proceso de secado, el frente de secado se mueve desde la derecha a la izquierda. Inicialmente todos los poros de la cuadrícula están saturados con agua, su succión es nula y el frente de secado se sitúa en  $R_{max}$ . Un sitio es secado cuando se cumplen las condiciones siguientes:

- a) Al menos uno de los enlaces conectados con el sitio está completamente seco
- b) El radio del sitio es igual o mayor que el radio crítico

Similarmente un enlace es secado cuando cumple las condiciones

- a) Al menos uno de los sitios conectados está seco
- b) Su radio es mayor que el radio definido por el frente de secado

La distribución del volumen relativo de cada relación de vacíos se obtiene con el nuevo tamaño promedio de los macroporos obtenido en la curva de calibración con la siguiente ecuación.

$$V_{RSi} = \frac{\left( R_i^2 \cdot f_i(\mu_{SMm}, \sigma_{SM}) \cdot Fpv + R_i^2 \cdot f_i(\mu_{sm}, \sigma_{sm}) \right)}{\sum_{i=1}^{i=k} (R_i^2 \cdot f_i(\mu_{SMm}, \sigma_{SM}) \cdot Fpv) + \sum_{i=1}^{i=k} (R_i^2 \cdot f_i(\mu_{sm}, \sigma_{sm}))} \quad (2.37)$$

donde:  $Fpv$  es un parámetro que representa el factor del volumen relativo que reduce el volumen total de los macroporos para hacerlo consistente con el volumen de los microporos y la relación de vacíos de la muestra,  $R_i$  es el radio correspondiente del poro  $i$ ,  $\mu_{sm}$  es el tamaño medio de microporos,  $\sigma_{sm}$  es la desviación estándar de los microporos,  $\mu_{SMm}$  es el tamaño medio de los macroporos y  $\sigma_{SM}$  es la desviación estándar de los macroporos.

Cada vez que la relación de vacíos cambia una nueva curva de retención agua-suelo es determinada. Cuando el material se deforma debido a los incrementos de succión, cada punto de la curva de retención agua-suelo es recalculado, reiniciando la simulación desde el punto inicial de la curva. Esto se debe a que la DTP se modifica a sí misma con cada incremento de succión y por lo tanto el volumen de agua introducida en los poros deformados también cambia.

# Capítulo 3. METODOLOGÍA

---

La metodología de este estudio ilustrada mediante la Figura 3-1 y Figura 3-2 fue planteada a fin de cumplir con los objetivos considerados en el capítulo I. INTRODUCCIÓN, para evaluar el impacto en la función de conductividad hidráulica tanto de un suelo expansivo en estado natural como en un suelo expansivo mejorado con cal. Los diagramas de flujo ilustran las etapas de la investigación que consideran tres variables independientes y son definidas a continuación:

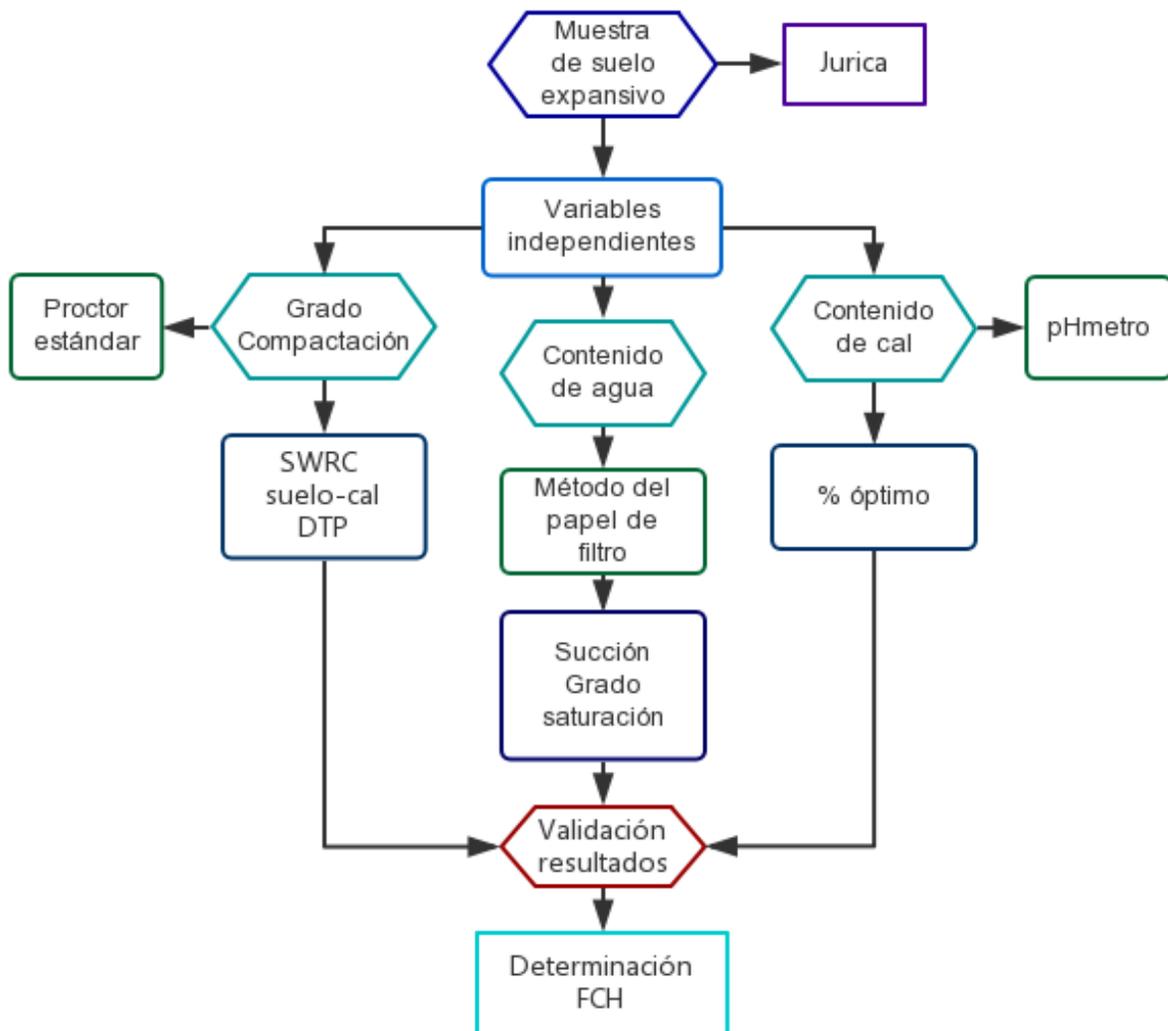


Figura 3-1. Metodología propuesta

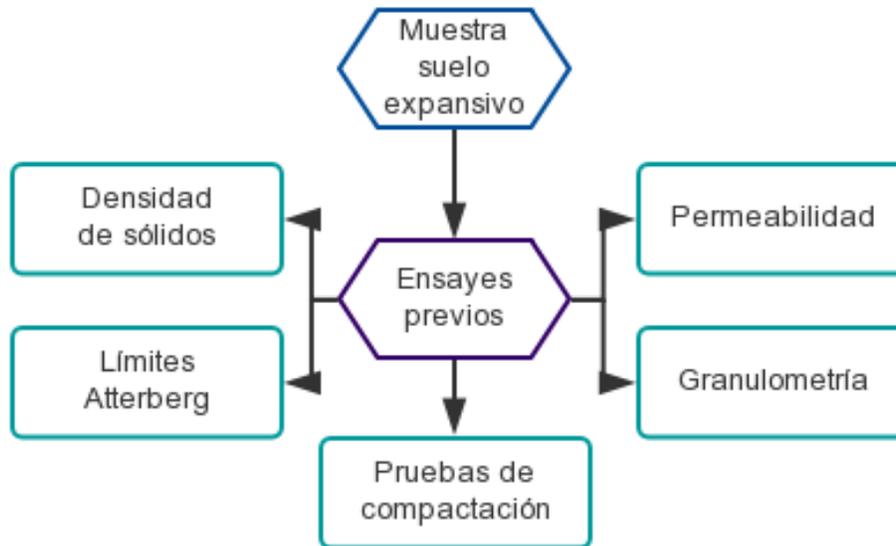


Figura 3-2. Ensayos previos de la investigación

### 3.1. Localización del suelo a estudiar

El estado de Querétaro se encuentra ubicado en el centro del país, entre los 20° 37' 0'' de latitud norte y los 100° 28' 0'' latitud oeste, con una extensión de 11 699 kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>).

### 3.2. Trabajo de campo

Debido a la presencia de suelos expansivos en la ciudad de Querétaro, se ha seleccionado el fraccionamiento de Jurica, en el que se ha encontrado la presencia de este tipo de suelos, causa de severos daños y objeto de estudio de diversas investigaciones como el caso de Pérez-Rea (1993) quien estudió la succión y el comportamiento esfuerzo-deformación, además de Preciado-Cervantes (1998) quien estudió la influencia de las variables de compactación en las características expansivas del suelo de Jurica, y Castelo-Valenzuela (2014) quien evaluó el impacto de las variaciones de humedad en la expansión y capacidad de carga de un suelo de Jurica.

### **3.3. Lugar de ejecución de la experimentación**

Los trabajos de caracterización se realizarán en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. La determinación de la curva característica a través del método de papel de filtro y el cálculo de la conductividad hidráulica se llevaran a cabo en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### **3.4. Contenido óptimo de suelo-cal**

Esta variable es independiente ya que se observará el comportamiento hidráulico de un suelo estabilizado con un contenido óptimo de cal.

Para determinar este contenido se realizarán pruebas de alcalinidad, buscándose elevar el pH a un valor determinado, donde el pH del suelo tiene una influencia sobre la estructura del suelo, mejorándose de esta manera sus características. Se espera que un  $\text{Ca}^{++}$  de la cal reemplace dos iones  $\text{H}^+$  en el intercambio catiónico. Los iones  $\text{H}^+$  se combinan con los iones hidróxilos para formar agua, y al disminuir la concentración de los iones  $\text{H}^+$  que son la fuente de la acidez del suelo se espera aumente el pH.

#### ***3.4.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH)***

Para determinar el potencial de hidrogeno se utilizara el procedimiento de la norma NOM-021-SEMARNAT-2000. Este método de prueba proporciona un medio para estimar la proporción necesaria de suelo-cal para la estabilización de un suelo. Con este ensaye es posible determinar el porcentaje mínimo de cal de la mezcla para obtener un pH de al menos 12.4.

Para su procedimiento se preparan muestras de suelo equivalentes a 10 g, secadas al aire, se preparan 6 dosificaciones de cal de 3, 4, 5, 6, 7, 8 % con respecto al peso seco del suelo. En contenedores se coloca el suelo con su respectivo porcentaje de cal y se añade 20 ml de agua, para determinar el pH de cada una.

### **3.4.2. Número de repeticiones**

Se realizaran dos repeticiones como mínimo y tres como máximo para la determinación del pH de la mezcla de suelo-cal que nos proporcione un pH de 12.4

## **3.5. Caracterización del suelo**

Para la caracterización del suelo se desarrollaron distintos procedimientos para la obtención de las propiedades índices y mecánicas de dicho suelo, estos se basan en las normas vigentes, las pruebas se enlistan a continuación.

### **3.5.1 Determinación del peso específico relativo de los sólidos (Ss)**

Se tomó una muestra de 50 g de suelo alterado, sometiéndola a un secado, se toman dos matraces de cuello largo previamente calibrados, en uno de ellos se vacían los sólidos. Se agrega agua hasta  $\frac{3}{4}$  de su capacidad en ambos matraces y se calientan en un recipiente con agua para que el aire en la muestra empiece a salir, posteriormente se somete a una bomba de vacío, se completa la capacidad del matraz con agua del otro matraz hasta la marca de los 500 ml. Se pesa el matraz + agua + sólidos y con la temperatura de la suspensión se entra a la curva de calibración del matraz para obtener el peso del matraz + agua, para posteriormente calcular la densidad. (ASTM 0854, 2010).

### **3.5.2. Análisis Granulométrico por mallas**

De una muestra representativa de suelo, se procederá a pasar el material por una serie de mallas, el material retenido en cada malla es pesado y anotado, todo lo anterior se realiza hasta llegar a la malla no. 4 y con el material que pasa dicha malla se toma una muestra entre 500 g y 1000 g, la cual se someterá a un lavado en la malla no. 200 para recolectar finos que más adelante se utilizaran en la prueba del hidrómetro, se realizan los cálculos de % retenido parcial, % retenido acumulado, % que pasa y se dibuja la curva granulométrica (ASTM D 2487, 2006)..

### **3.5.3. Límites de Consistencia (Atterberg)**

De una muestra de suelo cribado por la malla no.40 se vacía una porción en una cápsula de porcelana y debe humedecerse por 24 h.

Límite líquido: el suelo es mezclado hasta que sea una mezcla manejable, para utilizarlo en la copa de Casagrande, se procede a dar golpes a la copa hasta que los taludes del material se unan 13 mm, repitiéndose varias veces para encontrar la frontera entre los estados semi-líquido y plástico, localizada en los 25 golpes.

Límite plástico: humedad que posee un cilindro de material que presenta agrietamientos en su estructura.

Límite de contracción: material que se encuentra en estado semi-sólido y sólido, en el cual tras un secado posterior ya no provoca disminución de volumen.

Se utilizarán los procedimientos basados en la norma vigente (ASTM D 4318, 2010).

### **3.5.4. Determinación del peso específico seco de la masa de suelo ( $\gamma_d$ )**

De una muestra de suelo inalterado de aproximadamente 10 kg, se dividirá en cinco porciones añadiendo incrementos de agua del 3%, 6%, 9%, 12% y una se quedará con la humedad natural, pasadas 24 horas para homogeneizar el material se llena un molde en tres capas con 25 golpes en cada una de estas, se enrasa el molde y se pesa, se toma una muestra para conocer su humedad, se repite el procedimiento con cada muestra y se calcula el punto más alto de la parábola para obtener ( $\gamma_d$ ).

### **3.5.5. Grado de compactación**

De acuerdo al Capítulo VIII: Diseño de Cimentaciones del reglamento de construcción para el municipio de Querétaro un material de tipo arcilloso solamente se podrá utilizar como relleno cuando se realice una estabilización

sancionado con los ensayos de laboratorio correspondientes, y para el control de compactación de rellenos, se recurrirá a las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.), donde en su capítulo 011. Rellenos, apartado G Ejecución, punto G.2.4. Se menciona que a menos que el proyecto indique otra cosa o así lo apruebe la Secretaría, los rellenos se compactarán a un grado de compactación mínimo de noventa (90) por ciento de su masa volumétrica seca máxima, obtenida mediante la prueba AASHTO estándar, por lo que se utilizará ese valor. ((HAQ), 2008)

### **3.5.6. Coeficiente de permeabilidad saturada ( $k_s$ )**

De dos muestras de suelo remoldeada con el 90% de grado de compactación, una en estado natural y otra modificada con cal, se determina y registran los diámetros interior y la sección transversal de la muestra a ensayarse, esta se deja saturar en el permeámetro sumergiendo lentamente en un recipiente con agua y procurando que el nivel de la línea de saturación quede arriba del nivel de agua en el recipiente. Una vez saturada la muestra se vierte agua en un tubo y se procede a tomar el tiempo en que demora pasar un volumen determinado de agua por la muestra de suelo, anotamos en una hoja de cálculo las pérdidas de carga inicial y final y procedemos a obtener la permeabilidad.

## **3.6. Succión**

La prueba de succión se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 5298-03. El papel Whatman® no. 42 fue utilizado, este método compara el potencial de agua del suelo con el potencial de retención de agua en un medio poroso. Así, es posible calcular la succión indirectamente midiendo la cantidad de agua transferida por el espécimen de suelo no saturado a un papel filtro inicialmente seco.

Se secó el papel filtro seleccionado para un ensayo al menos 16 horas en el horno de secado a una temperatura de 100 °C, luego se colocó el papel filtro en un desecador, después del secado para almacenarlo antes de usarlo.

La succión total se midió a través del papel filtro (superior) que no estuvo en contacto con el espécimen del suelo, la transferencia de la humedad se limita a la transferencia de vapor a través del aire dentro del contenedor de especímenes.

Se colocó un espécimen de suelo en un recipiente, el cual tiene un peso de 67.26 g, remoldeado en 2 capas, con una altura de 4 cm, reproduciendo un peso específico seco de  $1,230 \text{ kg/m}^3$  y 22.54 % de contenido de agua, ambos son valores correspondientes al 90% de grado de compactación obtenidos por la prueba Proctor Estándar.

Se removieron de la campana de desecación dos papeles filtros para ser apilados con un elemento (o-ring) que no permitió que se encontraran en contacto con el suelo. Además, se colocó un papel filtro (inferior) en contacto con el suelo en la parte inferior. El papel filtro fue colocado con pinzas dentro del recipiente con el fin de no contaminarlo.

Se selló el recipiente con papel parafilm. Después se introdujo el recipiente en un contenedor aislante y se colocó en un lugar donde la variación de temperatura fue menor a  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura estándar fue de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . La succión en el papel filtro y el espécimen en el recipiente se realizó mediante un proceso de equilibrio de 7 días.

Al final del periodo de equilibrio, se pesó cada uno de los papeles filtro en una balanza con aproximación de 0.0001 g para determinar su contenido de agua y así se estimó su valor de succión correspondiente utilizando la ecuación proporcionada por la norma.

Una vez determinadas las pesos y contenidos de agua de cada papel filtro, se desecharon. Por lo tanto, no deben ser usados de nuevo para el desarrollo de este método de ensayo.

El éxito del ensayo radica en minimizar la pérdida de agua, debido a la evaporación, durante un periodo de exposición de cinco a diez segundos.

Este proceso se repitió dos veces tanto en muestras naturales como muestras modificadas con cal en 7% con el fin de corroborar dichos resultados, ya que una variación en las mediciones de este método puede producir un error en los resultados. Cabe señalar que los especímenes modificados con cal tuvieron un tiempo de curado de al menos 7 días a temperatura ambiente.

### **3.6.1. Curva de Retención de Agua-Suelo (SWRC)**

La curva de retención agua-suelo ha cobrado gran importancia en el estudio de los suelos no saturados, una de las aplicaciones más importantes de esta curva es la determinación de funciones de propiedades de suelos no saturados, además tienen la característica de no ser lineales, una de estas funciones es la función de conductividad hidráulica, en la cual se basa esta investigación.

### **3.6.2. Contenido de agua**

Esta variable es independiente ya que a diferentes contenidos de agua ( $S_r$ ), el comportamiento de la succión es distinto.

### **3.6.3. Nivel de tratamiento**

Ya que existe un rango del Grado de Saturación del suelo ( $S_r$ ) del 0% al 100% se planteó seleccionar este rango en segmentos de 10% cada uno.

### **3.6.4. Número de repeticiones**

Se hicieron 11 determinaciones de la succión tanto para la curva de humedecimiento como para la de secado. Esto debido al rango de saturación del suelo, este procedimiento se llevó a cabo con diferentes contenidos de agua inicial que se ve reflejado en el grado de saturación a fin de obtener la curva de retención definida ( $\text{Log}(\psi)$  vs  $(\omega)$  o  $(S_r)$ ).

### 3.7. Distribución del tamaño de poro

Las propiedades texturales de la arcilla natural Mexicana se determinaron a partir de las isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno registradas a 77K utilizando un equipo Quantachrome iQ2 (Figura 3-3), en las instalaciones del Laboratorio de Nanotecnología de la Facultad de Lenguas y Letras de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus Aeropuerto y sus especificaciones se muestran en la Tabla 3-1.

Previo al análisis, se obtuvieron 2 (dos) muestras en estado natural y 2 (dos) muestras con el porcentaje de contenido óptimo de cal (7%) (de aproximadamente 0.05 g) a partir de terrones que no superaron los 125 mm<sup>3</sup> (5x5x5 mm), las cuales fueron desgaseificadas a 200°C por 12 h bajo vacío (10<sup>-4</sup> mbar) para asegurar una superficie seca, limpia y libre de especies físicamente adsorbidas. El área específica de la muestra se calculó de acuerdo al método BET utilizando los datos de la curva de adsorción colectados en el intervalo de presión equilibrio relativa de 0.03 < P/P0 < 0.3. Las distribuciones del tamaño de poro se calcularon con los datos de la isoterma de desorción de las correspondientes isothermas de nitrógeno utilizando el método BJH. El volumen total de poro ( $V_{total}$ ) se estimó a partir de la cantidad de nitrógeno adsorbido a la presión relativa de 0.99.

Para examinar la distribución de tamaño de poro en detalle se utilizó el modelo sólido-poroso dado que proporcionó la distribución de tamaños de poros en el rango de los microporos y macroporos, lo cual nos permite ver más claramente el comportamiento de un suelo estabilizado en la curva de retención agua-suelo.

La Tabla 3-2 muestra un resumen del tipo de ensayos, número de veces que se realizaron, cantidad de pruebas y muestras que se necesitaron.



Figura 3-3. Equipo Quantachrome iQ2 para la determinación de las isothermas de adsorción-desorción.

Tabla 3-1. Especificaciones del equipo Quantachrome iQ2

Especificaciones técnicas del sistema		
Alto	103.5 cm	(40.75 in)
Ancho	60.9 cm	(27.5 in)
Profundidad	70.5 cm	(27.75 in)
Peso (Bomba de vacío instalada)	148 kg	(325 lbs)
Voltaje	100 - 240 VAC	
Frecuencia	50/60 Hz	
Poder (Max)	320 VA	
Conexión	Bajo tierra	salida monofásica
Humedad Relativa Máxima	90%	no-condensado

Tabla 3-2. Resumen de ensayos de laboratorio realizados

	Prueba	Norma	Repeticiones	Pruebas	Total
Muestreo de Suelo Expansivo	<i>Inalterado Y Alterado</i>	<i>NMX-C-431-ONNCCE-2002</i>	1	1	1
Caracterización Geotécnica	<i>Contenido De Agua (<math>\omega</math>)</i>	<i>ASTM D 2216, 2010</i>	1	1	1
	<i>Peso Específico De La Masa De Suelo (<math>\gamma_d</math>)</i>	<i>ASTM D 4531, 2008</i>	1	1	1
	<i>Peso Específico Relativo De Solidos (<math>S_s</math>)</i>	<i>ASTM 0854, 2010</i>	1	1	1
	<i>Granulometría (Mallas)</i>	<i>ASTM D 2487, 2006</i>	1	1	1
	<i>Límites Atterberg</i>	<i>ASTM D 4318, 2010</i>	1	1	1
PVSmax ( $\gamma_d$ )	<i>Proctor Std.</i>	<i>ASTM D-698</i>	1	6	6
Coefficiente de Permeabilidad Saturada (k)	<i>Permeametro Carga Variable</i>	<i>ASTM D-5084</i>	1	2	2
Contenido Optimo de Cal	<i>pHmetro</i>	<i>NOM-021-SEM-2000</i>	3	6	18
SUCCIÓN SWRC natural al 90% de ( $\gamma_d$ )  SWLRC suelo-cal al 90% de ( $\gamma_d$ )	<i>SWRC Natural</i>				
	<i>Papel Filtro</i>	<i>ASTM D 5298-03</i>	2	11 Secado	22
				11 Hum.	22
	<i>SWLRC Suelo-Cal</i>				
	<i>Papel Filtro</i>	<i>ASTM D 5298-03</i>	2	11 Secado	22
				11 Hum.	22
Porosimetría al 90% de ( $\gamma_d$ )	<i>Int. Nitrogeno</i>		1 Suelo Nat.	2	2
			1 Suelo Nat.		
	<i>Int. Nitrogeno</i>		1 Suelo-Cal	2	2
			1 Suelo-Cal		

# Capítulo 4. RESULTADOS, ANÁLISIS Y APLICACIÓN

---

## 4.1. Caracterización Geotécnica

Debido a la presencia de suelos expansivos en la ciudad de Querétaro, se ha seleccionado el fraccionamiento de Jurica, en el que se ha encontrado la presencia de este tipo de suelos, causa de severos daños y objeto de estudio de diversas investigaciones. La Tabla 4-1 mostrada a continuación presenta un resumen de la caracterización geotécnica.

Tabla 4-1. Caracterización Geotécnica del suelo de Jurica.

Propiedad	Magnitud	unidad
Contenido de Agua Gravimétrico ( $\omega$ )	33.46	%
Peso Específico de la Masa de Suelo	1660	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Relativa de Sólidos ( $S_s$ )	2.501	
Contenido de Agua Volumétrico ( $\theta$ )	41.57	%
Grado de Saturación ( $S_r$ )	60.01	%
Relación de Vacíos ( $e$ )	0.89	
Porosidad	0.47	
Contenido de Gravas (G)	3.0	%
Contenido de Arenas (S)	14.0	%
Contenido de Finos (F)	83.0	%
Límite Líquido (LL)	62.97	%
Límite Plástico (LP)	24.86	%
Índice Plástico (IP)	38.11	%
Contracción Lineal	15.83	%
Límite de Contracción (LC)	16.38	%
Actividad de la Arcilla (A) = 1.19	Normal	
Clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	CH	
Coefficiente de Permeabilidad Saturado (k)	$1.37 \times 10^{-7}$	m/s
Peso Volumétrico Seco Máximo Proctor ( $\gamma_d$ )	1349	kg/m <sup>3</sup>
Potencial de Hidrógeno (pH)	7.57	
Superficie específica	422.5	g/m <sup>2</sup>

## 4.2. Prueba Proctor Estándar, determinación del grado de compactación

De acuerdo a las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.), en su capítulo 011. Rellenos, apartado G Ejecución, punto G.2.4. Se menciona que a menos que el proyecto indique otra cosa o así lo apruebe la Secretaría, los rellenos se compactarán a un grado de compactación mínimo de noventa (90) por ciento de su Peso Volumétrico Seco Máximo, obtenido mediante la prueba AASHTO estándar, por lo que dicho grado de compactación fue considerado para la preparación de los especímenes. Los resultados obtenidos de la prueba Proctor Estándar se muestran en la Figura 4-1 y a partir de esta, se pudo establecer que el Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ) correspondiente al 90% de compactación corresponde a  $1.236 \text{ g/cm}^3$  ( $1236 \text{ kg/m}^3$ ), con un contenido de agua óptimo de 22.554%. Dichos valores fueron utilizados para remoldear todos los especímenes de prueba para determinar el valor de succión tanto en condición natural como en condición modificada del suelo.

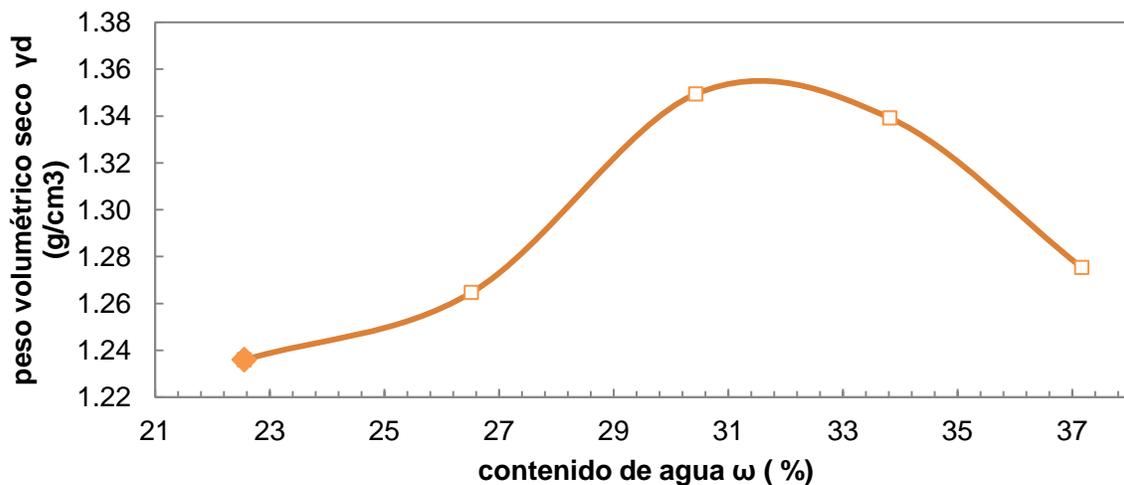


Figura 4-1. Curva de compactación Proctor Estándar del suelo de Jurica.

### 4.3. Potencial de Hidrógeno del suelo (pH) y contenido de cal óptimo

Para determinar el contenido óptimo de cal se realizaron ensayos de medición del Potencial de Hidrógeno (pH) bajo el procedimiento normado por la NOM-021-SEMARNAT-2000. El pH fue medido en muestras de suelo expansivo no saturado con distintos contenidos de cal hidratada “Del Valle” expresados en porcentaje. Se inició con un proporcionamiento del 3% hasta un máximo del 8%, con incrementos de 1%. Estos proporcionamientos fueron elegidos debido a que en la literatura se ha reportado que para mejorar las propiedades mecánicas de un suelo expansivo, solo basta con adicionar cal a partir de un 3% hasta 6%. La Figura 4-2 muestra que el 7% de contenido de cal fue determinado como el contenido óptimo para el suelo de Jurica. Dicho contenido fue considerado óptimo, debido a que se alcanza el mayor valor de pH = 11.75 en la escala del mismo (de 0 a 14) y a partir de este valor ya no se presentó un incremento significativo del mismo, por ende, fue utilizado para realizar los análisis de la SWRC, el coeficiente de permeabilidad saturado, la porosimetría y la conductividad hidráulica.

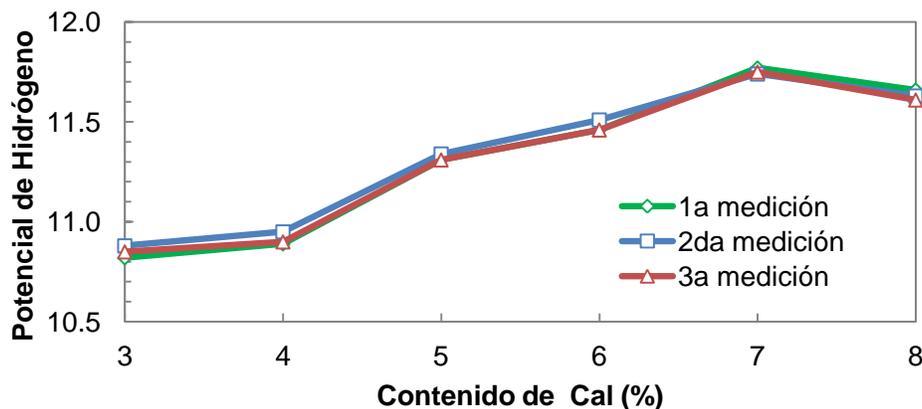


Figura 4-2. Contenido de cal óptimo para el suelo de Jurica, Contenido de cal (%) vs pH.

De acuerdo a la norma ASTM D6276 es necesario alcanzar un porcentaje mínimo de cal con un valor de 12.4 en la escala de pH para lograr la estabilización. Sin embargo, en las mediciones realizadas se obtuvo un pH =

11.75 que sin lugar a dudas es menor al 12.4 solicitado por la norma. Dicha medición se vio reducida debido al del tipo de cal usada, al periodo que duró la medición del ensaye. Este resultado es explicado a través del hecho de que después de tres días de haberse mezclado la cal con el suelo, los valores de pH empiezan a disminuir hasta mantenerse constantes con el tiempo. Lo anterior concuerda con los hallazgos obtenidos por otros investigadores tales como Di Sante *et al.* (2014) quienes trabajaron con los tiempos de las reacciones en suelos estabilizados.

#### 4.4. Porosimetría con intrusión de nitrógeno (N<sub>2</sub>)

Los resultados de la porosimetría con intrusión de nitrógeno se ilustran a través de la Figura 4-3 y Figura 4-4, el rango de la presión relativa abarca desde 0 hasta 1, que representa la relación a temperatura constante entre la cantidad de gas adsorbido y la presión ( $p/p_0$ ). A partir de estos resultados se puede observar que se trata de una isoterma tipo IV, de acuerdo a la clasificación de la IUPAC, la cual es característica de sólidos mesoporosos como las arcillas que contienen sílice y aluminio. Además que se presenta su ciclo de histéresis tipo H3, relacionado a sólidos con agregados de partículas en forma de placas paralelas.

El resultado que emerge de la modificación con cal con respecto al volumen adsorbido ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) es que el sólido poroso se comporta como si se tratara de un material granular. Situación que puede ser descrita debido a que la adsorción se define como la acumulación de material en una superficie, a medida que disminuye el tamaño de poro aumenta el potencial de adsorción (García-Martínez, 2003) razón por la cual existe una relación inversa entre el tamaño de las partículas y la superficie específica, ésta se incrementa por la división de partículas (reducción de tamaño) y la generación de porosidad, mientras que su tamaño de partículas disminuye, inversamente la aglomeración de partículas decreta esta superficie (ISASA Instrumentación, 2012).

Los resultados mostrados en la Tabla 4-2 claramente muestran una reducción en el área superficial que indica la aglomeración de partículas del sólido

una vez que se ha modificado el suelo con cal como agente estabilizador. A partir de los resultados de las isotermas se puede observar que se necesita de un menor volumen de adsorbato (N<sub>2</sub>) para llenar los poros del suelo si comparamos los valores de la isoterma en su estado natural con su estado modificado, ya que ésta última ha cambiado su posición hacia valores menores de adsorbato.

Tabla 4-2. Área superficial obtenida por el metodo del BET

Muestra	Área superficial m <sup>2</sup> /g
Jurica natural 1	76.059
Jurica modificada 1	2.840
Jurica natural 2	79.117
Jurica modificada 2	0.000

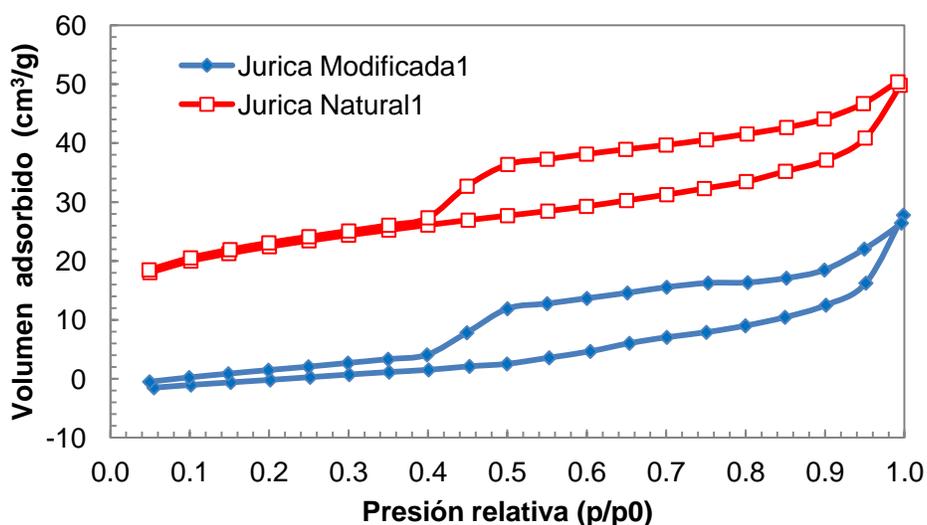


Figura 4-3. Isotermas no.1 del Suelo en estado natural y en estado modificado con cal al 7% de la zona de Jurica, Presión relativa vs volumen (cm<sup>3</sup>/g).

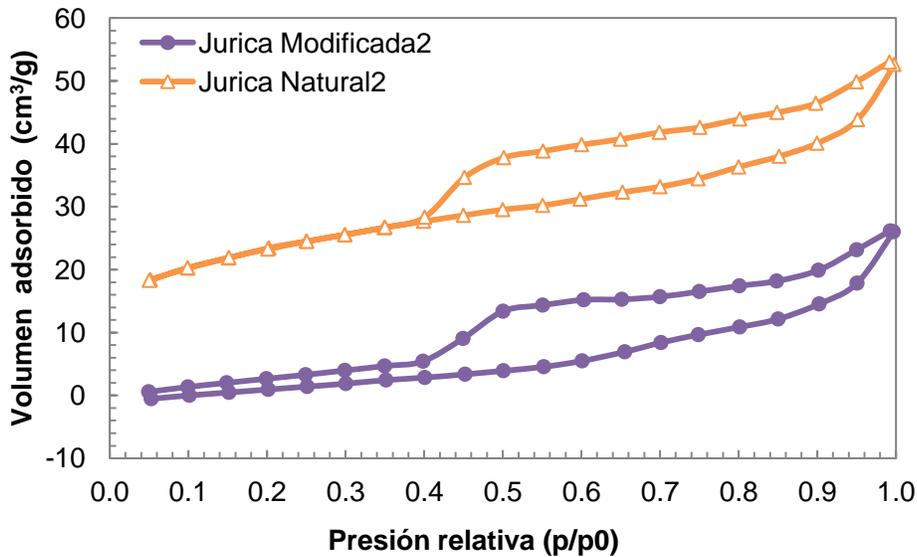


Figura 4-4. Isothermas no.2 del Suelo en estado natural y en estado modificado con cal al 7% de la zona de Jurica, Presión relativa vs volumen (cm<sup>3</sup>/g).

#### 4.4.1 Distribución de Tamaño de Poro rama de Adsorción

Algunos datos complementarios, se obtuvieron del análisis de Porosimetría, es decir, debido a que la Distribución de Tamaño de Poro (DTP) rige el comportamiento o la forma de la SWRC es de esperarse, que al observar variaciones en la forma de la SWRC, también debería de haber modificaciones en la DTP o viceversa. Este resultado es evidente en la Figura 4-5 y Figura 4-6. Estas figuras muestran la DTP en nanómetros (nm), con respecto al volumen adsorbido, el cual fue normalizado para ajustarse a valores entre cero y uno. Dichos resultados de la DTP evidencian que bajo las condiciones de compactación del 90% y un 7% de contenido de cal, existe una modificación en el tamaño de poro, y fue particularmente notable en el rango de los mesoporos (2 nm < diámetro < 50 nm). Así, estos resultados proporcionan un fuerte soporte al argumento de la modificación de las SWLRCs con respecto a las SWRCs.

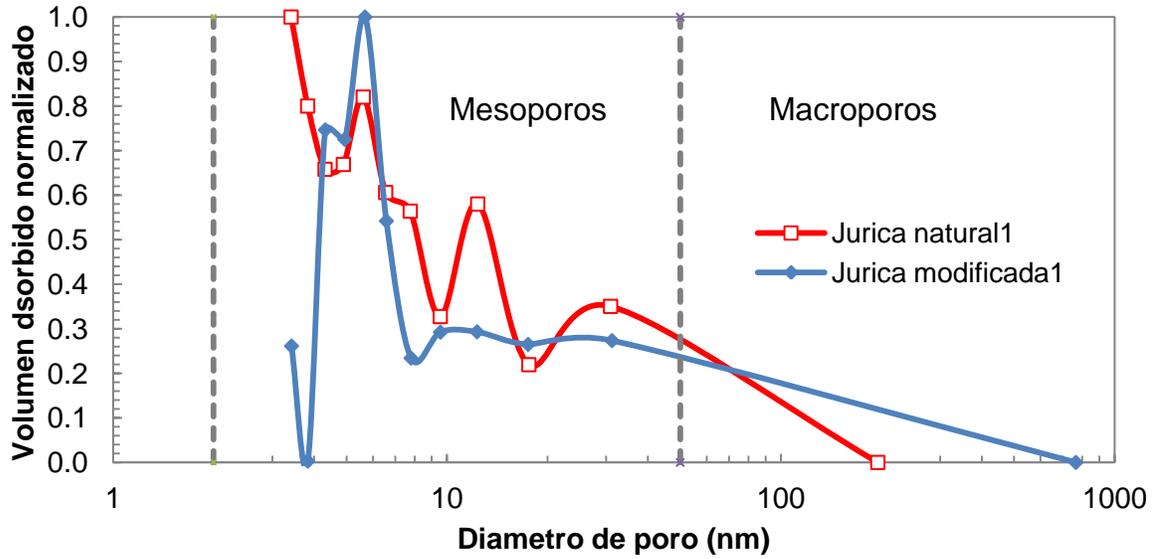


Figura 4-5. Distribución de tamaño de poro no.1 del suelo de Jurica, rama de Adsorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado.

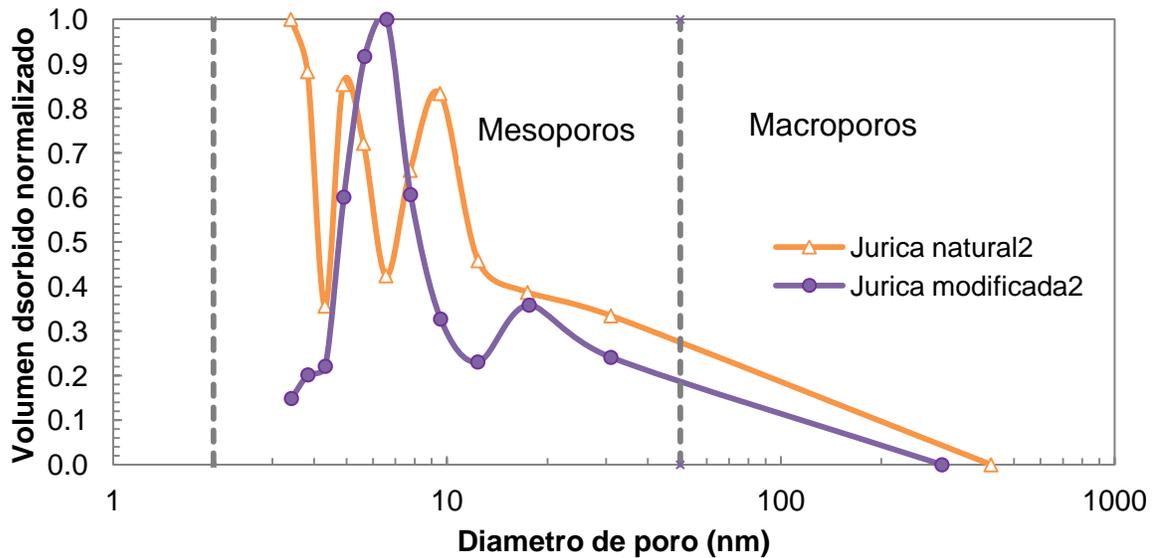


Figura 4-6. Distribución de tamaño de poro no.2 del suelo de Jurica, rama de Adsorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado

Las distribuciones de tamaños de poros obtenidas en la Figura 4-5 y Figura 4-6 presentan un máximo de radio de poros cercano a 3 nm (tamaño de 6 nm) y 3.5 nm (tamaño de 7 nm) para la muestra modificada-1 y modificada-2 respectivamente, estos valores son asociados a mesoporos estrechos. En estado natural se presenta un máximo de radio de poros cercano a 2 nm (tamaño de 4 nm) el cual se repite en la muestra natural-1 y natural-2. Las amplitudes entre los picos de estos gráficos en muestras naturales confirman la existencia de estructuras heterogéneas.

La rama de adsorción ha sido escogida por diversos autores y de acuerdo a López (2004) es preferible la utilización de la rama de adsorción para el cálculo de la distribución de tamaño de poro, a menos que no existan efectos de bloqueo de poro o estos sean despreciables, razón por la cual se han analizado ambas ramas a fin de observar la modificación de la DTP.

#### ***4.4.2 Distribución de Tamaño de Poro rama de Desorción***

El uso de la rama de desorción permite la obtención de curvas de distribuciones de tamaños de poros de mezclas de varios sólidos con tamaños de poros bien definidos (Martín-Martínez, 1990). Bajo las consideraciones antes mostradas se presentan la Figura 4-7 y Figura 4-8 que muestran la distribución de tamaño de poro (DTP) en nanómetros (nm), con respecto al volumen adsorbido, el cual fue normalizado para ajustarse a valores entre cero y uno. Dichos resultados de la DTP evidencian que bajo las condiciones de compactación del 90% y un 7% de contenido de cal, existe una modificación en el tamaño de poro, y fue particularmente notable en el rango de los mesoporos ( $2 \text{ nm} < \text{diámetro} < 50 \text{ nm}$ ).

Las distribuciones de tamaños de poros obtenidas en la Figura 4-7 y Figura 4-8 presentan un máximo de radio de poros cercano a 2 nm (tamaño de 4 nm) el cual se repite para la muestra modificada-1 y modificada-2 respectivamente, estos valores son asociados a mesoporos estrechos. En estado natural se presenta un máximo de radio de poros cercano a 1.75 nm (tamaño de 3.5 nm) el cual se repite en la muestra natural-1 y natural-2.

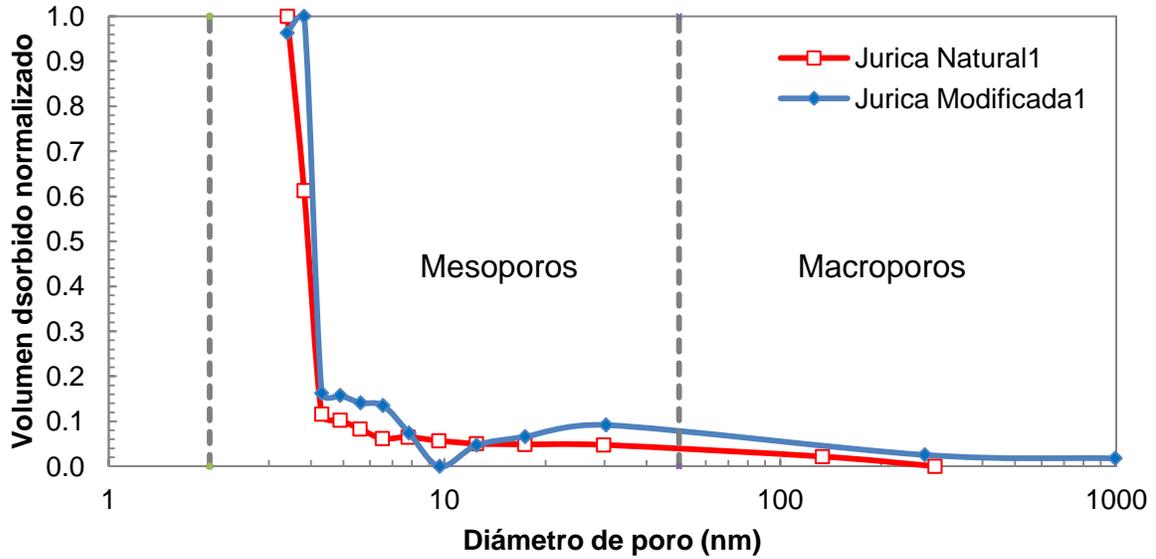


Figura 4-7. Distribución de tamaño de poro no.1 del suelo de Jurica, rama de desorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado.

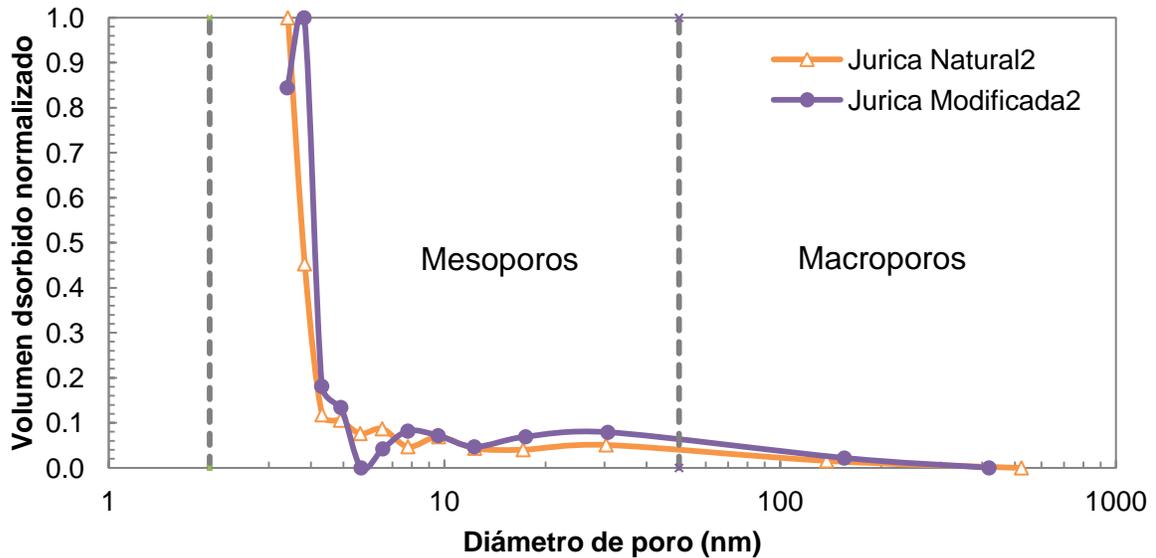


Figura 4-8. Distribución de tamaño de poro no.1 del suelo de Jurica, rama de desorción, con el 90% de compactación en estado natural y en estado modificado con 7% de cal. Diámetro de poro (nm) vs volumen adsorbido normalizado

## 4.5. Curva de Retención agua-suelo (característica) del suelo de Jurica en estado Natural

Los resultados del análisis del suelo de Jurica correspondientes a la succión mátrica en condición del 90% de grado de compactación, se ilustran en la Figura 4-9, Figura 4-10, Figura 4-11 y Figura 4-12. Todos los valores se dan como resultado de la prueba de papel de filtro, y la proporción de la succión se encuentra en un rango que va desde 1 kPa, hasta  $1 \times 10^6$  kPa. Expresado en porcentaje se representa el contenido de agua (humedad), el contenido de agua se puede expresar de forma más simple como el grado de saturación normalizado, que varía de 0 a 1.

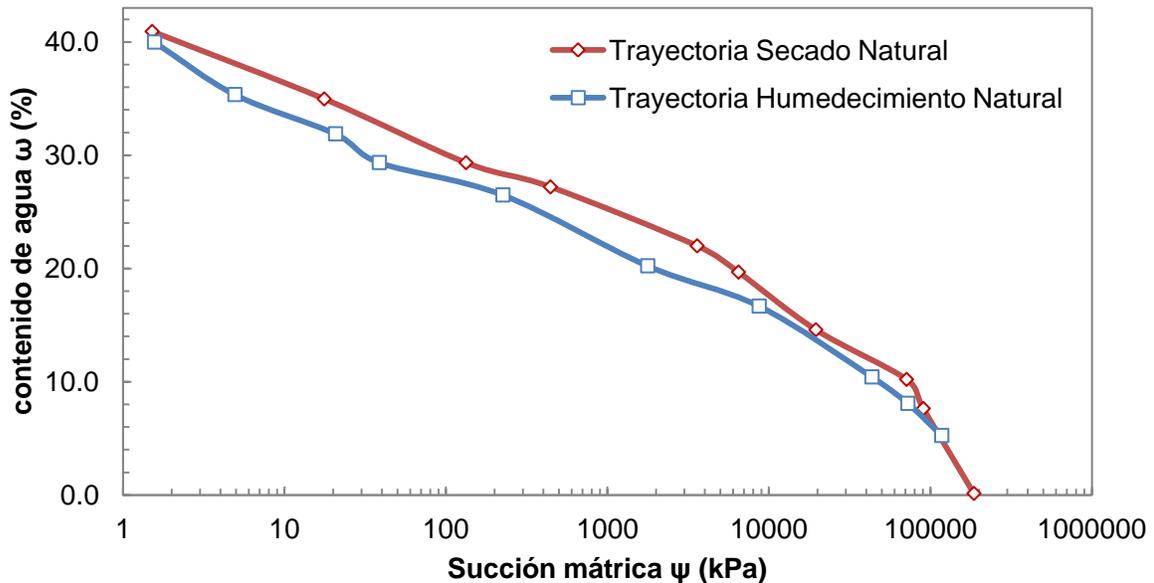


Figura 4-9. SWRC1 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ).

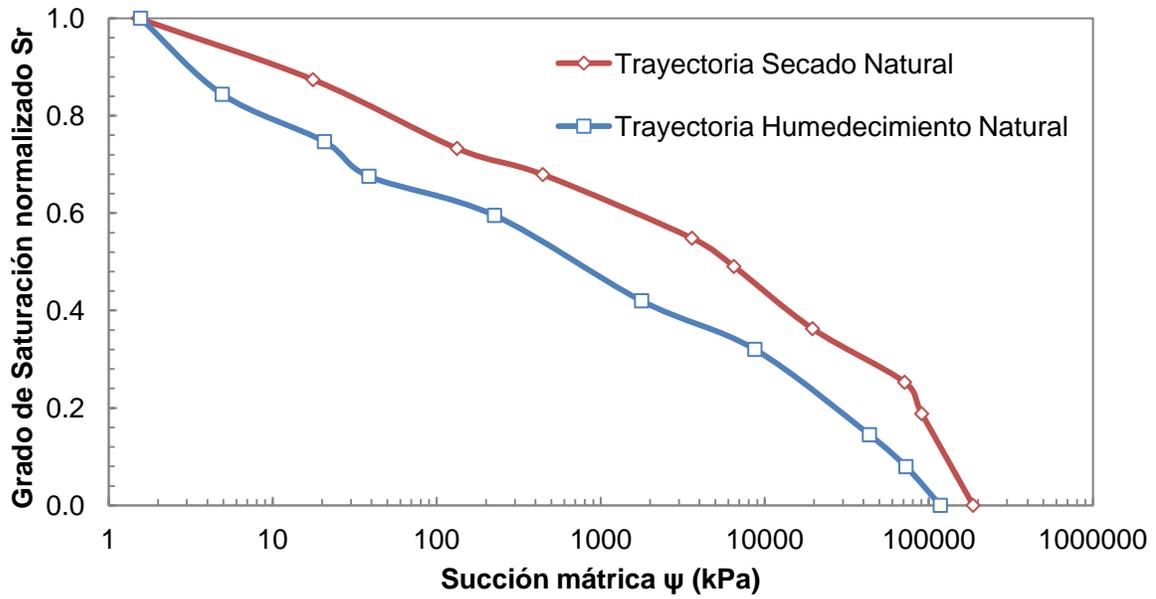


Figura 4-10. SWRC1 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado ( $S_r$ ).

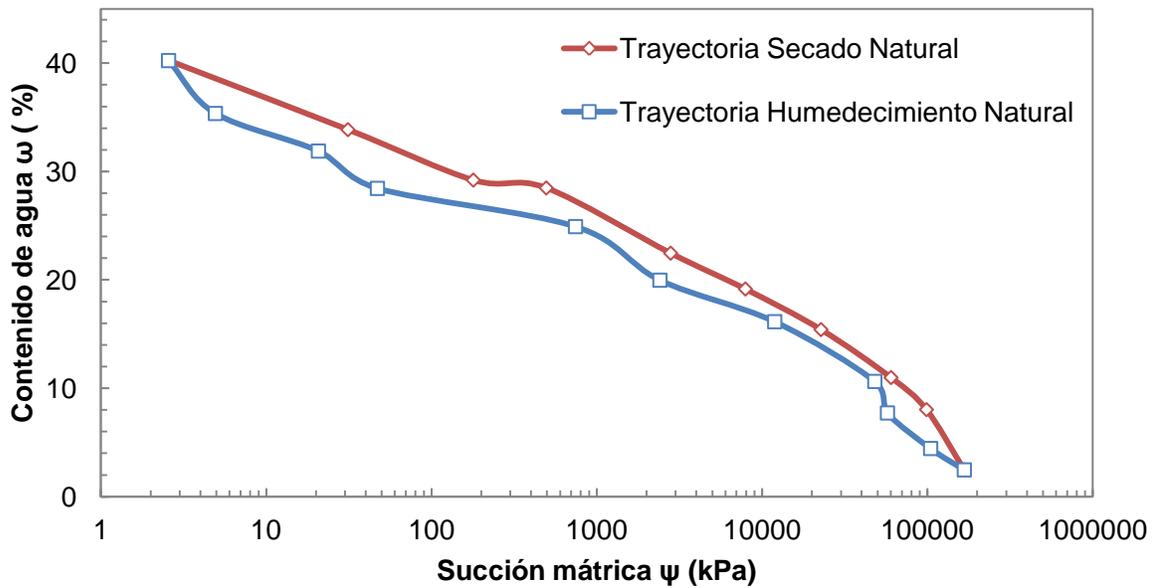


Figura 4-11. SWRC2 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ).

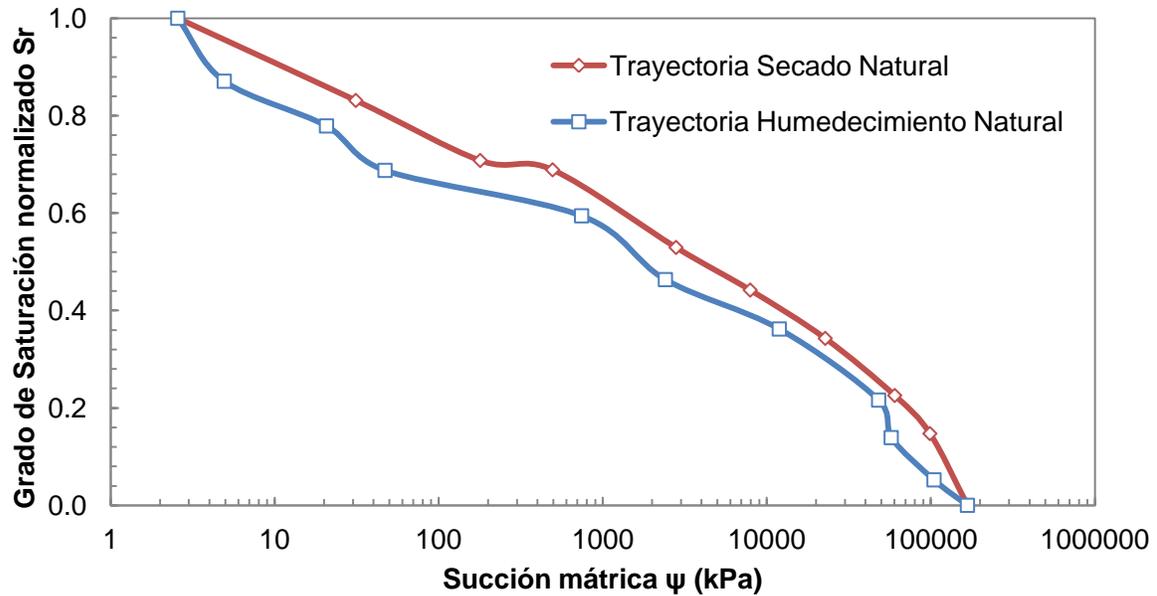


Figura 4-12. SWRC2 al 90% compactación, Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado ( $S_r$ ).

#### 4.6. Curva de Retención Agua-Suelo-Cal (90% de compactación y 7% de cal)

Los resultados de la determinación de los valores de succión relacionados con sus correspondientes valores de contenido de agua (o grado de saturación) del suelo de Jurica mejorado con un contenido de cal de 7% y con grado de compactación de 90%, pueden ser apreciados a través de las SWRC mostradas en la Figura 4-13, Figura 4-14, Figura 4-15 y Figura 4-16. Todos los valores de succión obtenidos a través de la técnica de papel filtro muestran que la proporción de la succión se encuentra en un rango que va desde 1 kPa hasta  $1 \times 10^6$  kPa en el eje de las abscisas, mientras que en eje de las ordenadas es expresado en porcentaje el contenido de agua (humedad). Además, el contenido de agua se puede expresar como el grado de saturación normalizado, que varía de 0 a 1.

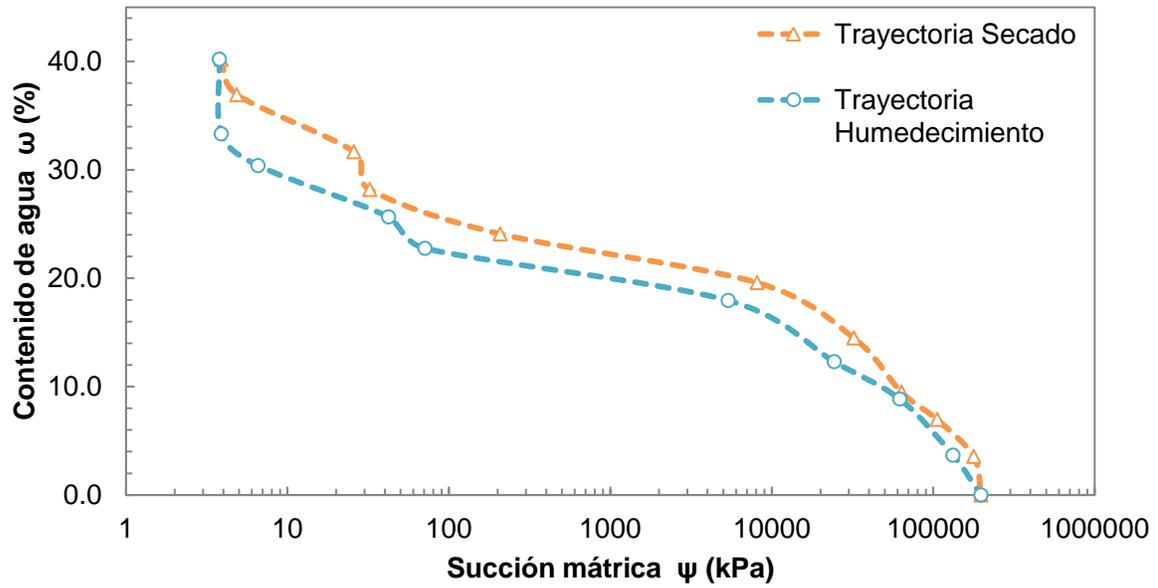


Figura 4-13. SWLRC1 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $w$ ).

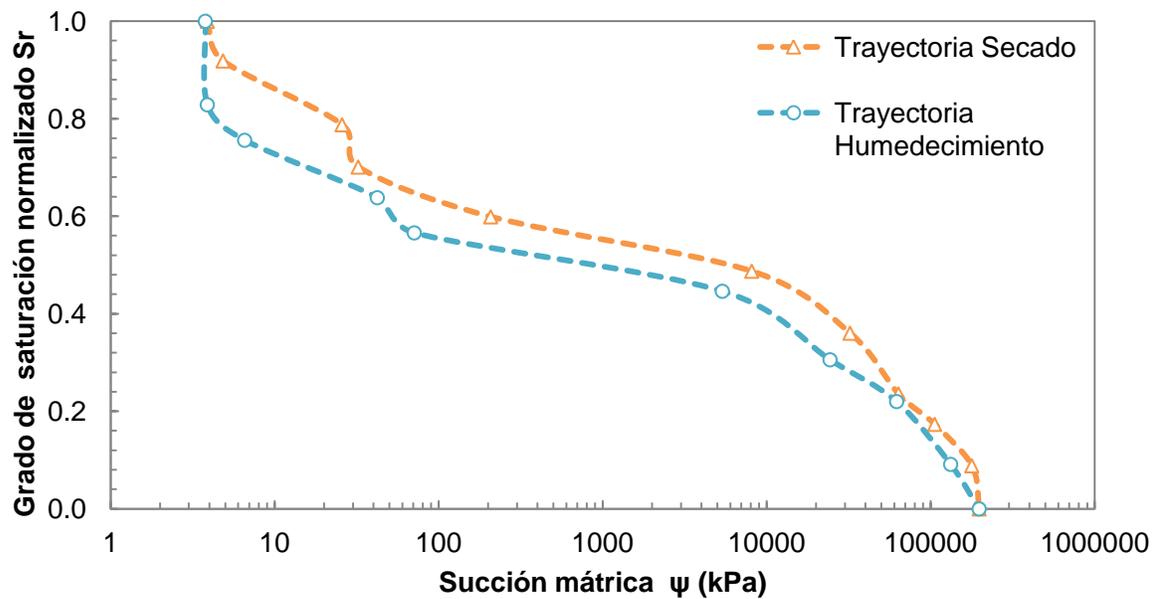


Figura 4-14. SWLRC1 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación ( $S_r$ ).

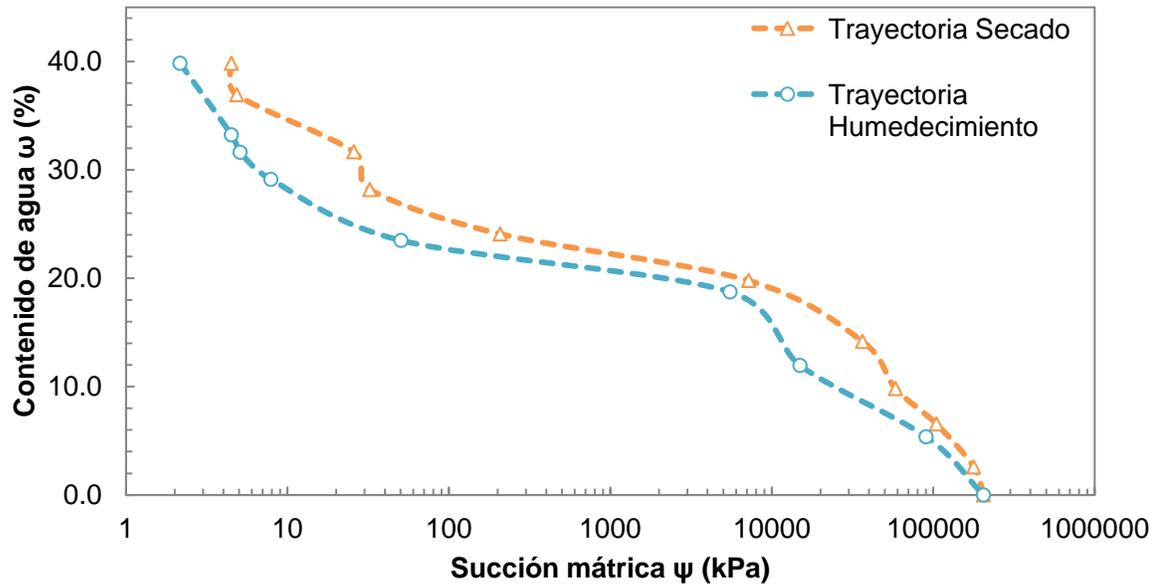


Figura 4-15. SWLRC2 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ).

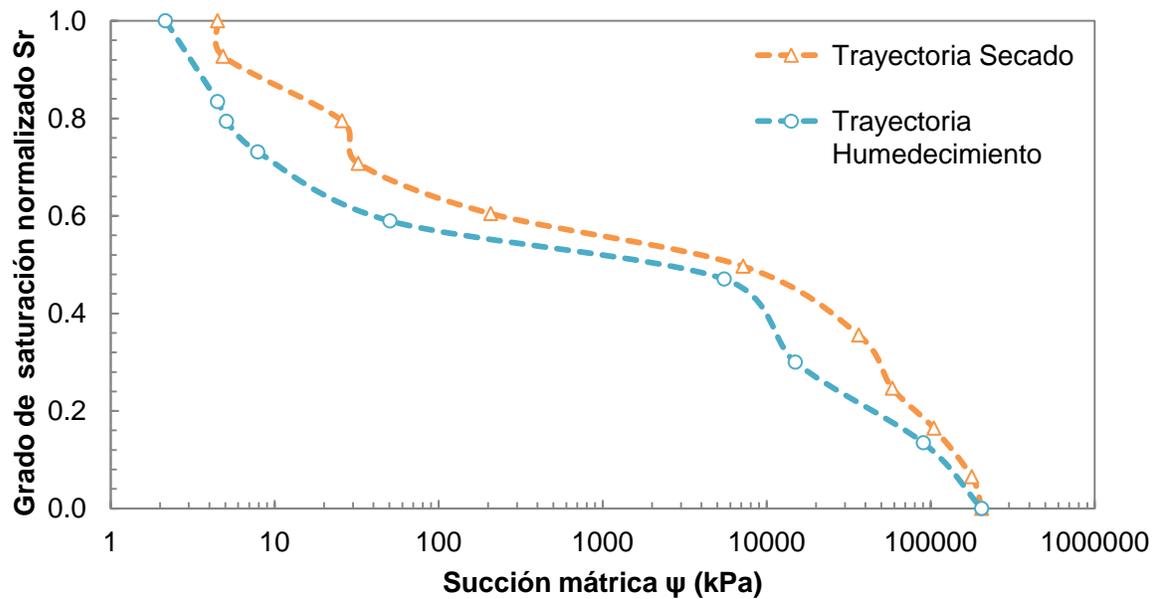


Figura 4-16. SWLRC2 al 90% compactación y modificado con cal al 7%. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación ( $S_r$ ).

Cabe especificar, que la ausencia de curado en condiciones húmedas en las muestras modificadas con cal se realizó a fin de verificar las condiciones climáticas con temperatura elevada donde el curado es difícil. A partir de los datos anteriores, se pudo observar que los valores de succión obtenidos para las dos curvas de retención no presentan diferencias significativas notables. En conjunto, estos resultados proporcionan la base del análisis de la Función de Conductividad Hidráulica (FCH) para el suelo natural y el suelo modificado con cal (ambos bajo el 90% de compactación), por medio de los métodos matemáticos descritos en el Capítulo 2.

#### **4.7. Curva de Retención Agua-Suelo modificado con 7% de cal y tiempo de curado de 7 días en condición de humedad**

Con el fin de evaluar el efecto del curado en el proceso de la reacción puzolánica de la cal con el suelo sobre los valores de succión, se realizó una comparación entre los valores de succión de las trayectorias de secado de las curvas de retención (SWLRC1 y SWLRC2) determinados sin proceso de curado en condición húmeda y otros valores de succión de especímenes reproducidos con un contenido de agua inicial elegido aleatoriamente, estos fueron sometidos a un proceso de curado. Los resultados se muestran en la Figura 4-17 y Figura 4-18. Todos los valores de succión obtenidos a través de la técnica del papel filtro muestran que la proporción de la succión se encuentra en un rango que va desde 1 kPa hasta  $1 \times 10^6$  kPa en el eje de las abscisas, mientras que en el eje de las ordenadas es expresado en porcentaje el contenido de agua (humedad).

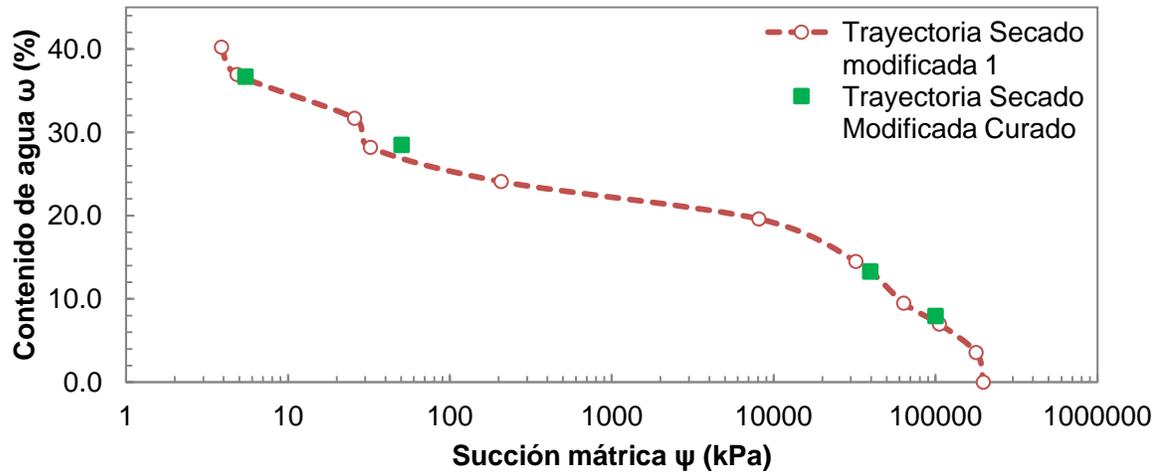


Figura 4-17. Comparativa de la trayectoria de secado 1 en muestras modificadas con cal, con y sin curado. Succión (kPa) vs Contenido de agua (%).

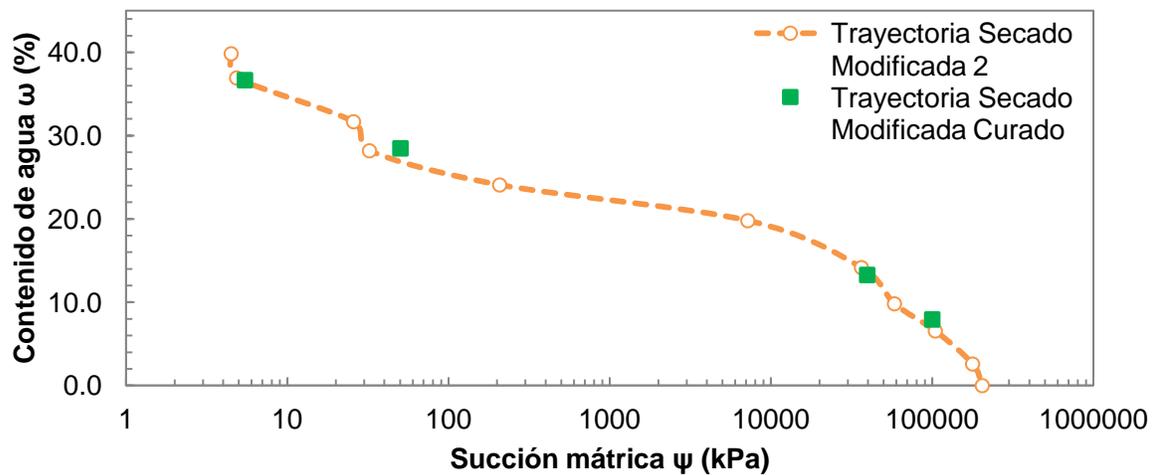


Figura 4-18. Comparativa de la trayectoria de secado 2 en muestras modificadas con cal, con y sin curado. Succión (kPa) vs Contenido de agua (%).

Lo interesante de estos datos es que a pesar de no contar con un tiempo y proceso de curado, no se observó algún efecto que modifique los valores de la succión del suelo, ya que generalmente se ven afectados por el proceso de carbonatación.

#### 4.8. Comparativa de las Curvas de Retención Natural (SWRC) y Modificada (SWLRC)

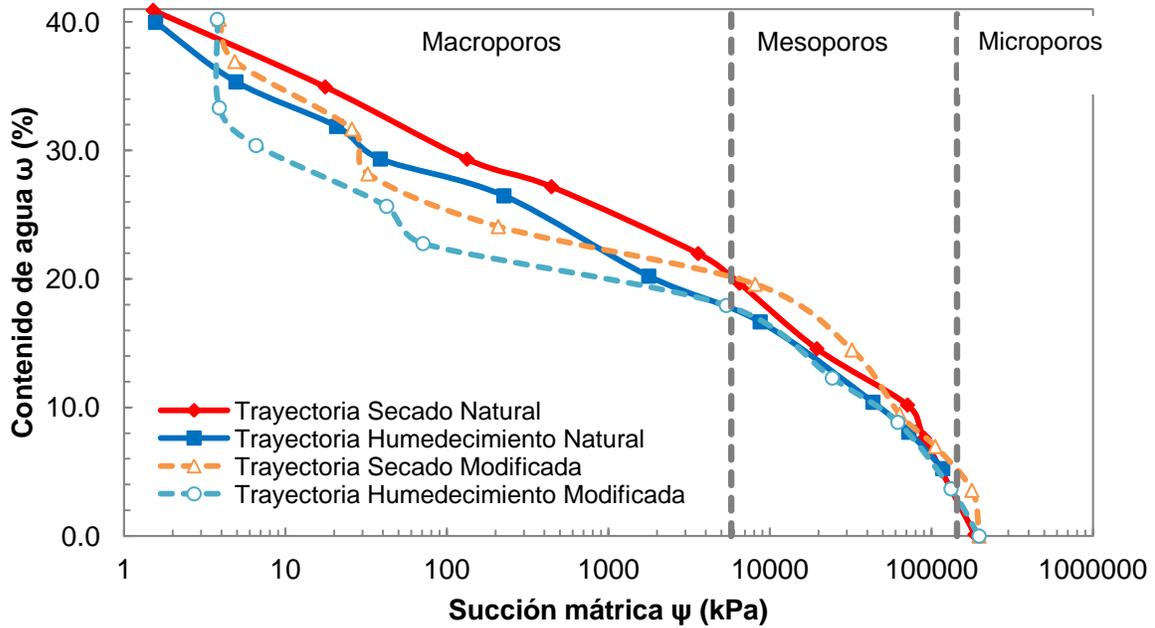


Figura 4-19. Comparativa SWRC1 y SWLRC1 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ).

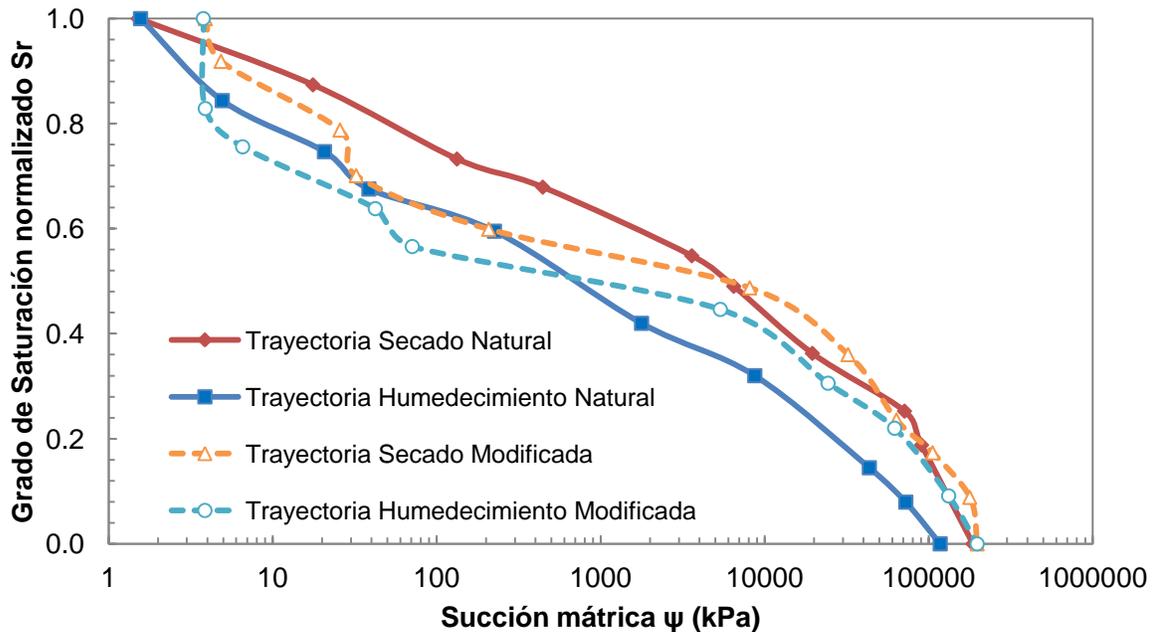


Figura 4-20. Comparativa SWRC1 y SWLRC1 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado  $S_r$ .

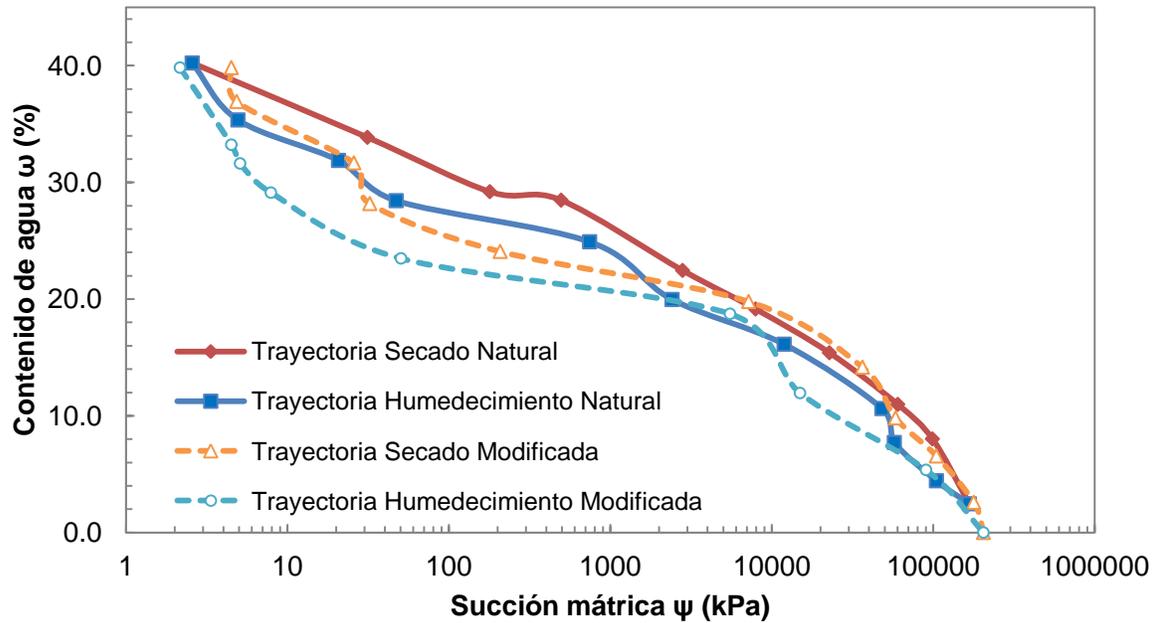


Figura 4-21. Comparativa SWRC2 y SWLRC2 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Contenido de agua ( $\omega$ ).

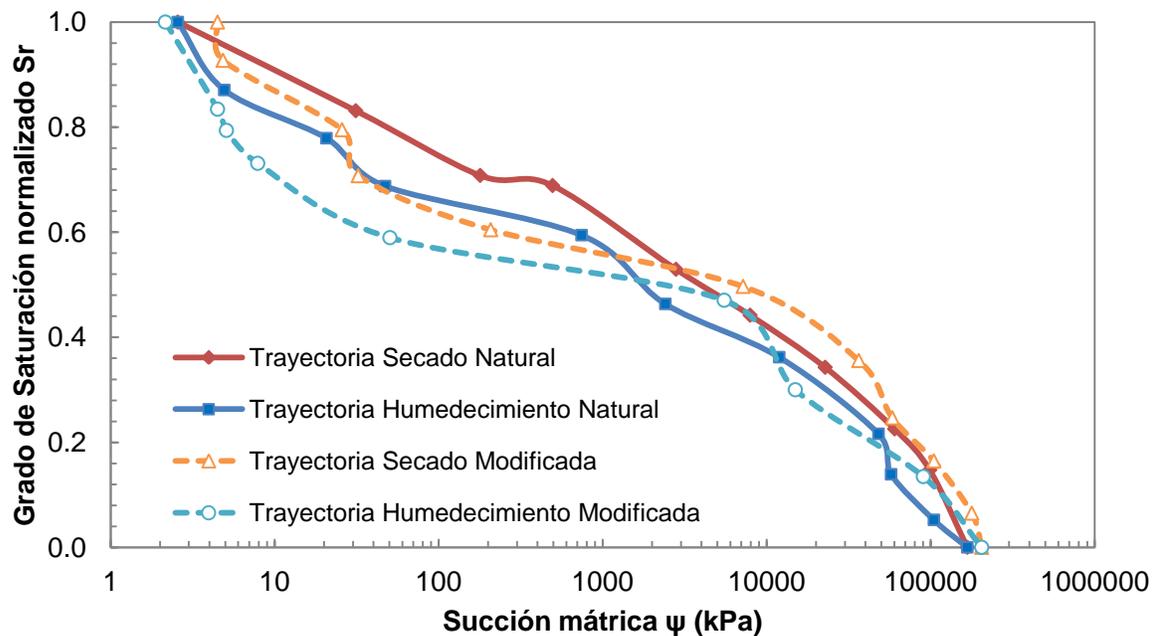


Figura 4-22. Comparativa SWRC2 y SWLRC2 al 90% compactación. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado  $S_r$ .

Como se puede observar en la Figura 4-19, Figura 4-21, Figura 4-22 y Figura 4-22, se presentan las curvas de retención del suelo expansivo de Jurica en estado natural (SWRC 1 y 2) en ambas trayectorias (humedecimiento y secado) con una línea sólida, mientras que las líneas punteadas representan la curva de retención del suelo modificado con cal (SWLRC 1 y 2).

Tabla 4-3. Valores de succión asociados a distintos tamaños de poros

Tipo de poro	Tamaño nm	Tamaño m	Succión kPa
Macroporos	> 50 nm	> 5.0E-08	> 5760
Mesoporos	50 nm - 2 nm	5.0E-8 - 2.0E-9	5760-144000
Microporos	< 2 nm	< 2.0E-9	< 144000

El resultado de las comparaciones entre las curvas de retención, confirman que las SWLRC muestran variaciones en los valores de succión con respecto a las SWRC. El rango de valores de succión que cambian se encuentran entre 1 y 5760 kPa evaluando con la ecuación de Laplace, que corresponden a valores asociados a macro y mesoporos, respectivamente. De acuerdo a la ecuación de Laplace  $(s = \frac{2T_s}{R})$  es posible asumir que los valores de succión cercanos a cero son influenciados por la presencia de partículas de mayor tamaño, además de que valores de succión altos están asociados a la microestructura (Figura 4-19). La Tabla 4-3 nos presenta los valores asociados a distintos tamaños de poro tomando en cuenta la ecuación de Laplace.

Los resultados indican que la presencia de cal en el suelo estabilizado modifica la capacidad de retención de agua ejercida por el suelo mejorado con cal, esto en relación a su estado natural (ambas bajo el 90% de grado de compactación). Esto representa una disminución del contenido de agua, que este hecho es evidente tras la comparación de los resultados realizada en ambas trayectorias (humedecimiento y secado). Lo anterior es explicado a través de lo obtenido por Cuisiner *et al.*, (2011), Al-Mukhtar *et al.*, (2012) y Di Sante *et al.*, (2014), quienes observaron que el intercambio catiónico y la reacción puzolánica producen los decrementos en la capacidad de retención de agua, por ende,

también el potencial de expansión y cambios en la trabajabilidad de un suelo mejorado con cal.

Las diferencias entre las SWRC y las SWLRC (rango de 1 a 5760 kPa) también pueden ser explicada mediante la explicación dada por Arroyo *et al.*, (2015) quienes propusieron un modelo capaz de simular las SWRC incluyendo deformaciones volumétricas. Sus hallazgos demuestran que la Distribución de Tamaño de Poro (DTP) se modifica durante los incrementos de succión. A medida que la succión se incrementa, el volumen de los macroporos se reduce y el de los microporos aumenta, y viceversa. Los resultados mostrados en la Figura 4-19 y Figura 4-21 concuerdan con los hallazgos antes mencionados, ya que una vez superado el valor de succión asociado a los mesoporos (5760 kPa) se induce en el suelo la formación de poros de menor tamaño, a pesar de que la adición de cal provocó la formación de poros de mayor tamaño. Asimismo, la disminución de la capacidad de retención es influenciada por la formación de partículas (aglomerados) de mayor tamaño, que a su vez produce el incremento en los poros de mayor tamaño, tal y como lo demostró López-Lara (2002).

#### **4.6. Ajuste del modelo sólido-poroso y Distribución de Tamaño de Poro**

Como se puede observar en la Figura 4-23, Figura 4-24, Figura 4-25 y Figura 4-26, se presentan las curvas de retención del suelo expansivo de Jurica en estado natural (SWRC 1 y 2) en ambas trayectorias (humedecimiento y secado) con el ajuste realizado con un modelo poroso bidimensional. Dichos ajustes se comparan en estado natural como modificado en la Figura 4-27 a fin de observar no solo las variaciones de la curva de retención, sino también la DTP a partir de estos ajustes.

Las distribuciones de tamaños de poros obtenidas se presentan en la Figura 4-28, que presentan un máximo de radio de poros cercano a 0.25 nm (tamaño de .5 nm) el cual se repite para la muestra natural y modificada respectivamente en el caso de los microporos, este valores es asociado a

ultramicroporos. Para el caso de los macroporos se presenta un máximo de radio de poros cercano a 3000 nm (tamaño de 6000 nm) en estado natural y un máximo tamaño de radio de poro cercano a 10000 nm (tamaño 20000 nm). Así, estos resultados en conjunto con los obtenidos en la intrusión de nitrógeno proporcionan un fuerte soporte al argumento de la modificación de las SWLRCs con respecto a las SWRCs.

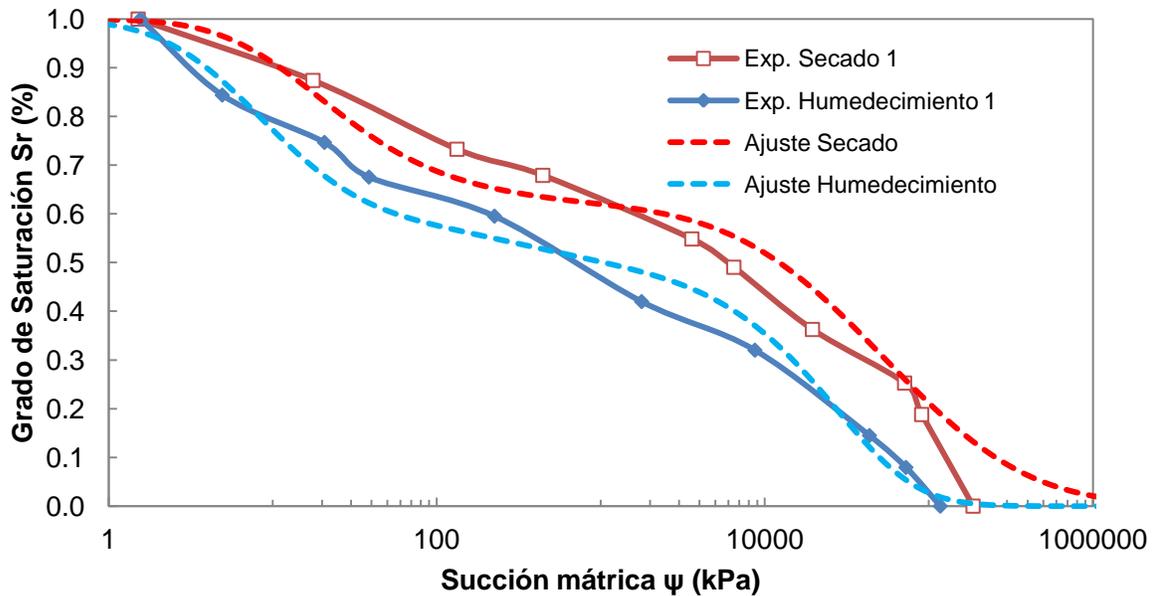


Figura 4-23. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo natural-1 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado  $S_r$ .

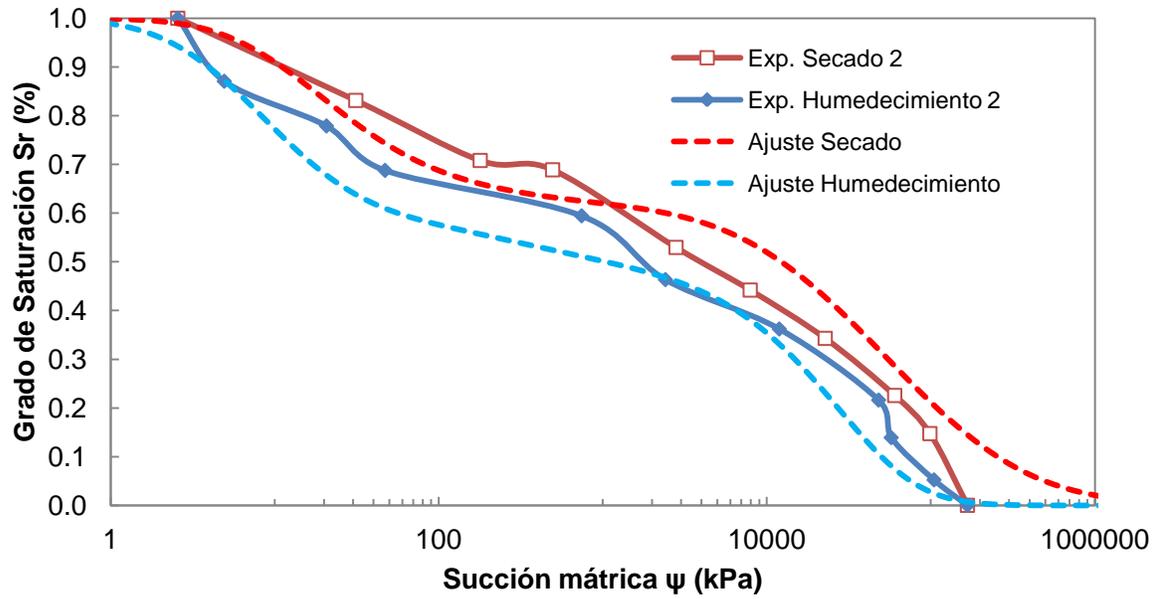


Figura 4-24. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo natural-2 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado  $S_r$ .

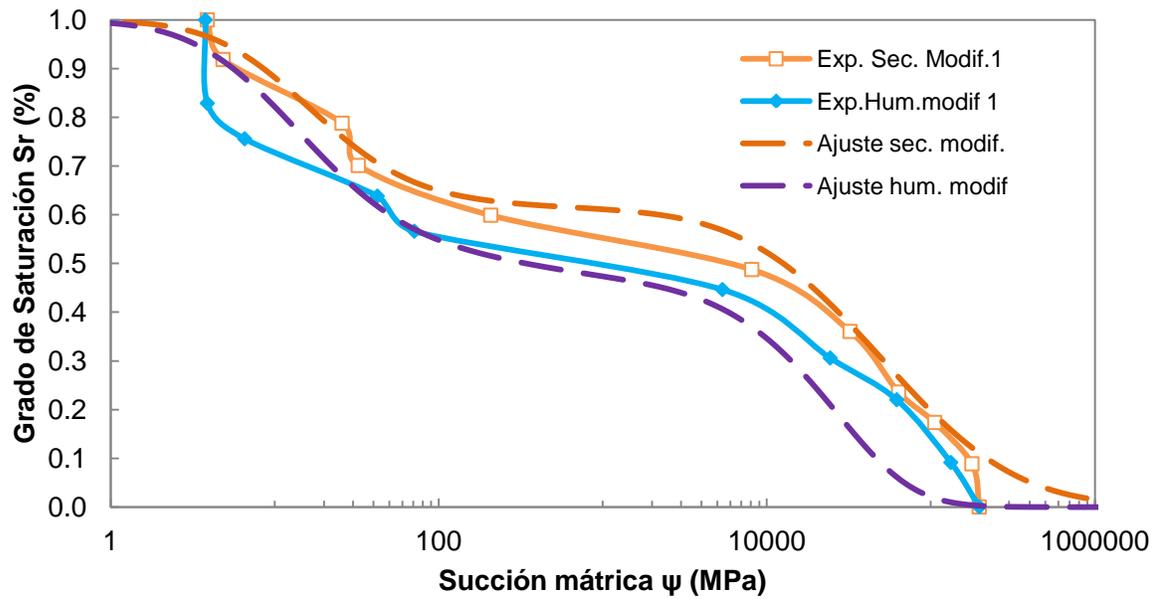


Figura 4-25. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo modificado-1 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado  $S_r$ .

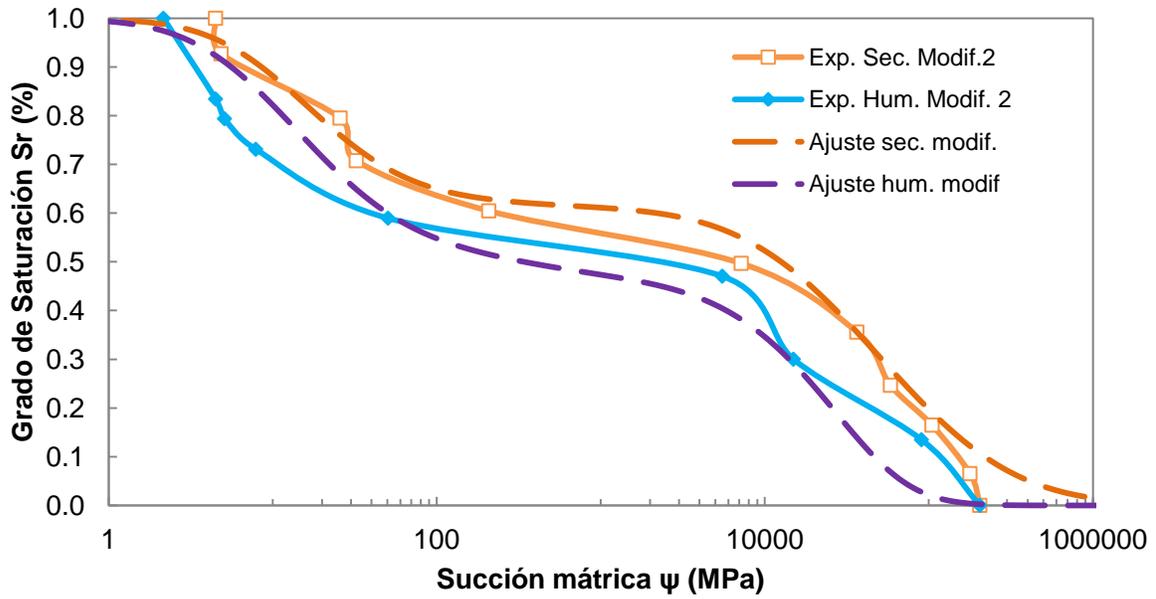


Figura 4-26. Ajuste de la Curva de retención Agua-Suelo modificado-2 utilizando el modelo poroso. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado  $S_r$ .

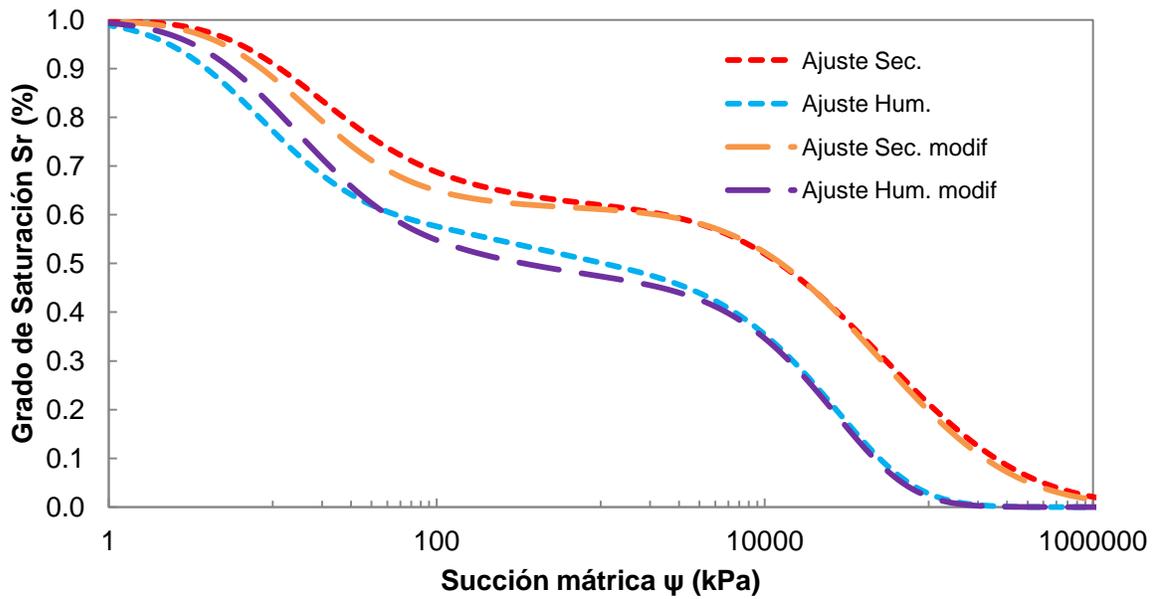


Figura 4-27. Comparativa de Curva de retención Agua-Suelo Ajustadas. Succión mátrica ( $\psi$ ) vs Grado de Saturación normalizado  $S_r$ .

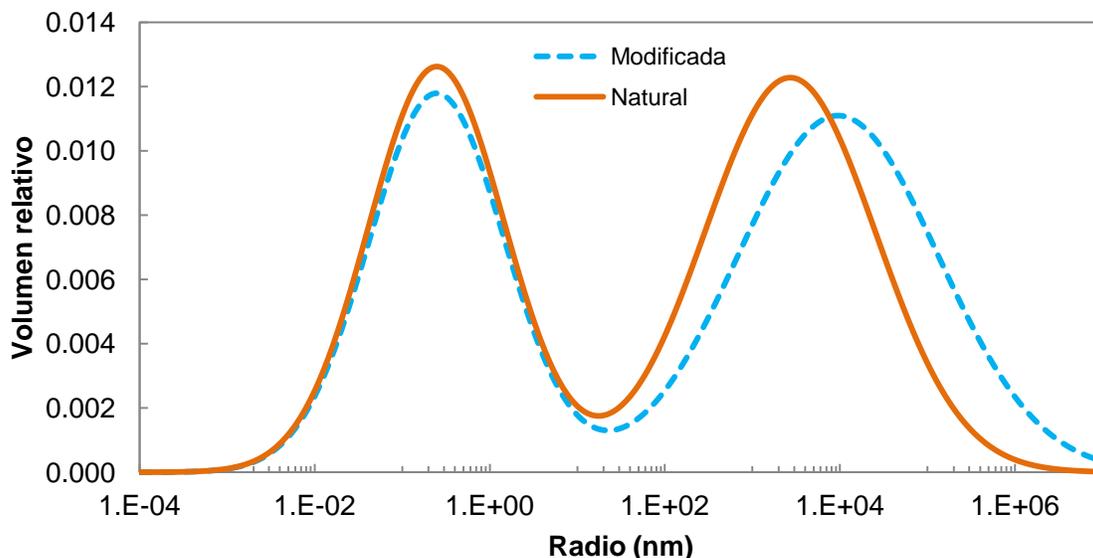


Figura 4-28. Distribución de Tamaño de Poro. Radio (nm) vs Volumen relativo.

#### 4.9. Comportamiento Hidráulico del suelo de Jurica

La Tabla 4-4 muestra los datos obtenidos de la prueba de conductividad hidráulica saturada por medio del método de carga variable con la norma vigente ASTM D 5084.

Tabla 4-4. Conductividad Hidráulica Saturada

Condición	% Cal	Magnitud (m/s)
Natural	-	1.37E-07
Modificada	7	6.15E-10

Es importante notar que la modificación con cal tiene un efecto negativo en el comportamiento hidráulico de un suelo expansivo, en las condiciones consideradas en este estudio (contenido de cal de 7%, 90 % de grado de compactación PVSM), resultados que confirman los resultados de Jofré y Kraemer (2008) y Al-Mukhtar *et al.*, (2012) quienes analizaron la microestructura de un suelo modificado con cal, demostrando que no solo al sobrepasar un contenido de cal, un suelo expansivo modificado con cal reduce su conductividad saturada debido al incremento de la tortuosidad, si no que a medida que se desarrollan las reacciones puzolánicas y se forman los enlaces entre partículas del suelo, se

cierran las interconexiones entre los vacíos, lo cual reduce su conductividad hidráulica saturada hasta los valores iniciales o incluso, menores.

#### **4.10. Función de Conductividad Hidráulica, métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-Gonzalez et al (2014a)**

Basándonos en los resultados de la curva de retención se realizaron los ajustes de las curvas para obtener la función de conductividad hidráulica en suelos sin modificar en condiciones de 90 % de compactación.

Los datos observados en la Figura 4-29, Figura 4-30, Figura 4-31 y Figura 4-32 muestran y comparan los datos experimentales de la succión con el ajuste de los métodos matemáticos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a) donde se evidencian variaciones en coeficiente de correlación, por lo que la evaluación de la función de conductividad hidráulica será afectada principalmente en medida de que tan bajo sea este ajuste.

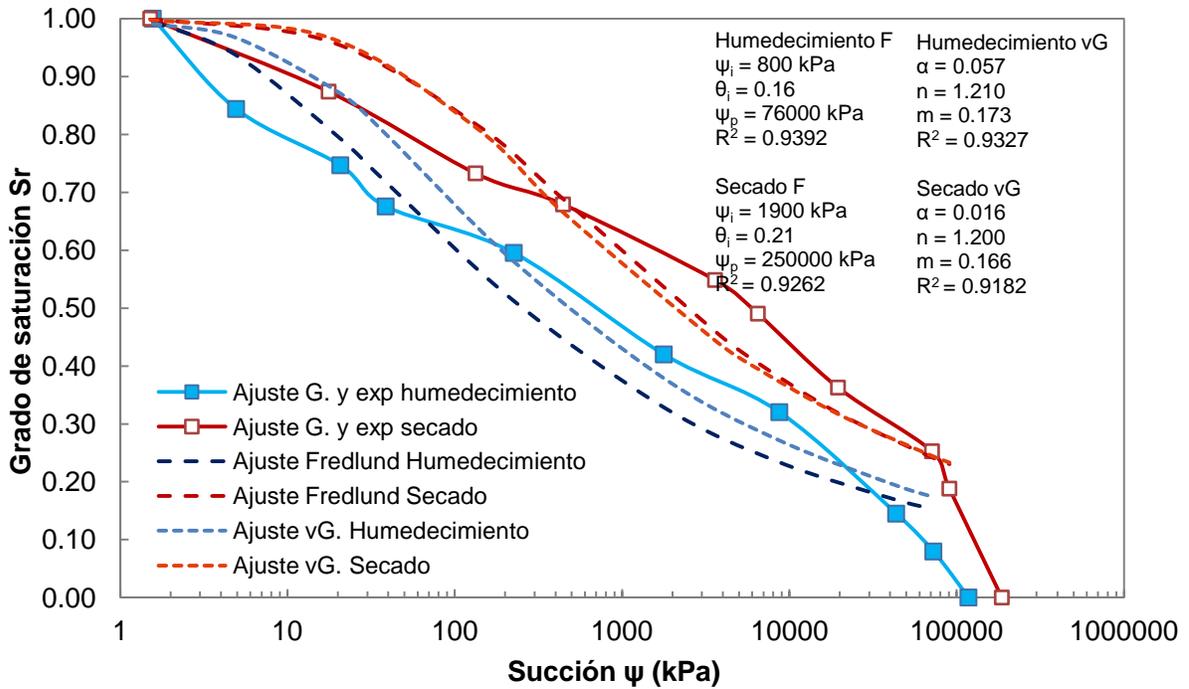


Figura 4-29. Ajuste de la Curva Característica natural no.1 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a).

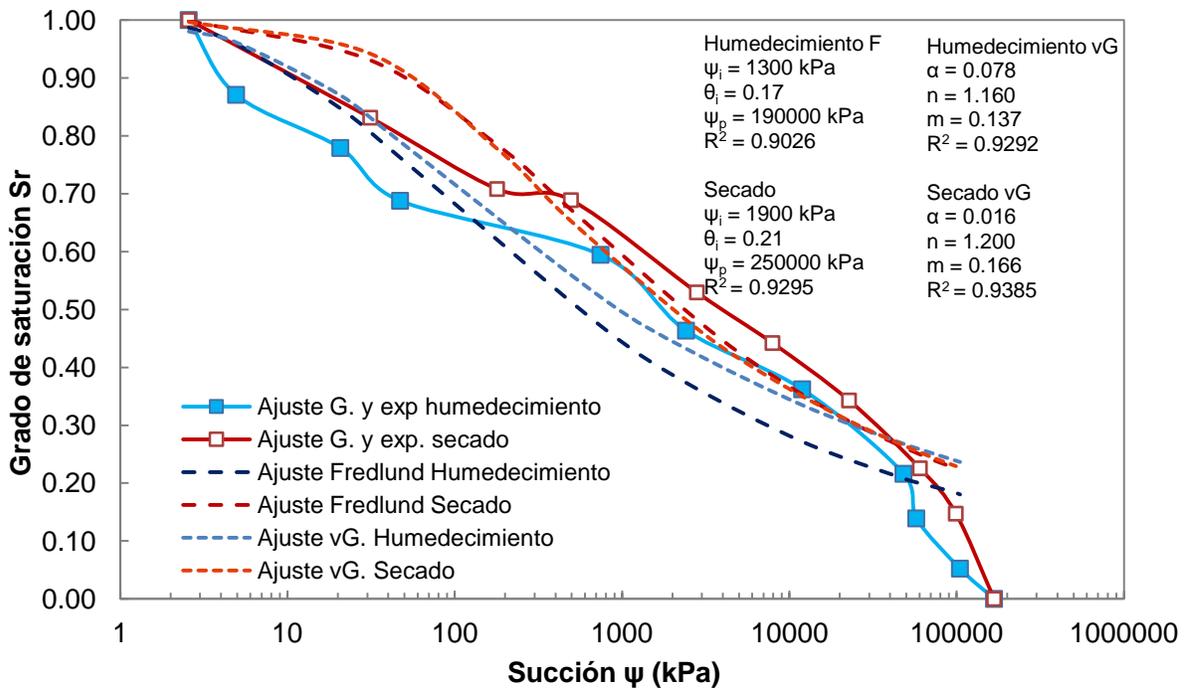


Figura 4-30. Ajuste de la Curva Característica natural no.2 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a).

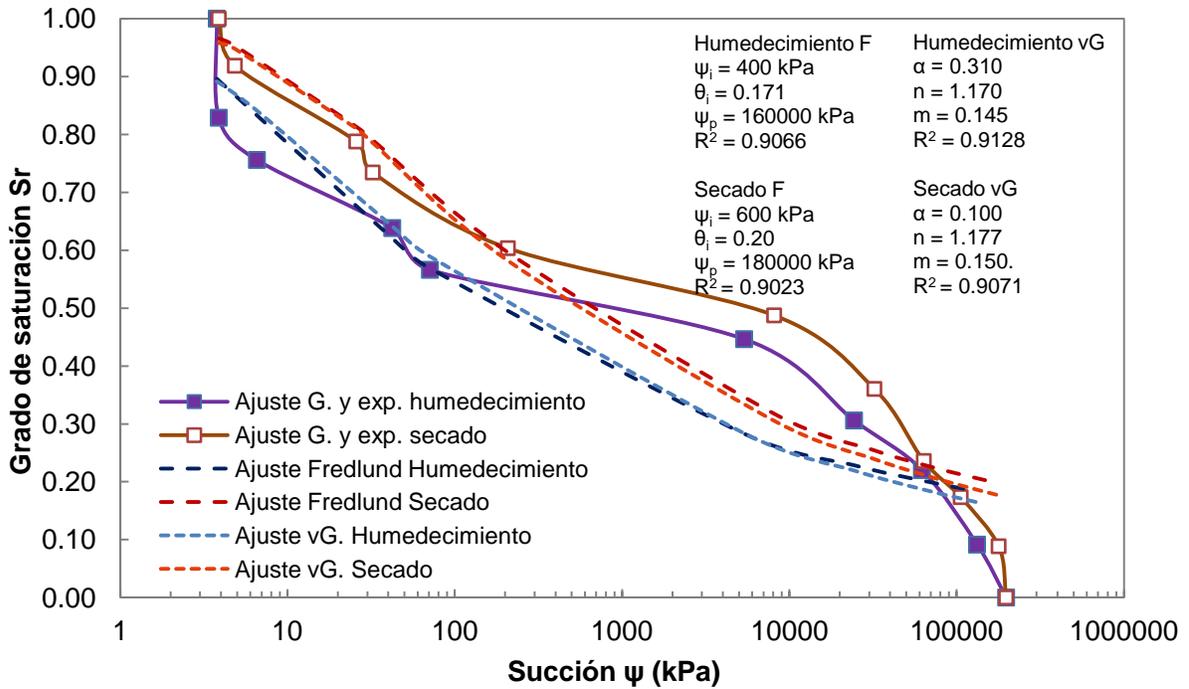


Figura 4-31. Ajuste de la Curva Característica modificada no.1 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a).

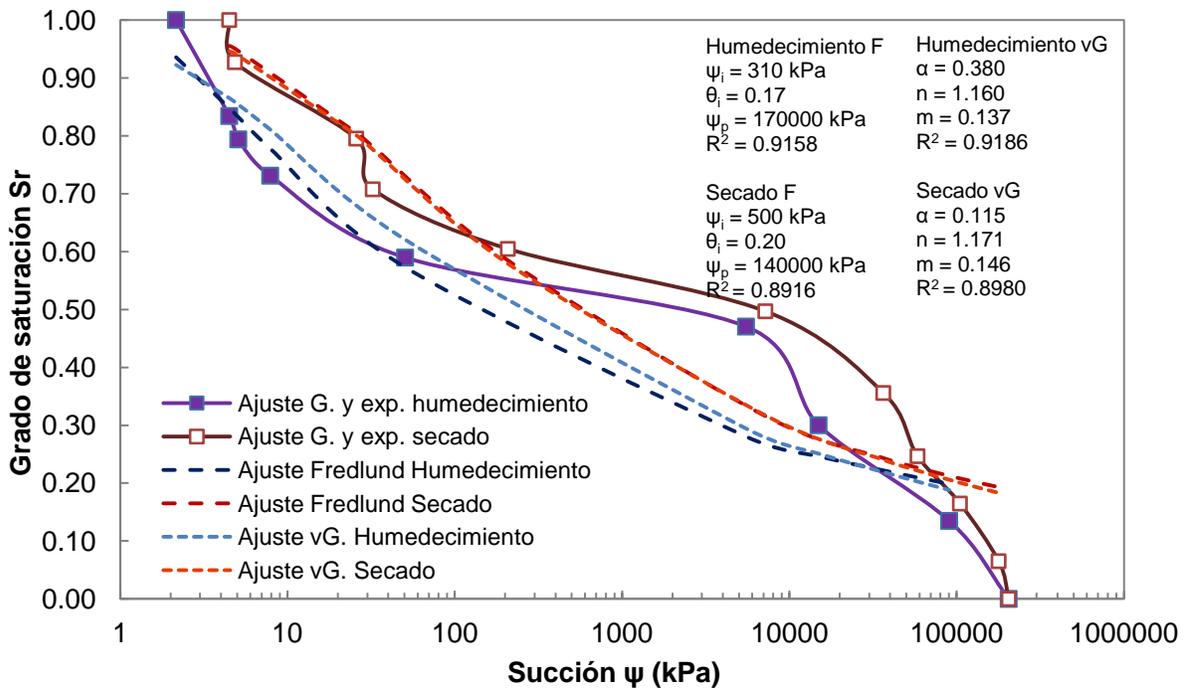


Figura 4-32. Ajuste de la Curva Característica modificada no.2 por los métodos de van Genuchten (1980), Fredlund y Rahardjo (1993) y Galaviz-González (2014a).

La Figura 4-33 y Figura 4-34 proporcionan una visión general de la Función de Conductividad Hidráulica (FCH) del suelo expansivo de Jurica en estado natural y en estado modificado con cal al 7%, en la que se evidencia un fuerte descenso del coeficiente de conductividad hidráulica, cercano a los dos órdenes de magnitud con respecto al estado natural. En ambas figuras se muestra que el primer valor de  $k$  inicia en el valor de  $k_{sat}$ , siendo el método de van Genuchten el que proporciona valores menores no solo en ambas trayectorias, sino en ambas condiciones. De la misma el método de Galaviz-González *et al.* (2014a) proporciona valores similares al método de Fredlund y Rahardjo (1993) puesto que utiliza su procedimiento para calcular esta función, sin embargo utiliza su propio ajuste en la curva de retención agua-suelo.

Estos resultados concuerdan con las observaciones realizadas por Cuisinier *et al.* (2011) quienes mostraron que la adición de cal cambia la distribución de tamaño de poro, induciendo la formación de partículas grandes, además de que la conductividad hidráulica es controlada por el volumen de poros grandes, como puede observarse en el análisis de porosimetría con nitrógeno (N<sub>2</sub>) y la comparación de las curvas de retención realizadas en esta investigación. A su vez Al-Mukhtar *et al.* (2012) demostraron que a medida que se incrementa el contenido de cal existe una reducción de la permeabilidad, lo anterior es producto del aumento en la tortuosidad. Dicho comportamiento es observado en el análisis de la Función de Conductividad Hidráulica (FCH). Además de inducir la formación de partículas de mayor tamaño, el contenido de cal usado en este trabajo, produce una reducción de la interconectividad de los poros, tal y como lo especifican Atienza (2008) y Al-Mukhtar *et al.* (2012). Debido a lo anterior, las inyecciones de lechada de cal no pueden ser adecuadas como soluciones a problemas en cimentaciones ya que la penetración de la lechada en los poros podría no ocurrir ya que la conductividad hidráulica del suelo disminuye considerablemente.

Es necesario considerar que a pesar de que este estudio utilizó la cal hidráulica obtenida comercialmente en la zona centro del país, los resultados podrán ser aplicables con otros tipos de cal como ha sido reportado por Atienza

(2008). En cambio el grado de compactación usado, correspondiente al 90% del peso volumétrico seco de la prueba Proctor estándar, depende del proyecto, reglamentos de construcción municipales o los reglamentos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes., por lo que hay que ser cautos al reproducir en campo las condiciones consideradas en esta investigación.

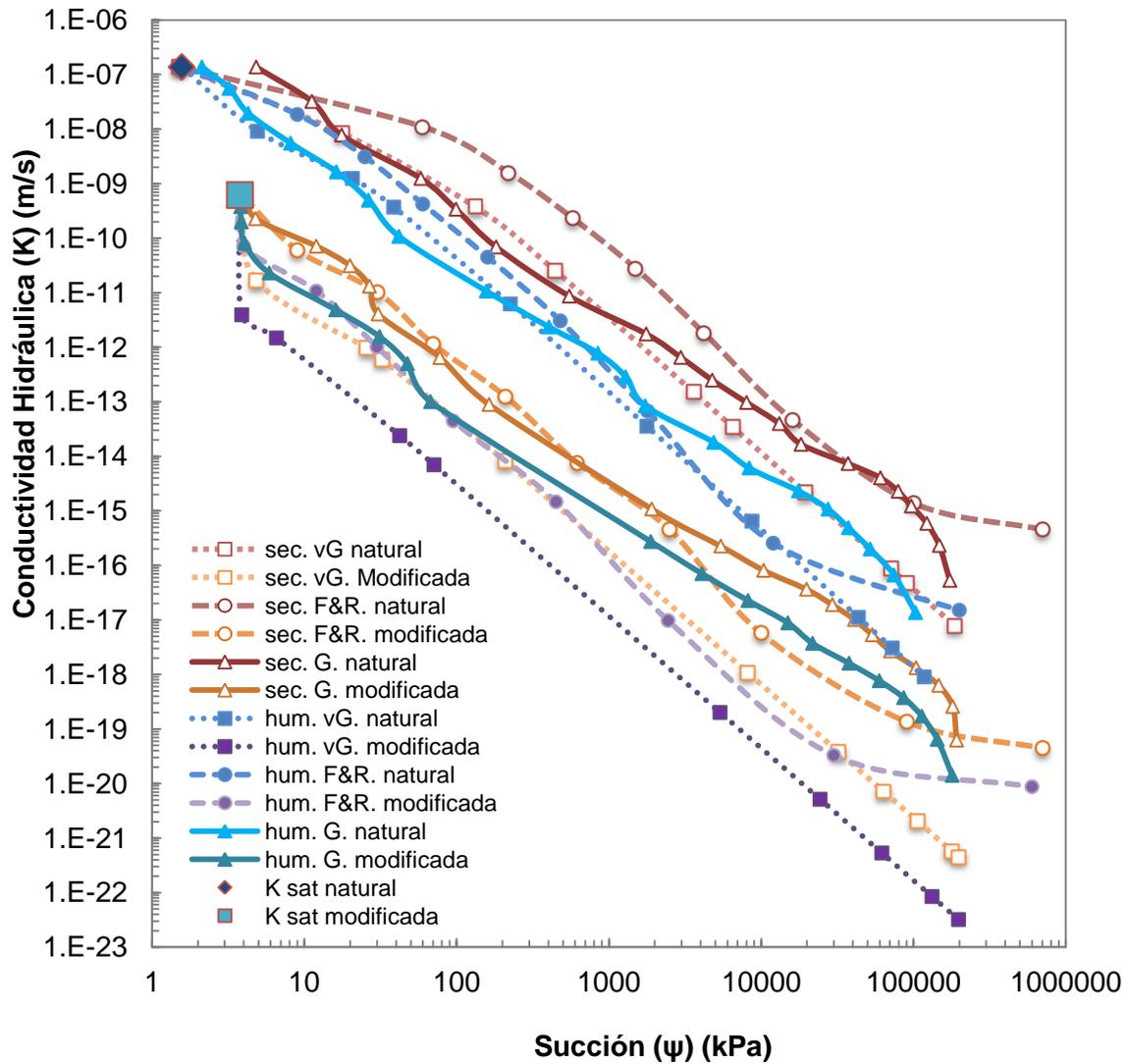


Figura 4-33. Función de Conductividad Hidráulica del Suelo Expansivo de Jurica no.1. Succión (kPa) vs Conductividad Hidráulica (m/s).

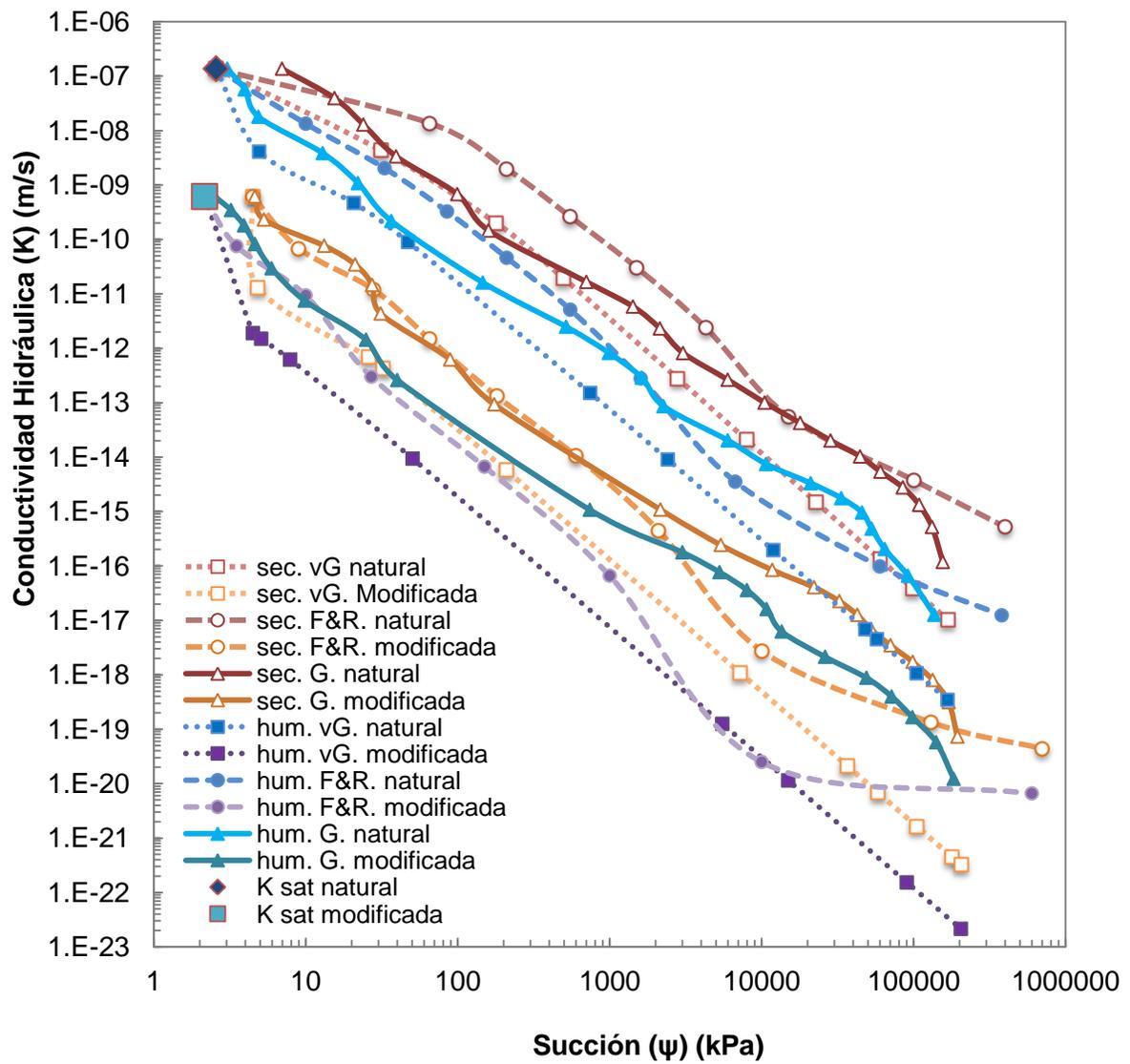


Figura 4-34. Función de Conductividad Hidráulica del Suelo Expansivo de Jurica no.2. Succión (kPa) vs Conductividad Hidráulica (m/s).

# Capítulo 5. CONCLUSIONES

---

Esta tesis ha investigado el impacto en la conductividad hidráulica analizando el papel de la cal como agente estabilizador en el comportamiento hidromecánico de un suelo expansivo.

Una serie de conclusiones han sido extraídas a partir de los resultados de este estudio:

La caracterización geotécnica del suelo de Jurica fue fundamental para el análisis del impacto en la conductividad hidráulica, debido a la presencia de suelos con minerales de montmorillonita reconocidos como problemáticos por ingenieros y constructores. Estos resultados proporcionan una visión general del cambio en las propiedades hidráulicas de un suelo modificado con cal, particularmente notable en el valor del coeficiente de permeabilidad saturado, ya que mostró una fuerte disminución en su magnitud entre la condición del suelo natural compactado al 90% y la condición del suelo modificado con un 7% de cal con un grado de compactación del 90%.

De acuerdo al primer objetivo particular se concluye que el comportamiento de la Función de Conductividad Hidráulica (FCH) está influenciado por el ajuste requerido por cada uno de los modelos matemáticos que describen el comportamiento hidromecánico del suelo. A pesar de mostrar un coeficiente de correlación  $R^2$  similar entre los modelos de van Genuchten y Fredlund y Rahardjo, se muestran diferencias apreciables en los valores de conductividad hidráulica con respecto al modelo de Galaviz-González et al., el cual presenta el mejor ajuste de las SWRCs ya que proporciona un 100% de correlación entre las SWRCs experimentales y numéricas, por ende, el resultado de la FCH se ve mejorado.

El segundo objetivo particular permite concluir que el análisis de la FCH demuestra un impacto hidromecánico negativo en muestras de suelos expansivos estabilizados. Los aspectos involucrados en estas variaciones son la Distribución de Tamaño de Poro (DTP) obtenida mediante el análisis de porosimetría, la cual evidencia la formación de partículas de mayor tamaño. Esto se aprecia tanto en

las isothermas como en los resultados del BET, que muestran una disminución del área superficial, como en la distribución de tamaño de poro, que confirma el aumento de agregados de mayor tamaño y la tortuosidad. Además, el porcentaje de cal requerido para la estabilización del suelo expansivo, evidenció un efecto negativo al reducir la interconectividad de los poros contenida en la estructura sólida del suelo. Esta situación se muestra directamente en la disminución del valor del coeficiente de permeabilidad saturado obtenido mediante la prueba de permeabilidad con el permeámetro de carga variable, por lo que diámetros mayores no suponen una mejora de la FCH. Lo anterior condujo a la conclusión de que las inyecciones de lechada de cal no deben ser consideradas para mejorar la resistencia de los suelos expansivos que contengan minerales como la montmorillonita. Por otro lado, sí pueden ser recomendables solo con suelos que requieran un porcentaje bajo de cal para su estabilización.

Para finalizar, el tercer objetivo particular permite concluir que las Curvas de Retención Agua-Suelo de un suelo modificado (SWLRC) con cal han demostrado un cambio en su forma, con respecto a las Curvas de Retención Agua-Suelo de un suelo natural (SWRC) debido al cambio de la distribución del tamaño de poro, este cambio se evidencia particularmente en el rango de 1 a 5760 kPa (valores asociados a macro y mesoporos, respectivamente), donde la formación de las partículas de mayor tamaño induce a un redimensionamiento de los meso y macroporos controlan los valores de succión bajos (zonas saturadas). A pesar de la formación de partículas de mayor tamaño, los valores de succión altos (zonas no saturadas) no se ve afectada significativamente la distribución de tamaño de microporos. Ambos procesos pueden ser explicados por medio de la ecuación de Laplace.

En este documento se ha explicado la importancia de la cal como un agente estabilizador de un suelo expansivo en el contexto de la modificación de las curvas de retención agua-suelo, lo de acuerdo a lo establecido en el objetivo general y los objetivos particulares, el trabajo final satisface cada uno de dichos objetivos.

# Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

---

- Al-Mukhtar, M., A. Lasledj, and J. Alcover. 2010. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. *Applied Clay Science* 50:191-198.
- Al-Mukhtar, M., A. Lasledj, and J. Alcover. 2014. Lime consumption of different clayey soils. *Applied Clay Science* 95:133-145.
- Al-Mukhtar, M., S. Khattab, and J. Alcover. 2012. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology* 139-140:17-27.
- Arroyo, H., E. Rojas, M. de la Luz Pérez-Rea, J. Horta, and J. Arroyo. 2015. A porous model to simulate the evolution of the soil–water characteristic curve with volumetric strains. *Comptes Rendus Mécanique* 343:264-274.
- Atienza, M. 2008. *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Madrid.
- Bayat, H., A. Sedaghat, A. Safari Sinigani, and A. Gregory. 2015. Investigating the relationship between unsaturated hydraulic conductivity curve and confined compression curve. *Journal of Hydrology* 522:353-368.
- Bell, F. 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42:223-237.
- Chakraborty, S. 2016. Numerical modeling for long term performance of soil-bentonite cut-off walls in unsaturated soil zone [Doctorado]. Jadavpur University.
- Ciancio, D., C. Beckett, and J. Carraro. 2014. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials* 53:59-65.

- Cohan, L. 1938. Sorption Hysteresis and the Vapor Pressure of Concave Surfaces. *J. Am. Chem. Soc.* 60:433-435.
- Consoli, N., P. Prietto, L. da Silva Lopes, and D. Winter. 2014. Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. *Transportation Geotechnics* 1:129-136.
- Cuisinier, O., J. Auriol, T. Le Borgne, and D. Deneele. 2011. Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology* 123:187-193.
- Dao, V., P. Morris, and P. Dux. 2008. On equations for the total suction and its matric and osmotic components. *Cement and Concrete Research* 38:1302-1305.
- Di Sante, M., E. Fratolocchi, F. Mazzieri, and E. Pasqualini. 2014. Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour. *Applied Clay Science* 99:100-109.
- Di Sante, M., E. Fratolocchi, F. Mazzieri, and V. Brianzoni. 2015. Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil–lime mixtures. *Engineering Geology* 185:131-138.
- Esparza, J. 2008. Estudio experimental y numérico de procesos de sorción de N<sub>2</sub> en sólidos porosos modelo [Doctorado]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Fredlund, D., A. Xing, and S. Huang. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31:533-546.
- Fredlund, D., and A. Xing. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31:521-532.
- Fredlund, D., and H. Rahardjo. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. Wiley, New York.

- Galaviz-González, R., J. Horta-Rangel, E. Rojas-González, and L. Pérez-Rea. 2014. Computational Model to Estimate Hydraulic Conductivity Function. In: X Congreso internacional de Ingeniería. Santiago de Querétaro.
- García Martínez, J., and J. Pérez-Pariente. 2003. Materiales zeolíticos. Universidad de Alicante, Alicante.
- Hamdi, N., and E. Srasra. 2013. Hydraulic conductivity study of compacted clay soils used as landfill liners for an acidic waste. *Waste Management* 33:60-66.
- Horta, J., E. Rojas, M. Pérez-Rea, T. López, and J. Zaragoza. 2012. A random solid-porous model to simulate the retention curves of soils. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 37:932-944.
- Hoyos, F. 2003. Implementación de la Mecánica del Suelo Parcialmente Saturado en la práctica de la Ingeniería Geotécnica. 1st ed. D. Fredlund, Saskatchewan.
- ISASA Instrumentación-Entrenamiento AUTOSORB IQ. 2012.
- Karim, M., and S. Lo. 2015. Estimation of the hydraulic conductivity of soils improved with vertical drains. *Computers and Geotechnics* 63:299-305.
- Le Runigo, B., V. Ferber, Y. Cui, O. Cuisinier, and D. Deneele. 2011. Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions. *Engineering Geology* 118:20-28.
- Leofanti, G., M. Padovan, G. Tozzola, and B. Venturelli. 1998. Surface area and pore texture of catalysts. *Catalysis Today* 41:207-219.
- López, R. 2004. Caracterización de Medios Porosos y Procesos Precolativos y de Transporte [Doctorado]. Universidad Nacional de San Luis.
- López-Lara, T. 2002. Estudio fisicoquímico de la modificación de suelos arcillosos [Doctorado]. Universidad Autónoma de Querétaro.

- Lu, N., and W. Likos. 2004. *Unsaturated soil mechanics*. J. Wiley, Hoboken, N.J.
- Magnusson, S., K. Lundberg, B. Svedberg, and S. Knutsson. 2015. Sustainable management of excavated soil and rock in urban areas – A literature review. *Journal of Cleaner Production* 93:18-25.
- Maqsoud, A., B. Bussi re, M. Aubertin, and M. Mbonimpa. 2012. Predicting Hysteresis of the Water Retention Curve from Basic Properties of Granular Soils. *Geotechnical and Geological Engineering* 30:1147-1159.
- Martín Martínez, J. 1990. *Adsorción f sica de gases y vapores por carbonos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad, Alicante.
- Meza, V. 2012. Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la c tedra universitaria. *Bolet n Ciencias de la Tierra*:23-38. Available from: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>
- Nasta, P., S. Assouline, J. Gates, J. Hopmans, and N. Romano. 2013. Prediction of Unsaturated Relative Hydraulic Conductivity from Kosugi's Water Retention Function. *Procedia Environmental Sciences* 19:609-617.
- Niu, Q., D. Fratta, and Y. Wang. 2015. The use of electrical conductivity measurements in the prediction of hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Journal of Hydrology* 522:475-487.
- Nowamooz, H., and F. Masrouri. 2010. Relationships between soil fabric and suction cycles in compacted swelling soils. *Engineering Geology* 114:444-455.
- Pérez-Rea, L., T. Ayala, R. Galaviz-González, and E. Rojas. 2012. In: XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Pliego-Díaz, M. 2016. *Dinámica de la penetración capilar en estructuras complejas [Doctorado]*. Universidad Autónoma de Querétaro.

- Puppala, A., T. Manosuthikij, and B. Chittoori. 2013. Swell and shrinkage characterizations of unsaturated expansive clays from Texas. *Engineering Geology* 164:187-194.
- Reglamento de construcción para el municipio de Querétaro. 2008. 1st ed. H. Ayuntamiento de Querétaro, Santiago de Querétaro. Available from: [http://www.smie.org.mx/paginas/reglamentos/qto/mu\\_01.pdf](http://www.smie.org.mx/paginas/reglamentos/qto/mu_01.pdf)
- Rojas, E. 2008. Equivalent Stress Equation for Unsaturated Soils. II: Solid-Porous Model. *Int. J. Geomech.* 8:291-299.
- Sangwichien, C., G. Aranovich, and M. Donohue. 2002. Density functional theory predictions of adsorption isotherms with hysteresis loops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 206:313-320.
- Seco, A., F. Ramírez, L. Miqueleiz, and B. García. 2011. Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science* 51:348-352.
- Serge-Étienne Parent, Alexandre R. Cabral, Amir M. Abdolazadeh, and Mathieu Nuth. 2011. Hydraulic Conductivity and Water Retention Curve of Highly Compressible Materials- From a Mechanistic Approach through Phenomenological Models. INTECH Open Access Publisher.
- Serra, E., Blanco, R, and Díaz, I, 2008. Síntesis y caracterización de materiales mesoporosos ordenados y su aplicación como soportes en la inmovilización de lipasa. *Real Sociedad Española de Química* 2:97-103.
- Tran, T., Y. Cui, A. Tang, M. Audiguier, and R. Cojean. 2014. Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6:399-404.
- van Erp, T., and J. Martens. 2011. A standardization for BET fitting of adsorption isotherms. *Microporous and Mesoporous Materials* 145:188-193.

- van Genuchten, M. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils<sup>1</sup>. Soil Science Society of America Journal 44:892.
- Yi, Y., L. Gu, and S. Liu. 2015. Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag. Applied Clay Science 103:71-76.
- Zhou, A., D. Sheng, and J. Li. 2014. Modelling water retention and volume change behaviours of unsaturated soils in non-isothermal conditions. Computers and Geotechnics 55:1-13.

# Capítulo 7. ANEXOS

---

# ANEXO 7-1. Isotherma natural 1

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
 Acquisition and Reduction  
 © 1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/28	Operator: uaq
Sample ID:	JURICanatural1	Filename:	juricanatural1.qps
Sample Desc:	MUESTRAS ROBERO	Comment:	Celda de 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0498 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 1
Approx. Outgas Time:	12.0 hrs	Final Outgas Temp.:	90 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	2:00 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.56021 cc
		Warm Zone V:	7.24701 cc
		Data Reduction Parameters	
		Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 Å	
		Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm	

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>
		Liquid Density:	0.808 g/cc

Relative Pressure	Volume @ STP cc/g
4.97875e-02	18.0545
1.01360e-01	20.0023
1.49254e-01	21.2850
2.00269e-01	22.4517
2.50126e-01	23.4481
2.99974e-01	24.3957
3.50670e-01	25.2668
3.99870e-01	26.1178
4.50597e-01	26.9440
5.00142e-01	27.7113
5.50814e-01	28.4842
5.99525e-01	29.2886
6.50063e-01	30.2838
7.00668e-01	31.2751
7.48028e-01	32.3193
8.00822e-01	33.4960
8.50133e-01	35.2401
9.01823e-01	37.1519
9.50463e-01	40.8870
9.94501e-01	49.8412
9.91524e-01	50.4201
9.48254e-01	46.7350
8.98818e-01	44.1253
8.51585e-01	42.6775
8.01800e-01	41.5680
7.50703e-01	40.5912
6.99803e-01	39.6986
6.49083e-01	38.9630
5.99606e-01	38.1597
5.50173e-01	37.2937
5.00411e-01	36.3994
4.49172e-01	32.7128
4.00053e-01	27.3499
3.50546e-01	26.0901
3.00133e-01	25.1158
2.49936e-01	24.1404
1.99572e-01	23.1039
1.50754e-01	21.9468
1.01028e-01	20.5494
4.87478e-02	18.5188

## ANEXO 7-2. Distribución de Tamaño de Poro natural 1 en rama de adsorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis Report  
Operator: uaq Date:2015/07/28 Operator: uaq Date:2015/08/03  
Sample ID: JURICanatural1 Filename: juricanatural1.qps  
Sample Desc: MUESTRAS ROBERO Comment: Celda de 9mm con rodillo  
Sample Weight: 0.0498 g Instrument: Autosorb iQ Station 1  
Approx. Outgas Time:12.0 hrs Final Outgas Temp.:90 °C Extended info: Available  
Analysis gas: Nitrogen Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr CellType: 9mm  
Analysis Time: 2:00 hr:min Bath temp.: 77.35 K  
Analysis Mode: Standard VoidVol Remeasure:off  
VoidVol. Mode: He Measure Cold Zone V: 1.56021 cc Warm Zone V: 7.24701 cc  
Data Reduction Parameters  
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm

t-Method Calc. method: de Boer  
BJH/DH method Moving pt. avg.: off Ignoring P-tags below 0.35 P/Po  
Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4136	1.9743e-03	2.3134e+00	5.1006e-03	5.9769e+00	4.0048e-02	4.6928e+01
3.8270	3.7286e-03	4.1471e+00	3.9881e-03	4.1684e+00	3.5105e-02	3.6692e+01
4.3145	5.4323e-03	5.7266e+00	3.1840e-03	2.9519e+00	3.1591e-02	2.9288e+01
4.8950	7.2042e-03	7.1745e+00	2.8306e-03	2.3131e+00	3.1861e-02	2.6036e+01
5.6151	9.4499e-03	8.7742e+00	2.7585e-03	1.9651e+00	3.5602e-02	2.5362e+01
6.5550	1.1594e-02	1.0083e+01	2.0121e-03	1.2278e+00	3.0303e-02	1.8491e+01
7.7655	1.3818e-02	1.1228e+01	1.6409e-03	8.4523e-01	2.9266e-02	1.5075e+01
9.5531	1.6192e-02	1.2222e+01	1.0693e-03	4.4772e-01	2.3414e-02	9.8039e+00
12.3654	1.9762e-02	1.3377e+01	1.0485e-03	3.3917e-01	2.9664e-02	9.5957e+00
17.5995	2.3427e-02	1.4210e+01	5.1890e-04	1.1793e-01	2.0743e-02	4.7144e+00
30.9261	3.0259e-02	1.5094e+01	3.4875e-04	4.5108e-02	2.3981e-02	3.1017e+00
195.3693	4.4568e-02	1.5387e+01	4.6265e-05	9.4722e-04	1.5316e-02	3.1359e-01

### BJH adsorption summary

Surface Area = 15.387 m<sup>2</sup>/g  
Pore Volume = 0.045 cc/g  
Pore Diameter Dv(d) = 3.414 nm

## ANEXO 7-3. Distribución de Tamaño de Poro natural 1 en rama de desorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/28	Operator: uaq
Sample ID:	JURICanatural11	Filename:	juricanatural11.qps
Sample Desc:	MUESTRAS ROBERO	Comment:	Celda de 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0498 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 1
Approx. Outgas Time:	12.0 hrs	Final Outgas Temp.:	90 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	2:00 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard	VoidVol Remeasure:	off
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.56021 cc
		Warm Zone V:	7.24701 cc

Data Reduction Parameters  
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm

t-Method	Calc. method: de Boer
BJH/DH method	Moving pt. avg.: off
Adsorbate	Nitrogen
	Molec. Wt.: 28.013
	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po
	Temperature 77.350K
	Cross Section: 16.200 Å <sup>2</sup>
	Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4084	1.7338e-02	2.0348e+01	4.6346e-02	5.4391e+01	3.6336e-01	4.2644e+02
3.8225	2.8837e-02	3.2381e+01	2.5320e-02	2.6496e+01	2.2260e-01	2.3294e+02
4.3121	3.1068e-02	3.4450e+01	4.2481e-03	3.9406e+00	4.2127e-02	3.9078e+01
4.8919	3.3168e-02	3.6167e+01	3.3102e-03	2.7067e+00	3.7234e-02	3.0445e+01
5.6068	3.5025e-02	3.7492e+01	2.3356e-03	1.6662e+00	3.0101e-02	2.1475e+01
6.5356	3.6612e-02	3.8463e+01	1.4928e-03	9.1362e-01	2.2415e-02	1.3719e+01
7.8005	3.8537e-02	3.9450e+01	1.3123e-03	6.7291e-01	2.3500e-02	1.2051e+01
9.6243	4.0573e-02	4.0297e+01	9.3371e-04	3.8806e-01	2.0603e-02	8.5629e+00
12.4577	4.2805e-02	4.1013e+01	6.4030e-04	2.0559e-01	1.8247e-02	5.8587e+00
17.3650	4.5627e-02	4.1663e+01	4.4593e-04	1.0272e-01	1.7631e-02	4.0613e+00
29.7889	5.0435e-02	4.2309e+01	2.5961e-04	3.4860e-02	1.7218e-02	2.3120e+00
133.5506	5.6412e-02	4.2488e+01	3.1625e-05	9.4721e-04	7.7989e-03	2.3359e-01
289.0350	5.6412e-02	4.2488e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

### BJH desorption summary

Surface Area = 42.488 m<sup>2</sup>/g  
Pore Volume = 0.056 cc/g  
Pore Diameter Dv(d) = 3.408 nm

## ANEXO 7-4. Isoterma natural 2

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
 Acquisition and Reduction  
 © 1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/29	Operator: uaq
Sample ID:	juricanatural2	Filename:	Juricanatural2.qps
Sample Desc:	Muestra Roberto	Comment:	Celda 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0713 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 2
Approx. Outgas Time:	12.2 hrs	Final Outgas Temp.:	200 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	2:38 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard	VoidVol Remeasure:	off
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.47103 cc
		Warm Zone V:	8.60379 cc
		Data Reduction Parameters	
		Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 Å	
		Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm	

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>	Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure	Volume @ STP cc/g
5.18220e-02	18.3955
9.94118e-02	20.2420
1.51157e-01	21.8393
2.02496e-01	23.4648
2.49943e-01	24.5119
2.99182e-01	25.5797
3.48965e-01	26.6578
3.99188e-01	27.6744
4.49847e-01	28.6268
4.99860e-01	29.5401
5.50606e-01	30.2076
5.98289e-01	31.1965
6.52217e-01	32.3187
6.99917e-01	33.1811
7.48422e-01	34.4461
7.99927e-01	36.3207
8.51431e-01	38.0192
8.99540e-01	40.0929
9.51180e-01	43.8432
9.97639e-01	52.6299
9.91778e-01	52.9845
9.49865e-01	49.8677
8.98151e-01	46.4447
8.48670e-01	44.9905
8.01414e-01	43.9407
7.50614e-01	42.6204
6.99129e-01	41.8227
6.49505e-01	40.7341
6.00214e-01	39.8674
5.51082e-01	38.8480
5.01224e-01	37.7988
4.51105e-01	34.6544
4.00533e-01	28.3379
3.50161e-01	26.7403
2.98893e-01	25.5315
2.50695e-01	24.4968
2.01060e-01	23.2623
1.51578e-01	21.9370
9.90166e-02	20.2920
5.02358e-02	18.2881

## ANEXO 7-5. Distribución de Tamaño de Poro natural 2 en rama de adsorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis Report  
Operator: uaq Date:2015/07/29 Operator: uaq Date:2015/08/03  
Sample ID: juricanatural2 Filename: Juricanatural2.qps  
Sample Desc: Muestra Roberto Comment: Celda 9mm con rodillo  
Sample Weight: 0.0713 g Instrument: Autosorb iQ Station 2  
Approx. Outgas Time:12.2 hrs Final Outgas Temp.:200 °C Extended info: Available  
Analysis gas: Nitrogen Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr CellType: 9mm  
Analysis Time: 2:38 hr:min Bath temp.: 77.35 K  
Analysis Mode: Standard VoidVol Remeasure:off  
VoidVol. Mode: He Measure Cold Zone V: 1.47103 cc Warm Zone V: 8.60379 cc  
Data Reduction Parameters  
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm

t-Method Calc. method: de Boer  
BJH/DH method Moving pt. avg.: off Ignoring P-tags below 0.35 P/Po  
Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4081	2.3305e-03	2.7353e+00	6.0413e-03	7.0906e+00	4.7357e-02	5.5583e+01
3.8226	4.5013e-03	5.0068e+00	4.8965e-03	5.1237e+00	4.3050e-02	4.5048e+01
4.3120	5.7827e-03	6.1955e+00	2.3935e-03	2.2203e+00	2.3734e-02	2.2017e+01
4.8851	8.0661e-03	8.0652e+00	3.7382e-03	3.0610e+00	4.1994e-02	3.4386e+01
5.6261	1.0569e-02	9.8447e+00	2.8730e-03	2.0427e+00	3.7144e-02	2.6409e+01
6.5656	1.2322e-02	1.0912e+01	1.7388e-03	1.0593e+00	2.6235e-02	1.5983e+01
7.7631	1.5038e-02	1.2312e+01	1.9587e-03	1.0093e+00	3.4919e-02	1.7993e+01
9.5362	1.9112e-02	1.4021e+01	1.8864e-03	7.9126e-01	4.1244e-02	1.7300e+01
12.4014	2.2571e-02	1.5137e+01	9.6884e-04	3.1249e-01	2.7473e-02	8.8614e+00
17.4286	2.6636e-02	1.6070e+01	6.2693e-04	1.4388e-01	2.4866e-02	5.7070e+00
30.9835	3.3530e-02	1.6960e+01	3.3426e-04	4.3153e-02	2.2938e-02	2.9613e+00
426.3454	4.7326e-02	1.7089e+01	1.7914e-05	1.6807e-04	1.0667e-02	1.0008e-01

### BJH adsorption summary

Surface Area = 17.089 m<sup>2</sup>/g  
Pore Volume = 0.047 cc/g  
Pore Diameter Dv(d) = 3.408 nm

## ANEXO 7-6. Distribución de Tamaño de Poro natural 2 en rama de desorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis Report  
Operator: uaq Date:2015/07/29 Operator: uaq Date:2015/08/03  
Sample ID: juricanatural2 Filename: Juricanatural2.qps  
Sample Desc: Muestra Roberto Comment: Celda 9mm con rodillo  
Sample Weight: 0.0713 g Instrument: Autosorb iQ Station 2  
Approx. Outgas Time:12.2 hrs Final Outgas Temp.:200 °C Extended info: Available  
Analysis gas: Nitrogen Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr CellType: 9mm  
Analysis Time: 2:38 hr:min Bath temp.: 77.35 K  
Analysis Mode: Standard VoidVol Remeasure:off  
VoidVol. Mode: He Measure Cold Zone V: 1.47103 cc Warm Zone V: 8.60379 cc  
Data Reduction Parameters  
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm

t-Method Calc. method: de Boer  
BJH/DH method Moving pt. avg.: off Ignoring P-tags below 0.35 P/Po  
Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4180	2.0582e-02	2.4087e+01	5.3250e-02	6.2317e+01	4.1864e-01	4.8992e+02
3.8343	3.0181e-02	3.4100e+01	2.1515e-02	2.2445e+01	1.8974e-01	1.9794e+02
4.3213	3.2804e-02	3.6529e+01	4.9703e-03	4.6007e+00	4.9394e-02	4.5721e+01
4.9015	3.5293e-02	3.8559e+01	3.9330e-03	3.2096e+00	4.4327e-02	3.6174e+01
5.6149	3.7258e-02	3.9959e+01	2.4749e-03	1.7631e+00	3.1945e-02	2.2757e+01
6.5313	3.9777e-02	4.1502e+01	2.4256e-03	1.4856e+00	3.6402e-02	2.2294e+01
7.7908	4.1407e-02	4.2339e+01	1.1006e-03	5.6507e-01	1.9684e-02	1.0106e+01
9.6126	4.4249e-02	4.3522e+01	1.3141e-03	5.4682e-01	2.8963e-02	1.2052e+01
12.3151	4.6348e-02	4.4203e+01	6.4732e-04	2.1025e-01	1.8249e-02	5.9274e+00
17.1682	4.9150e-02	4.4856e+01	4.3355e-04	1.0101e-01	1.6934e-02	3.9455e+00
30.3272	5.5456e-02	4.5688e+01	3.1759e-04	4.1889e-02	2.1362e-02	2.8175e+00
137.6337	6.0505e-02	4.5835e+01	2.5928e-05	7.5353e-04	6.5899e-03	1.9152e-01
523.2038	6.0505e-02	4.5835e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

### BJH desorption summary

Surface Area = 45.835 m<sup>2</sup>/g  
Pore Volume = 0.061 cc/g  
Pore Diameter Dv(d) = 3.418 nm

## ANEXO 7-7. Isoterma modificada 1

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/23	Operator: uaq
Sample ID:	arcilla1Ro	Filename:	Juricamodificada1.qps
Sample Desc:	muestras Roberto	Comment:	Celda de 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0471 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 1
Approx. Outgas Time:	12.0 hrs	Final Outgas Temp.:	90 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	1:37 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.39645 cc
		Warm Zone V:	7.20762 cc
		Data Reduction Parameters	
		Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 Å	
		Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm	

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>
		Liquid Density:	0.808 g/cc

Relative Pressure	Volume @ STP cc/g
5.49696e-02	-1.4992
1.01509e-01	-1.0329
1.51661e-01	-0.5935
2.01341e-01	-0.1705
2.51569e-01	0.2861
3.00802e-01	0.7348
3.51065e-01	1.1530
4.00777e-01	1.5315
4.52285e-01	2.1290
4.99492e-01	2.5502
5.52631e-01	3.5944
6.04416e-01	4.6756
6.53651e-01	6.0494
7.00718e-01	7.0636
7.50517e-01	7.9111
7.99700e-01	9.0172
8.49565e-01	10.4613
9.01132e-01	12.5201
9.51384e-01	16.2604
9.98717e-01	27.8053
9.96153e-01	26.4485
9.49496e-01	22.0468
8.99255e-01	18.4864
8.51365e-01	17.0981
8.02588e-01	16.3545
7.52680e-01	16.2679
7.00617e-01	15.5603
6.51169e-01	14.5939
6.00105e-01	13.6727
5.50042e-01	12.7724
5.00033e-01	11.9133
4.48966e-01	7.8462
3.98859e-01	4.0925
3.49801e-01	3.3438
2.99183e-01	2.6971
2.49491e-01	2.0736
1.99094e-01	1.4903
1.48566e-01	0.8823
9.92371e-02	0.2417
4.94321e-02	-0.4837

## ANEXO 7-8. Distribución de Tamaño de Poro modificada 1 en rama de adsorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis Report  
Operator: uaq Date:2015/07/23 Operator: uaq Date:2015/07/27  
Sample ID: arcilla1Ro Filename: Juricamodificada1.qps  
Sample Desc: muestras Roberto Comment: Celda de 9mm con rodillo  
Sample Weight: 0.0471 g Instrument: Autosorb iQ Station 1  
Approx. Outgas Time:12.0 hrs Final Outgas Temp.:90 °C Extended info: Available  
Analysis gas: Nitrogen Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr CellType: 9mm  
Analysis Time: 1:37 hr:min Bath temp.: 77.35 K  
Analysis Mode: Standard VoidVol Remeasure:off  
VoidVol. Mode: He Measure Cold Zone V: 1.39645 cc Warm Zone V: 7.20762 cc  
Data Reduction Parameters  
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm

t-Method Calc. method: de Boer  
BJH/DH method Moving pt. avg.: off Ignoring P-tags below 0.35 P/Po  
Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4237	1.1401e-03	1.3320e+00	2.8900e-03	3.3765e+00	2.2758e-02	2.6589e+01
3.8309	1.6973e-03	1.9138e+00	1.3274e-03	1.3861e+00	1.1697e-02	1.2214e+01
4.3220	4.1608e-03	4.1938e+00	4.3796e-03	4.0533e+00	4.3523e-02	4.0281e+01
4.9409	6.6942e-03	6.2447e+00	3.7515e-03	3.0371e+00	4.2614e-02	3.4499e+01
5.6833	1.0064e-02	8.6163e+00	4.1617e-03	2.9291e+00	5.4370e-02	3.8266e+01
6.5886	1.2362e-02	1.0012e+01	2.2964e-03	1.3942e+00	3.4772e-02	2.1110e+01
7.8084	1.4095e-02	1.0900e+01	1.2047e-03	6.1715e-01	2.1599e-02	1.1065e+01
9.5660	1.6376e-02	1.1853e+01	1.0982e-03	4.5921e-01	2.4094e-02	1.0075e+01
12.3103	1.9298e-02	1.2803e+01	8.5646e-04	2.7829e-01	2.4121e-02	7.8375e+00
17.5030	2.3317e-02	1.3721e+01	5.7627e-04	1.3170e-01	2.2915e-02	5.2367e+00
31.2267	3.0200e-02	1.4603e+01	3.3620e-04	4.3066e-02	2.3281e-02	2.9822e+00
765.7365	4.8207e-02	1.4697e+01	1.2431e-05	6.4936e-05	1.1576e-02	6.0470e-02

### BJH adsorption summary

Surface Area = 14.697 m<sup>2</sup>/g  
Pore Volume = 0.048 cc/g  
Pore Diameter Dv(d) = 4.322 nm

## ANEXO 7-9. Distribución de Tamaño de Poro modificada 1 en rama de desorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis		Report	
Operator: uaq	Date:2015/07/23	Operator: uaq	Date:2015/07/27
Sample ID: arcilla1Ro	Filename: Juricamodificada1.qps		
Sample Desc: muestras Roberto	Comment: Celda de 9mm con rodillo		
Sample Weight: 0.0471 g	Instrument: Autosorb iQ Station 1		
Approx. Outgas Time:12.0 hrs	Final Outgas Temp.:90 °C	Extended info: Available	
Analysis gas: Nitrogen	Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr	CellType: 9mm	
Analysis Time: 1:37 hr:min	Bath temp.: 77.35 K		
Analysis Mode: Standard		VoidVol Remeasure:off	
VoidVol. Mode: He Measure	Cold Zone V: 1.39645 cc	Warm Zone V: 7.20762 cc	
Data Reduction Parameters			
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm			
t-Method	Calc. method: de Boer		
BJH/DH method	Moving pt. avg.: off	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po	
Adsorbate	Nitrogen	Temperature 77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 Å <sup>2</sup>	Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4033	1.1657e-02	1.3700e+01	3.0602e-02	3.5968e+01	2.3956e-01	2.8156e+02
3.8198	2.4462e-02	2.7109e+01	2.8319e-02	2.9654e+01	2.4879e-01	2.6052e+02
4.3095	2.6612e-02	2.9105e+01	4.0793e-03	3.7863e+00	4.0429e-02	3.7525e+01
4.8947	2.8851e-02	3.0935e+01	3.4810e-03	2.8447e+00	3.9176e-02	3.2015e+01
5.6293	3.1092e-02	3.2528e+01	2.7129e-03	1.9277e+00	3.5102e-02	2.4942e+01
6.5645	3.3418e-02	3.3945e+01	2.2270e-03	1.3570e+00	3.3590e-02	2.0468e+01
7.8446	3.4966e-02	3.4734e+01	1.0215e-03	5.2088e-01	1.8394e-02	9.3793e+00
9.6796	3.4966e-02	3.4734e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
12.4686	3.6370e-02	3.5184e+01	4.0984e-04	1.3148e-01	1.1692e-02	3.7509e+00
17.3976	3.9034e-02	3.5797e+01	4.1418e-04	9.5226e-02	1.6401e-02	3.7708e+00
30.2930	4.5611e-02	3.6666e+01	3.3977e-04	4.4865e-02	2.2870e-02	3.0199e+00
269.5172	5.2578e-02	3.6769e+01	1.5176e-05	2.2523e-04	6.3544e-03	9.4308e-02
994.5361	5.4694e-02	3.6777e+01	2.1348e-06	8.5861e-06	4.4533e-03	1.7911e-02

### BJH desorption summary

Surface Area =	36.777 m <sup>2</sup> /g
Pore Volume =	0.055 cc/g
Pore Diameter Dv(d) =	3.403 nm

## ANEXO 7-10. Isotherma modificada 2

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
 Acquisition and Reduction  
 © 1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/23	Operator: uaq
Sample ID:	arcilla2Ro	Filename:	Juricamodificada2.qps
Sample Desc:	muestras Roberto	Comment:	Celda 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0457 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 2
Approx. Outgas Time:	12.0 hrs	Final Outgas Temp.:	90 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	1:30 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.40222 cc
			Warm Zone V: 8.83515 cc
		Data Reduction Parameters	
		Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 Å	
		Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm	

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>
		Liquid Density:	0.808 g/cc

Relative Pressure	Volume @ STP cc/g
5.27275e-02	-0.5163
1.01185e-01	0.0191
1.51644e-01	0.4909
2.01489e-01	0.9662
2.51075e-01	1.4246
3.00284e-01	1.8909
3.51388e-01	2.4594
4.00687e-01	2.8533
4.51910e-01	3.3783
5.00617e-01	3.9320
5.52001e-01	4.5666
6.00822e-01	5.4997
6.55026e-01	6.9435
7.01106e-01	8.4046
7.48598e-01	9.6662
8.01271e-01	10.8924
8.50102e-01	12.1563
9.02226e-01	14.5522
9.50502e-01	17.8576
9.96619e-01	26.0330
9.92862e-01	26.1623
9.49993e-01	23.1654
9.01320e-01	19.9135
8.48241e-01	18.1939
8.00790e-01	17.4344
7.49930e-01	16.5267
6.99784e-01	15.7036
6.51213e-01	15.2825
6.02846e-01	15.2109
5.50626e-01	14.3664
5.00167e-01	13.3927
4.49346e-01	9.0687
3.98412e-01	5.4434
3.49663e-01	4.6925
2.98971e-01	3.9857
2.49119e-01	3.2985
1.99142e-01	2.6673
1.48700e-01	2.0183
9.93377e-02	1.3613
4.94952e-02	0.5903

## ANEXO 7-11. Distribución de Tamaño de Poro modificada 2 en rama de adsorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/23	Operator: uaq
Sample ID:	arcilla2Ro	Filename:	Juricamodificada2.qps
Sample Desc:	muestras Roberto	Comment:	Celda 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0457 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 2
Approx. Outgas Time:	12.0 hrs	Final Outgas Temp.:	90 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	1:30 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.40222 cc
		Warm Zone V:	8.83515 cc

Extended info: Available  
CellType: 9mm  
VoidVol Remeasure:off  
Data Reduction Parameters  
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm

t-Method	Calc. method: de Boer
BJH/DH method	Moving pt. avg.: off
Adsorbate	Nitrogen
	Molec. Wt.: 28.013
	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po
	Temperature 77.350K
	Cross Section: 16.200 Å <sup>2</sup>
	Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4219	8.7358e-04	1.0212e+00	2.2283e-03	2.6047e+00	1.7538e-02	2.0501e+01
3.8347	1.8453e-03	2.0348e+00	2.2406e-03	2.3372e+00	1.9763e-02	2.0615e+01
4.3237	2.9717e-03	3.0768e+00	2.0694e-03	1.9145e+00	2.0575e-02	1.9035e+01
4.9112	5.0114e-03	4.7381e+00	3.2341e-03	2.6341e+00	3.6523e-02	2.9747e+01
5.6702	8.4016e-03	7.1297e+00	3.8210e-03	2.6955e+00	4.9786e-02	3.5121e+01
6.6062	1.1858e-02	9.2224e+00	3.5096e-03	2.1250e+00	5.3287e-02	3.2265e+01
7.7805	1.4663e-02	1.0665e+01	2.0571e-03	1.0576e+00	3.6760e-02	1.8898e+01
9.5745	1.7200e-02	1.1725e+01	1.1405e-03	4.7648e-01	2.5030e-02	1.0457e+01
12.3758	1.9703e-02	1.2534e+01	7.4089e-04	2.3947e-01	2.0981e-02	6.7813e+00
17.6398	2.4405e-02	1.3600e+01	6.5759e-04	1.4911e-01	2.6339e-02	5.9727e+00
30.9833	3.0476e-02	1.4383e+01	3.1076e-04	4.0120e-02	2.1415e-02	2.7647e+00
304.1063	4.3389e-02	1.4553e+01	2.4516e-05	3.2247e-04	1.1289e-02	1.4849e-01

### BJH adsorption summary

Surface Area = 14.553 m<sup>2</sup>/g  
Pore Volume = 0.043 cc/g  
Pore Diameter Dv(d) = 5.670 nm

## ANEXO 7-12. Distribución de Tamaño de Poro modificada 2 en rama de desorción

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2012, Quantachrome Instruments  
version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/23	Operator: uaq
Sample ID:	arcilla2Ro	Filename:	Juricamodificada2.qps
Sample Desc:	muestras Roberto	Comment:	Celda 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0457 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 2
Approx. Outgas Time:	12.0 hrs	Final Outgas Temp.:	90 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	1:30 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.40222 cc
		Warm Zone V:	8.83515 cc

Extended info: Available  
CellType: 9mm  
VoidVol Remeasure:off  
Data Reduction Parameters  
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm

t-Method	Calc. method: de Boer		
BJH/DH method	Moving pt. avg.: off	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po	
Adsorbate	Nitrogen	Temperature 77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 Å <sup>2</sup>	Liquid Density: 0.808 g/cc

Diameter	Pore Volume	Pore Surf Area	dV(d)	dS(d)	dV(logd)	dS(logd)
nm	cc/g	m <sup>2</sup> /g	cc/nm/g	m <sup>2</sup> /nm/g	cc/g	cc/g
3.4033	1.1199e-02	1.3163e+01	2.8926e-02	3.3998e+01	2.2643e-01	2.6613e+02
3.8220	2.4936e-02	2.7539e+01	3.0501e-02	3.1921e+01	2.6811e-01	2.8060e+02
4.3136	2.7547e-02	2.9961e+01	4.9019e-03	4.5456e+00	4.8626e-02	4.5091e+01
4.9178	2.9698e-02	3.1710e+01	3.1829e-03	2.5888e+00	3.5985e-02	2.9269e+01
5.6494	2.9698e-02	3.1710e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
6.5548	3.0468e-02	3.2180e+01	7.5226e-04	4.5906e-01	1.1331e-02	6.9145e+00
7.7870	3.2235e-02	3.3087e+01	1.2258e-03	6.2967e-01	2.1916e-02	1.1258e+01
9.5844	3.4115e-02	3.3872e+01	8.7337e-04	3.6449e-01	1.9193e-02	8.0101e+00
12.2796	3.5560e-02	3.4343e+01	4.4638e-04	1.4540e-01	1.2548e-02	4.0873e+00
17.4630	3.8891e-02	3.5106e+01	4.6721e-04	1.0702e-01	1.8522e-02	4.2427e+00
30.6904	4.4885e-02	3.5887e+01	3.1015e-04	4.0423e-02	2.1173e-02	2.7596e+00
155.3270	4.9715e-02	3.6012e+01	2.1004e-05	5.4089e-04	5.8473e-03	1.5058e-01
418.8808	4.9715e-02	3.6012e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

### BJH desorption summary

Surface Area =	36.012 m <sup>2</sup> /g
Pore Volume =	0.050 cc/g
Pore Diameter Dv(d) =	3.822 nm

## ANEXO 7-13. Área superficial BET natural-1

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
 Acquisition and Reduction  
 © 1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/28	Operator: uaq
Sample ID:	JURicanatural1	Filename:	juricanatural1.qps
Sample Desc:	MUESTRAS ROBERO	Comment:	Celda de 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0498 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 1
Approx. Outgas Time:	12.0 hrs	Final Outgas Temp.:	90 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	2:00 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.56021 cc
		Warm Zone V:	7.24701 cc
Data Reduction Parameters			
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 Å			
Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm			

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>
		Liquid Density:	0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
4.97875e-02	18.0545	2.3220e+00
1.01360e-01	20.0023	4.5118e+00
1.49254e-01	21.2850	6.5948e+00
2.00269e-01	22.4517	8.9242e+00
2.50126e-01	23.4481	1.1382e+01
2.99974e-01	24.3957	1.4054e+01
3.00133e-01	25.1158	1.3662e+01
2.49936e-01	24.1404	1.1044e+01
1.99572e-01	23.1039	8.6346e+00
1.50754e-01	21.9468	6.4716e+00
1.01028e-01	20.5494	4.3757e+00
4.87478e-02	18.5188	2.2141e+00

BET summary

Slope =	45.989
Intercept =	-2.025e-01
Correlation coefficient, r =	0.998458
C constant =	-226.074
Surface Area =	76.059 m <sup>2</sup> /g

## ANEXO 7-14. Área superficial BET natural-2

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
 Acquisition and Reduction  
 © 1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 3.0

Analysis		Report	
Operator:	uaq	Date:2015/07/29	Operator: uaq
Sample ID:	juricanatural2	Filename:	Juricanatural2.qps
Sample Desc:	Muestra Roberto	Comment:	Celda 9mm con rodillo
Sample Weight:	0.0713 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 2
Approx. Outgas Time:	12.2 hrs	Final Outgas Temp.:	200 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time:	2:38 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.47103 cc
		Warm Zone V:	8.60379 cc
Data Reduction Parameters			
Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 Å			
Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm			

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>
		Liquid Density:	0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.18220e-02	18.3955	2.3772e+00
9.94118e-02	20.2420	4.3632e+00
1.51157e-01	21.8393	6.5240e+00
2.02496e-01	23.4648	8.6580e+00
2.49943e-01	24.5119	1.0877e+01
2.99182e-01	25.5797	1.3353e+01
2.98893e-01	25.5315	1.3360e+01
2.50695e-01	24.4968	1.0928e+01
2.01060e-01	23.2623	8.6558e+00
1.51578e-01	21.9370	6.5162e+00
9.90166e-02	20.2920	4.3333e+00
5.02358e-02	18.2881	2.3141e+00

BET summary

Slope =	44.059
Intercept =	-4.222e-02
Correlation coefficient, r =	0.999253
C constant =	-1042.550
Surface Area =	79.117 m <sup>2</sup> /g

## ANEXO 7-15. Área superficial BET modificada-1

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
 Acquisition and Reduction  
 © 1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 3.0

Analysis		Report	
Operator: uaq	Date:2015/07/23	Operator: uaq	Date:2015/07/27
Sample ID: arcilla1Ro	Filename: Juricamodificada1.qps		
Sample Desc: muestras Roberto	Comment: Celda de 9mm con rodillo		
Sample Weight: 0.0471 g	Instrument: Autosorb iQ Station 1		
Approx. Outgas Time:12.0 hrs	Final Outgas Temp.:90 °C	Extended info: Available	
Analysis gas: Nitrogen	Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr	CellType: 9mm	
Analysis Time: 1:37 hr:min	Bath temp.: 77.35 K		
Analysis Mode: Standard		VoidVol Remeasure:off	
VoidVol. Mode: He Measure	Cold Zone V: 1.39645 cc	Warm Zone V: 7.20762 cc	
	Data Reduction Parameters		
	Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm		

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>	Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.49696e-02	-1.4992	-3.1044e+01
1.01509e-01	-1.0329	-8.7515e+01
1.51661e-01	-0.5935	-2.4102e+02
2.01341e-01	-0.1705	-1.1828e+03
2.51569e-01	0.2861	9.3994e+02
3.00802e-01	0.7348	4.6848e+02
2.99183e-01	2.6971	1.2665e+02
2.49491e-01	2.0736	1.2827e+02
1.99094e-01	1.4903	1.3346e+02
1.48566e-01	0.8823	1.5823e+02
9.92371e-02	0.2417	3.6474e+02
4.94321e-02	-0.4837	-8.6013e+01

BET summary  
 Slope = 1417.728  
 Intercept = -1.913e+02  
 Correlation coefficient, r = 0.251665  
 C constant = -6.411  
 Surface Area = 2.840 m<sup>2</sup>/g

## ANEXO 7-16. Área superficial BET modificada-2

Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
 Acquisition and Reduction  
 © 1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 3.0

Analysis		Report	
Operator: uaq	Date:2015/07/23	Operator: uaq	Date:2015/07/27
Sample ID: arcilla2Ro	Filename: Juricamodificada2.qps		
Sample Desc: muestras Roberto	Comment: Celda 9mm con rodillo		
Sample Weight: 0.0457 g	Instrument: Autosorb iQ Station 2		
Approx. Outgas Time:12.0 hrs	Final Outgas Temp.:90 °C	Extended info: Available	
Analysis gas: Nitrogen	Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr	CellType: 9mm	
Analysis Time: 1:30 hr:min	Bath temp.: 77.35 K		
Analysis Mode: Standard		VoidVol Remeasure:off	
VoidVol. Mode: He Measure	Cold Zone V: 1.40222 cc	Warm Zone V: 8.83515 cc	
	Data Reduction Parameters		
	Thermal Transpiration: onEff. mol. diameter (D): 3.54 ÅEff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm		

Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>	Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure P/Po	Volume @ STP cc/g	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.27275e-02	-0.5163	-8.6266e+01
1.01185e-01	0.0191	4.7076e+03
1.51644e-01	0.4909	2.9134e+02
2.01489e-01	0.9662	2.0896e+02
2.51075e-01	1.4246	1.8829e+02
3.00284e-01	1.8909	1.8159e+02
2.98971e-01	3.9857	8.5612e+01
2.49119e-01	3.2985	8.0478e+01
1.99142e-01	2.6673	7.4590e+01
1.48700e-01	2.0183	6.9245e+01
9.93377e-02	1.3613	6.4826e+01
4.94952e-02	0.5903	7.0580e+01

BET summary  
 Slope = -3457.479  
 Intercept = 1.101e+03  
 Correlation coefficient, r = 0.230826  
 C constant = -2.141  
 Surface Area = 0.000 m<sup>2</sup>/g

## ANEXO 7-17. Resumen SWRC

trayectoria secado									
SWRC 1					SWRC 2				
n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa	n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa
1	39.98	1.00	0.180	1.514	1	40.23	1.00	0.410	2.569
2	34.95	0.87	1.246	17.630	2	33.86	0.83	1.495	31.260
3	29.33	0.73	2.124	133.127	3	29.20	0.71	2.253	179.191
4	27.19	0.68	2.647	443.854	4	28.47	0.69	2.695	495.302
5	21.98	0.55	3.556	3596.238	5	22.46	0.53	3.447	2800.198
6	19.67	0.49	3.812	6484.144	6	19.15	0.44	3.899	7930.278
7	14.58	0.36	4.291	19539.375	7	15.41	0.34	4.357	22737.553
8	10.20	0.25	4.853	71256.763	8	10.98	0.23	4.780	60292.780
9	7.62	0.19	4.957	90524.725	9	8.02	0.15	4.995	98805.111
10	0.13	0.00	5.270	186256.314	10	2.46	0.00	5.224	167376.507
11					11				
$\theta_s$	39.98	$\theta_r$	0.13		$\theta_s$	40.23	$\theta_r$	2.46	
$a = \psi_i$	1900	$\theta_i$	21		$a = \psi_i$	1900	$\theta_i$	21	
$\psi_p$	250000	$K_s$ m/s	1.37E-07		$\psi_p$	250000	$K_s$ m/s	1.37E-07	

trayectoria humedecimiento									
SWRC 1					SWRC 2				
n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa	n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa
1	40.91	1.00	0.195	1.567	1	40.23	1.00	0.410	2.569
2	35.35	0.84	0.693	4.934	2	35.35	0.87	0.693	4.934
3	31.88	0.75	1.316	20.712	3	31.88	0.78	1.316	20.712
4	29.34	0.68	1.587	38.664	4	28.43	0.69	1.673	47.133
5	26.48	0.60	2.353	225.386	5	24.91	0.59	2.872	743.947
6	20.22	0.42	3.250	1776.915	6	19.96	0.46	3.382	2412.252
7	16.67	0.32	3.940	8711.005	7	16.13	0.36	4.077	11930.524
8	10.41	0.14	4.638	43498.039	8	10.62	0.22	4.682	48115.393
9	8.08	0.08	4.861	72604.905	9	7.71	0.14	4.759	57383.659
10	5.25	0.00	5.071	117660.185	10	4.43	0.05	5.020	104687.356
					11	2.46	0.00	5.224	167376.507
$\theta_s$	40.91	$\theta_r$	5.25		$\theta_s$	40.23	$\theta_r$	2.46	
$a = \psi_i$	800	$\theta_i$	16		$a = \psi_i$	1300	$\theta_i$	17	
$\psi_p$	76000	$K_s$ m/s	1.37E-07		$\psi_p$	190000	$K_s$ m/s	1.37E-07	

## ANEXO 7-18. Resumen SWRLC

trayectoria secado									
SWLRC 1					SWLRC 2				
n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa	n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa
1	40.21	1.00	0.590	3.887	1	39.83	1.00	0.652	4.488
2	36.93	0.92	0.686	4.849	2	36.93	0.93	0.686	4.849
3	31.67	0.79	1.411	25.780	3	31.67	0.80	1.411	25.780
4	28.19	0.70	1.510	32.345	4	28.19	0.71	1.510	32.345
5	24.08	0.60	2.318	207.767	5	24.08	0.60	2.318	207.767
6	19.60	0.49	3.909	8112.031	6	19.79	0.50	3.857	7189.347
7	14.49	0.36	4.508	32241.548	7	14.17	0.36	4.562	36441.690
8	9.48	0.24	4.804	63640.315	8	9.82	0.25	4.766	58380.866
9	6.97	0.17	5.024	105742.513	9	6.56	0.16	5.020	104641.069
10	3.56	0.09	5.251	178197.790	10	2.59	0.07	5.251	178197.790
11	0.00	0.00	5.296	197595.730	11	0.00	0.00	5.311	204634.773
$\theta_s$	40.21	$\theta_r$	0.00		$\theta_s$	39.83	$\theta_r$	0.00	
$a = \psi_i$	600	$\theta_i$	20		$a = \psi_i$	500	$\theta_i$	20	
$\psi_p$	180000	$K_s$ m/s	6.15E-10		$\psi_p$	140000	$K_s$ m/s	6.15E-10	

trayectoria humedecimiento									
SWLRC 1					SWLRC 2				
n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa	n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa
1	40.21	1.00	0.578	3.782	1	39.83	1.00	0.334	2.157
2	33.32	0.83	0.590	3.887	2	33.23	0.83	0.652	4.488
3	30.39	0.76	0.817	6.568	3	31.62	0.79	0.706	5.085
4	25.66	0.64	1.626	42.296	4	29.12	0.73	0.897	7.891
5	22.76	0.57	1.852	71.063	5	23.49	0.59	1.703	50.493
6	17.95	0.45	3.730	5370.936	6	18.74	0.47	3.741	5510.342
7	12.30	0.31	4.387	24364.779	7	11.95	0.30	4.175	14953.571
8	8.85	0.22	4.793	62047.148	8	5.37	0.13	4.955	90227.660
9	3.67	0.09	5.122	132434.154	9	0.00	0.00	5.311	204634.773
10	0.00	0.00	5.296	197595.730					
$\theta_s$	40.21	$\theta_r$	0.00		$\theta_s$	39.83	$\theta_r$	0.000	
$a = \psi_i$	400	$\theta_i$	17.1		$a = \psi_i$	310	$\theta_i$	17	
$\psi_p$	160000	$K_s$ m/s	6.15E-10		$\psi_p$	170000	$K_s$ m/s	6.15E-10	

SWRC Curado				
n	$\omega$ %	Sr norm	$\psi$ pF	$\psi$ kPa
1	36.67	1.00	0.737	5.463
2	28.48	0.72	1.702	50.359
3	13.28	0.19	4.597	39551.927
4	7.94	0.00	5.001	100156.132
$\theta_s$	36.67	$\theta_r$	7.94	

## ANEXO 7-19. Ajuste Fredlund y Rahardjo natural 1

Ajuste HUMEDECIMIENTO por Fredlund																		
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	Gs <sub>Fredlund</sub>	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>			
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	pF	(%)	pF				(%)	(%)					
1	2	40.91	100.0	40.91	5.25	800	16	76000	3.45	8.09	2.06	40.74	99.52	0.0048	0.0000			
2	5	35.35	84.4	<table border="1"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>2.90</td> <td>4.88</td> </tr> <tr> <td colspan="2">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2">0.9392</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	2.90	4.88	R <sup>2</sup>		0.9392		38.66	93.70	-0.0931	0.0087
a = $\psi_i$	$\psi_p$																	
pF	pF																	
2.90	4.88																	
R <sup>2</sup>																		
0.9392																		
3	21	31.88	74.7		33.53	79.29	-0.0462	0.0021										
4	39	29.34	67.6		30.86	71.82	-0.0426	0.0018										
5	225	26.48	59.5		23.53	51.26	0.0827	0.0068										
6	1777	20.22	42.0		16.97	32.87	0.0912	0.0083										
7	8711	16.67	32.0	13.59	23.38	0.0864	0.0075											
8	43498	10.41	14.5	11.27	16.89	-0.0240	0.0006											
9	72605	8.08	7.9	10.71	15.31	-0.0736	0.0054											
10	117660	5.25	0.0	10.23	13.99	-0.1399	0.0196											

Ajuste SECADO por Fredlund																		
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	Gs <sub>Fredlund</sub>	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>			
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	kPa	(%)	kPa				(%)	(%)					
1	2	39.98	100.0	39.98	0.13	1900	21	3E+05	2.36	9.91	3.17	39.98	100.00	0.0000	0.0000			
2	18	34.95	87.4	<table border="1"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>3.28</td> <td>5.40</td> </tr> <tr> <td colspan="2">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2">0.9262</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	3.28	5.40	R <sup>2</sup>		0.9262		38.43	96.11	-0.0872	0.0076
a = $\psi_i$	$\psi_p$																	
pF	pF																	
3.28	5.40																	
R <sup>2</sup>																		
0.9262																		
3	133	29.33	73.3		32.73	81.80	-0.0853	0.0073										
4	444	27.19	67.9		27.57	68.86	-0.0095	0.0001										
5	3596	21.98	54.9		18.45	45.99	0.0886	0.0079										
6	6484	19.67	49.0		16.27	40.51	0.0852	0.0073										
7	19539	14.58	36.3	12.83	31.87	0.0440	0.0019											
8	71257	10.20	25.3	9.78	24.21	0.0105	0.0001											
9	90525	7.62	18.8	9.31	23.05	-0.0424	0.0018											
10	186256	0.13	0.0	8.08	19.97	-0.1997	0.0399											

## ANEXO 7-20. FCH Fredlund y Rahardjo natural 1

HUMEDECIMIENTO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria ( $2j+1-2i$ ) $S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr ó $\Theta$	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ ( $m^2/s$ )
1	1	2	0.407	0.034	1.23E-02	1.43E-02	1.37E-07	1.000	7.43	0.034	2.43E-08
2	2	9.0	0.374	0.034	1.60E-03	1.92E-03	1.85E-08	0.889	16.00	0.034	7.05E-09
3	3	25.0	0.340	0.034	2.78E-04	3.21E-04	3.09E-09	0.778	35.00	0.034	2.58E-09
4	4	60.0	0.306	0.034	3.91E-05	4.37E-05	4.20E-10	0.667	100.00	0.034	1.00E-09
5	5	160.0	0.272	0.034	4.34E-06	4.66E-06	4.47E-11	0.556	320.00	0.034	3.42E-10
6	6	480.0	0.238	0.034	3.09E-07	3.16E-07	3.03E-12	0.444	1320.00	0.034	9.55E-11
7	7	1800.0	0.204	0.034	6.94E-09	6.97E-09	6.69E-14	0.333	10200.00	0.034	1.63E-11
8	8	12000.0	0.170	0.034	2.50E-11	2.66E-11	2.55E-16	0.222	188000.00	0.034	1.14E-12
9	9	200000.0	0.136	0.034	1.56E-12	1.56E-12	1.50E-17	0.111	600000.00	0.034	2.15E-13
10	10	800000.0	0.102	0.102	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.000	800000.00	0.102	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	$A_d$	$K_{sc}$	$K_s$	$K_g/K_{sc}$	$\gamma_d$
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.4074	0.01	2	10	4.2207	6.02E-02	1.37E-07	2.28E-06	1235.9

SECADO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria ( $2j+1-2i$ ) $S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)
1	1	2	0.400	0.035	2.78E-04	3.02E-04	1.37E-07	1.000	58.5	0.035	1.83E-07
2	2	60	0.364	0.035	2.07E-05	2.41E-05	1.10E-08	0.889	160.0	0.035	4.00E-08
3	3	220	0.329	0.035	2.97E-06	3.48E-06	1.58E-09	0.778	360.0	0.035	1.30E-08
4	4	580	0.293	0.035	4.44E-07	5.05E-07	2.29E-10	0.667	920.0	0.035	4.81E-09
5	5	1500	0.258	0.035	5.67E-08	6.07E-08	2.75E-11	0.556	2700.0	0.035	1.70E-09
6	6	4200	0.223	0.035	3.91E-09	4.01E-09	1.82E-12	0.444	11800.0	0.035	4.90E-10
7	7	16000	0.187	0.035	1.00E-10	1.03E-10	4.68E-14	0.333	84000.0	0.035	8.97E-11
8	8	100000	0.152	0.035	2.04E-12	3.04E-12	1.38E-15	0.222	600000.0	0.035	1.89E-11
9	9	700000	0.116	0.035	1.00E-12	1.00E-12	4.54E-16	0.111	300000.0	0.035	3.11E-12
10	10	1000000	0.081	0.081	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.000	1000000.0	0.081	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	$A_d$	$K_{sc}$	$K_s$	$K_g/K_{sc}$	$\gamma_d$
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.3998	0.01	2	10	4.0638	1.23E-03	1.37E-07	1.12E-04	1235.9

## ANEXO 7-21. FCH van Genuchten natural 1

HUMEDECIMIENTO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\Theta$	$\Theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S)^{\beta_1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{\beta_1/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\Theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	2	0.4091	1.00	0.99	0.0570	1.2100	0.1736	0.60	0.99	1.00	1.62E-01	1.37E-07	0.00E+00	
2	5	0.3535	0.86	0.97	0.0570	1.2100	0.1736	0.77	0.97	1.02	6.62E-02	9.06E-09	2.31E-08	
3	21	0.3188	0.78	0.87				$k_s$	1.04	0.87	1.07	9.06E-03	1.24E-09	2.34E-09
4	39	0.2934	0.72	0.80				1.37E-07	1.18	0.80	1.12	2.70E-03	3.69E-10	6.03E-10
5	225	0.2648	0.65	0.58				1.71	0.58	1.31	4.52E-05	6.19E-12	4.86E-12	
6	1777	0.2022	0.49	0.38				$Y_d$	2.64	0.38	1.62	2.59E-07	3.54E-14	1.11E-14
7	8711	0.1667	0.41	0.27				1.24E+03	3.68	0.27	1.92	4.69E-09	6.43E-16	1.19E-16
8	43498	0.1041	0.25	0.19				5.16	0.19	2.27	8.09E-11	1.11E-17	4.65E-19	
9	72605	0.0808	0.20	0.17				$R^2$	5.75	0.17	2.40	2.22E-11	3.04E-18	9.88E-20
10	117660	0.0525	0.13	0.16				0.9327	6.36	0.16	2.52	6.56E-12	8.99E-19	2.29E-20

SECADO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\Theta$	$\Theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S)^{\beta_1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{\beta_1/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\Theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	2	0.3998	0.977	0.998	0.0160	1.2000	0.1667	0.48	1.00	1.00	2.76E-01	1.37E-07	0.00E+00	
2	18	0.3495	0.854	0.968	0.0160	1.2000	0.1667	0.78	0.97	1.02	6.09E-02	8.34E-09	4.50E-09	
3	133	0.2933	0.717	0.812				$k_s$	1.16	0.81	1.11	2.72E-03	3.73E-10	2.66E-10
4	444	0.2719	0.665	0.666				1.37E-07	1.48	0.67	1.23	1.84E-04	2.53E-11	9.66E-11
5	3596	0.2198	0.537	0.444				2.25	0.44	1.50	1.10E-06	1.50E-13	4.03E-12	
6	6484	0.1967	0.481	0.395				$Y_d$	2.53	0.39	1.59	2.52E-07	3.45E-14	9.28E-13
7	19539	0.1458	0.356	0.317				1.24E+03	3.16	0.32	1.78	1.61E-08	2.20E-15	1.15E-14
8	71257	0.1020	0.249	0.245				4.09	0.24	2.02	6.33E-10	8.67E-17	7.24E-17	
9	90525	0.0762	0.186	0.233				$R^2$	4.29	0.23	2.07	3.48E-10	4.77E-17	1.32E-18
10	186256	0.0013	0.003	0.202				0.9182	4.95	0.20	2.23	5.73E-11	7.85E-18	0.00E+00

## ANEXO 7-22. Ajuste Fredlund y Rahardjo natural 2

Ajuste HUMEDECIMIENTO por Fredlund																											
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	$G_{SFredlund}$	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>												
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	pF	(%)	pF				(%)	(%)														
1	3	40.23	100.0	40.23	2.46	1300	17	190000	3.16	7.85	2.20	39.73	98.68	0.0132	0.0002												
2	5	35.35	87.1	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>3.11</td> <td>5.28</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">0.9026</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	3.11	5.28	R <sup>2</sup>		0.9026														
a = $\psi_i$	$\psi_p$																										
pF	pF																										
3.11	5.28																										
R <sup>2</sup>																											
0.9026																											
3	21	31.88	77.9																								
4	47	28.43	68.8																								
5	744	24.91	59.4																								
6	2412	19.96	46.3																								
7	11931	16.13	36.2																								
8	48115	10.62	21.6																								
9	57384	7.71	13.9																								
10	104687.3559	4.43	5.2																								
11	167376.5065	2.46	0.0																								

Ajuste SECADO por Fredlund																											
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	$G_{SFredlund}$	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>												
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	kPa	(%)	kPa				(%)	(%)														
1	3	40.23	100.0	40.23	2.46	1900	21	250000	2.39	9.91	3.14	40.18	99.88	0.0012	0.0000												
2	31	33.86	83.1	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>3.28</td> <td>5.40</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">0.9295</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	3.28	5.40	R <sup>2</sup>		0.9295														
a = $\psi_i$	$\psi_p$																										
pF	pF																										
3.28	5.40																										
R <sup>2</sup>																											
0.9295																											
3	179	29.20	70.8																								
4	495	28.47	68.9																								
5	2800	22.46	52.9																								
6	7930	19.15	44.2																								
7	22738	15.41	34.3																								
8	60293	10.98	22.6																								
9	98805	8.02	14.7																								
10	167377	2.46	0.0																								

## ANEXO 7-23. FCH Fredlund y Rahardjo natural 2

HUMEDECIMIENTO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria $(2j+1-2i) S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr ó $\Theta$	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ (m <sup>2</sup> /s)
1	1	3	0.3973	0.0310	1.00E-02	1.11E-02	1.37E-07	1.0000	7.43	0.0310	2.66E-08
2	2	10.0	0.3663	0.0310	9.18E-04	1.08E-03	1.34E-08	0.9000	23.00	0.0310	8.04E-09
3	3	33.0	0.3353	0.0310	1.38E-04	1.65E-04	2.04E-09	0.8000	52.00	0.0310	2.76E-09
4	4	85.0	0.3043	0.0310	2.27E-05	2.64E-05	3.26E-10	0.7000	125.00	0.0310	1.06E-09
5	5	210.0	0.2733	0.0310	3.31E-06	3.72E-06	4.60E-11	0.6000	340.00	0.0310	4.08E-10
6	6	550.0	0.2423	0.0310	3.91E-07	4.13E-07	5.11E-12	0.5000	1050.00	0.0310	1.40E-10
7	7	1600.0	0.2113	0.0310	2.23E-08	2.26E-08	2.79E-13	0.4000	5100.00	0.0310	3.71E-11
8	8	6700.0	0.1803	0.0310	2.78E-10	2.86E-10	3.53E-15	0.3000	53300.00	0.0310	4.91E-12
9	9	60000.0	0.1493	0.0310	6.93E-12	7.93E-12	9.80E-17	0.2000	320000.00	0.0310	8.18E-13
10	10	380000.0	0.1183	0.0310	1.00E-12	1.00E-12	1.24E-17	0.1000	620000.00	0.0310	2.00E-13
11	11	1000000.0	0.0873	0.0873	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0000	1000000.00	0.0873	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	Ad	Ksc	Ks	Ks/Ksc	yd
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.3973	0.01	2	11	3.3173	3.68E-02	1.37E-07	3.73E-06	1235.9

SECADO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria $(2j+1-2i) S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)
1	1	3	0.4018	0.0334	2.37E-04	2.63E-04	1.37E-07	1.0000	62.4	0.0334	2.07E-07
2	2	65	0.3684	0.0334	2.27E-05	2.65E-05	1.38E-08	0.8889	145.0	0.0334	4.84E-08
3	3	210	0.3350	0.0334	3.31E-06	3.81E-06	1.98E-09	0.7778	340.0	0.0334	1.63E-08
4	4	550	0.3016	0.0334	4.44E-07	5.03E-07	2.62E-10	0.6667	950.0	0.0334	6.03E-09
5	5	1500	0.2682	0.0334	5.41E-08	5.86E-08	3.05E-11	0.5556	2800.0	0.0334	2.07E-09
6	6	4300	0.2348	0.0334	4.44E-09	4.55E-09	2.37E-12	0.4444	10700.0	0.0334	6.14E-10
7	7	15000	0.2014	0.0334	1.00E-10	1.07E-10	5.58E-14	0.3333	85000.0	0.0334	1.15E-10
8	8	100000	0.1680	0.0334	6.25E-12	7.25E-12	3.77E-15	0.2222	300000.0	0.0334	2.74E-11
9	9	400000	0.1346	0.0334	1.00E-12	1.00E-12	5.21E-16	0.1111	600000.0	0.0334	7.57E-12
10	10	1000000	0.1012	0.1012	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0000	1000000.0	0.1012	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	Ad	Ksc	Ks	Ks/Ksc	yd
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.4018	0.01	2	10	4.1058	1.08E-03	1.37E-07	1.27E-04	1235.9

## ANEXO 7-24. FCH van Genuchten natural 2

HUMEDECIMIENTO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\theta$	$\theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S)^{\beta-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{-5}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{5/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	3	0.4023	1.0000	0.9803	0.0780	1.1600	0.1379	0.773	0.980	1.010	5.80E-02	1.37E-07	0.00E+00	
2	5	0.3535	0.8786	0.9614	0.0780	1.1600	0.1379	0.858	0.961	1.020	3.00E-02	4.11E-09	8.76E-09	
3	21	0.3188	0.7924	0.8700				$k_s$	1.080	0.870	1.072	3.42E-03	4.69E-10	7.33E-10
4	47	0.2843	0.7068	0.7899				1.37E-07	1.232	0.790	1.125	6.55E-04	8.98E-11	1.11E-10
5	744	0.2491	0.6192	0.5215				$y_d$	1.915	0.522	1.385	1.10E-06	1.51E-13	5.57E-14
6	2412	0.1996	0.4962	0.4325					2.312	0.432	1.521	6.60E-08	9.04E-15	2.12E-15
7	11931	0.1613	0.4010	0.3349				1.24E+03	2.985	0.335	1.728	1.43E-09	1.95E-16	2.57E-17
8	48115	0.1062	0.2640	0.2680				$R^2$	3.732	0.268	1.932	5.02E-11	6.88E-18	2.24E-19
9	57384	0.0771	0.1917	0.2605					3.838	0.261	1.959	3.29E-11	4.51E-18	1.34E-19
10	104687	0.0443	0.1102	0.2366					4.226	0.237	2.056	7.77E-12	1.06E-18	2.35E-20
11	167377	0.0443	0.1102	0.2195							4.555	0.220	2.134	2.52E-12

SECADO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\theta$	$\theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S)^{\beta-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{-5}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{5/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	3	0.4023	1.0000	0.996	0.0160	1.2000	0.1667	0.528	0.996	1.002	2.24E-01	1.37E-07	0.00E+00	
2	31	0.3386	0.8416	0.942	0.0160	1.2000	0.1667	0.871	0.942	1.031	3.15E-02	4.32E-09	3.40E-09	
3	179	0.2920	0.7259	0.777				$k_s$	1.234	0.777	1.134	1.45E-03	1.99E-10	3.36E-10
4	495	0.2847	0.7078	0.652				1.37E-07	1.513	0.652	1.238	1.42E-04	1.95E-11	2.61E-10
5	2800	0.2246	0.5582	0.467				$y_d$	2.139	0.467	1.464	2.04E-06	2.80E-13	6.86E-12
6	7930	0.1915	0.4761	0.379					2.634	0.379	1.623	1.53E-07	2.09E-14	7.83E-13
7	22738	0.1541	0.3829	0.307				1.24E+03	3.252	0.307	1.804	1.10E-08	1.51E-15	3.48E-14
8	60293	0.1098	0.2729	0.253				$R^2$	3.953	0.253	1.988	9.61E-10	1.32E-16	2.68E-16
9	98805	0.0802	0.1994	0.229					4.363	0.229	2.089	2.79E-10	3.83E-17	3.39E-18
10	167377	0.0246	0.0611	0.206					4.848	0.206	2.202	7.48E-11	1.03E-17	0.00E+00

## ANEXO 7-25. Ajuste Fredlund y Rahardjo modificada 1

Ajuste HUMEDECIMIENTO por Fredlund																												
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	$G_{S_{Fredlund}}$	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>													
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	pF	(%)	pF				(%)	(%)															
1	3.78	40.21	100.0	40.21	0.00	400	17.1	160000	3.14	6.57	1.54	36.04	89.63	0.1037	0.0107													
2	3.89	33.32	82.9	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>2.60</td> <td>5.20</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">0.9066</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	2.60	5.20	R <sup>2</sup>		0.9066															
a = $\psi_i$	$\psi_p$																											
pF	pF																											
2.60	5.20																											
R <sup>2</sup>																												
0.9066																												
3	6.57	30.39	75.6																									
4	42.30	25.66	63.8																									
5	71.06	22.76	56.6																									
6	5370.94	17.95	44.6																									
7	24364.78	12.30	30.6																									
8	62047.15	8.85	22.0																									
9	132434.15	3.67	9.1																									
10	197595.73	0.00	0.0																									

Ajuste SECADO por Fredlund																												
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	$G_{S_{Fredlund}}$	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>													
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	kPa	(%)	kPa				(%)	(%)															
1	3.89	40.21	100.0	40.21	0.00	600	20	180000	2.56	8.07	2.12	38.83	96.59	0.0341	0.0012													
2	4.85	36.93	91.9	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>2.78</td> <td>5.26</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">0.9023</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	2.78	5.26	R <sup>2</sup>		0.9023															
a = $\psi_i$	$\psi_p$																											
pF	pF																											
2.78	5.26																											
R <sup>2</sup>																												
0.9023																												
3	25.78	31.67	78.8																									
4	32.34	29.52	73.4																									
5	207.77	24.26	60.3																									
6	8112.03	19.60	48.7																									
7	32241.55	14.49	36.0																									
8	63640.32	9.48	23.6																									
9	105742.51	6.97	17.3																									
10	178197.79	3.56	8.9																									
11	197595.73	0.00	0.0																									

## ANEXO 7-26. FCH Fredlund y Rahardjo modificada 1

HUMEDECIMIENTO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria ( $2j+1-2i$ ) $S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr ó $\Theta$	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ ( $m^2/s$ )
1	1	4	0.3604	0.0322	6.25E-02	7.07E-02	6.15E-10	1.0000	0.22	0.0322	3.37E-12
2	2	4.0	0.3282	0.0322	6.94E-03	8.17E-03	7.11E-11	0.8889	8.00	0.0322	1.43E-11
3	3	12.0	0.2960	0.0322	1.11E-03	1.23E-03	1.07E-11	0.7778	18.00	0.0322	4.83E-12
4	4	30.0	0.2637	0.0322	1.11E-04	1.16E-04	1.01E-12	0.6667	65.00	0.0322	1.65E-12
5	5	95.0	0.2315	0.0322	4.94E-06	5.11E-06	4.44E-14	0.5556	355.00	0.0322	3.96E-13
6	6	450.0	0.1993	0.0322	1.67E-07	1.68E-07	1.46E-15	0.4444	2000.00	0.0322	7.33E-14
7	7	2450.0	0.1671	0.0322	1.11E-09	1.11E-09	9.70E-18	0.3333	27550.00	0.0322	6.71E-15
8	8	30000.0	0.1349	0.0322	2.78E-12	3.78E-12	3.29E-20	0.2222	570000.00	0.0322	4.71E-16
9	9	600000.0	0.1027	0.0322	1.00E-12	1.00E-12	8.70E-21	0.1111	400000.00	0.0322	8.74E-17
10	10	1000000.0	0.0705	0.0705	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0000	1000000.00	0.0705	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	$A_d$	$K_{sc}$	$K_s$	$K_s/K_{sc}$	$\gamma_d$
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.3604	0.01	2	10	3.3023	2.33E-01	6.15E-10	2.64E-09	1235.9

SECADO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria ( $2j+1-2i$ ) $S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ ( $cm^2/dia$ )
1	1	4	0.3883	0.0310	1.23E-02	1.37E-02	6.15E-10	1.0000	5.1	0.0310	8.21E-11
2	2	9	0.3573	0.0310	1.11E-03	1.34E-03	6.02E-11	0.9000	21.0	0.0310	3.30E-11
3	3	30	0.3263	0.0310	2.04E-04	2.30E-04	1.03E-11	0.8000	40.0	0.0310	1.08E-11
4	4	70	0.2953	0.0310	2.27E-05	2.54E-05	1.14E-12	0.7000	140.0	0.0310	4.18E-12
5	5	210	0.2643	0.0310	2.60E-06	2.77E-06	1.25E-13	0.6000	410.0	0.0310	1.33E-12
6	6	620	0.2333	0.0310	1.60E-07	1.70E-07	7.64E-15	0.5000	1880.0	0.0310	3.75E-13
7	7	2500	0.2023	0.0310	1.00E-08	1.01E-08	4.55E-16	0.4000	7500.0	0.0310	8.91E-14
8	8	10000	0.1713	0.0310	1.23E-10	1.26E-10	5.68E-18	0.3000	80000.0	0.0310	1.19E-14
9	9	90000	0.1403	0.0310	2.04E-12	3.04E-12	1.37E-19	0.2000	610000.0	0.0310	2.18E-15
10	10	700000	0.1093	0.0310	1.00E-12	1.00E-12	4.49E-20	0.1000	300000.0	0.0310	3.52E-16
11	11	1000000	0.0783	0.0783	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0000	1000000.0	0.0783	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	$A_d$	$K_{sc}$	$K_s$	$K_s/K_{sc}$	$\gamma_d$
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.3883	0.01	2	11	3.1690	4.34E-02	6.15E-10	1.42E-08	1235.9

## ANEXO 7-27. FCH van Genuchten modificada 1

HUMEDECIMIENTO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\Theta$	$\Theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S_1)^{\beta_1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{5/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\Theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	4	0.40	1.00	0.89	0.3100	1.1700	0.1453	1.03	0.89	1.06	6.68E-03	6.15E-10	0.00E+00	
2	4	0.33	0.83	0.89	0.3100	1.1700	0.1453	1.03	0.89	1.06	6.36E-03	3.91E-12	1.43E-12	
3	7	0.30	0.76	0.84				$k_s$	1.13	0.84	1.09	2.40E-03	1.48E-12	5.32E-13
4	42	0.26	0.64	0.64				6.15E-10	1.55	0.64	1.25	3.88E-05	2.39E-14	4.06E-15
5	71	0.23	0.57	0.59				$\gamma_d$	1.69	0.59	1.30	1.13E-05	6.96E-15	1.09E-15
6	5371	0.18	0.45	0.28					3.53	0.28	1.88	3.25E-10	2.00E-19	4.09E-21
7	24365	0.12	0.31	0.22					1.24E+03	4.56	0.22	2.14	8.32E-12	5.12E-21
8	62047	0.09	0.22	0.19				$R^2$	5.35	0.19	2.31	8.62E-13	5.30E-22	1.80E-24
9	132434	0.04	0.09	0.16					6.09	0.16	2.47	1.37E-13	8.43E-23	1.96E-25
10	197596	0.00	0.00	0.15				0.9128	6.51	0.15	2.55	5.20E-14	3.20E-23	6.09E-26

SECADO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\Theta$	$\Theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S_1)^{\beta_1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^{\beta_1})^{5/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\Theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	4	0.40	1.00	0.96	0.1000	1.1770	0.1504	0.85	0.96	1.02	3.51E-02	6.15E-10	0.00E+00	
2	5	0.37	0.92	0.95	0.1000	1.1770	0.1504	0.88	0.95	1.03	2.68E-02	1.65E-11	1.04E-11	
3	26	0.32	0.79	0.81				$k_s$	1.18	0.81	1.11	1.57E-03	9.66E-13	5.05E-13
4	32	0.30	0.73	0.79				6.15E-10	1.23	0.79	1.13	9.73E-04	5.98E-13	1.67E-13
5	208	0.24	0.60	0.58				$\gamma_d$	1.71	0.58	1.31	1.32E-05	8.13E-15	6.22E-15
6	8112	0.20	0.49	0.31					3.27	0.31	1.81	1.77E-09	1.09E-18	2.12E-16
7	32242	0.14	0.36	0.24					1.24E+03	4.18	0.24	2.04	6.10E-11	3.75E-20
8	63640	0.09	0.24	0.21				$R^2$	4.71	0.21	2.17	1.16E-11	7.12E-21	2.02E-21
9	105743	0.07	0.17	0.19					5.16	0.19	2.27	3.35E-12	2.06E-21	1.86E-23
10	178198	0.04	0.09	0.18				0.9071	5.65	0.18	2.38	9.37E-13	5.76E-22	3.49E-28
11	197596	0.00	0.00	0.17				5.76	0.17	2.40	7.28E-13	4.48E-22	0.00E+00	

## ANEXO 7-28. Ajuste Fredlund y Rahardjo modificada 2

Ajuste HUMEDECIMIENTO por Fredlund																											
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	Gs <sub>Fredlund</sub>	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>												
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	pF	(%)	pF				(%)	(%)														
1	2.16	39.83	100.0	39.83	0.00	310	17	170000	3.12	6.21	1.41	37.28	93.58	0.0642	0.0041												
2	4.49	33.23	83.4	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>2.49</td> <td>5.23</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">0.9158</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	2.49	5.23	R <sup>2</sup>		0.9158														
a = $\psi_i$	$\psi_p$																										
pF	pF																										
2.49	5.23																										
R <sup>2</sup>																											
0.9158																											
3	5.09	31.62	79.4																								
4	7.89	29.12	73.1																								
5	50.49	23.49	59.0																								
6	5510.34	18.74	47.0																								
7	14953.57	11.95	30.0																								
8	90227.66	5.37	13.5																								
9	204634.77	0.00	0.0																								

Ajuste SECADO por Fredlund																											
Muestra	Succion	Humedad del Suelo	Gs	$\theta_s$	$\theta_r$	a = $\psi_i$	$\theta_i$	$\psi_p$	m	s	n	$\theta_{Fredlund}$	Gs <sub>Fredlund</sub>	y = Sr = Gs	y <sup>2</sup>												
No.	kPa	$\theta$ (%)	(%)	(%)	(%)	kPa	(%)	kPa				(%)	(%)														
1	4.49	39.83	100.0	39.83	0.00	500	20	140000	2.53	8.17	2.11	38.07	95.56	0.0444	0.0020												
2	4.85	36.93	92.7	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>a = <math>\psi_i</math></td> <td><math>\psi_p</math></td> </tr> <tr> <td>pF</td> <td>pF</td> </tr> <tr> <td>2.70</td> <td>5.15</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">R<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">0.8916</td> </tr> </table>	a = $\psi_i$	$\psi_p$	pF	pF	2.70	5.15	R <sup>2</sup>		0.8916														
a = $\psi_i$	$\psi_p$																										
pF	pF																										
2.70	5.15																										
R <sup>2</sup>																											
0.8916																											
3	25.78	31.67	79.5																								
4	32.34	28.19	70.8																								
5	207.77	24.08	60.5																								
6	7189.35	19.79	49.7																								
7	36441.69	14.17	35.6																								
8	58380.87	9.82	24.7																								
9	104641.07	6.56	16.5																								
10	178197.79	2.59	6.5																								
11	204634.77	0.00	0.0																								

## ANEXO 7-29. FCH Fredlund y Rahardjo modificada 2

HUMEDECIMIENTO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria $(2j+1-2i) S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr ó $\Theta$	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ (m <sup>2</sup> /s)
1	1	2	0.3728	0.0376	8.16E-02	9.30E-02	6.15E-10	1.0000	1.34	0.0376	1.78E-11
2	2	3.5	0.3352	0.0376	1.00E-02	1.14E-02	7.55E-11	0.8750	6.50	0.0376	1.06E-11
3	3	10.0	0.2976	0.0376	1.37E-03	1.42E-03	9.37E-12	0.7500	17.00	0.0376	3.43E-12
4	4	27.0	0.2601	0.0376	4.44E-05	4.55E-05	3.00E-13	0.6250	123.00	0.0376	7.96E-13
5	5	150.0	0.2225	0.0376	1.00E-06	1.01E-06	6.68E-15	0.5000	850.00	0.0376	1.22E-13
6	6	1000.0	0.1850	0.0376	1.00E-08	1.00E-08	6.61E-17	0.3750	9000.00	0.0376	1.28E-14
7	7	10000.0	0.1474	0.0376	2.78E-12	3.78E-12	2.50E-20	0.2500	590000.00	0.0376	3.17E-16
8	8	600000.0	0.1099	0.0376	1.00E-12	1.00E-12	6.61E-21	0.1250	400000.00	0.0376	5.70E-17
9	9	1000000.0	0.0723	0.0723	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0000	1000000.00	0.0723	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	Ad	Ksc	Ks	Ks/Ksc	$\gamma_d$
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.3728	0.01	2	9	4.3617	4.06E-01	6.15E-10	1.52E-09	1235.9

SECADO											
j	i	S (kPa)	$\theta$	$\Delta\theta$	$(2j+1-2i) S_j^2$	Sumatoria $(2j+1-2i) S_j^2$	$k_w(\theta)_i$	Sr	Inc. succion $\Delta S$	Inc. hum. $\Delta\theta$	$D(\Theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)
1	1	4	0.3807	0.0305	1.23E-02	1.39E-02	6.15E-10	1.0000	4.5	0.0305	7.36E-11
2	2	9	0.3501	0.0305	1.28E-03	1.55E-03	6.84E-11	0.9000	19.0	0.0305	3.45E-11
3	3	28	0.3196	0.0305	2.37E-04	2.71E-04	1.20E-11	0.8000	37.0	0.0305	1.17E-11
4	4	65	0.2891	0.0305	3.09E-05	3.39E-05	1.50E-12	0.7000	115.0	0.0305	4.57E-12
5	5	180	0.2586	0.0305	2.78E-06	3.01E-06	1.33E-13	0.6000	420.0	0.0305	1.49E-12
6	6	600	0.2281	0.0305	2.27E-07	2.37E-07	1.05E-14	0.5000	1500.0	0.0305	4.17E-13
7	7	2100	0.1975	0.0305	1.00E-08	1.01E-08	4.45E-16	0.4000	7900.0	0.0305	9.33E-14
8	8	10000	0.1670	0.0305	5.92E-11	6.22E-11	2.75E-18	0.3000	120000.0	0.0305	8.76E-15
9	9	130000	0.1365	0.0305	2.04E-12	3.04E-12	1.35E-19	0.2000	570000.0	0.0305	2.03E-15
10	10	700000	0.1060	0.0305	1.00E-12	1.00E-12	4.43E-20	0.1000	300000.0	0.0305	3.52E-16
11	11	1000000	0.0754	0.0754	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0000	1000000.0	0.0754	0.00E+00

Ts	$\rho$	g	$\theta_s$	$\mu$	P	N	Ad	Ksc	Ks	Ks/Ksc	$\gamma_d$
kN/m	kg/m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>		Ns/m <sup>2</sup>				m/s	m/s		kg/m <sup>3</sup>
0.072	1000	9.81	0.3807	0.01	2	11	3.0451	4.23E-02	6.15E-10	1.45E-08	1235.9

## ANEXO 7-30. FCH van Genuchten modificada 2

HUMEDECIMIENTO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\theta$	$\theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S)^{\beta-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{-5}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{5/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	2	0.3983	1.0000	0.9225	0.3800	1.1600	0.1379	0.969	0.923	1.041	1.09E-02	6.15E-10	0.00E+00	
2	4	0.3323	0.8342	0.8652	0.3800	1.1600	0.1379	1.089	0.865	1.075	3.09E-03	1.90E-12	5.30E-13	
3	5	0.3162	0.7938	0.8537				<b>ks</b>	1.111	0.854	1.082	2.44E-03	1.50E-12	4.77E-13
4	8	0.2912	0.7311	0.8108				6.15E-10	1.192	0.811	1.111	1.01E-03	6.20E-13	1.73E-13
5	50	0.2349	0.5896	0.6206				<b>yd</b>	1.604	0.621	1.269	1.53E-05	9.38E-15	1.20E-15
6	5510	0.1874	0.4704	0.2942					3.399	0.294	1.844	2.04E-10	1.25E-19	1.92E-21
7	14954	0.1195	0.3000	0.2508					1.24E+03	3.988	0.251	1.997	1.86E-11	1.14E-20
8	90228	0.0537	0.1347	0.1881				<b>R2</b>	5.316	0.188	2.306	2.48E-13	1.53E-22	3.41E-25
9	204635	0.0000	0.0000	0.1650					6.061	0.165	2.462	3.48E-14	2.14E-23	3.17E-26
0	0	0.0000	0.0000	0.0000				0.9186	0.000	0.000	0.000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

SECADO														
Pto. (no.)	Matrica (S) (kPa)	Humedad ( $\theta$ ) (%)	$\theta$	$\theta_{VanGen}$	$\alpha$	n	m	$(\alpha S)^{\beta-1}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{-5}$ (kPa)	$(1+(\alpha S)^\beta)^{5/2}$	$k_r$ (cm/seg)	$k(S)_i$ (cm/seg)	$D(\theta)_i$ (cm <sup>2</sup> /dia)	
1	4	0.3983	1.0000	0.946	0.1150	1.1710	0.1460	0.893	0.946	1.028	2.34E-02	6.15E-10	0.00E+00	
2	5	0.3693	0.9272	0.942	0.1150	1.1710	0.1460	0.905	0.942	1.030	2.11E-02	1.30E-11	1.06E-11	
3	26	0.3167	0.7951	0.801				<b>ks</b>	1.204	0.801	1.117	1.12E-03	6.90E-13	4.48E-13
4	32	0.2819	0.7076	0.776				6.15E-10	1.252	0.776	1.135	6.91E-04	4.25E-13	6.22E-14
5	208	0.2408	0.6046	0.579				<b>yd</b>	1.721	0.579	1.314	9.34E-06	5.74E-15	4.44E-15
6	7189	0.1979	0.4968	0.317					3.154	0.317	1.776	1.76E-09	1.09E-18	1.76E-16
7	36442	0.1417	0.3557	0.240					1.24E+03	4.163	0.240	2.040	3.43E-11	2.11E-20
8	58381	0.0982	0.2466	0.222				<b>R2</b>	4.512	0.222	2.124	1.09E-11	6.73E-21	1.83E-21
9	104641	0.0656	0.1647	0.201					4.986	0.201	2.233	2.65E-12	1.63E-21	2.63E-24
10	178198	0.0259	0.0651	0.183				0.8980	5.461	0.183	2.337	7.29E-13	4.48E-22	0.00E+00
11	204635	0.0000	0.0000	0.179				5.592	0.179	2.365	5.21E-13	3.20E-22	0.00E+00	

## ANEXO 7-31. Ficha técnica de cal hidráulica Del Valle

	<b>INDUSTRIA DAYI, S.A. DE C.V.</b>	FR-11-01				
		Edición 0				
<b>OFICINAS:</b> AV. JOSÉ MA. MORELOS No. 10 COL. CENTRO PROGRESO DE OBREGÓN, HGO. C.P. 42730 TELS. 01(738) 725-06-74 / 725-05-16 / 735 73 19 / FAX.725-14-42 <a href="http://www.caldeivalle.com">www.caldeivalle.com</a>		<b>PLANTA SOFÍA:</b> CARR. PROGRESO - IXMIQUILPAN, KM. 7.3 POBLADO XOCHITLÁN, PROGRESO DE OBREGÓN, HGO. E-mail: <a href="mailto:davidalfaro@caldeivalle.com">davidalfaro@caldeivalle.com</a>				
<h1>HIDRÓXIDO DE CALCIO</h1> <h2>Ficha Técnica de Producto</h2>		<b>PLANTA</b> 				
<b>IDENTIFICACIÓN</b>		Fecha de Emisión: <b>AGOSTO de 2013</b>				
Nombre Químico:	HIDRÓXIDO DE CALCIO	Peso Molecular: 74.09				
Fórmula Química:	Ca(OH) <sub>2</sub>	Nombre Común: Cal Hidratada				
Estado Físico:	Sólido	Fabricado en: Planta SOFÍA, Km. 7.3 Carretera Progreso Ixmiquilpan Xochitlán, Hidalgo				
<b>CONSTITUYENTES</b> Sustancia de un solo componente, HIDRÓXIDO DE CALCIO, con pequeños porcentajes de SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO y CO <sub>3</sub> Ca, procedentes de la materia prima caliza de carácter natural. Producto natural obtenido por la calcinación a 1200°C, aproximadamente de CO <sub>3</sub> Ca.						
<b>PROPIEDADES GENERALES</b> Aspecto: Polvo granulado, de fuerte carácter higroscópico pH: 12,4 solución saturada a 25°C Peso específico: 0,470 Kgs/l a 20 °C						
<b>PRESENTACIÓN Y SUMINISTRO</b> Granel Sacos Ton Sak						
<b>NORMATIVA:</b> <b>NMX-C-003-ONNCCCE-2010</b>						
<b>CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS:</b>		<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>				
Fórmula	Compuesto	Referencia	Valor Medio	Granulometrías.	Valor Medio	Método
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Calcio	NMX-C-003-ONNCCCE-2010	80.0%	Malla 100 µm	3%	NMX-C-003-ONNCCCE-2010
SiO <sub>2</sub>	Oxido de Sílice	NMX-C-003-ONNCCCE-2010	0.50%	Malla 200 µm	10%	NMX-C-003-ONNCCCE-2010
MgO	Oxido de Magnesio	NMX-C-003-ONNCCCE-2010	2.00%			
H <sub>2</sub> O	Humedad	NMX-C-003-ONNCCCE-2010	< 1%	DENSIDAD APARENTE	0.68 grs/cm.	ASTM C-110-09a
Los resultados pueden variar, dado que la materia prima es un producto natural. El producto HIDRÓXIDO DE CALCIO es estable a todas las temperaturas. Se puede almacenar por un periodo no superior a un mes, si se mantiene protegido del contacto de la humedad y del anhídrido carbónico del aire.						
ELABORA			APRUEBA			
GRISELDA ESPÍNDOLA TESMAYES Analista			ING. DAVID ALFARO Gerente de Calidad			

## ANEXO 7-32. Ajuste Modelo Sólido-Poroso

Variables	Condición	
	Natural	Modificada
$\mu_{sitios\ 1}$	0.00002	0.000042
$\sigma_{sitios\ 1}$	4.95	4.40
$\mu_{sitios\ 2}$	1.70	1.10
$\sigma_{sitios\ 2}$	3.00	3.03
$\mu_{enlaces\ 1}$	0.00001	0.00001
$\sigma_{enlaces\ 1}$	6.00	6.00
$\mu_{enlaces\ 2}$	0.017	0.009
$\sigma_{enlaces\ 2}$	9.50	14.00
$Vr_{sólidos}$	0.45	0.45
$Vr_{sitios}$	0.55	0.55
$Vr_{enlaces}$	0.45	0.42
$Sr_{sat}$	1.00	1.00
$Sr_{residual}$	0.00	0.00

$\mu$	<i>Media</i>
$\sigma$	<i>Desviación estándar</i>
$Sr$	<i>Grado de Saturación</i>
$Vr$	<i>Volúmen relativo</i>