



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias. Línea terminal en Mecánica de Suelos

MODELO SÓLIDO-POROSO PARA REPRODUCIR LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

**Presenta:**

Hiram Arroyo Chávez

**Dirigido por:**

Dr. Jaime Horta Rangel

SINODALES

Dr. Jaime Horta Rangel

Presidente

Dr. Eduardo Rojas González

Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Vocal

Dr. Alfredo Pérez García

Suplente

Dra. Teresa López Lara

Suplente

  
Dr. Aurelio Domínguez González

Director de la Facultad



Firma



Firma



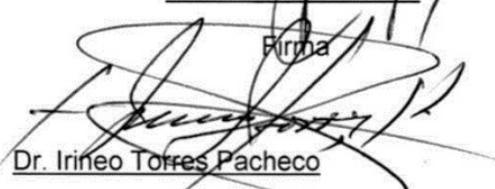
Firma



Firma



Firma

  
Dr. Irineo Torres Pacheco

Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Enero del 2012  
México

## **RESUMEN**

*Las curvas características suelo-agua representan la relación entre la humedad del suelo y la succión al interior de los mismos. Esta última se presenta en suelos como una variable de estado para describir las características esfuerzo-deformación de los suelos y por lo tanto es indispensable para entender el comportamiento de estos materiales. A pesar de su importancia, la relación succión-humedad no es única y depende de la trayectoria de humedecimiento y/o secado de los suelos.*

*En este trabajo de tesis se presentan los resultados de un modelo sólido-poroso de carácter computacional que modela la estructura interna de los suelos y simula en ella los fenómenos de humedecimiento y secado, lo que permite evaluar los grados de saturación así como la succión en los suelos no saturados para cualquier trayectoria de secado-humedecimiento. Estos resultados teóricos se comparan con las curvas características experimentales frontera, así como con las derivadas de ciclos histeréticos de secado-humedecimiento de un conjunto de materiales arenosos. Las comparaciones muestran que el modelo poroso propuesto aquí puede ser utilizado para reproducir las curvas características experimentales de los suelos.*

*El modelo es implementado en ambiente ANSYS (2009) y se conforma de 40 subrutinas escritas en lenguaje APDL (fortran modificado). El tiempo de espera en la solución de un problema es variable y depende del número de elementos requeridos para reproducir la estructura interna de los suelos.*

*(Palabras clave: succión, modelo poroso, suelos no saturados)*

## **SUMMARY**

*The Soil-Water characteristic curves are the relationship between soil moisture and soil suction. The latter occur in soils as a state variable to describe the stress-strain characteristics of soils and therefore it is essential to understand the behavior of these materials. Despite its importance, the suction-moisture relationship is not unique and depends on wetting and/or drying paths of soils*

*The results of a computational solid-porous model which reproduces internal structures of soils and therefore simulates the wetting and drying of soils are presented herein. This allows the model to evaluate the saturation degrees as well as soil suction in unsaturated soils for any wetting-drying path. These theoretical results are compared with experimental boundary characteristic curves as well as with experimental scanning curves of a set of granular materials. The comparisons show that the porous model presented herein can be used to reproduce the soil-water characteristic curves of soils.*

*The model is implemented in ANSYS (2009) and is made of about 40 subroutines which were written in APDL (ANSYS Parametric Design Language, which is a modified version of Fortran Language). The elapsed time at the end of each simulation is variable and it depends on the number of elements required to reproduce the internal soil structure.*

*(Keywords: suction, porous model, unsaturated soils)*

# *Dedicatoria*

*A mis incondicionales:*

*Mi padre el Ingeniero José Arroyo, mi madre Carmen*

*Mis hermanos Omar, Cindy, Joel y José*

*Gracias*

# *Agradecimientos*

*Al director de este trabajo de tesis, el Dr. Jaime Horta Rangel, cuya amabilidad y sencillez muestran singular riqueza en espíritu, un apoyo invaluable e imprescindible para realizar este trabajo*

*Al Dr. Eduardo Rojas González, cuyo trabajo constante e irrenunciable inspira a cualquiera siendo la mejor guía que cualquier estudiante pueda tener*

*A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, coordinadora de la Maestría en Mecánica de Suelos de quien recibí valiosos consejos y recomendaciones que definitivamente contribuyeron enormemente a enriquecer este trabajo*

*A la Universidad Autónoma de Querétaro que me abrió sus puertas como lo ha hecho desde sus inicios con todos los hijos de México*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el imprescindible apoyo que finalmente derivó en esta investigación*

*A mis amigos*

*“Hasta la victoria siempre”*  
*Ernesto “Ché” Guevara*

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
I.1 JUSTIFICACIÓN .....	1
I.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.2.1 <i>Distribución porosimétrica y dificultades en medirla de manera experimental.</i> .....	5
1.2.1.1 <i>Porosimetría por intrusión de mercurio</i> .....	5
1.2.1.2 <i>Tratamiento de imágenes mediante microscopio electrónico de barrido (SEM).</i> .....	6
I.2.2 <i>Succión y curvas de retención agua-suelo.</i> .....	7
I.3 OBJETIVOS .....	9
I.4 HIPÓTESIS .....	9
1.5 CONTENIDO DEL TRABAJO .....	9
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>11</b>
<b>SUCCIÓN, ESTRUCTURA Y MODELOS POROSOS EXISTENTES PARA SUELOS NO SATURADOS</b> .....	<b>11</b>
II.1 SUCCIÓN Y CAPILARIDAD EN SUELOS .....	11
II.1.2 <i>Tensión superficial.</i> .....	11
II.1.3 <i>Ecuación de Young-Laplace.</i> .....	13
II.1.4 <i>Ecuación de Kelvin.</i> .....	14

II.1.5	<i>Succión matricial y succión osmótica</i> .....	14
II.1.6	<i>Técnicas experimentales de medición de la succión</i> .....	17
II.1.6.1	<i>Técnica de traslación de ejes.</i> .....	18
II.2	CURVAS DE RETENCIÓN AGUA-SUELO. ....	19
II.3	POROSIMETRÍA .....	22
II.3.1	<i>Porosimetría de mercurio</i> .....	22
II.3.2	<i>Estimación de la porosimetría por métodos indirectos</i> .....	23
II.4	ESTRUCTURA DE LOS SUELOS GRANULARES .....	26
II.5	MODELOS POROSOS. ....	28
II.5.1	<i>Modelo de Androutsopoulos y Mann</i> .....	28
II.5.2	<i>Modelo de Simms y Yanful.</i> .....	29
II.5.3	<i>Modelo de Rojas et al.</i> .....	31
<b>CAPÍTULO III</b>	.....	<b>34</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	.....	<b>34</b>
III.1.	ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ESTUDIADOS....	34
III.1.1	<i>Peso específico relativo de los sólidos</i> .....	35
III.1.2	<i>Superficie específica</i> .....	37
III.1.3	<i>Relación de vacíos y porosidad</i> .....	38
III.1.4	<i>Estudio granulométrico.</i> .....	40
III.1.5	<i>Curvas experimentales de retención agua-suelo.</i> .....	42

III.1.6	<i>Porosimetría</i> .....	45
III.1.6	<i>Técnica experimental</i> .....	45
III.1.6	<i>Técnica teórica indirecta</i> .....	45
III.2	PLANTEAMIENTO DEL MODELO SÓLIDO-POROSO .....	49
III.2.1	<i>Frecuencias de sólidos y poros</i> .....	50
III.2.2	<i>Distribución de sólidos y poros escalados en un volumen finito</i> .....	55
III.2.2.1	<i>Leyes de escalado para los sólidos y poros</i> .....	55
III.2.2.2	<i>Distribución de elementos escalados en la malla de 100 por 100 pixeles</i> .....	56
III.2.3	<i>Elementos tipo poro</i> .....	58
III.2.4	<i>Enlaces entre poros</i> .....	59
III.2.5	<i>Procesos de secado – humedecimiento del modelo</i> .....	60
III.2.5.1	<i>Efecto cuello de botella</i> .....	60
III.2.5.2	<i>Modelo Mecánico – Estructural</i> .....	63
III.2.5.3	<i>Activación de poros y enlaces</i> .....	65
III.2.5.4	<i>Curvas de histéresis (Scanning curves)</i> .....	68
	<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>69</b>
	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>69</b>
IV.1	RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA TODOS LOS SUELOS ESTUDIADOS.	69
IV.1.1	A-1.....	69

IV.1.2	A-2 .....	71
IV.1.3	A-3.....	73
IV.1.4	A-4 .....	75
IV.1.5	A-5.....	77
IV.1.6	A-6 .....	79
IV.1.7	A-7.....	82
IV.1.8	<i>Curvas de retención agua-suelo y estudio granulométrico de todos los suelos en estudio.</i>	84
IV.2	RESULTADOS DE LAS PREDICCIONES DE LAS CURVAS DE RETENCIÓN AGUA-SUELO ARROJADAS POR EL MODELO SÓLIDO-POROSO .....	87
IV.2.1	<i>Comparaciones teórico-experimental</i> .....	88
IV.2.1.1	A-1.....	88
IV.2.1.2	A-2 .....	89
IV.2.1.3	A-3 .....	89
IV.2.1.4	A-4 .....	90
IV.2.1.5	A-5 .....	90
IV.2.1.6	A-6 .....	91
IV.2.1.7	A-7.....	91
IV.2.1.9	<i>Resultados teóricos de todas las curvas de retención agua-suelo</i> .....	95
IV.2.2	<i>Resultados teóricos adicionales del modelo sólido-poroso</i> .....	95

IV.2.2.1	A-1.....	96
IV.2.2.2	A-2 .....	97
IV.2.2.3	A-3 .....	98
IV.2.2.4	A-4 .....	99
IV.2.2.5	A-5 .....	100
IV.2.2.6	A-6 .....	101
IV.2.3	<i>Estudio estadístico de correlación teórico-experimental.....</i>	102
IV.2.4	<i>Evaluación de la capacidad del modelo para reproducir las curvas de retención agua-suelo.</i>	108
IV.2.5	<i>Estudio del comportamiento de la curva de retención agua-suelo bajo diferentes distribuciones granulométricas y porosimétricas.....</i>	111
IV.2.5.1	<i>Distribución porosimétrica .....</i>	111
IV.2.5.2	<i>Distribución granulométrica.....</i>	115
IV.2.5.3	<i>Arreglos estructurales probables del suelo modelado.....</i>	115
<b>CAPÍTULO V</b>	.....	<b>116</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	.....	<b>116</b>
V.1	TRABAJOS A FUTURO.....	117
<b>REFERENCIAS</b>	.....	<b>119</b>

## INTRODUCCION

**Capítulo I** La complejidad ingenieril de los suelos no saturados es causada entre otras cosas por la interacción que existe entre las fases que lo conforman, donde la inclusión de la fase gaseosa no presente en los suelos cuya condición es la saturada, conduce a la succión o estado de tensión en la fase líquida de la cual depende el estado hidro-mecánico de los suelos. Como se verá más adelante, la succión es un parámetro de capital importancia de la investigación en suelos no saturados ya que existe mucha información que puede ser obtenida mediante las curvas de retención agua-suelo, como lo es la conductividad hidráulica, resistencia al esfuerzo cortante, cambios volumétricos, estado de esfuerzos, distribución de tamaños de poro (Zhou y Jian, 2004) e incluso la consideración de estas curvas dentro de modelos constitutivos de suelos no saturados ha funcionado de manera adecuada (Rojas et al., 2009).

Este trabajo centra su atención precisamente en el estudio que arreglo geométrico de las partículas sólidas de un suelo guarda con sus vacíos derivados de la estructura global del suelo para consecuentemente estudiar el estado de tensión en el agua en diversas etapas de humedecimiento y secado del mismo. Esto último a su vez conduce a la obtención de las curvas de retención agua-suelo en humedecimiento, secado y ciclos de histéresis hidráulica. La estructura del suelo y la simulación de los cambios de humedad, se modelan de manera explícita mediante una serie de subrutinas programadas en lenguaje APDL (Fortran modificado) e implementadas a través del programa de elementos finitos ANSYS (2009).

### I.1 JUSTIFICACIÓN

Los suelos compactados, rellenos de escombros y suelos residuales forman parte de los materiales no saturados a los que se enfrentan los ingenieros especializados en suelos. Entender el comportamiento mecánico e hidráulico de estos suelos, es de gran importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos, rellenos, diques y presas de tierra. Esto último

indudablemente debe entenderse como un problema de capital importancia en el momento en que se reconoce que la economía de los países del mundo se basa en gran medida indiscutiblemente en la modernidad de su infraestructura. Estos suelos están sujetos a cambios de humedad de origen natural o artificial que causan importantes modificaciones en su capacidad portante (resistencia y deformabilidad) cuyas causas radican en la diversidad de climas que se presentan en la república Mexicana y en el mundo. Por tal motivo, el estudio del comportamiento de los suelos no saturados ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación en las últimas décadas (como el que aquí se presenta) debido a las dificultades para la aplicación de la Mecánica de Suelos tradicional a los problemas geotécnicos que se plantean en este tipo de material.

Uno de los motivos del rezago en el avance investigativo en el campo de la Mecánica de Suelos No Saturados respecto del de los Saturados se explica reconociendo que las sedes de estudio donde primero se investigó a los suelos como material de construcción y soporte de estructuras fueron países desarrollados donde las condiciones de humedad del suelo han privilegiado su estudio a la condición saturada (Países Bajos, Reino Unido, Europa Central, etc.), esto a pesar de que un porcentaje alto de la población mundial se encuentra en regiones áridas en el mundo donde el nivel de aguas freáticas (N.A.F.) es profundo, como ejemplo de esto, Fredlund (1996) señala que existe una fuerte relación entre las regiones áridas y la densidad de población acotada por las latitudes norte  $+10^{\circ}$  y  $+40^{\circ}$  y longitudes  $10^{\circ}$  y  $40^{\circ}$  del planeta Tierra (Figura 1.1).

De la Figura 1.1 se puede ver que la mayoría de la superficie terrestre emergida se ve sometida a procesos de desecación a causa de los estados climatológicos o de otro origen (vegetación, etc.) de los que en más del 50% de estos procesos de desecación pueden ser altamente significativos en su comportamiento (Fredlund, 1996).

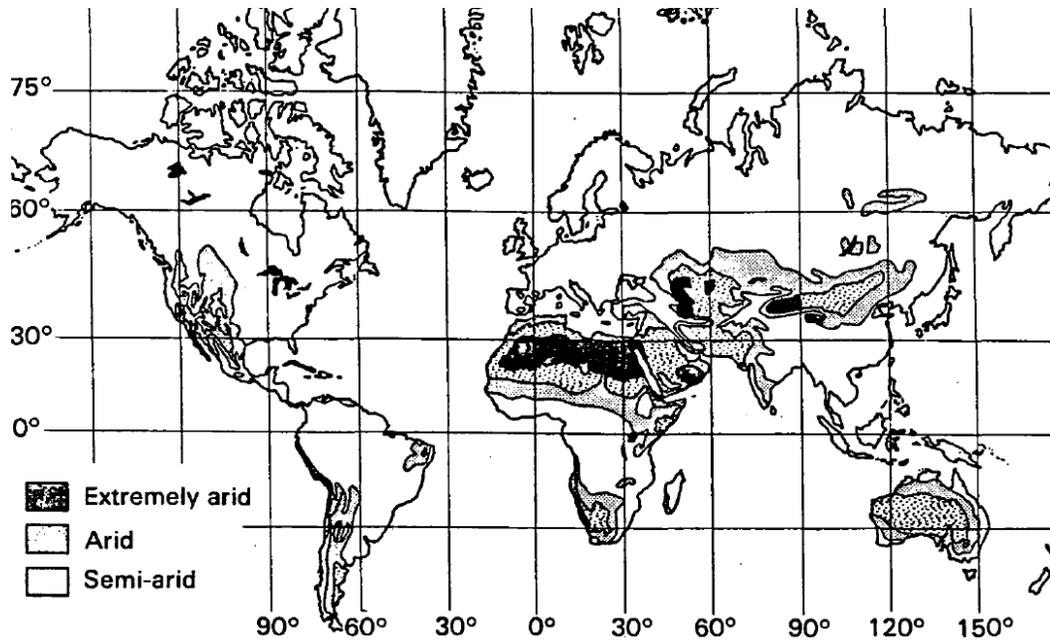


Figura 1.1. Mapa que muestra regiones extremadamente áridas, regiones semi-áridas en el mundo (adaptada de Fredlund, 1996).

El territorio de la República Mexicana cuenta también a su vez con una gran variedad de climas y zonas áridas; la Figura 1.2 ilustra la distribución geográfica de estas zonas donde los climas áridos en la República Mexicana son en total alrededor del 61.34 % del territorio nacional. La característica fundamental que distingue los climas áridos y semiáridos de los húmedos es que el déficit de humedad es muy severo a lo largo del año. Los climas áridos y húmedos se hallan definidos por una época de lluvias muy corta (entre 3 y 5 meses máximo para los climas áridos y semi-áridos respectivamente).

Los motivos anteriormente expuestos señalan la enorme importancia que presenta para los países tanto en vías de desarrollo como industrializados el estudio de los suelos en su condición no saturada. Más adelante en este trabajo se verificarán también los motivos por los cuales algunos especialistas en la materia entienden el estudio de la Mecánica de Suelos no saturados como un campo de mayor generalidad y amplitud que el de los materiales saturados considerando estos últimos dentro de un caso particular.

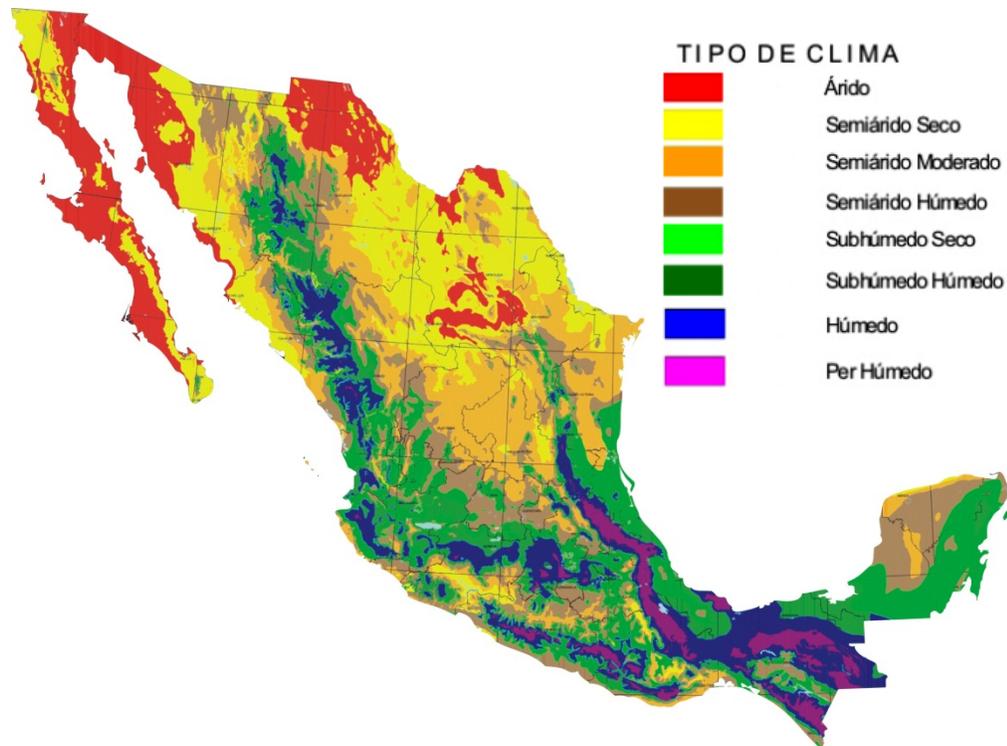


Figura 1.2. Climas de la República Mexicana de acuerdo al modelo Norteamericano de cambio climático (Comisión Nacional de Zonas Áridas y Universidad Autónoma de Chapingo, 2001).

## I.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para describir por completo un medio poroso es muy deseable identificar la ubicación espacial de los poros y de los vacíos que lo conforman al interior debido a que esto tiene diversas implicaciones en el comportamiento hidro-mecánico de los suelos no saturados, sin embargo, la correcta caracterización estructural de un medio poroso representa un reto formidable debido a la complejidad de la estructura donde por ejemplo, se pueden encontrar millones o billones de poros en un solo gramo de suelo variando sus tamaños desde 0.01 hasta 500  $\mu\text{m}$  (Rojas, 2008). En este sentido, las técnicas experimentales como la intrusión de mercurio o el análisis de imágenes hechas con el auxilio de microscopios electrónicos no son de mucha ayuda y solamente sirven para medir los tamaños de los poros y sus frecuencias y no para ubicar espacialmente los vacíos al interior del medio poroso.

### **1.2.1 Distribución porosimétrica y dificultades en medirla de manera experimental.**

El término *porosimetría* en medios porosos se refiere a la determinación de diversos aspectos cuantificables de la naturaleza de los poros tales como su volumen total, su área superficial, sus diferentes dimensiones y frecuencia con que se presenta cada una de estas dimensiones en el medio poroso. La característica más simple de un medio poroso es su porosidad, propiedad extensiva directamente relacionada a la relación de vacíos que mide el volumen total que ocupan los vacíos en el suelo y de la cual se hablará en el capítulo II. Existen diversas técnicas experimentales para medir la relación entre los diversos tamaños que tienen los poros y la frecuencia con que estos se presentan en un medio poroso (distribución de frecuencias de tamaños de poro), sin embargo, la interpretación de los datos no es clara y las técnicas tienen aún ciertas deficiencias debido a la complejidad de estas estructuras donde por ejemplo,

#### **I.2.1.1 Porosimetría por intrusión de mercurio**

La mayor limitación de la porosimetría de mercurio se debe a la propia complejidad del sistema poroso de la gran mayoría de los sólidos naturales. En primer lugar, la técnica está basada en un modelo de tubos capilares, lo que quiere decir que supone secciones circulares para los vacíos que ocupa gradualmente el mercurio intruído en la masa porosa, hecho que no se cumple en ningún medio poroso y representa únicamente una aproximación. En segundo lugar, la geometría de las conexiones o enlaces entre poros de diferente dimensión provoca que los poros tipo sitio (ver capítulo II) se caractericen incompletamente y, que los poros tipo enlace de menores dimensiones se sobrestimen. Otra complicación surge al tomar en cuenta que pueden existir poros comparativamente mayores al interior cuyo único medio de acceso son poros menores, en estos casos, la porosimetría por intrusión de mercurio registrará incorrectamente el volumen completo de estos poros “cuello de botella” como si tuvieran un diámetro aparente menor, y es que, un supuesto poro grueso puede observarse como una suma de poros medianos o pequeños y medianos debido a que la cantidad de mercurio necesario para ocupar dichos poros sería la misma. La técnica y el entendimiento de la manera en que el mercurio fluye a través de una masa porosa (percolación) no está madura tampoco y existen muchas cuestiones que no han

sido resueltas (Androustopoulos y Mann, 1978; Simms y Yanful, 2004). Además, las presiones empleadas en el desarrollo de un ensayo de porosimetría son tan elevadas que puede surgir la cuestión de si la estructura porosa natural puede ser dañada y modificada durante el mismo y la utilización de este método podría alterar la distribución de volumen de poro natural que se está midiendo.

#### **I.2.1.2 Tratamiento de imágenes mediante microscopio electrónico de barrido (SEM).**

La microscopía electrónica de barrido, SEM (*Scanning Electron Microscope*) es una técnica ampliamente utilizada, fácil de utilizar e interpretar, de gran utilidad y casi indispensable para el estudio de las características texturales de medios porosos, y en particular, de su sistema poroso constitutivo. Las imágenes recogidas por el detector de BSE vienen dadas en escala de grises de tal manera que el histograma de escala de grises está comprendido desde el 0, que corresponde al negro, hasta el 255, que corresponde al blanco y se asocia un valor de escala de grises a cada fase del sistema poroso en función de su peso atómico; así, para pesos atómicos bajos como el aire o las resinas se tiende a un valor de cero (negro) mientras que para minerales con pesos atómicos altos, como por ejemplo óxidos de *Fe*, el valor de escala de grises tiende a 255 (blanco) (Krinsely et al., 1998). Finalmente, El sistema poroso se determina binarizando la imagen en espacio poroso (resina y aire) y en matriz del suelo.

La exactitud en la caracterización del sistema poroso con esta técnica puede estar influenciada por diferentes errores entre los cuales se puede destacar el error producido por la impregnación de la muestra con resina, pulido o presencia de burbujas de aire de la misma resina, entre otros. La imagen y el software también pueden producir errores, tales como el error de escala, brillo, poros en el borde de la imagen o la elección de los límites para resolver los poros de los granos.

Otra desventaja que no se puede perder de vista que presenta esta técnica basada en el análisis de imágenes, es su dependencia con el usuario y con el tipo de medio poroso estudiado;

el usuario debe elegir la amplificación óptima para caracterizar el sistema poroso y situarlo en el marco de referencia. Es habitual encontrar en bibliografía, por ejemplo Berryman y Blair (1986) y Lebro et al., (1999), que la mejor amplificación es la que produce los resultados más cercanos a los obtenidos con otras técnicas y esto implicaría que el tratamiento de imágenes mediante el SEM no es una técnica independiente de caracterización del sistema poroso. Por último, la elección de los parámetros en el tratamiento de imágenes depende fuertemente del tipo de medio poroso estudiado (Benavente et al., 2001).

La dificultad principal en esta técnica es que no es posible cuantificar a plenitud los poros muy pequeños de orden nanométrico con la ayuda de esta técnica que se basa en el contraste de áreas.

### **I.2.2 Succión y curvas de retención agua-suelo.**

Si bien por debajo del valor de entrada de aire (VAE) de los suelos las relaciones son relativamente simples con lo cual es posible el uso de una sola variable de estado como lo es por ejemplo el esfuerzo efectivo  $\sigma'$  (Terzaghi, 1956), para caracterizar cambios volumétricos a medida que se incrementa la succión y se sobrepasa el VAE, el suelo comienza a de-saturarse sustancialmente, con lo cual el efecto de la presión de poros de agua en el cambio de volumen disminuye como función no lineal del grado de saturación. Por esta y otras razones, muchos investigadores han recurrido a modelos tri-dimensionales de la superficie constitutiva para los que el cambio de volumen es una función de dos variables independientes: la tensión neta ( $p - u_a$ ) y la succión matricial ( $u_a - u_w$ ). Este tipo de modelos requieren de un programa completo de laboratorio para determinar todos los parámetros necesarios en las relaciones volumen – permeabilidad – saturación – estado de tensiones. La succión pues, se considera una variable de estado y por ello mismo se dedican tratados completos al estudio de la determinación precisa de la succión (Alonso et al, 1990; Gens y Alonso, 1992; Wheeler, S. J. y Sivakumar, V., 1995, Rojas et al., 2009).

Es común en Mecánica de Suelos representar la relación que guarda el estado de succión

de un suelo con su grado de saturación (o alguna otra propiedad que refleje la cantidad de agua presente en el suelo) en un gráfico donde los valores de succión se consignan en el eje de las abscisas y los de los grados de saturación en el de las ordenadas (Figura 1.3). Este gráfico tiene como nombre comúnmente aceptado el de CURVAS DE RETENCIÓN AGUA-SUELO. Es aceptado el nombre de “Curvas Características Suelo-Agua” en la lengua inglesa (*Soil – Water Characteristic Curves*). Estas denominaciones se verán justificadas en los siguientes capítulos.

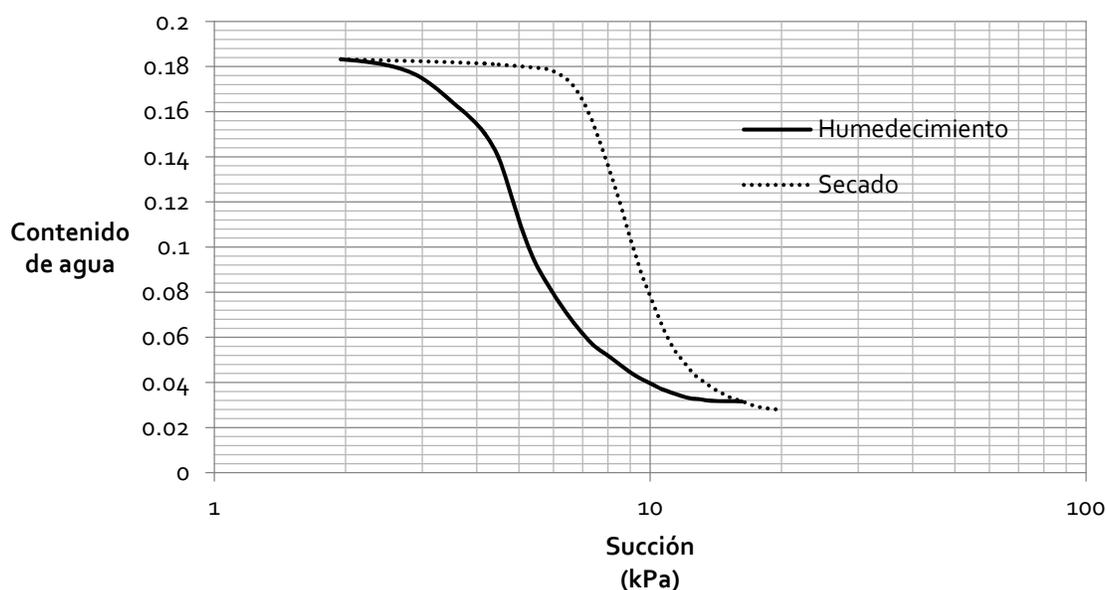


Figura 1.3. Curva de retención agua-suelo para un material arenoso.

Teniendo en mente las ideas previas se verifica la importancia que tiene un conocimiento certero de la curva de retención agua-suelo que no puede obtenerse de manera teórica con relaciones simples debido a que, como se puede ver en la Figura 1.3, la relación humedad-succión no es única en virtud de que, como se explicará en el capítulo IV, son distintos los procesos que dan origen a las ramas de secado y de humedecimiento y debe por tanto recurrirse a modelos que describan de manera adecuada su estructura porosa derivada del arreglo estructural de sus partículas sólidas y que simulen estos procesos de humedecimiento y secado de los suelos.

### **I.3 OBJETIVOS**

- Evaluar la capacidad del modelo sólido-poroso para reproducir curvas de retención agua-suelo.
- Estudiar la manera en que se ven modificadas dichas curvas bajo diferentes distribuciones granulométricas y porosimétricas utilizando el modelo.
- Describir un posible arreglo estructural que se establece por las partículas sólidas al interior de un suelo no saturado.

### **I.4 HIPÓTESIS**

Es posible analizar la interacción que se da entre las fases que se presentan al interior de un suelo no saturado mediante la implementación de un modelo a escala que sea representativo de un suelo no saturado y que simule los fenómenos de drenado y humedecimiento de manera adecuada. De manera más concreta, es posible simular el estado de succión debido a los cambios de humedad en un medio poroso mediante la aplicación correcta de los procesos que dan lugar a que cambie el contenido de agua en el suelo no saturado.

Un modelo descriptivo del arreglo estructural que guardan las partículas de un suelo granular debe ser siempre de carácter aleatorio; esto conduce a presumir que es factible plantear una simulación de carácter computacional de elemento finito que represente de manera adecuada el arreglo aleatorio que guardan los componentes de los suelos granulares no saturados a saber, partículas minerales, agua y aire.

### **1.5 CONTENIDO DEL TRABAJO**

En el capítulo II se describen los modelos que se han utilizado para llevar a cabo un acercamiento al problema dado y además se señalan las características básicas y la diferencia que ellos guardan con el modelo planteado en este trabajo, otorgando un panorama amplio de las razones por las cuales se decidió implementar este modelo numérico-computacional para el

desarrollo del trabajo. Adicionalmente con el objetivo de ubicar correctamente al lector en el marco del tema tratado se fundamentan de manera teórica las variables que intervienen en el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo III se detalla con suficiente precisión lo que concierne a la experimentación que condujo a la evaluación de las características de los materiales utilizados en este estudio y sus curvas de retención agua suelo reales, mismas que se utilizarán como punto de comparación y posterior validación del modelo propuesto en este trabajo. También se detallará la manera en que se construye el modelo sólido-poroso a partir de su programación en lenguaje APDL basándose en ciertas hipótesis fundamentadas que permiten simular el secado y humedecimiento de los suelos.

El capítulo IV se dedica en primera instancia a las características básicas y curvas de retención agua-suelo experimentales de los suelos utilizados. En seguida se establecen las predicciones que el modelo sólido-poroso hace respecto de las curvas de retención reales y se hace un análisis estadístico que evalúa la capacidad del modelo para reproducir dichas curvas.

En el capítulo V se presentan las conclusiones además de algunas recomendaciones para la utilización del modelo. Se incluyen también las bondades, deficiencias del mismo y una serie de trabajos a futuro que escapan del alcance de este trabajo de tesis.

# Capítulo II

## SUCCIÓN, ESTRUCTURA Y MODELOS POROSOS EXISTENTES PARA SUELOS NO SATURADOS

### II.1 SUCCIÓN Y CAPILARIDAD EN SUELOS.

Las moléculas de agua se ven sometidas a fuerzas de cohesión en todas direcciones por las demás moléculas que las rodean (Figura 2.1a); estas fuerzas finalmente se encuentran en equilibrio al interior del fluido donde el resultado de esto último implica que para las moléculas ubicadas en la superficie se presente una fuerza neta perpendicular debido a que las fuerzas de adhesión con las moléculas de aire son menores que las de cohesión con las de su misma naturaleza (Figura 2.1b). Estas interacciones entre las moléculas de agua y las de aire son denominadas fenómenos de superficie.

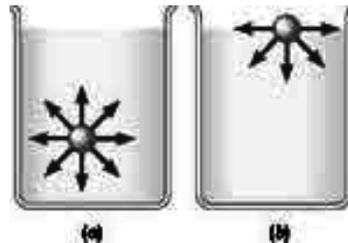


Figura 2.1. a) Molécula de agua al interior de un depósito, b) Molécula de agua en la superficie de un depósito.

#### II.1.2 Tensión superficial.

Considérese una sección vertical de algún líquido (Figura 2.2). Para definir la tensión superficial Dullien (1992) considera una sección vertical de una burbuja de algún líquido. Esta misma sección está sujeta a tres esfuerzos: la tensión  $T_s$  y las dos presiones  $P'$  y  $P''$  donde estas dos últimas tienen la misma dirección pero sentidos opuestos. Se dice que la sección mostrada en la Figura 2.2 está en un estado de tensión uniforme si:

- $T_s$  es perpendicular a la sección en todos los puntos y

b)  $T_s$  tiene el mismo valor en todos los puntos de la superficie. En este caso se le puede llamar tensión superficial.

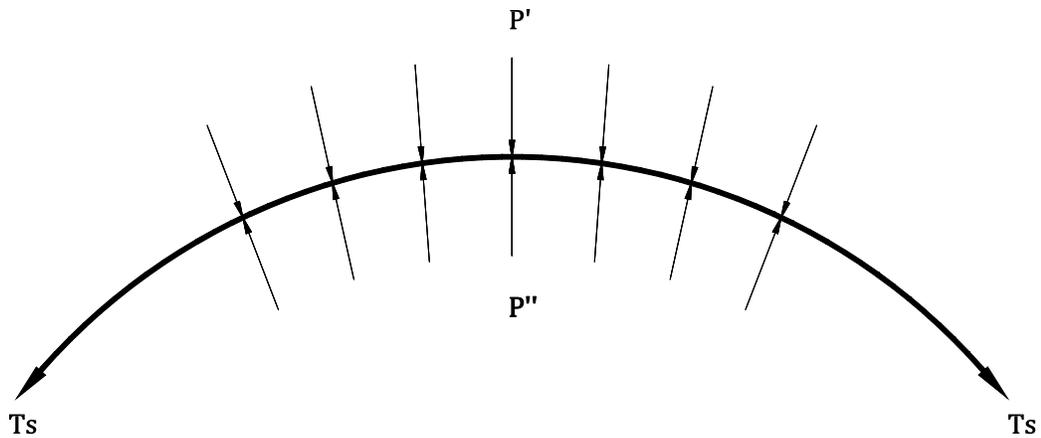


Figura 2.2. Sección circular en estado de tensión superficial (Dullien, 1992).

Es evidente que el efecto de  $T_s$  sería el de reducir el tamaño de la burbuja y esto sucederá a menos que se le oponga una fuerza neta igual a  $(P'' - P')$  lo suficientemente grande.

Cuadro 2.1. Tensión superficial del agua en función de la temperatura (Streeter et al, 2004).

Temperatura (°C)	$T_s \times 10^{-2}$ (N/m)
10	7.48
15	7.41
20	7.36
25	7.26
30	7.18

Las unidades de  $T_s$  se expresan en  $MT^{-2}$  (fuerza por unidad de longitud). Como es de esperarse, el valor de la tensión superficial depende de las propiedades de los componentes localizados en la interfase y por lo tanto varía con la temperatura. El Cuadro 2.1 consigna algunos valores de este parámetro en función de la temperatura para el agua haciendo interfase con el aire.

En relación a los valores de la tensión superficial mercurio-aire, Giesche (2006) señala

que se puede utilizar un valor de  $0.485 \text{ N/m}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### II.1.3 Ecuación de Young-Laplace.

En Mecánica de Suelos una de las simplificaciones respecto de la matriz porosa consiste en simplificar la complicada geometría al interior de los suelos hacia figuras regulares que comúnmente son de secciones circulares (Figura 2.3).

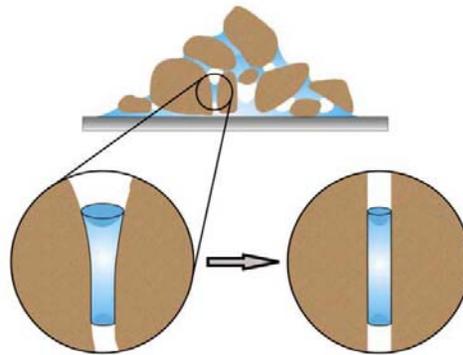


Figura 2.3. Idealización de los poros en los suelos como capilares cilíndricos (Or y Tuller, 2005).

Tomando en cuenta lo anterior, se plantea un análisis de la Figura 2.4 donde los vacíos se representan por el llamado modelo capilar (Or y Tuller, 2005).

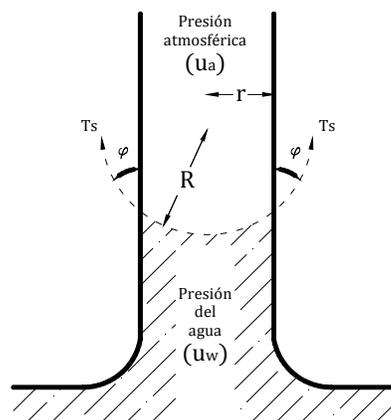


Figura 2.4. Modelo capilar utilizado en Mecánica de Suelos (Or y Tuller, 2005).

Un análisis permite establecer mediante el equilibrio de fuerzas en el modelo capilar que:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \varphi}{r} \quad (2.1)$$

Donde,  $r$  es el radio del capilar,  $u_a$  es la presión del aire,  $u_w$  es la presión del agua y  $\varphi$  tiene el significado previamente señalado. Si se hace un análisis de las implicaciones que conlleva el considerar la curvatura del menisco capilar en un tubo de esa misma naturaleza, se puede escribir  $h = \frac{2T_s \cos \varphi}{r\gamma_w}$  con lo que se puede obtener la altura  $h$  de ascensión del tubo capilar y en donde  $\gamma_w$  representa el peso específico del agua contenida en el tubo capilar de radio  $r$  (Figura 2.3). Juárez y Rico (2008) ejecutan una demostración de la obtención de la ecuación 2.1 y de la relación con la que se obtiene la altura de ascensión capilar que vale la pena consultar.

#### II.1.4 Ecuación de Kelvin

Lord Kelvin derivó en 1871 una ecuación notablemente simple la cual correlaciona el cambio de presión a través de una interfase aire-agua con la presión de vapor sobre la interfase (Lu and Likos, 2004). Para el caso de un tubo capilar como el mostrado en la Figura 2.3, la ecuación de Kelvin se puede expresar como:

$$u_a - u_w = -\frac{\bar{R}T}{\nu_w} \ln RH \quad (2.2)$$

En donde  $RH$  representa a la humedad relativa ( $RH = u_{v1}/u_{v0}$ ), donde  $u_{v0}$  es el cociente de la presión de vapor saturada a la temperatura  $T$  y  $u_{v1}$  es la presión de vapor en el tubo capilar;  $\bar{R}$  es la constante universal de los gases y le corresponde el valor de  $8.314 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{mol} \cdot \text{K}$  (Levine, 2004);  $\nu_w$  expresa al volumen molar parcial del vapor de agua y es igual a  $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$  (Lu y Likos, 2004);  $T$  es la temperatura en grados Kelvin.

#### II.1.5 Succión matricial y succión osmótica

El término succión o *potencial de agua* designa a la integrante del estado de esfuerzo que

tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo (Barrera y Garnica, 2002) y es una consecuencia de la interacción entre fases del medio no saturado, de su estructura y de las propiedades de las fases sólida, líquida y gaseosa (Lu y Likos, 2004; Juárez y Rico, 2008; Lu et al, 2008).

Despreciando el potencial gravitacional, se puede considerar como primera aproximación que la succión en suelos no saturados se compone por la succión matricial  $S_m$  y la succión osmótica  $S_{osm}$ . El potencial mátrico o succión es generado por los efectos conjuntos de capilaridad (ver sección II.1.6) y adsorción donde los efectos capilares provienen de las presiones desarrolladas por el menisco capilar (Alfaro, 2008). La atracción por adsorción se origina como consecuencia de las superficies de sólidos descompensados eléctricamente donde las moléculas del agua actúan como dipolos y son atraídas por fuerzas electrostáticas sobre la superficie de las partículas de los constituyentes del suelo (Figura 2.5), por tanto, la adsorción es la resultante de la diferencia entre las fuerzas de atracción y de repulsión que se presentan entre moléculas e iones de diferentes fases (sólida y líquida) al ser puestas en contacto sus superficies.

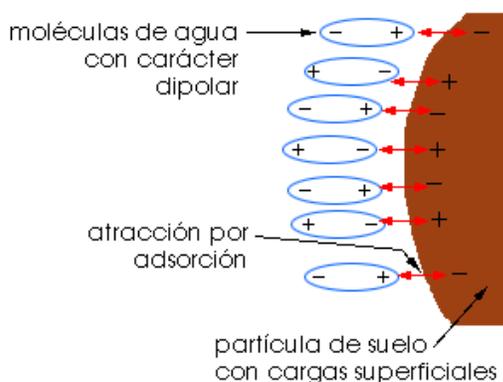


Figura 2.5. Partícula de suelo con moléculas de agua en su superficie.

En realidad, es difícil discernir entre las contribuciones que a la succión ofrecen los efectos de capilaridad y los de adsorción por separado y se ha convenido en llamarlos potencial mátrico en su conjunto (Marsal, 1979).

El potencial osmótico es inducido por la diferencia de concentraciones iónicas en el líquido intersticial de las partículas de arcilla (Richards, 1966; Libardi, 1995). Cuando una partícula de arcilla queda rodeada de agua, los átomos de oxígeno del cristal quedan en la

superficie de éstos y las cargas negativas de los átomos de oxígeno en consecuencia crean en la superficie de la partícula de arcilla un campo eléctrico hacia el exterior con lo cual las moléculas del agua vecina se ionizan de manera que, los iones positivos de hidrógeno y los cationes que pudiera haber en disolución en el agua son captados. La atracción eléctrica del cristal disminuye con la distancia de manera que la concentración de cationes en la atmósfera del cristal disminuye también (Juárez y Rico, 2008). La atmósfera de cationes muy cercanos y fuertemente unidos al cristal por vínculos eléctricos, así como el grupo de cationes ya ligeramente más desvinculados por su lejanía a la superficie de la partícula suelen considerarse como dos diferentes capas, de manera que al sistema en conjunto se le suele llamar sistema de la *doble capa difusa*. El espesor de dicha atmósfera se ha estimado en 0.1 a 1 micrones en soluciones muy diluidas y se considera mucho más pequeño en soluciones concentradas.

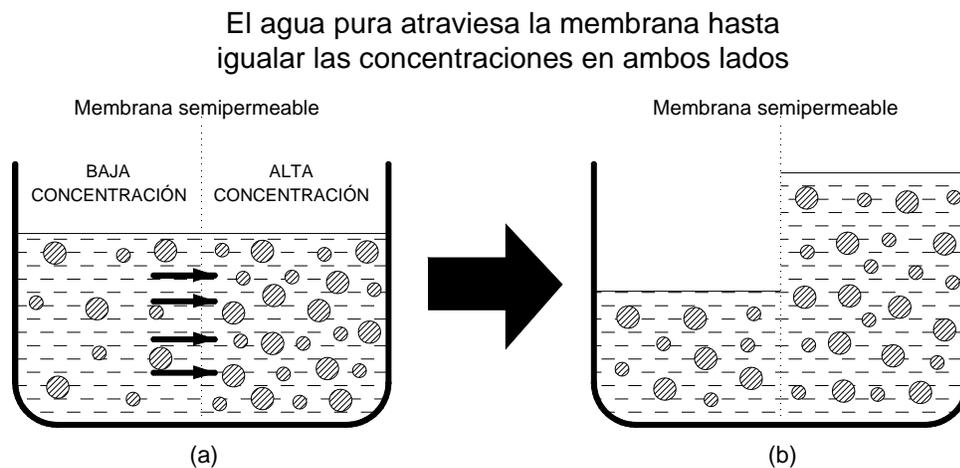


Figura 2.6. Presencia de presión osmótica a través de una membrana semipermeable (Levine, 2004).

Como se puede ver en la Figura 2.6, el potencial químico de la solución en una atmósfera con concentraciones menores de iones es mayor que la que posee mayor concentración de iones (Figura 2.6a) y por tanto fluirán a través de la membrana semipermeable de izquierda a derecha hasta que se igualen las concentraciones (Figura 2.6b), de manera que, Alfaro (2008) define la succión osmótica en los suelos como la presión negativa de agua pura a la que habría que someter a una masa de agua con la misma composición que la intersticial, para estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable (membrana idealizada permeable únicamente al agua y no a los iones disueltos en ella) (Figura 2.6).

En este contexto, la magnitud de la succión o potencial total corresponde al trabajo de las fuerzas de capilaridad, adsorción y osmosis. La succión total, se representa en unidades de presión y puede ser expresada:

$$S_t = S_m + S_{osm} \quad (2.3)$$

Debe notarse de lo dicho previamente que ambos lados de la ecuación 2.3 pudieran estar igualados al potencial mátrico  $S_m$  si la concentración iónica de sales disueltas en el agua tendiera a cero, es decir, si el agua contenida en la matriz porosa del suelo fuera por ejemplo, agua destilada; esto último eliminaría la posibilidad de poseer concentraciones iónicas diferenciales en las colindancias directas y en las cercanías de las partículas de suelo y por tanto, la contribución del potencial osmótico sería nula.

### **II.1.6 Técnicas experimentales de medición de la succión**

Las técnicas experimentales más utilizadas para medir la succión ya sea su componente total o las contribuciones mátrica u osmótica por separado, se exponen en el Cuadro 2.2. De este Cuadro se puede constatar la inviabilidad de utilizar únicamente una técnica para medir el estado de succión en todos los suelos y esto se debe principalmente a los rangos tan amplios sobre los cuales se mueven los valores de esta variable de estado de los suelos no saturados que a su vez están relacionados con el rango tan amplio de tamaños de poro que se pueden encontrar en sus matrices.

Según Alonso et al (2008), las técnicas para medir la succión se pueden dividir en dos grupos principales: métodos de medición directa y los de medición indirecta. Generalmente las metodologías indirectas toman mucho más tiempo para alcanzar el equilibrio y poder establecer un valor de succión correcto. Todas las metodologías que se basan en la medición de la humedad relativa generada por los poros de los suelos (sección II.1.4), están consideradas en el primer grupo así como aquellas que miden la fuerza de tracción ejercida por el agua (Tensiómetros y Mini – Sonda).

Cuadro 2.2. Dispositivos y técnicas experimentales para medición de la succión en suelos (Alonso et al, 2008)

Equipo	Succión medida	Fenómeno asociado	Rango de succión medido (MPa)	Tiempo para que se establezca el equilibrio
Psicrómetro de transistor	Total	Humedad relativa	0.3 – 70	Minutos
Psicrómetro termopar	Total	Humedad relativa	0.3 – 7	Minutos
Higrómetro capacidad / resistivo	Total	Humedad relativa	10 – 400	Minutos
Higrómetro de espejo (punto de rocío)	Total	Humedad relativa	3 – 400	Minutos
Papel filtro	Total o mátrica	Contenido de agua	0.4 – 40	7 a 15 días
Tensiómetro	Mátrica	Tensión del agua	0 – 0.08	Minutos
Mini – sonda	Total y mátrica	Tensión del agua	0 – 2.1	Minutos
Celulosa Porosa	Mátrica	Resistencia eléctrica	0 – 1.5	Días / Semanas
Sensor de conductividad térmica	Mátrica	Conductividad térmica	0 – 1.5	Días / Semanas
Sensor TDR	Mátrica	Constante dieléctrica	0 – 0.3	Horas / Días
Técnica de Squeezing	Osmótica	Conductividad eléctrica	0 – 3	Horas / Días

### II.1.6.1 Técnica de traslación de ejes.

Debajo de la presión atmosférica, presiones negativas de consideración del agua en los poros del suelo (menores a 100 *kPa*) pueden conducir a la cavitación en el agua y de esta manera eliminar cualquier intento de medir la presión del agua de poro debido a que la fase de agua en el suelo y en algún dispositivo que se utilice para medir la succión de manera directa se vuelve discontinua (Figura 2.7a). Por lo anterior, se considera la aplicación de la llamada *técnica de traslación de ejes* que se refiere a la práctica de elevar la presión del aire en el suelo no saturado pero manteniendo la presión de agua de poro a un valor de referencia medible, típicamente la

atmosférica.

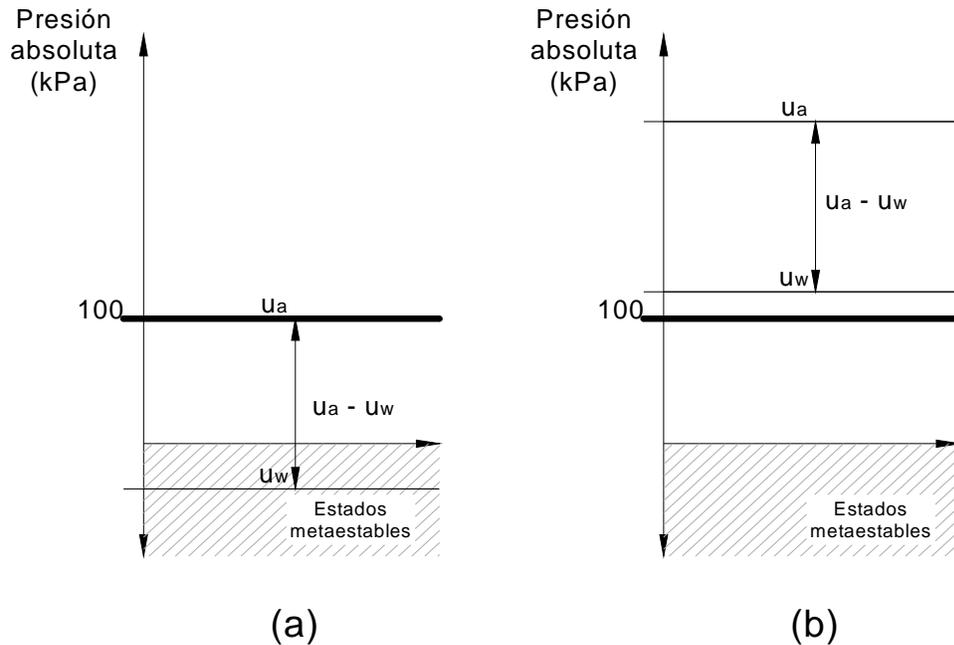


Figura 2.7. Técnica de traslación de ejes.

Esta técnica hace uso del hecho de que la presión del agua de poro se ve incrementada si el aire del ambiente se incrementa también; la magnitud del incremento de la presión de agua de poro es igual al incremento del aire del ambiente que se efectúa por sobre la presión atmosférica (Figura 2.7b). La presión del agua de poro del espécimen se lleva a la presión atmosférica ( $0 \text{ kPa}$ ) y la succión mátrica del espécimen del suelo se evalúa como la diferencia entre la presión del aire en la cámara de presión y la presión del agua de poro (Rahardjo y Leong, 2006).

## II.2 CURVAS DE RETENCIÓN AGUA-SUELO.

Estas curvas introducen, mediante la succión y alguna propiedad directamente relacionada con la humedad en el suelo, una manera gráfica que permite visualizar las etapas de humedecimiento y secado de los suelos no saturados y que a su vez, reflejan la capacidad de retención de agua de la masa de suelo, misma que depende de la estructura del suelo, de su

composición granulométrica y del tamaño y distribución de sus poros (Fredlund y Rahardjo, 1993).

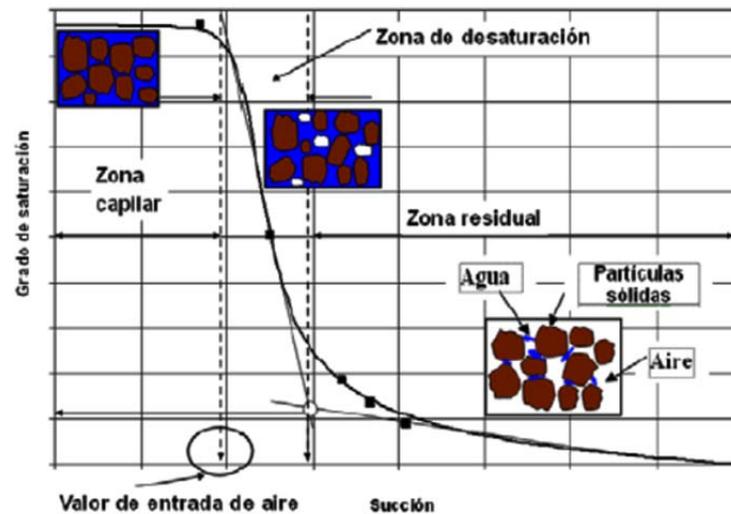


Figura 2.8. Representación de la curva de retención agua-suelo en secado (adaptada de Pérez y Garnica, 2008).

Como se puede observar en la Figura 2.8, la curva de retención agua-suelo en secado se divide en tres zonas dependiendo de la condición en la que se encuentre el agua. La zona capilar es donde el agua se encuentra en forma libre y puede fluir ante valores de succión muy bajos. En la zona de de-saturación, cierta cantidad de aire empieza a desplazar el agua, por tanto, el grado de saturación del suelo empieza a disminuir y lo hace en forma más rápida a partir de cierto valor conocido como *valor de entrada de aire* donde el proceso se caracteriza por drenar el contenido de agua de los poros con mayor frecuencia al interior del suelo que corresponde al punto más alto de la distribución de frecuencias de tamaños de poro. Finalmente, se procede a la zona residual en donde el agua que se encuentra en la estructura de suelo es muy escasa y los niveles de succión requeridos para poder extraerla son muy altos para el caso de suelos finos (suelos arcillosos) (Pérez y Garnica, 2008). En la Figura 2.9 se puede observar la diferencia que existe al secar a partir de la condición saturada o viceversa y por lo tanto la relación succión-humedad no es única y depende de los patrones de secado-humedecimiento; el patrón A-A' indica el secado de la muestra y el A'-A indica el humedecimiento de la misma.

En relación a las características básicas de los patrones seguidos por las curvas de

retención agua-suelo, es obligada la mención del fenómeno de histéresis hidráulica (patrones B-B'); el patrón B-B' representa el secado en humedecimiento y el B'-B representa el humedecimiento en secado. Este fenómeno cobra importancia en las obras civiles en particular cuando se dan procesos cíclicos de humedecimiento y secado debido a fluctuaciones atmosféricas o variaciones fortuitas de la humedad en el suelo como lo es por ejemplo una fractura de una tubería.

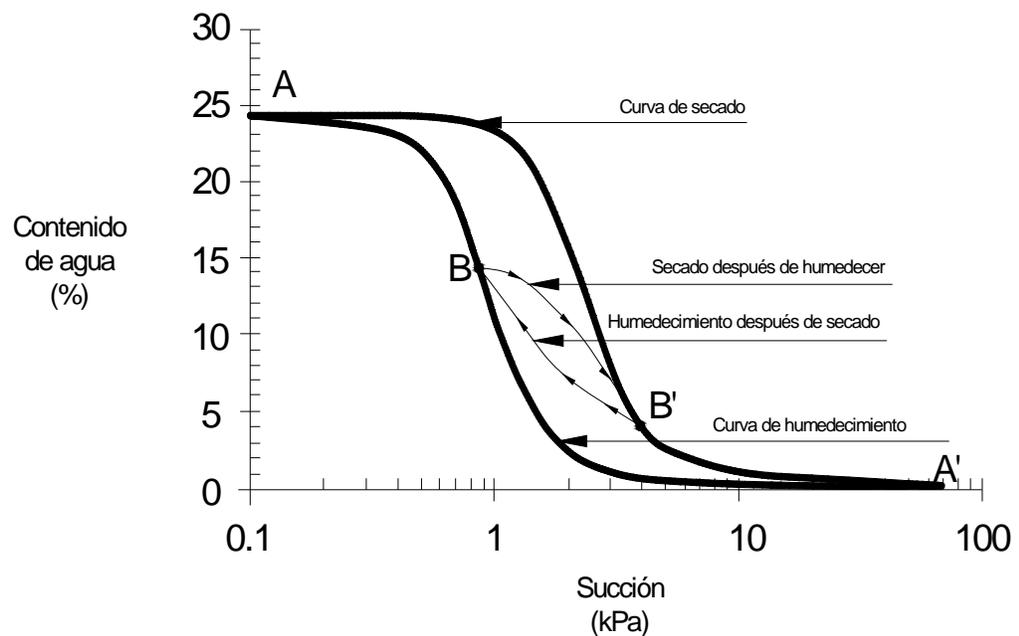


Figura 2.9. Representación esquemática de la curva de retención agua-suelo.

En la práctica, es muy probable que no se alcance el 100% de grado de saturación, esto se puede deber entre otras cosas a que al intentar saturar el suelo, algunas burbujas de aire queden atrapadas entre la matriz porosa. Los fenómenos que gobiernan el secado o el humedecimiento de la muestra se presentarán en el Capítulo IV donde se establecen los arreglos porosos probables a partir de ciertas hipótesis fundamentadas para simular los cambios de humedad.

## II.3 POROSIMETRÍA

### II.3.1 Porosimetría de mercurio

La porosimetría en suelos se obtiene comúnmente por medio de la técnica de intrusión de mercurio (Reed et al., 1979; Prapaharan et al., 1985; Lapierre et al., 1990) debido a que es una técnica sencilla y rápida, que se basa en el hecho de que el mercurio es un metal líquido que no moja (Figura 2.10), y por lo tanto necesita que se someta bajo presión para que penetre en el sistema poroso (un fluido que moja es aquel cuyo ángulo de contacto  $\varphi$ , es menor a  $90^\circ$ , de modo que el líquido puede fluir fácilmente por la superficie en la que se encuentra). Las fuerzas intermoleculares o cohesión al interior de un líquido son de naturaleza electrostática y determinan ciertas propiedades físicas del mismo donde por ejemplo, si estas son mayores a las fuerzas de adhesión (atracción entre moléculas de naturalezas distintas como un recipiente y el líquido que lo contiene),  $\varphi$  será mayor que  $90^\circ$  y estaremos ante un líquido que no moja (Figura 2.10).

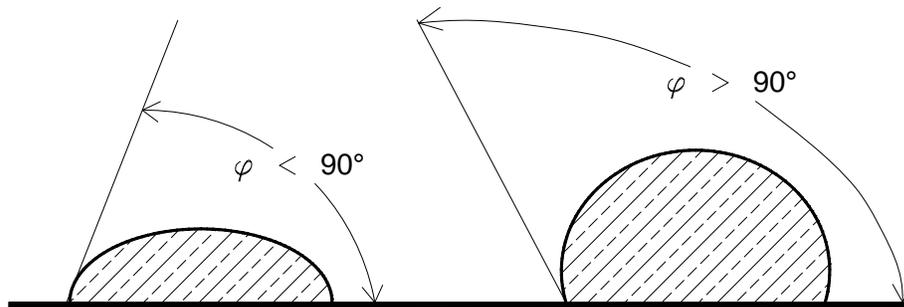


Figura 2.10. Izquierda: fluido que moja; derecha: fluido que no moja.

En la porosimetría por intrusión, a medida que la presión aumenta el mercurio va introduciéndose en poros cada vez más pequeños y la relación entre la presión  $p$  ejercida sobre el mercurio y el tamaño de los poros (radio,  $r$ ) está regulada por la ecuación de Young-Laplace (Lu y Likos, 2004) que se puede reescribir como:

$$p = \frac{2T_s \cos \varphi}{r} \quad (2.1b)$$

En donde  $p$  representa la presión necesaria para que penetre un volumen de mercurio en la

muestra física de suelo;  $T_s$  es la tensión superficial del mercurio y es igual a  $0.480 \text{ gf/cm}$ ;  $\varphi$  será el ángulo de contacto entre el mercurio y la superficie del poro y es aproximadamente  $130^\circ$ . La Figura 2.11 resulta de registrar los volúmenes introducidos de mercurio para cada presión ejercida a la muestra.

De esta técnica se puede obtener información del volumen de mercurio intruído y, por lo tanto, de la porosidad conectada y el intervalo de radios de poros que se puede determinar comprende desde  $0.002$  a  $100 \mu\text{m}$ . Como se mencionó en el capítulo I, este procedimiento trae consigo ciertas limitaciones, sin embargo, esto no significa que su utilización no sea adecuada para el estudio del sistema poroso. Por el contrario, es una técnica muy resolutive siempre que se lleve a cabo combinada con otras técnicas adicionales. Se recomienda que el desarrollo e implementación de este procedimiento de análisis de la porosimetría en suelos siga los lineamientos especificados en la norma ASTM D 4404–84, la cual contiene las recomendaciones pertinentes para caracterizar el sistema poroso.

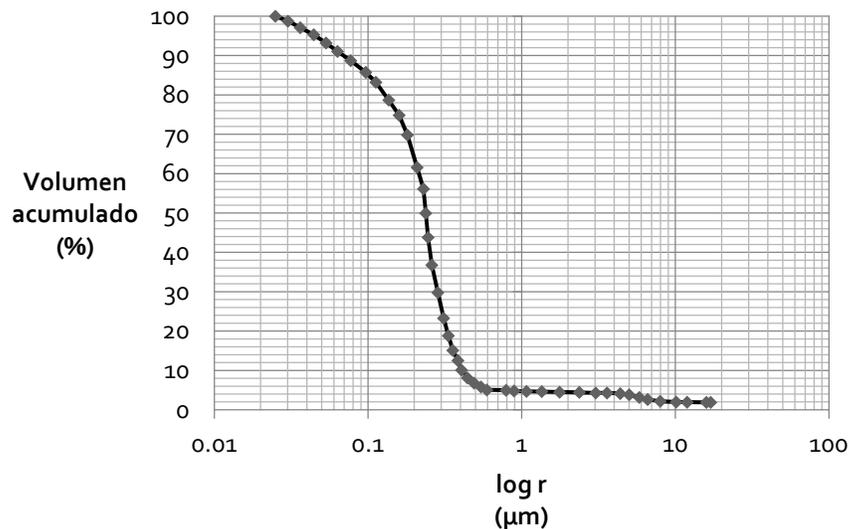


Figura 2.11. Curva de intrusión típica de una prueba de porosimetría hecha con mercurio.

### II.3.2 Estimación de la porosimetría por métodos indirectos

Lu y Likos (2004) proponen un procedimiento mediante el cual se evalúa puede

determinar la distribución de frecuencias de tamaños de poro a partir de la curva de retención agua-suelo. Este procedimiento utiliza las ecuaciones bien conocidas de Young-Laplace y Kelvin (2.1 y 2.2 respectivamente) y las relaciona a su vez con la variación del contenido de humedad registrado durante la evolución del secado de una muestra de material poroso.

La ecuación de Kelvin (ecuación 2.2) provee de la base termodinámica para relacionar la humedad relativa (o succión mátrica) con el tamaño de los poros (Lu y Likos, 2004). Esta ecuación y la ecuación de Young-Laplace combinadas pueden reescribirse en la ecuación 2.2b y con ella calcular la humedad relativa  $HR$  correspondiente a determinado valor en la succión que será necesaria para establecer el valor de la película adsorbida en las paredes del medio poroso.

$$HR = e^{-(u_a - u_w) \frac{V_w}{RT}} \quad (2.2b)$$

Ahora pues, según Lu y Likos (2004) al tamaño  $r_k^i$  de poro que corresponde al  $i$ -ésimo valor en la succión del suelo debe considerársele el espesor de la película de agua  $t^i$  adsorbida en la superficie de las paredes del medio poroso la cual también depende de la humedad relativa que prevalece al interior del suelo:

$$r_t^i = r_k^i + t^i \quad (2.4)$$

Existen muchos métodos propuestos para estimar el espesor de la película, sin embargo, existe uno muy popular de Halsey (1948) el cual es utilizado en virtud de que ha demostrado que otorga una relación cercana a los datos experimentales para muchos medios porosos y es precisamente porque es independiente del medio poroso con humedades relativas mayores a un 30% (aproximadamente 164 MPa). La ecuación de Halsey dice que:

$$t^i = \tau \left[ -\frac{5}{\ln(HR^i)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.5)$$

En donde  $\tau$  es el diámetro efectivo de una molécula adsorbida. Según Lu y Likos (2004) este diámetro se puede calcular considerando el área y volumen ocupados por un solo mol de agua como si estuviera esparcida sobre una superficie con una profundidad de una capa

molecular:

$$\tau = \frac{v_w}{A N_A} \quad (2.6)$$

En donde  $A$  representa el área transversal de una molécula de agua líquida, la cual se puede asumir aproximadamente igual a  $10.8 \text{ angstroms}^2$  (Livingston, 1949);  $N_A$  representa el número de Avogadro ( $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ). Llevando a cabo las sustituciones adecuadas:

$$\tau = 2.77 \text{ angstroms}$$

El procedimiento se puede resumir de la siguiente manera:

1. En principio, este procedimiento exige seleccionarse en primera instancia algunos pares de valores de la curvas de retención agua-suelo en intervalos regulares.
2. Lo que sigue es calcular los radios de poro asociados a la succión  $i$ -ésima mediante la ecuación de Young-Laplace (Ecuación 2.1) y sumar el espesor de la película de agua adsorbida en las paredes del medio poroso con la ayuda de la ecuación 2.5 que es función de la humedad relativa  $HR$  previamente calculada con la ecuación 2.2b.
3. Resta ahora establecer la frecuencia de cada uno de los tamaños de poro asociados toda vez que ya están calculadas sus dimensiones. Para ello, la forma de la curva de retención agua-suelo se utilizará como base. Lo anterior quiere decir que los cambios de humedad están en relación directa con la frecuencia con la que se presenta determinado poro. Para lograr cuantificar las frecuencias deben convertirse los contenidos de agua a volúmenes de agua dividiendo los primeros entre la densidad del líquido y como se establecieron intervalos regulares de variación de humedad será fácil discernir bajo qué succión se presenta determinada variación más brusca de contenido de agua la cual estará directamente relacionada con la frecuencia de determinado tamaño de poro.

Este procedimiento es implementado por Lu y Likos (2004) como un estimador de la distribución de frecuencias de los tamaños de poro en arenas y de la misma manera será utilizado en este trabajo para lograr lo mismo y caracterizar algunos materiales que no cuenten con datos

experimentales de porosimetría (Capítulo III).

## II.4 ESTRUCTURA DE LOS SUELOS GRANULARES

Los tipos de “suelos” en la naturaleza son tan más vastos que el conocimiento que el hombre ha acumulado en toda su historia y existencia (Juárez y Rico, 2008). Sin embargo, se ha logrado, gracias a la experiencia de los interesados en este campo del conocimiento, llevar a cabo una clasificación “escueta” que sirve como base para ubicar de manera simple y llana a cualquiera que carezca del conocimiento especializado en este campo en una clasificación pertinente y dotada de percepción empírica. Así pues, los suelos se pueden clasificar en *gravas*, *arenas*, *limos* y *arcillas*. Estas clasificaciones atienden esencialmente a los tamaños y forma de las partículas que los componen. Sin atender en primera instancia a sus formas, el tamaño de los mismos van en orden decreciente como se fueron mencionando siendo las arcillas los suelos cuyos tamaños son los menores y que poseen las formas más irregulares.

Muchos autores han reconocido la importancia que tiene el conocimiento de la estructura íntima formada al interior de la masa de los suelos. Zeevaert (1997) reconoce que el comportamiento mecánico de los suelos depende entre otras cosas de la estructura de los mismos; así pues, el conocimiento de la estructura de los suelos derivaría inequívocamente, en estimaciones confiables de la resistencia y compresibilidad de los suelos, además de determinar correctamente las propiedades hidráulicas de los mismos. Por su parte Casagrande plantea la existencia de ciertos arreglos estructurales tales como *estructuras dispersas* y *estructuras floculadas* (Juárez y Rico, 2008), lo anterior con el objetivo de explicar los valores de compresibilidad asociados a los vacíos que se encontraban en materiales granulares respecto de los materiales finos en suelos. Según Zeevaert (1997), se pueden considerar los siguientes tipos de estructuras básicas de las cuales se derivan otras: i) *simple*, ii) *panal* y *cavernosa*, y iii) *floculenta*. En relación a las dos últimas, Zeevaert (1997) señala que se derivan principalmente de depósitos de suelos arcillosos o limoso-arcillosos y que además, por la manera en que se formaron y depositaron, poseen relaciones de vacíos altas y por consiguiente índices de compresibilidad altos también. En estos suelos arcillosos, la superficie específica juega un papel

fundamental debido a las fuerzas que derivadas de la carga eléctrica presente, ya sean fuerzas de atracción o repulsión entre sus partículas, está directamente relacionada con su superficie específica (Barrera y Garnica, 2002). Las estructuras simples (Figura 2.12) se presentan generalmente en los suelos sin o con muy débil cohesión, como arenas, grava y fragmentos de rocas (suelos granulares).

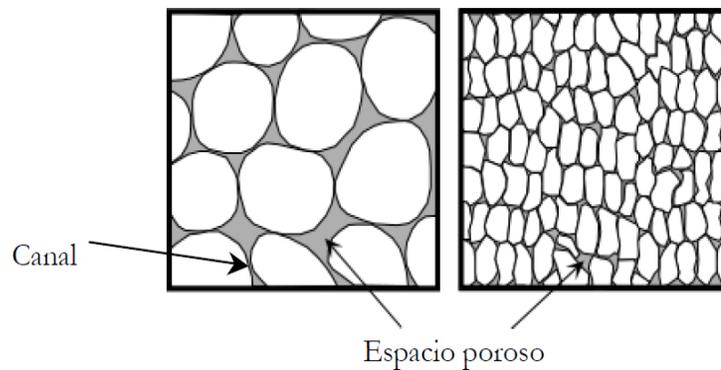


Figura 2.12. Representación esquemática de una porción de un material poroso (derecha) y una ampliación de dicha estructura (izquierda) (Horacio, 2004).

En las estructuras simples, los granos, por la acción de la gravedad, adoptan posiciones más o menos estables. Según Horacio (2004), si se efectúa un examen cuidadoso de un medio poroso, es común encontrarse con dos tipos de entidades dentro de lo que usualmente denominamos poros: *sitios*, donde reside la mayor parte de la porosidad del medio, y los *enlaces* o gargantas, que conectan a las cavidades entre sí. Para modelar este intrincado espacio, se asigna una dada geometría a los sitios y otra a los enlaces (Figura 2.13).

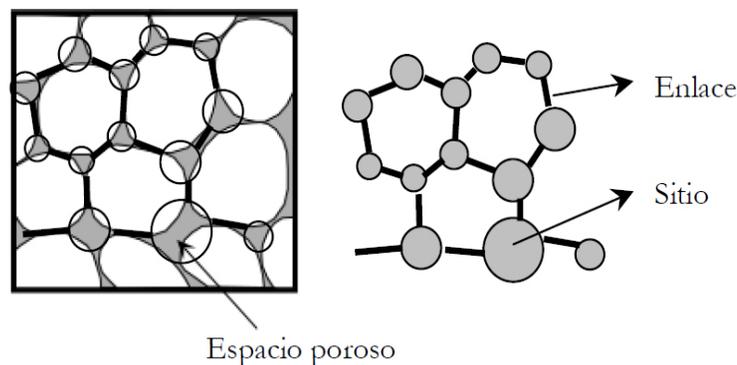


Figura 2.13. Representación esquemática de la manera en que se asocia el espacio poroso y los canales a los sitios y enlaces respectivamente (Horacio, 2004).

Como se verá más adelante, Simms y Yanful (2002), así como Rojas et al. (2009) utilizan esta representación para modelar el comportamiento de los suelos no saturados. Por su parte Rojas et al. (2009) propone un esquema de sitios y enlaces representados por 4 elementos en los que involucra macroporos, sitios, enlaces y sólidos. Simms y Yanful (2002) proponen un esquema de malla regular cuadrática construida solamente con sitios y enlaces.

## **II.5 MODELOS POROSOS.**

Diversos modelos geométricos de suelos han sido propuestos en el primer lustro del siglo XX con el objetivo de investigar los procesos percolativos de medios porosos tales como el fenómeno de histéresis hidráulica. En este sentido, se plantearon por ejemplo modelos como el *parallel bundle model* mismo que interconecta en un arreglo unidimensional una serie de poros de tamaños aleatorios que no predice ningún nivel de histéresis por la falta de interconexión entre sus elementos (Lu y Likos, 2004).

### **II.5.1 Modelo de Androutsopoulos y Mann.**

Androutsopoulos y Mann (1979) estudian la porosimetría de mercurio y concretamente se centran en interpretar los fenómenos que dan origen a la histéresis hidráulica observada al introducir este líquido en muestras físicas y a las observaciones de mercurio atrapado en los medios porosos. Proponen para esto, un modelo de malla cuadrada de elementos cilíndricos de longitudes iguales en tamaño donde los tamaños asignados a los segmentos siguen una función estadística de tamaños. El tamaño de la malla es asignado de manera arbitraria y se plantea realizar varias corridas del modelo para obtener un “promedio” de curvas. La intrusión de mercurio, así como la evacuación del mismo es simulada utilizando una ecuación de Washburn (1921) donde la penetración de un segmento de poro se da cuando  $P = -4\gamma \cos(\theta/D)$ ,  $\gamma$  es la tensión superficial del mercurio,  $\theta$  es el ángulo de contacto mercurio-sólido y  $D$  es el diámetro del segmento longitudinal. El modelo es capaz de simular la curva frontera de intrusión y de retracción del mercurio y concluyen que la interconexión de las cavidades de los medios porosos

es indispensable para simular los procesos histeréticos, sin embargo, no toma en cuenta los cambios volumétricos del medio poroso y por lo tanto no se puede utilizar para reproducir el acoplamiento hidro-mecánico en suelos no saturados (Simms y Yanful, 2005).

### **II.5.2 Modelo de Simms y Yanful.**

Simms y Yanful (2003) proponen que la forma de integrar el fenómeno de drenaje y cambios volumétricos en los suelos, así como los diferentes efectos de succión y carga mecánica, es modelando cada poro individual en una red porosa. Para ello, proponen un modelo bi-dimensional capaz de simular los cambios volumétricos así como el drenaje en cada poro individual con las siguientes características:

a) El modelo pretende simular un volumen representativo de suelo, lo suficientemente grande como para predecir adecuadamente el comportamiento de su cambio volumétrico macroscópico, su curva de retención agua-suelo, y su función de conductividad hidráulica no saturada.

b) El suelo se simula como una malla cuadrada de poros (Figura 2.14). A cada punto de la malla se le asigna un radio generado aleatoriamente de acuerdo con la función de distribución de poro determinada mediante la porosimetría de intrusión de mercurio realizada a muestras tomadas del suelo en sus condiciones iniciales de esfuerzo. Existe evidencia descrita en Simms and Yanful (2002) que sugiere que la función de distribución de tamaños de poro medida mediante la porosimetría por intrusión de mercurio es una buena medida de la distribución de tamaños de poro. Se asume que el volumen de cada poro es proporcional a su radio.

c) Los poros se conectan hidráulicamente a un número arbitrario de sus vecinos. Para que un poro drene, debe tener tamaño suficiente para hacerlo a una determinada succión de acuerdo a la ecuación de Young-Laplace. El poro debe estar conectado a poros que ya han drenado o estar cerca junto a la frontera de aire en la malla y también debe estar conectado hidráulicamente a la frontera de drenaje de la malla. La Figura 2.13 muestra un esquema de la

mallas con sus condiciones de frontera:

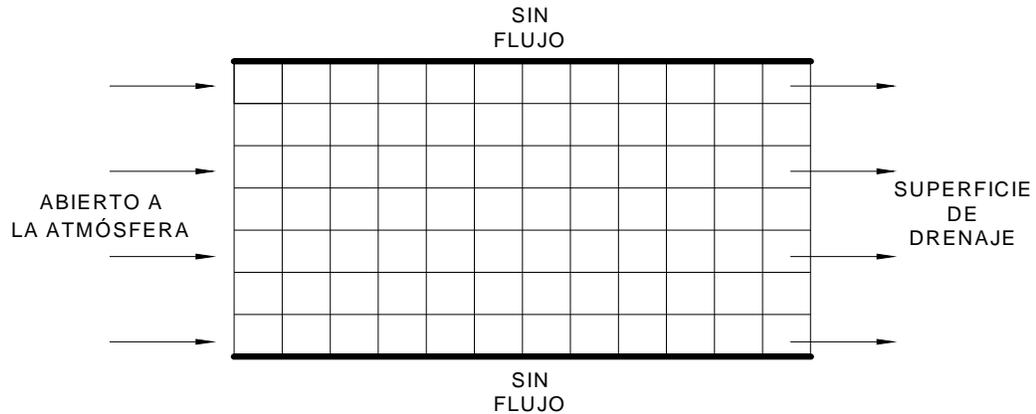


Figura 2.14. Esquema de malla de poro mostrando las condiciones de frontera.

d) El algoritmo de cambios volumétricos se basa en el esquema de la Figura 2.15 donde se asume que la rigidez del poro se incrementa linealmente con el decremento del radio del poro, ya sea debido a la repulsión electromecánica existente entre los poros o por cualquier otro fenómeno de acuerdo a la relación  $\Delta r = -\frac{\Delta p'}{C}r$ , donde  $r$  es el radio del poro y  $C$  es un parámetro de rigidez el cual es válido para toda la malla. En poros drenados, se asume que la succión no contribuye a la variable de esfuerzos efectivos  $p'$ .

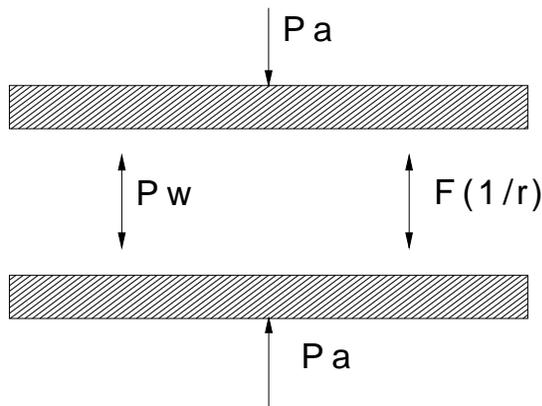


Figura 2.15. Esquema de un poro saturado y las fuerzas inter-partícula.

El flujo a través de tal red puede ser analizado por dos vías: construyendo un vector matemático para describir la red y resolviéndolo numéricamente o examinarlo desde un punto de vista estadístico; esta última aproximación es denominada teoría de la percolación y el modelo de

Simms y Yanful opera con la primera opción.

El modelo es calibrado y verificado con medidas de la curva de retención agua-suelo. Así, el modelo requiere de los siguientes datos de entrada: (i) propiedades básicas tales como grado de saturación inicial, índice de poros inicial y densidad de sólidos; (ii) distribuciones de tamaño de poros medidas por MIP a estados de tensión iniciales y en el límite de contracción; y (iii) algunos puntos sobre la curvas de retención agua-suelo.

A pesar de la simplicidad relativa de algunas de las suposiciones del modelo, las predicciones realizadas de las curvas de retención agua-suelo, conductividad hidráulica no saturada, evolución de distribución de tamaño de poros y relaciones de cambio de volumen-succión han resultado suficientemente satisfactorias. Estos resultados indican que este tipo de modelación puede ser utilizado para construir la superficie constitutiva entera de una arcilla compactada bajo carga isotrópica y/o procesos de secado. Las propiedades macroscópicas estimadas del modelo incluyen la superficie constitutiva de cambios de volumen, la curva de retención agua-suelo y la función de conductividad hidráulica no saturada. Consecuentemente, el modelo provee de estimaciones de la superficie constitutiva de cambio de volumen tanto para incrementos de succión como de carga mecánica bajo tensiones isotrópicas, la variación de la conductividad hidráulica saturada o no saturada y el grado de saturación como una función de la succión. El modelo en forma de malla cuadrículada propuesto por Simms y Yanful (2002) se basa en la simulación de cambio volumétrico de cada poro aisladamente, por tanto no puede ser utilizado para modelar la respuesta al cortante de los suelos.

### **II.5.3 Modelo de Rojas et al.**

Rojas et al. (2009) propone un modelo sólido-poroso que utiliza para evaluar la fracción saturada  $f^s$  de los suelos y el grado de saturación de la fracción no saturada  $S_w^u$  (difícilmente medibles por métodos experimentales directos). El modelo considera la variación de la distribución de frecuencias de tamaños de poro que ocurre bajo diferentes niveles de esfuerzos (Simms y Yanful, 2002) donde dichas distribuciones son evaluadas mediante la técnica de

intrusión de mercurio (Lu y Likos, 2004). El modelo considera la doble porosidad (estructura bimodal) observada particularmente en suelos finos (Barden y Sides, 1970; Romero y Simms, 2007) lo cual quiere decir que existen dos niveles de estructuras porosas ocurridas a dos escalas diferentes: en el nivel de menores dimensiones, se encuentran poros derivados de la aglutinación de partículas de arcilla de donde es muy difícil extraer la humedad de los mismos aún a muy altos niveles de succión; el segundo nivel consiste de la porosidad en las vecindades de partículas de mayores dimensiones como las de arenas y en las vecindades de los paquetes de arcilla. Para modelar lo anterior, Rojas (2008b) considera cuatro tipos de elementos: macroporos, los sitios, los enlaces y los sólidos (Figura 2.16).

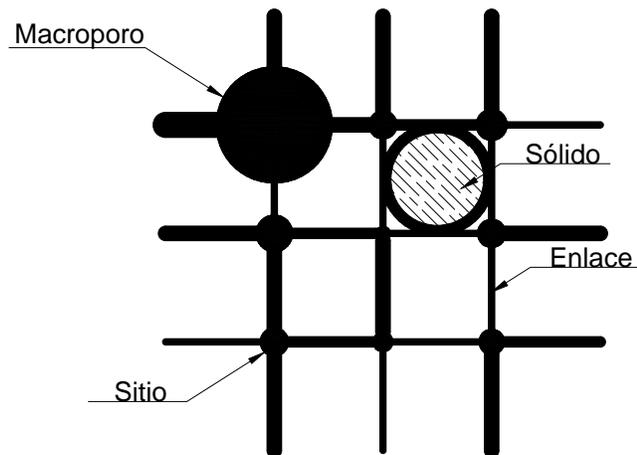


Figura 2.16. Porción de una red porosa mostrando los cuatro elementos: enlaces, sitios, macroporos y sólidos (Rojas et al., 2009).

El modelo se construye en una red porosa dentro de un esquema bi-dimensional o tri-dimensional donde cada nodo representa una cavidad (ya sea un sitio o un macroporo) y las conexiones entre ellos representan a los enlaces. En Rojas et al (2009) se recomienda que la red no sea menor a un millón de nodos con el objetivo de evitar que el tamaño de la red influya en los resultados arrojados por el modelo además de que se plantea un algoritmo mediante el cual se garantiza que la construcción de la red porosa sea geoméricamente viable.

La evaluación de la relación succión-humedad se hace simulando los procesos de humedecimiento-secado de los suelos atendiendo a ciertas reglas que controlan la interacción entre los elementos que forman la estructura porosa de los suelos (Lu y Likos, 2004). Consecuentemente el modelo puede ser utilizado para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante a través de la ecuación de Bishop para lo cual, el valor del parámetro  $\chi$  es establecido en función de  $f^s$  y de  $S_w^u$  a través de un análisis de equilibrio de las partículas sólidas de los suelos que se caracterizan por tener una estructura *bimodal* y sujetos a cierto valor de succión. El modelo es capaz de simular los ciclos de humedecimiento y secado así como ciclos intermedios (*scanning curves*).

Capítulo **III** **III.1. ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ESTUDIADOS**

Esta sección III.1 se dedica a detallar el procedimiento experimental conducido para obtener las porosimetrías y curvas de retención agua-suelo experimentales donde, como ya se dijo, las primeras serán utilizadas en el posterior proceso de modelado de los suelos (sección III.2) para después establecer las curvas teóricas agua-suelo y compararlas con las experimentales en el capítulo IV. Debido a los largos periodos con que se miden las curvas de retención agua-suelo bajo el procedimiento utilizado en este trabajo, se consideró oportuno identificar ciertas publicaciones efectuadas por diversos investigadores mismas que contenían resultados que reportan las características de los materiales que ellos mismos utilizaron, algunos con fines análogos al de este trabajo y otros no y que consignaban además las curvas experimentales agua-suelo en dichas publicaciones.

La determinación de la porosimetría y curvas de retención experimentales involucra un proceso de caracterización de los materiales, mismo que está descrito en esta sección y es conducido con el objetivo de caracterizar con más profundidad a las muestras de suelo utilizadas. En primera instancia se enlistarán los pasos seguidos en la caracterización para después detallarlos un poco más a manera de fundamentar de manera teórica la necesidad de llevarlos a cabo; en el capítulo IV, se concentran todas las características generales de los suelos (porosimetrías, curvas de retención, características volumétricas y gravimétricas, granulometrías, etc.). El estudio experimental incluye los pasos siguientes de caracterización de los materiales estudiados:

1. Determinación del peso específico relativo de los sólidos  $S_g$ . Esta propiedad se mide aquí con el objeto de establecer el grado de saturación de los suelos en las etapas de secado-humedecimiento.
2. Medición de la superficie específica de los materiales. Este dato se presenta con el objetivo de identificar, de manera adicional al estudio de granulometría el carácter

granular que poseen las partículas de suelo.

3. Relación de vacíos y porosidad. Son indispensables para determinar los grados de saturación de la muestra de suelo en toda su etapa de cambios de humedad.
4. Estudio granulométrico. Este estudio otorga el conocimiento de los tamaños de los granos presentes en las muestras de suelo real que serán después modelados.
5. Curvas de retención agua-suelo. Curvas obtenidas de manera experimental, la mayoría utilizando la cámara de presión con membrana celulosa, y que serán las que se tratarán de reproducir por el modelo sólido-poroso en esta tesis.
6. Porosimetría. Representa una envolvente expresada en términos de frecuencias y tamaños asociados a las partículas de suelo. Identifica de manera precisa los tamaños y frecuencias con que cada tamaño de poro se presenta dentro de un medio poroso.

### **III.1.1 Peso específico relativo de los sólidos**

El peso específico relativo de la mayoría de las partículas minerales constituyentes de un suelo ( $S_s$ ) varía comúnmente entre límites estrechos (2.60 a 2.90). Como ejemplo, el peso específico relativo del cuarzo es 2.67 y el del feldespato es 2.6. En suelos con abundante hierro,  $S_s$  puede llegar a 3. En la turba se han llegado a medir valores de 1.5 debido a la presencia de materia orgánica. Los minerales de arcilla que constituyen la fracción coloidal de un suelo, pueden tener un peso específico promedio comprendido entre 2.80 y 2.90. Sin embargo, en algunas arcillas volcánicas, tal como sucede en el Valle de México, suelen encontrarse valores más bajos (entre 2.2 y 2.6). Así pues, es normal que en un suelo real los minerales de las fracciones muy fina y coloidal tengan su peso específico relativo mayor que los minerales de la fracción más gruesa. Ello no obstante, en la mayoría de los casos prácticos basta determinar el valor promedio del peso específico relativo de la materia sólida.

En Mecánica de Suelos el peso específico relativo de los sólidos se utiliza para calcular relaciones volumétricas de los suelos tales como grado de saturación y relación de vacíos (Figura 3.1).

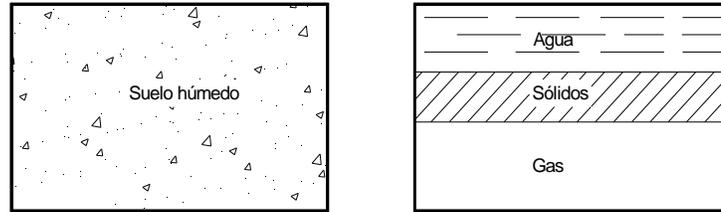


Figura 3.1. Fases de un suelo parcialmente saturado.

De manera experimental, el peso específico relativo de los sólidos se puede obtener mediante la relación 3.1:

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}} \quad (3.1)$$

Donde  $S_s$ ,  $W_s$ ,  $W_{fw}$ ,  $W_{fsw}$  son el peso específico relativo de los sólidos, el peso de los sólidos de la muestra analizada, el peso del picnómetro con agua solamente y el peso del picnómetro utilizado para la prueba con agua y sólidos de la muestra analizada.

El procedimiento de prueba se realizó de acuerdo a las norma (ASTM D 854). En la Figura 3.2a se muestran las mediciones de temperatura que se llevan a cabo para relacionarlas con los volúmenes al interior de los matraces calibrados los cuales se utilizan en este procedimiento experimental. A su vez, la Figura 3.2b muestra la manera en que se conecta uno de los matraces a una bomba de vacío con el objeto de extraer toda burbuja de oxígeno y eliminar la posibilidad de que las mediciones en el volumen se vean influenciados por oxígeno disuelto.



(a)



(b)

Figura 3.2. a) Peso de matraz con suelo y agua  $W_{fsw}$ ; b) Matraces puestos al vacío.

### III.1.2 Superficie específica

La superficie específica  $S_e$  es una relación ente la superficie exterior de una partícula de suelo  $A_p$  y su masa  $m$  y resulta una medida independiente y complementaria al análisis granulométrico para caracterizar los sólidos de un suelo, debido a que su valor determina el balance entre fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas actuantes sobre las partículas, afecta la estructura, la permeabilidad, y controla la adsorción y retardación durante la difusión química (Santamarina et al., 2008).

Santamarina (2008) describe a detalle el procedimiento y emite recomendaciones para la realización de esta prueba de laboratorio. La figura 3.3a muestra el equipo necesario para conducir esta prueba, mismo que está al interior del laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro que consiste básicamente de pipetas, vaso de precipitados, azul de metileno y un mezclador magnético de soluciones.



Figura 3.3. a) Equipo montado para la determinación de la superficie específica; b) Ilustración del “punto final”. Se obtuvo el exceso de azul de metileno para una cantidad igual a 7.0 mililitros de suspensión.

El punto azul derecho de la Figura 3.3b muestra un aspecto de halo circular que tiene esa peculiaridad debido a que indica el momento en que el azul de metileno ha saturado ya a las partículas de suelo; este punto identifica la finalización de la prueba. El Cuadro 3.1 contiene algunos valores típicos de  $S_e$  de minerales comúnmente encontrados en suelos.

Cuadro 3.1 Superficies específicas para minerales de arcilla  
(Juárez y Rico, 2004)

Mineral	Superficie específica ( $m^2/gr$ )
Caolinita	50 - 100
Illitas	100 - 200
Montmorillonitas	200 - 400 (en algunos caso se han observado valores de hasta 800)

### III.1.3 Relación de vacíos y porosidad

Un primer acercamiento al conocimiento de los componentes básicos de un suelo no saturado se da al separar la masa total de los suelos en tres fases: sólida, líquida y gaseosa (Figura

3.4).

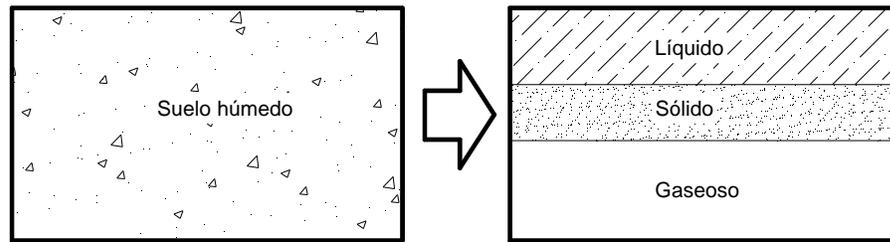


Figura 3.4. Representación esquemática de los componentes que conforman un suelo no saturado.

Wang y Fredlund (2003) señalan que la película contráctil que se forma en las fronteras de las partículas individuales de suelo, posee propiedades diferentes del resto del agua contenida en la masa del suelo y la identifican como una cuarta fase que lo constituye, sin embargo, la influencia de dicha película contráctil es más grande en suelos finos con partículas laminares y no tanto en los granulares.

En Mecánica de Suelos se relaciona el peso de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes por medio del concepto de peso específico, es decir, de la relación entre el peso de la sustancia y su volumen (Figura 3.5):

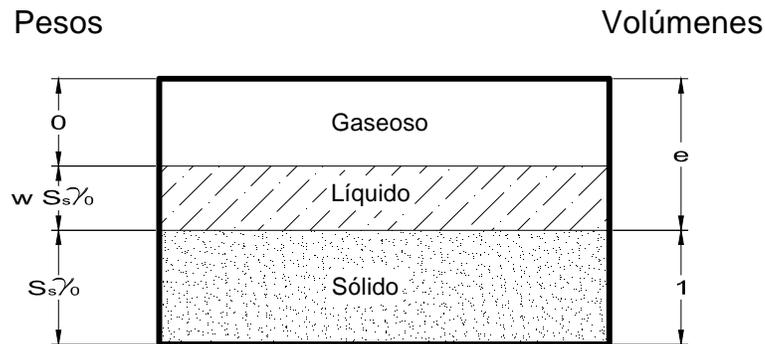


Figura 3.5. Relaciones volumétricas y gravimétricas de las fases de un suelo parcialmente saturado.

En donde  $S_s$  representa el peso específico relativo de los sólidos;  $w$  es el contenido de agua gravimétrica en la masa de suelo y se refiere al cociente del peso del agua que contiene el suelo y el peso de los sólidos del mismo ( $w = W_w/W_s$ );

$e$  a su vez es la relación de vacíos y es igual al cociente del volumen de vacíos y el volumen de los sólidos del suelo (Ecuación 3.2) y guarda una estrecha relación con la porosidad  $n$  ( $n = \frac{e}{1+e}$ ). La Mecánica de Suelos ha preferido el término  $e$  para suelos finos debido a que en ellos es de interés conocer la variación volumétrica de los vacíos bajo la influencia de solicitaciones externas; en tal caso la porosidad  $n$  tiene la desventaja de representar una relación entre dos variables (Ecuación 3.3) mientras la relación de vacíos expresa la relación de una cantidad variable ( $V_v$ ) a una constante ( $V_s$ ) (Juárez y Rico, 2008).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.2)$$

$$n = \frac{V_v}{V_m} \quad (3.3)$$

#### III.1.4 Estudio granulométrico.

La distribución de frecuencias de tamaños de sólidos presentes en los suelos se obtiene del cribado del material (Figura 3.6) y del análisis granulométrico vía hidrómetro donde este último se utiliza solamente para la fracción de suelo menor a 0.074 micras (malla #200).



Figura 3.6. Cribado del material

Una vez cribado el material, la distribución granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas (Figura 3.7). Las ordenadas se refieren a porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La representación en escala semi-logarítmica resulta preferible a la simple representación natural debido a que en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos que en escala natural resultan muy comprimidos.

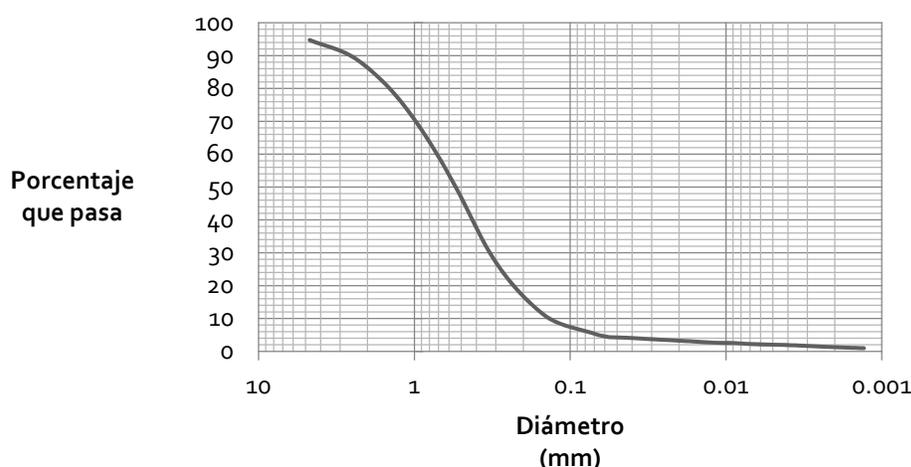


Figura 3.7. Distribución granulométrica típica de un suelo granular.

La forma de la curva da inmediata idea de la distribución granulométrica del suelo; un suelo constituido por partículas de un solo tamaño, estará representado por una línea vertical. Como una medida simple de uniformidad de un suelo, Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad para la curva granulométrica:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.4)$$

En donde  $D_{60}$  es el tamaño tal, que el 60%, en peso, del suelo, sea igual o menor;  $D_{10}$  tiene un significado análogo con la salvedad de referirse al 10% en peso del suelo. Los suelos con  $C_u < 3$  se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez presentan  $C_u < 2$ .

Como dato complementario, necesario para definir la graduación, se define el coeficiente

de la curvatura del suelo con la expresión:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (3.5)$$

$D_{30}$  se define análogamente a  $D_{60}$  y a  $D_{10}$  y tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

Cuadro 3.2 Coeficientes de uniformidad y curvatura (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2008)

Clasificación	Coeficiente de uniformidad	Coeficiente de Curvatura
Arena bien graduada	$C_u \geq 6$	$1 \leq C_c \leq 3$
Grava bien graduada	$C_u \geq 4$	$1 \leq C_c \leq 3$

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el análisis granulométrico se realizó atendiendo las disposiciones planteadas por las normas ASTM correspondientes (ASTM D 2487, ASTM D 2974).

### III.1.5 Curvas experimentales de retención agua-suelo.

La medición experimental de la relación succión-humedad se llevó a cabo con la ayuda de la cámara de presión; este procedimiento basa su ejecución en la técnica de traslación de ejes (Sección II.1.6.1) donde la separación de las fases, se logra forzando la fase líquida aplicando presión al interior de la cámara y haciendo pasar el líquido a través de poros diminutos de algún material con un valor de entrada de aire alto (ver Figura 3.9). Cuando se encuentra saturado, el material con valor de entrada de aire alto en contacto directo con la muestra de suelo tiene la capacidad única de restringir el flujo de aire mientras permite el libre paso del agua aplicando presión por el otro lado. La separación de las fases se da siempre y cuando la presión aplicada no

exceda el valor de entrada del material con valor de entrada de aire alto (Lu y Likos, 2004).

Existen dos tipos diferentes de elementos que pueden ser utilizados: las membranas de celulosa y discos cerámicos de valores de entrada de aire altos. Las membranas de celulosa se pueden utilizar hasta valores de 7 MPa y debido a que son muy delgadas, los periodos de estabilización del equilibrio es corto, sin embargo, ellas son vulnerables a degradarse por medios químicos y ataque biológico y se daría en tal caso la difusión de aire registrando mediciones incorrectas; este último aspecto elimina la posibilidad de utilizarlas para la rama de humedecimiento debido a que la continuidad de la fase líquida se pierde porque algunas burbujas se pueden alojar debajo de la membrana (Alonso et al, 2008).

En este trabajo, la medición de la succión en las ramas de secado se realizó mediante una cámara de presión adicionando en su interior una celulosa porosa con un valor de entrada de aire alto. La presión al interior de la cámara es controlada con un regulador de precisión el cual vigila la presión que suministra un tanque cuyo contenido es nitrógeno (ver Figuras 3.8 y 3.9). El procedimiento que detalla los parámetros adecuados para llevar a cabo estas mediciones se detalla en las especificaciones ASTM D-2325.



Figura 3.8. Izquierda: cámara de presión con muestras de suelo no saturado en su interior, Derecha: Tanque a presión con nitrógeno en su interior.

Previo a su utilización, la celulosa porosa se sumerge en agua pura por un periodo mínimo de 24 horas con el objetivo de que sus poros estén completamente saturados y garantizar la continuidad de la fase líquida. Esta membrana es colocada al interior de la cámara de presión

(Figura 3.9) donde esta última cuenta con una entrada para suministrar la presión ejercida por el tanque de nitrógeno y una salida para recabar el agua expulsada por las muestras de suelo. Se cuenta adicionalmente con una línea de salida la cual estará siempre en condición clausurada a menos que se necesite bajo algún caso indispensable para despresurizar la cámara. Es importante hacer hincapié en que la línea que recolecta el agua extraída de las muestras hacia el exterior debe estar saturada de agua de manera inequívoca.

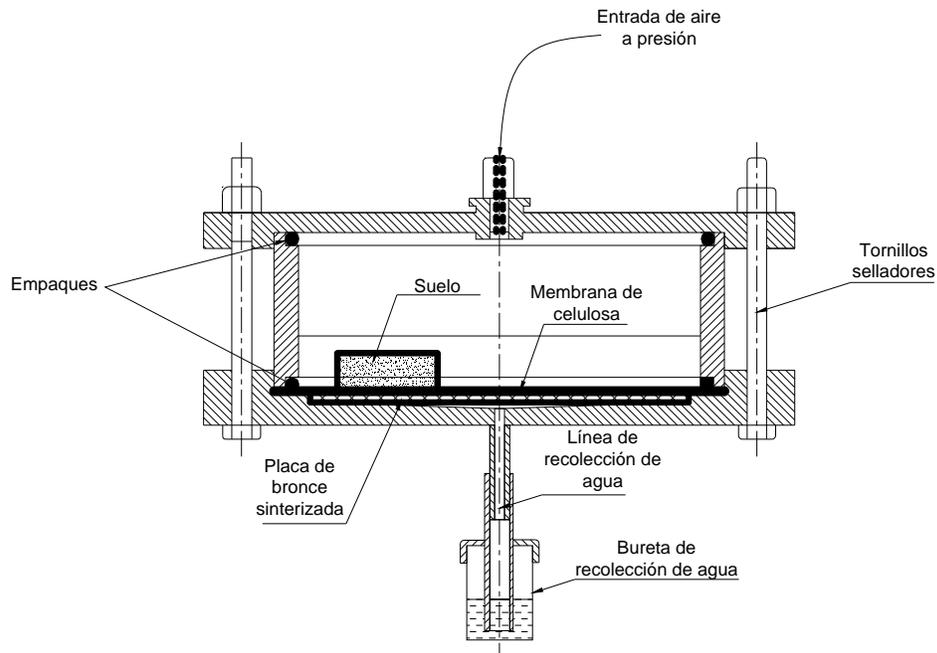


Figura 3.9. Esquema que muestra la manera en que están arreglados los componentes al interior de la cámara de presión con celulosa porosa.

Para cada curva, tres muestras de suelo con distribuciones granulométricas idénticas y fabricadas con el mismo procedimiento de compactación dinámica, se colocaron al interior de la cámara de presión para que todas ellas tuvieran el mismo grado de saturación y misma relación de vacíos. La presión fue incrementada paulatinamente mediante el regulador de precisión, de manera que cuando se llevaba a cabo un incremento en la presión se medía el agua que era recolectada al interior de una bureta graduada; se llevaban a cabo observaciones frecuentes a fin identificar el punto de estabilización. Una vez que se había logrado dicha estabilización y las lecturas en la bureta eran constantes se procedía a llevar a cabo un nuevo incremento en la presión.

Se llevaron a cabo dos pruebas para medir la curva de retención agua-suelo para los materiales A-5 y A-6 (Ver Capítulo IV). En el siguiente capítulo se consignan los resultados de estas mediciones para los materiales estudiados, así como para otros materiales que convenientemente fueron publicados por diversos investigadores en la materia.

### **III.1.6 Porosimetría.**

#### **III.1.6 Técnica experimental.**

La evaluación de la distribución de frecuencias de tamaños de poros para las muestras de arena A-1 y A-2, Barrera et al. (2003) se hizo con el método de intrusión de mercurio (ver Sección II.3.1).

Se recomienda que el desarrollo e implementación de este procedimiento de análisis porosimétrico para suelos siga los lineamientos especificados en la norma ASTM D-4404, la cual contiene las recomendaciones pertinentes para evaluar este parámetro con la ayuda del mercurio.

#### **III.1.6 Técnica teórica indirecta.**

Para evaluar la distribución de frecuencias de tamaños de poros de las muestras A-3, A-4, A-5, A-6, y A-7 se siguió el procedimiento teórico descrito en la sección II.3.2 debido a que no se contaba con los medios experimentales.

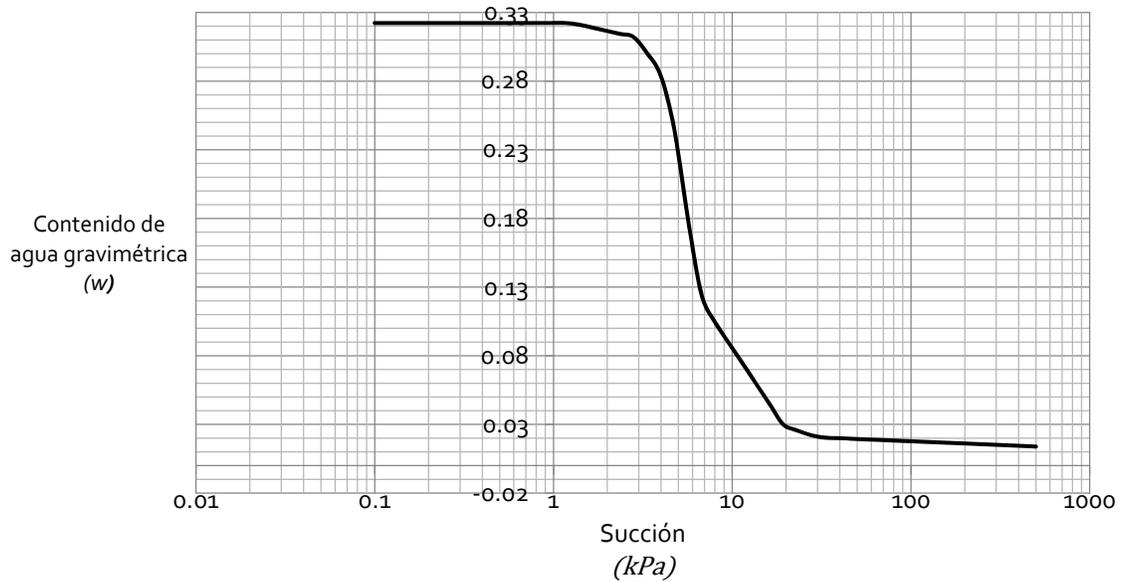


Figura 3.11. Curva experimental de retención agua-suelo.

El Cuadro 3.3 es un ejemplo de cálculo que modela este procedimiento en el cual se ve que, basándose en la curva de retención agua-suelo de la Figura 3.11, se establece un total de 50 puntos espaciados uniformemente centrandó la atención en el eje de las abscisas que contiene a la succión (columna 1) y se identifican sus correspondientes valores de contenido de agua  $w$  (columna 3). La humedad relativa  $HR$  (columna 3) se calcula con la ayuda de la ecuación 2.2b recordando que  $v_w = 1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$ . Deben convertirse los contenidos de agua  $w$  a volúmenes de agua  $V_w$  (columna 4) dividiendo los primeros entre la densidad del líquido que se toma igual a  $0.998 \text{ gr}/\text{cm}^3$ . Esto último no es indispensable debido a que se podrían estimar las variaciones de humedad considerando el contenido de agua  $w$ , sin embargo, Lu y Likos (2004) recomiendan considerar esta conversión a fin de no eliminar la posibilidad de estimar la variación volumétrica de los poros. En la columna 5 se calcula el radio de poro asociado a los correspondientes valores de la succión con la ayuda de la ecuación de Laplace (Ecuación 2.1). Se calcula a continuación el espesor de la película de agua adsorbida en las paredes del medio poroso  $t_i$  con la ayuda de la ecuación 2.5 que necesita los datos de la humedad relativa de la columna 2 previamente calculados y recordando que  $\tau = 2.77 \text{ \AA}$ , para después sumárselos al tamaño de poro previamente calculado y hacer  $r_t^i = r_k^i + t^i$  (columna 7). La variación en los volúmenes de agua  $V_w$  se hace por simple diferencia entre el valor  $i$  y el  $i + 1$  de los volúmenes

de la columna 4, esto último identifica la variación de humedad que existe debido a la aplicación de succión al suelo. Lu y Likos (2004) recomiendan que para establecer el valor definitivo del radio de poro se evalúe el promedio  $\bar{r}_t^i$  entre el valor  $i$  y el  $i + 1$  de los radios  $r_t^i$  de la columna 5, mismos que se colocan en la columna 9.

Cuadro 3.3. Procedimiento de cálculo para estimar la distribución de frecuencias de tamaños de poro basándose en la curva de retención agua-suelo (Lu y Likos, 2004).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Succión (kPa)	HR	w	$V_w$ (cm <sup>3</sup> /g)	$r_k^i$ (Å)	$t_i$ (Å)	$r_t^i$ (Å)	$\Delta V_w$ (cm <sup>3</sup> /gr)	$\bar{r}_t^i$ (μ)
1	0.100	0.9999993	0.322	0.3229	14513845	524.0172	14514369	'-----	'-----
2	0.119	0.9999991	0.322	0.3229	12179126.1	494.2615	12179620.4	0	1334.70
3	0.142	0.9999990	0.322	0.3229	10219973.6	466.1954	10220439.8	0	1120.00
4	0.169	0.9999988	0.322	0.3229	8575973.24	439.7230	8576412.96	0	939.84
5	0.202	0.9999985	0.322	0.3229	7196429.29	414.7539	7196844.04	0	788.66
6	0.240	0.9999982	0.322	0.3229	6038800.85	391.2025	6039192.05	0	661.80
7	0.286	0.9999979	0.322	0.3229	5067390.26	368.9885	5067759.25	0	555.35
8	0.341	0.9999975	0.322	0.3229	4252242.25	348.0359	4252590.28	0	466.02
9	0.407	0.9999970	0.322	0.3229	3568220.16	328.2731	3568548.44	0	391.06
10	0.485	0.9999964	0.322	0.3229	2994230.9	309.6325	2994540.53	0	328.15
11	0.578	0.9999957	0.322	0.3229	2512574.42	292.0503	2512866.47	0	275.37
12	0.688	0.9999949	0.322	0.3229	2108397.92	275.4666	2108673.38	0	231.08
13	0.820	0.9999939	0.322	0.3229	1769237.86	259.8245	1769497.68	0	193.91
14	0.978	0.9999928	0.322	0.3229	1484635.6	245.0707	1484880.67	0	162.72
15	1.165	0.9999914	0.322	0.3229	1245814.88	231.1546	1246046.04	0	136.55
16	1.388	0.9999897	0.321	0.3218	1045411.23	218.0288	1045629.25	0.00117	114.58
17	1.654	0.9999878	0.319	0.3195	877244.804	205.6482	877450.452	0.00226	96.15
18	1.972	0.9999854	0.317	0.3172	736129.885	193.9707	736323.856	0.00226	80.69
19	2.350	0.9999826	0.314	0.3150	617714.925	182.9563	617897.881	0.00226	67.71
20	2.800	0.9999793	0.312	0.3127	518348.373	172.5674	518520.941	0.00226	56.82
21	3.337	0.9999754	0.300	0.3009	434966.074	162.7683	435128.843	0.01178	47.68
22	3.976	0.9999706	0.284	0.2847	364996.778	153.5257	365150.303	0.01629	40.01
23	4.739	0.9999650	0.245	0.2455	306282.847	144.8079	306427.655	0.03914	33.58
24	5.647	0.9999583	0.180	0.1805	257013.728	136.5852	257150.313	0.06503	28.18
25	6.730	0.9999503	0.125	0.1248	215670.113	128.8293	215798.942	0.05572	23.65
26	8.020	0.9999408	0.104	0.1045	180977.094	121.5139	181098.608	0.02024	19.84
27	9.557	0.9999294	0.089	0.0896	151864.847	114.6139	151979.461	0.01488	16.65
28	11.389	0.9999159	0.075	0.0748	127435.639	108.1056	127543.745	0.01488	13.98

29	13.572	0.9998998	0.060	0.0599	106936.151	101.9670	107038.118	0.01488	11.73
30	16.174	0.9998806	0.045	0.0450	89734.2406	96.1769	89830.4175	0.01488	9.84
31	19.275	0.9998577	0.030	0.0301	75299.4557	90.7156	75390.1713	0.01488	8.26
32	22.970	0.9998304	0.026	0.0257	63186.672	85.5644	63272.2364	0.00437	6.93
33	27.373	0.9997979	0.022	0.0224	53022.3689	80.7057	53103.0747	0.00339	5.82
34	32.620	0.9997591	0.020	0.0205	44493.1109	76.1230	44569.2339	0.00190	4.88
35	38.874	0.9997129	0.020	0.0200	37335.8822	71.8004	37407.6826	0.00042	4.10
36	46.326	0.9996579	0.020	0.0196	31329.976	67.7233	31397.6993	0.00042	3.44
37	55.206	0.9995924	0.019	0.0192	26290.189	63.8777	26354.0667	0.00042	2.89
38	65.789	0.9995142	0.019	0.0188	22061.1096	60.2505	22121.3601	0.00042	2.42
39	78.401	0.9994211	0.018	0.0183	18512.3264	56.8292	18569.1556	0.00042	2.03
40	93.430	0.9993102	0.018	0.0179	15534.4057	53.6022	15588.008	0.00042	1.71
41	111.341	0.9991780	0.018	0.0176	13035.5178	50.5585	13086.0763	0.00035	1.43
42	132.685	0.9990206	0.017	0.0171	10938.6048	47.6876	10986.2924	0.00042	1.20
43	158.120	0.9988329	0.017	0.0167	9179.00442	44.9797	9223.98412	0.00042	1.01
44	188.431	0.9986093	0.016	0.0163	7702.45596	42.4256	7744.88155	0.00042	0.85
45	224.553	0.9983430	0.016	0.0159	6463.42731	40.0165	6503.44381	0.00042	0.71
46	267.600	0.9980256	0.015	0.0154	5423.71068	37.7442	5461.45488	0.00042	0.60
47	318.898	0.9976476	0.015	0.0150	4551.24442	35.6009	4586.84536	0.00042	0.50
48	380.031	0.9971973	0.015	0.0146	3819.1244	33.5794	3852.70378	0.00042	0.42
49	452.882	0.9966609	0.014	0.0142	3204.7743	31.6726	3236.44692	0.00042	0.35
50	500.000	0.9963141	0.014	0.0139	2902.76901	30.6447	2933.41372	0.00028	0.31

Después de evaluar todas las variables consideradas, se pueden visualizar de manera gráfica los resultados de la porosimetría teórica resultante (Figura 3.12) de donde se puede ver que, la forma de la distribución de frecuencias de tamaños de poro está íntimamente relacionada a la de la curva de retención agua-suelo de la Figura 3.11: el radio de poro que con mayor frecuencia se presenta de acuerdo al análisis, se identifica con el valor de 28.18 micras mismo que se puede estimar con la ayuda de la ecuación de Laplace (Ecuación 2.1) y que correspondería de acuerdo a esta ecuación a aproximadamente al valor de 5.6 *kPa*, lo cual está de acuerdo con la etapa en que drena el mayor volumen de líquido del medio poroso.

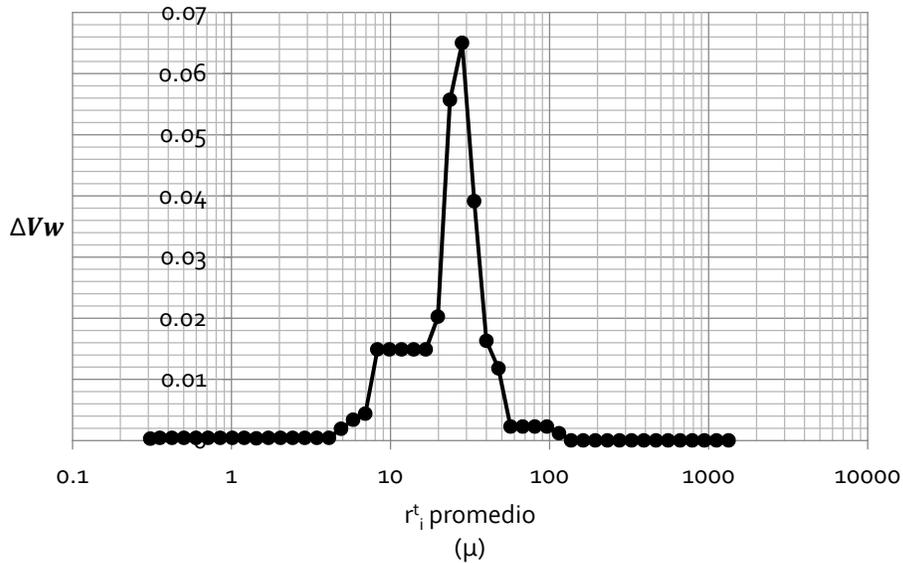


Figura 3.12. Distribución de frecuencias de tamaños de poro teórica, basándose en la curva de retención agua-suelo de la Figura 3.13.

Este procedimiento se basa en la variación que en humedad se da de la curva de retención agua-suelo en etapa de secado y, debido a esto, se puede utilizar la porosimetría resultante para cálculos relacionados con el secado del medio poroso y se utilizó, como ya se dijo, para estimar la porosimetría de los suelos A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7 debido a que no se cuenta con datos experimentales de porosimetría.

### III.2 PLANTEAMIENTO DEL MODELO SÓLIDO-POROSO

Esta sección centra su atención en la modelación de la estructura teórica de los suelos basándose en los datos experimentales de granulometría y porosimetría de cada suelo, lo cual conduce a la determinación de las curvas teóricas de retención agua-suelo. El modelo sólido-poroso tiene como objetivos generales efectuar la distribución de granos sólidos y de poros de una estructura típica de suelo y simular consecuentemente los procesos de humedecimiento-secado.

La metodología establecida para programar el modelo se implementó en el ambiente

ANSYS de elementos finitos de la siguiente manera:

1. Frecuencias de tamaños de sólidos y de poros. Se determina el número correcto de sólidos y de poros de cada diferente tamaño para poder modelar el suelo hacia una estructura escalada.
2. Distribución espacial de sólidos y poros en un volumen finito. Se ubica espacialmente y de manera aleatoria a cada poro y a cada grano sólido en una malla cuadrada de 100 por 100 pixeles hasta cubrir en su totalidad dicha malla con el número requerido de poros y de sólidos de acuerdo a las frecuencias y tamaños calculados en el inciso 1.
3. Poros. Se identifican los poros y a partir de aquí el análisis se centra en la porosidad resultante.
4. Enlaces entre poros. Se consigue conectar a los poros por medio de enlaces que modelan las *gargantas*.
5. Procesos de secado-humedecimiento del modelo. La simulación del humedecimiento y secado del modelo poroso final y la relación que guardan estos fenómenos con los estados de succión, se plantea de acuerdo a un modelo mecánico-estructural de cuerpo rígido que identifica los grados de saturación y los relaciona con los niveles de succión que paulatinamente se van presentando al activar los elementos tipo poro de acuerdo al llamado *efecto de cuello de botella* descrito más adelante. Las curvas de retención agua-suelo resultan de graficar los correspondientes pares de valores *grado de saturación-succión* y se cuenta con la posibilidad de invertir el proceso que en su caso se esté siguiendo (de secado o de humedecimiento) para obtener las curvas de histéresis (*scanning curves* en idioma inglés).

### **III.2.1 Frecuencias de sólidos y poros.**

La modelación de la estructura del suelo obliga a conocer los tamaños reales de los sólidos y de los poros, así como las frecuencias con que se presentan dichos tamaños en una

muestra real de suelo para después, distribuir el número necesario de poros y de sólidos de cada tamaño en un *modelo escalado* y lograr representar la estructura de la muestra real de suelo en el programa ANSYS.

Las frecuencias de sólidos que se darán como valor de entrada al modelo, se obtienen a partir de la envolvente experimental de frecuencias de tamaños (Figura 3.13), misma que se obtiene de la granulometría real.

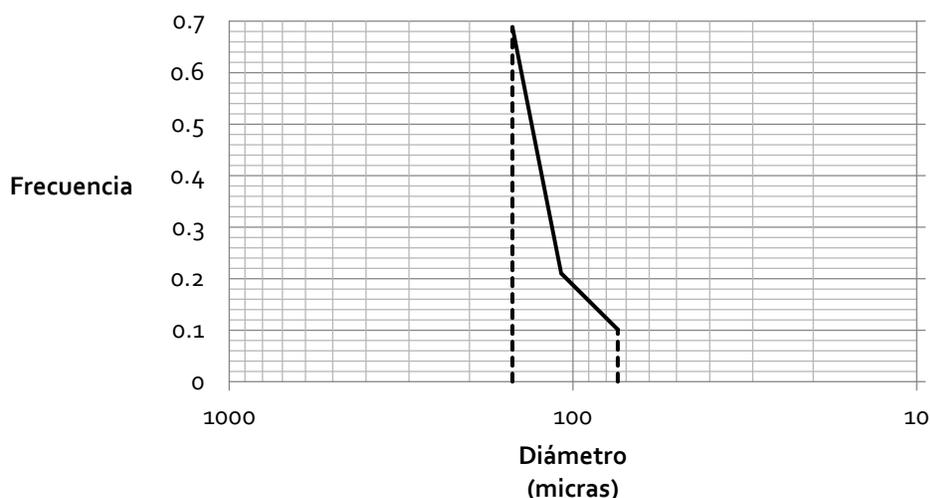


Figura 3.13. Distribución de frecuencias de tamaños de grano para un suelo arenoso obtenida a partir de la granulometría experimental.

El modelado se ha llevado a cabo para un total de seis diferentes tamaños de sólidos, es decir, se dispone de la posibilidad de dar al modelo numérico solamente seis diferentes tamaños asociados cada uno a una frecuencia (Figura 3.14). La limitación en el número de sólidos distintos tiene que ver con evitar que se vuelva extenuantemente larga e inviable la ejecución por su larga duración debido al hardware computacional que se utilizó. Por tanto, debe normalizarse la envolvente de la Figura 3.13 para representarla solamente con seis pares de valores.

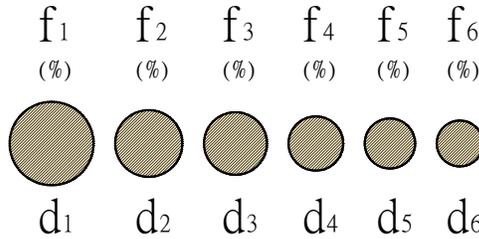


Figura 3.14. Seis tipos diferentes de tamaños de granos sólidos considerados representativos del total de la muestra de suelo.

Siendo de esta manera, se localizan seis puntos representativos de la distribución de frecuencias de la Figura 3.13 de manera tal que se vea reflejada esta envolvente en la medida de lo posible (ver Figuras 3.13 y 3.15). Una vez establecidos estos seis pares de valores frecuencia-tamaño en la envolvente real, se procede a normalizarlos para lograr que las frecuencias de los seis puntos representativos sumen 100%. El Cuadro 3.4 representa la secuencia de cálculo para normalizar la envolvente de frecuencias-tamaños de partículas de la Figura 3.13. En la columna 3 se presenta la frecuencia real obtenida de la granulometría del material misma que se obtiene de la Figura 3.13. En las columnas 4 y 5 del cuadro 3.4 están las frecuencias normalizadas en decimales y porcentajes respectivamente que se encuentran graficadas en la Figura 3.15.

Cuadro 3.4 Ejemplo de cálculo para normalizar la envolvente experimental de frecuencias y tamaños de sólidos de la Figura 3.13.

1	2	3	4	5
Sólido	Diámetro seleccionado ( $\mu$ )	Frecuencia real	Frecuencia normalizada para 6 tamaños	Frecuencia (%)
1	74.00	0.101	0.051	5.193
2	93.00	0.160	0.082	8.216
3	105.67	0.203	0.104	10.423
4	118.33	0.325	0.166	16.688
5	131.00	0.470	0.241	24.133
6	150.00	0.688	0.353	35.348
			<b>Suma de frecuencias:</b>	<b>100 %</b>

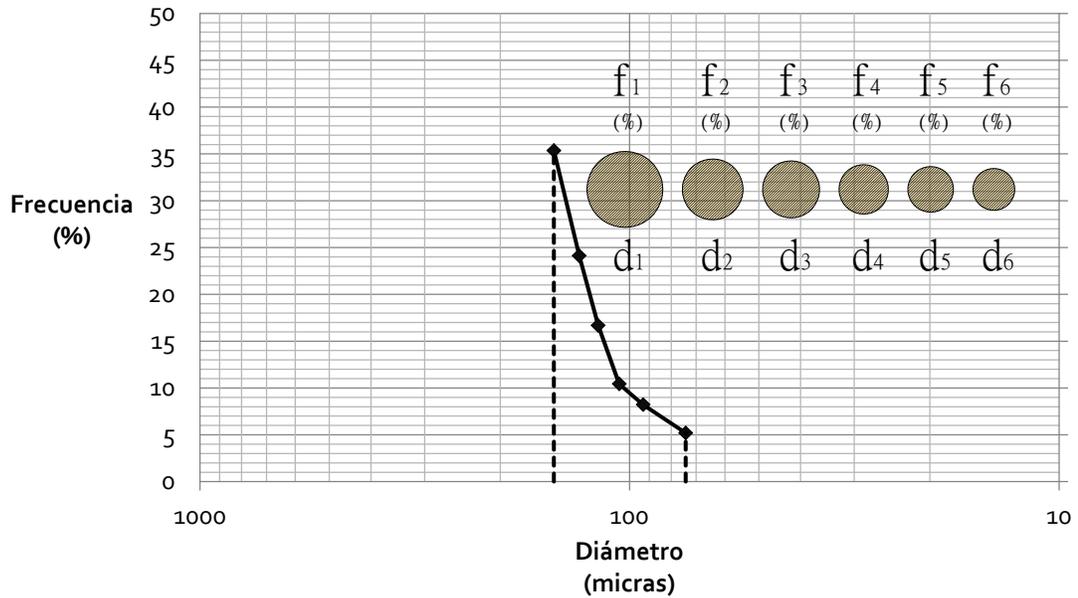


Figura 3.15. Envoltente de frecuencias - tamaños de granos diferentes entre sí de un suelo arenoso con 6 puntos representativos.

Se deberá hacer lo propio en relación al estudio de porosimetría para la distribución de frecuencias de tamaños de poro, ya que se dispone también de seis diferentes tamaños para representar la estructura porosa del suelo. La Figura 3.16 consigna los resultados del estudio de porosimetría experimental para una muestra típica de arena fina.

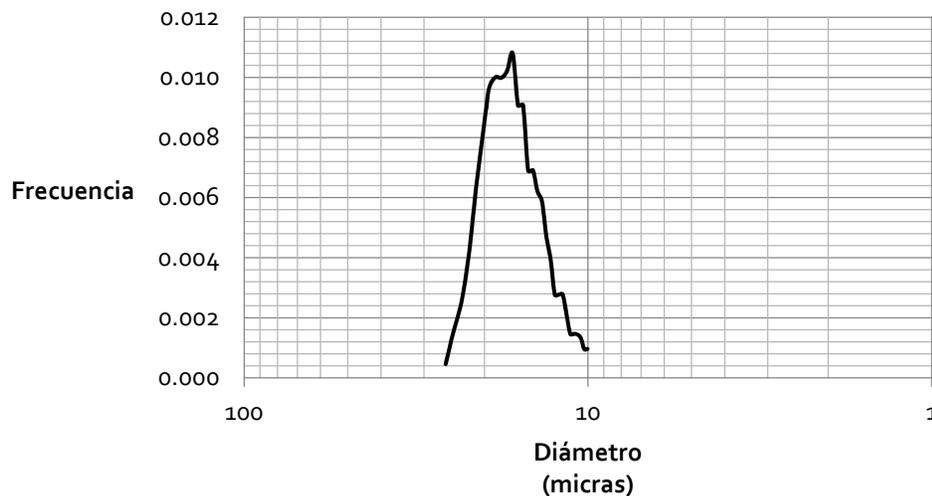


Figura 3.16. Distribución de tamaños de poro típica de un suelo arenoso.

Para obtener la distribución normalizada a seis tamaños representativos de frecuencias

tamaños de poro, se plantean puntos representativos de la envolvente de la Figura 3.16 mismos que normalizados a seis tamaños diferentes se presentan en la Figura 3.17; la secuencia de cálculo es análoga a la de los sólidos.

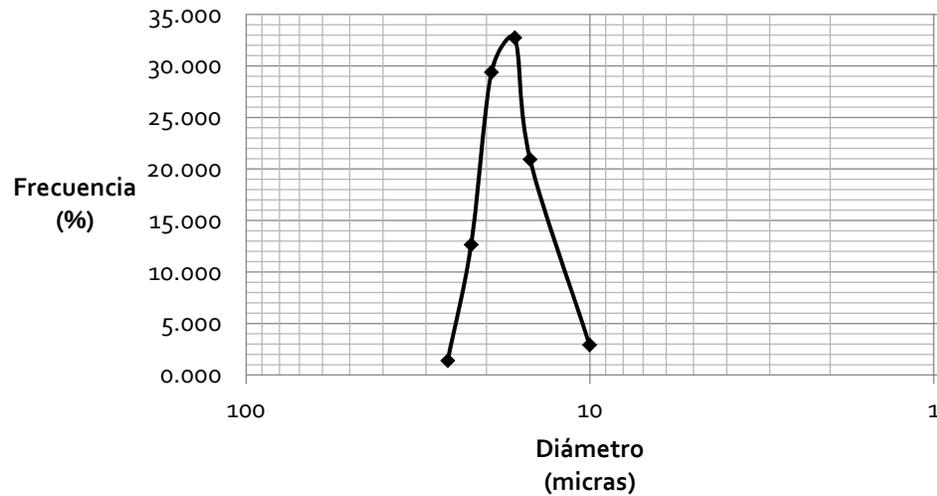


Figura 3.17. Envolvente de frecuencias - tamaños de poros diferentes entre sí de un suelo arenoso con 6 puntos representativos.

Se cuenta al final de este proceso con dos vectores a saber, uno que cuenta con las frecuencias y tamaños de seis diferentes sólidos y otro con las frecuencias y tamaños de seis diferentes poros, disponiendo al final con un total de doce diferentes tamaños de entidades (sólidos y poros) que deberán ser distribuidas en la malla cuadrada de 100 por 100 pixeles de acuerdo a la cantidad especificada por las frecuencias que se calcularon en esta sección. Es probable que las distribuciones de sólidos y las de poros se encuentren intercaladas en tamaños lo que quiere decir que, no necesariamente el poro más grande deberá ser menor que el sólido más grande; el modelo puede lidiar con esto gracias a que estos vectores se almacenan en la memoria interna de la unidad central de procesamiento CPU y se da la instrucción a ANSYS discerna entre los dos tipos de entidades.

## III.2.2 Distribución de sólidos y poros escalados en un volumen finito

### III.2.2.1 Leyes de escalado para los sólidos y poros.

Como ya se dijo, la totalidad del modelo del suelo en ANSYS es un área formada por 10,000 unidades básicas y por tanto, la unidad básica se ha definido *a priori* como el poro o sólido más pequeño según sea el caso. Debe a continuación considerarse la aplicación de un factor que escale las dimensiones reales a las del prototipo de 10,000 unidades básicas. El factor de escala  $\xi$  se ha definido de la siguiente manera:

$$\xi = \frac{A_m}{A_r} \quad (3.6)$$

En donde  $A_r$  es el área real más pequeña (sólido o poro) y  $A_m$  representa el área básica más pequeña del modelo escalado (1 pixel). De manera que para escalar el área real  $i$ -ésima  $A_{r_i}$ , debe hacerse  $A_i = \xi A_{r_i}$  donde  $1 < i < 12$ . El factor de escala es aplicable también a diámetros:

$$D_m = \xi^{1/2} D_r \quad (3.7)$$

En donde  $D_r$  es el diámetro real más pequeño el cual pertenece al área  $A_r$  y  $D_m$  representa el diámetro escalado que pertenece al área básica más pequeña del prototipo. De manera que para escalar el diámetro real  $i$ -ésimo  $D_{r_i}$  a las dimensiones del prototipo, debe hacerse  $D_i = \xi^{1/2} D_{r_i}$  donde  $1 < i < 12$ .

A los vectores de sólidos y de poros definidos en la sección III.2.1 se les aplica el factor  $\xi$  para escalar sus dimensiones al prototipo de acuerdo a las Ecuaciones 3.6 y 3.7 para escalarlos. El elemento más pequeño, sea un sólido o un poro, contará con un área escalada igual a un pixel y las áreas de los otros once elementos serán iguales al número requerido de pixeles para cumplir con las leyes de escalado. El número de elementos de cada  $i$ -ésimo sólido y de cada  $i$ -ésimo poro que se habrá de distribuir en la malla de 100 por 100 pixeles estará de acuerdo con la frecuencia ya normalizada.

### III.2.2.2 Distribución de elementos escalados en la malla de 100 por 100 pixeles.

Se parte del hecho de que en nuestra naturaleza física ningún punto material ocupa el lugar de otro, así como de que carece de sentido pensar que existen “vacíos” que no ocupa ningún cuerpo en nuestra naturaleza física real; la distribución de sólidos y de poros se hace cumpliendo estas condiciones, y tomando en cuenta que ya se conoce el número  $n$  y tamaño de cada poro  $i$ -ésimo y de cada sólido  $i$ -ésimo necesarios para cumplir con las frecuencias requeridas, se procede de la siguiente manera:

Se inicia por conveniencia a distribuir los  $n$  elementos requeridos del elemento  $i$ -ésimo, ya sea un sólido o un poro, cuyas dimensiones de entre los once elementos restantes son las mayores. Se implementa una subrutina mediante la cual se hace un *mapeo* con la ayuda de un vector cuyo origen es un punto escogido de manera aleatoria; el vector trabaja mediante coordenadas cilíndricas de manera que hace un barrido en forma circular sumando pixeles hasta lograr obtener el número de pixeles o áreas básicas  $A_m$  requerido de acuerdo al escalado previo para el elemento  $i$ -ésimo (Figura 3.18).

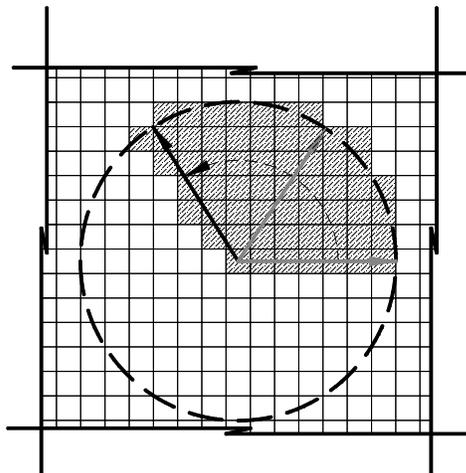


Figura 3.18. Vector que barre las áreas básicas para encontrar el número necesario de pixeles requerido por cada sólido o poro.

Una vez que el vector identifica el primero de los  $n$  elementos necesarios, procede con los demás hasta satisfacer la frecuencia requerida; además, el vector reconoce los píxeles que ya forman parte de otro elemento y no los adhiere a uno nuevo. Terminados los  $n$  elementos requeridos del elemento  $i$  –ésimo, la subrutina indica al programa ANSYS que proceda con el

número solicitado de elementos del grupo  $i + 1$  hasta completar los doce elementos disponibles para reproducir la estructura del suelo de acuerdo a las frecuencias normalizadas y diámetros escalados. La Figura 3.19 ilustra cómo se presenta una vez que se distribuyeron todos los poros y todos los sólidos en la malla de 10,000 píxeles.

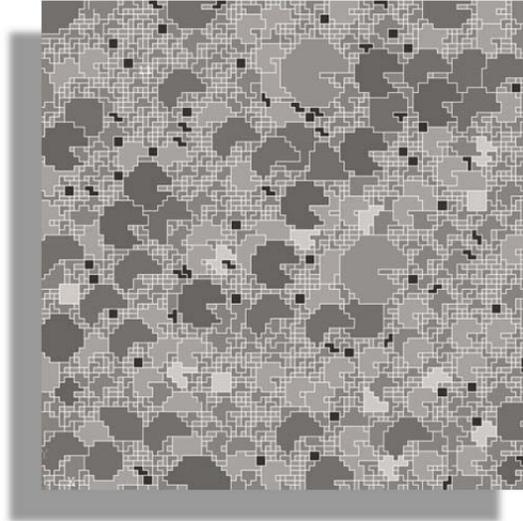
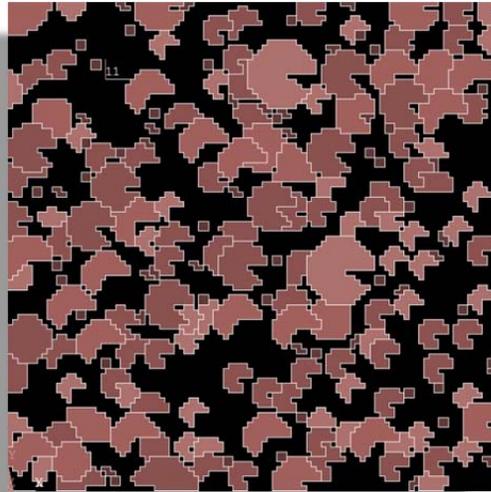
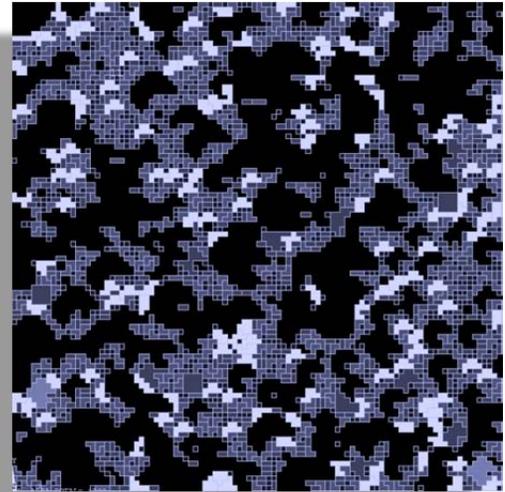


Figura 3.19. Distribución final de granos

El proceso continúa separando los poros (Figura 3.20a) de los sólidos (Figura 3.20b) lo cual es posible gracias a que se indicaron previamente características distintas a cada uno de los doce elementos; a partir de este momento, la atención se centrará en la distribución espacial final de poros.



(a)



(b)

Figura 3.20. a) Distribución final de sólidos; b) Distribución final de poros.

Es necesario mencionar que la distribución de elementos que se acaba de describir tiene una limitación en cuanto a los rangos de tamaños que puede manejar: el elemento más grande de los doce disponibles no debe ser mayor de once o doce veces a lo más que el más chico de ellos; esto se debe a que si la relación de tamaños se incrementa, el modelo tendría que *acomodar* en la malla cuadrada a los elementos más grandes los cuales tendrían dimensiones considerablemente mayores comparadas con las de los demás. Es precisamente esta limitación la que conduce el estudio de este trabajo hacia las arenas donde se pretenden encontrar granos sólidos no muy distintos entre sí en lo que respecta a sus dimensiones, sin embargo, la generalidad del modelo se conserva pudiendo ser utilizado incluso para suelos con doble porosidad pero que sin embargo, el modelado de su estructura tendría que utilizar mallas cada vez más grandes y recursos computacionales cada vez más potentes.

### III.2.3 Elementos tipo poro.

En esta etapa se remplazan las geometrías irregulares de los poros por geometrías circulares equivalentes en dimensiones y cuyo centro se ubica en el centro geométrico de las geometrías irregulares (ver Figuras 3.20b y 3.21). El cambio de geometrías irregulares hacia geometrías circulares atiende a la necesidad de evaluar la succión por medio de la ecuación de

Young-Laplace (Ecuación 2.1).

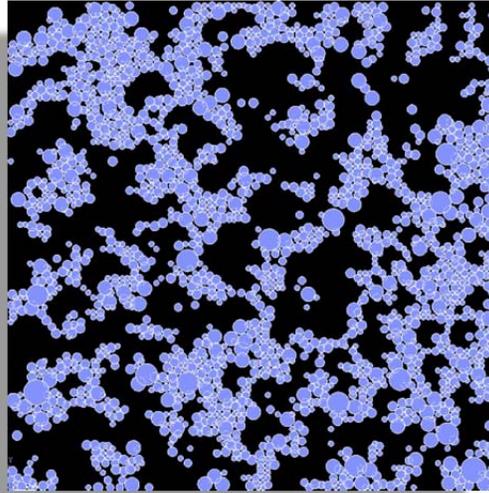


Figura 3.21. Granos poro remplazados por granos poro circulares equivalentes.

### III.2.4 Enlaces entre poros

Se consigue ahora conectar con un mínimo de dos y un máximo de seis enlaces por poro y la unión se hace identificando los vecinos más cercanos lo cual evita que se interconecten poros diametralmente opuestos y permite crear estructuras geoméricamente factibles. La Figura 3.22 muestra la interconexión efectuada entre los poros circulares de la Figura 3.21.

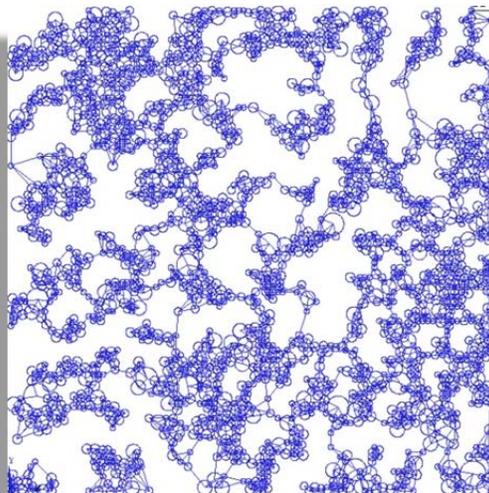


Figura 3.22. Estructura de poros conectados mediante enlaces.

### III.2.5 Procesos de secado – humedecimiento del modelo

El problema que se pretende resolver ahora es el de simular los efectos capilares y flujo de agua; concretamente se desean simular los movimientos de agua en la masa de suelo y evaluar los estados de succión asociados a cada uno de los grados de saturación derivados de la intrusión y expulsión del líquido a través de la estructura de poros y enlaces.

Para resolver este problema, se deben tomar en cuenta ciertas hipótesis fundamentadas que permiten explicar la forma peculiar de las curvas de retención agua-suelo. Lu y Likos (2004) explican que los patrones de las curvas de retención agua-suelo no se pueden revelar si no se toman en cuenta los siguientes factores que la modifican: (a) el efecto geométrico asociado a la distribución de frecuencias de tamaños de poro no-homogénea referida a menudo como el *efecto de cuello de botella*, (b) la condensación capilar, la cual se vuelve un proceso único de humedecimiento a valores relativamente bajos de contenido de agua, (c) aire atrapada, la cual se presenta por la formación de burbujas en estado ocluido en secciones donde no hay salida para que salga el aire, (d) cambios volumétricos los cual pueden alterar la estructura de suelos finos de manera diferente durante el humedecimiento y secado de las mismas e (e) histéresis debida a la diferencia intrínseca que se da entre los ángulos de contacto de humedecimiento y los de secado en la interface partícula de suelo-agua de poro.

#### III.2.5.1 Efecto cuello de botella.

Para explicar las implicaciones del *efecto cuello de botella* en el drenaje e imbibición del líquido en el suelo, se presentan dos diferentes posibilidades del arreglo interconectado de poros en las Figuras 3.23a y 3.23b donde en ambos arreglos los poros  $S_1 > S_2 > S_3 > S_4 > S_5$  y de igual manera, los enlaces  $L_1 > L_2 > L_3 > L_4 > L_5$  en lo referente a su tamaño.

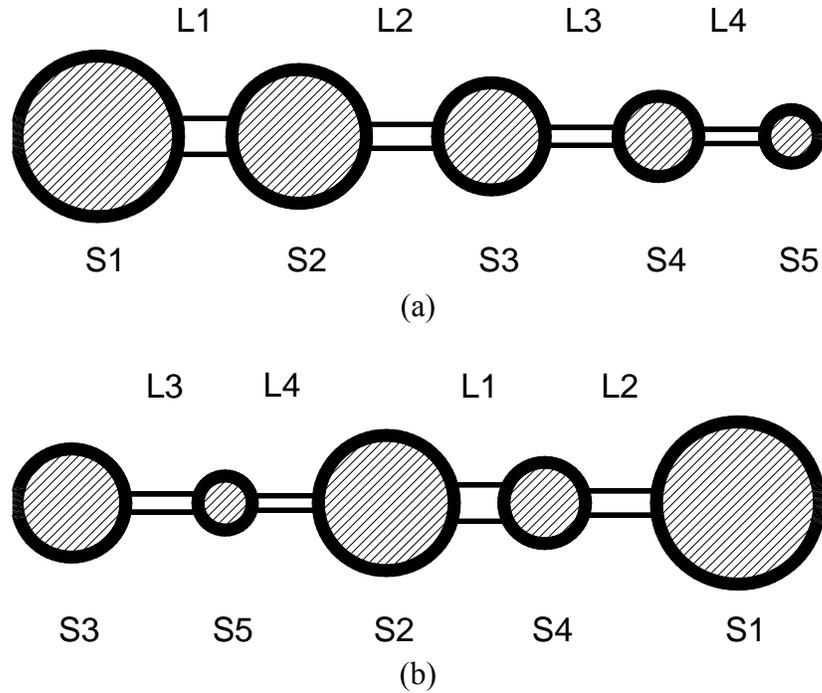
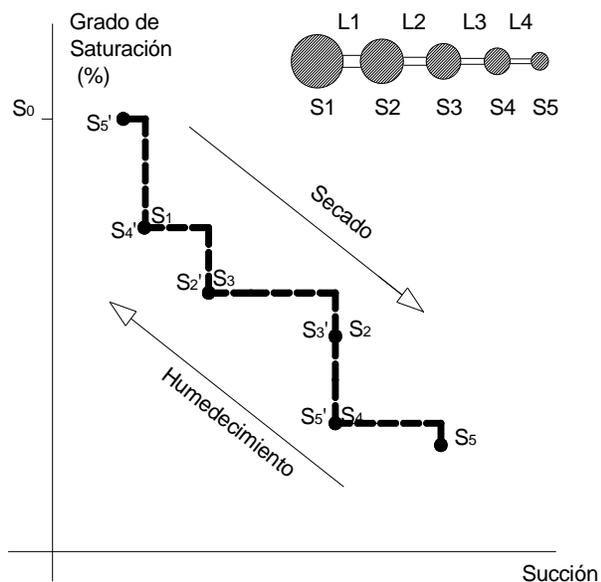


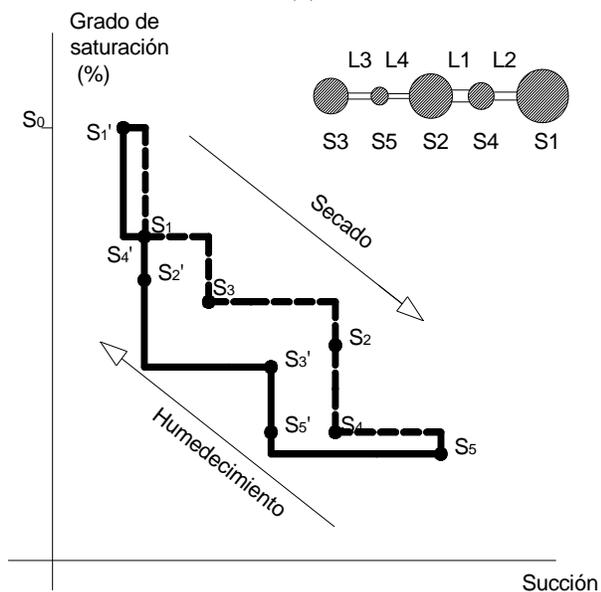
Figura 3.23. Dos posibilidades de un conjunto de poros conectados.

Si se centra la atención en la parte “a” de la Figura 3.23 y se considera inicialmente saturado de agua, el líquido necesariamente drenaría por las fronteras hacia afuera de  $S_1$  y  $S_5$  para lo cual, se puede verificar que de acuerdo a la ecuación de Young-Laplace, se seca primero el poro más grande  $S_1$  porque la succión ( $u_a - u_w$ ) que se necesita aplicar es menor que la que se necesita para secar el poro más pequeño  $S_5$ . Así pues, el secado de la muestra procede de izquierda a derecha ininterrumpidamente en virtud de que se van secando primero los poros más grandes y el más pequeño  $S_5$  se deja hasta el último porque requiere los mayores niveles de succión para secarse de acuerdo a la ecuación de Young-Laplace. Si ahora se procede a humedecer la muestra desde el punto donde se quedó, es decir, con el nivel de succión máximo y grado de saturación nulo, se verifica que el volumen para humedecer el poro más pequeño  $S_5$  es mucho menor que el que se necesita para humedecer el poro  $S_1$ ; por tanto, ahora el humedecimiento procede de derecha a izquierda y así mismo se van restableciendo los niveles iniciales de succión en el suelo. Si se grafica este comportamiento en un eje coordenado colocando como ordenadas el grado de saturación y como abscisas el estado de succión, se puede esbozar el comportamiento establecido en la Figura 3.24a de donde se deduce que el patrón de humedecimiento y el de secado son los mismos y por tanto, el arreglo 3.23a no presenta ningún

nivel de histéresis.



(a)



(b)

Figura 3.24. Dos curvas de retención agua-suelo derivadas de los arreglos propuestos en la Figura 3.23.

Ahora se puede verificar de la Figura 3.23b que se han desordenado tanto las posiciones de los enlaces como las de los poros ordenándose de una manera totalmente arbitraria. Si la

muestra inicialmente se seca aplicando succión, el primer poro que drena es el  $S_1$ , sin embargo, ocurre ahora que si la muestra se sigue secando, quedan en este punto expuestos al exterior ahora los poros  $S_3$  y  $S_4$  y el que drenará enseguida será  $S_3$ . A continuación drena el poro  $S_4$  que es el que sigue en tamaño pero inmediatamente lo acompaña  $S_2$  debido a que los niveles de succión para drenar este último ya fueron sobrepasados por mucho; queda como última opción drenar el poro  $S_5$ . Si se procede ahora a humedecer la muestra a su condición inicial de saturación se debe ejecutar el mismo procedimiento. Así pues, el volumen más pequeño requerido corresponde al poro  $S_3$  que es el que está en primer contacto con el exterior por lo que este poro se satura en conjunto con el poro  $S_5$  por dos motivos: el primero tiene que ver con que el tamaño del enlace que los une es menor que el poro  $S_3$  y por lo tanto, el enlace saturado permite el paso del líquido hacia  $S_3$ ; el segundo motivo es que el nivel de succión requerido para llenar el poro  $S_5$  ya fue satisfecho por el llenado del poro  $S_3$ . Se procede de manera análoga con todo el conjunto interconectado. Graficando de manera análoga a la anterior en un eje coordenado se puede graficar el comportamiento de la muestra interconectada (Figura 3.24b)

El primer arreglo (parte “a” de la Figura 3.24) no muestra ningún nivel de histéresis debido a que el proceso de humedecimiento y secado siguen el mismo patrón. El segundo arreglo se parece mucho más a lo que ocurre en realidad en las muestras no saturadas en una curva de retención agua-suelo. Del análisis anterior se concluyen tres condiciones indispensables para simular correctamente el comportamiento de humedecimiento y drenado en los suelos:

1. Debe existir una distribución aleatoria de poros distintos, es decir, los poros no deben unirse secuencialmente de mayor a menor ni tampoco unir poros iguales.
2. Los poros deben estar interconectados por enlaces que deben estar ordenadas de forma aleatoria de igual manera.

Estos puntos corresponden esencialmente al llamado fenómeno de *cuello de botella*.

### **III.2.5.2 Modelo Mecánico – Estructural**

El proceso continúa relacionando los elementos finitos tipo masa (MASS21), así como los

elementos tipo viga (BEAM44) con los poros y enlaces respectivamente (Figura 3.25). Dichos elementos se encuentran en la librería de elementos finitos que contiene el programa de elementos finitos ANSYS.

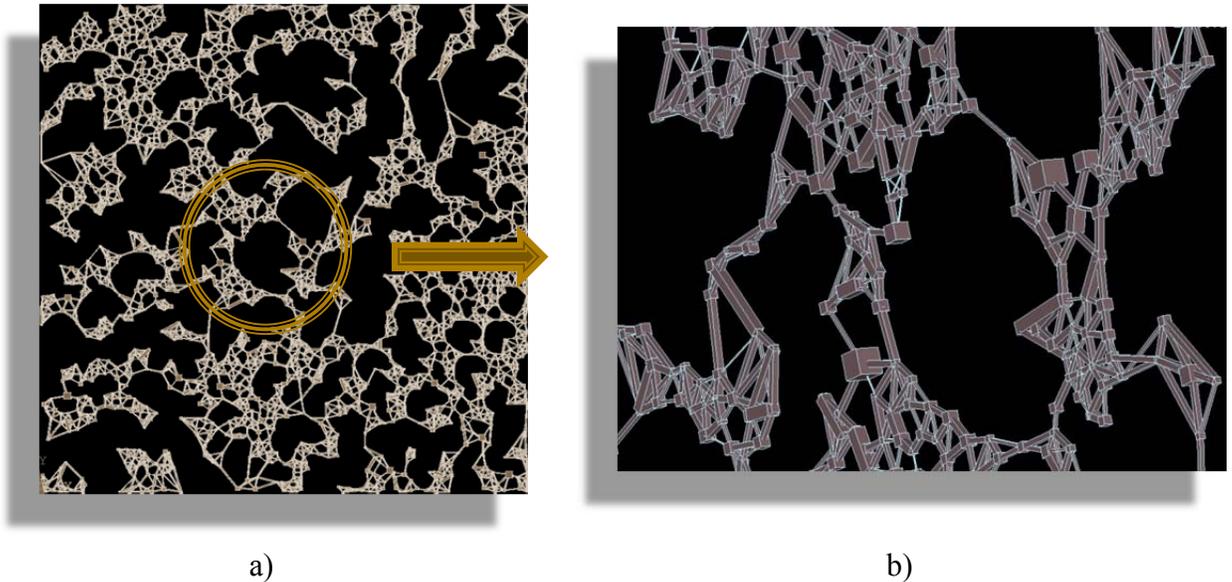


Figura 3.25. a) Estructura de poros conectados mediante enlaces; b) acercamiento a la red porosa interconectada, rotada alrededor del eje vertical.

MASS21 está considerado ser un elemento finito masa estructural y consta de hasta seis grados de libertad: traslaciones nodales sobre los ejes “X”, “Y” y “Z”, así como rotaciones alrededor de los mismos ejes. El elemento está definido por un solo nodo, componentes masa concentradas en las direcciones coordenadas del elemento  $\left(\frac{\text{Fuerza} \cdot \text{Tiempo}^2}{\text{Longitud}}\right)$  e inercias rotatorias  $\left(\frac{\text{Fuerza} \cdot \text{Longitud}}{\text{Tiempo}^2}\right)$  alrededor de los ejes coordenados del elemento. BEAM 44 es un elemento uniaxial con características de flexión, torsión, compresión y tensión. El elemento posee seis grados de libertad en cada nodo, traslaciones en las direcciones X, Y y Z, así como rotaciones alrededor de los mismos ejes.

El modelado de la estructura porosa en este sentido confiere entre otras cosas, la bondad de generar un modelo de vista en tres dimensiones (Figura 3.25b).

### III.2.5.3 Activación de poros y enlaces.

La simulación implementada de drenaje e imbibición del agua puede ser vista como un problema mecánico-estructural estático con desplazamientos prescritos aplicados en sus fronteras. El modelo mecánico utilizado para este propósito es el siguiente (Cook R. et al, 1988):

$$\left\{ \int_A [B]^T [D] [B] dv \right\} \{U\} = \int_B [N]^T \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{Bmatrix} dv + \int_{\partial B} [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\partial B + \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix}$$

En donde:

$[B]$  representa a la matriz de derivadas de las funciones de forma;  $[D]$  es la matriz constitutiva;  $[N]$  representa a la matriz de funciones de forma;  $b_x, b_y, b_z$  son las fuerzas de cuerpo;  $P_x, P_y, P_z$  son las fuerzas aplicadas en los nodos y  $\{U\}$  es un vector de desplazamientos.

Para el caso de la rama de secado, los elementos son *activados* de mayor a menor y de acuerdo al efecto de cuello de botella. Por *activación* se pretende decir que cuando el proceso inicia, el elemento *i-ésimo* se selecciona en ANSYS mediante la selección de su *real* asociado y se lleva a cabo un análisis de cuerpo rígido con desplazamientos en la frontera solamente a los elementos seleccionados, el cual consiste en que una vez que están activados los poros y los enlaces que deben estarlo para determinado valor de succión, se procede a desplazar la estructura porosa en un valor de 10 unidades estrictamente en sentido horizontal (Figura 3.26). Esto último tiene la finalidad de identificar los poros que se encuentran activados y consecuentemente (en base a un contador) evaluar el grado de saturación, mismo que se calcula al sumar los volúmenes de los elementos que tienen continuidad entre sí; el valor de la succión se calcula con la ecuación de Young-Laplace. El proceso continúa hasta que el grado de saturación ha descendido hasta el valor nulo.

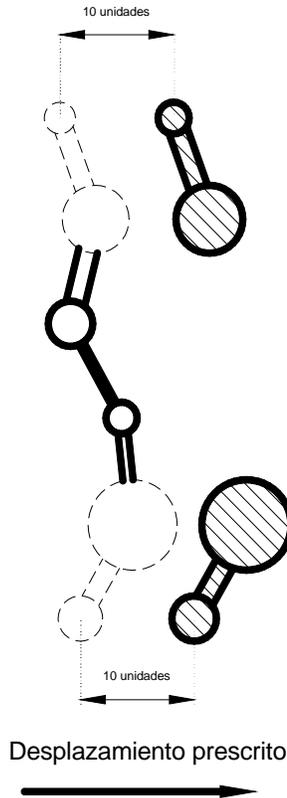


Figura 3.26. Activación de poros y enlaces. Desplazamientos prescritos de 10 unidades en sentido horizontal para identificar poros y enlaces conectados.

El proceso es idéntico en el caso de humedecimiento con la salvedad de que los poros se activan ahora en orden ascendente (de menor a mayor).

En las Figuras 3.27 con incisos “a” al “f” se presenta el proceso de activación tal y como se visualiza en el programa ANSYS durante la simulación de humedecimiento. De la Figura 3.27 se puede señalar por ejemplo a primera vista la marcada diferencia que existe entre la Figura con inciso “c” y la Figura con inciso “d” donde para esta última ya se ha sobrepasado el valor de entrada de aire caracterizado por un fuerte cambio en el volumen de líquido en las muestras de suelo, lo cual está de acuerdo con el efecto cuello de botella.

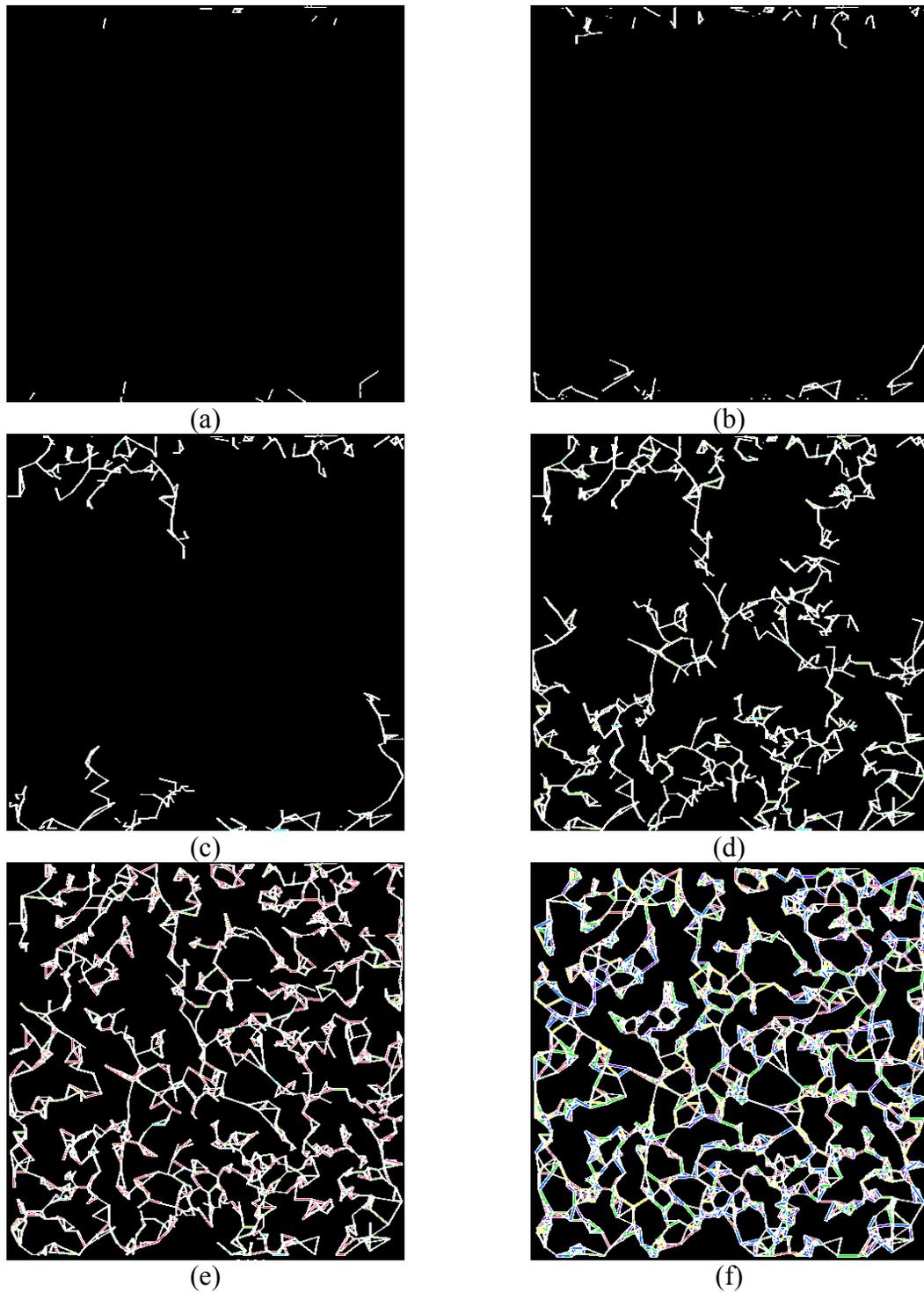


Figura 3.27. Evolución del proceso de activación de poros y enlaces para simular el proceso de humedecimiento de la muestra hacia el interior de la misma.

### III.2.5.4 Curvas de histéresis (*Scanning curves*).

Una vez obtenidas las curvas de humedecimiento y de secado, se cuenta con la posibilidad de verificar el comportamiento de humedecimiento del modelo después de una etapa de secado o viceversa el cual se muestra esquematizado en la Figura 3.28.

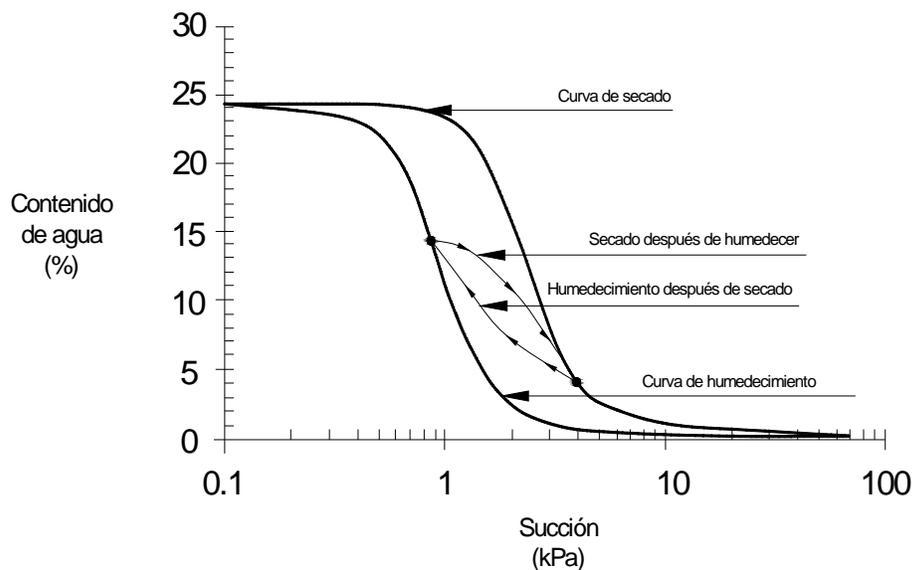


Figura 3.28. Esquema general de comportamiento histérico de las curvas de retención agua-suelo (Fredlund, 2006)

Para esto, el proceso detiene la activación en algún punto de las curvas de secado o de humedecimiento principales según se solicite, e invierte el proceso para proceder a humedecer o a secar de acuerdo a como se ejecutan las operaciones para cada caso según corresponda. El modelo solicita, para este fin, la interacción del usuario y pide que se especifique algún valor ya sea de succión o de grado de saturación a partir del cual se invertirá el proceso que se hubiese estado siguiendo, es decir, se humedece la muestra a partir de un secado parcial o se seca a partir de un humedecimiento parcial como ocurre en la Figura 3.28.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

# Capítulo IV

## IV.1 RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA TODOS LOS SUELOS ESTUDIADOS.

### IV.1.1 A-1

Barrera et al. (2003) llevan a cabo un estudio de conductividad hidráulica en arenas limpias y proponen un modelo estadístico derivado de sus investigaciones, para las cuales caracterizan algunas muestras de un suelo arenoso remoldeado a las cuales miden su curva de retención agua-suelo en secado; las características básicas de estas muestras están en el Cuadro 4.1 y el Cuadro 4.2 contiene las generalidades de la granulometría de dichas muestras.

Cuadro 4.1. Características gravimétricas y volumétricas de A-1

Relación de vacíos (%)	Porosidad (%)	Contenido de agua gravimétrica de saturación (%)	Densidad de sólidos relativa
84.45	45.78	32.23	2.62

Cuadro 4.2. Características generales de la distribución de frecuencias de tamaños de grano de A-1

$D_{50}$ (mm)	$Cu$	$Cc$
0.165	1.105	1.00

La curva granulométrica se consigna en la Figura 4.1. La Figura 4.2 contiene la envolvente de frecuencias de tamaños de sólidos obtenida a partir de la granulometría de la Figura 4.1 así como la envolvente de frecuencias de tamaños de poros, evaluada esta última mediante la técnica de intrusión de mercurio a A-1.

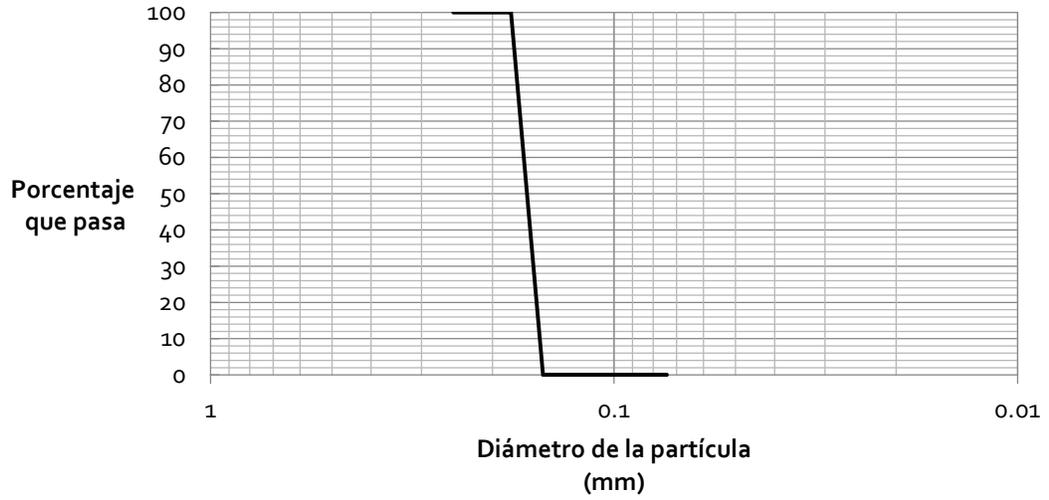


Figura 4.1. Curva de distribución granulométrica de la muestra A-1.

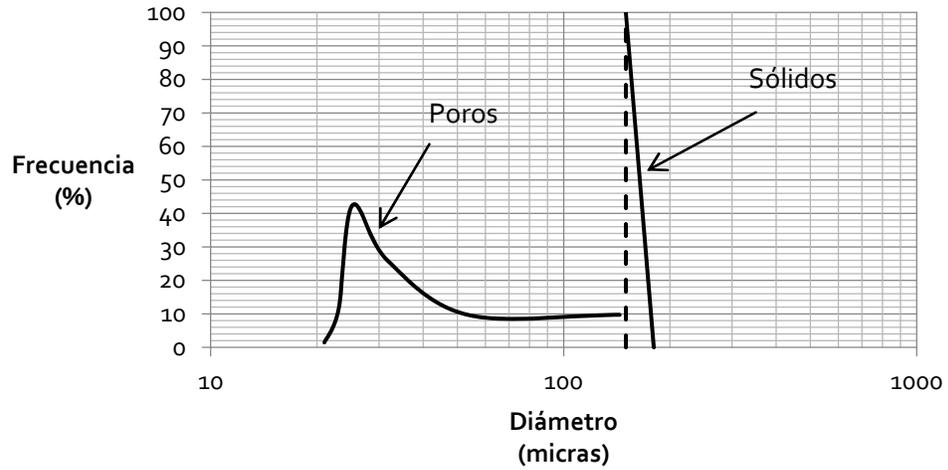


Figura 4.2. Distribuciones de frecuencias de poros y sólidos en la muestra A-1.

La curva de retención agua-suelo de A-1 fue evaluada por medio del plato de presión y los resultados de dicho estudio están en la Figura 4.3.

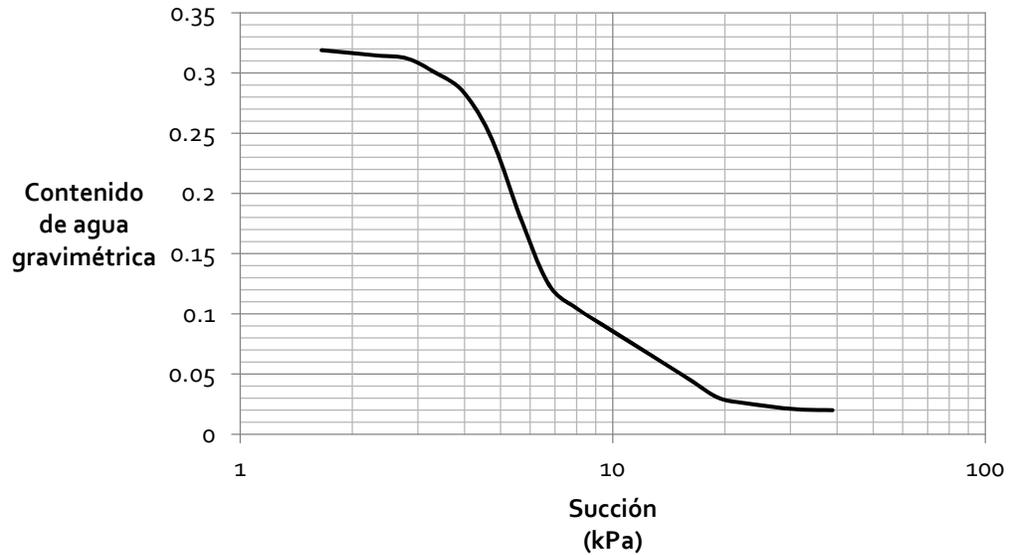


Figura 4.3. Curva de retención agua-suelo de la muestra A-1 en secado (Barrera et al., 2003).

#### IV.1.2 A-2

El estudio de conductividad hidráulica de Barrera et al. (2003) trabaja además con las muestras de arena A-2 que son de naturaleza remoldeada también y a las cuales se les midió la curva de retención agua-suelo en secado (Figura 4.6) cuando tenían las características consignadas en el Cuadro 4.3; el Cuadro 4.4 contiene las generalidades de la granulometría de dichas muestras.

Cuadro 4.3. Características gravimétricas y volumétricas de A-2

Relación de vacíos (%)	Porosidad (%)	Contenido de agua gravimétrica de saturación (%)	Densidad de sólidos relativa
65.79	39.68	25.113	2.62

Cuadro 4.4. Características generales de la distribución de frecuencias de tamaños de grano de A-2

$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
0.516	1.1875	0.97

La curva granulométrica se consigna en la Figura 4.4 y la Figura 4.5 contiene la información de las frecuencias de tamaños de sólidos, obtenida a partir de la granulometría de la Figura 4.4 así como la envolvente de frecuencias de tamaños de poros, evaluada esta última mediante la técnica de intrusión de mercurio a la muestra de arena A-2.

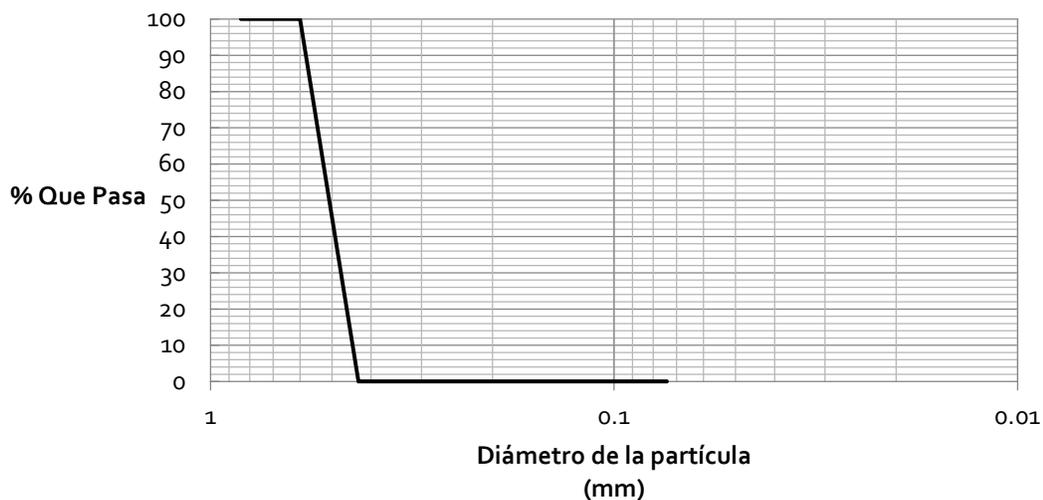


Figura 4.4. Curva de distribución granulométrica de la muestra A-2.

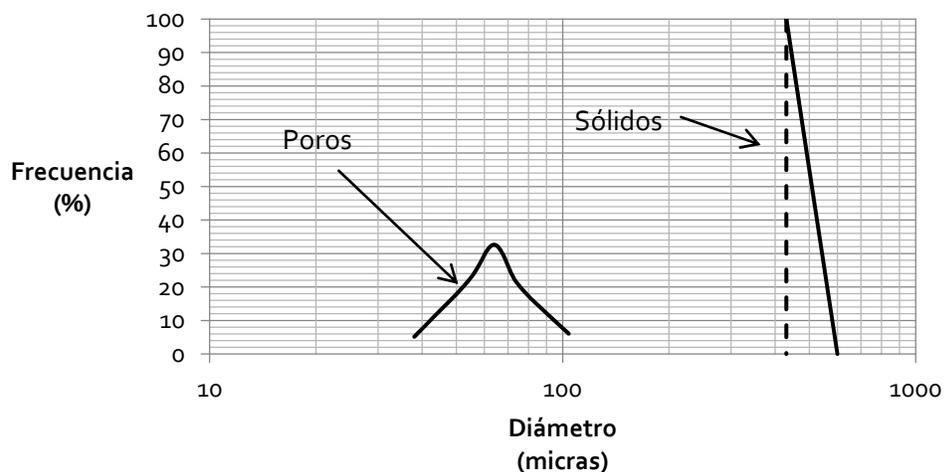


Figura 4.5. Distribuciones de frecuencias de tamaños de poros y sólidos en la muestra A-2.

La curva de retención agua-suelo para estos materiales la evalúan por medio del plato de presión y los resultados de dicho estudio están en la Figura 4.6.

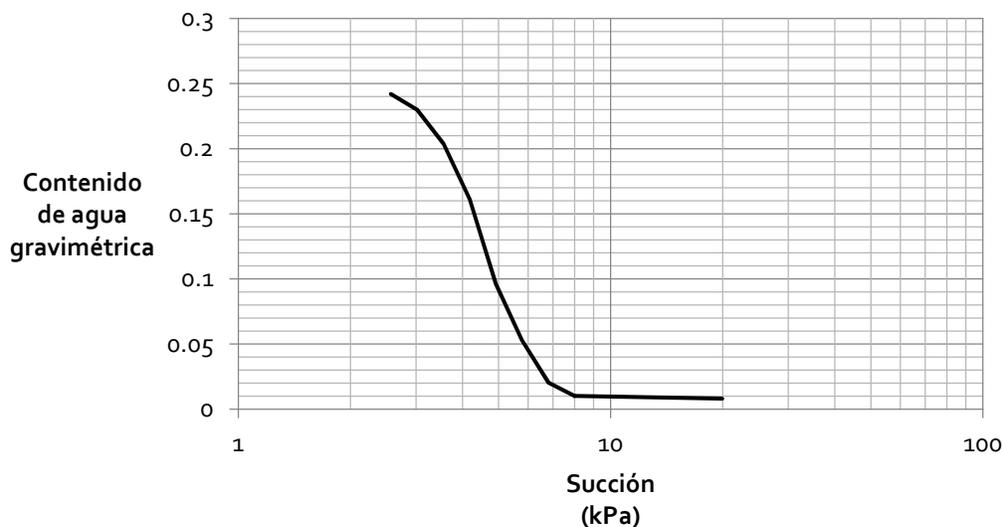


Figura 4.6. Curva de retención agua-suelo de la muestra A-2 en proceso de secado (Barrera et al., 2003).

#### IV.1.3 A-3

Likos (2009) presenta un modelo para reproducir las curvas características de los suelos el cual valida con la ayuda de un estudio experimental conducido sobre arenas como la A-3. Las características básicas de A-3 se consignan en el Cuadro 4.5 al cual se midió la curva de retención agua-suelo (Figura 4.9); las características granulométricas de A-3 son las del Cuadro 4.6.

Cuadro 4.5. Características gravimétricas y volumétricas de A-3

Relación de vacíos (%)	Porosidad (%)	Contenido de agua gravimétrica de saturación (%)	Densidad de sólidos relativa	Superficie específica (m <sup>2</sup> /gr)
81.81	45.00	30.87	2.65	66.00

Cuadro 4.6. Características generales de la distribución de frecuencias de tamaños de grano de A-3

$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
0.105	1.8	1.1



valor de entrada de aire es alto y por tanto utiliza la técnica de traslación de ejes descrita en el capítulo II.

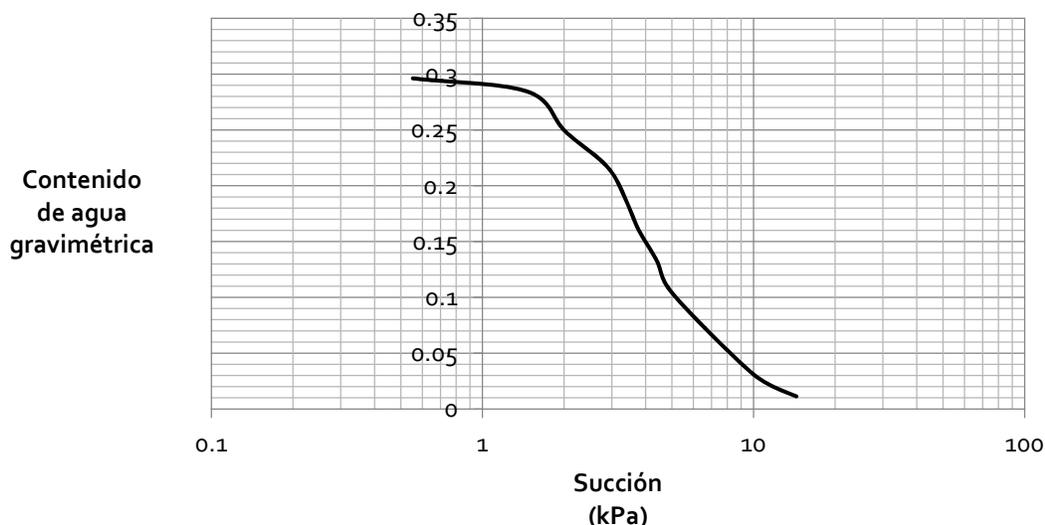


Figura 4.9. Curva de retención agua-suelo de la muestra A-3 en proceso de secado (Likos, 2009).

#### IV.1.4 A-4

Por su parte, Krisdani et al. (2009) estudian la conductividad hidráulica en arenas no saturadas y utilizan el material A-4 (Cuadro 4.7) al cual miden la cura característica suelo-agua (Figura 4.12). El Cuadro 4.8 contiene las propiedades generales de la distribución granulométrica.

Cuadro 4.7. Características gravimétricas y volumétricas de A-4

Relación de vacíos (%)	Porosidad (%)	Contenido de agua gravimétrica de saturación (%)	Densidad de sólidos relativa
61.80	38.20	23.59	2.62

Cuadro 4.8. Características generales de la distribución de frecuencias de tamaños de grano de A-4

$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
4.74	1.82	1.01

En la Figura 4.10 se puede visualizar la curva granulométrica de A-4 y en la 4.11 la

envolvente de frecuencias de tamaños de sólidos obtenida a partir de la 4.10, la cual a su vez contiene también la distribución de tamaños de poro que fue estimada basándose en el procedimiento teórico propuesto por Lu y Likos (2004).

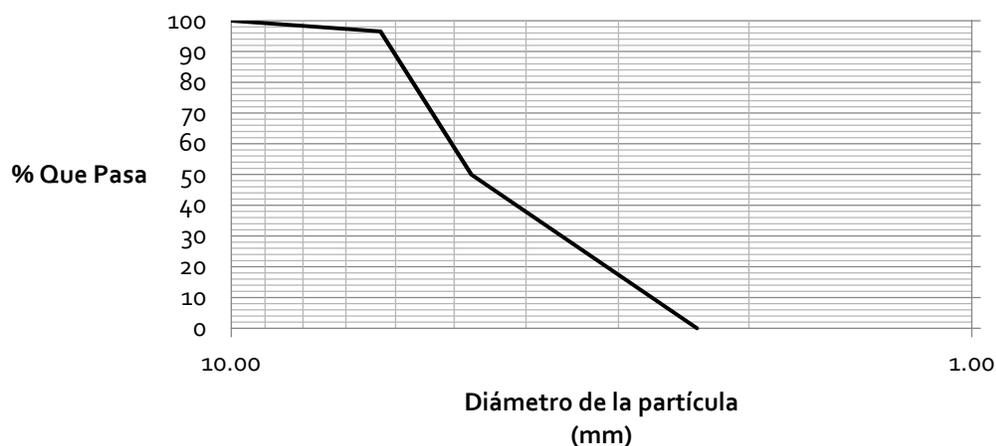


Figura 4.10. Curva de distribución granulométrica de la muestra A-4.

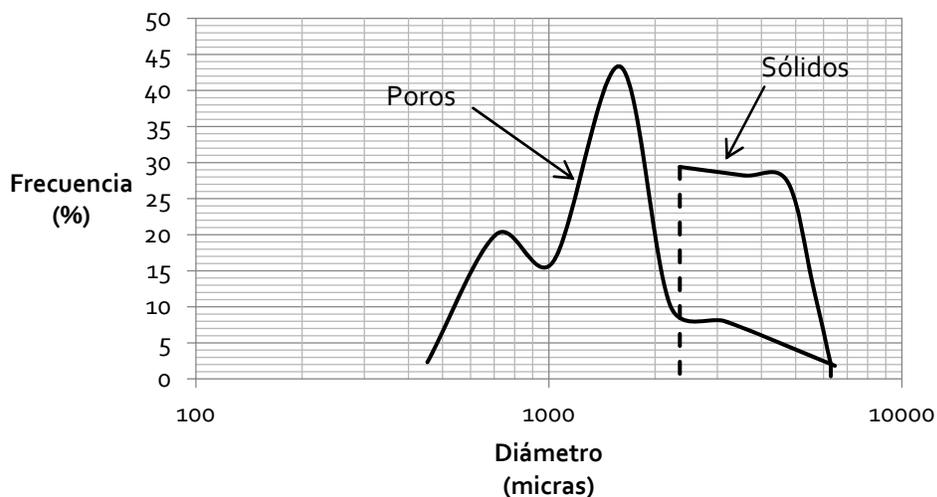


Figura 4.11. Distribuciones de frecuencias de tamaños de poros y de sólidos en la muestra A-4.

La curva característica suelo-agua de A-4 en secado (Figura 4.12) fue evaluada por Krisdani et al. (2009) con la ayuda de la cámara de presión y utilizando la técnica de traslación de ejes.

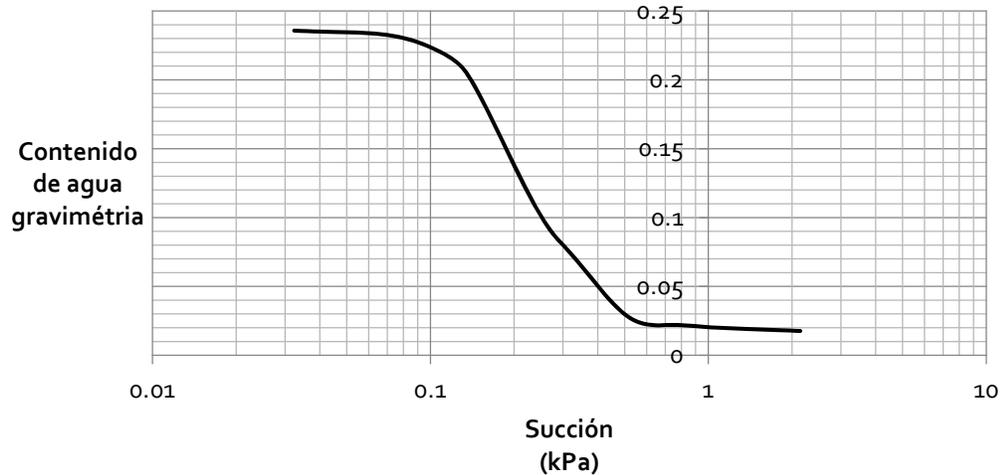


Figura 4.12. Curva de retención agua-suelo de la muestra A-4 en secado (Krisdani et al., 2009).

#### IV.1.5 A-5

La muestra A-5 es un suelo arenoso el cual forma parte del estudio experimental conducido para para los fines de este trabajo de tesis, y cuyo objetivo es el de la validación experimental del modelo sólido-poroso que aquí se propone. La curva característica suelo-agua de A-5 (Figura 4.15) fue medida cuando tenía las propiedades que contiene el Cuadro 4.9, además, las características granulométricas de este suelo son las del Cuadro 4.10.

Cuadro 4.9. Características gravimétricas y volumétricas de A-5

Relación de vacíos (%)	Porosidad (%)	Contenido de agua gravimétrica de saturación (%)	Densidad de sólidos relativa
66.67	40.00	25.44	2.62

Cuadro 4.10. Características generales de la distribución de frecuencias de tamaños de granos de A-5

$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
0.225	1.88	0.70

La Figura 4.13 contiene la distribución granulométrica del suelo arenoso remoldeado A-5.

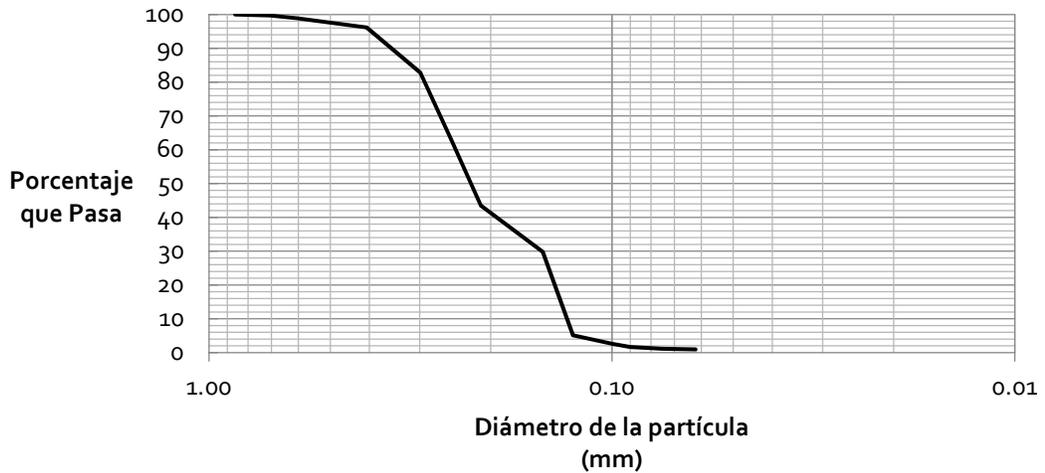


Figura 4.13. Curva de distribución granulométrica de la muestra A-5.

La Figura 4.14 a su vez contiene la distribución de frecuencias de tamaños de sólidos obtenida a partir de los datos de la Figura 4.13 y contiene también la distribución de frecuencias de tamaños de poros la cual es estimada a partir del procedimiento teórico propuesto por Lu y Likos (2004). De la Figura 4.14 se puede notar una superposición notable de ambas envolventes que refleja una estructura cuyos poros son de magnitudes equiparables a las de los sólidos; lo anterior se puede deber al proceso de compactación que derivó en una porosidad alta de 40% para A-5.

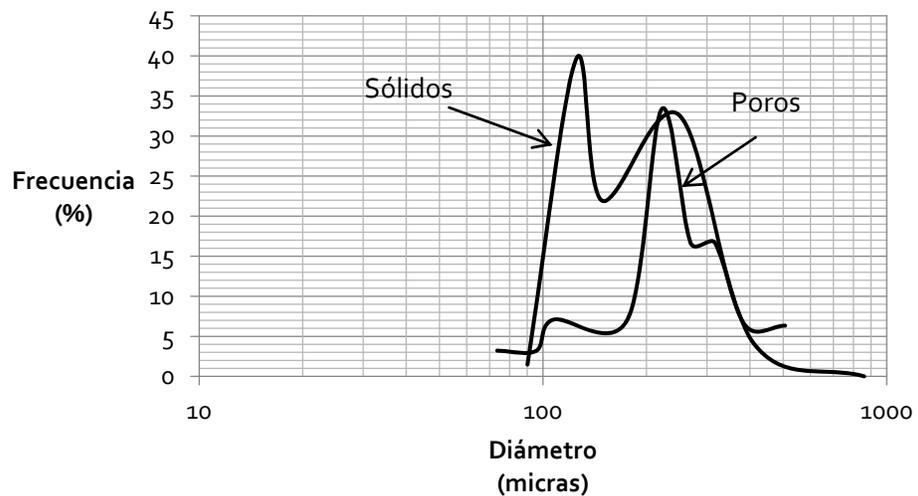


Figura 4.14. Distribuciones de frecuencias de poros y sólidos en la muestra A-5.

La curva característica suelo-agua de A-5 (Figura 4.15) fue evaluada utilizando la técnica

de traslación de ejes, la cual fue implementada a través de la utilización de una cámara de presión a su vez adicionada con una membrana de celulosa porosa que permitió separar la fase gaseosa de la líquida.

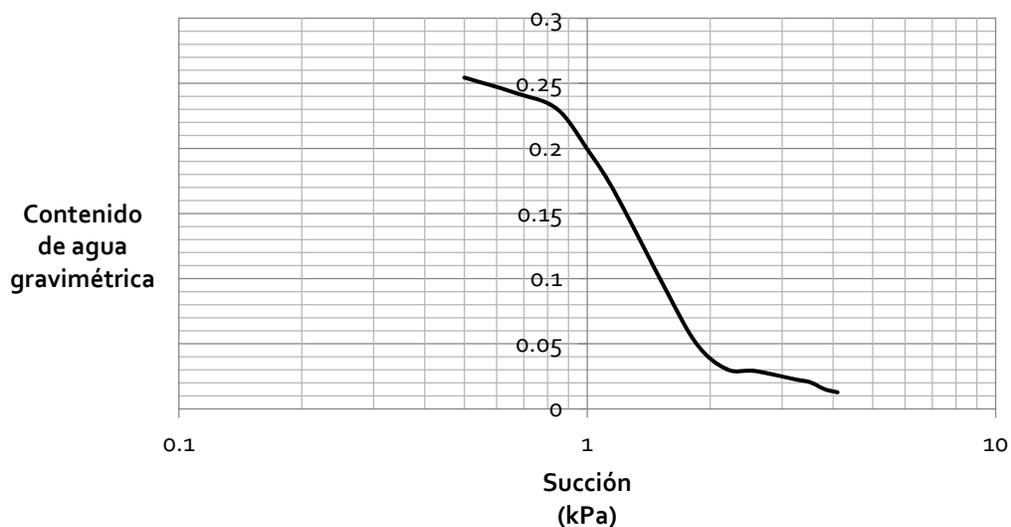


Figura 4.15. Curva de retención agua-suelo de la muestra A-5 en proceso de secado.

#### IV.1.6 A-6

Las muestras de arena remoldeada A-6 forman parte también del estudio llevado a cabo para los fines de este trabajo de tesis y las generalidades de su granulometría están en el Cuadro 4.12. La curva característica suelo-agua (Figura 4.18) fue medida en A-6 con las características que se registran en el Cuadro 4.11.

Cuadro 4.11. Características gravimétricas y volumétricas de A-6

Relación de vacíos (%)	Porosidad (%)	Contenido de agua gravimétrica de saturación (%)	Densidad de sólidos relativa
63.90	39.00	24.12	2.62

Cuadro 4.12. Características generales de la distribución de frecuencias de tamaños de granos de A-6

$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
0.222	1.72	1.00

La Figura 4.16 contiene la curva granulométrica de A-6 la cual muestra que los tamaños de los granos corresponden a los de un suelo arenoso.

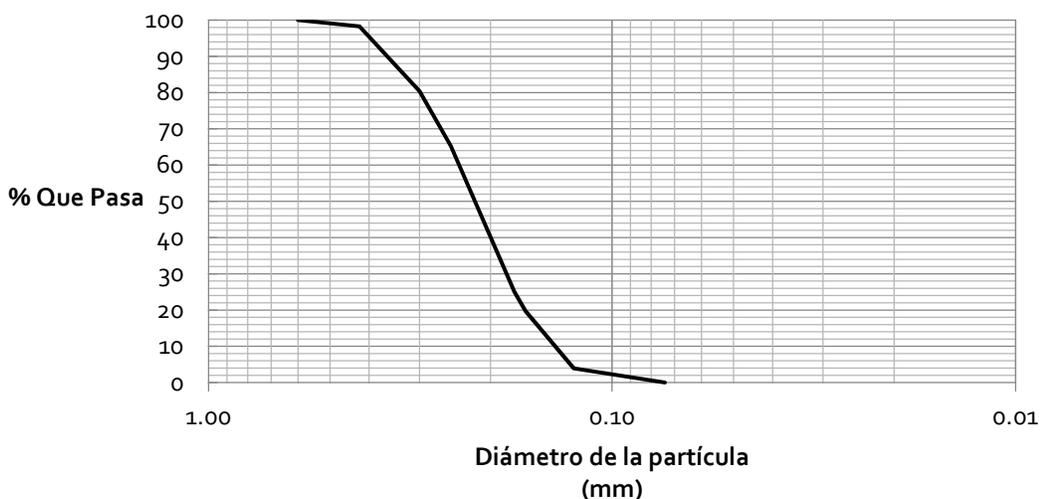


Figura 4.16. Curva de distribución granulométrica de la muestra A-6.

A su vez, la Figura 4.17 indica la distribución de frecuencias de tamaños de sólidos obtenidas a partir de los datos de la curva granulométrica de la Figura 4.16 y también indica la distribución de frecuencias de tamaños de poros la cual fue estimada a partir del procedimiento propuesto por Lu y Likos (2004).

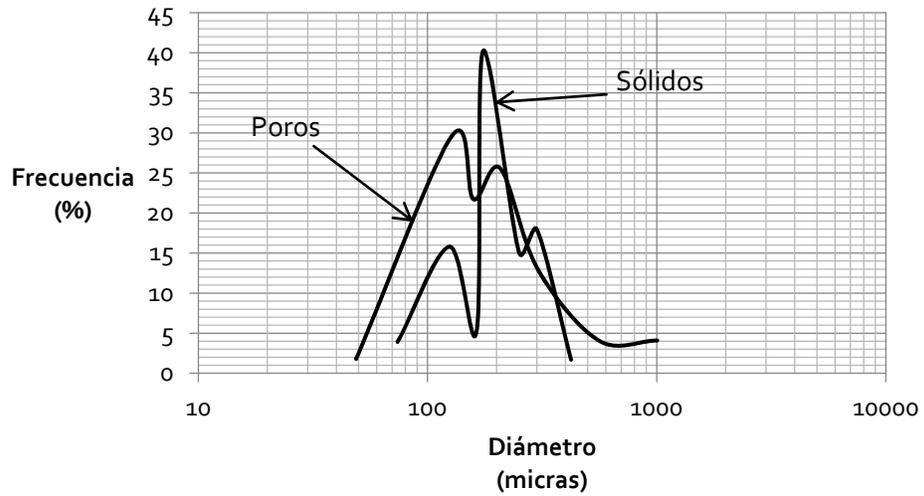


Figura 4.17. Distribuciones de frecuencias de poros y sólidos en la muestra A-6.

La curva característica suelo-agua de A-6 (Figura 4.18) fue evaluada utilizando la técnica de traslación de ejes, la cual fue implementada a través de la utilización de una cámara de presión que a su vez le fue adicionada una membrana de celulosa porosa que permitió separar la fase gaseosa de la líquida.

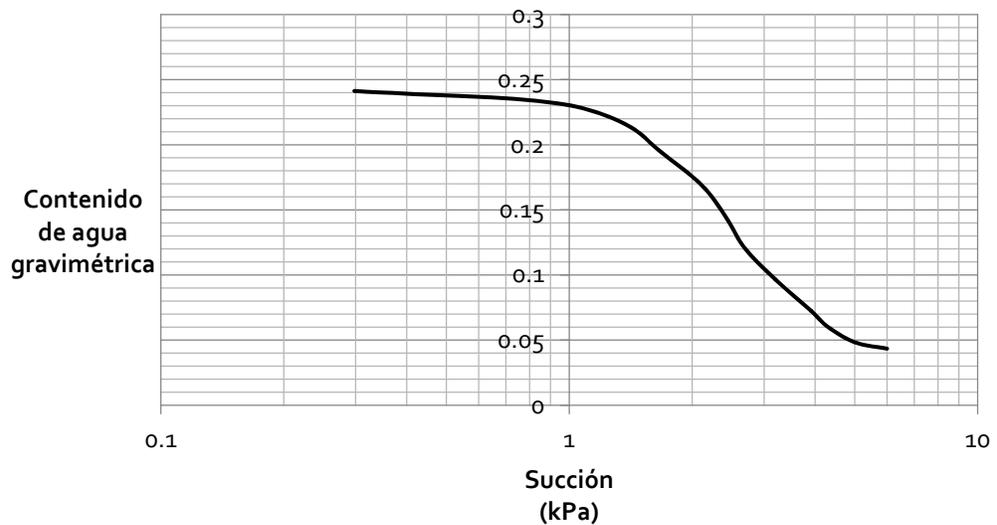


Figura 4.18. Curva de retención agua-suelo de la muestra A-6 en proceso de secado.

#### IV.1.7 A-7

Ray y Morris (1994) conducen un estudio para evaluar las propiedades histeréticas de la arena muy uniforme A-7 cuyos tamaños de partículas se encuentran entre las mallas con denominaciones #100 y #200 (0.150 y 0.074 mm respectivamente). Ellos mismos evalúan la curva característica (Figura 4.21) sobre los patrones de humedecimiento, secado y etapas intermedias de humedecimiento y secado también (patrones histeréticos) en A-7 donde las características de las muestras ensayadas están en el cuadro 4.13.

Cuadro 4.13. Características gravimétricas y volumétricas de A-7

Relación de vacíos (%)	Porosidad (%)	Densidad de sólidos relativa
66.7	35.00	2.62

Así mismo, el Cuadro 4.14 guarda las características básicas de la distribución granulométrica de A-7.

Cuadro 4.14. Características generales de la distribución de frecuencias de tamaños de granos de A-7

<i>Cu</i>	<i>Cc</i>
2.15	0.878

La Figura 4.19 expone la curva granulométrica de A-7 donde se verifica que los tamaños que contienen las muestras de A-7 son propios de arenas.

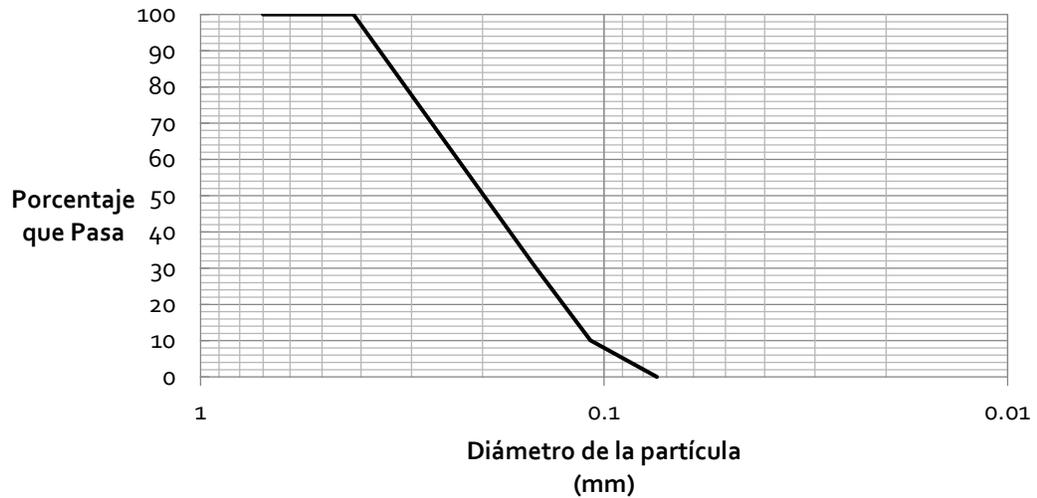


Figura 4.19. Curva de distribución granulométrica de la muestra A-7.

La Figura 4.20 muestra las envolventes de frecuencias de tamaños de sólidos y de poro, donde la primera es producto derivado de los datos del análisis granulométrico y la segunda se estimó en base al procedimiento propuesto por Lu y Likos (2004) que de manera teórica evalúa esta distribución de frecuencias en la estructura porosa.

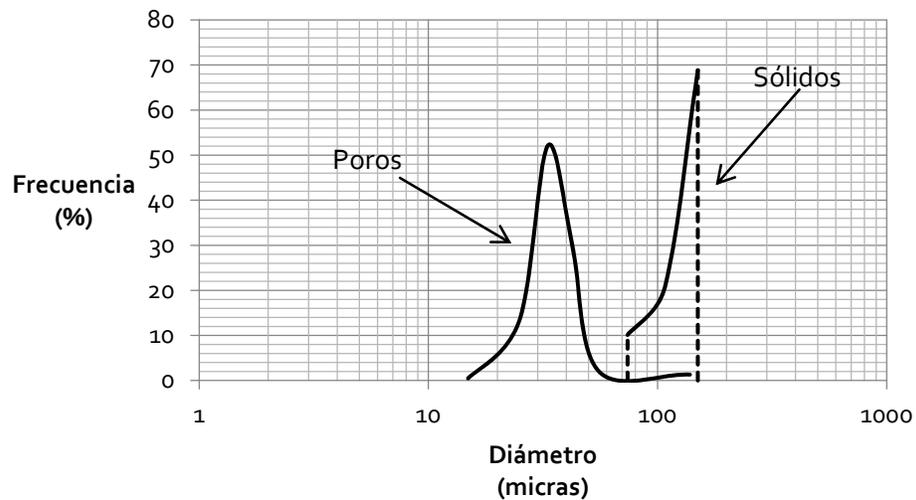


Figura 4.20. Distribuciones de tamaños de grano y de poro de la muestra A-7.

Las curvas características suelo-agua de A-7 (Figura 4.21) presentan diversos patrones de humedecimiento-secado como se puede verificar. Esto permitirá evaluar la capacidad del modelo sólido poroso propuesto en este trabajo para reproducir las curvas de retención agua-suelo bajo

diversos escenarios.

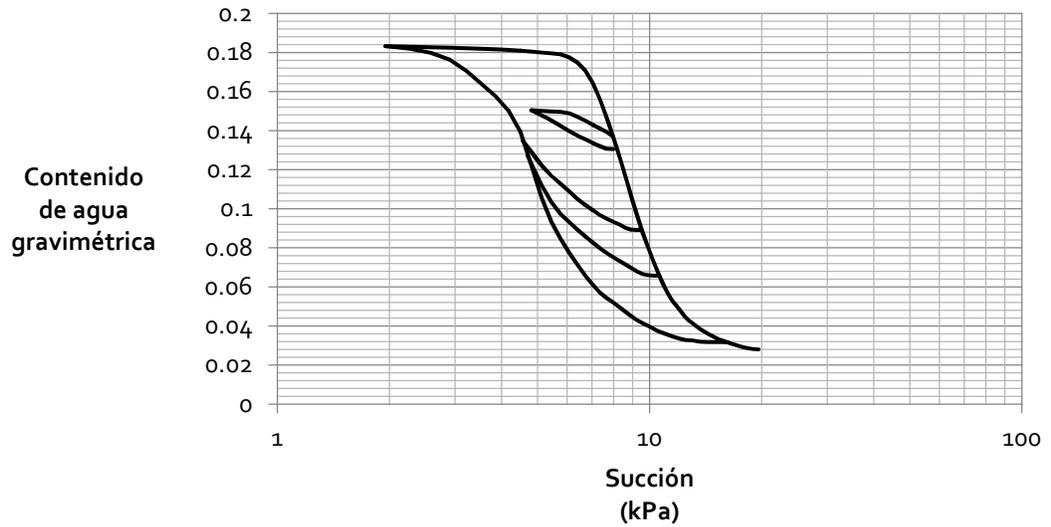


Figura 4.21. Curva de retención agua-suelo de la muestra A-7 en procesos de secado, humedecimiento y etapas intermedias evaluada por Ray y Morris (1994).

#### **IV.1.8 Curvas de retención agua-suelo y estudio granulométrico de todos los suelos en estudio.**

La figura 4.22 contiene las granulométricas experimentales de los suelos A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7. En ella se pueden observar los rangos en tamaños de los sólidos contenidos suelos estudiados cuya estructura se reproducirá con el modelo presentado y confirma la utilización de tamaños de granos sólidos propios de suelos arenosos para este estudio a diferencia del suelo A-4 que presenta tamaños correspondientes a suelos con gravas.

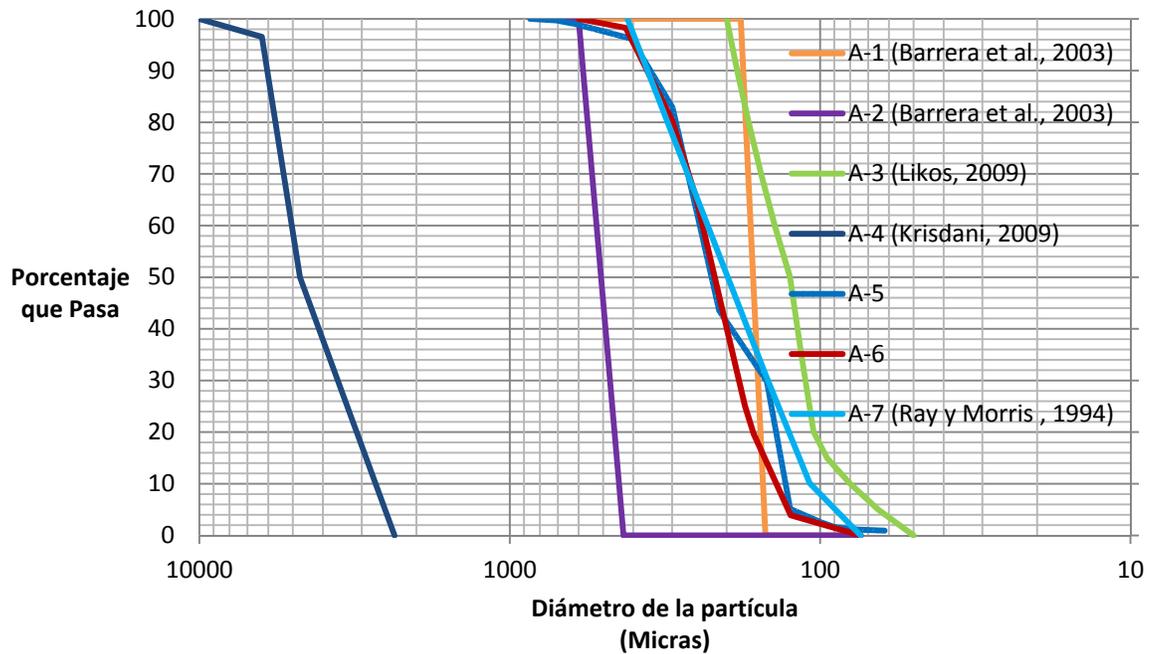


Figura 4.22. Granulometrías de todos los suelos estudiados.

Como se puede observar de la Figura 4.22, los tipos de suelos utilizados varían en tamaños desde las 74 hasta las 10000 micras, que de acuerdo a la clasificación SUCS, se son tamaños de arenas y gravas.

A manera de ubicar los rangos de succión bajo los cuales se localizan las curvas de retención que se intentará reproducir más tarde, la Figura 4.23 contiene las curvas experimentales de retención agua-suelo de todos los suelos ya presentados. El suelo A-4 se identifica en los valores más bajos de succión que está de acuerdo con la distribución granulométrica de este material que exhibe tamaños de gravas lo cual correspondería a una estructura porosa muy abierta.

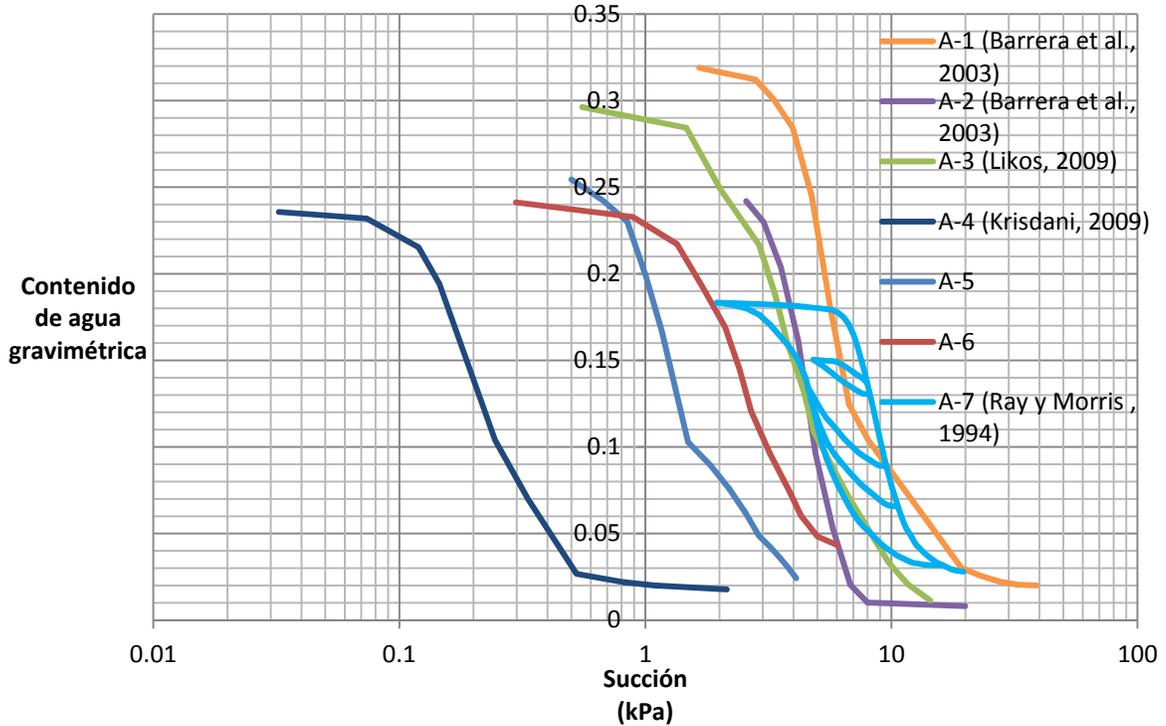


Figura 4.23. Curvas características suelo-agua experimentales de todas las muestras de suelo.

De manera adicional se presentan las distribuciones de tamaños de poros en un concentrado (Figura 4.24) con el objetivo de ubicar los rangos de tamaños de los poros en las muestras de arena y grava estudiadas, donde se puede ver, que dichas distribuciones en todas las muestras se ubican en los rangos de tamaños donde los sólidos corresponderían a arenas (sólidos mayores a 74 micras), lo cual indicaría que las muestras en general fueron fabricadas con esfuerzos de compactación relativamente bajos derivando lo anterior en porosidades y relaciones de vacíos altas.

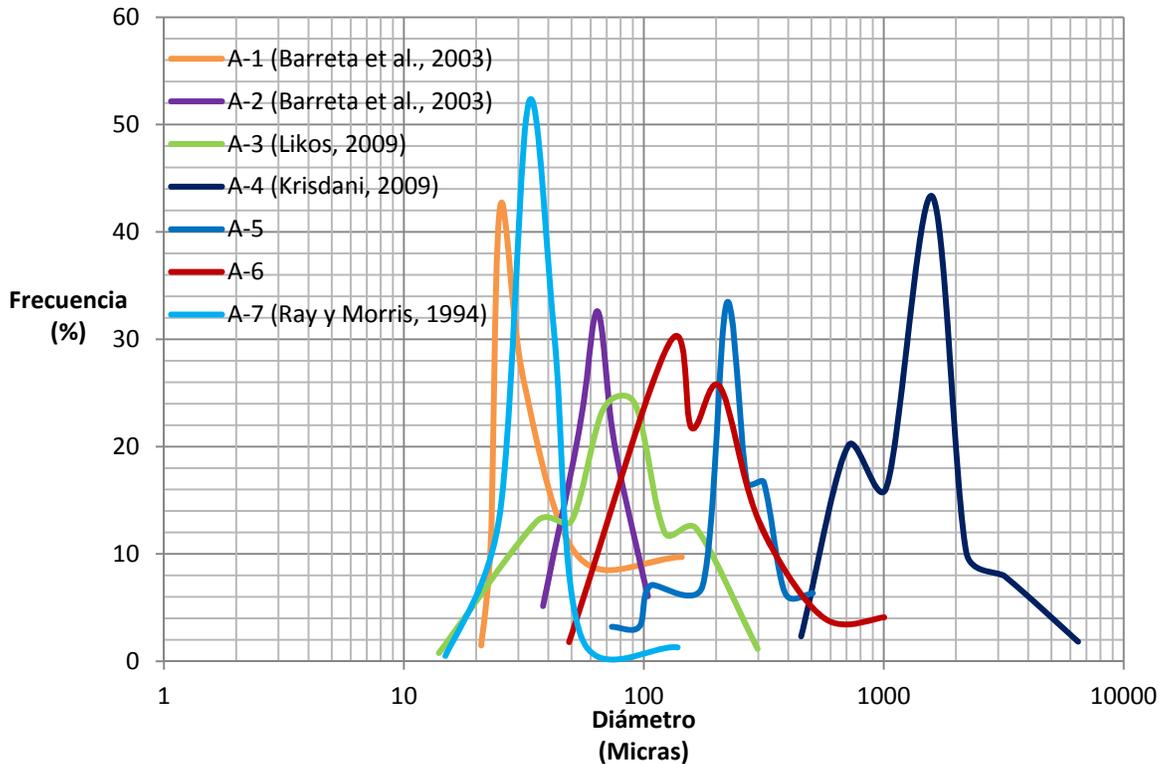


Figura 4.24. Distribución de frecuencias de tamaños de poro para todas las muestras en estudio.

## IV.2 RESULTADOS DE LAS PREDICCIONES DE LAS CURVAS DE RETENCIÓN AGUA-SUELO ARROJADAS POR EL MODELO SÓLIDO-POROSO.

Una vez introducidas todas las variables que se debe dar como valores de entrada, el modelo procede a construir la estructura del suelo mediante dos tipos distintos de elementos: sólidos y poros. Terminando de construir la estructura, centra la atención en los elementos que identifica como poros y los enlaza. Lo que resta es simular los procesos de humedecimiento y secado. El modelo entonces es capaz de emitir resultados teóricos en relación a la curva característica introduciendo básicamente valores de entrada tales como distribuciones de frecuencias de tamaños de los elementos que forman la estructura del mismo y la porosidad del medio; esto ya se expuso a detalle en el Capítulo III y también en la Sección III.1 se profundizó en la manera en que se determinan las variables de entrada y el procedimiento correcto con que se alimenta el modelo con dichas variables; esta Sección IV.2 se dedica a exponer y analizar los resultados teóricos que emite el modelo en relación a las curvas de retención agua-suelo de todos

los suelos analizados una vez que fueron determinadas las variables de entrada.

#### IV.2.1 Comparaciones teórico-experimental

Para contrastar los resultados y lograr los objetivos de esta sección, la Figura 4.25 incluye la curva característica teórica arrojada por el modelo y la que es medida de manera experimental para A-1; lo mismo se hace para A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7 en seguida.

##### IV.2.1.1 A-1

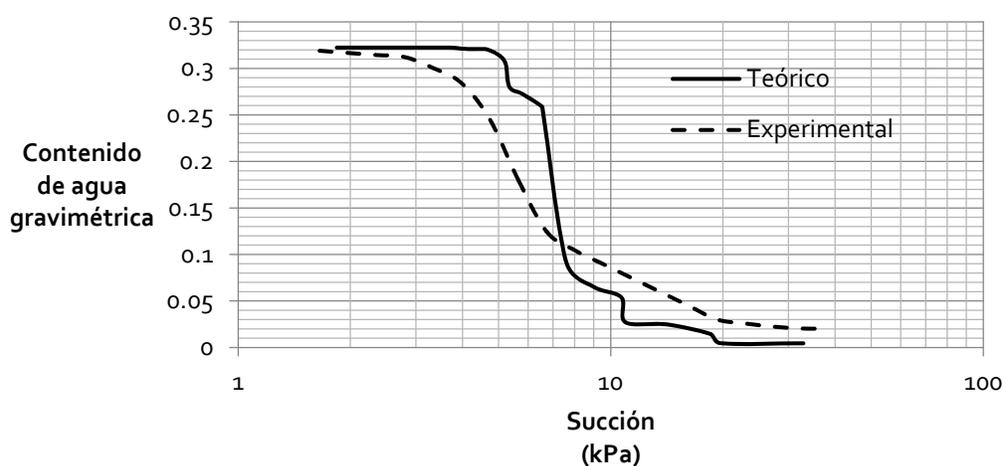


Figura 4.25. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en proceso de secado) para la muestra de suelo A-1.

IV.2.1.2 A - 2

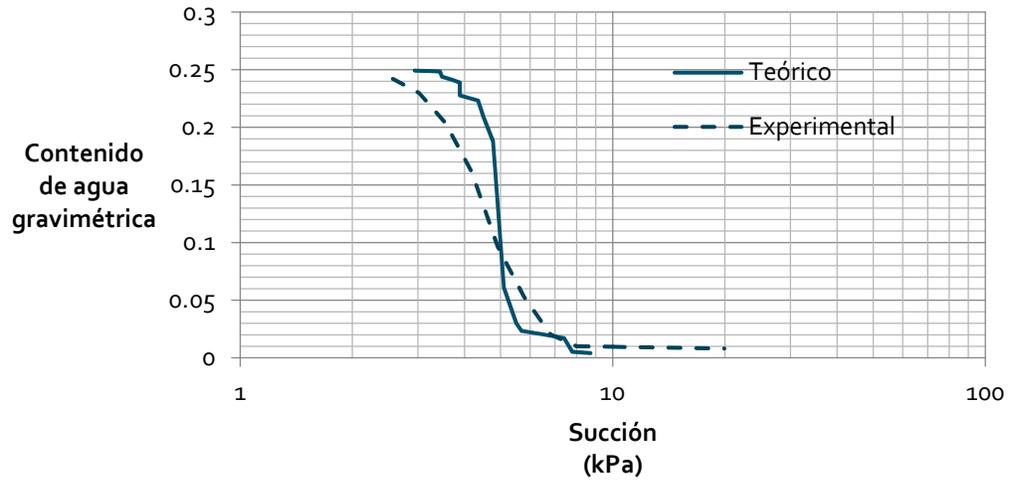


Figura 4.26. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en secado) para la muestra de suelo A-2.

IV.2.1.3 A - 3

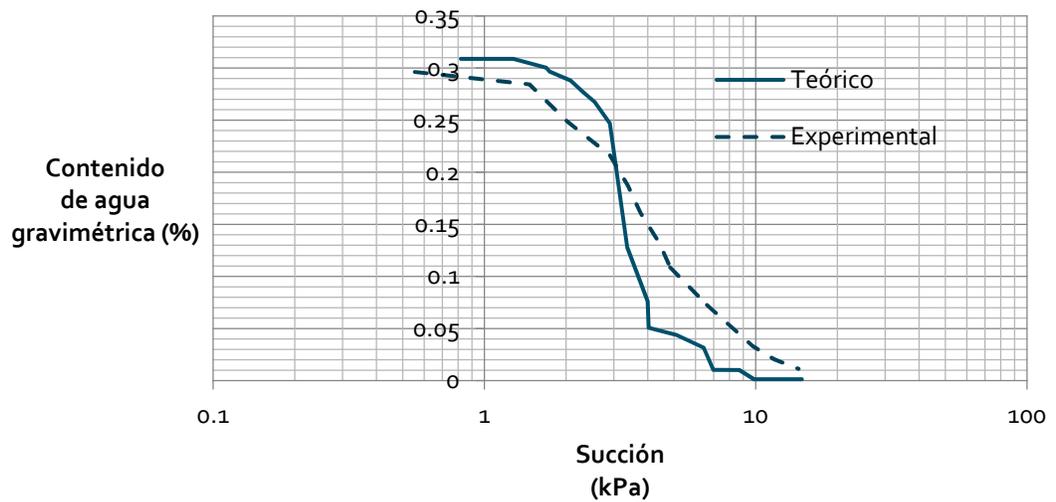


Figura 4.27. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en secado) para la muestra de suelo A-3.

IV.2.1.4 A – 4

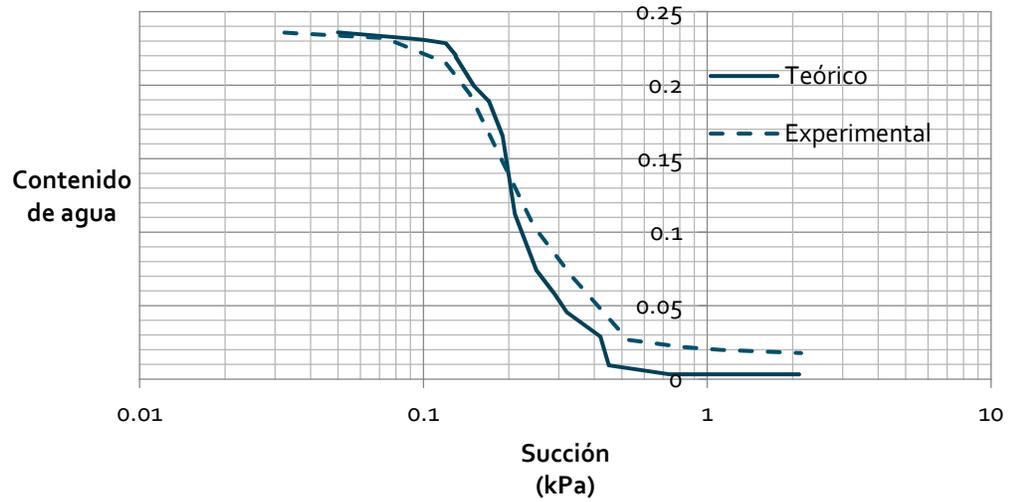


Figura 4.28. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en secado) para la muestra de suelo A-4.

IV.2.1.5 A – 5

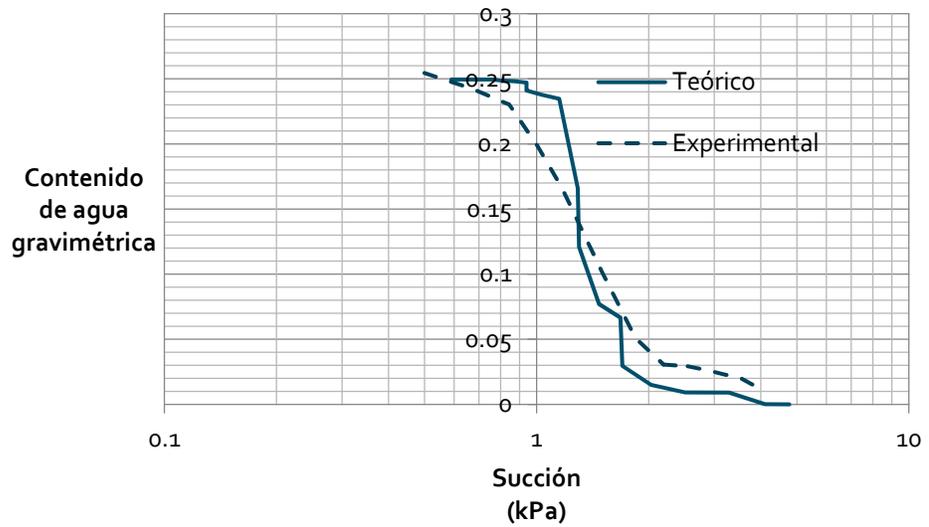


Figura 4.29. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en secado) para la muestra de suelo A-5.

#### IV.2.1.6 A – 6

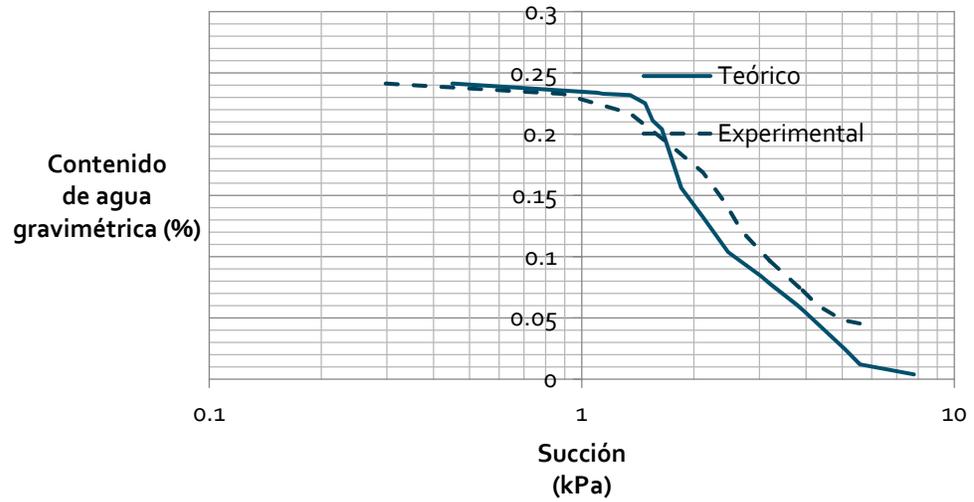


Figura 4.30. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en secado) para la muestra de suelo A-6.

#### IV.2.1.7 A – 7

Para la muestra A-7 se cuenta con datos experimentales de los procesos histeréticos de secado en humedecimiento y de humedecimiento en secado. Esto permite llevar a cabo las comparaciones teórico-experimentales para este suelo mismas que se muestran en las gráficas 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 y 4.35.

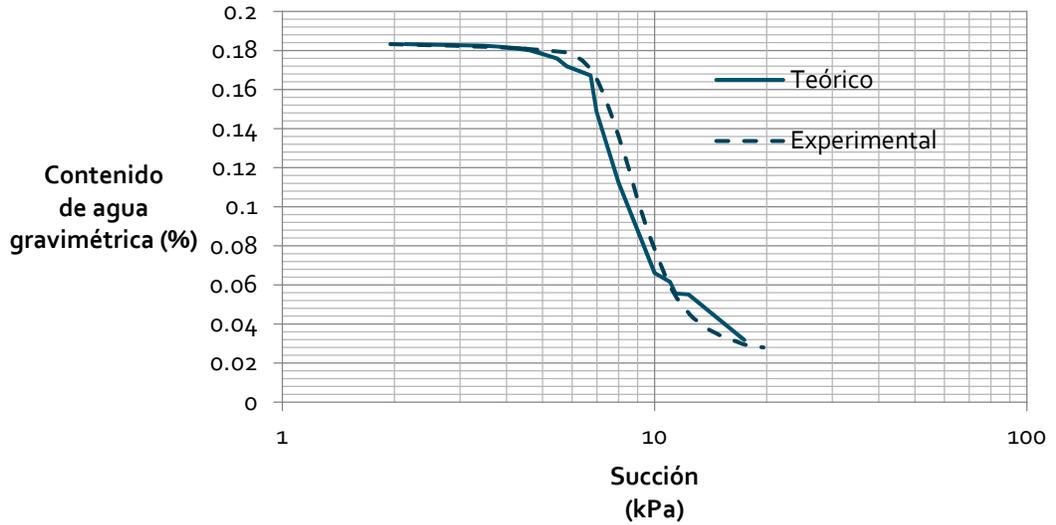


Figura 4.31. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en secado) para la muestra de suelo A-7.

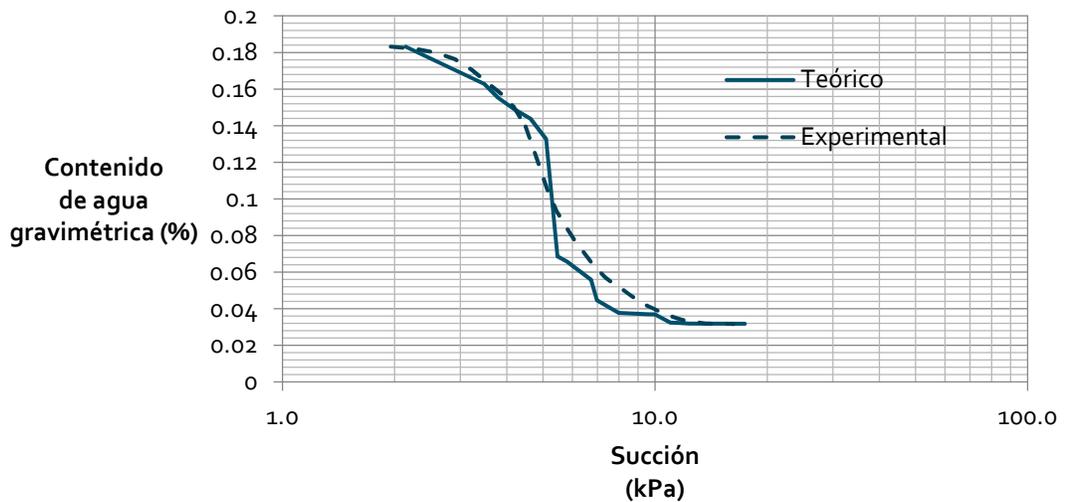


Figura 4.32. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (ambas en humedecimiento) para la muestra de suelo A-7.

Las curvas predichas los resultados emitidos por el modelo sólido-poroso se muestran en la Figura 4.33 donde la inversión del proceso de humedecimiento hacia el secado se da a partir del contenido de agua igual al 15.5% del contenido de agua gravimétrica hasta llegar a poco menos del 4%.

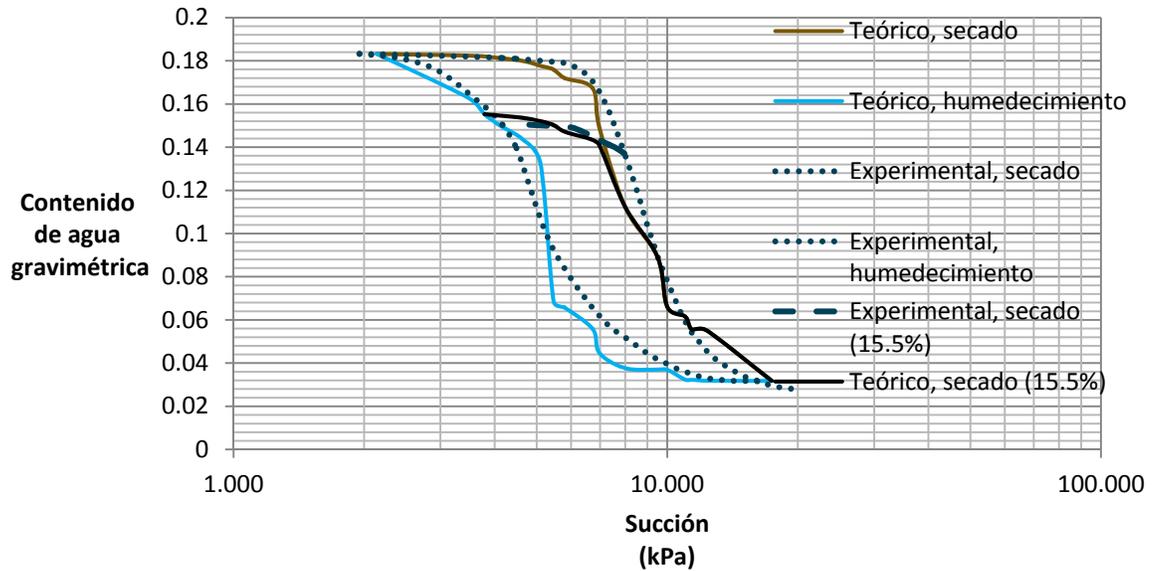


Figura 4.33. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (en etapas intermedias de humedecimiento y secado) para la muestra de suelo A-7.

La figura 4.34 muestra los resultados emitidos por el modelo sólido-poroso donde la inversión del proceso, esta vez de secado y dirigido hacia el humedecimiento se da a partir del contenido de agua igual al 6.4% hasta llegar a poco más del 18%.

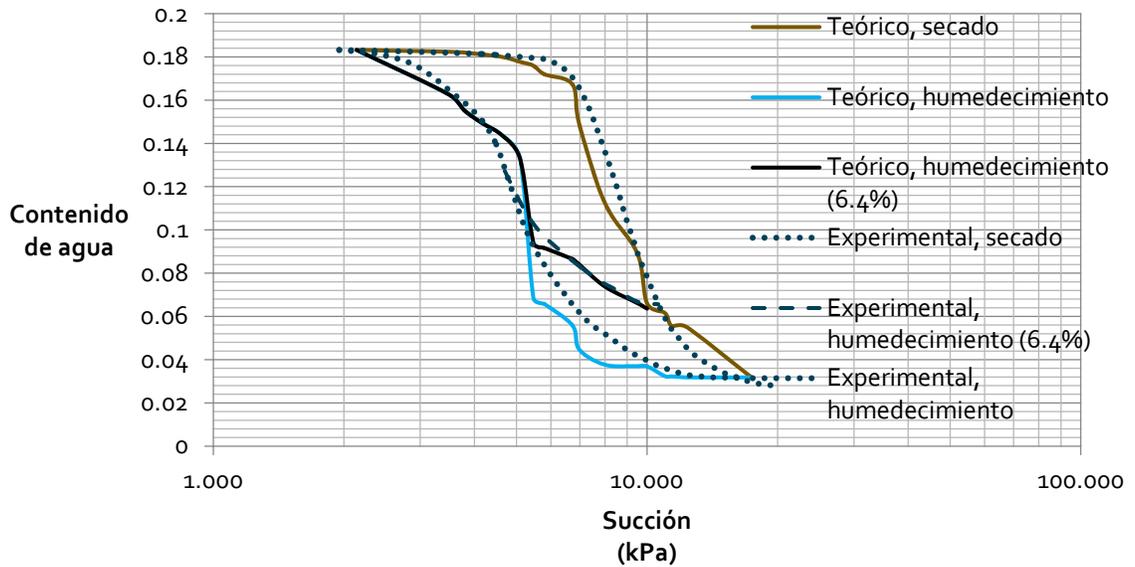


Figura 4.34. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (en etapas intermedias de humedecimiento y secado) para la muestra de suelo A-7.

La Figura 4.35 es análoga a la 4.34 presentado también humedecimiento en una etapa intermedia pero partiendo esta vez del valor de contenido de agua igual al 8.9% hasta llegar también a poco más del 18% del contenido de agua.

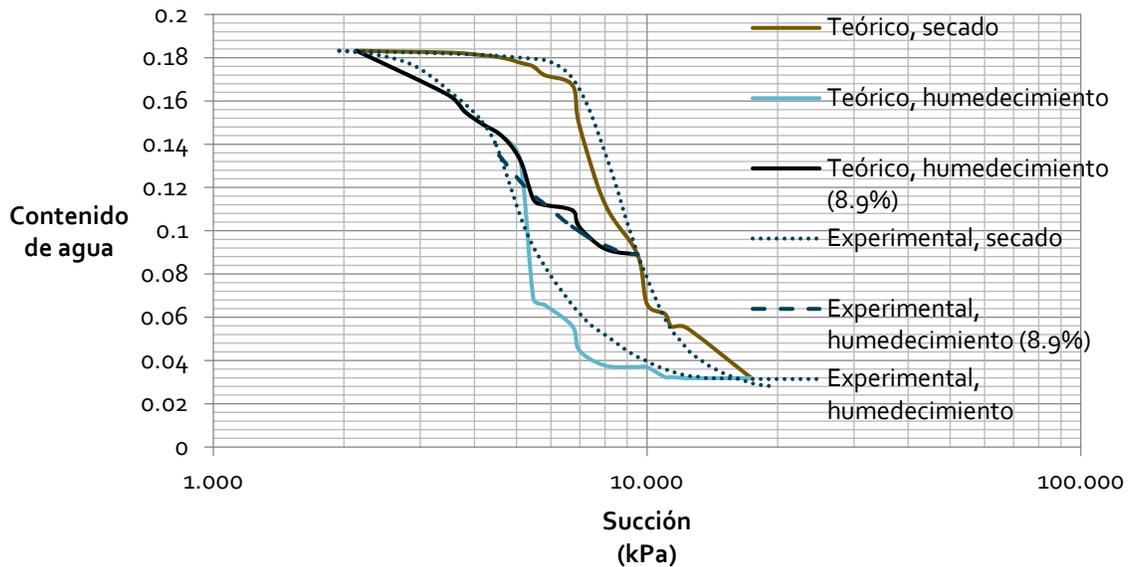


Figura 4.35. Curvas de retención agua-suelo en teóricas y experimentales (en etapas intermedias de humedecimiento y secado) para la muestra de suelo A-6.

#### IV.2.1.9 Resultados teóricos de todas las curvas de retención agua-suelo

Aquí se presenta un concentrado de las predicciones que emite el modelo en relación a las curvas de retención (Figura 4.36); este concentrado se puede cotejar en primera instancia con el de la Figura 4.23 con el objeto de verificar en primera instancia la precisión de los resultados teóricos obtenidos.

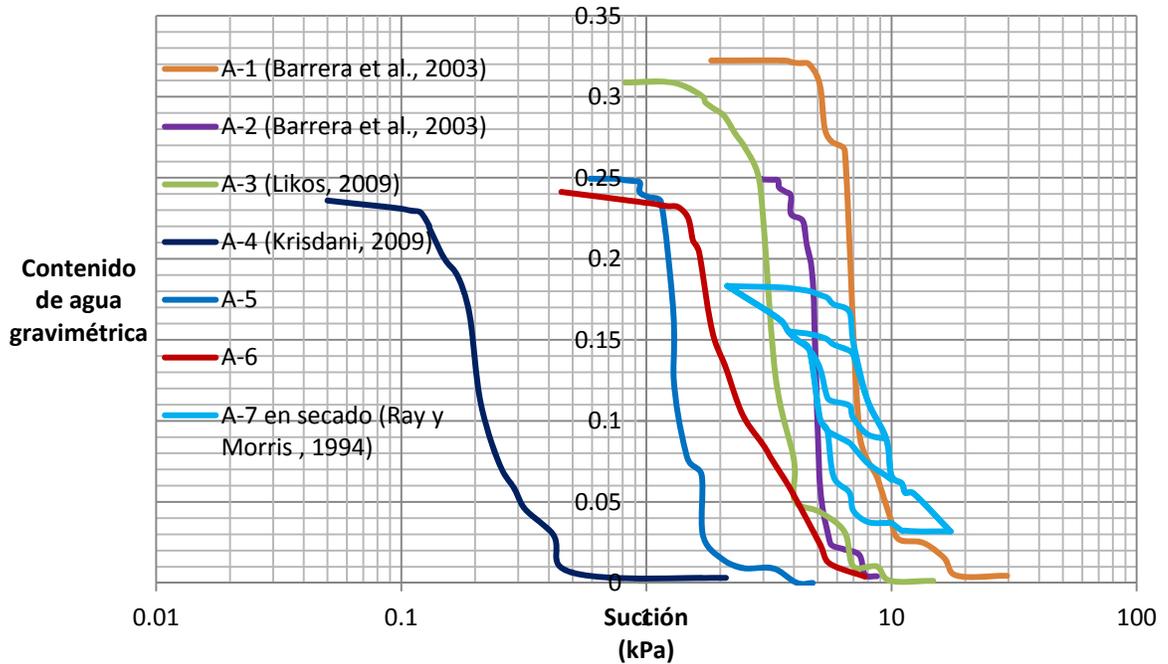


Figura 4.36. Curvas teóricas de retención agua-suelo.

#### IV.2.2 Resultados teóricos adicionales del modelo sólido-poroso

A pesar de que no se cuenta con resultados experimentales para las etapas de humedecimiento de los suelos, ni para las etapas de humedecimiento en proceso intermedio de secado o viceversa (secado en humedecimiento) para los suelos A-1 a A-6, para mostrar las capacidades del modelo-sólido poroso se muestran a continuación dichas predicciones aun careciendo de la validación experimental.

#### IV.2.2.1 A-1

Se presentan resultados teóricos de etapas intermedias de humedecimiento en secado (Figura 4.37), mismas que provienen de invertir el proceso de secado en el valor 7.4 kPa hasta lograr humedecerlo de nuevo a su valor inicial correspondiente a la succión de 1.84 kPa. Lo mismo sucede con la curva iniciada en el valor de 6.54 kPa.

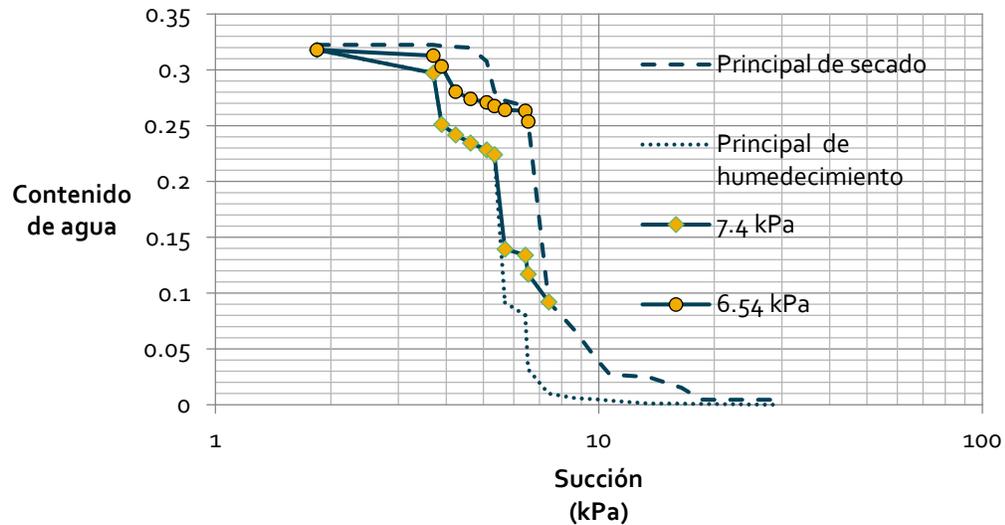


Figura 4.37. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales y curvas de retención agua-suelo teóricas en proceso de humedecimiento a partir de una etapa intermedia de secado a 7.4 y 6.54 kPa.

La Figura 4.38 contiene las curvas teóricas principales en secado y en humedecimiento para la muestra A-1, además de incluir también resultados teóricos (curvas con pequeños círculos) que provienen de invertir el proceso de humedecimiento en el valor 3.89 kPa hasta lograr secarlo de nuevo a su valor inicial. Lo mismo sucede con la curva iniciada en el valor de 5.69 kPa. Esta Figura corresponde al análisis de secado teórico a partir del humedecimiento parcial de la muestra modelada A-1.

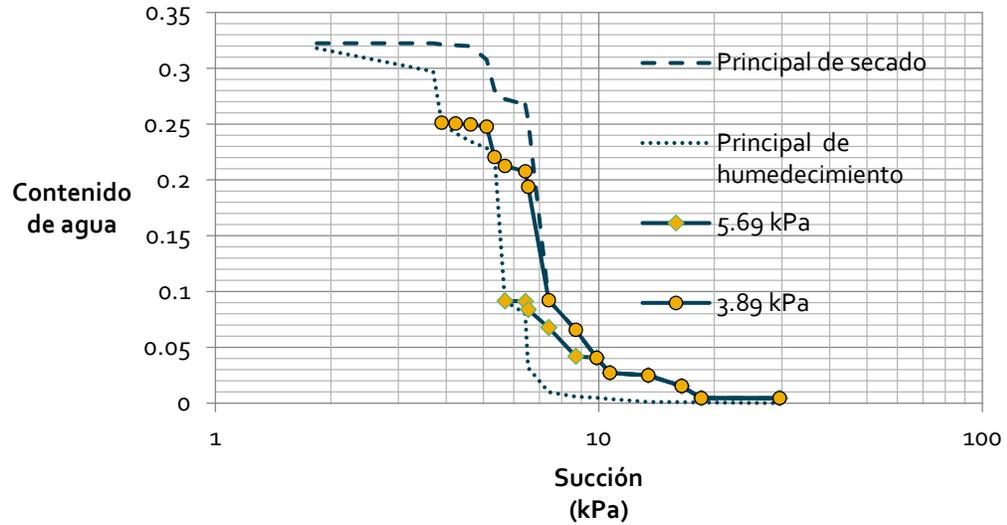


Figura 4.38. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retención agua-suelo en proceso de secado a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de humedecimiento (5.69 y 3.89 kPa)

Las figuras 4.37 y 4.38 identifican procesos teóricos intermedios para la muestra A-1 y las figuras siguientes en esta sección harán lo propio para las muestras A-2 a A-7.

**IV.2.2.2 A-2**

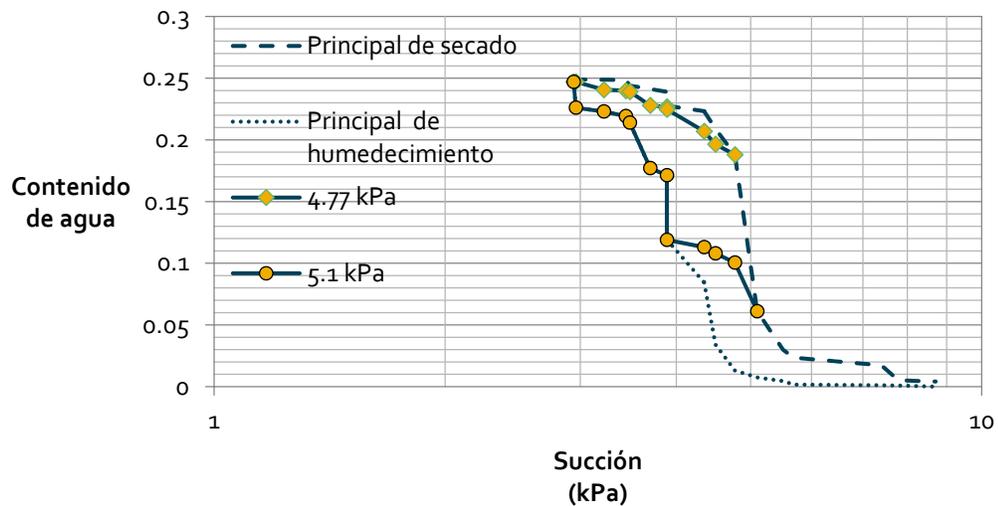


Figura 4.39. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retención agua-suelo en proceso de humedecimiento a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de secado (4.77 y 5.10 kPa).

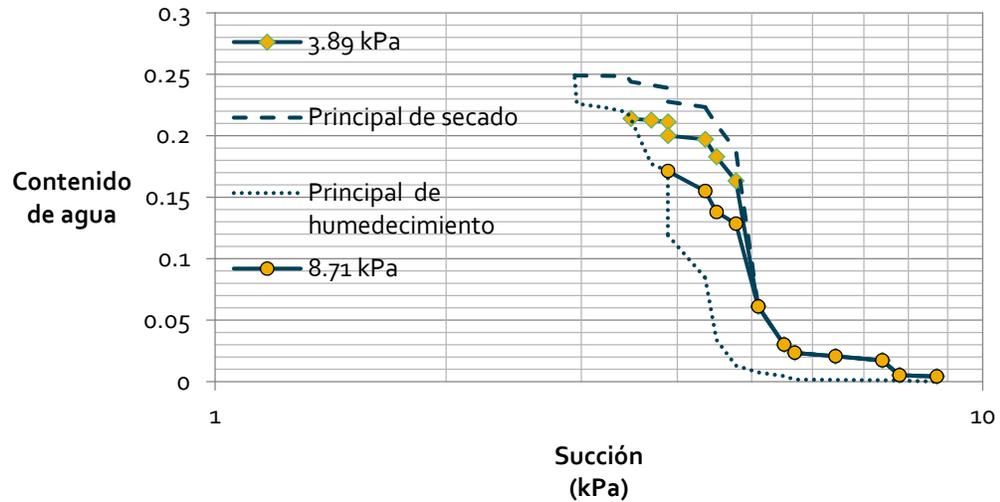


Figura 4.40. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retención agua-suelo en proceso de secado a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de humedecimiento (3.89 y 8.71 kPa).

IV.2.2.3 A – 3

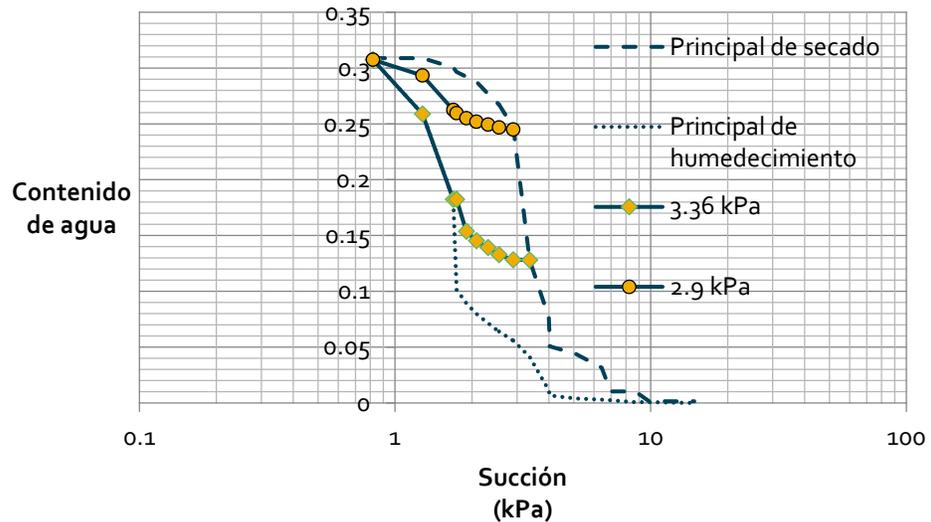


Figura 4.41. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retención agua-suelo en proceso de humedecimiento a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de secado (3.36 y 2.90 kPa).

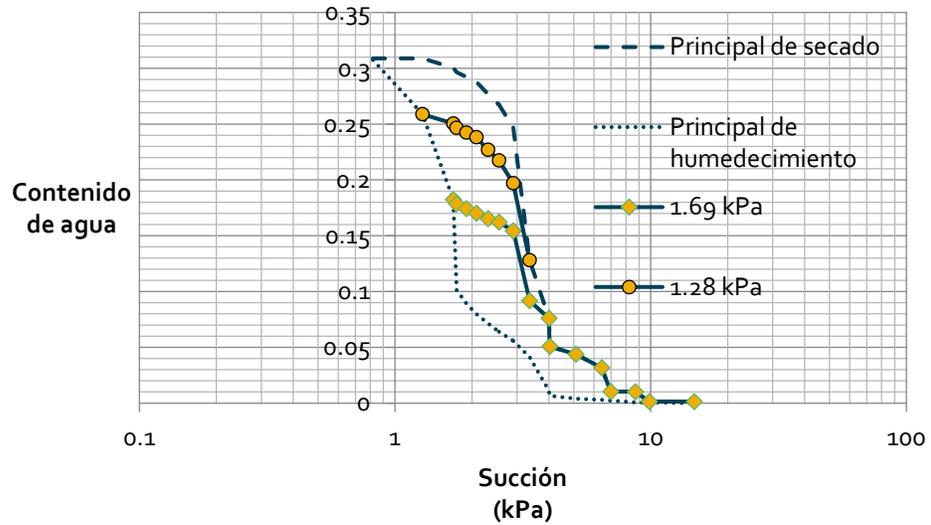


Figura 4.42. Curvas teóricas de retenção água-suelo principais de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retenção água-suelo en proceso de secado a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de humedecimiento (1.69 y 1.28 kPa).

IV.2.2.4 A – 4

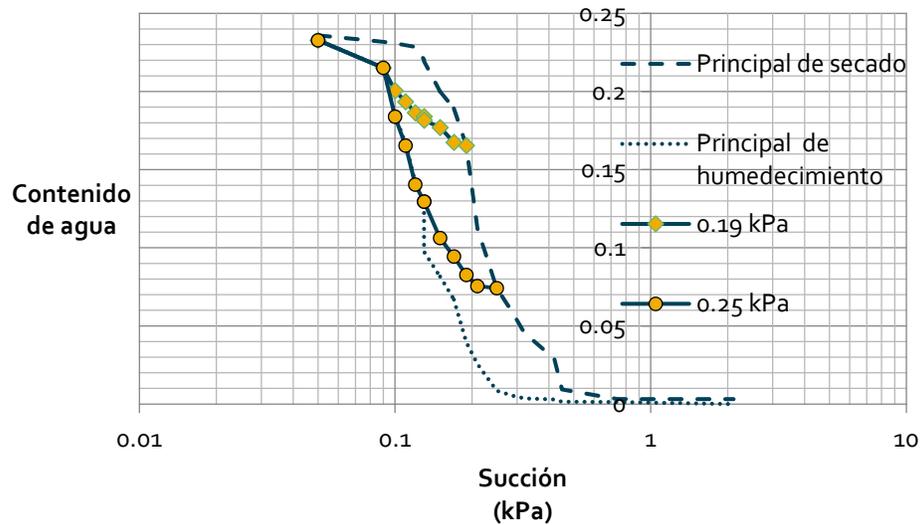


Figura 4.43. Curvas teóricas de retenção água-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retenção água-suelo en proceso de humedecimiento a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de secado (0.19 y 0.25 kPa).

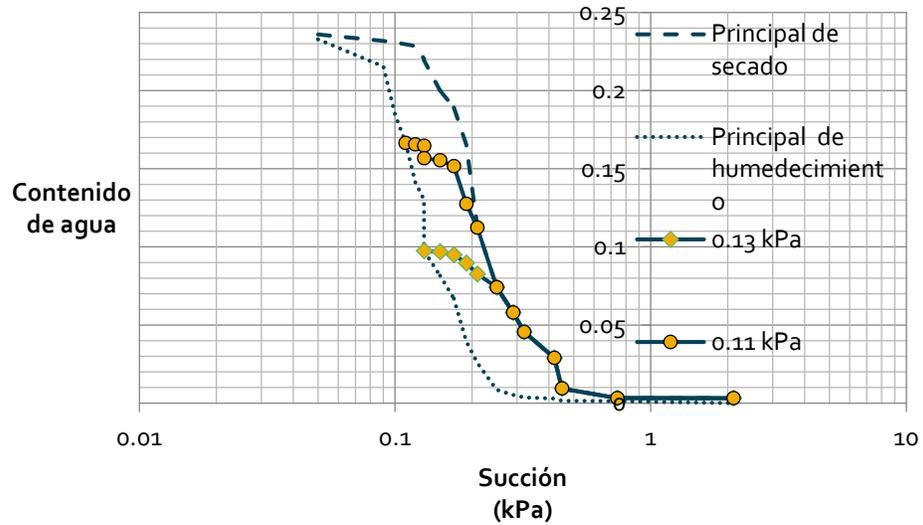


Figura 4.44. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retención agua-suelo en proceso de secado a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de humedecimiento (0.13 y 0.11 kPa).

IV.2.2.5 A – 5

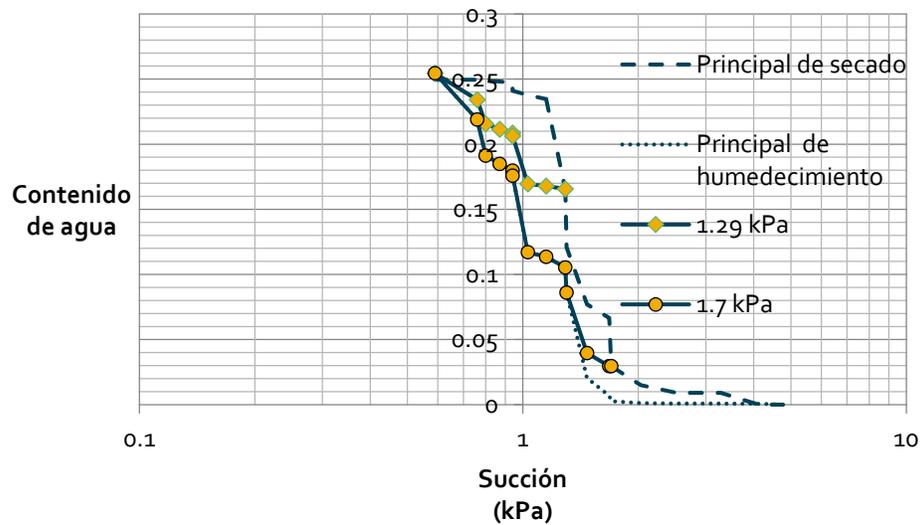


Figura 4.45. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retención agua-suelo en proceso de humedecimiento a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de secado (1.29 y 1.70 kPa).

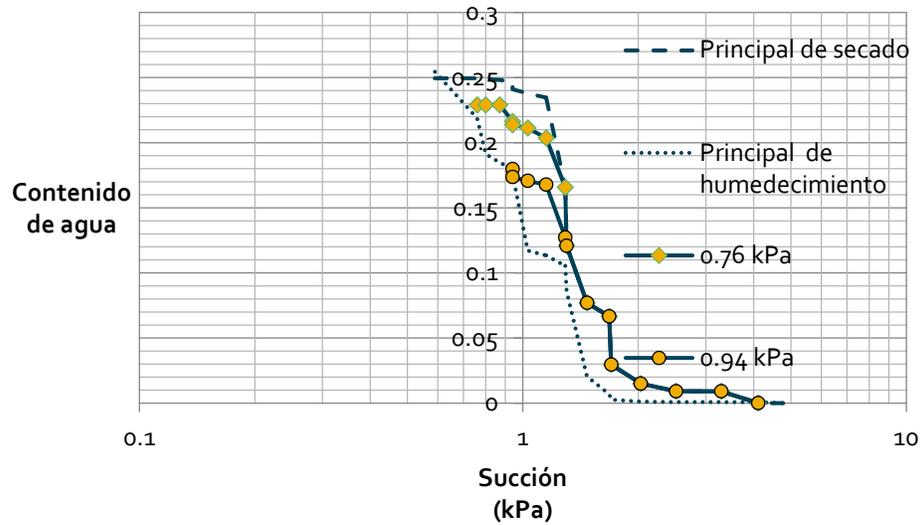


Figura 4.46. Curvas teóricas de retenção água-suelo principais de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retenção água-suelo en proceso de secado a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de humedecimiento (0.76 y 0.94 kPa).

IV.2.2.6 A – 6

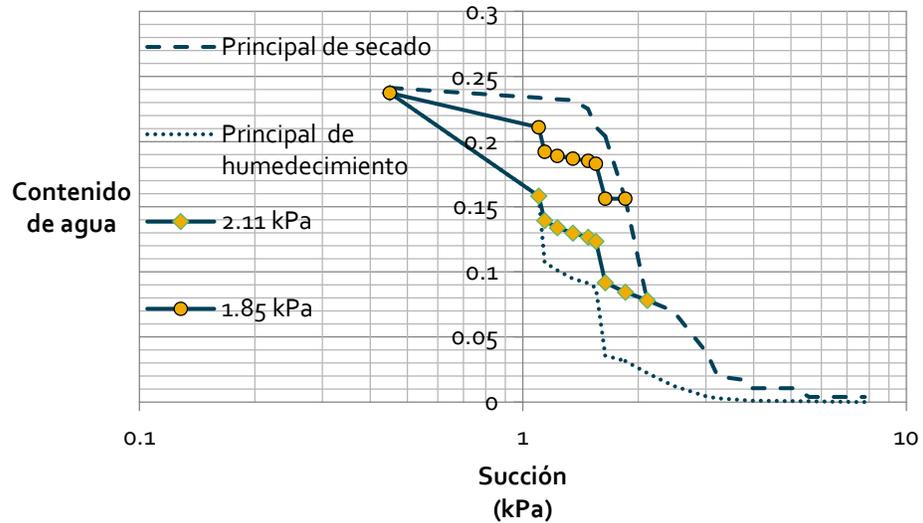


Figura 4.47. Curvas teóricas de retenção água-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retenção água-suelo en proceso de humedecimiento a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de secado (2.11 y 1.85 kPa).

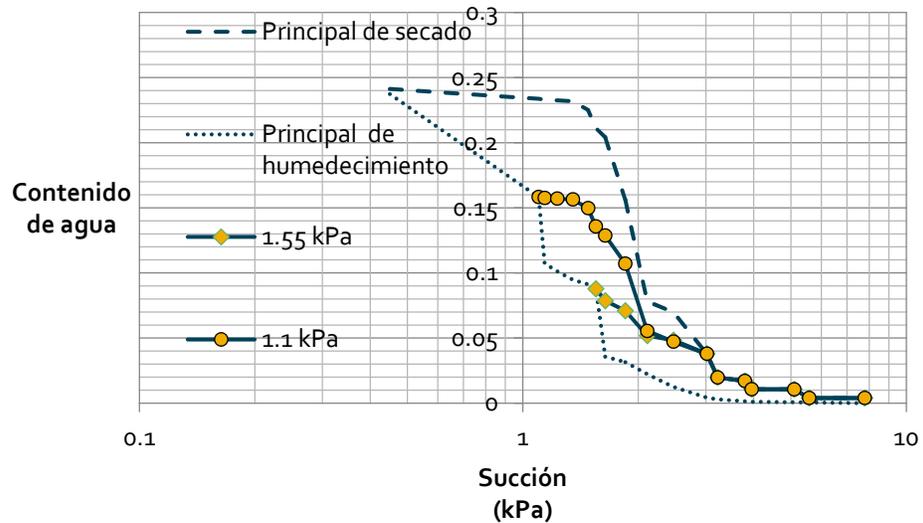


Figura 4.48. Curvas teóricas de retención agua-suelo principales de secado y de humedecimiento y curvas teóricas de retención agua-suelo en proceso de secado a partir valores intermedios de succión de las curvas teóricas principales de humedecimiento (1.55 y 1.1 kPa).

#### IV.2.3 Estudio estadístico de correlación teórico-experimental

Se presentan análisis estadísticos de regresión lineal que tienen como objetivo verificar la exactitud de las predicciones, de manera cuantitativa y objetiva, de la curva característica teórica que arroja el modelo basándose en una ecuación de predicción denominada *ecuación de regresión*. Esta ecuación está definida como la relación que se ajusta a un conjunto de datos de alguna variable aleatoria, donde un análisis de regresión lineal implica relacionar a dos variables, una dependiente y otra independiente mediante una ecuación lineal de la forma  $\hat{y} = a + bx$ , para la cual  $a$  y  $b$  son estimadores estadísticos que en la ecuación de regresión representan la intersección con el eje de las ordenadas y la pendiente respectivamente de dicha ecuación. El ajuste de la ecuación de regresión a los datos se hará por medio del método de los mínimos cuadrados (Walpole, 1999); la variable dependiente serán los resultados predichos (ordenadas) y la independiente serán los resultados experimentales (abscisas) de los contenidos de agua de la curva de retención. La comparación se hará identificando los mismos valores  $i$ -ésimos de la succión en ambas curvas y sus correspondientes contenidos de agua  $i$ -ésimos graficando en el eje de las ordenadas los datos teóricos y en el eje de las abscisas de dichos contenidos de agua (ver

Figura 4.49).

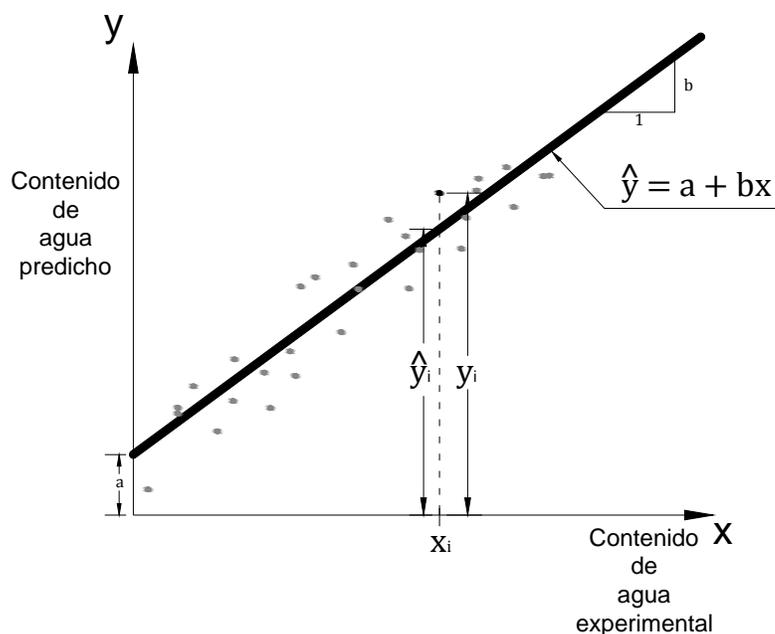


Figura 4.49. Modelo de regresión lineal para llevar a cabo las comparaciones teórico-experimentales.

Se han utilizado algunos parámetros estadísticos para cuantificar la correlación entre los datos predichos y los teóricos como el error cuadrático medio, el coeficiente de regresión  $R^2$ , la intercepción y la pendiente. El error cuadrático medio (*ECM*) está definido como:

$$ECM = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

Donde  $N$  es el número de observaciones,  $\hat{y}_i$  y  $y_i$  son el valor  $i$ -ésimo predicho por la ecuación de regresión y el valor real  $i$ -ésimo respectivamente. De la ecuación 4.1 es claro que el ECM tenderá a cero si los datos ajustados no se encuentran muy lejos de la ecuación de regresión.

El coeficiente  $R^2$ , por lo general se denomina coeficiente de determinación múltiple y está

dado por:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.2)$$

Donde  $\hat{y}_i$  representa la ordenada en el punto  $x_i$  de la ecuación ajustada,  $y_i$  es la ordenada en el punto  $x_i$  de cada observación y  $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$  representa la media de las ordenadas de las observaciones (ver Figura 4.49). El coeficiente de correlación múltiple  $R^2$ , es una medida descriptiva que sirve para evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos, ya que mide la capacidad predictiva del modelo ajustado y es una medida de la relación lineal entre dos variables. Si todas las observaciones están en la línea de regresión, el valor de  $R^2$  es 1, y si no hay relación lineal entre las variables dependiente e independiente, el valor de  $R^2$  es 0 y a medida que su valor es mayor, el ajuste de la recta a los datos es mejor puesto que la variación explicada es mayor.

Si bien los modelos de regresión son utilizados con fines predictivos, aquí se utiliza este análisis para cuantificar la exactitud de los resultados predichos por el modelo tomando en cuenta que el error cuadrático medio *ECM*, la pendiente *b*, la intersección *a* y el coeficiente de regresión múltiple  $R^2$  deben tender a los valores 0, 1, 0 y 0 respectivamente para poder decir que los datos teóricos se ajustan a los reales de manera adecuada (Walpole, 1999).

La Figura 4.48 es un análisis de correlación teórico-experimental para la muestra A-1 donde se presenta la ecuación de regresión de ajuste a los datos que se presentan en la misma figura en la forma  $\hat{y} = a + bx$ . Se puede ver el grado de discrepancia que existe al predecir los contenidos de agua con el modelo sólido-poroso de tal manera que, los puntos que se ubican por encima de la línea de ajuste indican una sobrestimación de dichos valores del contenido de agua y los valores por debajo de ella indican una subestimación de los mismos; estos análisis también se han llevado a cabo para las demás muestras de suelo (A-2 a A-7) como se puede ver más adelante.

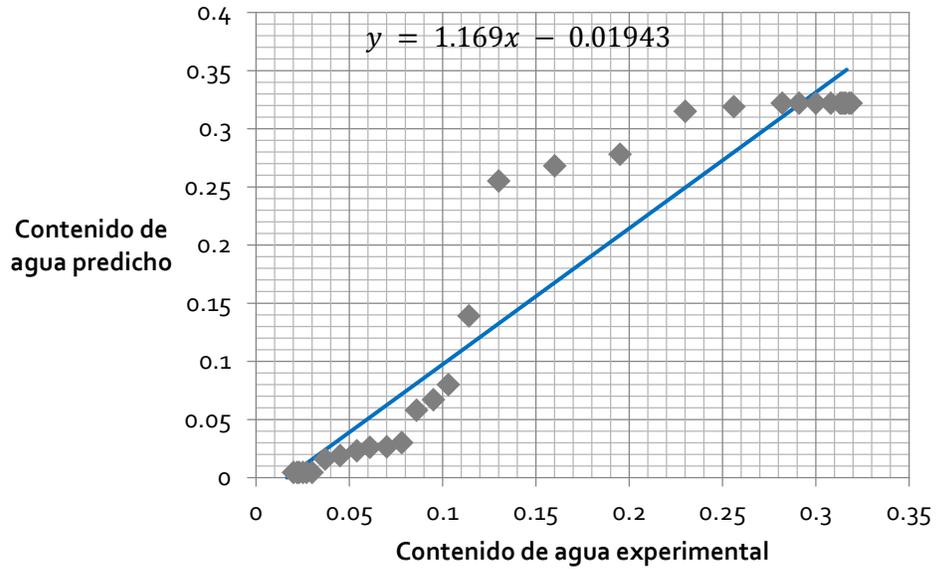


Figura 4.50. Comparación entre los contenidos de agua experimentales y los predichos en los mismos valores de succión para la muestra en proceso de secado (suelo A-1).

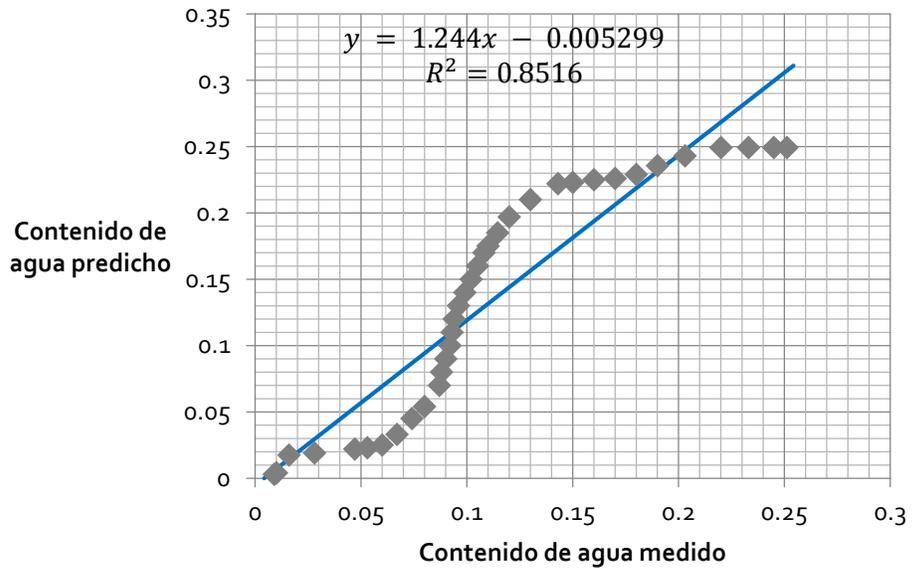


Figura 4.51. Comparación entre los contenidos de agua experimentales y los predichos en los mismos valores de succión para la muestra en proceso de secado (suelo A-2).

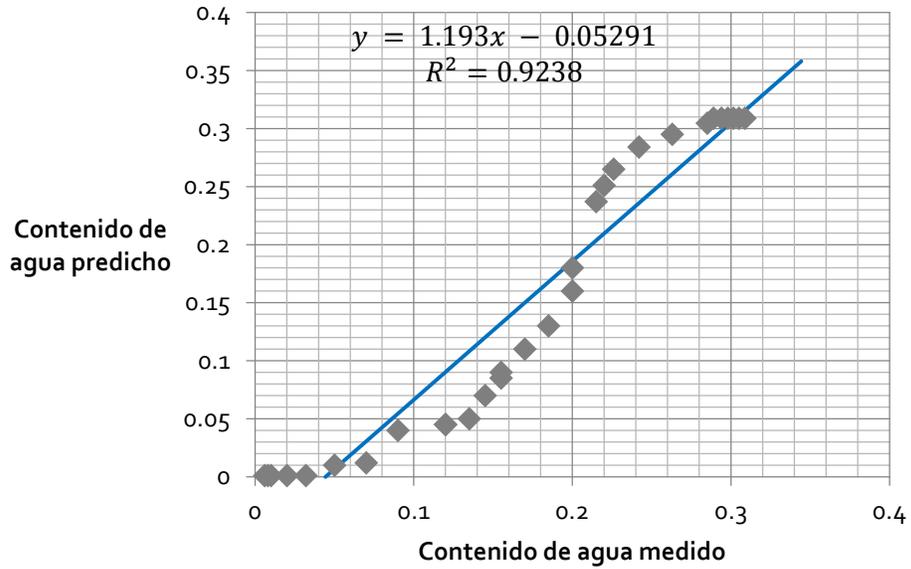


Figura 4.52. Comparación entre los contenidos de agua experimentales y los predichos en los mismos valores de succión para la muestra en proceso de secado (suelo A-3).

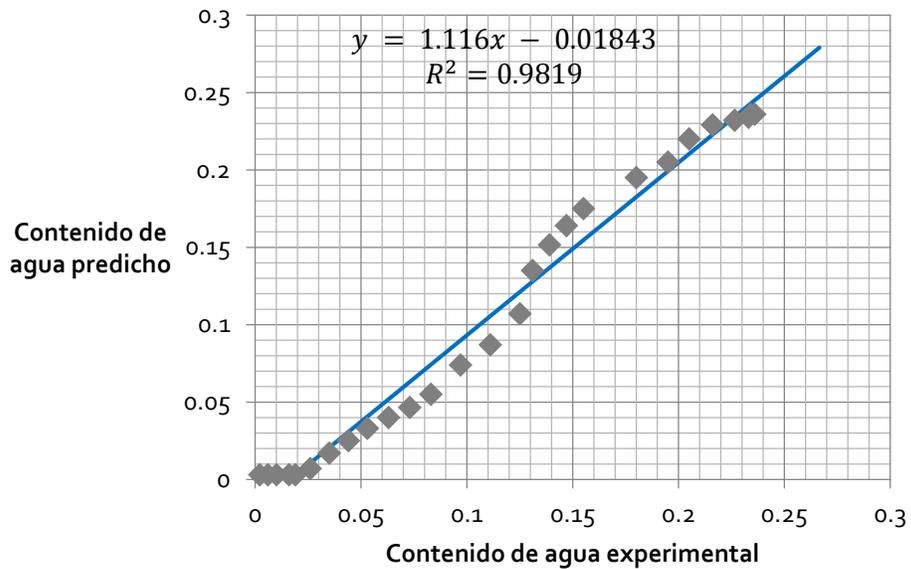


Figura 4.53. Comparación entre los contenidos de agua experimentales y los predichos en los mismos valores de succión para la muestra en proceso de secado (suelo A-4).

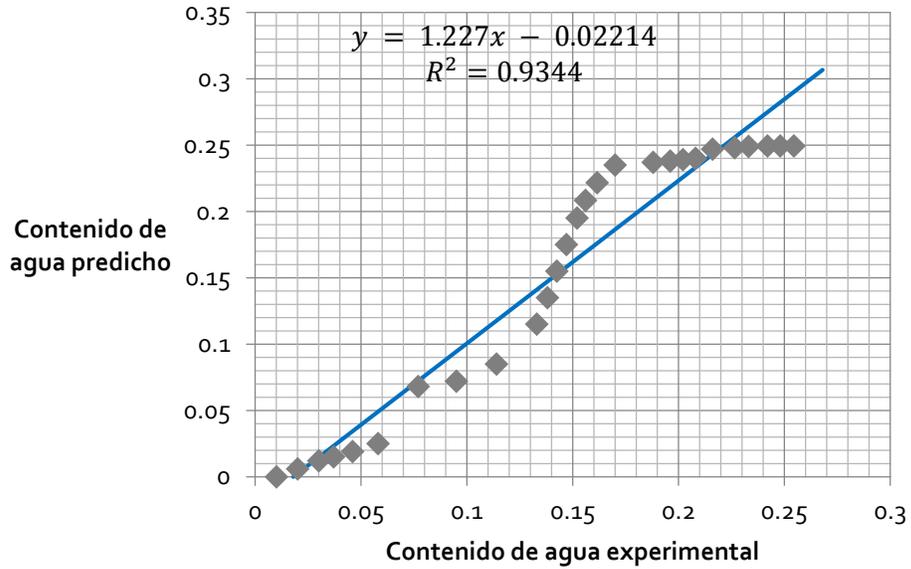


Figura 4.54. Comparación entre los contenidos de agua experimentales y los predichos en los mismos valores de succión para la muestra en proceso de secado (suelo A-5).

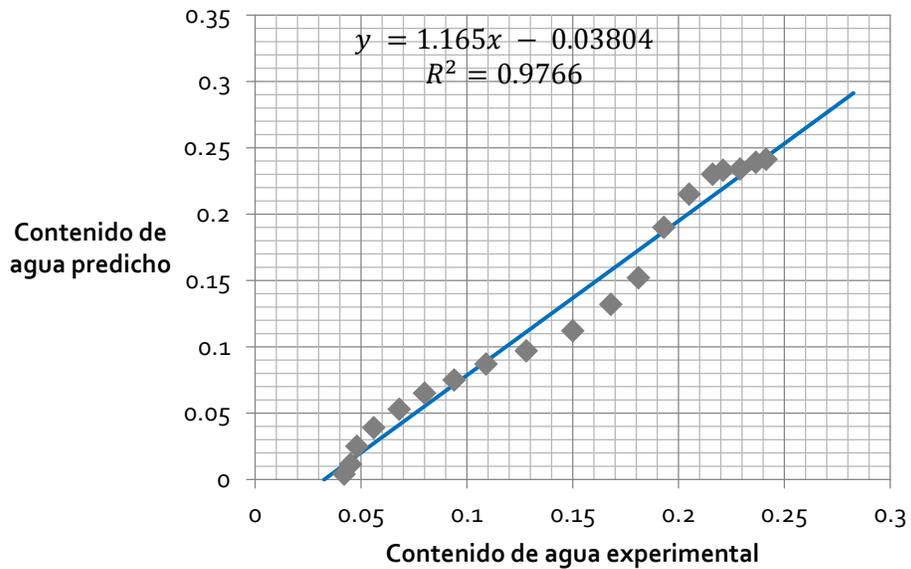


Figura 4.55. Comparación entre los contenidos de agua experimentales y los predichos en los mismos valores de succión para la muestra en proceso de secado (suelo A-6).

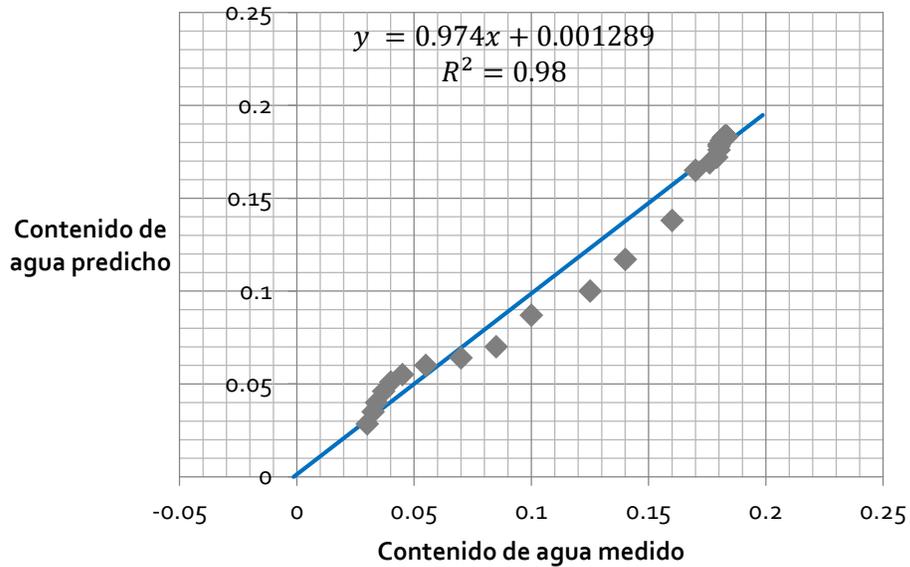


Figura 4.56. Comparación entre los contenidos de agua experimentales y los predichos en los mismos valores de succión (suelo A-7).

#### IV.2.4 Evaluación de la capacidad del modelo para reproducir las curvas de retención agua-suelo.

El Cuadro 4.15 consigna detalladamente características propias como la pendiente, intercepción, el coeficiente de regresión múltiple y el error cuadrático medio de las ecuaciones de regresión que están en las figuras 4.50 a 4.56.

Cuadro 4.15. Comparación entre los contenidos de agua medidos y los predichos para todas las muestras analizadas (Bondad de ajuste)

Suelo analizado	Intercepción (a)	Pendiente (b)	$R^2$	Error cuadrático medio (ECM)
A-1	-0.019430	1.169	0.9239	0.04059
A-2	-0.005299	1.244	0.8516	0.03406
A-3	-0.052910	1.193	0.9238	0.03523
A-4	-0.018430	1.116	<b>0.9819</b>	0.01254
A-5	-0.022140	1.227	0.9344	0.02506
A-6	-0.038040	1.165	0.9766	0.0135
A-7	<b>0.001289</b>	<b>0.974</b>	0.98	<b>0.00836</b>

Se debe recordar que un valor exacto de acuerdo a los análisis de regresión lineal se presentaría para un valor de intercepción igual a cero, además, las pendientes otorgan también una base cuantitativa para discriminar de entre las exactitudes de los resultados obtenidos: si los resultados son exactos se contará con una pendiente igual a la unidad; un coeficiente de regresión grande expresa una mayor aproximación en la correlación de los resultados.

De lo anterior se verifica que los resultados que exhiben mayores precisiones son los que están en relación al suelo A-7. La imprecisión mayor de los resultados para los otros suelos no tuvo nada que ver con alguna cuestión relacionada con el modelo mismo o la manera en que se construyó y más bien tiene que ver con la limitación respecto de los rangos de tamaños que puede manejar. Debe recordarse que la construcción de la estructura con elementos sólidos y poros tiene una limitación respecto de que el sólido o poro mayor según sea el caso, no debe ser mayor que once o doce veces el sólido o poro menor de ellos. Lo anterior limitaba de manera poco cómoda la alimentación del modelo particularmente para A-1 y A-3 donde por ejemplo, en el caso de A-1 el poro de menores dimensiones se tuvo que recorrer hacia la derecha considerando uno de mayores dimensiones, lo cual derivó seguramente en imprecisiones de las predicciones. En el caso de A-3 se incurrió en la falta de despremiar, en este caso, el poro de mayores dimensiones debido a que aparentemente no contribuía de manera notable al volumen total de los poros de A-3 (ver Figura 4.8) y considerando uno de menor tamaño. Lo anterior seguramente influyó la pendiente de la etapa de de-saturación debido a que en secado, el proceso está controlado por los poros de menores dimensiones, y en humedecimiento por los mayores (Rojas, 2008).

Adicionalmente a lo anterior, se ha llevado un análisis de regresión lineal a la totalidad de los valores obtenidos en relación a los contenidos de agua de manera análoga a como se ha procedido con la modelación individual de cada suelo; esto último tiene el objetivo de mostrar, en forma global, el comportamiento y dispersión derivados de la utilización del modelo Sólido-Poroso para predecir las curvas características de los suelos. La Figura 4.57 estudia el comportamiento en conjunto de todas las muestras.

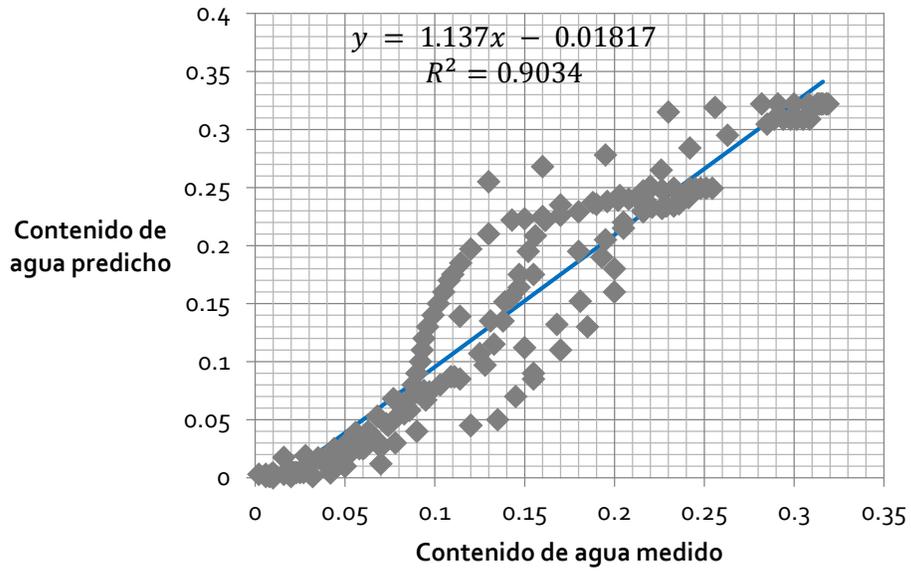


Figura 4.57. Comparación entre los contenidos de agua medidos y predichos para todas las muestras estudiadas.

Asimismo, el Cuadro 4.16 detalla también los resultados estadísticos del análisis presentado en la Figura 4.54.

Cuadro 4.16. Comparación entre los contenidos de agua medidos y predichos.  
(Bondad de ajuste)

Intercepción ( <i>a</i> )	Pendiente ( <i>b</i> )	$R^2$	Error cuadrático medio ( <i>ECM</i> )
-0.01817	1.137	0.9038	0.03171

Los datos estadísticos del Cuadro 4.16 implican que la precisión del modelo propuesto en este trabajo de tesis es adecuada en el sentido de que la intercepción con el eje de las ordenadas no se aleja de manera alarmante del origen y la pendiente es bastante cercana a la unidad. El error cuadrático medio es del orden de 3% y el coeficiente de regresión adopta un valor tendiente a la unidad y de 0.9038.

## IV.2.5 Estudio del comportamiento de la curva de retención agua-suelo bajo diferentes distribuciones granulométricas y porosimétricas.

### IV.2.5.1 Distribución porosimétrica

La distribución porosimétrica representa el parámetro que determina definitivamente la curva de retención en todos los sentidos, tanto en su forma como niveles de succión alcanzados. Las razones tienen que ver con que esta distribución específica de manera cuantitativa y exacta la cantidad y volumen de cada poro diferente. Si se desea por ejemplo modelar un suelo más denso, sería necesario modificar, además de la relación de vacíos, la distribución porosimétrica. Lo primero incluiría una mayor cantidad de cada uno de los poros necesarios para llenar el volumen de huecos necesario de acuerdo proceso de escalado, y tiene fines únicamente de representatividad gráfica para poder visualizar el posible arreglo estructural del suelo. La modificación de la porosimetría sin embargo es mucho más importante y debe modificarse correctamente para poder simular un material más denso o menos denso según sea requerido. Esto tiene que ver con que esta distribución está relacionada de manera directa a la densidad del material donde los vacíos de una muestra más suelta deben ser de mayores dimensiones que los de una muestra con características más densas (Figura 4.58).

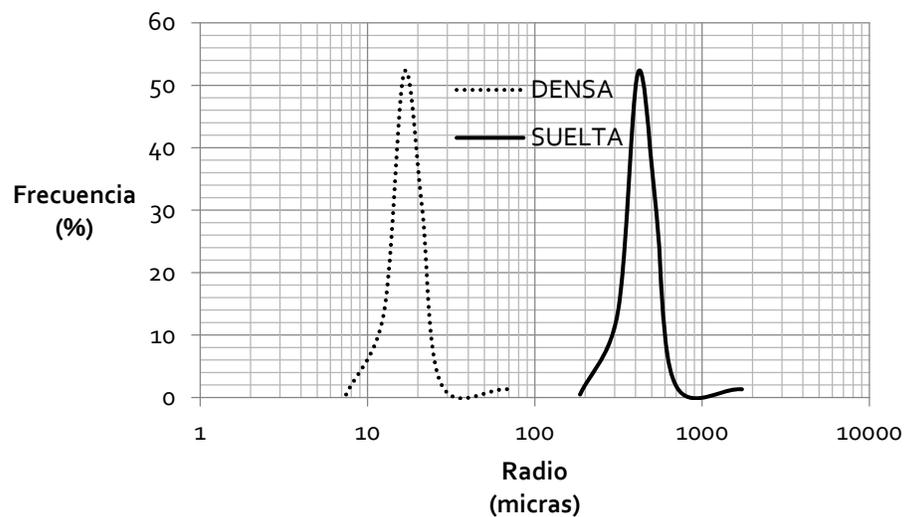


Figura 4.58. Distribuciones de tamaño de poro densa y suelta en suelos arenosos.

Recordando ahora que se cuenta con un número limitado de poros en frecuencia y tamaño para modelar la distribución de vacíos de la muestra real, es importante considerar que de los puntos de esta distribución que se proporciona al modelo sólido-poroso como valor de entrada, se tomen en cuenta de manera indispensable los siguientes pares de valores cuya importancia para reproducir de manera adecuada a las curvas de retención agua-suelo es mayor en relación a los demás: frecuencia y tamaño de los poros que se presentan mayor periodicidad, frecuencia y tamaños de los poros más grandes así como los más pequeños. Es decir, deben considerarse los puntos extremos laterales de la distribución de tamaños de poro, así como el mayor número de puntos máximos en frecuencia (*o picos*) presentes, en caso de existir más de uno.

Lo anterior se ejemplifica a continuación mediante la Figura 4.59 en la cual se encuentra la distribución de tamaños de poro de un suelo. La Figura 4.59 contiene los puntos que son el vector de entrada que se da al modelo y que se consideran representativos en primera instancia (y de manera incorrecta como se verá a continuación) de la distribución de tamaños de poro, sin embargo, esta distribución se encuentra incompleta debido a que si bien considera ciertos puntos de importancia, desprecia por otro lado a los valores extremos.

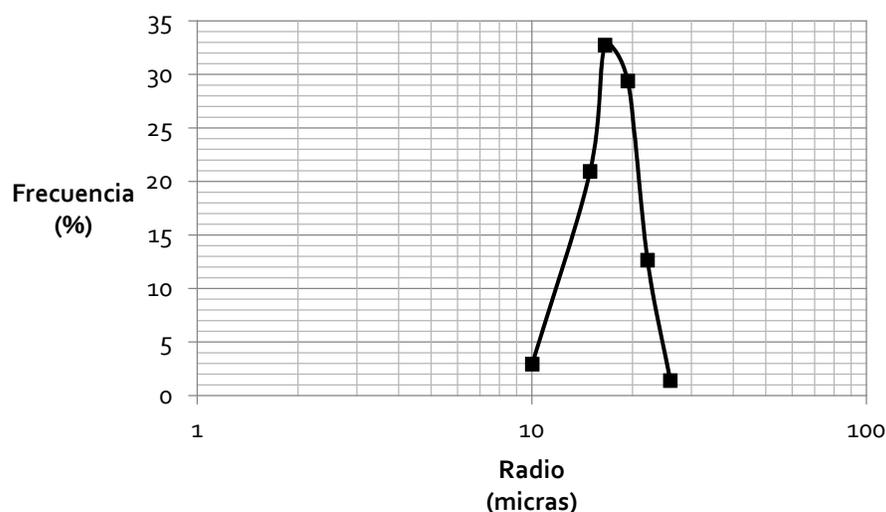


Figura 4.59. Distribución incompleta de tamaño de poros para un material arenoso.

Como resultado de considerar la distribución de la Figura 4.59, se tiene la curva teórica reproducida por el modelo sólido-poroso la cual está mostrada en la Figura 4.60. De ella se puede identificar que a falta de considerar el poro cuyo tamaño es mayor, el modelo no ha podido

identificar el valor de succión más grande asociado a dicho poro. Esto no es muy gravoso sin embargo para las etapas más características del proceso de secado de la curva, pero si representa un importante defecto para poder reproducir de manera correcta el fenómeno de histéresis y más concretamente para la etapa de humedecimiento del suelo modelado.

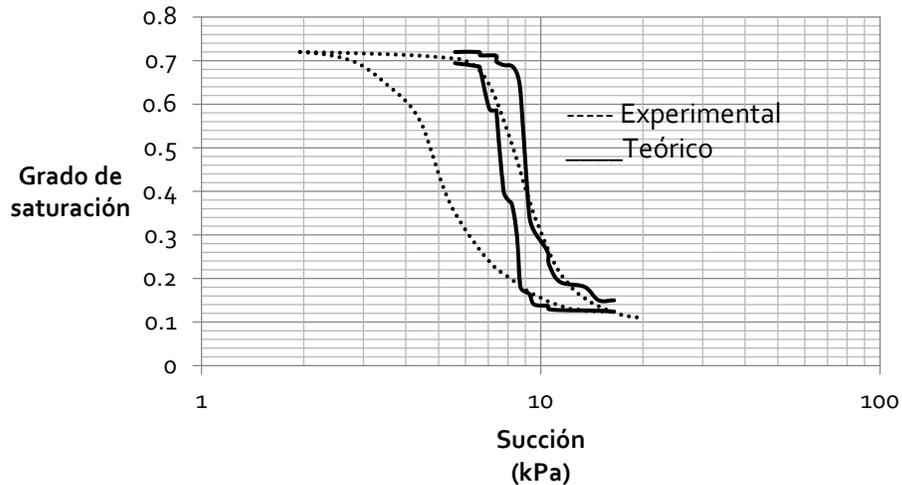


Figura 4.60. Comparaciones teórico-experimental considerando la distribución de tamaños de poro de la Figura 4.59.

Otro defecto que tiene la distribución presentada en la Figura 4.59 es que no considera la frecuencia y tamaño de los poros de menores dimensiones. Esto principalmente atiende a la necesidad de simular de manera correcta la etapa de saturación residual en las curvas de retención agua-suelo, fenómeno que se presenta con mayor claridad y magnitud en los suelos finos con partículas arcillosas o limosas.

En contraste a la distribución incompleta de la Figura 4.59, se presenta en la Figura 4.61 la distribución pero esta vez considerada de manera completa para el mismo suelo arenoso y sin subestimar la importancia que tienen los poros mayores y tampoco los menores, esto a pesar de que los últimos forman parte de una fracción volumétrica relativamente pequeña de la porosidad del suelo.

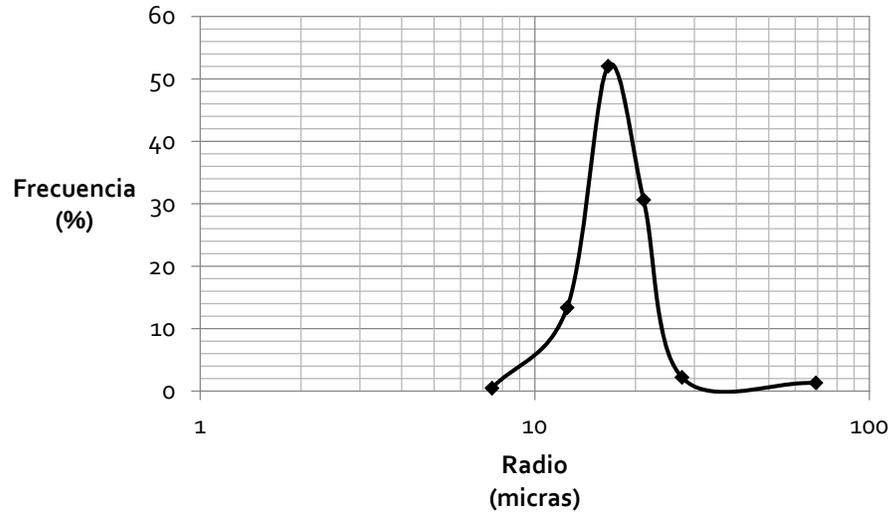


Figura 4.61. Distribución completa de tamaño de poros para un material arenoso.

Esta distribución (Figura 4.61) tiene la bondad de contener en ella las características de los vacíos de menor tamaño así como los de mayor tamaño y los que presentan mayor periodicidad. Lo anterior permite simular el proceso histerético con mayor precisión tal como lo muestra la Figura 4.62 la cual muestra una mayor exactitud y precisión a la hora de cotejar los resultados teóricos con los experimentales.

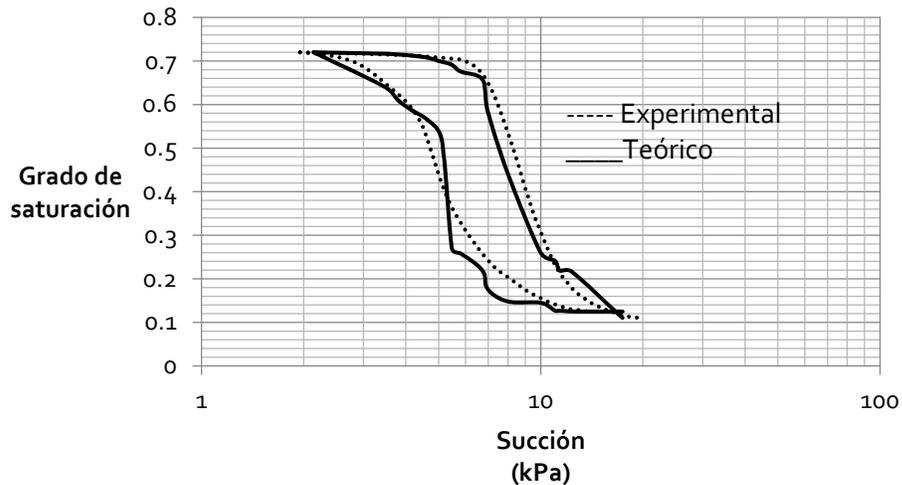


Figura 4.62. Comparaciones teórico-experimental considerando la distribución de tamaños de poro de la Figura 4.61.

#### **IV.2.5.2 Distribución granulométrica**

En este sentido, el tamaño de los granos sólidos representados en el modelo de la estructura final del suelo no modifica de manera sustancial a la forma de la curva de retención, de los niveles de succión en ella presentes ni de sus características geométricas. Las razones tienen que ver con que el análisis a partir de la etapa en que se separan los sólidos de los poros se centra en la porosidad de la misma y no se está considerando pues la variación volumétrica del modelo. Es decir, el volumen que ocupan los vacíos y los sólidos no cambia en ningún momento y la distribución granulométrica contribuye pues únicamente a establecer un arreglo estructural probable como ya se mencionó.

#### **IV.2.5.3 Arreglos estructurales probables del suelo modelado**

Como se mencionó previamente, la variación de la distribución granulométrica no modifica de manera sustancial la geometría ni las propiedades de las curvas de retención bajo una distribución de tamaños de poro constante. Esto, sin embargo sí conduce a diferentes arreglos estructurales al final del proceso de acomodo de cada uno de los diferentes granos considerados donde se considera válido afirmar que dado que la simulación del proceso de cambios de humedad conduce a una descripción adecuada de la curva de retención, es factible plantear que el arreglo estructural proporcionado por el acomodo de las partículas sólidas es un posible arreglo estructural que se pudiera presentar en la muestra de suelo real. Esto sin embargo está atado a incluir dentro de la distribución granulométrica los tamaños correctos de granos sólidos para dar los valores de entrada correctos al modelo sólido-poroso, cuestión que no se ve impedida más que por un análisis granulométrico adecuado de laboratorio. Finalmente la validación definitiva de este objetivo se plantea dentro de los trabajos a futuro en el sentido de llevar a cabo simulaciones con el arreglo estructural final al cual se le aplicarían en su momento esfuerzos mecánicos y medir así su resistencia al esfuerzo cortante para validarlo con datos experimentales de pruebas triaxiales.

# Capítulo V

En este trabajo se presentó un modelo numérico-computacional de elemento finito de carácter sólido-poroso programado en ambiente ANSYS capaz de reproducir las curvas de retención agua-suelo de los suelos no saturados. En primera instancia, el modelo propone una distribución espacial aleatoria para cada elemento ya sea un sólido o un poro. Consecuentemente, centra la atención en la porosidad resultante y simula los procesos de secado-humedecimiento de las curvas frontera y de histéresis mediante la implementación de un modelo mecánico-estructural que se utiliza para evaluar los grados de saturación asociados a los niveles de succión los cuales se obtienen por medio de la ecuación de Young-Laplace (Ecuación 2.1). Lo anterior deriva en la predicción teórica de las curvas de retención agua-suelo de los suelos no saturados que relacionan los contenidos de agua con la succión, misma que es una variable de estado denominada de esa manera por Alonso et al. (1990), y de la cual depende el comportamiento hidro-mecánico de dichos medios porosos y sin la cual no se podrían explicar los fenómenos de colapso, expansión y flujo de agua.

De acuerdo a las comparaciones entre los datos teóricos y los experimentales de los contenidos de agua gravimétrica para los mismos valores de succión, el modelo sólido-poroso es capaz de reproducir las curvas de retención agua-suelo de manera adecuada con las características siguientes:

- Las pendientes de regresión lineal de las comparaciones teóricas-experimentales de dichos contenidos de agua gravimétrica para cada muestra de suelo (A-1 a A-7) oscilan entre los valores de 0.97 y 1.22 y el error cuadrático medio nunca rebasa el valor del 4%. Hay que tomar en cuenta que los valores ideales para la pendiente de regresión y el error cuadrático medio son la unidad y cero respectivamente por lo

que se considera que estas comparaciones indican una fuerte correlación de los datos experimentales con los teóricos de los contenidos de agua gravimétrica.

- En relación a la capacidad global del modelo de reproducción de las curvas de retención agua-suelo, se ha efectuado también un análisis de regresión lineal para todas las comparaciones teórico-experimental de los contenidos de agua gravimétrica arrojando dicho análisis los valores finales para la pendiente y el error cuadrático medio de 1.137 y 3.1 %.

Huang et al. (2009) exponen resultados en relación a la pendiente y el error cuadrático medio muy parecidos a los que aquí se presentan al llevar a cabo comparaciones entre dos funciones de pseudo-transferencia, mismas que predicen las curvas de retención agua-suelo, donde finalmente se evalúa la capacidad de una de ellas para reproducir dichas curvas y concluye que las predicciones de su modelo son adecuadas.

## **V.1 TRABAJOS A FUTURO**

Un primer acercamiento al objetivo de dar seguimiento a este trabajo se plantea hacia el desarrollo del modelo sólido poroso en un esquema tri-dimensional. Esto indudablemente mejoraría la precisión de los resultados teóricos, además de hacerlo evolucionar con la perspectiva de dar aplicación hacia el estudio no solamente de las curvas de retención agua-suelo, sino también de aplicar, por ejemplo, simulaciones de esfuerzos mecánicos a la estructura porosa final con el objetivo de estudiar también la resistencia al esfuerzo cortante en suelos saturados y no saturados o fenómenos de flujo de agua como lo es el de consolidación.

Una característica evidente dado el ambiente en el que se desarrolla el modelo propuesto en este trabajo de tesis, es la posibilidad de interactuar con la estructura porosa en todas las etapas de su construcción donde esto finalmente conlleva a poder medir de manera precisa las fracciones del volumen que se encuentran no saturadas con precisión. Esto último sin embargo se vuelve complicado cuando se realizan las mediciones experimentales en laboratorio al respecto de la distribución porosimétrica. Rojas (2008) plantea por ejemplo una ecuación para determinar el

parámetro  $\chi$  en la ecuación de esfuerzos efectivos de *Bishop* que depende del conocimiento precisamente de las fracciones no saturadas del material en cuestión así como del grado de saturación mismo los cuales representan variables fácilmente determinables mediante el modelo sólido-poroso presentado aquí.

Otra contribución planteada como trabajos a futuro se dirige hacia la inclusión de un número mayor de diferentes granos sólidos y de poros también porque como se recordará, se cuenta únicamente con un total de 12 (6 diferentes tamaños de granos sólidos y 6 diferentes tamaños de poros). Esto último promete corregir de manera sustancial la precisión de los resultados teóricos porque incluiría la distribución porosimétrica en su totalidad y terminando en un sistema más real al definido por solo 12 elementos distintos.

Una deficiencia que tiene el modelo propuesto en este trabajo de tesis tiene que ver con la imposibilidad de hacer variar la distribución porosimétrica del modelo. Rojas et al (2009) reconocen que la distribución porosimétrica varía con los niveles de succión en el suelo donde esto último tiene su justificación en que los suelos son materiales compresibles y susceptibles a cambiar su volumen si se sujetan a los esfuerzos que los efectos de la succión producen. Al variar su volumen cambia por lo tanto su distribución porosimétrica, esto sin embargo no tiene dificultad alguna en la programación del modelo y la razón por la que se planteó así más bien alude a cuestiones computacionales donde el hardware utilizado para las simulaciones numéricas, aun siendo actual y propio de los que el usuario promedio utiliza en México, sigue siendo limitado para las aplicaciones que se han hecho en este trabajo de tesis. El ordenador personal que se utilizó para estas simulaciones es una computadora portátil marca *LENOVO* de la línea *THINKPAD EDGE* con 8 gigabytes de memoria RAM y procesador *Intel Core i5* trabajando a 2.27 giga Hertz concluyendo la mayoría de las simulaciones en un tiempo promedio de 4 horas.

## REFERENCIAS

Alfaro, S.M.A. 2008. Geotecnia en suelos no saturados. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 32(125): 471-481, 2008.

Alonso E.E., A. Gens and Josa A. 1990. A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique 40, No. 3, 405 – 430.

Alonso, E.E., E.E. Rojas, N.M. Pinyol. 2008. Suelos Parcialmente Saturados. XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Aguascalientes, Ags., México.

Androustopoulos, G.P. y R. Mann. 1978. Evaluation of Mercury Porosimeter Experiments using a network pore structure model. Chemical Engineering Science vol. 34, pp 1203-1212 (1978).

ANSYS, Inc. Software, ver. 11, 2009. Canonsburg PA, USA.

ASTM D 2325. 2002. Standard Test Method for Capillari-Moisture Relationships for Coarse- and Medium-Textured Soils by Porous-Plate Apparatus.

ASTM D 2487. 2002. Standard Practice for classification of Soils For Engineering Purposes.

ASTM D 2974. 2002. Standard Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils.

ASTM D 4404. 2002. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. Estados Unidos.

ASTM D 854. 2002. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Estados Unidos.

Barden, L., y G. R. Sides. 1970. Engineering behaviour and structure of compacted clay.

Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM4): 1171–1200.

Barrera N. E., J. A. Muñoz, J. E. Colmenares y L. D. Donado. 2003. Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica de arenas limpias. XI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería en Colombia y V Foro de Geotecnia de la Sabana de Bogotá. Colombia, Bogotá.

Barrera, B., P. Garnica. 2002. Introducción a la Mecánica de Suelos no saturados en vías terrestres. Publicación técnica No. 198. IMT.

Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R. y Ordóñez, S. 2001. Determination and quantification of pore structure using backscattered electron image analysis in porous building. Proceedings of 8th Euroseminar on Microscopy Applied of Building Materials, Atenas, 517-524.

Berryman, J.G. y Blair, S.C. 1987. Kozeny-Carman relations and image processing methods for estimating Darcy's constant. Journal of Applied Physics, 62: 2221- 2228.

Comisión Nacional de Zonas Áridas y Universidad Autónoma de Chapingo. 2001. Modelo Norteamericano de Cambio Climático. GFDL – R30 – 2001.

Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E. 1988. Concepts and applications of finite element analysis. John Wiley and Sons. Inc. New York.

Dullien, F. A. L., 1992. Porous media: Fluid transport and pore structure. 2nd Edition. San Diego: Academic Press, 574p

Fredlund, D. G. 2006. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE.

Fredlund, D.G. 1996. The emergence of unsaturated soil Mechanics. Fourth Spencer J. Buchanan Lecture.

Fredlund, D.G. y Rahardjo H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York,

John Wiley & Sons, Inc. 1993. p. 1-6.

Gens, A. and Alonso E.E., 1992. A framework for the behavior of unsaturated expansive clays. *Can. Geotech. J.* 29, 1013 – 1032.

Giesche, H. 2006. *Mercury Porosimetry: a General (Practical) Overview*. Wiley Interscience.

Halsey, G. D., 1948, *Journal of Chemical Physics*, 16, 931.

Hogart W. L., Hopmans J., Parlange J., Haverkamp R. 1988. Application of a simple soil-water hysteresis model. *J. Hydrol.*,98,21 – 29.

Hogue, C. 1998. Shape representation and contact detection for discrete element simulations of arbitrary geometries, *Engineering Computations*, Vol. 15, pp 374-390.

Horacio R., 20004. *Caracterización de medios porosos y procesos percolativos y de transporte*. Tesis Doctoral. San Luis, Argentina.

Huang, M., D. G. Fredlund, M. D. Fredlund. 2009. Comparison of Measured and PTF Predictions of SWCCs for Loess Soils in China. *Geotech. Geol. Eng.*

Jennings, J. E. B. y J. B. Burland. 1962. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique*, v.12, No. 84, (SM5), p. 125-144

Jimenes, S. J. 1993. “Hacia una mecánica de Suelos no Saturada”. *Revista Ingeniería Civil* v. 88 -1ra parte. p. 145-164.

Juárez, B. E. y A. R. Rico. 2008. *Mecánica de Suelos. Fundamentos de Mecánica de Suelos*. Ed. Limusa.

Koliji, A., L. Laloui, O. Cusinier, L. Vulliet. 2006. Suction Induced Effects on the Fabric of a Structured Soil.

Krinsley, D.H., Pye, K., Boggs, S. y Tovey, N.K. (1998): Backscattered scanning electron microscopy and image analysis of sediments and sedimentary rocks. Cambridge University Press, Cambridge, 193 p.

Krisdani H., H. Rahardjo y E. Leong. 2009. Use of instantaneous profile and statistical methods to determine permeability functions of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 46: 869-874.

Lapierre, C., S. Leroueil and J. Locat. 1990. Mercury intrusion and permeability of Louisville clay. Can Geotech J 27:761–773

Lebro, I. Schaap, M.G. y Suarez, D.L. (1999): Saturated hydraulic prediction from microscopic pore geometry measurements and neural network analysis, Water Resources Research, 35: 3149-3158.

Levine I. 2004. Fisicoquímica, Volumen 1, Quinta Edición, Mc Graw Hill.

Li, X. y L. Zhang. 2005. Prediction of SWCC for Coarse Soils Considering Pore Size Changes.

Libardi, P. L. 1995. Dinámica del agua del suelo. ESALQ, Depto. de Física y Meteorología, Piracicaba, p. 497.

Likos W. J. 2009. Pore-Scale Model for Water Retention in Unsaturated Sand. Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular media. American Institute of Physics.

Likos, W. J. & Lu, N. 2002. Filter paper technique for measuring total soil suction. Transportation Research Record 1786, Paper N0.. 02-2140, 120-128.

Livingston, H. K. 1949, Journal of Colloid Science, 4, 447.

Lu, N. y W. J. Likos. 2004. Unsaturated Soil Mechanics. John Wiley & Sons.

Lu, N., J. Lechman, K. T. Miller. 2008. Experimental verification of capillary force and water retention between uneven – sized spheres.

Marsal, R. J. 1979. Análisis de conocimientos sobre suelos cohesivos compactados. General Report. Proc. 6th Pan–Am. Conf. on SMFE, Lima, Vol.1: 143–222.

Mora, O. R. y G. E. Rojas. 2009. E. / Ingeniería 13-3 17-28. Análisis del efecto del humedecimiento en la falla de talud en el km 240+000 del cuerpo A de la autopista Cuernavaca – Acapulco.

Öberg, A. L. y G. A. Sällfors. 1997. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve. Geotechnical Testing Journal. v. 20, No. 1.

Or, D. and M. Tuller. 2005. Capillarity. p. 155 – 164, In: Hillel D. (ed.) Encyclopedia of Soils in the Environment, Elsevier Science, Oxford.

Pacheco J., 2007. Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de México. Centro de Geociencias. Santiago de Querétaro, Querétaro.

Pérez, G. N., A. P. Garnica. 2008. Evaluación del modelo de proporcionalidad natural para la modelación de la curva característica. XXIV Reunión Nacional De Mecánica De Suelos. Aguascalientes, Ags, México.

Poulovassilis, A. 1962. Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains. Soil Sci., Vol. 93: 405-412.

Prapaharan, S., A. G. Altschaeffl, B. J. Dempsey. 1985. Moisture curve of compacted clay: mercury intrusion method. J Geotech Geoenv Eng 111(9):1139–1143.

Rahardjo, H., and Leong, E.C. 2006. Suction measurements. In Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils, 2–6 April 2006, Phoenix, Ariz. Vol. 1, pp. 81–

Ray, R. P., y K. B. Morris. 1994. Automated laboratory testing for soil/water characteristic curves, in Proceedings of 1st International Conference on Unsaturated Soils, vol. 2, edited by E. Alonso and P. Delage, pp. 236 –241, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1994.

Reed, M.A., C. W. Lovell, A. G. Altschaeffl, L. E. Wood. 1979. Frost-heaving rate predicted from pore-size distribution. *Can Geotech J* 16:463–472

Richards, B. G. 1966. The significance of moisture flow and equilibria in unsaturated soils in relation to the design of engineering structures built on shallow foundations in Australia. *Symp. On Permeability and Capillarity of Soils. ASTM STP 417. Atlantic City.*

Rojas, E. 2008. Equivalent stress equation for unsaturated soils, II: Solid-Porous Model. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 8, No.5.

Rojas, E., A. G. Zepeda, R. M. L. Pérez, J. Leal, G. Gallegos. 2009. A four elements porous model to estimate the strength of unsaturated soils. *Springer Science + Business Media B.V.*

Romero, E., A. Gens, A. Lloret. 1998. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Eng Geol* 54:117–127

Romero, E., y P. Simms. 2007. Microstructure Investigation in Unsaturated Soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. Published Online DOI 10.1007/s10706-008-9204-5 and In Press for hard copy.

Santamarina C. J., Narsilio A. Guillermo. 2008. *Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones*. Georgia Institute of Technology. 790 Atlantic Dr., Atlanta, GA. 30332. USA.

Simms, P. H. y E. K. Yanful. 2002. Predicting soil-water characteristic curves of

compacted plastic soils from measured pore-size distributions. *Géotechnique*, 52(4): 269-278.

Simms P. H. y E. K. Yanful E.K. 2003. Pore network modeling for unsaturated soils. *Proc. 56<sup>th</sup> Can. Geotech. Conf.*, Winnipeg, Canada.

Simms, P. H. y E. K. Yanful. 2004. Discussion of the application of mercury intrusion porosimetry for the investigation of soils, including an evaluation of its use to estimate volume change in compacted clayey soils. *Geotéchnique* 54(6):421–426.

Simms P.H., and Yanful, E.K. 2005. A pore-network model for hydro-mechanical coupling in unsaturated compacted clayey soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (2): 499-514.

Streeter, V., B. Wylie, K. Bedford. 2004. *Mecánica de Fluidos*, Novena edición, Mc Graw Hill.

Terzaghi, K. 1956. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons.

Walpole, R. E. 1999. *Probabilidad y estadística para ingenieros*, 6<sup>a</sup>. ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México.

Wang, Y.H. y D.G. Fredlund. 2003. Towards a better understanding of the role of the contractile skin. *Second Asian Conference on Unsaturated Soils*, Osaka, Japan.

Wheeler S.J. and V. Sivakumar. 1995. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Géotechnique* 45, No.1, 35 – 53.

Zeevaert, L. 1997. *La Investigación del Suelo por su Estructura y Comportamiento Reológico*"; Segunda Conferencia Magistral en el Instituto Politécnico Nacional; México.

Zhou, J. y Y. Jian-lin. 2004. Influences affecting the soil-water characteristic curve. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*.