



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

GALLEGOS, G.; LEAL, J. C.; ROJAS, E.; HORTA, J. A.; MARTÍNEZ, E. I.  
Obtención de la curva de retención mediante el análisis de imagen y el modelo probabilista  
Revista de la Construcción, vol. 10, núm. 3, diciembre, 2011, pp. 75-85  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127622721008>

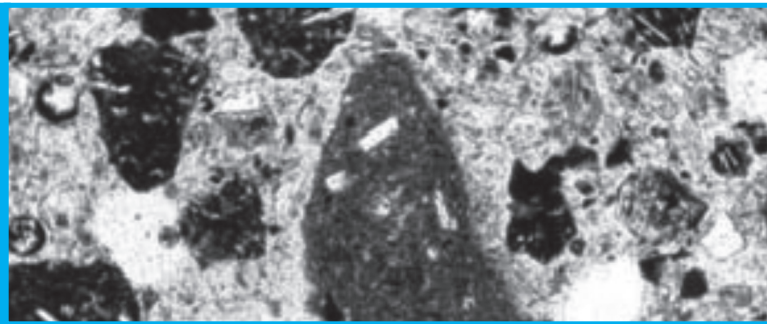
- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Determination of the  
retention curve by  
image analysis and the  
probabilistic model*

# Obtención de la curva de retención mediante el análisis de imagen y el modelo probabilista



## Autores

- GALLEGOS, G.** Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería, en la línea de Mecánica de Suelos, Profesor Investigador de tiempo completo de la carrera de Ingeniería Civil de la Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
- LEAL, J. C.** Ingeniero Civil, candidato a Doctor en Ingeniería, en la línea de Mecánica de Suelos, Profesor Investigador de tiempo completo del Departamento en Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, México.
- ROJAS, E.** Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería, Profesor Investigador de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- HORTA, J. A.** Físico, Doctor en Ingeniería, Profesor Investigador de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, México.
- MARTÍNEZ, E. I.** Licenciada en Administración, Maestra en Administración, Profesora Investigadora de tiempo completo de la carrera de Mercadotecnia de la Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

**Fecha de recepción** 14/04/2011  
**Fecha de aceptación** 10/11/2011



## Resumen

En este trabajo se presenta un procedimiento sistemático para obtener la porosimetría del suelo mediante el análisis de imagen, con la información obtenida así, se alimenta el Modelo

Probabilista, el cual permite obtener la curva de retención de arenas y limos, con mucha mayor aproximación a los resultados experimentales.

**Palabras clave:** Análisis de imagen, curva de retención y modelo probabilista.

## Abstract

*This research shows a systematic procedures to obtain the pore size distribution of the soil by image analysis, the information is introduce*

*in the Probabilistic Model for obtain the retention curve of sand and silty soils, with higher precision to the experimental information.*

**Key words:** Image analysis, retention curve and probabilistic model

## 1. Introducción

Existen muchos ejemplos en los que se puede apreciar que los materiales porosos juegan un rol importante en muchas áreas del conocimiento, particularmente en la ingeniería encontramos materiales porosos como: concreto, acero, rocas, suelo, cerámica, plástico, etc. En los que sus poros usualmente contienen aire, agua, aceite o una mezcla de diferentes fluidos (Dullier, 1992).

Todos los materiales sólidos contienen cavidades o canales, de acuerdo a sus accesos se dividen en dos tipos: las cavidades abiertas y las cavidades cerradas. En un material se denominan cavidad (poro) abierta a aquellas cavidades que presentan canales comunicados entre sí y conectados con la superficie exterior. Por otro lado, las cavidades (poros) cerradas son aquellos espacios que son inaccesibles a cualquier fluido, y que además influyen en las propiedades macroscópicas del material como la densidad, elasticidad, esfuerzos mecánicos y conductividad térmica. Sin embargo, solo los poros abiertos permiten el paso de fluidos (Dullier, 1992).

Las cavidades y conductos se forman entre los agregados de partículas esféricas y planas, en particular las cavidades de partículas sólidas pequeñas se caracterizan por tener una gran superficie y exhibir una capacidad de absorción elevada. Así, las propiedades físicas como superficie específica, tamaño de poro y distribución de tamaño de poros son características importantes de los materiales que son utilizados en muchos procesos de construcción como es el caso de los filtros de materiales graduados, membranas, el material de las capas de los pavimentos, etc.

Generalmente los canales y conductos de este tipo de materiales no son visibles al ojo humano, por ello se ha desarrollado un gran número de procedimientos de medición para caracterizar a los materiales porosos, como los presentados por Sing *et al.* (1985) y Rouquerol *et al.* (1994), por medio de los cuales es posible conocer la densidad, permeabilidad, succión, distribución de tamaño de poro, superficie específica y otros.

La distribución del tamaño de partícula, la superficie específica, el volumen de poro específico y la distribución de tamaño de poro son mediciones cuantitativas que involucran consideraciones precisas, de acuerdo a las cantidades que se están midiendo y a la validez del procedimiento de medición contemplado por el material. Por lo cual, las cantidades determinadas de esta manera son conocidas como procedimientos cuantitativos (Munro, 2003), dado que las mediciones

no cuentan con las bases teóricas para que sus valores puedan ser evaluados en forma independiente por otros procedimientos.

Algunos métodos porosimétricos solo tienen acceso a los poros abiertos (tal es el caso de los métodos que utilizan fluidos), mientras que otros métodos pueden acceder tanto a los poros cerrados como a los abiertos (como ejemplo están los métodos que utilizan adsorción o dispersión de radiación electromagnética).

Además, dependiendo del método de medición que se maneje, será el tamaño de la probeta que debe ser utilizada para el ensaye (por ejemplo los métodos de desplazamiento de fluidos y adsorción) y de la medición (estereología). Como consecuencia, el valor de la porosidad medida dependerá del estado físico del material y del método experimental utilizado para su determinación.

Al hacer el análisis porosimétrico de un suelo, con frecuencia se usan formas y tamaños idealizados de las cavidades y de los conductos. En la práctica el tipo de formas de las cavidades está limitado a cilindros o esferas, para un análisis bidimensional y tridimensional. Mientras que a los conductos se les consideran formas rectangulares o cilíndricas durante un análisis bidimensional y tridimensional, respectivamente.

De acuerdo con Dullier (1992), se han logrado avances significativos en el entendimiento de las propiedades macrofísicas de los materiales porosos a partir del análisis del comportamiento de la microestructura de los materiales. A decir, la porosidad, la permeabilidad, la superficie específica, la resistividad y la succión están estrechamente relacionadas con su porosimetría.

Collins (1961) y Scheidegger (1974) dividieron los métodos para determinar la porosimetría en las siguientes categorías: métodos directos, métodos ópticos, métodos de imbibición, métodos de inyección de mercurio y método de expansión de mercurio. Por otro lado Mikhail and Robens (1983) propusieron los siguientes procedimientos para determinar la porosimetría total: cálculo a partir de la densidad aparente, determinación a partir de la dispersión de rayos X con ángulo pequeño, análisis de imagen cuantitativo y sistemas de análisis de imagen. Sin embargo, los métodos ópticos permiten conocer la porosimetría de manera rápida, Dullier (1992).

Así la exploración del suelo mediante el microscopio electrónico de barrido a bajo vacío es la herramienta más apropiada para estudios morfológicos (Chinga, 2002), debido a que las micrografías así obtenidas,

son imágenes de alta calidad y resolución, las cuales permiten adquirir información muy confiable de la porosimetría y detalles de la porosidad, como es el caso de la forma del poro, su tamaño, orientación, etc.

La porosimetría del suelo por análisis de imagen se analizará en forma decreciente iniciando por los macroporos, continuando por los mesoporos y finalizando con los microporos, de modo que sea posible cuantificar la presencia de cada uno de ellos con respecto de la sumatoria total de los poros, de donde se obtiene el porcentaje correspondiente a cada uno de los vacíos presentes en el medio poroso.

## 2. Materiales y métodos

### Selección de la muestra

Para poder analizar el comportamiento mecánico e hidráulico que experimenta un suelo sin potencial osmótico, a diferentes magnitudes de succión mátrica, se eligió una arena limosa con las características que se muestran en la Tabla 1. Las partículas sólidas presentan un diámetro medio de 221.31  $\mu\text{m}$  y una desviación estándar de 492.27  $\mu\text{m}$ .

Físicamente el suelo presenta el aspecto mostrado en la Figura 1, en la que se observa que el suelo está formado por fragmentos angulosos y subangulosos de roca ígnea con tamaño máximo de 2 mm, también se localizaron fragmentos de cuarzo de origen ígneo, sedimentario y metamórfico; así como fragmentos aislados de feldespato potásico y plagioclasas. Además, las partículas se muestran con un grado de alteración y oxidación moderado.

### Elaboración de los especímenes

Posteriormente se fabricaron probetas, con el suelo en estudio, dentro de los portamuestras como se aprecia en la Figura 2, en las cuales se buscó reproducir un  $\gamma_d$  de 14.88  $\text{kN/m}^3$  para un contenido de agua  $\omega = 21\%$  —parámetros obtenidos a partir del ensaye proctor

estándar—. Las probetas ya elaboradas se colocaron en el portaobjetos del microscopio electrónico de barrido, como se aprecia en la Figura 3. El microscopio electró-

Figura 1. Arena limosa utilizada en la investigación

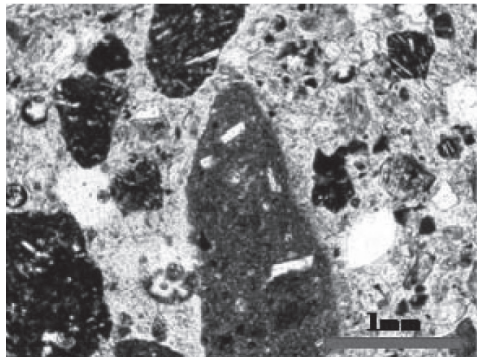


Figura 2. Muestra de suelo instalada en el portamuestra

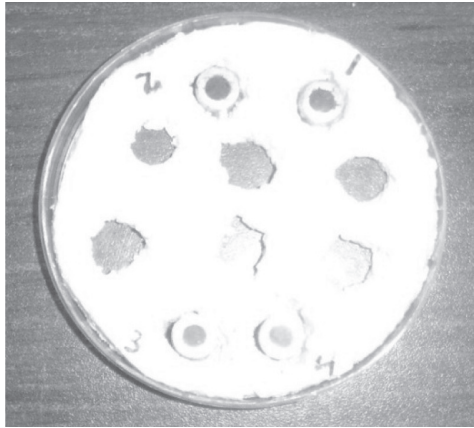


Tabla 1. Características del suelo ensayado

Grava %	Arena %	Limo %	Arcilla %	Límite líquido %	Límite plástico %	Índice de plasticidad %	Clasificación SUCS
0.00	68.82	29.41	1.78	27.82	24.12	2.70	SM

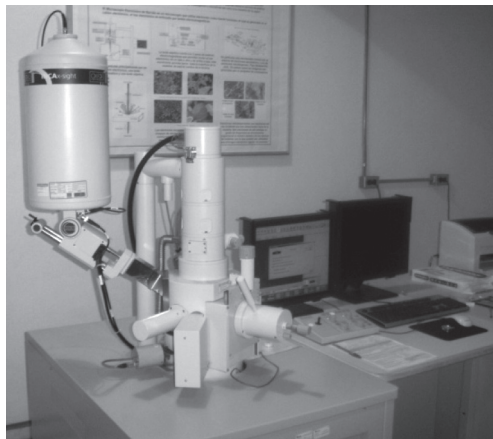
Fuente: Elaboración propia.

nico de barrido trabajó a bajo vacío para no alterar las condiciones de humedad de las muestras (Figura 4) y en esas condiciones se obtuvieron micrografías a 100, 500, 1.000, 3.000 y 6.000 ampliaciones.

**Figura 3.** Portaobjetos del microscopio electrónico de barrido



**Figura 4.** Microscopio electrónico de barrido



### Análisis de imagen

Ya con las micrografías de este suelo, se procedió a analizarlas de acuerdo al siguiente procedimiento:

- 1) Se efectuó una selección de las micrografías obtenidas.
- 2) A cada micrografía se le proporcionó un tratamiento de nitidez, para diferenciar a las partículas sólidas de los poros.
- 3) Mediante un programa de conteo de imagen se cuantificó la superficie total de la micrografía, posteriormente se determinó la superficie de cada uno de los poros y por diferencia se obtuvo la superficie de los sólidos (para este propósito se requirió la escala de la micrografía). Durante el análisis de imagen, el programa mantiene el área total de la micrografía, el área de cada uno de los poros seleccionados, así como la suma de ellos. Con el área total ( $A_m$ ) y el área de los poros ( $A_v$ ) es posible obtener por diferencia el área de los sólidos ( $A_s$ ). Con la información obtenida a partir de la micrografía y además utilizando la expresión de la relación de vacíos ( $e = V_v/V_s = A_v/A_s$ ) fue posible obtener su valor teórico y de esta manera se pudo compararlo con el determinado experimentalmente. Esta revisión permite conocer el momento en el cual el análisis de la imagen ha terminado. Finalmente el programa proporciona un archivo con el listado del área de los poros y su diámetro equivalente.

### Determinación de la porosimetría del suelo

- 1) Con el listado de los diámetros de poro se efectuó un análisis estadístico, para ello se identificó al diámetro máximo y mínimo, lo que permitió definir las fronteras de clase, su correspondiente valor medio y efectuar el análisis de la distribución de estos. Cabe destacar que los poros identificados se obtuvieron a partir de la integración de la información de varias micrografías.
- 2) Con el programa de conteo de imágenes se cuantificó el área de cada uno de los poros y con el área determinada y la consideración de que los poros presentan forma circular, se determina cada uno de los diámetros equivalentes correspondientes, por medio de ecuación 1.

$$D_{\text{equivalente}} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$D_{\text{equivalente}}$  = Diámetro equivalente

$A$  = Área del poro.

- 3) Con el diámetro de poro y la frecuencia de cada uno de estos se construyó la curva de distribución porosimétrica (CDP).

- 4) Mediante la inspección efectuada a la curva de distribución porosimétrica se determinó el diámetro medio y desviación estándar de los mesoporos (sitios) y los microporos (enlaces) encontrados.

### Determinación de la curva característica

A continuación, mediante el Modelo Probabilista (MP) se determinó la curva de retención del suelo en estudio en ambas trayectorias.

## 3. Manejo del programa de análisis de imagen

El programa de conteo de imagen es un programa que fue desarrollado por el Dr. Francisco Antonio Horta Rangel, en Visual Basic, el cual es capaz de leer cada uno de los píxeles que se encuentran en una micrografía (la carátula del programa se aprecia en la Figura 5). Para ello, el conteo se efectúa en tres pasos. El primer paso radica en determinar el número de píxeles existentes en la micrografía Am; el segundo, consiste en determinar el número de píxeles en blanco Av, y en el tercer paso se obtiene de la diferencia de los dos primeros, que corresponde a As. El proceso que el programa de conteo efectúa se puede sintetizar en el esquema que se muestra en la Figura 6.

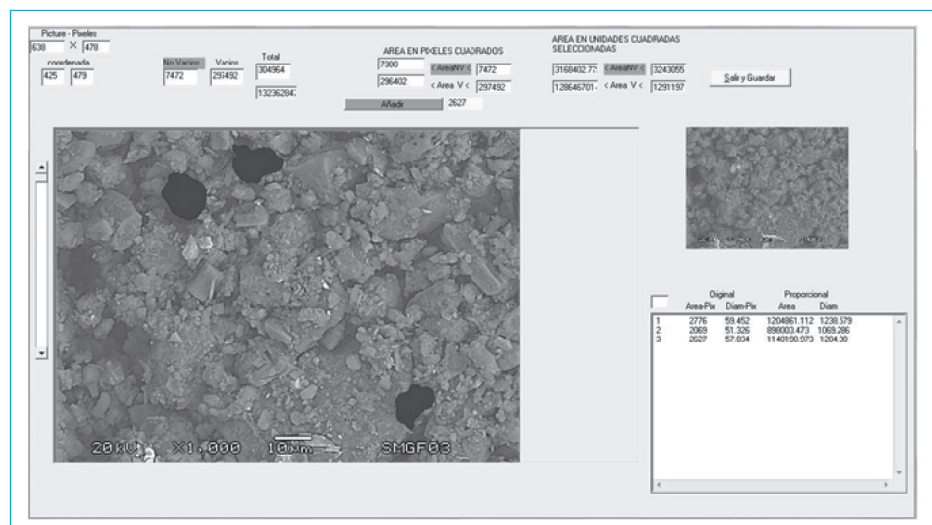
## 4. Descripción del modelo probabilista

En un suelo en condiciones normales se encuentran presentes los sólidos, vacíos y conductos, además éste presenta una distribución de tamaño de poro que puede modificarse durante el proceso de secado o humedecimiento, de aquí que la histéresis del suelo obedezca al proceso de llenado o vaciado de los poros de diferentes tamaño, presentes en él (Dullien, 1992), como se aprecia en la Figura 7.

De manera semejante a como lo plantearon Simms and Yangful (2002), se presenta el modelo probabilista que permite simular la curva de retención a partir de la porosimetría obtenida mediante la técnica de análisis de imagen. Así los poros (sitios) y conductos (enlaces) de este modelo se pueden representar en forma bidimensional y tridimensional (Figuras 8 y 9).

Este hecho permite reproducir el efecto de la histéresis, para ello, la asignación de los diámetros de los vacíos, así como su ubicación en la red de poros, se establecen de forma aleatoria (Figura 7). Este modelo también permite ajustar la distribución porosimétrica del suelo, apoyándose en su curva de retención experimental, y además la simulación del proceso de humedecimiento del suelo se puede realizar en trayectoria de secado y humedecimiento.

Figura 5. Programa de conteo de imagen





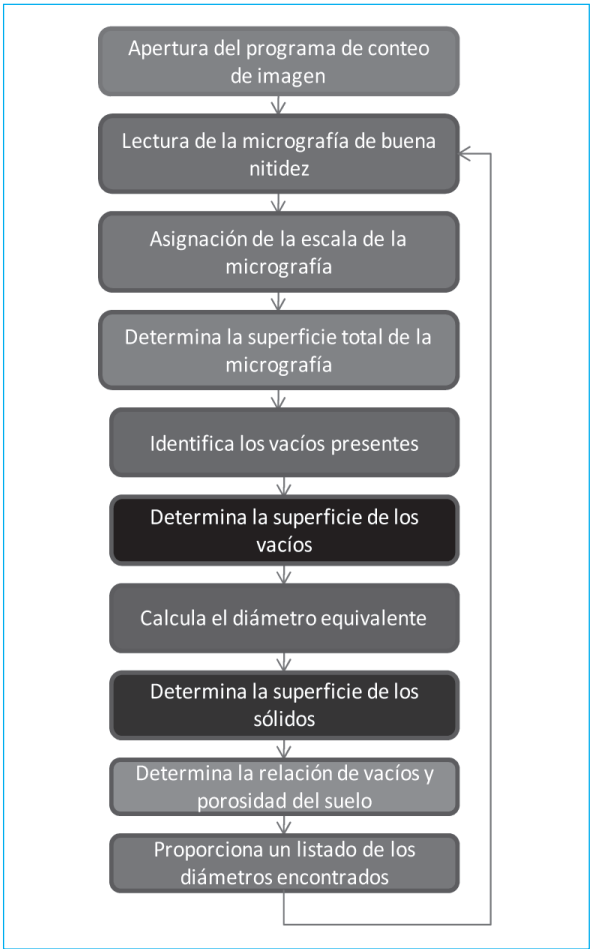
El modelo probabilista se desarrolló apoyándose en la distribución estadística de los sitios y de los enlaces, presentes en un suelo (Rojas, 2006), como se aprecia en la Figura 10, por medio de la cual es posible reproducir la compleja estructura de los suelos, Simms and Yanful (2000).

Así, apoyándose en la distribución logarítmica normal de sitios y de enlaces, se realizó el planteamiento matemático de cada uno de los factores que regulan el modelo y que permite determinar el grado de saturación alcanzado. Además, apoyándose en el modelo de Laplace se determina la succión del suelo (Figura

10), para las trayectorias de secado y humedecimiento. Adicionalmente se desarrolló un programa de cómputo que permite efectuar esta simulación y comparar sus resultados con los resultados obtenidos en forma experimental.

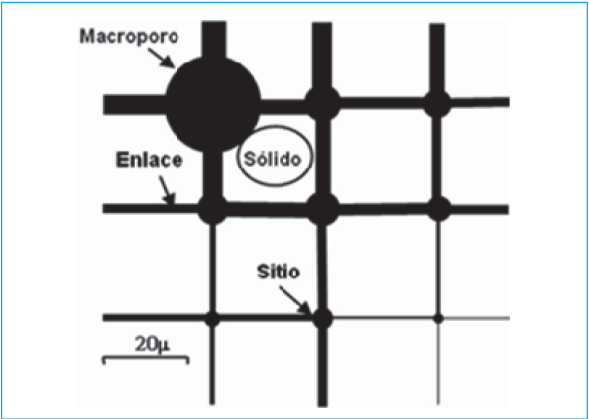
Durante una simulación, si se efectúa un barrido sobre el eje de los diámetros (de enlace y sitios) de izquierda a derecha permitirá obtener los factores de probabilidad de los enlaces y de los sitios en trayectoria de humedecimiento  $L_{BI}$  y  $L_{SI}$ , con los cuales se determina el grado de saturación del suelo  $G_{WI}$ . De igual forma si se efectúa un barrido sobre el eje de los diámetros

**Figura 6.** Esquema del proceso de análisis de la micrografía



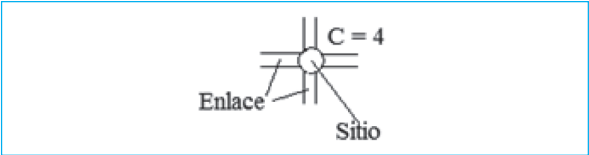
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7.** Arreglo de sólidos, sitios y enlaces en el modelo

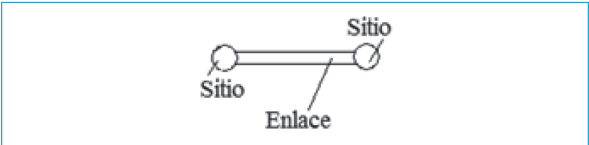


Fuente: Rojas 2006.

**Figura 8.** Disposición de los sitios



**Figura 9.** Disposición de los enlaces





(de sitios y enlaces) de derecha a izquierda permitirá obtener los factores de probabilidad de los enlaces y de los sitios en trayectoria de secado  $L_{BD}$  y  $L_{SD}$ , con los cuales se determina el grado de saturación del suelo  $G_{WD}$ . Además, durante el barrido en forma simultánea se determina la succión de cada diámetro analizado.

Con la información anterior ( $\psi$ ,  $G_{WI}$ ) y ( $\psi$ ,  $G_{WD}$ ) es posible construir la curva de retención del suelo en trayectoria de secado y humedecimiento. Además, se le llama conectividad a la unión entre los sitios y los enlaces y esta puede tomar el valor de  $C = 4$  o  $C = 6$ , según se trate de un análisis bidimensional o tridimensional. Los factores que regulan los procesos de secado y humedecimiento del modelo probabilista son las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 y las expresiones para establecer el grado de saturación en ambas trayectorias son las ecuaciones 6 y 7. Además, para determinar la succión se utiliza la ecuación 8.

$$L_{SD} = S(R_c) + [1 - S(R_c)] \{ B(R_c) + [1 - B(R_c)] L_{SD} \}^C$$

$$L_{BD} = B(R_c) + [1 - B(R_c)] \{ [1 - S(R_c)] L_{BD}^{C-1} \}$$

$$L_{SI} = S(R_c) \left\{ 1 - \left\{ [1 - B(R_c)] [1 - (1 - L_{SI})^2] \right\}^C \right\}$$

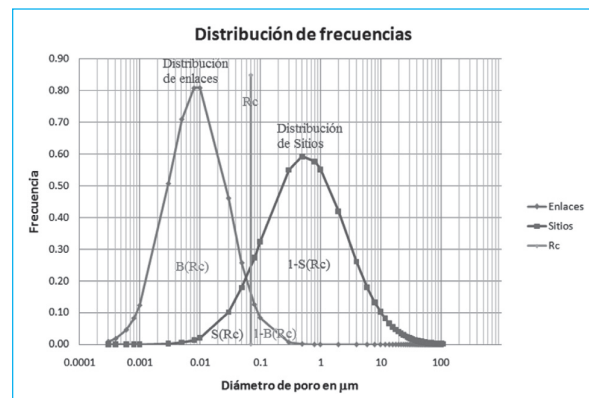
$$L_{BI} = B(R_c) \left\{ 1 - \left\{ [1 - S(R_c)] [1 - (1 - L_{BI})^2] \right\}^C \right\}$$

$$S_{WD} = \frac{L_{SD} V_S \cdot L_{BD} \cdot V_B}{V_S + V_B}$$

$$S_{WI} = \frac{L_{SI} V_S \cdot L_{BI} \cdot V_B}{V_S + V_B}$$

$$\psi = U_a - U_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{R_c}$$

**Figura 10.** Distribución probabilista de sitios y enlaces



Donde:

- $S(R_c)$  : Área bajo la curva de sitios, antes del diámetro  $R_c$
- $1-S(R_c)$  : Área bajo la curva de sitios, después del diámetro  $R_c$
- $B(R_c)$  : Área bajo la curva de enlaces, antes del diámetro  $R_c$
- $1-B(R_c)$  : Área bajo la curva de enlaces, después del diámetro  $R_c$
- $L_{SD}$  : Probabilidad de que un sitio se encuentre saturado en trayectoria de secado
- $L_{BD}$  : Probabilidad de que un enlace se encuentre saturado en trayectoria de secado
- $L_{SI}$  : Probabilidad de que un sitio se encuentre saturado en trayectoria de humedecimiento
- $L_{BI}$  : Probabilidad de que un enlace se encuentre saturado en trayectoria de humedecimiento
- $S_{WD}$  : Grado de saturación del suelo en trayectoria de secado
- $S_{WI}$  : Grado de saturación del suelo en trayectoria de humedecimiento
- $\psi$  : Succión del suelo

## 5. Resultados

### 5.1 Curva de retención experimental

Los resultados del ensayo de la curva de retención experimental en ambas trayectorias, se presentan en la Figura 11, los cuales se obtuvieron mediante la técnica de papel filtro, ASTM D 5298 – 03.

En la Figura 11 se aprecia que la curva de retención en ambas trayectoria experimenta distintos grados de saturación que van desde 0 hasta el 85%, para succiones desde 1 a 1E-06 kPa. Además se aprecia la histéresis que el suelo exhibe cuando este transita de seco a saturado, o de saturado a seco.

### Curvas de distribución porosimétrica

De igual manera se muestran los resultados de la porosimetría del suelo, obtenidos mediante la técnica de análisis de imagen, tal y como se muestra en la Figura 12.

Por medio de la Figura 12 es posible apreciar que los diámetros identificados en el suelo estudiado están entre 0.10 y 60  $\mu\text{m}$  con un diámetro de poro promedio de 15.94  $\mu\text{m}$  y una desviación estándar de 18.83  $\mu\text{m}$ , además, es posible visualizar la bimodalidad de la curva porosimétrica (característica de los suelos no saturados) en la que se presentan dos tamaños de poro muy marcado, los macroporos entre 20 y 60  $\mu\text{m}$

y los mesoporos, en este caso recibirán el nombre de sitios, con tamaños entre 2 y 10  $\mu\text{m}$ . Además se puede apreciar la existencia de las gargantas (enlaces) cuyos tamaños son inferiores a 0.3  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Finalmente, se observa que en las probetas utilizadas para el ensaye de porosimetría “por análisis de imagen” predominan los macroporos.

Curvas de retención teórica

Para predecir la curva característica se utilizó un diámetro de sitios de  $\mu S = 15.82 \mu\text{m}$  y  $\sigma S = 3.00 \mu\text{m}$  y para los enlaces de  $\mu B = 0.06 \mu\text{m}$  y  $\sigma B = 3.40 \mu\text{m}$ , con los cuales se alimentó el Modelo Probabilista. Con la información obtenida mediante éste modelo se cons-

truyó la Figura 13, en la que se presenta la curva de retención teórica en ambas trayectorias.

Como se puede apreciar en las Figuras 13 y 14, la curva característica predicha difiere de la curva característica experimental, lo anterior obedece a que la porosimetría obtenida mediante el análisis de imagen no pudo inspeccionar los tamaño de poro con diámetros inferiores a 0.1  $\mu\text{m}$ . Así, para poder ajustar la curva característica predicha con la curva característica experimental se optó por proponer distintos diámetros de sitios y enlaces, así como su desviación estándar hasta que la curva de retención obtenida resultó igual a la experimental. Para este propósito se utilizó un diámetro de sitios de  $\sigma S = 0.009 \mu\text{m}$  y  $\sigma S = 3.70 \mu\text{m}$  y para los enlaces de  $\sigma B = 0.001 \mu\text{m}$  y  $\sigma B = 1.75 \mu\text{m}$ . En la Figura 14 se presenta la curva de retención teórica

Figura 11. Curva de retención experimental

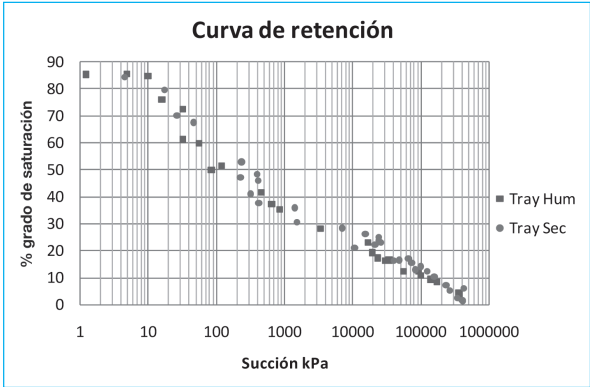


Figura 13. Curva de retención del suelo

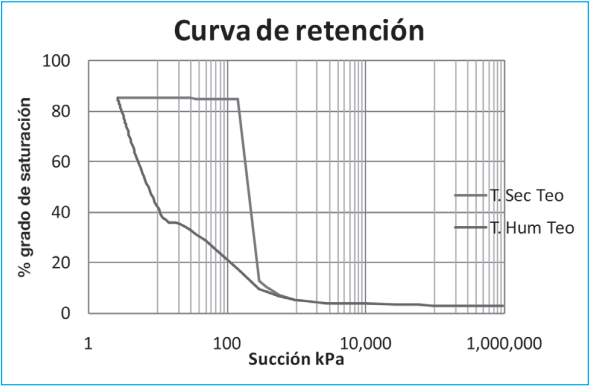


Figura 12. Distribución porosimétrica del suelo

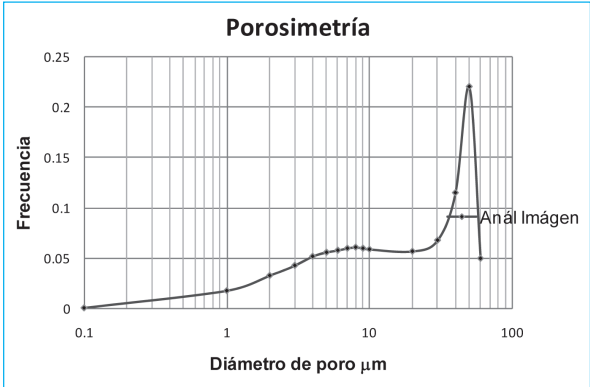
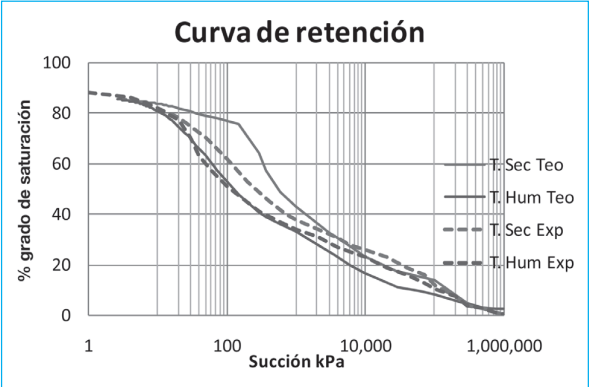


Figura 14. Curvas de retención teóricas



en ambas trayectorias, obtenida mediante el Modelo Sólido Poroso.

La curva de retención teórica, en ambas trayectorias, alcanza los grados de saturación mínimos y máximos para las mismas succiones encontradas experimentalmente. Además la aproximación de ambas curvas de retención desde succiones bajas hasta succiones elevadas fue mejor.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se presenta un procedimiento sistemático para obtener la porosimetría del suelo mediante el análisis de imagen.

Mediante la porosimetría del suelo fue posible identificar su bimodalidad o multimodalidad, y también determinar cuáles vacíos predominan.

La distribución porosimétrica obtenida por análisis de imagen presenta un espectro de diámetros reducido, en especial hacia los diámetros de los microporos. Sin embargo, esta limitante se puede corregir obteniendo micrografías a mayores ampliaciones y a la vez contar con un programa de conteo de imagen que pueda hacer su medición.

Con la porosimetría del suelo y el uso del Modelo Probabilista es posible determinar la curva de retención de arenas, limos o mezclas de ellos, en ambas trayectorias.

El Modelo Probabilista proporciona curvas características más aproximadas a las que se obtiene mediante otros modelos.

Es posible ensamblar el modelo probabilista con otros modelos para suelo no saturados.

## 7. Bibliografía

ASTM D 698-00ae1 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup>(600 kN-m/m<sup>3</sup>)).

ASTM D 4318-00 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM D 5298-03 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.

Bowles E. Joshep (1980). Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S. A.

Collins R. E. (1961). Flow of Fluid Through Porous Materials. Reinhold Publishing Corporation, New York, pp. 1-10.

Dullier F.A.I. (1992). Porous Media, "Fluid Transport and Pore Structure". Academic Press, Inc.

Fredlund, D. G., Xing, A. E. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." Can. Geotech. J., 31, 521-532.

Gary Chinga. (2002). Structural studies of LWC paper coating layers using SEM and image analysis techniques. Thesis submitted in partial fulfillment of the doctor ingenieering degree. Norwegian University of Science and Technology Department of Chemical Engineering.

Mikhail, R. Sh. and E. Robens (1983). Microstructure and Thermal Analysis of Solid Surfaces, Wiley, Chichester.

Munro, R. G. (2003). Data Evaluation Theory and Practice for Materials Properties, NIST Recommended Practice Guide, Special Publication SP 960-11, Washington, D. C., U. S. Government Printing Office.

Rojas E. (2006). Equivalent stress for unsaturated soils. Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils held in Carefree, Arizona on April 2-5.

Rouquerol, J., D. Avnir, D., C. W. Fairbridge, D. H. Everett, J. H. Haynes, N. Pernicone, J. D. F. Ramsay, K. S. W. Sing, and K. K. Unger (1994). "Recommendations for the Characterization of Porous Solids (Technical Report)", Pure and Appl. Chem. 66 1739-1758.

Scheidegger, A. E. (1974). The Physics of Flow through Porous Media. University of Toronto Press.

Sing KSW, Everett D. H, Haul R. A. W., Moscou L, Pierotti R. A., Rouquerol J., Siemienewska T. (1985). Reporting physisorption data for gas-solid systems. Pure and Applied Chemistry; 57:603-619.

Simms P. H. and Yanful E. K. (2000). Estimation of the soil-water characteristic curve of a clayey till using measured pore-size distribution. In Proceeding of the 5th International Conference on Geotechnology and Sustainable Development, Minas Gerais, Brasil, 17-23 Aug.

## 8. Semblanza de los autores

Gustavo Gallegos-Fonseca. Ingeniero Civil. Maestro en Ciencias en la línea de Mecánica de Suelos, alumno del Doctorado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la U.A.Q. Profesor en la licenciatura de ingeniería civil de la U.A.S.L.P. Z.M. desde 1993 a la fecha.

Julio César Leal-Vaca. Ingeniero Civil. Maestro en Ciencias en la línea de Mecánica de Suelos, alumno del Doctorado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la U.A.Q. Profesor en la licenciatura de ingeniería civil de la U. de G. desde 1998 a la fecha.

Eduardo Rojas González. Profesor Investigador asociado a la Facultad de Ingeniería de la U. A. Q.

Francisco Antonio Horta Rangel. Profesor Investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato.

Eugenia Inés Martínez López. Profesora investigadora de la U.A.M. Z.M. de la U.A.S.L.P.