

SWCC: Resultados experimentales en relaves de cobre y rípios

José Riquelme

SRK Consulting, Santiago, Chile

Cristian Godoy

SRK Consulting, Santiago, Chile

ABSTRACT: Para modelar el flujo al interior de estructuras geotécnicas mineras tales como pilas de lixiviación, botaderos de rípios y/o relaves, se debe considerar que los materiales constitutivos pueden encontrarse en un régimen parcialmente saturado. Un parámetro que resulta fundamental para realizar este tipo de análisis corresponde a la curva de retención de humedad (SWCC); sin embargo, su determinación experimental no es frecuente debido a limitaciones de disponibilidad de equipos y tiempo. El estado de la práctica habitual consiste en determinar estas curvas a través de estimaciones indirectas, las cuales no necesariamente han sido diseñadas para ser aplicadas en materiales especiales como los productos de procesos mineros.

El presente artículo presenta el resultado de un estudio experimental de determinación de curvas SWCC en muestras de rípios lixiviados y relaves, comparando los resultados con estimaciones obtenidas a partir de diferentes métodos. Ante la incapacidad de las estimaciones de reproducir el comportamiento de estos materiales, finalmente, se propone un enfoque alternativo para determinar la curva experimentalmente con solo tres mediciones, ahorrando tiempo y costos de ensayo.

1 INTRODUCCION

Las estructuras geotécnicas asociadas a obras mineras, en general, se encuentran en un estado de saturación parcial, por lo tanto, cualquier estudio de infiltración o de flujo al interior de estas debe considerar los aspectos de la mecánica de suelos no saturados. La curva característica suelo-agua (SWCC) o curva de retención de humedad, la cual define la capacidad del suelo de retener o liberar agua, tiene un rol fundamental para la realización de estos análisis, por lo que su determinación es vital. Al contrario de los ensayos comunes de mecánica de suelos, determinar empíricamente la SWCC puede tardar desde varios días a algunos meses, dependiendo del material; debido a esto, y a la escasa disponibilidad de equipos en laboratorios de mecánica de suelos, se suelen utilizar estimaciones a partir de parámetros más accesibles.

En el presente estudio, se presenta los resultados de una campaña experimental para la determinación de las curvas de retención de humedad a través de ensayos de placa de presión (pressure plate) de materiales provenientes de minas, en particular, relaves y rípios lixiviados, para los cuales no se dispone de abundante información en la literatura. Además, se investigó la capacidad de predicción de tres métodos de estimación distintos y, finalmente, se propone una metodología para determinar la curva de succión que permite una reducción de los tiempos y recursos asociados a los ensayos de placa de presión, proponiéndose parámetros de ejecución adecuados para cada tipo de material estudiado.

2 CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD (SWCC)

La curva de retención de humedad (SWCC) es una representación gráfica de la relación matemática entre succión dentro de un suelo con el contenido de agua o grado de saturación [1]. Originalmente fue desarrollada para estudios de suelo en el ámbito agrícola. La curva representa la capacidad de almacenamiento de agua de un material frente a diferentes estados de succión matricial. La SWCC presenta en general dos cambios fuertes de pendiente, el primer cambio es el air entry value (AEV) el cual representa la succión a la cual el suelo pasa de un estado saturado a uno parcialmente saturado y se le asocia una presión de poros negativa. El segundo cambio de

pendiente representa un estado de equilibrio, el cual está asociado a un contenido de humedad residual. La Fig. 1 muestra la forma de una curva tipo. En el ámbito agrícola es común que se ejecuten ensayos para determinar el contenido de humedad a dos valores de succión típicos 30 kPa y 1500 kPa, los cuales representan la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente respectiva respectivamente. La Fig.1 muestra la forma típica que presentan los suelos arenosos, limosos y arcillosos.

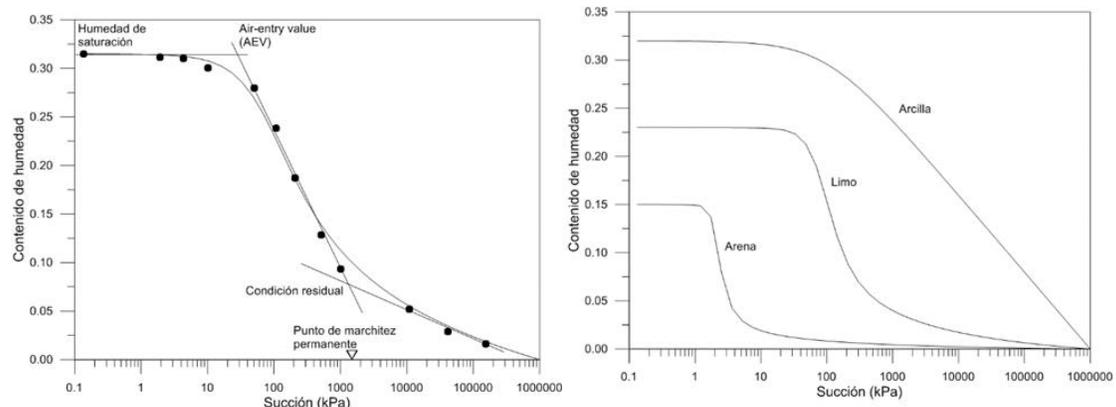


Fig. 1 –Ejemplo SWCC (izquierda). Forma típica para arenas, limos y arcillas (derecha)

3 DETERMINACIÓN EMPÍRICA CURVAS SWCC

Se determinaron las curvas empíricas de cinco muestras provenientes de tranques de relaves y nueve de botaderos de ripios, cuyo origen son faenas mineras ubicadas en el norte del país. Las propiedades básicas y distribuciones granulométricas de estos materiales se presentan en la Tabla 1 y, en las Fig. 2 y 3, respectivamente.

Tabla 1 – Propiedades materiales utilizados.

Tipo	Nombre	γ_d (t/m ³) (1)	Gs (2)	e (3)	n (4)	t_{max} (mm) (5)	% Grava	% Arena	% Limos	% Arcilla
Relave	Relave 1	1.50	2.75	0.83	0.45	0.4	0	34	45	21
	Relave 2	1.35	2.79	1.07	0.52	0.4	0	19	63	18
	Relave 3	1.82	2.93	0.61	0.38	0.4	0	33	59	8
	Relave 4	1.6	2.83	0.77	0.43	0.4	0	35	56	9
	Relave 5	1.51	2.65	0.75	0.43	2	0	36	52	12
Ripios	Ripio 1	1.96	2.79	0.42	0.30	76.2	62	26	8	4
	Ripio 2	1.84	2.79	0.52	0.34	25.4	55	30	12	3
	Ripio 3	1.75	2.79	0.59	0.37	4.8	0	67	26	7
	Ripio 4	1.60	2.79	0.74	0.43	4.8	0	67	26	7
	Ripio 5	1.59	2.72	0.71	0.41	38.1	44	43	10	3
	Ripio 6	1.50	2.66	0.77	0.44	50.8	56	28	11	5
	Ripio 7	1.49	2.62	0.76	0.43	50.8	56	27	12	5
	Ripio 8	1.46	2.66	0.82	0.45	38.1	56	26	14	4
	Ripio 9	1.47	2.62	0.79	0.44	38.1	56	30	11	3

Nota:(1) Peso Unitario Seco

(2) Gravedad específica de los sólidos

(3) Índice de vacíos

(4) Porosidad

(5) Tamaño máximo de partícula

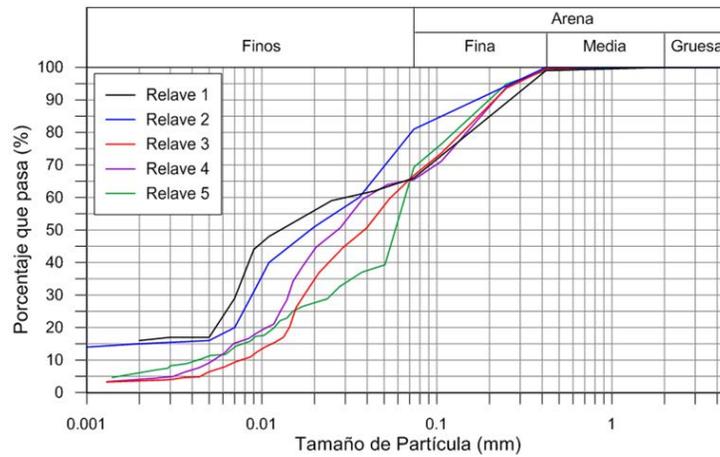


Fig. 2 – Distribución granulométrica relaves

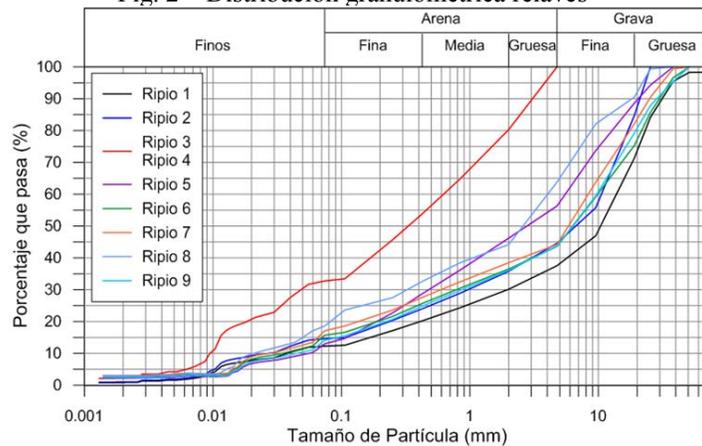


Fig. 3 – Distribución granulométrica ripios

La determinación experimental de la curva de retención de humedad se realizó a través del método de la placa de presión (pressure plate) [2], de uso común en Chile para estudios agrícolas (no así en laboratorios de mecánica de suelos). En este ensayo se colocan muestras saturadas dentro de una cámara de presión, luego se aplica succión hasta que la muestra elimine agua retenida, alcanzando un estado de equilibrio. Finalmente se determina el contenido gravimétrico de humedad por diferencia de masa húmeda y seca.

En este estudio para construir la curva SWCC en todo el espectro de succiones posibles se ejecutaron ensayos a diferentes succiones dependiendo del material. La Fig. 4 muestra la disposición de las muestras y los equipos utilizados en la ejecución del ensayo.



Fig. 4 – Equipos utilizados para determinar SWCC de forma experimental

Los resultados experimentales de los suelos ensayados en el marco de este estudio, pueden ser observados en la Fig. 5, a continuación. Es posible notar la diferencia entre los resultados obtenidos para relaves con respecto a los rипios, siguiendo los primeros la forma típica de S, mientras que los segundos presentan una forma relativamente plana.

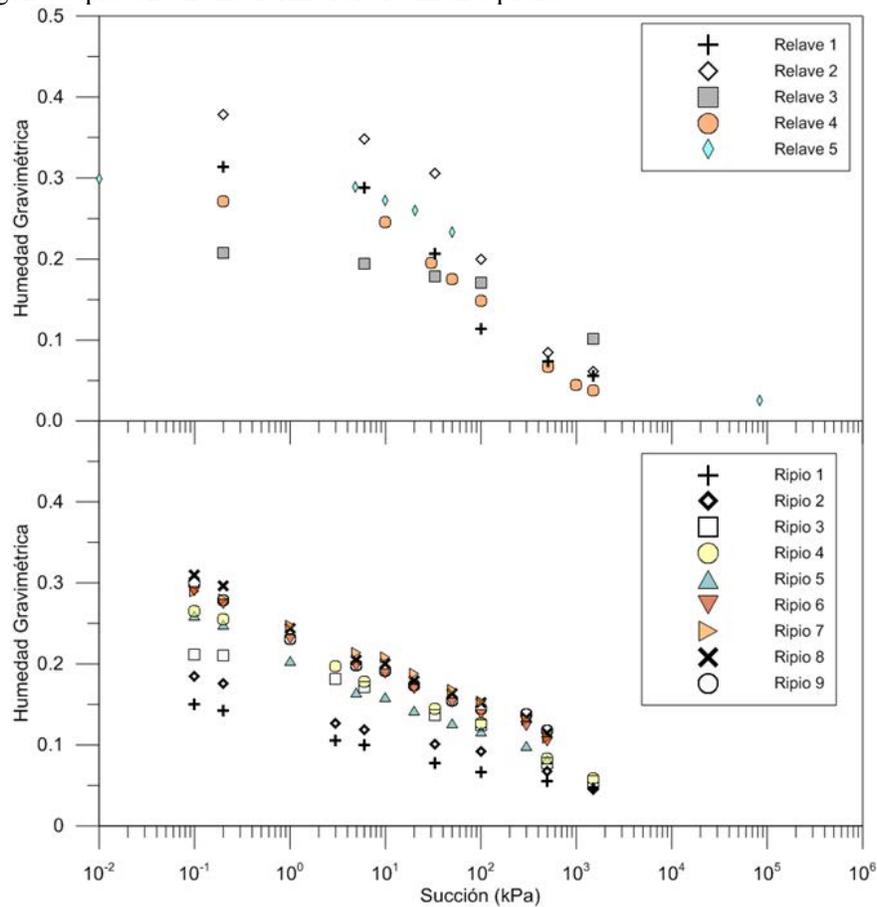


Fig. 5 – Curvas experimentales relaves (arriba) y rипios (abajo)

Con la finalidad de obtener una representación continua de la SWCC, los resultados experimentales fueron ajustados a través de los modelos paramétricos de van Genuchten [3] y de Fredlund y Xing [4].

$$w(\psi) = w_r + (w_s - w_r) \left[\frac{1}{[1 + (a_{vg} \cdot \psi)^{n_{vg}}]^{m_{vg}}} \right] \quad (1)$$

$$w(\psi) = w_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right]^{m_f}} \right] \quad (2)$$

Donde:

- $w(\psi)$ Humedad en función de la succión
- ψ Succión, capilaridad o presión de poros negativa
- w_s Humedad para el estado de saturación
- w_r Humedad residual
- $a_f, n_f, m_f, h_r, a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}$ Parámetros de ajuste de los modelos

4 COMPARACIÓN CURVAS EXPERIMENTALES CON MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE SWCC

Debido a la relativa dificultad presente en la determinación experimental de la curva SWCC, se han desarrollado diversas metodologías para estimarla a partir de algunas propiedades del material a estudiar. En el presente estudio se han considerado tres diferentes métodos de estimación, el primero corresponde al propuesto por Fredlund y Wilson [5], el cual considera principalmente propiedades granulométricas y relaciones volumen-masa, y haciendo uso de redes neuronales realiza la estimación. La segunda metodología utilizada, corresponde a la propuesta por Vereecken [6], la cual a través de un modelo de regresión determina la curva utilizando como parámetros de entrada los porcentajes de arena y de arcilla, la densidad y el contenido de carbón del material. Finalmente, se utilizó la metodología de Aubertin [7] que utiliza el método modificado de Kovacs para realizar la estimación a partir de la porosidad, densidad, índice de vacíos, D10 y D60 del material. Para la aplicación de los distintos métodos de estimación y ajuste de curvas, se utilizó el software Soilvision [8].

Para cuantificar las diferencias entre las distintas estimaciones con respecto a los datos experimentales, se recurrió al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe [9], el cual mide la calidad de ajuste entre dos modelos y varía entre $-\infty$ y 1; en este caso, se ha considerado que eficiencias sobre 0.9 son aceptables.

Para esta verificación se han incluido, además de los cinco relaves ensayados, seis relaves provenientes de la literatura correspondientes a los descritos en las referencias [7], [10] y [11], y se denominaron Relave 6 a Relave 11.

La Tabla 2 muestra un resumen de las eficiencias de cada método de estimación con respecto a los datos experimentales, es posible observar la gran variabilidad presente en cada caso, sin embargo, la estimación a través del método de Fredlund y Wilson es la que presenta valores mejores en promedio para los casos en estudio.

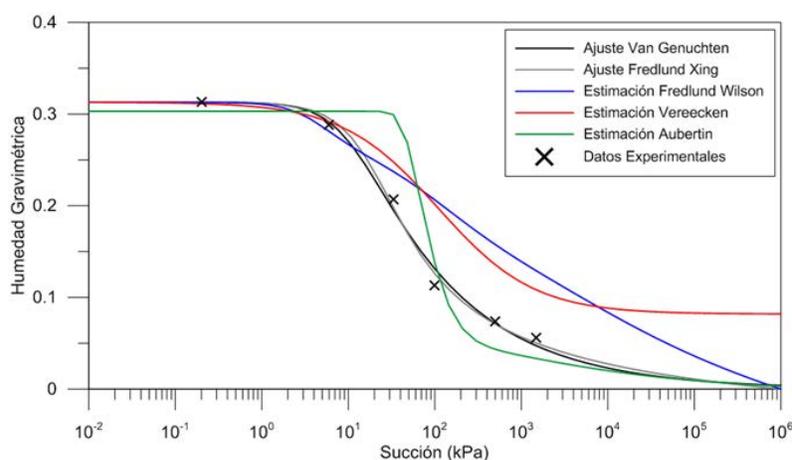


Fig. 6 – Comparación de ajustes y estimaciones con datos experimentales, Relave 1

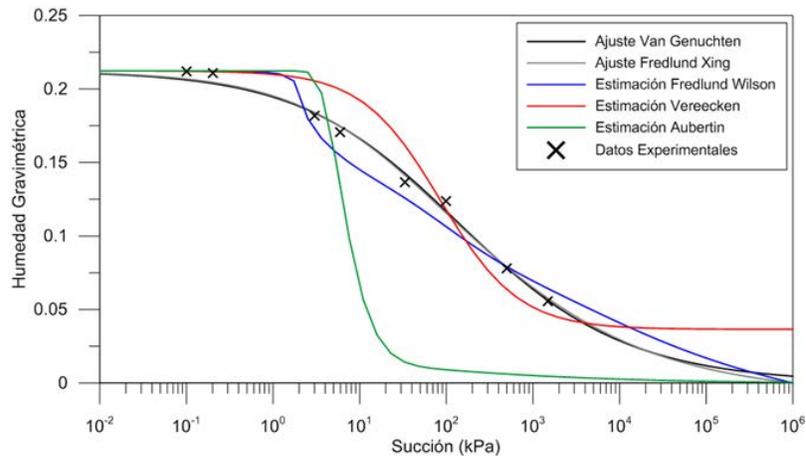


Fig. 7 – Comparación de ajustes y estimaciones con datos experimentales, Ripio 3

Tabla 2 – Eficiencia de estimación para cada método

Tipo	Nombre	Fredlund & Wilson	Vereecken	Aubertin
Relave	Relave 1	0.64	0.74	0.82
	Relave 2	0.74	0.90	0.92
	Relave 3	0.59	0.31	-5.08
	Relave 4	0.82	0.97	0.40
	Relave 5	0.93	0.94	0.51
	Relave 6	0.93	0.95	0.71
	Relave 7	0.76	0.78	-5.25
	Relave 8	0.75	-0.45	-3.72
	Relave 9	0.72	0.87	0.35
	Relave 10	0.82	0.92	-0.77
	Relave 11	0.78	0.92	0.06
Ripios	Ripio 1	0.95	-0.22	-2.30
	Ripio 2	0.86	0.26	-1.94
	Ripio 3	0.96	0.90	-0.58
	Ripio 4	0.93	0.75	-0.11
	Ripio 5	0.83	0.25	-3.04
	Ripio 6	0.79	0.33	-4.82
	Ripio 7	0.90	0.60	-6.17
	Ripio 8	0.65	0.27	-4.59
	Ripio 9	0.76	0.13	-5.62

5 ENFOQUE DE TRABAJO ALTERNATIVO

Considerando los valores obtenidos en la Tabla 2, surge la motivación para buscar nuevas alternativas que entreguen resultados similares a los experimentales, sin tener que invertir demasiado tiempo ni recursos en su ejecución. Siguiendo la filosofía anterior, se propone realizar una determinación experimental parcial de la curva de retención, complementada con un método de ajuste que permita rellenar los vacíos experimentales. En particular, se propone realizar el ensayo de placa de presión para solo tres puntos.

Los puntos que se proponen para esta metodología corresponden a una succión baja, cuya humedad asociada puede ser aproximada a la humedad de saturación del suelo; una succión alta, equivalente al punto de marchitez; y, finalmente, un punto intermedio, que en este caso sería

representado por el “air entry value” (AEV). Este último valor fue calculado tanto para el ajuste experimental de Fredlund & Xing como el de van Genuchten, los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 – Valores AEV para ajuste experimental VG y F&X

Tipo	Nombre	van Genuchten	Fredlund & Xing
		AEV (kPa)	AEV (kPa)
Relave	Relave 1	5.9	7.5
	Relave 2	12.1	13.3
	Relave 3	44.9	25.8
	Relave 4	8.5	8.6
	Relave 5	11.5	10.2
	Relave 6	2.1	3.0
	Relave 7	1.8	2.3
	Relave 8	83.2	106.7
	Relave 9	18.6	19.0
	Relave 10	25.9	21.5
	Relave 11	26.1	19.2
Ripios	Ripio 1	0.17	0.19
	Ripio 2	0.27	0.18
	Ripio 3	2.79	1.87
	Ripio 4	0.42	0.33
	Ripio 5	0.18	0.18
	Ripio 6	0.20	0.15
	Ripio 7	0.47	0.29
	Ripio 8	0.13	0.16
	Ripio 9	0.13	0.13

El AEV promedio para los relaves corresponde a 22 kPa y en los ripios a 0.5 kPa. Ajustando estos valores de succión a los típicos de laboratorio, se obtienen los valores recomendados en la Tabla 4.

Tabla 4 – Valores de succión seleccionados

Punto	Ripios	Relave
	Succión (kPa)	Succión (kPa)
1	0.1	0.1
2	1	30
3	1500	1500

Posteriormente se verificó el ajuste de van Genuchten y el ajuste de Fredlund & Xing con respecto a la curva experimental. Para los relaves ambos ajustes presentaron valores de eficiencia cercanos a 1. Para los ripios solo el ajuste de Fredlund & Xing presenta valores de eficiencia cercano a 1, mientras que van Genuchten entrega valores bajos para cuatro casos. Lo anterior se resume en la Tabla 5.

Tabla 5 – Eficiencia de ajuste para cada método

Tipo	Nombre	van Genuchten	Fredlund & Xing
Relave	Relave 1	0.99	1.00
	Relave 2	0.99	1.00
	Relave 3	0.99	1.00

	Relave 4	1.00	1.00
	Relave 5	0.99	1.00
	Relave 6	0.99	0.99
	Relave 7	0.99	1.00
	Relave 8	1.00	0.97
	Relave 9	1.00	0.99
	Relave 10	0.99	1.00
	Relave 11	0.99	1.00
Ripios	Ripio 1	0.20	1.00
	Ripio 2	0.34	0.99
	Ripio 3	1.00	1.00
	Ripio 4	0.99	0.99
	Ripio 5	1.00	1.00
	Ripio 6	0.27	1.00
	Ripio 7	0.46	0.99
	Ripio 8	0.93	1.00
	Ripio 9	0.97	1.00

A modo de ejemplo la Fig. 6 muestra el ajuste para el relave 1 y el ripio 3.

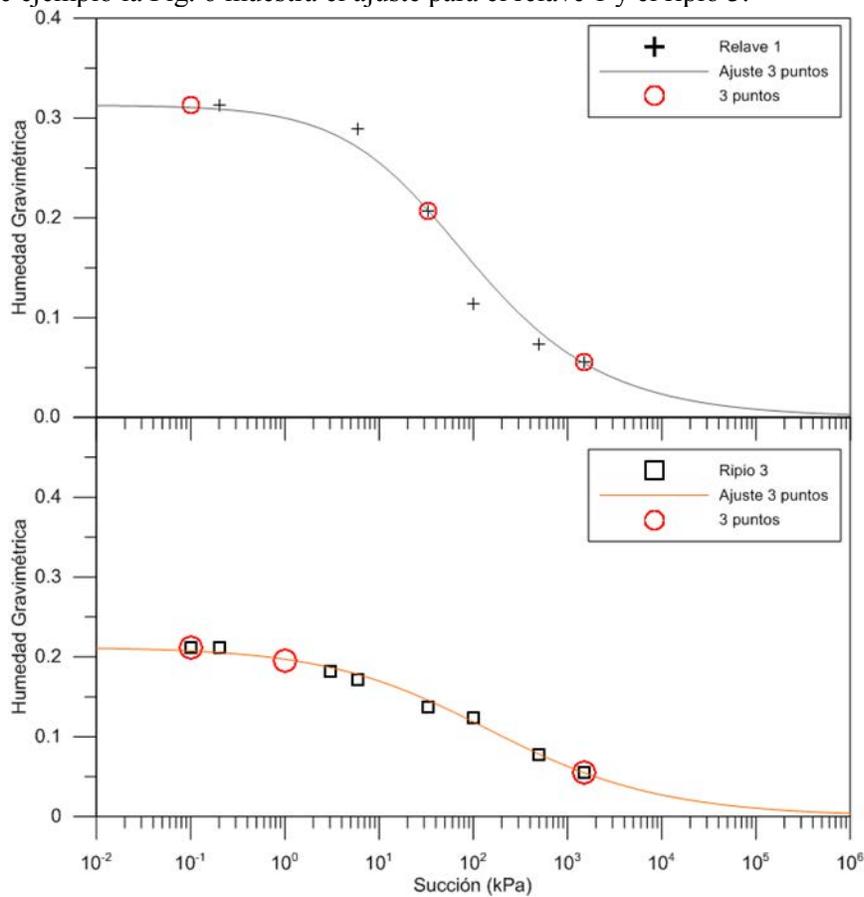


Fig. 8 – Comparación de ajustes y estimaciones con datos experimentales, Relave 1 (arriba) y Ripio 3 (abajo).

6 CONCLUSIONES

Se determinaron experimentalmente curvas de retención de humedad (SWCC) para ripios y relaves provenientes de distintas faenas mineras del país. Estas curvas pueden ser utilizadas como referencias para estudios de flujo no saturado en depósitos de relave, botaderos de ripios y pilas de lixiviación, con materiales similares.

Los resultados experimentales obtenidos fueron comparados con distintos métodos de estimación, encontrándose que ninguno representa el comportamiento de forma satisfactoria para todos los casos estudiado, de acuerdo a la eficiencia calculada. Sin embargo, la estimación de Fredlund y Wilson demuestra, en general, ser superior a las otras estudiadas.

Cuando no sea posible la determinación total de la curva de retención de humedad, se recomienda utilizar el método de ajuste con tres puntos propuesto, el cual contempla utilizar, además del punto de saturación de la muestra, los siguientes valores de succión: Para relaves 30 kPa y 1500 kPa, mientras que para ripios 1 kPa y 1500 kPa. Este enfoque alternativo entrega valores de eficiencia mayores que las estimaciones indirectas, representado una alternativa más confiable.

7 REFERENCIAS

- [1] Mahmood KR, Abdul Kareem AH. Nature of soil-water characteristic curves (SWCC) for soils from Anbar Governorate. *Anbar Journal of Engineering Sciences*,3; 2010. p. 61 – 80.
- [2] ASTM D6836. Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge; 2002.
- [3] Fredlund DG, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31; 1994.
- [4] van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44; 1980. p. 892 - 898.
- [5] Fredlund MD, Wilson GW. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 39; 2002. p. 1103 – 1117.
- [6] Vereecken H, Maes J, Feyen J, Darius P. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science* Vol. 148, No. 6; 1989. p.389 – 403.
- [7] Aubertin M, Ricard JF, Chapuis R. A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal* 35; 1998, p. 55 - 69. Qiu Y, Sego D. *Laboratory Properties of Mine Tailings*; 2000.
- [8] SoilVision Software, Version 4, SoilVision Systems Ltd., Saskatoon, SK, Canada.
- [9] Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models; Part I, A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10; 1970. p. 282–290.
- [10] Swanson D, Savci G, Danzinger G, Mohr RN, Weiskopf T. Predicting the soil-water characteristics of mine soils. *Tailings and Mine Waste*; 1999.
- [11] Qiu Y, Sego D. *Laboratory Properties of Mine Tailings*. *Canadian Geotechnical Journal* 38; 2001. p. 183 – 190.