

**ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE
EL EMPLEO DE FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA¹**

Soil water content estimation using pedotransfer functions

Carlos Bonilla M.² y José Cancino V.²

A B S T R A C T

During recent year an important number of pedotransfer functions (PFs) with the capacity to estimate soil water content based on easily measured physical and chemical soil properties have been published. In view of their relatively scarce use in Chile, a study was conducted to evaluate five of the most used PFs in an Inceptisol, a Vertisol and three Alfisols of central Chile. The water retention curves were determined experimentally and fitted to a van Genuchten function. The results using the PFs point out that the functions based only on texture, organic matter and bulk density do not allow estimations of the water retention properties with an acceptable level of precision for the selected soils. These PFs showed mean errors between +0.16 and +0.19, and mean relative errors between +106 and +310%. The accuracy of the estimations was progressively improved by including one (1500 kPa) or two (33 and 1500 kPa) known values of the water retention curve in the regression. Thus, the PF which include water content at 33 and 1500 kPa showed mean and mean relative errors in the range of -0.03 to +0.05 and -2 to +83%, respectively, and a R² coefficient equal to 0.86. Even though the results obtained are not detailed enough to conclude about the predictive accuracy of the PFs for Chilean soils, they appear to be an interesting alternative, allowing easier field measurements when characterizing soils, and also indicate the necessity to carry out more research concerning the behavior of the PFs under different soil conditions in the country.

Key words: Chilean soils, soil water properties, soil water retention models, unsaturated moisture equations.

R E S U M E N

Durante los últimos años ha surgido un número importante de funciones de pedotransferencia (FP) que permiten estimar el contenido de humedad del suelo a partir de propiedades físico-químicas de fácil medición. Frente a su escasa utilización en Chile, se llevó a cabo un estudio para evaluar cinco de las FP más utilizadas, en un Inceptisol, un Vertisol y tres Alfisoles de la zona central de Chile. Las curvas de retención se determinaron experimentalmente y se ajustaron a una relación de van Genuchten. De acuerdo a los resultados obtenidos es posible señalar que aquellas funciones basadas exclusivamente en textura, materia orgánica y densidad aparente no estiman con un grado de precisión aceptable la retención de humedad en los suelos estudiados, y muestran errores medios

¹Recepción de originales: 17 de julio de 2000.

Proyecto N° 99/01E, financiado por la Dirección de Investigación y Postgrado de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

²Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. E-mail: cbonilla@puc.cl jcancino@puc.cl

entre +0,16 y +0,19, y errores medios relativos en el rango de +106 y +310%. La exactitud de las estimaciones se incrementó progresivamente al incluir en la regresión uno (1500 kPa) o dos (33 y 1500 kPa) valores conocidos de la curva de retención de humedad. Así, la FP que utiliza los contenidos de humedad a 33 y 1500 kPa, mostró un error medio y un error medio relativo entre -0,03 y +0,05; y -2 y +83%, respectivamente, y un coeficiente R^2 de 0,86. Si bien estos resultados no son suficientes para concluir respecto a las bondades predictivas de las FP en los suelos de Chile, éstas surgen como una alternativa interesante y señalan la necesidad de seguir estudiando su comportamiento en distintas condiciones edáficas del país.

Palabras claves: suelos chilenos, propiedades hídricas del suelo, modelos de retención de agua de los suelos, ecuaciones de humedad insaturada.

INTRODUCCIÓN

La progresiva toma de conciencia en relación a la conservación de los suelos y la calidad de las aguas, junto al empleo de avanzados métodos numéricos y sistemas computacionales, han permitido el desarrollo de modelos de simulación altamente sofisticados, capaces de predecir los flujos hídricos y el transporte de solutos en suelos no saturados (Bonilla *et al.*, 1999). Estos modelos, en general, utilizan información relativa a las propiedades de retención de humedad del suelo, $\theta(h)$, donde θ es el contenido volumétrico de humedad y h es la tensión a la cual está retenida el agua en el suelo. Sin embargo, la medición directa de estas propiedades a nivel de campo o laboratorio, a menudo es de alto costo en términos de tiempo y dinero, con resultados no siempre precisos (Rawls *et al.*, 1982). Además, la variabilidad espacial propia del suelo obliga a disponer de un elevado número de muestras para representar adecuadamente un área de grandes dimensiones (Williams *et al.*, 1992). Esta situación muchas veces limita la posibilidad de verificar y validar estos parámetros (Schaap *et al.*, 1998). Por ello, una alternativa para estos estudios es el uso de las denominadas funciones de pedotransferencia (FP), que estiman las propiedades hidráulicas del suelo a través de correlaciones con datos de fácil medición, normalmente disponibles (van Genuchten y Leij, 1992).

Durante los últimos años se han desarrollado diversas FP, basadas en distintas propiedades del

suelo. La mayoría de ellas establece un análisis de regresión múltiple entre el contenido de humedad a una tensión dada y la textura, densidad aparente y contenido de materia orgánica del suelo (Gupta y Larson, 1979; Rawls *et al.*, 1982, 1983), o en la utilización de uno o más puntos medidos de la curva de retención de humedad, ya sea a 33 kPa o a 1500 kPa (Ahuja *et al.*, 1985; Rawls *et al.*, 1982).

En particular, y por su empleo en los grandes modelos hidrológicos y de calidad de agua, tales como EPA (Carsel y Parish, 1988), OPUS (Smith, 1992) y WEPP (Flanagan y Livingston, 1995), las ecuaciones de regresión desarrolladas por Rawls *et al.* (1982, 1983) se han hecho ampliamente conocidas. Estas ecuaciones se basan en descripciones provenientes de 2.543 horizontes de 500 suelos de los Estados Unidos.

Por otra parte, existen pocos estudios que comparen los distintos métodos empleados para estimar las propiedades de retención de humedad de los suelos. Si bien Ahuja *et al.* (1985) presentaron una comparación de los modelos de Rawls *et al.* (1982, 1983), es un hecho que se requieren más evaluaciones con diferentes tipos de suelos (Williams *et al.*, 1992). Debido a esto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad predictiva de las FP propuestas por Rawls *et al.* (1982, 1983) y Gupta y Larson (1979) empleando un nuevo conjunto de datos, proveniente de mediciones experimentales realizadas con cinco suelos de la zona central de Chile.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar la precisión con la cual estiman el contenido de humedad del suelo las distintas FP, se seleccionaron cinco suelos de la zona central de Chile. A cada suelo se le determinaron experimentalmente sus propiedades físico-químicas y los parámetros de la curva de retención de humedad propuesta por van Genuchten (1980), para luego comparar los valores medidos experimentalmente, con aquellos obtenidos empleando las FP. La metodología utilizada se describe a continuación.

Suelos empleados

Se seleccionaron cinco suelos. El primero corresponde a un Inceptisol, de la serie Maipo (33°30' lat. Sur, 70°37' long. Oeste). En términos espaciales, la serie Maipo ocupa una proporción importante de la Provincia de Santiago, es un suelo aluvial depositado en planos o terrazas recientes, formado por sedimentos finos a medios, ocasionalmente sobre gravas de composición mixta. Presenta un buen drenaje, tanto externo como interno. En su horizonte superficial presenta una proporción uniforme entre arena, limo y arcilla, clasificándose de esta forma como un suelo franco.

El segundo suelo empleado corresponde a un Vertisol de origen lacustre obtenido de la zona de Chicureo (33°15' lat. Sur, 70°45' long. Oeste), perteneciente a la serie de suelo del mismo nombre. Se ubica al sur de la cuesta El Durazno, Provincia de Santiago, y ocupa un área local dentro de la Provincia. Es un suelo de posición baja a intermedia, con una topografía plana a ondulada, ocupando planos depositacionales o pendientes de piedmont, constituido de materiales heterogéneos depositados en algunas áreas sobre gravas con o sin limo como matriz. En su horizonte superficial presenta un tipo de textura moderadamente fina, lo que permite clasificarlo como arcillo franco.

El tercer suelo corresponde a un Alfisol de origen aluvial y materiales varios, perteneciente al tipo terraza marina (33°25' lat. Sur, 71°35' long. Oeste), frecuentemente encontrado en zonas de lomaje del secano costero de la zona central de Chile. Es un suelo aluvial y de descomposición proveniente de rocas graníticas, constituyendo suelos en posición baja, de topografía plana a ondulada, situado en planos depositacionales o piedmont. El drenaje externo es rápido y el interno es moderado. En términos texturales corresponde a un suelo areno franco, ya que su horizonte superficial posee un alto contenido de arena y materiales gruesos en general.

El cuarto suelo seleccionado es un Alfisol, obtenido de la zona de Curacaví (33°27' lat. Sur, 71°10' long. Oeste), perteneciente a la serie Cuesta Vieja. Es un suelo derivado de sedimentos graníticos aluvio coluviales, profundo y muy estratificado, de posición de piedmont (cono de deyección). De textura areno franco a franco arcillo arenosa en superficie. Presenta abundante grava y clastos angulares de hasta 10 cm de diámetro. El drenaje es bueno, permeabilidad moderada y escurrimiento superficial rápido.

Finalmente, el quinto suelo empleado fue otro Alfisol, el cual se obtuvo de la localidad de Pumanque (34°38' lat. Sur, 71°37' long. Oeste). Este suelo granítico pertenece a la serie Constitución, que ocupa una franja costera que se extiende desde la Provincia de Colchagua hasta el norte de la Provincia de Concepción. Se ubica en una posición intermedia alta con una topografía ondulada a quebrada y montañosa, constituyendo planos remanentes, compuesto de rocas metamórficas del tipo micaesquisto descompuesto, y algunas veces se puede encontrar asociado con rocas sedimentarias de composición mixta. Presenta un tipo de textura media (areno arcillo franco), una fase moderadamente pedregosa, una fase moderadamente gravosa, una fase de erosión severa y una fase moderadamente profunda.

Mediciones experimentales

Del horizonte superior de cada suelo se tomaron tres muestras (5 suelos, con 3 repeticiones en cada caso). A cada muestra se le midió en condiciones de laboratorio el porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica, además de la densidad aparente y retención de humedad a 33 y 1500 kPa. La textura de los suelos se determinó por el método del hidrómetro. El contenido de materia orgánica se midió de acuerdo al método del ácido crómico o de Walkley y Black (Jackson, 1964). Los contenidos de humedad a 33 y 1500 kPa se midieron en olla de presión.

La curva hídrica se construyó por diferencia de peso entre el valor registrado a saturación y aquél medido para distintos niveles de tensión, en un proceso de secado a temperatura ambiente. Con este fin, se dispuso cada muestra de 2,5 kg de suelo en un contenedor plástico (15 contenedores en total). En el centro de cada contenedor se ubicó un sensor de humedad de suelo del tipo bloque de yeso protegido (tipo Watermark, Irrometer Co. Inc., Riverside, California, USA), el cual posee una resistencia eléctrica que permite medir tensiones entre 0 y 200 kPa, con un grado de precisión mayor que el obtenido con otros tipos de bloques de resistencia eléctrica (Spaans y Baker, 1992). Una vez saturada en agua cada muestra, la curva hídrica se construyó calculando diariamente la diferencia de peso entre el valor registrado a saturación y aquél medido para distintos niveles de tensión.

Posteriormente, utilizando los valores de retención de humedad obtenidos para cada una de las 15 muestras se procedió a estimar los parámetros de la relación de van Genuchten (1980), que se presenta en la Ecuación 1.

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

donde θ_r es el contenido de humedad residual, que corresponde al agua no extractable mediante

fuerzas capilares, θ_s es el contenido de humedad a saturación, α y n son parámetros asociados a la forma de la curva, y $m = 1 - 1/n$. Los parámetros θ_r , α y n se calcularon empleando una función objetivo de mínimos cuadrados con las restricciones sugeridas por Schaap *et al.* (1998): $0,0 \leq \theta_r \leq 0,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; $0,0001 \leq \alpha \leq 1,000 \text{ cm}^{-1}$, y $1,001 \leq n \leq 10$. Una vez obtenidos los parámetros de la Ecuación 1, se generaron los valores de contenido de humedad estimados para cada una de las tensiones empleadas por las correspondientes FP (4, 7, 10, 20, 33, 60, 100 y 200 kPa).

Funciones de pedotransferencia utilizadas

Entre las más conocidas y utilizadas, se seleccionaron cinco FP. Éstas se pueden agrupar en aquellas que no emplean como variable explicativa valores conocidos de la relación $h-\theta$, aquellas que emplean un valor conocido, y por último, las que consideran dos valores conocidos de la relación $h-\theta$. De acuerdo a esto, la totalidad de las funciones de transferencia evaluadas se pueden representar por la Ecuación 2.

$$\theta_{x \text{ ext}} = a + b \text{ arena (\%)} + c \text{ limo (\%)} + d \text{ arcilla (\%)} + f \text{ densidad aparente (g/cm}^3\text{)} + g \theta_{33} + i \theta_{1500} \quad (2)$$

donde $\theta_{x \text{ est}}$ es el contenido de humedad ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) estimado para una tensión dada (x), y a , b , c , d , e , f , g e i son los coeficientes de regresión asociados a cada una de las variables explicativas consideradas en la FP seleccionada. En el Cuadro 1 se indican los valores propuestos por Rawls *et al.* (1982, 1983) y Gupta y Larson (1979) para cada uno de estos coeficientes. Las características de cada una de las FP seleccionadas se describen a continuación.

a) Funciones que no utilizan valores conocidos de la relación $h-\theta$

En este caso se evaluaron tres FP, que sólo utilizan como variables explicativas el contenido de materia orgánica, la densidad aparente y la

textura. La primera de estas funciones, FP1 (Rawls *et al.*, 1982), incluye en la ecuación sólo aquellas variables que tienen una contribución significativa a la suma de los cuadrados de la

regresión, mientras que la segunda función, FP2 (Rawls *et al.*, 1983), incorpora todas las variables independientemente de su nivel de significancia. La tercera función, FP3 (Gupta y Larson, 1979),

Cuadro 1. Parámetros asociados a las funciones de pedotransferencia evaluadas
Table 1. Parameters associated with the evaluated pedotransfer functions

Función de pedotransferencia	Tensión (kPa)	Intercepto	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	θ_{33} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{33} (cm ³ cm ⁻³)	R ²
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>i</i>	
1 Rawls <i>et al.</i> (1982)	10	0,4118	-0,0030		0,0023	0,0317				0,66
	20	0,3121	-0,0024		0,0032	0,0314				0,74
	33	0,2576	-0,0020		0,0036	0,0299				0,76
	60	0,2065	-0,0016		0,0040	0,0275				0,76
	100	0,0349		0,0014	0,0055	0,0251				0,76
	200	0,0281		0,0011	0,0054	0,0200				0,74
2 Rawls <i>et al.</i> (1983)	20	0,4180	-0,0021		0,0035	0,0232	-0,0859			0,76
	33	0,3486	-0,0018		0,0039	0,0228	-0,0738			0,77
	60	0,2819	-0,0014		0,0042	0,0216	-0,0612			0,77
	100	0,2352	-0,0012		0,0043	0,0202	-0,0517			0,76
	200	0,1837	-0,0009		0,0044	0,0181	-0,0407			0,74
3 Gupta y Larson (1979)	10		0,005018	0,008548	0,008833	0,004966	-0,24230			0,92
	33		0,003075	0,005886	0,008039	0,002208	-0,14340			0,92
	60		0,002181	0,004557	0,007557	0,002191	-0,09276			0,92
	100		0,001563	0,003620	0,007154	0,002388	-0,05759			0,94
4 Rawls <i>et al.</i> (1982)	4	0,6275	-0,0041			0,0239			-0,08	0,32
	7	0,4829	-0,0035			0,0263			0,25	0,55
	10	0,4103	-0,0031			0,0260			0,41	0,66
	20	0,3000	-0,0024			0,0235			0,61	0,79
	10	0,2391	-0,0019			0,0210			0,72	0,85
	60	0,1814	-0,0015			0,0178			0,80	0,88
	100	0,1417	-0,0012			0,0151			0,85	0,92
200	0,0986	-0,0009			0,0116			0,90	0,94	
5 Rawls <i>et al.</i> (1982)	4	0,1829				-0,0246	-0,0376	1,89	-1,38	0,59
	7	0,8888	-0,0003			-0,0107		1,53	-0,81	0,83
	10	0,0619	-0,0002			-0,0067		1,34	-0,51	0,90
	20	0,0319	-0,0002					1,01	-0,06	0,98
	60	0,0136					-0,0091	0,66	0,39	0,98
	100	-0,0034				0,0022		0,52	0,54	0,98
200	-0,0043				0,0026		0,36	0,69	0,98	

$$\theta_{x\ est} = a + b \text{ arena (\%)} + c \text{ limo (\%)} + d \text{ arcilla (\%)} + e \text{ materia orgánica (\%)} + f \text{ densidad aparente (g cm}^{-3}\text{)} + g \theta_{33} + i \theta_{1500}$$

$\theta_{x\ est}$: contenido de humedad estimado para una tensión dada (x).

θ_{33} : contenido de humedad del suelo a 33 kPa.

θ_{1500} : contenido de humedad del suelo a 1500 kPa.

a, b, c, d, e, f, g e i : coeficientes de regresión asociados a cada variable explicativa considerada en la función de pedotransferencia correspondiente.

a diferencia de los dos anteriores, no define un intercepto para la curva.

b) Funciones que utilizan un valor conocido de la relación $h-\theta$

La FP evaluada, FP4 (Rawls *et al.*, 1982), considera que el contenido de humedad para un nivel de tensión determinado es función del contenido de humedad del suelo medido a 1500 kPa, además del contenido de arena y materia orgánica.

c) Funciones que utilizan dos valores conocidos de la relación $h-\theta$

La última FP empleada, FP5 (Rawls *et al.*, 1982), utiliza como variables explicativas los contenidos de humedad del suelo a 33 y 1500 kPa, además de la densidad aparente y los contenidos de arena y materia orgánica.

Con el objetivo de evaluar la bondad de ajuste de las estimaciones obtenidas con las distintas FP y a la vez establecer una comparación directa con los resultados presentados en los trabajos de Rawls *et al.* (1982), Ahuja *et al.* (1985), y Williams *et al.* (1992), se calculó el error medio, el error medio relativo y la desviación estándar de los errores. Además, a fin de complementar el análisis y abordar las limitaciones que presenta cada uno de estos indicadores por separado, también se calculó el coeficiente R^2 y se realizó un análisis gráfico mediante la línea 1:1 (Loague y Green, 1991).

En particular, el error medio (E) se calculó según la Ecuación 3.

$$E = \frac{1}{n} \sum \theta_{x\text{ est}} - \theta_{x\text{ med}} \quad (3)$$

donde $\theta_{x\text{ est}}$ y $\theta_{x\text{ med}}$ son los contenidos de humedad estimados y medidos, respectivamente, y n es el número total de muestras empleadas. En tanto, el error medio relativo fue calculado utilizando la Ecuación 4.

$$ER = \frac{1}{n} \sum \frac{\theta_{x\text{ est}} - \theta_{x\text{ med}}}{\theta_{x\text{ med}}} \quad (4)$$

De acuerdo a las Ecuaciones 3 y 4, el error medio se puede interpretar como la "media del error de estimación" o "sesgo" del método utilizado, mientras que la desviación estándar del error corresponde a la "exactitud" del método.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características físicas y químicas de cada uno de los suelos empleados se presentan en el Cuadro 2. Como se observa en dicho Cuadro, el porcentaje de arena en las muestras empleadas osciló entre 34 y 66%; el limo, entre 16 y 39%; y la arcilla, entre 17 y 32%. El contenido de materia orgánica alcanzó valores normales, variando entre 1,2 y 3,0%. Una situación similar se registró con la densidad aparente, cuyos valores se encontraron entre 1,3 y 1,6 g cm⁻³. Además, los contenidos de humedad a saturación en la totalidad de las muestras, bordearon los 0,4 cm³ cm⁻³.

Curvas de retención de humedad

Las curvas de retención de humedad de cada uno de los suelos empleados se presentan en la Figura 1, y se pueden diferenciar claramente dos grupos de suelos de acuerdo a sus propiedades de retención. El primero está constituido por los suelos del valle del Maipo y Chicureo (Figuras 1a y 1b), los cuales exhiben una gran capacidad de retención de agua para tensiones cercanas a cero, con valores del orden de 0,35 y 0,30 cm³ cm⁻³, respectivamente. El segundo grupo lo constituyen los suelos de terraza marina, secano costero y Curacaví (Figuras 1c, 1d y 1e), en cuyo caso los valores de retención de humedad, obtenidos experimentalmente para tensiones cercanas a cero, bordean los 0,20 cm³ cm⁻³.

El ajuste de la función de van Genuchten se realizó sobre la serie completa de valores experimentales obtenidos para cada suelo, es decir, aquellos provenientes de las tres repeticiones.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de los suelos seleccionados.**Table 2.** Physical and chemical properties of the selected soils.

Suelo	Textura (%)			Materia orgánica (%)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_{33} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{1500} (cm ³ cm ⁻³)
	Arena	Limo	Arcilla					
Valle del Maipo	36,0	39,4	24,6	2,98	1,27	0,448	0,202	0,094
Chicureo	34,0	34,0	32,0	1,60	1,26	0,424	0,187	0,130
Terraza marina	66,0	17,2	16,8	1,75	1,39	0,413	0,064	0,048
Secano costero	54,6	22,9	22,6	1,24	1,51	0,364	0,106	0,070
Curacaví	66,0	16,0	18,0	1,37	1,63	0,363	0,088	0,057

θ_s : contenido de humedad del suelo a saturación.

θ_{33} : contenido de humedad del suelo a 33 kPa.

θ_{1500} : contenido de humedad del suelo a 1500 kPa.

Los parámetros calculados se indican en el Cuadro 3. Los valores del término n oscilaron entre 1,37 y 1,69, en tanto que α se ajustó al intervalo 0,33-1,00 (cm⁻¹), y m se observó en el rango 0,27-0,41. Adicionalmente, la estimación del contenido de humedad residual, θ_r , mostró casi en la totalidad de los casos valores iguales a cero. Por último, el contenido de humedad a saturación, θ_s , mostró magnitudes cercanas a los 0,40 cm³ cm⁻³.

Tal como se observa en la Figura 1, en términos visuales el ajuste de las curvas estimadas en los cinco suelos fue adecuado, con coeficientes R² entre 0,93 y 0,98. Posteriormente, estas curvas se emplearon para estimar los contenidos de humedad requeridos para la comparación de las diversas FP evaluadas.

Funciones de pedotransferencia

En el Cuadro 4 se presenta el error medio, el error medio relativo y las respectivas desviaciones estándar obtenidas con cada una de las FP en estudio. Además, en la Figura 2 se muestra gráficamente la correlación entre los contenidos de humedad determinados experimentalmente y aquellos estimados con las FP. Los resultados se analizan a continuación.

a) Funciones que no utilizan valores conocidos de la relación h- θ

Como se observa en la Figura 2a, los valores medidos experimentalmente y aquellos estimados al emplear la FP1 (Rawls *et al.*, 1982) no muestran un buen ajuste en el rango 0-200 kPa. En la totalidad de los casos se sobrestima el contenido de humedad para una tensión dada. El error medio para el rango de tensiones empleado varió entre +0,16 y +0,19 (Cuadro 4). La dispersión de los errores locales alrededor del error medio (desviación estándar) fue cercana a $\pm 0,026$. El error medio relativo se ubicó en el rango de +120 a +310%, con una dispersión en torno al valor medio en el rango de ± 45 a $\pm 79\%$. La magnitud del error medio relativo se incrementa en forma directa con los valores de tensión, debido principalmente a que si bien el error medio absoluto no experimenta un cambio tan significativo, el cálculo del error medio relativo se hace sobre la base de un contenido de humedad cada vez más pequeño, razón por la cual el cociente se incrementa para valores de tensión superiores. En otras palabras, la FP1 estima los contenidos de humedad del suelo con errores medios similares a lo largo de la curva, pero en términos relativos éstos se hacen mayores para tensiones altas. Los errores medios calculados en este estudio son mayores al menos en un orden de magnitud a los reportados

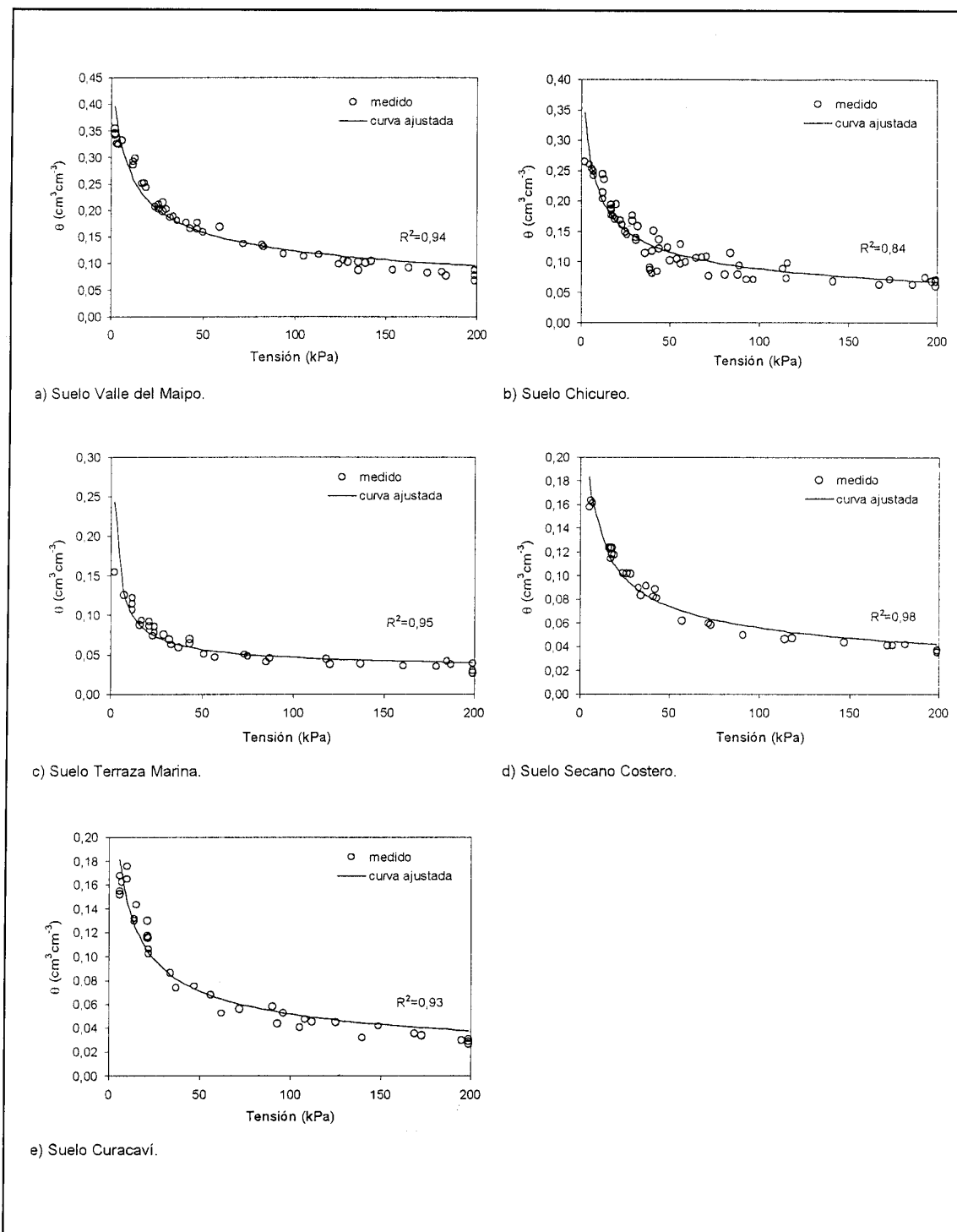


Figura 1. Contenidos de humedad determinados experimentalmente y curva ajustada de acuerdo a la Ecuación 1 (van Genuchten, 1980).

Figure 1. Experimentally determined water contents and fitted curve according to Equation 1 (van Genuchten, 1980).

Cuadro 3. Parámetros hidrodinámicos de los suelos seleccionados**Table 3.** Hydrodynamic parameters of the selected soils

Parámetro	Valle del Maipo	Chicureo	Terraza marina	Secano costero	Curacaví
n	1,369	1,399	1,686	1,408	1,461
α (cm ⁻¹)	0,334	0,518	1,000	1,000	0,698
θ_r	0,000	0,000	0,030	0,000	0,000
θ_s	0,448	0,424	0,413	0,364	0,363
m	0,270	0,285	0,407	0,290	0,315

n , α y m : parámetros asociados a la función de van Genuchten (Ecuación 1).

θ_r : contenido residual de humedad del suelo.

θ_s : contenido de humedad del suelo a saturación.

anteriormente por Ahuja *et al.* (1985) y Williams *et al.* (1992) utilizando este mismo método. Adicionalmente, los coeficientes R^2 presentados por Rawls *et al.* (1982), dependiendo de la tensión, oscilan entre los 0,65 y los 0,76. En este caso, el coeficiente R^2 asociado al modelo ajustado al conjunto de datos y considerando todas las tensiones, alcanzó un valor de 0,91.

Con respecto a la FP2 (Rawls *et al.*, 1983), si bien difiere levemente de la FP1 en términos de requerimientos de información pues incorpora la densidad aparente como variable explicativa, permite reducir el error medio en la totalidad de los casos (Cuadro 4), aun cuando la dispersión de los datos para cada uno de los cinco niveles de tensión considerados fue mayor (Figura 2b). El error medio relativo se ubicó en el rango de +145 a 304%, con una desviación en torno al valor medio que varió entre ± 56 y $\pm 74\%$, la cual se incrementa con tensiones mayores.

De acuerdo a las estimaciones presentadas por Rawls *et al.* (1983), el coeficiente R^2 para la FP2 presenta valores que dependiendo de la tensión, oscilan entre 0,74 y 0,77. En este caso, el modelo se ajustó al conjunto de datos considerando todas las tensiones, con un coeficiente R^2 de 0,84; es decir 0,07 unidades inferior al obtenido con la FP1. Sin embargo, es necesario señalar que aun cuando el R^2 de la FP2 es mejor que el obtenido al emplear la FP1, la sobrestimación

de los contenidos de humedad es una característica que permanece.

Las estimaciones obtenidas empleando la FP3 (Gupta y Larson, 1979) resultan menos precisas que las obtenidas con la FP1 (Figura 2c). No sólo se sobrestima el contenido de humedad en el rango 0-200 kPa, sino que también los resultados presentan una dispersión mayor que la observada al emplear la FP1. Específicamente, el error medio osciló entre +0,17 y +0,19 (Cuadro 4). La desviación estándar de los errores individuales fue cercana a los $\pm 0,04$ para la totalidad de las tensiones, casi el doble de la obtenida con la FP1. El error medio relativo tuvo un rango de +106 a +285%, con una dispersión alrededor del valor medio que osciló entre ± 47 y $\pm 80\%$. Al igual que lo observado al emplear la FP1 y la FP2, la magnitud del error medio relativo aumenta en forma directa con la tensión, ya que si bien el error medio absoluto no experimenta un cambio significativo, el valor del contenido de humedad sobre el cual se calcula del error medio relativo es cada vez menor a medida que se incrementa la magnitud de la tensión. Asimismo, los errores medios son mayores que los reportados anteriormente por Ahuja *et al.* (1985) y Williams *et al.* (1992) utilizando el mismo método. Además, los coeficientes R^2 obtenidos en el trabajo de Gupta y Larson (1979), fueron del orden de 0,92; en tanto que la FP3 presentó un coeficiente R^2 igual a 0,73.

Cuadro 4. Valores del error medio, error medio relativo y desviación estándar, obtenidos al utilizar las funciones de pedotransferencia evaluadas**Table 4.** Mean error, mean relative error and standard deviation obtained when using the evaluated pedotransfer functions

Tensión (kPa)	Error	Función de pedotransferencia				
		1 Rawls <i>et al.</i> (1982)	2 Rawls <i>et al.</i> (1983)	3 Gupta y Larson (1979)	4 Rawls <i>et al.</i> (1982)	5 Rawls <i>et al.</i> (1982)
4	Medio				0,209 (0,025)	-0,025 (0,016)
	Medio relativo				0,918 (0,301)	-0,104 (0,074)
7	Medio				0,169 (0,025)	
	Medio relativo				0,923 (0,345)	
10	Medio	0,191 (0,025)		0,170 (0,050)	0,154 (0,025)	-0,004 (0,015)
	Medio relativo	1,201 (0,451)		1,058 (0,468)	0,971 (0,375)	-0,028 (0,087)
20	Medio	0,183 (0,025)	0,175 (0,034)		0,132 (0,025)	0,012 (0,018)
	Medio relativo	1,517 (0,556)	1,447 (0,559)		1,097 (0,413)	0,085 (0,116)
33	Medio	0,179 (0,025)	0,171 (0,033)	0,184 (0,043)	0,126 (0,025)	
	Medio relativo	1,816 (0,640)	1,717 (0,625)	1,840 (0,677)	1,267 (0,452)	
60	Medio	0,177 (0,026)	0,170 (0,032)	0,187 (0,040)	0,112 (0,026)	0,029 (0,024)
	Medio relativo	2,229 (0,685)	2,133 (0,670)	2,343 (0,735)	1,398 (0,420)	0,322 (0,206)
100	Medio	0,169 (0,028)	0,162 (0,032)	0,187 (0,038)	0,102 (0,027)	0,038 (0,025)
	Medio relativo	2,565 (0,698)	2,452 (0,671)	2,845 (0,804)	1,535 (0,409)	0,529 (0,261)
200	Medio	0,159 (0,029)	0,157 (0,032)		0,089 (0,029)	0,046 (0,027)
	Medio relativo	3,102 (0,787)	3,035 (0,742)		1,692 (0,457)	0,834 (0,393)

(): desviación estándar.

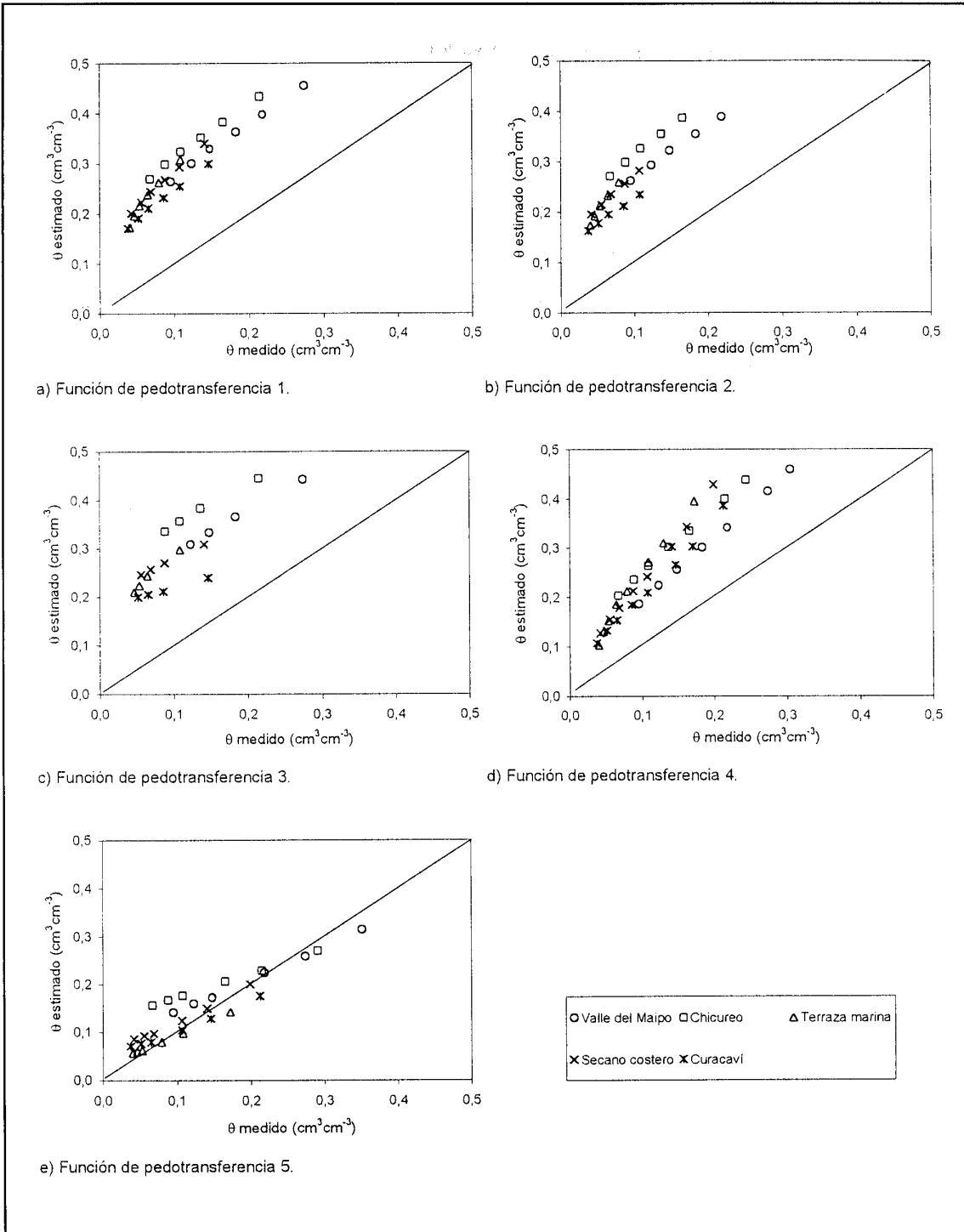


Figura 2. Correlación entre los contenidos de humedad medidos y aquéllos estimados utilizando las funciones de pedotransferencia evaluadas.

Figure 2. Correlation between measured and estimated water content utilizing the evaluated pedotransfer functions.

b) Funciones que utilizan un valor conocido de la relación $h-\theta$

Cuando en la FP se incluye el valor del contenido de humedad a 1500 kPa como una variable explicativa adicional (FP4), la exactitud de las estimaciones mejora notoriamente en relación a cualquiera de los métodos anteriores. Tal como se observa en la Figura 2d, el ajuste entre los valores de contenido de humedad medidos y los estimados se acerca más a la línea 1:1, particularmente para contenidos de humedad bajos. En este caso, el error medio fue mayor para la tensión de 4 kPa, y disminuye consistentemente hasta los 200 kPa, con un valor de 0,09 (Cuadro 4), con cifras equivalentes a la mitad de las obtenidas empleando las FP1 o FP2. Por otra parte, los coeficientes R^2 presentados por Rawls *et al.* (1982), dependiendo de la tensión, oscilan entre 0,32 y 0,94. En este caso, el modelo se ajustó al conjunto de datos con un coeficiente R^2 igual a 0,93.

c) Funciones que utilizan dos valores conocidos de la relación $h-\theta$

El empleo de la FP5, la cual incorpora los contenidos de humedad a 33 y 1500 kPa como variables explicativas, permitió mejorar significativamente las estimaciones logradas con cualquiera de las FP anteriores (Figura 2e). A diferencia del resto de las FP evaluadas, la FP5 logra una distribución más uniforme alrededor de la línea 1:1. El error medio y el error medio relativo se redujeron considerablemente, oscilando el primero entre $-0,03$ y $+0,05$ (Cuadro 4), y el segundo entre un -2 y un $+83\%$. Esto produjo que la magnitud de la desviación estándar de los errores medios fuese del orden de 0,02, y que la de los errores medios relativos se ubicase en el rango $+0,07$ a $+0,39$. En relación con los valores reportados anteriormente por Ahuja *et al.* (1985) y Williams *et al.* (1992) utilizando el mismo método, los errores absolutos calculados resultaron ser similares, igual situación se observó al comparar los errores relativos entre las mediciones experimentales y aquellas estimadas con la FP5.

En términos del coeficiente R^2 , el método se ajustó a los resultados experimentales con un valor de 0,86; cifra que se encuentra dentro del rango 0,77 y 0,99, reportado por Rawls *et al.* (1982).

En este último caso es necesario señalar que el auspicioso resultado obtenido con la FP5 se explica en gran medida debido al empleo de mayor número de variables explicativas, y particularmente aquellas asociadas a los contenidos de humedad en los extremos de la curva, lo que permite realizar las estimaciones en forma más exacta a través de un proceso de interpolación. Sin embargo, en algunas situaciones, la falta de información respecto a estos dos valores de retención puede limitar su empleo.

CONCLUSIONES

En este estudio se utilizaron cinco funciones de pedotransferencia para predecir las propiedades de retención de humedad de cinco suelos de la zona central de Chile. Las funciones utilizadas se pueden agrupar en aquellas que no emplean valores conocidos de la curva de retención de humedad y aquellas que utilizan uno o dos valores conocidos de la curva.

De acuerdo a la experiencia desarrollada, es posible señalar que las funciones basadas exclusivamente en la textura, materia orgánica y densidad no permiten estimar con un grado de exactitud aceptable el contenido de humedad del suelo. Las FP evaluadas exhiben errores medios que varían entre $+0,16$ y $+0,19$, y errores medios relativos en el rango de $+106$ y $+310\%$. Sin embargo, las estimaciones mejoran al incluir como variable explicativa adicional el contenido de humedad a 1500 kPa, reduciendo el error medio relativo a un valor cercano al 100% . En último término, la exactitud de la estimación de humedad mejoró considerablemente al utilizar como variables explicativas adicionales los contenidos de humedad a 33 y 1500 kPa, alcanzando errores medios en el rango $-0,03$ y $+0,05$, errores medios relativos entre -2 y $+83\%$, y un coeficiente R^2 de

0.86; valores similares a los encontrados por otros autores.

Por último, y de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, las funciones de pedotransferencia surgen como una alternativa interesante para la caracterización hidrodinámica de suelos,

particularmente para el empleo de modelos de simulación hidrológica y transporte de contaminantes a nivel de grandes cuencas hidrográficas. A la vez, se plantea la necesidad de seguir evaluando su comportamiento en distintos sistemas edáficos dentro del país.

LITERATURA CITADA

- Ahuja, L., J. Naney, and R. Williams. 1985. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49:1100-1105.
- Bonilla, C., J. Muñoz, and M. Vauclin. 1999. Opus simulation of water dynamics and nitrate transport in a field plot. *Ecological Modell.* 122:69-80.
- Carsel R., and R. Parish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24:755-769.
- Gupta, S., and W. Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour. Res.* 15:1633-1635.
- Jackson, M. 1964. Análisis químico de los suelos. 662 p. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España.
- Flanagan, D., and S. Livingston (eds). 1995. USDA-water erosion prediction project. WEPP user summary. 131p. U.S. Department of Agriculture – Agricultural Research Service. National Soil Erosion Research Laboratory, W. Lafayette, Indiana, USA.
- Loague, K., and R. Green. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. of Contam. Hydrol.* 7:51-71.
- Rawls, W., D. Brakensiek, and K. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. of the ASAE* 25:1316-1321.
- Rawls, W., D. Brakensiek, and B. Soni. 1983. Agricultural management effects on soil water processes. Part I: soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. *Trans. of the ASAE* 26:1747-1752.
- Schaap, M., F. Leij, and M. van Genuchten. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:847-855.
- Smith, R. 1992. Opus: An integrated simulation model for transport of nonpoint-source pollutants at field scale. 120 p. Volume I, Documentation. U.S. Department of Agriculture – Agricultural Research Service, Colorado, USA.
- Spaans, E., and J. Baker. 1992. Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. *Plant Soil* 143:213-217.
- van Genuchten, M., and F. Leij. 1992. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. p. 1-14. In M. Th. van Genuchten *et al.* (eds.) Proceedings of International Workshop: Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils, Riverside, California, USA. 11-13 Oct. 1989. University of California, Riverside. California, USA.
- van Genuchten, M. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Williams, R., L. Ahuja, and J. Naney. 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from limited texture, bulk density, and limited data. *Soil Sci.* 153:172-184.