

**XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, OCTUBRE 2006**

**FUNCIONES HIDRAULICAS DE SUELOS LIMOSOS:  
VALORES DE REFERENCIA**

*Erik D. Zimmermann*

Dr. Ing., CONICET y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina, e-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

**RESUMEN:**

En este trabajo se presenta el procesamiento de curvas de retención obtenidas de la base UNSODA para las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcilla limosa, las cuales son características de los suelos del sur de Santa Fe (Argentina). Los parámetros fueron  $\theta_s$ ,  $\alpha$  y  $n$  del modelo de van Genuchten que se ajustaron a las curvas de campo y laboratorio (totalizando 152 muestras). Se presentan los resultados del ajuste junto a parámetros físicos de las muestras, los que pueden servir de guía comparativa para otras muestras. Se han incluido valores de referencia locales mediante ensayos de laboratorio y resultados de calibración de un modelo matemático aplicado regionalmente. Se observa en general que los promedios obtenidos en este estudio para la humedad de saturación  $\theta_s$  y  $n$  coinciden en gran medida con los presentados por Rawls y otros (1982) y por Carsel y Parrish (1988), salvo para la fracción arcilla limosa que presenta mayores diferencias. Respecto al parámetro  $\alpha$ , presenta importantes desvíos típicos y diferencias de un orden de magnitud respecto a los promedios obtenidos por los otros autores.

**ABSTRACT**

In this work, processing of retention curves obtained of the UNSODA database, for silty loam, silty clay loam, and silty clay, is presented. This textures are characteristic of the soils of the south of Santa Fe province. The parameters were  $\theta_s$ ,  $\alpha$  and  $n$  of the van Genuchten's model that were fitted to the field and laboratory curves (totalling 152 samples). The results of the adjustment next to physical parameters of the samples, are presented. These results can serve as comparative guide for another samples. Local reference values have been included by means of laboratory experiences and results of a mathematical model calibration, which was applied regionally. It is observed in general that the averages obtained in this study for the saturation moisture content  $\theta_s$  and  $n$  coincide mostly with those presented by Rawls et al (1982) and for Carsel and Parrish (1988), except for silty clay fraction that presents bigger differences. Regarding the parameter  $\alpha$ , it presents important standard deviations and differences of an order of magnitude can be observed respect to the averages obtained by the other authors.

**PALABRAS CLAVE:** suelos limosos, conductividad hidráulica, curvas de retención

## INTRODUCCIÓN

El interés en la zona no saturada (ZNS) ha aumentado en los últimos años debido a la evidencia creciente de la afectación ambiental provocada por actividades agrícolas e industriales. En este ambiente, los modelos numéricos son rutinariamente usados en investigación y gestión para predecir el movimiento de agua y solutos en la ZNS.

Los resultados de las aplicaciones sólo pueden ser confiables si las propiedades del medio poroso son conocidas. Esto representa la principal limitación a la tecnología actual de modelos sofisticados que se encuentra en un estado avanzado con respecto al conocimiento de los parámetros que engloban esos modelos.

En trabajos de calibración de modelos hidrológicos continuos; se ha demostrado la alta sensibilidad que presentan los procesos subterráneos, observables en el sistema mediante los niveles freáticos, y los procesos hidrológicos superficiales, observables a través de volúmenes de escurrimiento, frente a los parámetros hidráulicos que caracterizan la zona no saturada (Zimmermann y Riccardi, 2002, Zimmermann, 2003).

Esto resalta el rol protagónico que ejerce la zona vadosa en la recarga freática y en la infiltración, que constituyen los procesos que interconectan la hidrología superficial y la subterránea. La zona no saturada debe ser analizada con detenimiento ya que en ella se da lugar a importantes procesos de intercambio de flujo.

Para caracterizar el medio no saturado se requiere del conocimiento de las curvas de conductividad  $k(\theta)$ , y retención  $\psi(\theta)$  o bien, difusividad  $D(\theta)$ , siendo  $\theta$ , el contenido volumétrico de humedad,  $k(\theta)$  la conductividad hidráulica no saturada,  $\psi(\theta)$  la succión mátrica del suelo y  $D(\theta)$  el coeficiente de difusividad.

Se han diseñado un gran número de ensayos de laboratorio y métodos de campo para medir las funciones hidráulicas del suelo (Klute, 1986), pero la mayoría de los métodos son relativamente costosos y difíciles de llevar a cabo.

Aquí se presentan, en un estado inicial de la investigación realizada y con fines de caracterizar los suelos típicos de la llanura pampeana santafecina, valores de referencia obtenidos de distintas fuentes de información: parámetros calibrados de modelos matemáticos hidrológicos aplicados en la región, resultados de ensayos compilados de estaciones de INTA y las curvas de retención calibradas con la información de una base de datos pública (recopilada por el departamento de agricultura de EEUU, USDA) denominada UNSODA (Leij et al, 1996).

El conjunto de datos conforma en sí mismo una base informativa que pretende servir de referencia para aplicaciones hidrológicas en los suelos de la llanura santafecina.

## PARÁMETROS DEL SUELO PARA LA CURVA DE RETENCIÓN

En este trabajo se ha utilizado como modelo de curva de retención el de van Genuchten (1980), cuya expresión es la siguiente:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + (\alpha \psi)^n \right]^{-m} \quad [1]$$

donde  $\theta$  es el contenido volumétrico de humedad,  $\theta_s$  es el contenido de humedad para medio saturado,  $\theta_r$  es la humedad correspondiente a saturación irreductible,  $Se$  es la saturación efectiva,  $\psi$  el potencial de succión y  $\alpha$ ,  $m$  y  $n$  son parámetros empíricos. Este modelo de curva de retención tiene más flexibilidad para adaptarse a las curvas reales ya que depende de cinco parámetros independientes ( $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ). En la práctica resulta conveniente restringir los valores de  $m$  y  $n$  de forma que  $m = 1 - 1/n$ .

Los valores de los parámetros de la curva de van Genuchten han sido tabulados para diferentes tipos de suelos (van Genuchten, 1980). El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos presentó los valores medios de las propiedades hidráulicas de los suelos de acuerdo a la clasificación de USDA estimadas por Rawls y otros (1982) y Carsel y Parrish (1988), Las Tablas 1 y 2 muestran los valores.

**Tabla 1** -. Valores medios para los parámetros de los suelos, (Rawls y otros, 1982),  $\alpha$  y  $n$  son los parámetros de van Genuchten. Se han resaltado en gris las texturas analizadas en el trabajo.

<i>Textura</i>	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$K_s$ cm/d	$\alpha$ 1/cm	$n$ (-)
Arcilla	0,385	0,090	1,44	0,027	1,131
Franco arcilloso	0,390	0,075	5,52	0,039	1,194
Suelo Franco	0,434	0,027	16,32	0,090	1,220
Franco arenoso	0,401	0,035	146,60	0,115	1,474
<b>Franco limoso</b>	<b>0,486</b>	<b>0,015</b>	<b>31,68</b>	<b>0,048</b>	<b>1,211</b>
<b>Arcilla limosa</b>	<b>0,423</b>	<b>0,056</b>	<b>2,16</b>	<b>0,029</b>	<b>1,127</b>
<b>Franco arcillo-limoso</b>	<b>0,432</b>	<b>0,040</b>	<b>3,60</b>	<b>0,031</b>	<b>1,151</b>
Arena	0,417	0,020	504,00	0,138	1,592
Arcilla arenosa	0,321	0,109	2,88	0,034	1,168
Franco arcillo- arenoso	0,330	0,068	10,32	0,036	1,250

**Tabla 2**. Valores medios y desviaciones estándares para los parámetros del suelo para 10 tipos de texturas (Carsel y Parrish, 1988),  $\alpha$  y  $n$  son los parámetros de van Genuchten. Se han resaltado en gris las texturas analizadas en el trabajo.

<i>Textura</i>	$\theta_s$		$\theta_r$		$K_s$		$\alpha$		$n$	
	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		(cm/dia)		(1/cm)		(-)	
	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
Arcilla	0,38	0,09	0,068	0,034	4,8	10,1	0,008	0,012	1,09	0,09
Franco arcilloso	0,41	0,09	0,095	0,01	6,2	16,8	0,019	0,015	1,31	0,09
Suelo Franco	0,43	0,10	0,078	0,013	25,0	43,7	0,036	0,021	1,56	0,21
Franco arenoso	0,43	0,09	0,057	0,015	350,2	272,6	0,124	0,043	2,28	0,27
<b>Franco limoso</b>	<b>0,45</b>	<b>0,08</b>	<b>0,067</b>	<b>0,015</b>	<b>10,8</b>	<b>29,5</b>	<b>0,020</b>	<b>0,012</b>	<b>1,41</b>	<b>0,12</b>
<b>Arcilla limosa</b>	<b>0,36</b>	<b>0,07</b>	<b>0,070</b>	<b>0,023</b>	<b>0,5</b>	<b>2,6</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>1,09</b>	<b>0,06</b>
<b>Franco arcillo-limoso</b>	<b>0,43</b>	<b>0,07</b>	<b>0,089</b>	<b>0,009</b>	<b>1,7</b>	<b>4,6</b>	<b>0,010</b>	<b>0,006</b>	<b>1,23</b>	<b>0,06</b>
Arena	0,43	0,06	0,045	0,010	712,8	374,4	0,145	0,029	2,68	0,29
Arcilla arenosa	0,38	0,05	0,106	0,013	2,9	6,7	0,027	0,017	1,23	0,10
Franco arcillo-arenoso	0,39	0,07	0,100	0,006	31,4	65,7	0,039	0,038	1,48	0,13

Referencias: D.E: desvío estándar.

## PARAMETROS DEL SUELO EN LA REGION PAMPEANA

La llanura chaco-pampeana, de clima templado húmedo, está caracterizada por un relieve de moderada pendiente topográfica.

El área meridional de la provincia de Santa Fe (Figura 1) presenta un módulo pluviométrico del orden de los 1000 mm y la temperatura media anual del orden de los 16 °C. La unidad estratigráfica superior del paquete sedimentario está compuesta por el loess, integrada por limos y arcillas de colores castaños. El espesor en el sector de análisis varía entre 30 y 150 metros. En el perfil del suelo, incluyendo el horizonte C, predomina la fracción limosa, que en términos medios ocupa el 70 % con respecto a un 26 % de la arcilla. El resto lo cubre la fracción arenosa.

Los mapas de suelos disponibles en la provincia de Santa Fe, elaborados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), clasifican, desde un punto de vista textural, a los suelos de la región entre las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcilla limosa. El objetivo del trabajo consistió la búsqueda de información relativa a suelos clasificados en dichas composiciones texturales. Los parámetros correspondientes a dichas fracciones se resaltan en las Tablas 1 y 2.

Para ello se contó con información de la base UNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic Database) versión 1.0 seleccionando las muestras de suelos que se corresponden con las texturas presentes en la región: silty loam, silty clay loam y silty-clay (Fig. 2).

UNSODA es una base de datos de propiedades hidráulicas de suelos no saturados (curvas de retención, de conductividad hidráulica y difusividad), de propiedades básicas (distribución de tamaño de partículas, densidad, contenido de materia orgánica, etc.) e información adicional sobre la zona de extracción y los ensayos de laboratorio. El programa se puede utilizar para almacenar y editar datos, búsquedas y consultas clasificadas, imprimir los resultados de las búsquedas, describir y ajustar ecuaciones a las propiedades hidráulicas.

### **Procesamiento de datos**

Para la fracción franco limosa (silty loam) la base cuenta con 142 muestras de suelos, para la fracción franco arcillo limosa (Silty clay loam) se contó con 33 muestras de suelo y para la fracción arcillo limosa se contó con 21 muestras de suelos.

La base permite realizar consultas clasificadas por texturas de suelos, pero las salidas se realizan en archivos de textos (ASCII) y con toda la información disponible para cada muestra de suelo. A los fines de separar la información de propiedades básicas, de las curvas granulométricas y de los ensayos de laboratorio in situ, se diseñaron programas en PASCAL para el procesamiento de la información y permitir así un tratamiento posterior.

Los programas desarrollados extraen los textos en código ASCII de las salidas de la base UNSODA y los transforman en códigos numéricos. Se diseñaron algoritmos de caracteres para clasificar y archivar por separado, parámetros básicos para cada código, curvas granulométricas, curvas de retención de humedad  $\theta(h)$ , curvas de conductividad hidráulica  $K(\theta)$  ó  $K(h)$  y curvas de difusividad  $D(\theta)$  ó  $D(h)$ . Esto en función de los datos disponibles para cada muestra.

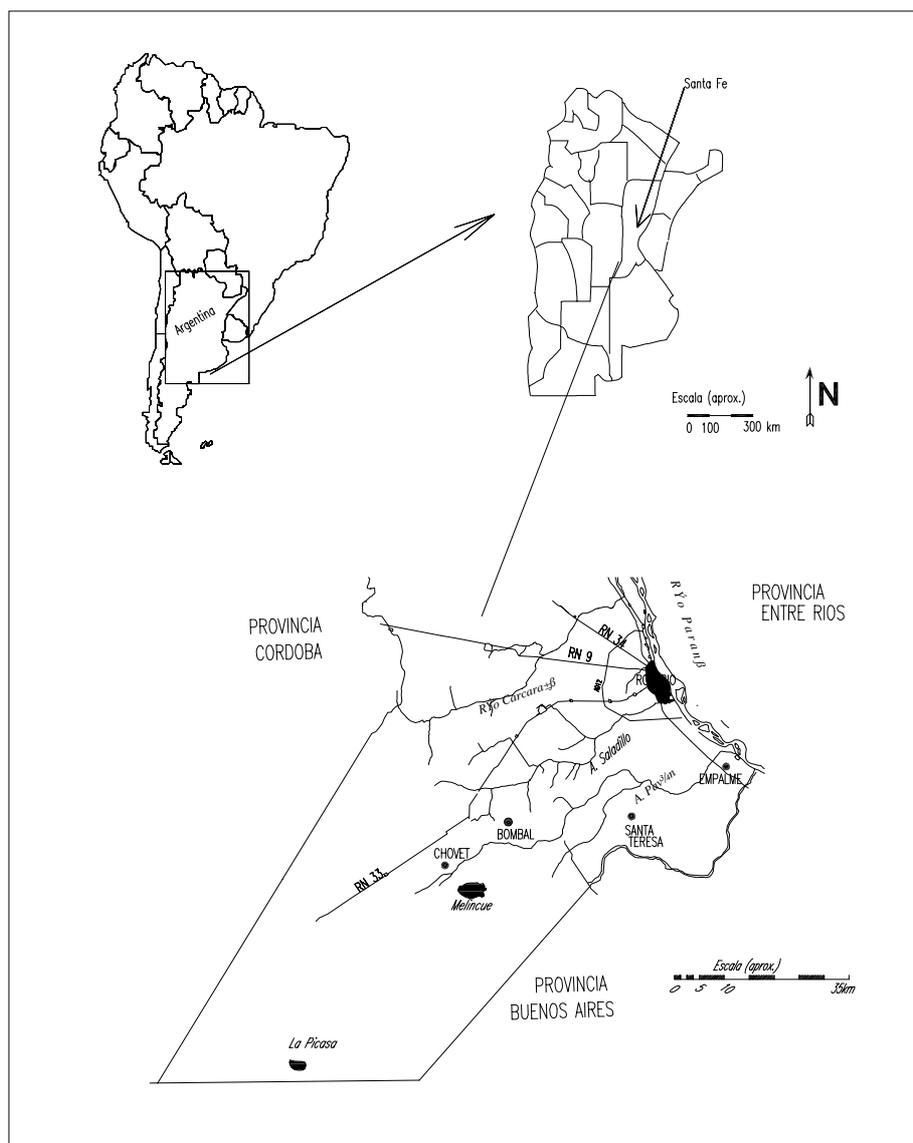
Este procesamiento permitió extraer la siguiente información por muestra de suelo analizada: código asignado en la base, profundidad de extracción, horizonte edáfico, profundidad freática, localización, precipitación media anual, temperatura media mes de meses de enero y julio, densidades húmeda y seca, porosidad, contenido orgánico, conductividad hidráulica saturada, ph, índice RAS. Además se presentan las curvas granulométricas de las muestras de suelo, curvas de retención (laboratorio o in situ) y curvas de conductividad (laboratorio o in situ).

En segunda instancia, se diseñaron programas en lenguaje FORTRAN para el armado automático de los archivos de entrada para el programa RETC (Van Genuchten et al, 1991), el cual permite estimar los parámetros de funciones analíticas de las curvas hidráulicas del suelo.

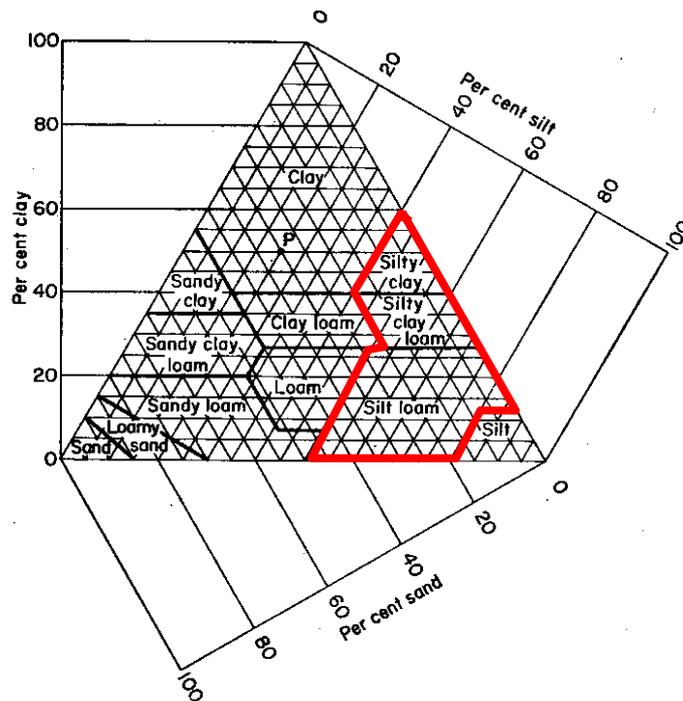
RETC (RETention Curve) es un programa de distribución libre que analiza las propiedades hidráulicas de los suelos no saturados. El código, escrito en lenguaje FORTRAN77, permite ajustar los parámetros de las curvas de retención de humedad y de conductividad hidráulica no saturada. Los datos experimentales o de campo ingresan como entrada en el programa

La curva de retención de humedad puede representarse en el programa mediante la ecuación de Brooks-Corey o van Genuchten, mientras que la conductividad hidráulica no saturada,  $K(h)$  ó  $K(\theta)$  o la difusividad,  $D(\theta)$ , son formuladas en términos de la distribución estadística del tamaño de poros mediante los modelos de Mualem y/o Burdine. Se utiliza en la optimización de los parámetros un método no lineal de ajuste por mínimos cuadrados.

Al programa original se le adicionó una rutina realizada en lenguaje PASCAL (GRF) para graficar las datos observados y las curvas ajustadas con RETC. Esto permitió visualizar claramente el grado de ajuste de cada muestra de suelo tanto en su curva de retención como de conductividad.



**Figura 1.** Area de estudio: sector meridional de Santa Fe



**Figura 2.** Triángulo de clasificación textural con las fracciones seleccionadas (rojo).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de los códigos mencionados dio por resultados la estimación de los parámetros de van Genuchten para las texturas analizadas. Cabe mencionar que algunas muestras originales presentes en la base UNSODA 1.0 fueron depuradas al no contar con información granulométrica de interés para un estudio posterior. Esta depuración redujo el número de casos a 114 muestras para la fracción franco limosa (silty loam), 25 muestras de suelos para la fracción franco arcillo limosa (Silty clay loam) y 14 muestras para la fracción arcillo limosa.

Durante el proceso de calibración de parámetros con el código RETC, se observó que los valores de los mismos están influenciados por el rango de humedades cubiertos por los datos experimentales. Cuanto más estrecho es este rango mayor divergencia puede esperarse en los parámetros ajustados respecto a sus valores medios. A los fines de lograr un modelo parsimonioso se fijó la saturación irreductible a los valores recomendados por RETC, quedando de esta forma  $\theta_s$ ,  $\alpha$  y  $n$  como parámetros a ajustar.

El código RETC permite ajustar parámetros aproximando la curva de retención solamente, o bien ésta y la curva de conductividades simultáneamente. En el primer caso, que fue la opción adoptada mayoritariamente, se encontraron altos coeficientes de determinación. El promedio de los coeficientes de correlación obtenidos fue de 0,9678 con un desvío estándar de 0.0713.

El desarrollo de las rutinas gráficas permitió visualizar la performance de los ajustes, contituyendo una herramienta muy útil a la hora de seleccionar el método de ajuste.

Los resultados de la parametrización de las muestras se ejemplifican en la Tabla 3 para la fracción arcillo limosa, que fue la muestra más pequeña de las tres analizadas. Estos parámetros característicos impresos pueden servir de guía comparativa a la hora de seleccionar los parámetros de van Genuchten para otras muestras de suelo. P.ej., seleccionando parámetros hidráulicos de suelos que tengan densidades, contenidos orgánicos, etc. semejantes.

**Tabla 3.** Caracterización de las muestras consideradas para la fracción **arcilla limosa** junto a los parámetros de van Genuchten.

CODIGO	prf	LOCALIZACION	d.hum	d.seca	poros	c.org	PH	$\theta_s$	$\alpha$	n
	cm		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	%				
1320	15 - 60 c	Ziegelei Hoelle, Gottingen, Germany	1,46			1,40	6,6	0,3230	0,0002	1,1610
1360	0 - 20 cm	Reinhausen (Goettingen), Germany	1,50	2,70	0,444	3,97	7,3	0,4466	0,0034	1,1126
1361	0 - 20 cm	Reinhausen (Goettingen), Germany	1,49	2,65	0,438	4,38	7,0	0,4330	0,0043	1,2630
1383	60 - 100	Muenchehagen (Loccum), Germany	1,64	2,70	0,393	0,14	4,1	0,3152	0,0021	1,1045
2180	20 - 30 c	Hokota, Ibaraki, Japan	0,54	2,57	0,790	4,50				
2350	35 - 45 c	Memleben, Germany	1,18		0,55	14,48	7,5	0,5549	0,0436	1,7851
2460	1 - 6 cm	Goettingen, Germany	0,77		0,71	10,32	5,7	0,6995	0,0203	1,1533
2461	8 - 13 cm	Goettingen, Germany	0,91		0,65	6,36	5,7	0,6408	0,0256	1,1230
2462	15 - 20 c	Goettingen, Germany	0,93		0,65	5,68	6,3	0,6205	0,0651	1,1081
2470	1 - 6 cm	Goettingen, Germany	0,70		0,73			0,6878	0,0691	1,1143
2471	6 - 11 cm	Goettingen, Germany	0,87		0,67					
2472	12 - 17 c	Goettingen, Germany	0,90		0,66					
3030	0 - 22 cm	Orenburg region, Russia	1,32	2,66	0,50			0,5620	0,0421	1,0394
3120	0 - 15 cm	Canning Town, W. Bengal India	1,40	2,80	0,50	0,80	6,5	0,5081	0,0016	1,4696
		<b>Promedio</b>	<b>1,11</b>	<b>2,68</b>	<b>0,59</b>	<b>5,20</b>	<b>6,31</b>	<b>0,53</b>	<b>0,025</b>	<b>1,221</b>
		<b>Desvío estándar</b>	<b>0,35</b>	<b>0,08</b>	<b>0,13</b>	<b>4,42</b>	<b>1,03</b>	<b>0,13</b>	<b>0,026</b>	<b>0,219</b>

### Valores de referencia

La Tabla 4 sintetiza la información recolectada para las fracciones texturales de interés en este estudio. Allí figuran los valores de referencia de Rawls y otros (1982), de Carsel y Parrish (1988), los promedios y desvíos estándares de los parámetros ajustados en este trabajo y otros valores de referencia locales que se detallan a continuación.

Se contó, como información adicional de valores locales, con resultados de ensayos en laboratorio para un grupo de seis muestras de suelo extraídas por INTA Oliveros (pcia. de Santa Fe). Las muestras representan horizontes A y B bajo usos de suelo diferentes: pasturas y agrícola.

Las muestras se clasificaron en arcilla-limosa para las del horizonte B y franco-limoso para las del horizonte A. Se ajustaron los parámetros de van Genuchten aplicando el código RETC (Figura 3). Los valores extremos de los parámetros se incluyen en la Tabla 4.

Como tercer elemento de juicio, se contó con valores de parámetros calibrados con el modelo SHALL3 (Zimmermann y Riccardi 2000). El modelo, apto para representar áreas de llanura, se ha utilizado para realizar predicciones de cambios en procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo.

El modelo contempla las interacciones entre los procesos de superficie, en la zona no saturada (ZNS) y en la zona saturada (Zimmermann y Riccardi 2002). En cada celda ó unidad de discretización espacial puede cuantificar dinámicamente variables de estado, tales como almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo, así como flujos de humedad y vapor, tales como los envueltos en los procesos de evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo. Cada una de estas variables puede conocerse con una adecuada resolución espacial y temporal.

El modelo fue puesto en operación en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina), y posteriormente fue calibrado utilizando información freaticométrica, pluviográfica y

limnigráfica (período 1994-96). Los parámetros calibrados (Zimmermann 2003) se incluyen en la Tabla 4. Dado que los mismos fueron ajustados en forma global para la cuenca, sólo constituyen valores de referencia generales.

Puede observarse en la Tabla 4 que la humedad de saturación de los suelos locales concuerda aproximadamente con los valores promedios señalados por Rawls y otros. No obstante teniendo en cuenta los desvíos estándares obtenidos para las otras muestras, las predicciones utilizando tanto los datos de este estudio como los de Carsel y Parrish, podrían ser aceptables. Los desvíos estándares, en comparación con los promedios, son pequeños para esta variable.

**Tabla 4.** Valores comparativos de parámetros de van Genuchten obtenidos para las texturas analizadas, en negrita se indican los promedios y en itálica los desvíos estándares.

Autores	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ 1/cm	$n$ (-)
ARCILLA LIMOSA			
Rawls y otros, 1982	<b>0,42</b>	<b>0,029</b>	<b>1,13</b>
Carsel y Parrish, 1988	<b>0,36</b> ± 0,07	<b>0,005</b> ± 0,005	<b>1,09</b> ± 0,06
Valores en este estudio (14 muestras)	<b>0,53</b> ± 0,13	<b>0,025</b> ± 0,026	<b>1,22</b> ± 0,22
Horizonte B Oliveros	<b>0,40</b>	<b>0,004</b>	<b>1,20</b>
FRANCO ARCILLO-LIMOSO			
Rawls y otros, 1982	<b>0,43</b>	<b>0,031</b>	<b>1,15</b>
Carsel y Parrish, 1988	<b>0,43</b> ± 0,07	<b>0,010</b> ± 0,006	<b>1,23</b> ± 0,06
Valores en este estudio (25 muestras)	<b>0,43</b> ± 0,10	<b>0,015</b> ± 0,019	<b>1,22</b> ± 0,10
FRANCO LIMOSO			
Rawls y otros, 1982	<b>0,49</b>	<b>0,048</b>	<b>1,21</b>
Carsel y Parrish, 1988	<b>0,45</b> ± 0,08	<b>0,020</b> ± 0,012	<b>1,41</b> ± 0,12
Valores en este estudio (114 muestras)	<b>0,43</b> ± 0,06	<b>0,014</b> ± 0,018	<b>1,34</b> ± 0,17
Horizonte A Oliveros	<b>0,49</b>	<b>0,004</b>	<b>1,33</b>
Parámetros calibrados en la Cuenca del A° Ludueña (Zimmermann 2003)	<b>0.49</b>	<b>0,004</b>	<b>1,56</b>

El parámetro  $\alpha$  presenta desvíos estándares del orden de los promedios, lo que da cuenta de la gran variabilidad que presenta el mismo. Incluso, los promedios publicados por los distintos autores para cada muestra son muy diferentes entre sí. Da la sensación de constituir el parámetro más difícil de pronosticar. Los valores encontrados para suelos locales son bajos respecto a los presentados por Rawls y otros y Carsel y Parrish, incluso los promediados para este estudio. Los datos de Rawls y otros son significativamente mayores que los restantes.

El parámetro  $n$  presenta menores desvíos y aparenta ser menos variable que el  $\alpha$ . Un rango observado para los distintos autores y texturas consideradas entre 1,09 y 1,56, da esa pauta. Los valores obtenidos promediando las muestras de la base UNSODA se acercan en gran medida a los obtenidos para las muestras locales.

Se observa que los desvíos son mayores para las fracciones que tienen menos cantidad de datos, como ocurre con la arcilla-limosa y los suelos franco arcillo-limosos.

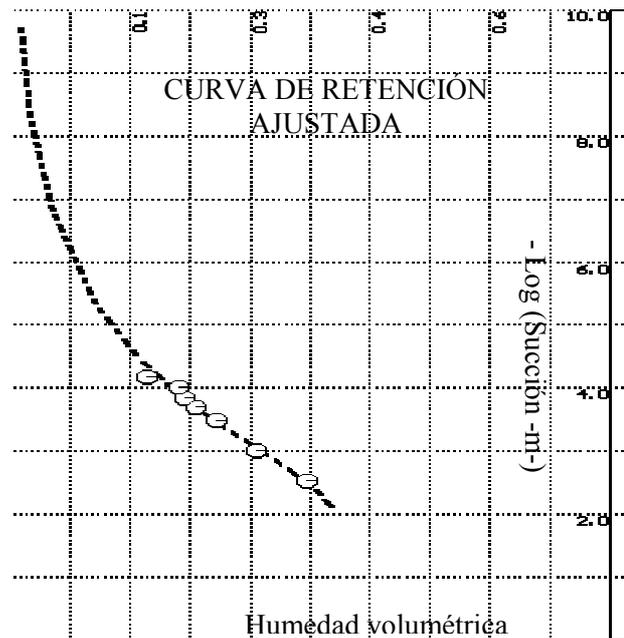
Se observó que la humedad de saturación  $\theta_s$  tiene una relación inversa con la densidad húmeda, esto pudo apreciarse en las fracciones arcillo-limosa y franco limosa. Es un resultado lógico ya que una mayor compactación de la muestra implicará una mayor densidad húmeda y una menor porosidad y/o humedad de saturación. En todos los casos hubo una dependencia directa con la porosidad. Tomando como única variable independiente la porosidad, los valores promedios de la

relación  $\theta_s$  - porosidad se detallan en la Tabla 5. El valor de C fue verificado por otros autores encontrándose en este entorno de valores.

**Tabla 5.** Proporción entre  $\theta_s$  y porosidad

$\theta_s = C * \text{porosidad}$		
Arcillo limosa	Franco arcillo-limosa	Franco limosa
C = 0.959	C = 0.864	C = 0.903

**Figura 3.** Curva de retención de suelos de Oliveros (Santa Fe). Horizonte B, uso pasturas.



## CONCLUSIONES

Se procesaron las curvas de retención obtenidas de la base UNSODA para las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcilla limosa, las cuales son características de los suelos del sur santafecino. Se ajustaron parámetros  $\theta_s$ ,  $\alpha$  y  $n$  del modelo de van Genuchten a los datos obtenidos de las muestras en campo y en laboratorio (totalizando 152 muestras), obteniéndose elevados coeficientes de determinación.

Se presentan los resultados de la parametrización incluyendo otros parámetros físicos de las muestras, los que pueden servir de guía comparativa seleccionando parámetros hidráulicos de suelos que tengan densidades, contenidos orgánicos, etc. semejantes. Se han incluido valores de referencia locales a partir de ensayos de laboratorio de muestras de suelo y de resultados de calibración de un modelo matemático aplicado regionalmente.

Se observa que para la humedad de saturación  $\theta_s$  los promedios obtenidos coinciden con los presentados por Rawls y otros (1982) y no difieren en gran medida con los publicados por Carsel y Parrish (1988), salvo para la fracción arcilla limosa que presenta mayores diferencias. Respecto al parámetro  $\alpha$ , se ha encontrado una gran dispersión respecto a los valores medios obtenidos en este trabajo y diferencias de un orden de magnitud respecto a los promedios obtenidos por los otros autores. Esto da la pauta que es un parámetro difícil de pronosticar debido a su variabilidad. El parámetro  $n$  presentó una menor dispersión que el anterior, y los promedios obtenidos en este trabajo se acercan en gran medida a los publicados por otros autores.

Las regresiones lineales múltiples planteadas entre los parámetros y otras características físicas de las muestras (densidad húmeda, porosidad,  $\text{Ph}$ , contenido orgánico) han ofrecido bajos coeficientes de determinación. Los resultados alcanzados al presente motivan un estudio a posteriori más profundo, incorporando nuevas variables tales como características granulométricas, etc.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bear J. (1972) *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier. New York. 764 pp.
- Brooks RH, Corey AT. (1964) "Hydraulics properties of porous media". Colorado State Univ. *Hydrology Papers No. 3*. Fort Collins. 27 pp.
- Carsel, R. F., and R. S. Parrish. 1988. "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics". *Water Resour. Res.* 24:755-769.
- Klute, A. (Ed.) 1986. "Methods of soil analysis, part 1, Physical and mineralogical methods". *Agronomy* 9(1), 2nd Ed., American Society of Agronomy, Madison, Wis.
- Gardner W. (1958) "Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table". *Soil Sci.* 85 (4) 228-232.
- Irmay S. (1954) "On the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Trans. Am. Geophys. Un.* 35. 463-468.
- Leij, F. J., W. J. Alves, M. Th. van Genuchten, and J. R. Williams. 1996. *Unsaturated Soil Hydraulic Database*, UNSODA 1.0 User's Manual. Report EPA/600/R-96/095, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma. 103 pp.
- Mualem, Y. 1976a. "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media". *Water Resour. Res.* 12:513-522.
- Mualem, Y. 1976b. *A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils*. Research Project Report No. 442, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton. 1982. "Estimating soil water properties". *Transactions, ASAE*, 25(5):1316-1320 and 1328.
- Richards, L. A. 1931. "Capillary conduction of liquids through porous mediums". *Physics* 1:318-333.
- van Genuchten, M. Th. 1980. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and L. J. Lund (eds.). 1991. *Proc. Int. Workshop, "Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils"*. Univ. California, Riverside.
- Zimmermann E y Riccardi G. 2000. "Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para Areas de Llanura". *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, IAHR. Vol II. 169-178. Córdoba. Argentina. ISBN 950-33-0267-6
- Zimmermann E y Riccardi G. 2002. "Modelo Hidrológico Superficial y Subterráneo desarrollado para la Simulación de Sistemas de Llanura. 1. Aplicación en el Sistema Ludueña (Santa Fe, Argentina)". *XXXII IAH Congress*. International Association of Hydrogeologists. Mar del Plata. Argentina. Res p94 y CD-ROM Groundwater and Human Deveopment (Eds. Bocanegra E, Martinez D y Massone H). ISBN 987-544-063-9. p739-749.
- Zimmermann E. 2003. "Modelo Hidrológico Superficial y Subterráneo desarrollado para la Simulación de Sistemas de Llanura. 2. Estrategias para la Calibración". *Journal of Earth Sciences. Boletín Geológico y Minero de España*. ISSN 0366-0176. Vol 114. No 2: 159-169. Madrid. España.