

FUNCIONES HIDRAULICAS DE SUELOS LIMOSOS: REGRESIONES NO LINEALES CON PROPIEDADES FISICAS Y GRANULOMETRICAS

Erik D. Zimmermann y Pedro A. Basile

Dres. Ings., 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 θ_s , α y n del modelo de van Genuchten se ajustaron a las curvas de campo y laboratorio (totalizando 141 muestras).

Paralelamente se procesaron las curvas granulométricas de las muestras obteniéndose un conjunto de características estadísticas de las mismas, las que se relacionaron con los parámetros hidráulicos, junto con las propiedades físicas de las muestras.

Las regresiones lineales múltiples planteadas entre los parámetros y características físicas de las muestras solamente (densidad húmeda, porosidad, P_h , contenido orgánico) han ofrecido bajos coeficientes de determinación. La incorporación de propiedades granulométricas en las relaciones presentó una mejoría notable en algunos casos y aceptable en otros.

Se observó como tendencia general para las texturas analizadas que el parámetro θ_s está relacionado en forma directa con la porosidad e inversamente con la densidad húmeda. De igual manera, los parámetros α y n parecen relacionarse en forma inversa con la densidad húmeda y otras variables tales como el contenido orgánico del suelo, la porosidad, P_h , la humedad irreductible θ_r , y la curtosis granulométrica adimensional.

Los coeficientes de correlación obtenidos con ecuaciones de regresión no lineales son menores a los obtenidos para la regresión lineal en la mayoría de los casos. Es decir que las regresiones no lineales no han aportado beneficios considerables a las correlaciones. Los resultados alcanzados al presente motivan un estudio a posteriori más profundo, ya que se pone de manifiesto que el conjunto de variables consideradas parece no ser suficiente para explicar las propiedades hidráulicas del suelo.

PALABRAS CLAVE: suelos limosos, propiedades granulométricas, curvas de retención

INTRODUCCIÓN

Para predecir el movimiento de agua y solutos en la zona no saturada (ZNS) se emplean habitualmente modelos numéricos. Los resultados de sus 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).

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.

Ante esta perspectiva y con fines de caracterizar los suelos típicos de la llanura pampeana (Santa Fe, Argentina), se obtuvieron (Zimmermann, 2006) valores de referencia de propiedades hidráulicas de suelos desde 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 denominada UNSODA (Leij et al, 1996).

En una segunda etapa, presentada en este trabajo, se realizaron regresiones entre parámetros físicos, granulométricos e hidráulicos de las muestras de suelo presentes en la base, dado que éstos últimos son relativamente más complejos de obtener.

PROCESAMIENTO DE DATOS

Los mapas de suelos disponibles en la provincia de Santa Fe (Figura 1), 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 se centralizó en la información relativa a suelos clasificados en dichas composiciones texturales.

Parámetros hidráulicos de los suelos

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 θ es el contenido volumétrico de humedad, θ_s es el contenido de humedad para medio saturado, θ_r es la humedad correspondiente a saturación irreductible, S_e es la saturación efectiva, ψ el potencial de succión y α , 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 (α , m , n , θ_s , θ_r). En la práctica resulta conveniente restringir los valores de m y n de forma que $m = 1 - 1/n$.

Se contó con información de la base UNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic Database) versión 1.0 (Leij et al, 1996) 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).

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. Cabe mencionar que del total de las muestras originales presentes en la base se eliminaron aquellas que no poseían información granulométrica o bien ésta se repetía. Esta depuración redujo el número de casos a 109 muestras para la fracción franco limosa (silty loam), 21 muestras de suelos para la fracción franco arcillo limosa (Silty clay loam) y 11 muestras para la fracción arcillo limosa.

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. Para el tratamiento de la información de propiedades básicas, de las curvas granulométricas y de los ensayos de laboratorio en situ, se diseñaron un conjunto de programas (Zimmermann, 2006). Los mismos 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.

El 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 (Zimmermann, 2006) para el programa RETC (Van Genuchten et al, 1991), el cual permite estimar los parámetros de funciones analíticas de las curvas hidráulicas del suelo.

Al programa original se le adicionó una rutina realizada en lenguaje PASCAL para graficar los 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.

Parámetros granulométricos de los suelos

Para obtener las propiedades granulométricas de las muestras se empleó el programa STATRA (Basile, 2001). Dado que la representación aritmética lineal en términos de diámetros resulta inadecuada para describir las características estadísticas de las distribuciones granulométricas, en el programa se recurre a la escala sedimentológica ϕ definida como:

$$\phi = -\log_2 d \quad [2]$$

Siendo d el diámetro de la partícula (mm). Para una función discreta de distribución acumulada de los diámetros $F(\phi_j)$ se definen N clases granulométricas. Para la i -ésima clase se determina el diámetro representativo en la escala ϕ y su fracción en peso asociada f_i como:

$$\bar{\phi}_i = 0,5(\phi_j + \phi_{j+1}) \quad [3]$$

$$f_i = F_{j+1} - F_j \quad [4]$$

donde el índice j está asociado a los extremos de cada clase ($j=0,N$), mientras i es el índice que identifica cada clase ($i=1,N$). Los parámetros estadísticos considerados para las distribuciones granulométricas son diámetro medio ϕ_m , desvío Estándar σ , asimetría s_k , curtosis K , asimetría adimensional β_1 , curtosis adimensional β_2 , diámetro medio aritmético d_m . Los mismos se calculan en la escala ϕ de la siguiente manera:

$$\phi_m = \sum_{i=1}^N \bar{\phi}_i f_i, \quad \sigma = \left[\sum_{i=1}^N (\bar{\phi}_i - \phi_m)^2 f_i \right]^{1/2}, \quad s_k = \sum_{i=1}^N (\bar{\phi}_i - \phi_m)^3 f_i \quad [5a], [5b], [5c]$$

$$K = \sum_{i=1}^N (\bar{\phi}_i - \phi_m)^4 f_i, \quad \beta_1 = \frac{s_k^2}{\sigma^6}, \quad \beta_2 = \frac{K}{\sigma^4}, \quad d_m = \sum_{i=1}^N 2^{-\bar{\phi}_i} f_i \quad [6a], [6b], [6c], [6d]$$

El diámetro medio geométrico d_g , el desvío estándar geométrico σ_g y el coeficiente de variación geométrico CV_g se obtienen a través de los respectivos valores definidos en la escala ϕ mediante las ecuaciones:

$$d_g = 2^{-\phi_m}, \quad \sigma_g = 2^\sigma, \quad CV_g = \frac{d_g}{\sigma_g} \quad [7a],[7b],[7c]$$

Los parámetros estadísticos descriptos precedentemente son calculados para un número de clases granulométricas N (proporcionado como dato de entrada) variable entre $2 < N \leq 100$. El programa ha sido modificado (Zimmermann, comunicación personal, 2004) para permitir el ingreso simultáneo de más de una distribución granulométrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de los códigos mencionados dio por resultados la estimación de los parámetros de van Genuchten para las texturas analizadas y las características granulométricas de las muestras. A los fines de lograr un modelo parsimonioso, es decir con el menor número de parámetros relevantes, se fijó la saturación irreductible a los valores recomendados por RETC, quedando de esta forma θ_s , α 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, constituyendo una herramienta muy útil a la hora de seleccionar el método de ajuste.

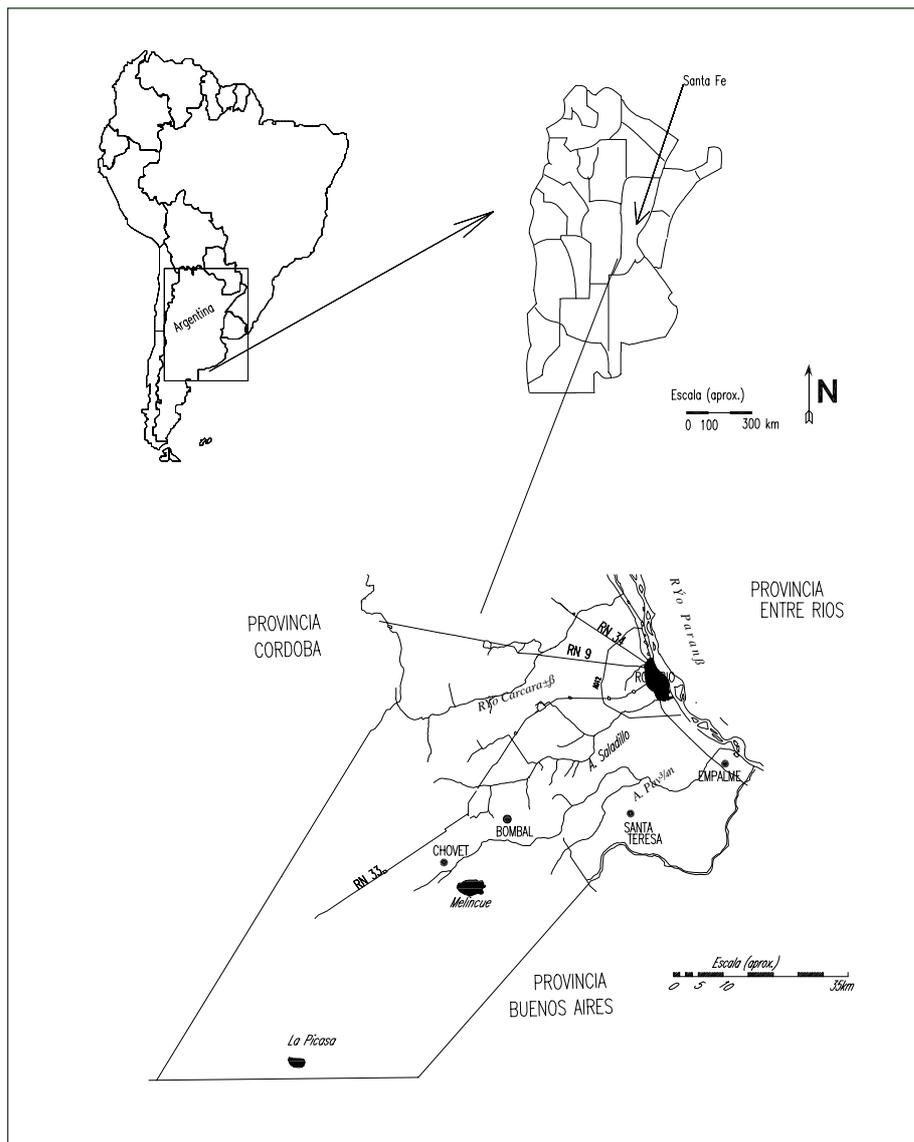


Figura 1. Area de estudio: sector meridional de Santa Fe

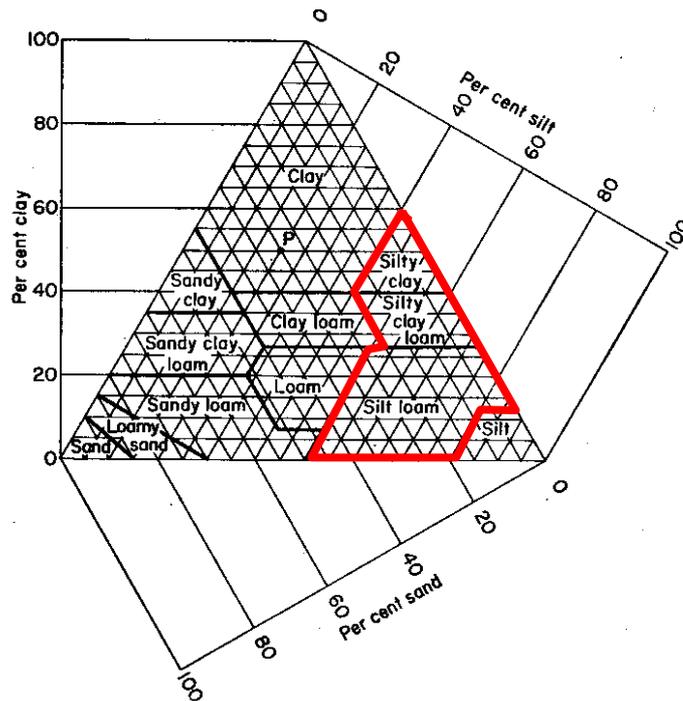


Figura 2. Triángulo de clasificación textural con las fracciones seleccionadas (rojo).

Regresiones lineales con propiedades físicas y granulométricas

Las Tablas 1, 2 y 3 sintetizan los aportes de cada variable en las regresiones y las bondades de los ajustes encontrados. En las columnas se muestran las fracciones texturales analizadas junto al procedimiento empleado para la selección de las variables mientras que las mismas se detallan en las filas.

Para el análisis de las regresiones lineales se empleó el software Statgraphics Plus 5.0 (©Statistical Graphic Corp). Se realizó un análisis multivariable mediante la matriz de coeficientes de correlación de Pearson tomando las variables de a pares. Se extractaron las variables correlacionadas de manera más significativa, realizando esto para cada fracción textural de suelo y para cada parámetro hidráulico.

Se tomaron en cuenta cuatro opciones para las regresiones múltiples: (a) considerando solo las características físicas de las muestras para las regresiones (columnas PF), (b) considerando todas las variables físicas y granulométricas significativas (columnas TVS), (c) seleccionando las primeras variables significativas de la lista total de variables (columnas F, Forward Selection) y (d) descartando las variables poco significativas de la lista total de variables (columnas B, Backward Selection). Estos últimos procedimientos los hace automáticamente el software.

En el interior de la tabla se colocan los signos de los coeficientes ajustados para las regresiones. Los modelos seleccionados para las regresiones tienen en cuenta el principio de parsimonia, contrapesando la cantidad de variables (en lo posible no más de tres) y los resultados del ajuste (r^2). En términos generales los coeficientes de determinación (r^2) que figuran al pie de las tablas decrecen para las fracciones con mayor número de muestras.

El parámetro θ_s es el que presenta mayores coeficientes de determinación comparativamente con los otros parámetros (Tabla 1). Se observó como tendencia general para las texturas analizadas

que el parámetro θ_s está relacionado en forma directa con la porosidad e inversamente con la densidad húmeda.

Para la arcilla limosa, todos los procedimientos empleados para realizarlas regresiones dieron por resultado las mismas variables significativas (salvo para F que al existir pocos datos no fue posible): la porosidad y la densidad húmeda (ec. [8a]). La textura franco arcillo-limosa presenta r^2 elevados cuando participan la mayoría de las variables (columnas TVS y B). Adoptando un modelo parsimonioso de dos variables (porosidad y diámetro medio geométrico, columna F) los ajustes son aceptables (ec. [8b]). Para la textura franco limosa el modelo de tres variables (densidad húmeda, porosidad y coeficiente de variación, columna F) presenta un ajuste similar a las restantes combinaciones con menos variables (ec. [8c]). Las ecuaciones de regresión seleccionadas son las siguientes:

$$\theta_s = 0.8757 + 0.0847\eta - 0.3188\delta_h, (r^2 = 0,9353) \quad [8a]$$

$$\theta_s = 0.1261 + 0.4006\eta + 1.273d_g, (r^2 = 0,7505) \quad [8b]$$

$$\theta_s = 0.5318 + 0.1578\eta - 0.1528\delta_h + 0.0003682CV_g, (r^2 = 0,5027) \quad [8c]$$

donde η (adimensional) es la porosidad y δ_h (g/cm^3) la densidad húmeda. Los demás símbolos fueron definidos previamente.

Tabla 1. Regresiones lineales entre el parámetro θ_s y características físicas y granulométricas.

	θ_s	Arcilla Limosa			Franco arcillo limoso				Franco Limoso				
		Variables	PF	TVS	B	PF	TVS	B	F	PF	TVS	B	F
Caract. físicas	Densidad húmeda	-	-	-		+	+			-	-	-	-
	Densidad seca												
	Porosidad	+	+	+	+	-		+	+	+	+	+	+
	Ph												
	Contenido orgánico					+	+	+			-		
Características granulométrica	d_m									+	+		
	d_g					-	-	+					
	σ					-	-			-			
	σ_a					+	+			-	-		
	β_1					-	-			+			
	β_2					+	+			-			
	CV_a					-				+	+	+	
	s_k					+	+						
K					-	-			+				
Parámetros	θ_r												
	θ_s												
	α												
	n												
	Coef. Determ. r2	0.9353	0.9353	0.9353	0.6062	0.9358	0.9325	0.7505	0.4607	0.5423	0.5266	0.5027	

Para el parámetro α se observó, como tendencia general en las texturas analizadas, que está relacionado en forma inversa con la densidad húmeda. Para la textura franco limosa se observó una relación directa con el contenido orgánico y con el parámetro θ_s . Aunque para otras fracciones el contenido orgánico se relacionó inversamente (Tabla 2).

Para la arcilla limosa, el modelo (ec. [9a]) que conjuga buena correlación y simpleza fue de tres variables (densidad húmeda, contenido orgánico y parámetro θ_r , columna B). Para la textura franco arcillo-limosa podría seleccionarse un modelo de cuatro variables (densidad húmeda, Ph, contenido orgánico y curtosis adimensional, columna B) con un r^2 aceptable (ec. [9b]). Para la textura franco limosa el modelo de tres variables (densidad húmeda, contenido orgánico y parámetro θ_s , columna F) presenta un ajuste similar a las restantes combinaciones con menos variables (ec. [9c]) aunque la correlación obtenida es pobre. Las ecuaciones de regresión seleccionadas son las siguientes:

$$\alpha = 0.1264 - 0.0777\delta_h - 0.00334CO + 0.1165\theta_r, (r^2 = 0,7318) \quad [9a]$$

$$\alpha = 0.2117 - 0.1444\eta - 0.0535\delta_h + 0.001325Ph - 0.021\beta_2, (r^2 = 0,7346) \quad [9b]$$

$$\alpha = 0.1888 - 0.0863\delta_s + 0.003459CO + 0.117\theta_s, (r^2 = 0,3294) \quad [9c]$$

donde CO es el contenido orgánico (%), Ph concentración de hidrogeniones y δ_s densidad seca (g/cm^3).

Tabla 2. Regresiones lineales entre el parámetro α y características físicas y granulométricas.

	α	Arcilla Limosa			Franco arcillo limoso				Franco Limoso				
		Variables	PF	TVS	B	PF	TVS	B	F	PF	TVS	B	F
Caract. físicas	Densidad húmeda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Densidad seca										-	-	-
	Porosidad				-	-				+	-		
	Ph							+					
	Contenido orgánico				-	-					+	+	+
Características granulométrica	d_m			-			+						
	d_g			+									
	σ											+	
	σ_g			+								-	
	β_1							-					-
	β_2							-					
	CV_g												
	s_k												
	K												
Parámetros	θ_r												
	θ_s										+	+	+
	α												
	n												
	Coef. Determ. r^2	0.5413	0.7338	0.7318	0.4461	0.4835	0.7346	0.4049	0.2201	0.3442	0.3808	0.3294	

El parámetro n es el que presenta menores coeficientes de determinación comparativamente con los otros parámetros. Se observó que está relacionado en forma inversa con la densidad húmeda y el parámetro α para la textura franco limosa y en forma directa con la porosidad para la textura franco arcillo limosa (Tabla 3).

Para la arcilla limosa, la relación lineal con el parámetro θ_r (columnas TVS y B) presentó un r^2 aceptable (ec. [10a]). Para la textura franco arcillo-limosa predominó una relación lineal directa con la porosidad (columnas PF, TVS y F) aunque con bajos coeficientes de determinación (ec. [10b]). Para la textura franco limosa un modelo de dos variables (densidad húmeda y parámetro α ,

columna F) presenta un ajuste intermedio a los restantes aunque con bajo r^2 (ec. [10c]). Las ecuaciones de regresión seleccionadas son las siguientes:

$$n = 1.1466 + 1.3161\theta_r, (r^2 = 0,7209) \quad [10a]$$

$$n = 0.7971 + 0.9498\eta, (r^2 = 0,2481) \quad [10b]$$

$$n = 1.56 - 0.1183\delta_h - 3.8565\alpha, (r^2 = 0,1458) \quad [10c]$$

Regresiones no lineales entre variables

En términos generales cabe la observación que se han probado relaciones multiplicativas del tipo: $y = ax^b$ ó bien, en su forma linealizada, $\log y = \log a + b \log x$. Las variables seleccionadas para las regresiones no lineales fueron las mismas que las que se plantearon para las regresiones lineales, esto fue así para poder comparar las bondades de una u otra.

En el caso del parámetro θ_s , las ecuaciones de regresión ajustadas para la arcilla limosa (ec. [11a]), la textura franco arcillo-limosa (ec. [11b]) y la textura franco limosa (ec. [11c]) son las siguientes:

$$\theta_s = 1.9637\eta^{2.3463}\delta_h^{0.9353}, (r^2 = 0,9336) \quad [11a]$$

$$\theta_s = 1.2094\eta^{0.6195}d_g^{0.2347}, (r^2 = 0.6945) \quad [11b]$$

$$\theta_s = 0.4184 \frac{\eta^{0.2293}}{\delta_h^{0.3289} CV_g^{0.0648}}, (r^2 = 0.4951) \quad [11c]$$

En el caso del parámetro α , las ecuaciones de regresión ajustadas para la arcilla limosa (ec. [12a]), la textura franco arcillo-limosa (ec. [12b]) y la textura franco limosa (ec. [12c]) son las siguientes:

$$\alpha = 0.1809 \frac{CO^{0.1258}\theta_r^{4.8549}}{\delta_h^{0.0412}}, (r^2 = 0,6861) \quad [12a]$$

$$\alpha = 0.0000543 \frac{Ph^{3.6204}}{\eta^{6.4434}\delta_h^{6.4338}\beta_2^{4.6156}}, (r^2 = 0,4956) \quad [12b]$$

$$\alpha = 4.4238 \frac{\theta_s^{2.131} CO^{0.165}}{\delta_s^{4.4515}}, (\rho^2 = 0.1573) \quad [12c]$$

En el caso del parámetro n , las ecuaciones de regresión ajustadas para la arcilla limosa (ec. [13a]), la textura franco arcillo-limosa (ec. [13b]) y la textura franco limosa (ec. [13c]) son las siguientes:

$$n = 3.1762 \frac{\eta^{1.9852} \delta_h^{1.4555}}{\alpha^{0.0123}}, (r^2 = 0,2549) \quad [13a]$$

$$n = 1.6305 \eta^{0.3614}, (r^2 = 0.2956) \quad [13b]$$

$$n = \frac{0.9795}{\alpha^{0.0677} \delta_h^{0.0464}}, (r^2 = 0.2552) \quad [13c]$$

Como puede observarse los coeficientes de correlación son menores a los obtenidos para la regresión lineal en la mayoría de los casos. Es decir que las regresiones no lineales no han aportado beneficios considerables a las correlaciones.

En términos generales se observa una correlación entre los parámetros tanto para las regresiones lineales como para las no lineales, ej. $\alpha = f(\theta_s)$. $n = f(\alpha)$.

Para la textura franco limosa, con mayor cantidad de muestras, las correlaciones con variables granulométricas y físicas fueron bajas, especialmente para el α y el n . Esto pone de manifiesto que el conjunto de variables consideradas parece no ser suficiente para explicar las propiedades hidráulicas del suelo.

Tabla 3. Regresiones lineales entre el parámetro n y características físicas y granulométricas.

	n	Arcilla Limosa			Franco arcillo limoso				Franco Limoso				
		PF	TVS	B	PF	TVS	B	F	PF	TVS	B	F	
Caract. físicas	Densidad húmeda											-	-
	Densidad seca												
	Porosidad				+	+			+				
	Ph									-			
	Contenido orgánico	+											
Características granulométrica	d_m												+
	d_g												-
	σ												-
	σ_a												+
	β_1												-
	β_2												
	CV_g												
	s_k												
Parámetros	θ_r			+	+								
	θ_s												
	α											-	-
	n												-
	Coef. Determ. r2	0.3467	0.7209	0.7209	0.2481	0.2481	0.4986	0.2481	0.048	0.1331	0.4031	0.1458	

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 θ_s , α y n del modelo de van Genuchten a los datos obtenidos de las muestras en campo y en laboratorio (totalizando 141 muestras), obteniéndose elevados coeficientes de determinación.

Paralelamente se procesaron las curvas granulométricas de las muestras obteniéndose un conjunto de características estadísticas de las mismas, las que se relacionaron con los parámetros hidráulicos, junto con las propiedades físicas de las muestras.

Las regresiones lineales múltiples planteadas entre los parámetros y características físicas de las muestras solamente (densidad húmeda, porosidad, P_h , contenido orgánico) han ofrecido bajos coeficientes de determinación. La incorporación de propiedades granulométricas en las relaciones presentó una mejoría notable en algunos casos y aceptable en otros. En general contribuyó positivamente.

Se observó como tendencia general para las texturas analizadas que el parámetro θ_s está relacionado en forma directa con la porosidad e inversamente con la densidad húmeda.

Para el parámetro α se observó, como tendencia general en las texturas analizadas, que está relacionado en forma inversa con la densidad húmeda. Para la textura franco limosa se observó una relación directa con el contenido orgánico y con el parámetro θ_s . Aunque para otras fracciones el contenido orgánico se relacionó inversamente.

Se observó que el parámetro n está relacionado en forma inversa con la densidad húmeda y el parámetro α para la textura franco limosa y en forma directa con la porosidad para la textura franco arcillo limosa.

Los coeficientes de correlación obtenidos con ecuaciones de regresión no lineales son menores a los obtenidos para la regresión lineal en la mayoría de los casos. Es decir que las regresiones no lineales no han aportado beneficios considerables a las correlaciones.

Los resultados alcanzados al presente motivan un estudio a posteriori más profundo, ya que se pone de manifiesto que el conjunto de variables consideradas parece no ser suficiente para explicar las propiedades hidráulicas del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basile, P.A. 2001. "On the Number of Fractions to Compute Transport of Sediment Mixtures", International Journal of Sediment Research, ISSN 1001-6279, Vol.16, N°3, pp. 399-407.
- 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.
- 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.
- 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. 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.
- Zimmermann E. 2006. "Estimación de funciones hidráulicas de suelos limosos: valores de referencia y regresiones con parámetros físicos". Cuadernos del CURIHAM. PHI-UNESCO. ISSN 1514-2906. Catálogo Latindex No. 1715. Vol. 11 (1). En prensa.