

Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos (Llanura Argentina)

E. D. Zimmermann y P. A. Basile

Dres. 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 han utilizado diferentes procedimientos para estimar propiedades hidráulicas de suelos limosos, representativos de un sector de la llanura argentina, partiendo de información granulométrica, y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se utilizaron valores de referencia característicos propuestos por Rawls *et al.*, (1982), Carsel y Parrish (1988) y Zimmermann (2006a, 2006b) para las composiciones texturales de las 321 muestras analizadas, funciones de pedotransferencia (FPT) incluidas en los códigos SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003) y Rosetta (Schaap *et al.*, 1999) junto con regresiones lineales entre parámetros hidráulicos y físicos ajustadas con datos de UNSODA (Zimmermann y Basile, 2006, 2007). Los pronósticos se comparan con valores obtenidos mediante calibraciones de modelos matemáticos hidrológicos y resultados de ensayos compilados de estaciones de INTA. Se concluyó que los procedimientos que emplean las FPTs son los que mejor pronostican los parámetros hidráulicos, principalmente el código Rosetta. Desde un punto de vista hidrológico, se pudo simplificar el comportamiento del perfil de suelo en dos procesos principales: (a) la retención de humedad cuyo horizonte dominante es el "A" (franco limoso) y (b) la transmisión del flujo vertical dominado por las características del "B" (arcilla limosa). En contraste a un buen pronóstico de valores medios de los parámetros hidráulicos para el conjunto de las muestras analizadas, el análisis individual de cada una, reveló una gran dispersión entre los diferentes procedimientos empleados dando la pauta que los predictores se deben emplear con precaución.

Palabras clave: función de pedotransferencia, llanura argentina, parámetros hidráulicos, suelos limosos

Use of pedotransfer function for estimation of hydraulic parameters of silty soils (Argentinean Flatlands)

ABSTRACT

In this work, different procedures have been used to estimate hydraulic properties of silty soils, representative of a sector of the Argentinean flatlands. It was used grain size, and physical-chemical information of soil maps printed by the National Agriculture Technology Institute (INTA). Characteristic reference values (Rawls et al., 1982; Carsel and Parrish, 1988; Zimmermann 2006a, 2006b), pedotransfer functions (PTF) included in the codes SOILPAR (Acutis and Donatelli, 2003) and Rosetta (Schaap et al., 1999) together with linear regressions among hydraulic parameters and physiqués properties (Zimmermann and Basile, 2006, 2007) were used for 321 analyzed samples of soils. Forecasts are compared with values obtained by calibrations of hydrological mathematical models and results of field data of INTA. Results showed that the procedures, which use PTFs had better prediction of hydraulic parameters, mainly the code Rosetta. From a hydrological point of view, it could be simplify the soil profile behavior in two main processes: (a) the retention of moisture which is handled by properties of horizon "A" (silty loam) and (b) the transmission of the vertical flow which is handled by characteristics of horizon "B" (silty clay). In contrast to a good forecast of average values of the hydraulic parameters, a great dispersion among the different used procedures was found. Consequently the methods should be used with caution.

Keywords: argentinean flatlands, hydraulic parameters, pedotransfer functions, silt soils

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, 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 θ , el contenido volumétrico de humedad, $k(\theta)$ la conductividad hidráulica no saturada, $\psi(\theta)$ el potencial mático del suelo y $D(\theta)$ el coeficiente de difusividad. En trabajos previos (Zimmermann 2006a, 2006b) se han estimado, para los suelos típicos de la llanura pampeana santafecina, valores de referencia de los parámetros que gobiernan sus funciones hidráulicas. Estos valores fueron obtenidos de distintas fuentes de información: calibraciones de modelos matemáticos hidrológicos (Zimmermann, 2003), resultados de ensayos compilados de estaciones de INTA y las curvas de retención calibradas (Zimmermann 2006b) con la información de la base de datos pública recopilada por el departamento de agricultura de EEUU, USDA, denominada UNSODA (Leij *et al.*, 1996). En el mismo trabajo se propusieron regresiones entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos (densidad húmeda, contenido orgánico, porosidad y pH) con el fin de pronosticar los primeros en función de los demás parámetros.

Utilizándose la misma base de datos UNSODA se han propuesto regresiones lineales y no lineales entre parámetros hidráulicos de la curva de retención y parámetros físicos y granulométricos de las muestras de suelo (Zimmermann y Basile, 2006, 2007). Existen otros modelos de pedotransferencia tales como el SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003) y Rosetta (Schaap *et al.*, 1999) que proponen relaciones similares que han sido ajustadas a otras bases de información edafológica. En este trabajo todas las propuestas mencionadas precedentemente se han aplicado a perfiles tipo de suelos pampeanos y se han comparado con el objetivo de analizar su semejanza en los resultados.

Parámetros del suelo para curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica no saturada

Existen métodos indirectos para generar las propiedades hidráulicas de suelos, que varían en términos de metodología y complejidad, pudiendo distinguirse tres grupos principales: los métodos basados en la distribución del tamaño de poros, los métodos inversos y las funciones de pedotransferencia. Los primeros se usan frecuentemente para estimar conductividad hidráulica no saturada y la curva de retención de humedad con las funciones de Brooks-Corey o Van Genuchten. Se han propuesto métodos cuasi-físicos que usan el concepto de similitud de la forma entre distribuciones del tamaño de poros y de la partícula (Arya y París, 1981; Haverkamp y Parlange, 1986; Tyler y Wheatcraft, 1989). Los métodos inversos están basados en la resolución numérica de la ecuación de Richards (1931) junto un algoritmo de optimización y paralelamente mediciones de campo o laboratorio. Ajustando los resultados del modelo a los medidos se puede obtener los parámetros hidráulicos del suelo en forma indirecta. Los métodos inversos son a menudo vulnerables por la no unicidad de los resultados, es decir, dos o más juegos de parámetros optimizados pueden ser aplicables al problema estudiado.

Las funciones de pedotransferencia (FPT) ofrecen un tercer método para estimar propiedades hidráulicas usando el hecho que las mismas se relacionan con la composición textural del suelo entre otra información taxonómica disponible. (ej., la distribución de tamaño de partículas, densidad aparente, contenido de materia orgánica, etc.). Sin embargo, la gran mayoría de FPTs son completamente empíricas y no usan ningún concepto físico.

Hay diferentes tipos de FPTs. Un primer tipo se basa en clasificar los suelos por su composición textural y asignar iguales parámetros asumiendo que suelos similares tienen parámetros hidráulicos similares (ej. Carsel y Parrish, 1988 y Rawls *et al.*, 1982). Otro grupo de FPT se basan en ecuaciones de regresión lineal y/o no lineal ofreciendo una solución con propiedades hidráulicas que varían en forma continua a través del triángulo de clasificación textural del USDA. Las predicciones pueden ser mejoradas usando propiedades físicas del suelo como información adicional tales como la densidad aparente, porosidad o contenido de materia orgánica (Rawls y Brakensiek, 1985; Vereecken *et al.*, 1989; Zimmermann y Basile, 2006, 2007, en suelos de un sector pampeano de Argentina). Otros autores mejoran la predicción incluyendo uno o más puntos de la curva de retención (Rawls *et al.*, 1992; Williams *et al.*, 1992).

Muchos procedimientos de funciones de pedotransferencia están disponibles aunque pueden producir diferentes estimaciones. El usuario deberá seleccionar la FPT más apropiada para su aplicación. Para la implementación práctica de las FPT se han desarrollado varios códigos de cálculo entre los que pueden mencionarse los programas Rosetta y SoilPar. Ambos fueron utilizados en este trabajo y se describen sucintamente a continuación.

Programa Rosetta

Rosetta implementa funciones de pedotransferencia que predicen las curvas de retención y conductividad basadas en ajustes de composición textural, densidad aparente y en uno o dos puntos de la curva de retención (punto de marchitez permanente y/o capacidad de campo). Rosetta fue desarrollado por Marcel G. Schaap en el United States Salinity Laboratory (USDA), Riverside, California supervisado por Leij y van Genuchten. Esta versión del software refleja el estado del arte en las FPTs hasta el año 1999.

Este programa emplea para el ajuste de parámetros redes neuronales para mejorar las predicciones de las FPTs empíricas. Los parámetros hidráulicos óptimos, relacionados con datos de la entrada (tamaño de partícula, densidad aparente, etc.) se obtienen mediante un procedimiento de calibración iterativo. Diversos autores opinan que los ajustes alcanzados superan los de los métodos anteriormente mencionados (Schaap *et al.*, 1998). El software es de distribución libre y gratuita y puede obtenerse mayor información consultando la página web <http://www.ussl.ars.usda.gov>.

Programa SOILPAR

SOILPAR 2.0 es un programa para estimar parámetros hidráulicos del suelo desarrollado por Marco Acutis (Departamento de Ingeniería Agrícola y Agronomía Territorial, Nápoles, Italia) y Marcello Donatelli (Instituto de Investigación para Cultivos Industriales, Bologna, Italia). El programa permite guardar información de suelos en un banco de datos georeferenciado, estimar parámetros hidráulicos de suelos usando varios procedimientos incorporados al programa, comparar las estimaciones contra datos medidos en forma gráfica y/o tabulada, y crear mapas.

Once métodos estiman uno o más de las características siguientes: contenido de humedad para diferentes tensiones matriciales, conductividad hidráulica

ca saturada, y densidad aparente (tabla 1). Tres métodos estiman los parámetros de curvas de retención (Brooks-Corey, Hutson-Cass, Van Genuchten), y un método para estimaciones de conductividad hidráulica no saturada y parámetros de curvas de retención (Campbell). El software corre bajo Windows 98/NT/2000/XP y es de acceso libre vía internet.. El programa permite el ajuste de parámetros para las curvas de retención, en caso de contar con datos medidos de contenido de humedad y potencial matricial mediante un procedimiento de calibración no lineal. El mismo está basado en el método simplex con restricciones, para evitar inconsistencias físicas en los valores ajustados. SOILPAR es un software disponible gratuito con propósitos no-comerciales. El paquete de la instalación puede obtenerse de: <http://www.isci.it/tools>.

Parámetros del suelo de fracciones texturales limosas

La llanura chaco-pampeana de Argentina, de clima templado húmedo, está caracterizada por un relieve de moderada pendiente topográfica. El área meridional de la provincia de Santa Fe, motivo de interés en

Estimación puntual de valores específicos			
Método	Variables requeridas	Parámetros estimados	Fuentes
Baumer	DTP, CO	DA, CC, PMP	Software EPIC/ASW
Brakensiek/Rawls	DTP, CO DA	CH	Hutson and Wagenet, 1992
British Soil Survey subsoil	DTP, CO, DA	CH	Hutson and Wagenet, 1992
British Soil Survey topsoil	DTP, CO, DA	CH	Hutson and Wagenet, 1992
Manrique	DTP, DA	CC, PMP	Software EPIC/ASW
Hutson	DTP	DA, CH	Hutson and Wagenet, 1992
Manrique	DTP, DA	CC, PMP	Software EPIC/ASW
Rawls	DTP	DA, CC, PMP	Software EPIC/ASW
Jabro	DTP, DA	Ks	Jabro (1992)
Jaynes-Tyler	DTP, DA	Ks	Jaynes and Tyler (1984)
Puckett	DTP	Ks	Puckett et al. (1985)
Campbell	DTP, DA	Ks	Campbell (1985)
Estimación de parámetros de las curvas de retención de humedad			
Método	Variables requeridas	Parámetros estimados	Fuentes
Rawls y Brakensiek	DTP, DA	parámetros de Brooks y Corey	Rawls y Brakensiek (1989)
Vereecken	DTP, DA	Parámetros de van Genuchten	Vereecken et al. (1989)

Referencias

Todos los métodos pueden aplicarse conociendo de la distribución de tamaño de partículas (DTP), al menos la clasificación textural en arenas, limos y arcilla. El método de Campbell es el único que necesita el conocimiento de siete clases de DTP. CO, carbono orgánico. DA, densidad aparente. CC, capacidad de campo. PMP, punto de marchitez permanente. CH, contenido de humedad para diferentes tensiones matriciales. Ks, Conductividad hidráulica saturada.

Tabla 1. Métodos empleados en el software SoilPar para estimación de parámetros hidráulicos

Table 1. Methods used in software SoilPar for hydraulic parameter estimation

este estudio (figura 1), presenta un módulo pluviométrico del orden de los 1000 mm y la temperatura media anual del orden de los 17 °C. La unidad estratigráfica superior del paquete sedimentario, que constituye el sustrato geológico de los sistemas hidrológicos, está compuesta por el loess de la formación pampeana, integrada por limos y arcillas de colores castaños. El espesor en el sector de análisis varía entre 30 y 150 metros. Los mapas de suelos disponibles en la provincia de Santa Fe, elaborados por el 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.

Valores previos de referencia

Con fines de caracterizar los suelos típicos de la llanura pampeana (Santa Fe, Argentina), se obtuvieron, en trabajos previos al presente, valores de referencia de propiedades hidráulicas desde distintas fuentes de información. En principio, se contó con resultados de ensayos en laboratorio para un grupo de seis mues-

tras de suelo extraídas por INTA Oliveros (provincia de Santa Fe). Las muestras representan horizontes A y B bajo usos de suelo diferentes: pasturas y uso agrícola. Las muestras se clasificaron en arcilla-limosa para las del horizonte B y franco-limosa para las del horizonte A. En segundo lugar, se realizó el procesamiento de curvas de retención obtenidas de la base UNSODA para las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcilla limosa (Zimmermann, 2006a, 2006b), las cuales son características de los suelos del sur de Santa Fe (Argentina). Los parámetros fueron humedad de saturación θ_s , α y n del modelo de retención de humedad de van Genuchten (1980), cuya expresión es la siguiente:

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

donde S_e es la saturación efectiva, θ_s y θ_r son los contenidos de humedad para medio saturado y a saturación irreductible, respectivamente, y αm y n son parámetros empíricos. Los mismos se ajustaron a las curvas de campo y laboratorio, presentes en la base UNSODA, totalizando 141 muestras. Este criterio obedece al primer tipo de FPTs, es decir, asignar iguales parámetros para las mismas composiciones texturales.

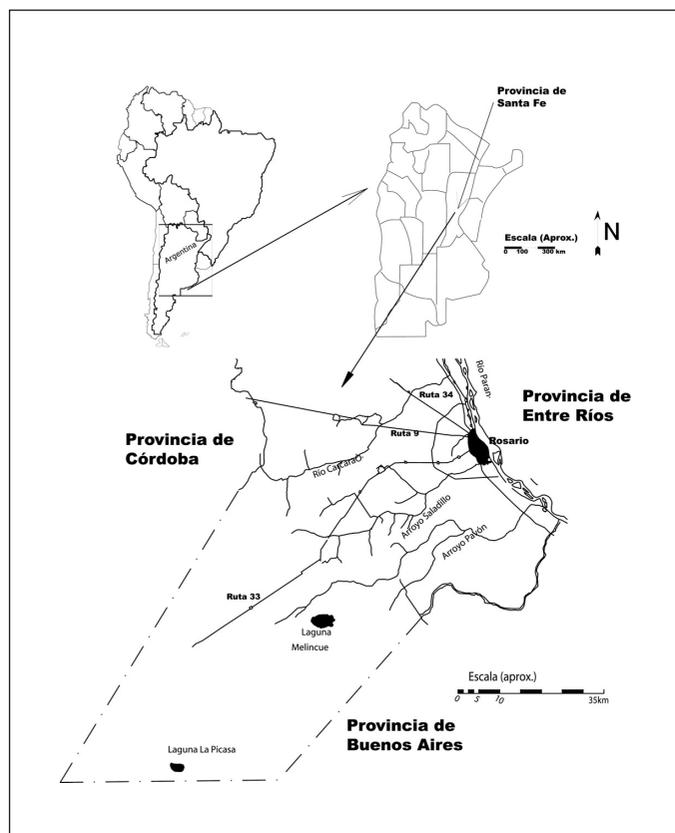


Fig. 1. Area de estudio: sector meridional de Santa Fe
Fig. 1. Study area: southern sector of Santa Fe province

ARCILLA LIMOSA	
$\theta_s = 0.8757 + 0.0847\eta - 0.3188\delta_h$,	($r^2 = 0,9353$)
$\alpha = 0.1264 - 0.0777\delta_h - 0.00334CO + 0.1165\theta_s$,	($r^2 = 0,7318$)
$n = 1.1466 + 1.316\theta_s$,	($r^2 = 0,7209$)
FRANCO ARCILLO-LIMOSO	
$\theta_s = 0.1261 + 0.4006\eta + 1.273d_g$,	($r^2 = 0,7505$)
$\alpha = 0.2117 - 0.1444\eta - 0.0535\delta_h + 0.001325Ph - 0.021\beta_2$	($r^2 = 0,7346$)
$n = 0.7971 + 0.9498\eta$,	($r^2 = 0,2481$)
FRANCO LIMOSO	
$\theta_s = 0.5318 + 0.1578\eta - 0.1528\delta_h + 0.0003682CV_g$,	($r^2 = 0,5027$)
$\alpha = 0.1888 - 0.0863\delta_h + 0.003459CO + 0.117\theta_s$,	($r^2 = 0,3294$)
$n = 1.56 - 0.1183\delta_h - 3.8565\alpha$,	($r^2 = 0,1458$)
REFERENCIAS:	
η (adimensional) porosidad, δ_h (g/cm^3) densidad húmeda, CO (%) contenido orgánico, Ph concentración de hidrogenos y δ_s (g/cm^3) densidad seca, d_g diámetro geométrico, β_2 curtosis adimensional, CV_g coeficiente de variación geométrica. Estos últimos parámetros granulométricos se obtienen de la siguiente forma:	
Escala sedimentológica ϕ : $\phi = -\log_2 d$ siendo d diámetro de la partícula. Los parámetros estadísticos considerados para las distribuciones granulométricas son diámetro medio ϕ_m , desvío Estándar σ , curtosis K , curtosis adimensional β_2 . Los mismos se calculan en la escala ϕ de la siguiente manera:	
$\phi_m = \sum_{i=1}^N \phi_i f_i$, $\sigma = \left[\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_m)^2 f_i \right]^{1/2}$, $K = \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_m)^3 f_i$, $\beta_2 = \frac{K}{\sigma^4}$ donde f_i es la fracción en peso asociada al diámetro d_i . 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:	
$d_g = 2^{-\phi_m}$, $\sigma_g = 2^\sigma$, $CV_g = \frac{\sigma_g}{d_g}$	

Tabla 2. Ecuaciones ajustadas entre parámetros hidráulicos, físicos y granulométricos para las texturas analizadas
Table 2. Fitted equations between hydraulic, physical and granulometric parameters for analyzed textures

Como tercer elemento de juicio, se contó con valores de parámetros calibrados con el modelo SHALL3 (Zimmermann y Riccardi, 2003). El modelo contempla las interacciones entre los procesos de superficie, en la zona no saturada (ZNS) y en la zona saturada. Es de tipo continuo y físicamente basado. Los intercambios de flujos en la ZNS son representados mediante la resolución numérica de la ecuación de Richards. 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 en el período 1994-1996 (Zimmermann, 2003). Dado que los mismos fueron ajustados en forma global para la cuenca, sólo constituyen valores de referencia generales.

Posteriormente en trabajos más recientes (Zimmermann y Basile, 2006, 2007), se plantearon regresiones lineales múltiples entre parámetros hidráulicos y otras características físicas y granulométricas de las muestras extractadas de la base UNSODA. Se realizó un análisis multivariado extrayendo las variables correlacionadas de manera más significativa, realizando esto para cada fracción textural de suelo y para cada parámetro hidráulico, considerando todas las variables físicas y granulométricas. Las ecuaciones de regresión seleccionadas se muestran en la tabla 2.

El objetivo de este trabajo, entonces, consistió en la aplicación y comparación del conjunto de procedimientos descriptos para estimar parámetros hidráulicos del suelo a las muestras de suelos presentes en la región de estudio.

Aplicación de Soilpar y Rosetta a las series de suelos típicas en la región sur de la provincia de Santa Fe (Pampa húmeda argentina)

A los fines de aplicar los procedimientos descritos se contó con información elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), que caracteriza los perfiles de suelos presentes en el área de estudio. De las cartas de suelos disponibles se extrajo la información de los perfiles tipo siguientes: A.Juarez, Los Nogales Arequito, Maizales, Casilda, Monte Fiore, Chabas, Pergamino, Faustina, Peyrano, Gelly, Roldan, Hansen, Santa Lucia, Huemul, Villada, Juncal, VillaEloisa, Las Gamas, Zavalla, Lima.

En cada perfil, en función de su profundidad y su estratigrafía, se detallan entre 3 y 8 sub-horizontes de los cuales, de las cartas de suelo, se publicó la granulometría, junto a otros parámetros bio-físicos tales como contenido de materia orgánica, capacidad de

	Unidades	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
Profundidad	(m)	0.18	0.27	0.48	0.76	1.04	1.28	1.80	2.10
Densidad seca (Rawls)	(t/m ³)	1.46	1.44	1.42	1.38	1.39	1.42	1.45	1.44
PMP (Brakensiek & Rawls)	(m/m)	0.19	0.22	0.22	0.28	0.23	0.19	0.14	0.16
CC (Brakensiek & Rawls)	(m/m)	0.39	0.42	0.40	0.46	0.40	0.35	0.31	0.32
Contenido de arena muy gruesa	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Contenido de arena gruesa	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Contenido de arena mediana	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Arena fina	(%)	2.00	1.50	1.00	1.00	1.50	1.00	1.80	1.30
Arena muy fina	(%)	8.20	5.50	4.20	2.50	4.60	6.90	9.80	6.90
Contenido de limo	(%)	69.90	64.40	61.70	49.60	55.80	62.80	67.80	68.20
Contenido de arcilla	(%)	19.87	28.57	33.07	46.87	38.07	29.27	20.57	23.57
coarse fragment content	(%)								
Materia orgánica	(%)	2.55	2.29	1.22	0.99	0.49	0.27	0.15	0.10
Capac. Intercambio Catiónico	(cmol/kg)	16.70	19.30	21.40	30.60	29.80	24.70	18.80	20.60
pH - en agua		6.20	6.40	6.60	7.00	7.10	6.80	7.50	8.20
Humedad a 10 (-J/kg)	(m/m)								
Humedad a 20 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	0.43	0.46	0.44	0.49	0.44	0.39	0.35	0.36
Humedad a 30 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	0.39	0.42	0.41	0.46	0.40	0.35	0.31	0.32
Humedad a 50 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	0.34	0.38	0.37	0.42	0.36	0.32	0.27	0.28
Humedad a 100 (-J/kg) (Brakensiek & Rz)	(m/m)	0.31	0.34	0.33	0.39	0.33	0.29	0.24	0.26
Humedad a 500 (-J/kg) (Brakensiek & Rz)	(m/m)								
Humedad a 1500 (-J/kg) (Brakensiek & F)	(m/m)	0.19	0.22	0.23	0.28	0.23	0.19	0.15	0.16
Conductividad Hidráulica saturada (Puck)	(mm/h)	31.01	5.56	2.29	0.15	0.85	4.84	27.00	14.93
vanGenuchten α	(1/cm)	0.0014	0.0010	0.0017	0.0010	0.0019	0.0036	0.0051	0.0053
vanGenuchten m	(adim)	0.53	0.19	0.17	0.14	0.41	0.35	0.37	0.33
vanGenuchten n	(adim)	2.14	1.24	1.21	1.16	1.68	1.54	1.58	1.48
vanGenuchten θ_r	(adim)	0.18	0.01	0.03	0.02	0.20	0.16	0.13	0.13

Referencias: Los valores en *italica* son estimados aplicando el programa SoilPar.

Tabla 3. Propiedades granulométricas, físicas e hidráulicas estimadas para la serie Casilda

Table 3. Granulometric, physical and hydraulic properties estimated for Casilda's serie

intercambio catiónico, pH, etc. El conjunto de estratos para todas las series estudiadas totalizan 321 muestras de suelo.

A manera de ejemplo se presenta en la tabla 3 los datos y estimaciones realizadas con el software SoilPar para la serie Casilda, con sus 8 estratos. El mismo trabajo se realizó para cada uno de los horizontes de las series, obteniéndose densidades aparentes, humedades para capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y otras tensiones matriciales, conductividad hidráulica saturada y parámetros de van Genuchten para la curva de retención de humedad. Dicha información fue utilizada para aplicar el software Rosetta bajo tres diferentes grados de información de entrada: (a) composición textural (arena, limo y arcilla, SSC), (b) composición textural y densidad aparente (SSCB) y (c) lo anterior junto a humedades de CC y PMP. Para la clasificación textural de las muestras se consideraron los contenidos de arena, limo y arcilla disponibles como información en la base del INTA. Fueron aplicadas también las ecuaciones lineales de las regresiones multivariadas presentadas en el parágrafo anterior.

Resultados y Discusión

Los resultados de la aplicación de estos criterios conjuntos se muestran en la tabla 4. Allí se muestra los valores de referencia para las texturas analizadas conjuntamente con los que se obtuvieron en este trabajo tras aplicar las FPTs mencionadas en los programas

Autores	K_s (cm/h)	α 1/cm	n (-)
ARCHILLA LIMOSA			
Rawls et al., 1982	0,050	0,029 (<i>0,140-0,006</i>)	1,15 (<i>1,04-1,26</i>)
Carsel y Parrish, 1988	-	0,005 ± 0,005	1,09 ± 0,06
Zimmermann (2006b) UNSODA (14 muestras)	-	0,025 ± 0,026	1,22 ± 0,22
SoilPar (18 muestras - suelos locales)	1,302 (Jabro)		1,22
	0,018 (Puckett)	0,001	1,22
Rosetta SSCB $\theta_{33-0,1500}$ (18 muestras - suelos locales)	0,232	0,004	1,32
Rosetta SSCB (18 muestras - suelos locales)	0,405	0,014	1,36
Rosetta SSC (18 muestras - suelos locales)	0,712	0,014	1,35
Horizonte B Oliveros	-	0,004	1,20
FRANCO ARCILLO-LIMOSO			
Rawls y otros, 1982	0,100	0,031 (<i>0,150-0,006</i>)	1,18 (<i>1,04-1,32</i>)
Carsel y Parrish, 1988	-	0,010 ± 0,006	1,23 ± 0,06
Zimmermann (2006b) UNSODA (25 muestras)	-	0,015 ± 0,019	1,22 ± 0,10
SoilPar (84 muestras - suelos locales)	0,872 (Jabro)		1,58
	0,339 (Puckett)	0,002	1,41
Rosetta SSCB $\theta_{33-0,1500}$ (84 muestras - suelos locales)	0,391	0,005	1,41
Rosetta SSCB (84 muestras - suelos locales)	0,376	0,008	1,52
Rosetta SSC (84 muestras - suelos locales)	0,482	0,008	1,51
FRANCO LIMOSO			
Rawls y otros, 1982	0,650	0,048 (<i>0,279-0,008</i>)	1,23 (<i>1,11-1,36</i>)
Carsel y Parrish, 1988	-	0,020 ± 0,012	1,41 ± 0,12
Zimmermann (2006b) UNSODA (114 muestras)	-	0,014 ± 0,018	1,34 ± 0,17
SoilPar (219 muestras - suelos locales)	0,871 (Jabro)		1,60
	4,214 (Puckett)	0,004	1,60
Rosetta SSCB $\theta_{33-0,1500}$ (219 muestras - suelos locales)	0,678	0,005	1,50
Rosetta SSCB (219 muestras - suelos locales)	0,576	0,006	1,62
Rosetta SSC (219 muestras - suelos locales)	0,612	0,006	1,62
Horizonte A Oliveros	-	0,004	1,33
Parámetros calibrados en la Cuenca del A° Ludueña (Zimmermann 2003)	0,125 (<i>0,225-0,030</i>)	0,004	1,56

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 o rangos máximo-mínimo

Table 4. Comparative values of van Genuchten's parameters obtained for the analyzed textures. Averages values are indicated in bold and standard deviation or range of variation, in italic

Rosetta y SoilPar. Como se aprecia en la tabla 4, las diferentes metodologías empleadas arrojan resultados disímiles, especialmente en la estimación del parámetro α y la conductividad hidráulica saturada K_s que presentan valores de diferente orden de magnitud.

Si se toma como referencia los parámetros medios calibrados mediante modelación matemática hidrológica, puede realizarse una comparación entre las metodologías para definir cuál se aproxima en mayor medida a los mismos. Debe tenerse en cuenta que entre los valores de las muestras y los calibrados para el modelo juega un papel importante el factor de escala. No obstante en este trabajo se ha contemplado los valores calibrados dado que son los únicos valores de referencia disponibles, debiendo interpretarlos como representativos para un "paquete pro-

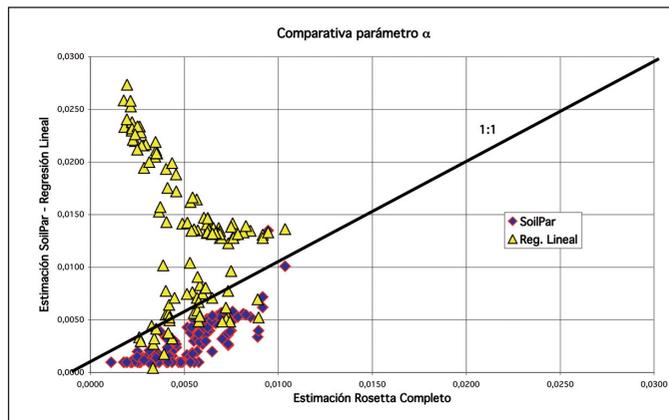


Fig. 2. Estimación de α mediante Rosetta SSCB $\theta_{33-0,1500}$, SoilPar y ecuaciones de Tabla 2

Fig. 2. Estimation of α by Rosetta SSCB $\theta_{33-0,1500}$, SoilPar and equations of Table 2

medio" de suelos compuesto por texturas disímiles, que en la mayoría de los casos responde a la estructura FL-FAL-AL-FAL-FL, es decir:

- franco limosa (horizonte A)
- franco arcillo limosa (transición A-B)
- arcilla limosa (horizonte B)
- franco arcillo limosa (transición B-C)
- franco limosa (horizonte C).

El horizonte determinante para la estimación de la conductividad hidráulica es el B, de textura arcilla limosa, ya que condiciona la conductividad vertical del conjunto del perfil. Por ende la metodología que

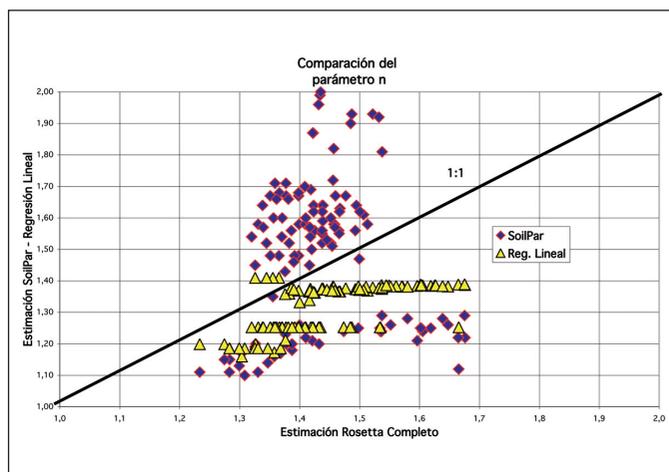


Fig. 3. Estimación de n mediante Rosetta SSCB $\theta_{33-0,1500}$, SoilPar y ecuaciones de Tabla 2

Fig. 3. Estimation of n by Rosetta SSCB $\theta_{33-0,1500}$, SoilPar and equations of Table 2

mejor pronostique K_s para la textura AL será la seleccionada.

En la tabla 4 puede observarse que los métodos basados en la clasificación textural (Rawls *et al.*, 1982) subestiman el valor calibrado. De los métodos basados en las funciones de pedotransferencia SoilPar arroja resultados muy dispares según las funciones seleccionadas (Jabro o Puckett) y un orden de magnitud mayor o menor al valor calibrado, respectivamente. El programa Rosetta con la información completa (clasificación textural, densidad y humedades límites - SSCB 033-01500) es el que mejor se aproxima aunque con un valor cercano al doble del calibrado. En cuanto a los parámetros de la curva de retención, al parámetro concretamente, siguiendo la hipótesis que el horizonte dominante es el B (arcilla limosa), la mejor aproximación es la del programa Rosetta con la información completa aunque las estadísticas de Carsel y Parrish también se acercan mucho al parámetro calibrado (y corroborado con el análisis de Oliveros). Tanto las estadísticas de Rawls *et al.*, los valores promediados obtenidos de la base UNSODA (Zimmermann 2006b), como las estimaciones de SoilPar y Rosetta con información incompleta pronostican valores que se alejan del calibrado.

Respecto al parámetro n de la curva de retención, el valor calibrado se aproxima más para las texturas franco arcillo limosa y franco limosa. En ambos casos, tanto SoilPar como Rosetta con información completa dan las mejores aproximaciones al parámetro calibrado. El resto de los métodos ofrecen valores alejados del n calibrado. Aún más, si se considera

para la curva de retención que el horizonte dominante es el A (franco limoso) tanto SoilPar como Rosetta completo ofrecen las mejores aproximaciones de ambos parámetros (α y n). Esto podría analizarse de la siguiente manera: el horizonte B (arcilla limosa) regula la velocidad con que el agua penetra en el suelo pero el horizonte A (franco limoso) es el que retiene la humedad, y consiguientemente, los parámetros que regulan esa retención son los que caracterizan el horizonte A.

En términos generales, para los parámetros de la curva de retención, tanto los métodos basados en la clasificación textural (Carsel y Parrish, 1988 y Rawls *et al.*, 1982) y los promedios extraídos de UNSODA (Zimmermann, 2006b) no han ofrecido buenos pronósticos.

Hasta aquí se han analizado valores promediados en todas las series y estratos. Si se analizan los valores individuales por estratos las figuras 2, 3 y 4 muestran las comparaciones entre los distintos predictores para α , n y K_s , respectivamente. En la figura 2 se observa que las tendencias en el pronóstico del parámetro α , son muy diferentes entre las metodologías. SoilPar tiende a valores menores que Rosetta mientras que las ecuaciones de regresión (Zimmermann y Basile, 2007) tienden a valores mayores en un orden de magnitud. En la figura 3 se observa una tendencia inversa, siendo las diferencias de menor magnitud que en el caso anterior.

Con respecto al pronóstico de la conductividad hidráulica saturada (figura 4), las tendencias son muy disímiles entre Rosetta y SoilPar, incluso entre las ecuaciones de Puckett y Jabro incluidas en este último software, llegando a valores de un orden de magnitud diferente para la misma muestra de suelos.

Esto da la pauta que se debe considerar con precaución el empleo de estos programas ya que las ecuaciones ajustadas internamente dan resultados muy distintos para una misma caracterización físico-química de un suelo.

Probablemente las muestras utilizadas para el ajuste de las FPTs internas de cada software, aunque presenten la misma clasificación textural, propiedades físicas y químicas semejantes, no permiten un predictor que pronostique comportamientos hidráulicos semejantes. Es decir, hasta el momento no pueden obtenerse ecuaciones aplicables "universalmente".

Conclusiones

Se han utilizado diferentes procedimientos para estimar propiedades hidráulicas de suelos limosos, representativos de un sector de la llanura argentina,

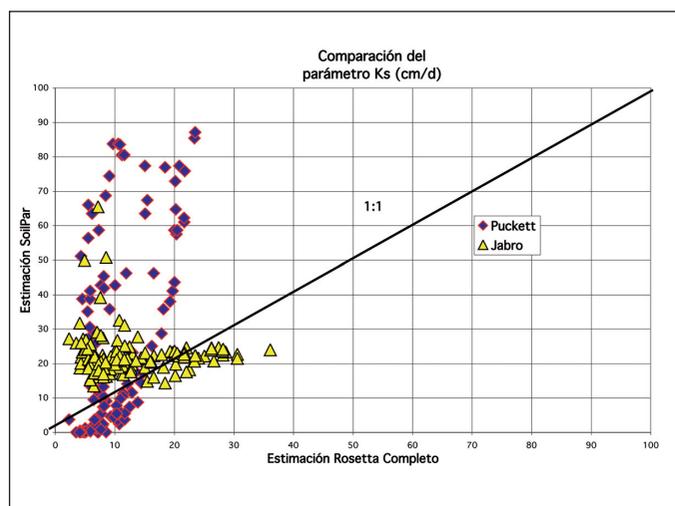


Fig. 4. Estimación de K_s mediante Rosetta SSCB 033-01500, SoilPar mediante ecuaciones de Puckett y Jabro
 Fig. 4. Estimation of K_s by Rosetta SSCB 033-01500, and SoilPar by Puckett and Jabro equation's

partiendo de información granulométrica, y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos de INTA.

En primer lugar se utilizaron valores de referencia característicos propuestos por Rawls *et al.* (1982), Carsel y Parrish (1988) y Zimmermann (2006a, 2006b) para las composiciones texturales de las 321 muestras analizadas. Luego se emplean funciones de pedotransferencia (FPT) incluidas en los códigos SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003) y Rosetta (Schaap *et al.*, 1999) junto con regresiones lineales entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos ajustadas con datos de la base UNSODA (Zimmermann y Basile, 2006, 2007). Finalmente los pronósticos se comparan con valores obtenidos mediante calibraciones de modelos matemáticos hidrológicos (Zimmermann, 2003) y resultados de ensayos compilados de estaciones de INTA.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo pudo concluirse que en general los procedimientos que emplean las FPTs mejoran el pronóstico de parámetros hidráulicos frente a los que proponen valores de referencia en función de la clasificación textural únicamente. Esto se debe a que los primeros contemplan otras variables adicionales tales como densidad aparente, composición granulométrica, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y pH.

Entre los códigos empleados, el que mejor se aproximó a los parámetros hidráulicos calibrados para la zona de estudio fue el programa Rosetta suministrándole la información completa (composición textural, densidad aparente y dos puntos de la curva de retención: punto de marchitez permanente y capacidad de campo). El mismo programa con la información incompleta no arrojó buenos pronósticos. En segundo lugar el programa SoilPar ofreció buena aproximación a los parámetros de la curva de retención. Las ecuaciones de regresión lineal con parámetros físico-químicos exhibieron errores importantes.

Desde un punto de vista hidrológico, se podría simplificar el comportamiento del perfil de suelo, compuesto por horizontes estratificados de características disímiles, en dos procesos principales: (a) la retención de humedad cuyos parámetros dominantes estarían gobernados por las características del horizonte "A" (franco limoso) y (b) la transmisión del flujo vertical de humedad dominado por las características del horizonte "B" (arcilla limosa).

En contraste a un buen pronóstico de valores medios de los parámetros hidráulicos para el conjunto de las muestra analizadas, el análisis individual de cada una, reveló una gran dispersión entre los dife-

rentes procedimientos empleados. Esto da la pauta que los predictores se deben emplear con precaución, analizando las compatibilidades entre las muestras de suelo de estudio y las que se utilizaron originalmente en la propuesta de las ecuaciones intrínsecas de cada FPT. Es decir, hasta el momento no pueden obtenerse ecuaciones aplicables "universalmente".

Referencias

- Acutis, M. and Donatelli, M. 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Europ. J. Agronomy* 18:373-377.
- Arya, L.M., and J.F. Paris. 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:1218-1227.
- Brooks, R.H. y Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Colorado State Univ. Hydrology Papers* No. 3. Fort Collins. 27 pp.
- Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 117:311-314.
- Campbell, G.S., 1985. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil/Plant System*. Elsevier, Amsterdam, 150 pp.
- Carsel, R. F., and R. S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24:755-769.
- Haverkamp, R., and J.Y. Parlange. 1986. Predicting the water-retention curve from particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Sci.* 142:325-339.
- Hutson, J.L., Cass, A., 1987. A retentivity function for use in soil water simulation models. *J. Soil Sci.* 38, 105-113.
- Hutson, J.L., Wagenet, R.J., 1992. LEACHM, Leaching Estimation And Chemistry Model. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences Research series no. 92.3. New York, Cornell University, 121 pp.
- Jabro, J.D., 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Trans. ASAE* 35 (2), 557-560.
- Jaynes, D.B., Tyler, E.J., 1984. Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. *Soil Sci.* 138, 298-305.
- 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.
- Puckett, W.E., Dane, J.H., Hajek, B.F., 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 831-836.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton. 1982. Estimating soil water properties. *Transactions, ASAE*, 25(5):1316-1320.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek.. 1985. Prediction of soil

- water properties for hydrologic modeling. p 293-299. In Jones, E.B. and T.J. Ward (ed.) Watershed management in the eighties. Proc. Irrig. Drain. div., ASCE, Denver, CO. April 30 - May 1. 1985.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel, S. (Ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling. Theory and Practice*. Kluwer academic publishers, 275-300.
- Rawls, W.J., L.R. Ahuja and D.L. Brakensiek. 1992. Estimating soil hydraulic properties from soils data. p 329-340. In M. Th. van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L.J. Lund (ed.). *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*. Proc. Int Worksh. Riverside, CA.. University of California, Riverside, CA.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1:318-333.
- Schaap, M.G., Leij F.J. and van Genuchten M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:847-855.
- Schaap, M.G., Leij F.J., van Genuchten. M. Th., 1999. A bootstrap neural-network approach to predict soil hydraulic parameters. In: van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L. Wu (Eds.), *Proceedings of the International Workshop on Characterization and easurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, University of California, Riverside, CA, 1237-1250.
- Tyler, SW; Wheatcraft, WW. 1989. Application of Fractal Mathematics to Soil Water Retention Estimation. *Soil Science Society of America Journal SSSJD4 Vol. 53, No. 4*, 987-996.
- 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.
- Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.* 148:389-403.
- Williams, R.D., L.R. Ahuja, and J.W. Naney. 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from limited texture, bulk density, and limited data. *Soil Sci.* 153:172-184.
- Zimmermann E y Riccardi G. 2003. *Modelo Hidrológico Superficial y Subterráneo desarrollado para la Simulación de Sistemas de Llanura. 1. Aplicación en el sistema Ludueña (Santa Fe. Argentina)*. *Boletín Geológico y Minero de España*. ISSN 0366-0176. 114(2):147-158. Madrid. España.
- Zimmermann E. 2003. *Modelo Hidrológico Superficial y Subterráneo desarrollado para la Simulación de Sistemas de Llanura. 2. Estrategias para la Calibración*". *Boletín Geológico y Minero de España*. ISSN 0366-0176. 114(2):159-169. Madrid. España.
- Zimmermann, E. 2006a. Funciones hidráulicas de suelos limosos: valores de referencia. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana. Venezuela.
- Zimmermann E. 2006b. Estimación de funciones hidráulicas de suelos limosos. Valores de referencia y regresiones con parámetros físicos. Cuadernos del CURIHAM, UNR Editora. Rosario, 11(1): 49-66.
- Zimmermann, E; Basile, P. 2006. Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones con propiedades físicas y granulométricas. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana. Venezuela.
- Zimmermann, E; Basile, P. 2007. Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones no lineales con propiedades físicas y granulométricas. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán. Argentina.

Recibido: febrero 2008

Aceptado: abril 2008