

EVALUACIÓN DE FUNCIONES DE EDAFOTRANSFERENCIA PARA ESTIMAR LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD PARA USO EN PLANEACIÓN DE LABRANZA

Assessing Pedotransfer Functions to Estimate the Moisture Retention Curve for Use in Tillage Planning

M. Cadena Zapata^{1‡}, S. Campos Magaña², M. Cantú Sifuentes¹ y A. Zermeño González¹

RESUMEN

La planeación para la operación de los sistemas de labranza requiere de información del estado de humedad en el suelo con el fin de determinar los períodos disponibles para realizar las labores con la mejor calidad y menor gasto de energía. La determinación de curvas de retención de humedad de los suelos a laborar es información fundamental en un sistema de planeación y operación de labranza. Sin embargo, en las regiones tropicales de México esta información no está disponible en la actualidad. El producirla para la región es un proceso caro y llevaría mucho tiempo. En este trabajo se evaluaron cuatro funciones de edafotransferencia (FET) con el objetivo de conocer si pueden utilizarse para estimar la curva de retención de humedad de suelos bajo uso agrícola en la zona tropical de Veracruz, México. En caso de que las estimaciones sean adecuadas, éstas pueden usarse para calcular el balance de humedad, el cual sería parte de una herramienta para determinar los períodos óptimos para realizar las labores. En laboratorio se midieron las curvas de retención de humedad de tres tipos de suelo bajo uso agrícola en el área (franco, franco-arenoso y arcilloso). Luego, con textura y contenido de materia orgánica, se estimó la curva de humedad para los mismos suelos por medio de las FET y se usaron como modelos de predicción. Con el análisis gráfico y estadístico, se estableció la validez de los modelos de predicción de Stolte y Wösten para estimar con precisión los valores del potencial mátrico de la curva de retención de humedad del suelo franco, pero no para el arcilloso y franco arenoso. En estos dos últimos suelos el modelo de Stolte podría ser utilizado, realizando ajustes.

No se obtuvo evidencia gráfica y estadística de que los modelos de Rawls, y Tomasella y Hodnett sean adecuados para predecir los potenciales mátricos para los tipos de suelo bajo estudio.

Palabras clave: modelos de predicción, balance de humedad, manejo de suelo en condiciones tropicales.

SUMMARY

In order to determine the available time to carry out tillage with the best results and minimum energy input, information on the moisture status in the soil is required. Soil moisture retention curves are key data in planning and operating a tillage system. However, in the tropical regions of Mexico these data are not currently available and the process to generate such information would be costly and time consuming. In this research, four pedotransfer functions (PTF) were evaluated to know whether the use of these models for the estimation of moisture retention curves in agricultural soils in the tropical region of Veracruz, Mexico, is possible. If the estimated data are adequate, these can be used to calculate the water balance in the area, which would be part of a tool to determine the timeliness of tillage operations. First, in laboratory moisture retention curves were measured for three types of agricultural soil in the area (loam, sandy loam, and clay). Then, using the textural characteristics and organic matter content, the moisture retention curve of the soil was estimated by means of the PTF. With graphical and statistical analyses, it was possible to establish that the models of Stolte and Wösten are valid for a precise estimation of matric potential values of the retention curve for loam, but not for the clay and sandy loam. For the last two soils, the Stolte model could be used after adjustment. There was no graphical or statistical evidence that either the Rawls or the Tomasella and Hodnett models is adequate for predicting the matric potentials of the retention curve of the soils under study.

¹ División de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, 25315 Saltillo, Coahuila, México.

[‡] Autor responsable (martincadena@uaan.mx)

² Unidad de Ingeniería y Mecanización, INIFAP. Veracruz, México.

Index words: *prediction models, water balance, soil management in tropical conditions.*

INTRODUCCIÓN

El resultado de la acción de un implemento de labranza depende principalmente del contenido de humedad en el perfil del suelo en el momento de la labor; si el contenido no es adecuado se producen grandes agregados que hacen necesario más labores, o bien, se puede compactar el suelo (Spoor, 1979; Perdok y Kouwenhoven, 1994; Raper y Sharma, 2002). Considerando lo anterior, es importante medir, calcular o predecir el estado de humedad del suelo cuando se busca el mejor resultado de las actividades de laboreo. El cálculo o la predicción de la humedad en el suelo, en conjunto con umbrales o límites para realizar la labranza, permite determinar los períodos en que se obtienen los mejores resultados en términos de mayor calidad y menor gasto de energía (Hoogmoed *et al.*, 2003). Esta información es la herramienta clave a nivel de planeación para calcular el tamaño y número de implementos, así como fuentes de potencia requeridas para un sistema de labranza con el fin de realizar un trabajo oportuno y con mejores resultados en la estructura del suelo (Cadena-Zapata *et al.*, 2003).

Los modelos determinísticos de balance de humedad proporcionan información de mayor calidad del estado de humedad en el perfil del suelo (De Jong y Bootsma, 1997). Sin embargo, la predicción diaria del estado de humedad del suelo en estratos o capas (como se necesita para propósitos de labranza) por medio de estos modelos, requiere de un conocimiento detallado de algunas propiedades físicas del suelo, como la curva de retención de humedad (Earl, 1996).

SWATRE es un modelo determinístico que fue utilizado con éxito por Cadena-Zapata *et al.* (2003) para predecir el contenido de humedad para propósitos de labranza en un suelo franco de la zona tropical de México pero, en la práctica, el uso extensivo de estos modelos está limitado por la falta de información de las características hidráulicas de los suelos de la región; entre éstas, la curva de retención de humedad.

La medición de las características hidráulicas de los suelos es un trabajo caro que requiere de mucho tiempo y mano de obra (Rawls *et al.*, 1998; Cornelis *et al.*, 2001; Schaap *et al.*, 2004). En particular, en la zona tropical de México prácticamente no existe información sobre curvas de retención de humedad, pues la mayoría

de los suelos se describen sólo en términos de textura (INEGI, 1987).

Las funciones de edafotransferencia (FET) son modelos matemáticos mediante los cuales se pueden predecir las características hidráulicas del suelo, a partir de información que es más fácil de medir o encontrar disponible. Tal es el caso de la textura y el contenido de materia orgánica (MO) las cuales son determinadas en forma rutinaria en trabajos o experimentos (Bouma y Van Lanen, 1987; Wösten *et al.*, 1995; Tomasella y Hodnett, 1998; Rubio y Llorens, 2003; Rajkai *et al.*, 2004; Nemes *et al.*, 2005).

La mayoría de las FET han sido derivadas y validadas utilizando bases de datos de suelos de las regiones templadas, donde los procesos físicos, químicos y biológicos son diferentes de los que ocurren en los suelos de los trópicos (Tomasella y Hodnett, 1998), lo que podría restringir su aplicación. En general, se ha recomendado ser cauto al aplicar las FET para estimar características hidráulicas a otros suelos y condiciones climáticas (Espino *et al.*, 1995; Kay *et al.*, 1997).

Sin embargo, hipotéticamente las FET pueden considerarse buenas y aplicables si los datos originales de los cuales se derivan son de buena calidad y han sido recabados en cantidad suficiente (Stolte *et al.*, 1996). En la actualidad, en las regiones tropicales de México no existe suficiente información para crear una FET confiable para predecir las características hidráulicas de los suelos, excepto en muy pocas y, además, muy separadas localidades. En México, algunas FET se desarrollaron exclusivamente para predecir la capacidad de intercambio catiónico y el punto de marchitez permanente en áreas donde el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) tiene trabajos de investigación (Bell y Van Keulen, 1995).

Algunas FET se han evaluado en diferentes lugares para derivar características hidráulicas con el fin de utilizarlas para diversos propósitos, entre éstos: predicción de la densidad aparente y de partículas (Leonaviciute, 2000), modelado del flujo producido por una tormenta en una cuenca (Sobieraj *et al.*, 2001), percolación de pesticidas (Van Alphen y Stoorvogel, 2002) y determinación de propiedades hidráulicas de sedimentos profundos (Wagner *et al.*, 2004).

El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación en labranza de suelos, llevado a cabo en terrenos agrícolas del municipio de Medellín de Bravo en el estado de Veracruz, México. En investigaciones anteriores (Cadena-Zapata *et al.*, 2002; Hoogmoed

et al., 2003) se establecieron límites de trabajo en campo y laboratorio para conocer los rangos del estado óptimo de humedad del suelo para realizar la labranza; lo anterior se predijo utilizando un modelo determinístico de balance de humedad. No obstante, para utilizar este procedimiento como herramienta de planeación de sistemas de labranza a nivel regional (municipio o municipios en un distrito de desarrollo), se requiere de información sobre la curva de retención de humedad de los suelos.

Las mediciones directas de las características hidráulicas de los suelos no son técnica y financieramente posibles a corto y mediano plazo en las zonas agrícolas del trópico de México. Por esta razón, las investigaciones acerca de los límites de trabajo de los suelos se profundizaron con el objetivo de evaluar la confiabilidad de las FET derivadas en otras regiones para predecir la parte de la curva de retención de humedad que es de interés en el procedimiento de planeación de la labranza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los tres tipos de suelo más comunes en las áreas agrícolas de la región (franco, franco arenoso y arcilloso) se colectaron de parcelas del campo experimental Cotaxtla y la Colonia, localizados aproximadamente a 19° N y 96° O en la zona centro del estado de Veracruz, México. En el Cuadro 1 se muestra la composición de partículas que se obtuvo en laboratorio por el método de Bouyoucos (1951) en cuatro muestras tomadas por parcela experimental (20 m x 50 m) por cada tipo de suelo, y el contenido de MO de cada suelo se obtuvo por el método de Walkley y Black (1934).

En el Cuadro 2 se muestra la curva de retención de humedad del suelo medida en laboratorio a diferentes valores de succión (potencial mátrico), tanto en unidades pF (logaritmo base 10 de las unidades de centímetros de agua) como en MPa y bar. Lo anterior se realizó en 10 muestras por cada contenido de humedad para cada tipo de suelo. Los valores de retención de humedad a succiones entre 0 y 100 cm de agua se obtuvieron utilizando el método de la placa porosa y columna móvil de agua; para succiones mayores de 100 cm de columna de agua se utilizaron las ollas de presión.

Funciones de Edafotransferencia Utilizadas

Para comparar las curvas obtenidas en laboratorio con las que se predicen a partir de las FET, es necesario que los tipos de suelo bajo estudio estén dentro de las texturas que originalmente se utilizaron para derivarlas.

Considerando lo anterior, las curvas de retención de humedad de los tres tipos de suelo se predijeron aplicando los procedimientos descritos por los autores de las siguientes FET:

- a) Funciones de edafotransferencia derivadas de las series de suelos Staring en los Países Bajos (Stolte et al.,

Cuadro 1. Composición mineral y materia orgánica (MO) de los suelos bajo estudio.

Tipo de suelo	Arcilla	Limo	Arena	MO
	----- % -----			
Franco arenoso	13.8	39.0	47.2	2.0
Franco	26.3	38.3	35.3	2.3
Arcilloso	50.3	31.0	18.6	3.9

Cuadro 2. Curvas de retención de humedad medidas en laboratorio.

Tipo de suelo	Escalas de succión			Contenido de humedad		
	cm de agua	MPa	bar	----- % v/v -----		
pF						
1	10	0.00098	0.0098	29.6	34.9	29.8
1.5	31.62	0.00309	0.031	27.5	32.2	27.9
2	100	0.0098	0.0981	25.4	29.5	25.3
2.3	199.52	0.0195	0.1957	23.8	28.3	22.5
2.7	501.18	0.0491	0.4915	22.4	26.8	20.5
3	1000	0.098	0.9806	22	26.9	20.4
3.4	2511.88	0.2461	2.4633	19.8	24.8	17.1
3.9	7943.28	0.7784	7.7895	16.3	22.3	12.9
4.5	31622.77	3.099	31.01	12.8	16.1	10.6
6	1000000	98	980.642	4.5	7	3.5

pF = logaritmo base 10 de las unidades de centímetros de agua.

1996). Como ejemplo de éstas se presenta la derivada para suelos francos y arcillosos:

$$\theta = 0.8085 - 0.2617 * D - 0.038 * \text{topsoil} + 0.00001046 * C^2 + 0.01287 * \ln(\text{MO}) + 0.000789 * C * \text{topsoil}$$

donde: θ = porcentaje volumétrico de agua, C = porcentaje de arcilla, D = densidad aparente, MO = porcentaje de materia orgánica, $\text{topsoil} = 1$.

b) Funciones de edafotransferencia derivadas de bases de datos de los Estados Unidos de América (Rawls *et al.*, 1982). Como ejemplo de éstas se presenta la derivada para -0.33 bar:

$$\theta = 0.2576 - 0.0020 S_a + 0.0036 C - 0.0299 \text{MO}$$

donde: S_a = porcentaje de arena.

c) Funciones de edafotransferencia derivadas de la región del Amazonas en Brasil (Tomasella y Hodnett, 1998). Como ejemplo de éstas se presenta la derivada para -100 kPa, con la forma:

$$\theta = 3.198 + 0.369 S_i + 0.351 C$$

donde: S_i = porcentaje de limo.

d) Funciones de edafotransferencia derivadas de la base de datos Hypres de suelos de Europa Occidental (Wösten *et al.*, 1998). Con la forma:

$$\theta = 0.7919 + 0.00169 * C - 0.29619 * D - 0.000801491 * S^2 + 0.0000821 * \text{MO}^2 + 0.02427 * C^{-1} + 0.01113 * S^{-1} + 0.01472 * \ln(S) - 0.0000733 * \text{MO} * C - 0.000619 * D * C - 0.001183 * D * \text{MO} - 0.0001664 * \text{topsoil} * S$$

donde: S = porcentaje de limo.

En cada referencia mencionada se presentan todas las ecuaciones de los modelos y se describen los detalles de los procedimientos de cálculo e interpretación de los datos derivados de los modelos.

Comparación de Datos Medidos con Datos Derivados de las FET

Tomando como referencia una relación 1:1, con inicio en el origen y la pendiente 1, se graficó la relación entre los valores de potencial mátrico medidos en laboratorio y los obtenidos siguiendo los procedimientos descritos por los autores de las FET. Se analizó

la coincidencia entre la referencia y la relación de valores medidos y predichos en el intervalo de pF 1.5 a pF 4.5 que es el rango de humedad de interés para las actividades de labranza.

Por otra parte, usando técnicas estadísticas estándar (Faraway, 2005) es posible establecer la validez del modelo de predicción. Si un diagrama de dispersión entre los valores medidos y predichos sugiere una relación lineal entre estas variables, entonces, es razonable usar un modelo lineal para relacionarlas. Esto es, se supone que

$$Y = Xb + e$$

donde: Y denota el vector que colecta los valores pronosticados por el modelo, X denota una matriz que colecta los valores medidos en laboratorio, con su primer columna de unos,

$b = (b_0, b_1)^t$ es el vector de parámetros del modelo, y e es un vector de errores, los cuales se suponen independientes e idénticamente distribuidos (*iid*) normales con media cero, y varianza σ^2 .

Xb representa la parte estructural del modelo, mientras que e representa la parte aleatoria.

El estimador de mínimos cuadrados de b , \hat{b} , es:

$$\hat{b} = (X'X)^{-1} X'Y.$$

La línea de regresión estimada es entonces:

$$\hat{Y} = X\hat{b}.$$

El vector de residuales $e = Y - \hat{Y}$ puede usarse para obtener un estimador insesgado, $\hat{\sigma}^2$, de σ^2 ; de hecho,

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{e'e}{n - p},$$

donde: n es el número de datos y p' es el número de parámetros de regresión, en este caso $n = 8$ y $p = 2$.

El ajuste del modelo se puede medir mediante el coeficiente de determinación o por ciento de varianza explicada por el modelo, denotada mediante R^2 y definida como:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

donde:

$$RSS = e'e$$

y

$$TSS = \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \text{ es, por supuesto, la media de los valores}$$

en Y . El coeficiente de determinación toma valores entre cero y uno. Un valor cercano a uno indica un buen ajuste lineal y se tiene, entonces, evidencia de que la parte estructural del modelo es adecuada.

Por otra parte, siempre que los supuestos del modelo se cumplan, \hat{b} tiene una distribución normal bivariada con media b y matriz de covarianzas $s^2(X'X)^{-1}$.

Los resultados arriba enunciados se pueden usar para probar hipótesis acerca de b . En este caso interesa contrastar:

$$H_0: b_0 = 0; b_1 = 1$$

$$H_1: b_0 \neq 0; b_1 \neq 1.$$

Si

$$(\hat{b} - b)' X' X (\hat{b} - b) \leq p s^2 F_{p, n-p}^{(a)}$$

con $F_{p, n-p}^{(a)}$ el cuantil $(1 - \alpha)$ de la distribución F con p y $n-p$ grados de libertad, no se rechaza la hipótesis nula, en caso contrario se rechaza. No rechazar la hipótesis nula, en el presente contexto, se traduce a "el modelo es adecuado".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados Considerando como Referencia una Relación 1:1 entre Valores de Succión Medidos y Estimados

Los valores de succión medidos y estimados, para una adecuada comparación gráfica, en una relación 1:1 se presentan como valores logarítmicos base 10 del potencial mátrico expresado en columna de centímetros de agua (escala pF) y correspondiente valor en bar. Las equivalencias en otras escalas de succión del potencial mátrico medido para cada suelo se presentan en el Cuadro 2.

Funciones de Edafotransferencia de Rawls et al. (1982)

En la Figura 1 se observa que los valores de succión para la retención de humedad en los suelos bajo estudio no fueron estimados adecuadamente por estas FET. Las funciones de Rawls et al. (1982) están entre las primeras desarrolladas y predicen el contenido volumétrico de humedad (θ) para puntos específicos de succión (h), así se desarrolló una FET específica para cada punto.

Para el suelo franco arenoso ocurre una sobrestimación de los valores de succión, mientras que para el suelo franco una subestimación de los mismos. Para el suelo arcilloso, a relativamente bajos valores de succión, se nota una sobrestimación, mientras que se observa una subestimación en los valores de alto potencial mátrico. En general, se observa que la tendencia sistemática de estas FET es a sobrestimar los valores a bajas succiones y a subestimarlos en las altas. Tietje y Tapkenhinrichs (1993) encontraron algo similar al aplicar estas FET a suelos de Alemania.

Tal vez una de las causas de la poca precisión de las FET de Rawls et al. (1982) sea que en las bases de datos sobre retención de humedad que emplearon para derivar las FET se utilizaron diversos métodos; no está claro si esto aplica sólo para diferentes partes de la curva de retención o aun a puntos dentro de una misma parte de la curva. Otro punto que señalan los autores de estas FET y que podría influir en la poca precisión es que, cuando se predice el contenido de humedad volumétrica a un tercio de bar para texturas arcillosas y arena arcillosas, éste es mayor que la porosidad efectiva, lo cual físicamente no es posible. Esto, señalan, puede deberse a que se promediaron valores.

Funciones de Edafotransferencia de los Suelos de la Serie Staring en los Países Bajos (Stolte et al., 1996)

La aplicación de estas FET resultó en una buena estimación de la curva de retención de humedad para el suelo franco. Los valores de potencial mátrico medidos y estimados muestran una muy buena relación. Para el suelo arcilloso los valores estimados resultaron mayores que los medidos, mientras que para el suelo franco arenoso fueron menores que los medidos (Figura 2).

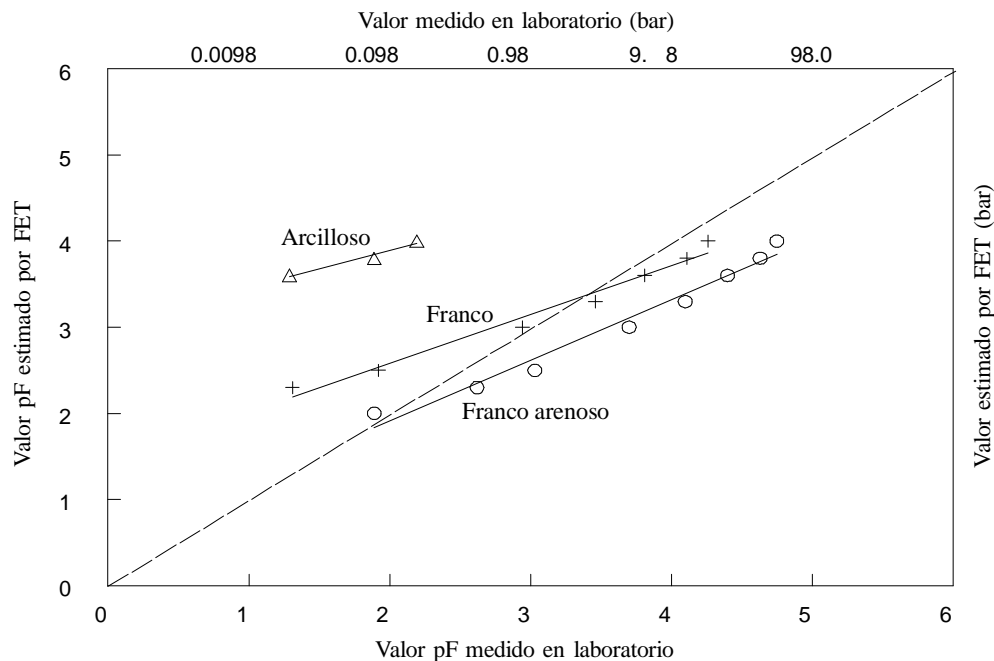


Figura 1. Relación entre los valores medidos de succión en laboratorio y los estimados utilizando las FET de Rawls *et al.* (1982).

No obstante lo anterior, puede observarse también que las curvas sobrestimadas y subestimadas guardan cierto paralelismo con la línea 1:1 de referencia. Por esto, se puede cuantificar que la sobrestimación de los valores del suelo arcilloso es de 1.5 veces los valores

medidos y la subestimación del suelo arenoso es de una vez también con respecto a lo medido.

Los mejores resultados obtenidos con las FET derivadas, utilizando la metodología de los Países Bajos, se podrían explicar por que los conjuntos de datos de

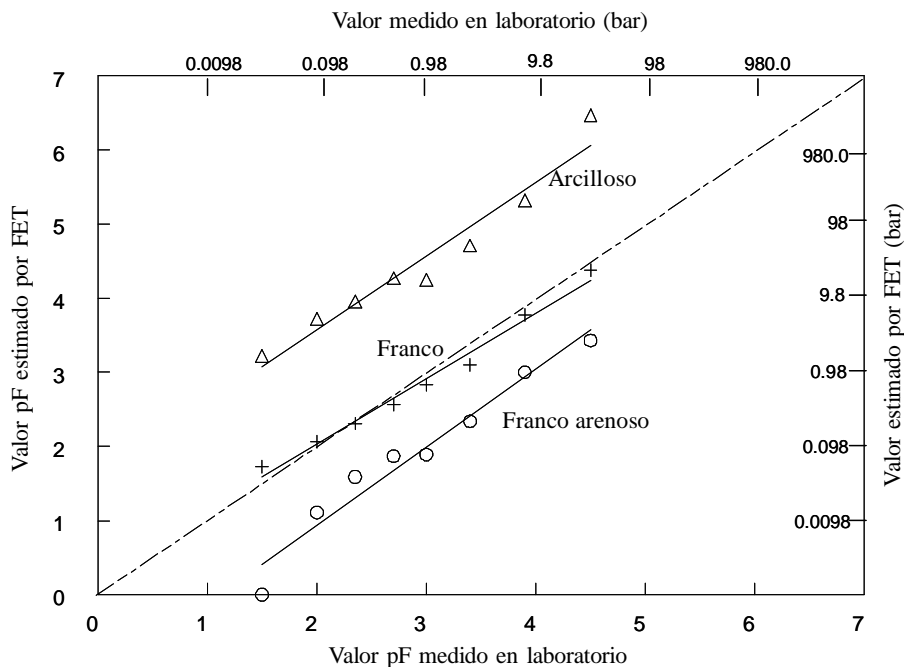


Figura 2. Relación entre los valores medidos (pF) en laboratorio y los estimados utilizando las FET de las series Staring (Stolte *et al.*, 1996).

las curvas de retención de las cuales fueron derivadas: 1) cubren un amplio espectro de tipos de suelo, 2) los mismos métodos se utilizaron en forma rutinaria para medir rangos específicos de la curva de retención de humedad, 3) las mediciones se realizaron en laboratorio a muestras no disturbadas y 4) se derivaron FET distintas, una, para suelos de textura gruesa y, otra, para suelos de textura media y fina.

Las FET de los Países Bajos aquí evaluadas se consideran como modelos paramétricos de predicción de la función de retención de humedad (Wösten, 1997). Para derivar esas FET, todas las características hidráulicas individuales se parametrizaron con el uso del programa RETC que hace una optimización no lineal de mínimos cuadrados (Van Genuchten *et al.*, 1991).

Funciones de Edafotransferencia de Tomasella y Hodnett (1998)

En la Figura 3 puede observarse que con estas FET, en general, la tendencia es a sobrestimar en los valores bajos de potencial métrico y a subestimar en el rango alto de potencial métrico. Esta FET se desarrolló para predecir los parámetros de Brooks-Corey de la curva de retención de humedad.

Tomasella y Hodnett (1998) mencionan que de las bases de datos utilizadas para derivar estas FET, pocas tenían información detallada de la curva de retención de

humedad. La mayoría tenía información limitada sólo a contenidos de humedad a potenciales mátricos de -33 kPa y de -1500 kPa. Lo anterior debe ser la causa por la cual la predicción de la curva de retención de los suelos bajo estudio no fuera buena, aun cuando se esperaba que fuese adecuada, pues estas FET se derivan de suelos de ambiente tropical, como lo son los de Veracruz, México.

Funciones de Edafotransferencia Derivadas de la Base de Datos Hypres (Wösten *et al.*, 1998)

La base de datos de la cual se derivaron estas FET comprende una gran cantidad de suelos europeos. La relación para el suelo franco está casi en la línea de referencia 1:1 (Figura 4). Con respecto al suelo arcilloso, los valores son sobrestimados y esta tendencia se incrementa a valores más grandes de potencial métrico. Las succiones para el suelo de textura gruesa se subestiman.

Las FET derivadas de la base de datos Hypres se desarrollaron utilizando los mismos procedimientos de las de la serie Staring. En los suelos bajo estudio los resultados de estas dos FET son similares para los de textura franca y franco arenoso. Sin embargo, algo que pudo haber influido para resultados relativamente diferentes es que las FET derivadas de la base de datos Hypres son para todo tipo de suelo, es decir,

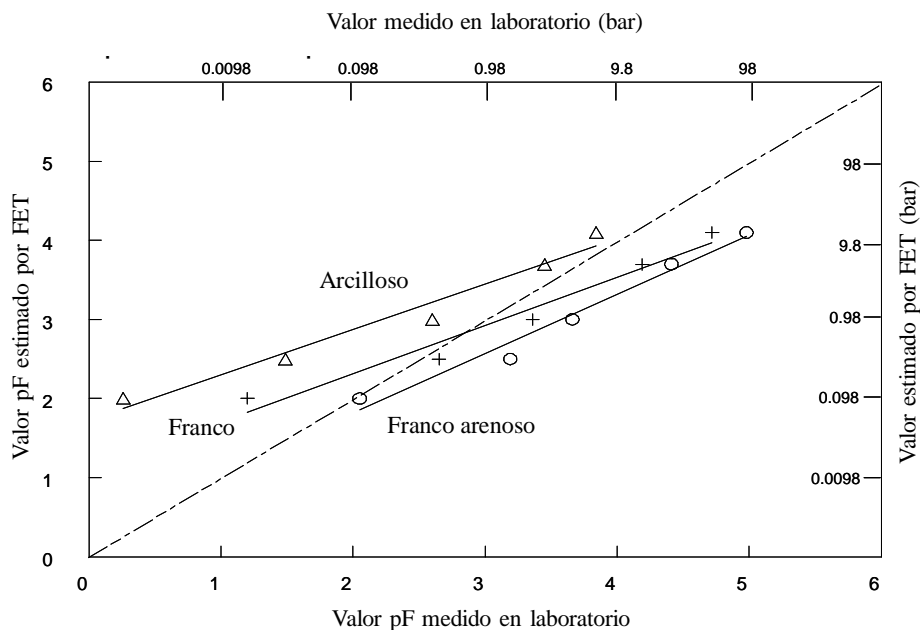


Figura 3. Relación entre los valores medidos (pF) en laboratorio y los estimados utilizando las FET Tomassella y Hodnett (1998).

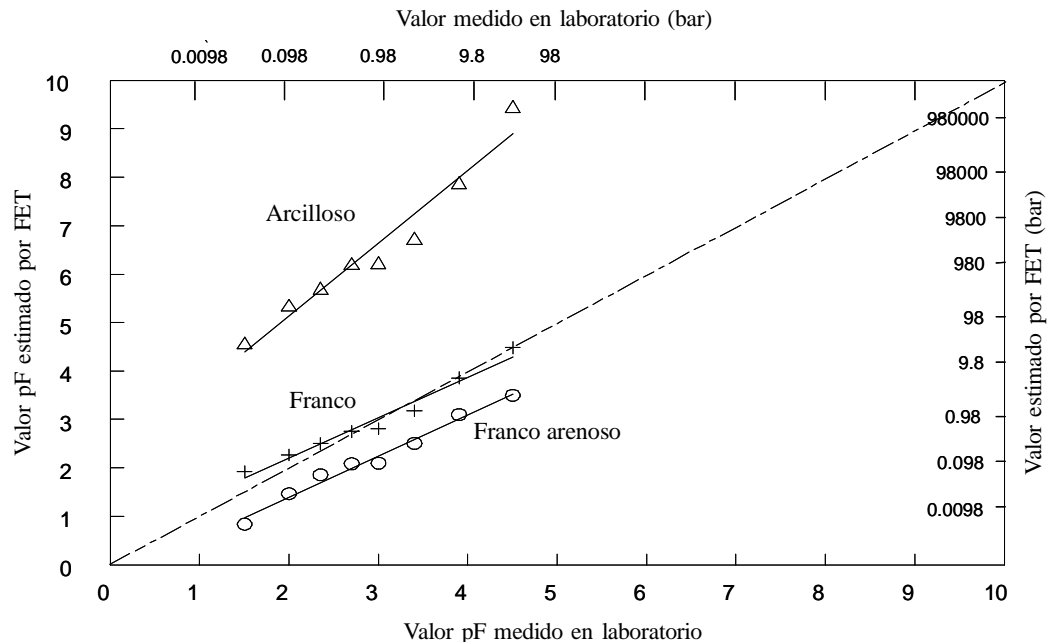


Figura 4. Relación entre valores medidos (pF) en laboratorio y los estimados utilizando las FET de la base de datos Hypres (Wösten *et al.*, 1998).

no se derivaron FET para suelos de textura gruesa, media o fina en forma separada.

El que para algunas texturas haya severas limitaciones en la predicción de la retención de humedad puede deberse a que la variabilidad de los suelos (distribución de partículas, MO, densidad aparente) no está bien representada en las bases de datos que dan origen a las FET, por eso la necesidad de ser evaluadas (Nemes *et al.*, 2003).

Resultados Utilizando Técnicas Estadísticas Estándar

El modelo de predicción es adecuado si los datos obtenidos en el laboratorio son estadísticamente iguales a los predichos. Visualmente, esto puede apreciarse comparando el diagrama de dispersión de los datos estimados con los datos de laboratorio con una línea recta con ordenada al origen 0 y pendiente 1. Además de lo anterior, usando las técnicas estadísticas descritas en el apartado de materiales y métodos, se estableció la validez de los modelos de predicción.

Para cada función de edafotransferencia y para cada tipo de suelo, franco, arcilloso y franco-arenoso, se ajustó el modelo lineal y se verificaron los supuestos de normalidad. Los valores del coeficiente de determinación y la decisión para el contraste de hipótesis se presentan

en el Cuadro 3. En todos los casos, el coeficiente de determinación es alto, por lo que la parte estructural del modelo es adecuada. Por otra parte, se tiene evidencia estadística de que los modelos de Stolte *et al.* (1996) y de Wösten *et al.* (1998) predicen adecuadamente los potenciales mátricos para el suelo franco, no así para los suelos arenosos y arcillosos.

Además, no se tiene evidencia estadística de que los modelos de Tomasella y Hodnett (1998) y de Rawls *et al.* (1982) sean adecuados para predecir los potenciales mátricos para ningún tipo de suelo.

CONCLUSIONES

- Los potenciales mátricos para la curva de humedad de los suelos francos de la región tropical de Veracruz, México, fueron estimados con bastante precisión por las funciones de edafotransferencia (FET) de Stolte *et al.* (1996) y Wösten *et al.* (1998). Estas FET pueden utilizarse para predecir la curva de retención de humedad para los suelos francos de la región.
- En el caso del modelo de Stolte *et al.* (1996), la sobrestimación de los valores en el suelo arcilloso es un valor constante, como lo es también la subestimación de los valores para el suelo franco arenoso, lo que da la posibilidad de utilizarlo con ajustes.

- Se descarta el uso de las otras FET evaluadas para estimar la curva de retención de humedad de los suelos de la región.
- Se deduce que para que una FET pueda estimar con precisión la curva de retención de un suelo de características similares del que fue derivada, es importante que los datos en cada parte de la curva hayan sido medidos con un mismo procedimiento y en un gran número de muestras. Esto es primordial si en el futuro existiera la posibilidad técnico financiera de desarrollar FET propias para los grupos de suelo de la región bajo estudio.

LITERATURA CITADA

- Bell, M. A. and H. van Keulen. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 865-871.
- Bouma, J. and A. J. van Lanen. 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. pp. 106-111. *In:* K. J. Beek, P. A. Burrough, and D. E. McCormack (eds.). *Quantified land evaluations*. ITC Publication 6. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Bouyoucos, G. J. 1951. A recalibration of the hydrometer for making mechanical analysis of soils. *Agron. J.* 43: 434-438.
- Cadena-Zapata, M., W. B. Hoogmoed, and U. D. Perdok. 2002. Field studies to assess the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. *Soil Tillage Res.* 68: 83-92.
- Cadena-Zapata, M., S. Campos-Magaña, E. Narro-Farías y T. Gaytán-Muñiz. 2003. Predicción del tiempo oportuno para planear y operar sistemas de labranza. *Terra* 21: 545-549.
- Cornelis, W. M., J. Ronsyn, M. van Meirvenne, and R. Hartmann. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 638-648.
- De Jong, R. and A. Bootsma. 1997. Estimates of water deficits and surpluses during the growing season in Ontario using the SWATRE model. *Can. J. Soil Sci.* 77: 285-294.
- Earl, R. 1996. Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. *Soil Tillage Res.* 40: 155-168.
- Espino, A., D. Mallants, M. Vanclooster, and J. Feyen. 1995. Cautionary notes on the use of pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties. *Agric. Water Manage.* 29: 235-253.
- Faraway, J. J. 2005. *Linear models with R*. Chapman & Hall/CRC. Boca Raton, FL, USA.
- Hoogmoed, W. B., M. Cadena-Zapata, and U. D. Perdok. 2003. Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. *Soil Tillage Res.* 74: 169-178.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1987. *Carta estatal de suelos de Veracruz*. Escala 1:1 000 000. Dirección Nacional de Geografía, INEGI. Aguascalientes, México.
- Kay, B. D., A. P. da Silva, and J. A. Baldock. 1997. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: prediction using pedotransfer functions. *Can. J. Soil Sci.* 77: 655-667.
- Leonaviciute, N. 2000. Predicting soil bulk and particle densities by pedotransfer functions from existing soil data in Lithuania. *Geografijos Metastis* 33: 317-330.
- Nemes, A., M. G. Schaap, and J. H. M. Wösten. 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1093-1102.
- Nemes, A., W. J. Rawls, and Y. A. Pachepsky. 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1330-1337.
- Perdok, U. D. and J. K. Kouwenhoven. 1994. Soil tool interactions and field performance of implements. *Soil Tillage Res.* 30: 283-326.
- Rajkai, K., S. Kabos, and M. Th. van Genuchten. 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil Tillage Res.* 79: 145-152.
- Raper, R. L. and K. Sharma. 2002. Using soil moisture to determine when to subsoil. pp. 404-409. *In:* E. van Santen (ed.). *Making conservation tillage conventional: building a future on 25 years of research*. Special Report 1. Alabama Agricultural Experimental Station and Auburn University. Auburn, AL, USA.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25: 1316-1320.
- Rawls, W. J., D. Gimenez, and R. Grossman. 1998. Use of soil texture, bulk density, and slope of water retention curve to predict hydraulic conductivity. *Trans. ASAE* 41: 983-988.
- Rubio, C. y P. Llorens. 2003. Evaluación del uso de funciones de edafotransferencia para la determinación de propiedades hidrodinámicas en suelos franco-limosos. pp. 137-142. *In:* J. Álvarez-Benedi y P. Marinero (eds.). *Estudio de la zona no saturada del suelo*. Vol. VI. *Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada 03*. Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid, España.
- Schaap, M. G., A. Nemes, and M. Th. van Genuchten. 2004. Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. *Vadose Zone J.* 3: 1455-1463.
- Sobieraj, J. A., H. Elsenbeer, and R. A. Vertessy. 2001. Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modeling storm flow generation. *J. Hydrol.* 251: 202-220.
- Spoor, G. 1979. Soil type and workability. pp. 71-82. *In:* *Soil Survey of England and Wales Tech. Monograph 13*. London, UK.
- Stolte, J., J. G. Wesseling, and J. H. M. Wösten. 1996. Pedotransfer functions for hydraulic and thermal properties of soil and the tool HERCULES. Report 126. DLO Winand Staring Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Tietje, O. and M. Tapkenhinrichs. 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1088-1095.
- Tomasella, J. and M. Hodnett. 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Sci.* 163: 190-202.
- Van Alphen, B. J. and J. J. Stoorvogel. 2002. Effects of soil variability and weather condition on pesticide leaching: a farm level evaluation. *J. Environ. Qual.* 31: 797-805.
- Van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions for unsaturated soils*. US Salinity Laboratory. Riverside, CA, USA.

- Wagner, B., V. R. Tarnawski, and M. Stöck. 2004. Evaluation of pedotransfer functions predicting hydraulic properties of soils and deeper sediments. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 236-245.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
- Wösten, J. H. M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. pp. 221-245. *In*: E. G. Gregorich and M.R. Carter (eds.). *Soil quality for crop production and ecosystem health. Development in Soil Science 25.* Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Wösten, J. H. M., P. A. Finke, and M. J. W. Jansen. 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma* 66: 227-237.
- Wösten, J. H. M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Final Report on the European Union Founded Project. Report 156. DLO Staring Centre. Wageningen, The Netherlands.