



Artículo científico

Cuatro funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos: Evaluación de desempeño e implicaciones en el manejo del recurso hídrico

Carlos Manuel Hidalgo-Campos¹, Manuel E. Camacho-Umaña^{2/*}

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: manuel.camachoumana@ucr.ac.cr

¹Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). San Pedro de Montes de Oca, 11503-2060 San Pedro, Costa Rica.

²Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía y Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), San Pedro de Montes de Oca, 11503-2060 San Pedro, Costa Rica.

DOI: <https://doi.org/10.15517/a76bhh92>

Recibido el 02 de setiembre del 2025; Aceptado el 28 de noviembre del 2025.

Resumen

Introducción. Un manejo técnico y económico, adecuado y eficiente de los recursos naturales como el suelo y agua, resulta fundamental e imperativo para garantizar una producción sostenible en los sistemas agrícolas. Las funciones de pedotransferencia (PTFs) son herramientas para la estimación de propiedades hidrológicas del suelo como la retención de humedad a partir de otras variables edáficas fácilmente disponibles. **Objetivo.** Evaluar el desempeño de cuatro funciones en la estimación del contenido de humedad del suelo a dos puntos (capacidad de campo CC y marchitez permanente PMP) en suelos de Costa Rica. **Metodología.** A partir de datos de perfiles de suelo disponibles para Costa Rica, se estimó los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten mediante dos funciones de pedotransferencia: Rosettal y Rosetta3. También se calculó la humedad de suelo (θ) a CC y PMP por medio de dos ecuaciones empíricas: Peele y Briggs. Estos datos se contrastaron con los valores correspondientes medidos en el laboratorio, y se calcularon parámetros de capacidad predictiva para evaluar el desempeño de las funciones. **Resultados.** Las ecuaciones empíricas de Peele y Briggs presentaron un desempeño muy bajo en la estimación de la humedad a CC y PMP.

Las funciones Rosetta1 y Rosetta3 presentaron un buen desempeño en la determinación de los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten. Se observó desviaciones considerables entre los valores medidos de CC y PMP y los calculados mediante ambas PTFs evaluadas, en específico en Andisoles. **Conclusión.** Se sugiere tomar precauciones antes del uso e implementación de estas dos PTFs (Rosetta1 y Rosetta3) para la estimación del contenido de humedad del suelo, pues podría tener repercusiones en el manejo adecuado de los recursos agua y suelo. También se recomienda evitar el uso de las ecuaciones empíricas de Peele y Briggs en estimaciones de lámina de riego.

Palabras clave: irrigación; hidrología; recursos naturales; física de suelos; agricultura.

Scientific article

Abstract

Four Pedotransfer functions for estimating soil water retention in soils: Performance evaluation and implications for water resources management

Introduction. Technical, economic, and efficient management of natural resources such as soil and water is fundamental and imperative to ensure sustainable agricultural production. Pedotransfer functions (PTFs) are tools for estimating soil hydrological properties, such as water retention, from other easily measurable soil variables. **Objective.** To evaluate the performance of four functions in estimating soil water content at two reference points field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) in Costa Rican soils. **Methodology.** Using soil profile data available for Costa Rica, the fitting parameters of the van Genuchten equation were estimated to calculate soil water content (θ) at FC and PWP through two functions: Rosetta1 and Rosetta3. These values were also derived using the empirical equations of Peele and Briggs. The estimated data were compared with laboratory measurements, and predictive performance indices were calculated to assess the accuracy of the functions. **Results.** The empirical equations of Peele and Briggs exhibited very poor performance in estimating soil water content at FC and PWP. In contrast, Rosetta1 and Rosetta3 demonstrated good performance in estimating the van Genuchten parameters. Nevertheless, considerable deviations between FC and PWP measured and estimated values were observed, particularly in Andisols. **Conclusion.** Caution is advised when applying Rosetta1 and Rosetta3 for soil water content estimation, as inaccuracies may affect the appropriate management of soil and water resources. The use of Peele and Briggs' empirical equations is not recommended for irrigation scheduling.

Keywords: irrigation; hydrology; natural resources; soil physics; agriculture.

Introducción

La determinación de la curva de retención de agua del suelo (SWRC, por sus siglas en inglés) es crucial para entender los procesos hídricos que ocurren en los suelos y mejorar las predicciones hidrológicas. Dicha curva relaciona dos variables físicas del suelo, el contenido volumétrico de agua (θ) y el potencial hídrico (ψ) (Hillel 1998).

De forma experimental, estas variables se determinan mediante métodos tradicionales como las columnas de agua colgante (Klute 1986), mesas de tensión (Lima y da Silva, 2008) y las ollas de presión (Richards y Fireman 1943). De igual forma, existen métodos modernos, como los dispositivos basados en la evaporación (Gardner y Miklich 1962, Wind 1968), que permiten obtener datos de retención de agua casi continuos en condiciones de laboratorio (Schindler y Müller 2006, Peters y Durner 2008). Con estos datos antes mencionados, normalmente se ajustan ecuaciones para representar el comportamiento de la SWRC. Dentro de estas ecuaciones destaca la propuesta por van Genuchten (1980), siendo esta la más utilizada en la literatura (Hopmans *et al.* 2024). Consiste en una ecuación sigmoidal con parámetros de ajuste (θ_s , θ_r , α , n , y m) que permite una caracterización más completa y dinámica del fenómeno de la retención de agua en el suelo. El trabajo realizado por van Genuchten se ha convertido en un aporte invaluable en las ciencias del suelo, y representa un recurso fundamental para el desarrollo e implementación de modelos hidrológicos muy conocidos como HYDRUS, MIKE SHE, AquaCrop o SPHY (Raes *et al.* 2009, Jaber y Shukla, 2012, Terink *et al.* 2015, Šimůnek *et al.* 2016)

La importancia de la ecuación desarrollada por van Genuchten (1980), en adición a la complejidad, costo económico y tiempo requerido por los métodos para la determinación de la SWRC impulsó la búsqueda de alternativas que vinculen la retención de humedad con propiedades del suelo más simples y fáciles de medir, sin perder la exactitud de las predicciones en comparación con los métodos de laboratorio disponibles en la literatura (Hidalgo-Campos y Camacho-Umaña 2024).

Por lo anterior, se han desarrollado funciones de pedotransferencia (PTFs) para estimar la retención de humedad a partir de datos de fácil acceso como la textura del suelo, el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente (Saxton *et al.* 1986, Pachepsky y Rawls 2004). Estas funciones han venido ganando popularidad debido a su capacidad para proporcionar estimaciones costo efectivas que sirven como fuente de datos para poder utilizar modelos hidrológicos de forma confiable y a menudo precisas en la modelización de procesos hidrológicos y en la toma de decisiones agronómicas, tanto en las regiones templadas como las zonas tropicales (Hodnett y Tomasella 2002, Tomasella *et al.* 2003, Kotlar *et al.* 2019).

Entre estas PTFs destaca Rosetta (conocida como Rosetta1) desarrollada por Schaap *et al.* (2001), la cual utiliza redes neuronales artificiales (ANN) combinadas con el método de remuestreo “Bootstrap” para estimar los parámetros de la ecuación de van Genuchten (1980). Recientemente, estas mismas PTFs se recalibraron contra bases de datos más numerosas y mediante remuestreos más intensivos, incrementando su exactitud y confiabilidad (Zhang y Schaap 2017). Pese a su uso extensivo y validación en otras latitudes, dichas PTF's no han sido evaluadas o validadas en los suelos de Costa Rica, lo cual representa una brecha científica en el campo de la hidrología, física de suelos, así como el manejo de los recursos suelo y agua.

Por otro lado, dentro de las funciones de pedotransferencia existen ecuaciones empíricas más sencillas para la estimación de la retención de humedad del suelo para valores de potencial específicos (33 y 1500 kPa), a partir de la distribución del tamaño de partículas o textura del suelo (Briggs y Shantz 1912, Peele y Beale 1950, Nemes y Rawls 2004). Dichas ecuaciones se conocen comúnmente como 1) “ecuación de Peele” para la estimación de la humedad retenida a 33 kPa de tensión o capacidad de campo (CC) y 2) “ecuación de Briggs” para la estimación de la humedad retenida a 1500 kPa de tensión o punto de marchitez permanente (PMP), y se han recomendado como límites para estimar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (un parámetro que se utiliza en modelos hidrológicos que apoyan la gestión hídrica, y decisiones de cuánto y cuando regar) ante la ausencia de valores determinados en el laboratorio (Fuentes 1996, Calvo 2005).

Sin embargo, la capacidad de predicción y el desempeño tanto de las funciones de pedotransferencia disponibles en Rosetta 1 y 3 como estas dos ecuaciones empíricas no han sido evaluadas o validadas en los suelos de Costa Rica. Por lo anterior, el presente trabajo de investigación se realizó con el objetivo de evaluar el desempeño de dos ecuaciones empíricas (Briggs y Peele), y dos funciones de pedotransferencia (PTFs) (Rosetta1 y Rosetta3) para estimar la retención de agua en suelos en Costa Rica.

Materiales y métodos

Selección de sitios de estudio

Los perfiles de suelo evaluados en el presente estudio se seleccionaron de veintidós sitios distribuidos en el territorio de Costa Rica: Bagatzi, Altos del Socorro y San Isidro de Monterromo (Provincia de Guanacaste), Palmar, El Guayacán, Biolley, Rincón de Osa y Estación la Gamba (Provincia de Puntarenas), Crucitas de Cutris, Termales, Palmira y Santa Gertrudis (Provincia de Alajuela), Chinchilla, Irazú, Instituto, Potrero Cerrado y Chicuá (Provincia de Cartago), La Ceniza, El Porvenir, y Colorado de Acosta (Provincia de San José), Los Ángeles y Cerro Coronel (Provincia de Limón). Estos sitios se seleccionaron con base en dos criterios: 1) representan una diversidad de condiciones climáticas, geomorfológicas, y edáficas que permiten una evaluación comprensiva de las propiedades del suelo y las distintas regiones agrícolas de Costa Rica (Camacho-Umaña *et al.* 2024); 2) dichos perfiles contaban con valores de propiedades físicas de interés. La localización geográfica, y la clasificación taxonómica a nivel de Familia taxonómica se resume en la **Tabla 1**.

Caracterización de las propiedades del suelo

Dichos perfiles cuentan con una caracterización detallada de sus propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas de cada horizonte genético, las cuales se encuentran disponibles en la página web del National Cooperative Soil Survey (NCSS 2024) y en el trabajo realizado por Camacho *et al.* (2021).

Para cada uno de los perfiles mencionados se consultaron los datos de distribución del tamaño de partículas (PSDA) para arena (%), limo (%) y arcilla (%), la clase textural asociada a dichos porcentajes, densidad aparente (g cm^{-3}), carbono orgánico (%), el contenido de humedad retenido a dos puntos específicos: 1) 33 kPa (capacidad de campo, CC) y 2) 1500 kPa (punto de marchitez permanente, PMP). Un resumen de los valores obtenidos de esta base de datos se detalla en la **Tabla 2**, para un total de 116 horizontes genéticos evaluados.

Tabla 1. Localización de los suelos evaluados en el presente estudio.

Table 1. Location of the soils evaluated in the present study.

Pedón	Latitud*	Longitud*	Familia Taxonómica
Bagatzi	10,393	-85,320	Muy fino, Esmectítico, isohipertérmico Typic Haplusterts
Palmar	10,031	-84,798	Francoso fino, Isótico, isohipertérmico Fluvaquentic Haplustolls
Termales	10,365	-84,390	Muy fino, Parasésquico, isohipertérmico Humic Acrudox
Palmira	10,217	-84,378	Medial, Amórfico, isomésico Dystric Haplustands
Santa Gertrudis	10,071	-84,274	Muy fino, Halloisítico, isotérmico Andic Palehumults
Chinchilla	9,890	-83,891	Fino, Caolinitico, isotérmico Vertic Paleustalfs
Írazú	9,973	-83,860	Ceniciente, Vidrioso, isofrígido Typic Udipsamments
Instituto	9,900	-83,683	Fino, Halloisítico, isohipertérmico Typic Humudepts
Potrero Cerrado	9,916	-83,880	Medial, Amórfico, isomésico Humic Haplustands
Chicuá	9,948	-83,868	Ceniciente, Vidrioso, isomésico Humic Udivitrands
Altos del Socorro	9,94003	-85,40096	Fino, Mezclado isohipertérmico Kandiudalfic Eutrustox
Monterromo	9,96968	-85,39771	Fino, Mezclado, isohipertérmico Typic Rhodustalfs
La Ceniza	9,30483	-83,69186	Muy Fino, Caolinítico, isohipertérmico Plinthic Kandiustox
El Porvenir	9,24578	-83,54455	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Anionic Acrustox
El Guayacán	9,94003	-85,40096	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Anionic Acrustox
Bolley	9,00468	-83,01085	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Typic Kandiudox
Crucitas	10,88658	-84,32552	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Plinthic Kandiudox
Colorado	9,68873	-84,2729	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Ustic Palehumults
Rincón	8,73213	-83,46627	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Rhodic Kandiudox
La Gamba	8,69834	-83,20251	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Andic Palehumults
Los Ángeles	9,62294	-82,93833	Muy Fino, Caolinítico, isohipertérmico Typic Palehumults
Cerro Coronel	10,64746	-83,67893	Muy Fino, Mezclado, isohipertérmico Andic Haplóperox

*Sistema de coordenadas WGS84.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de las propiedades físicas y morfológicas de los suelos evaluados en el presente estudio.**Table 2.** Descriptive statistics of the physical and morphological properties of the soils evaluated in the present study.

Variable	n	Media	Mediana	DE*	CV*	Mínimo	Máximo
Horizonte A							
Arcilla (%)	34	27,3	27	19,63	71,91	2,3	64,2
Limo (%)	34	45,04	32,95	52,96	117,59	14,6	278
Arena (%)	34	66,73	34,1	138,17	207,07	7,6	677
Densidad aparente (g cm ⁻³)	34	1,04	1,11	0,24	22,99	0,53	1,49
Humedad a 33 kPa (cm ³ cm ⁻³)	34	0,41	0,41	0,07	16,63	0,3	0,54
Humedad a 1500 kPa (cm ³ cm ⁻³)	34	0,21	0,22	0,08	37,01	0,08	0,37
Agua disponible (cm ³ cm ⁻³)	34	0,2	0,2	0,07	36,51	0,1	0,38
Carbono orgánico (%)	34	3,23	2,57	2,55	78,77	0,32	10,67
Fragmentos de roca (%)	34	0,09	0	0,29	323,67	0	1
Horizonte B							
Arcilla (%)	75	36,65	42,35	23,81	64,96	0,2	74,1
Limo (%)	75	31,91	34,7	11,81	37	14,4	56,2
Arena (%)	75	31,46	21,7	23,46	74,59	6,6	77,4
Densidad aparente (g cm ⁻³)	75	1,02	1,11	0,29	28,65	0,37	1,45
Humedad a 33 kPa (cm ³ cm ⁻³)	75	0,47	0,48	0,07	15,75	0,24	0,59
Humedad a 1500 kPa (cm ³ cm ⁻³)	75	0,26	0,29	0,08	31,21	0,11	0,36
Agua disponible (cm ³ cm ⁻³)	75	0,21	0,17	0,11	50,31	0,1	0,46
Carbono orgánico (%)	75	1,17	0,81	1,37	117,68	0,08	6,47
Fragmentos de roca (%)	75	0,87	0	3,65	420,67	0	20
Horizonte C							
Arcilla (%)	7	8,07	1,9	8,89	110,17	0,9	21,2
Limo (%)	7	23,79	24,8	13,61	57,22	9,5	49,4
Arena (%)	7	68,14	73,4	20,88	30,65	29,4	89,6
Densidad aparente (g cm ⁻³)	7	1,5	1,46	0,12	8,1	1,29	1,63
Humedad a 33 kPa (cm ³ cm ⁻³)	7	0,22	0,17	0,11	51,12	0,09	0,38
Humedad a 1500 kPa (cm ³ cm ⁻³)	7	0,11	0,02	0,13	119,29	0,01	0,3
Agua disponible (cm ³ cm ⁻³)	7	0,1	0,12	0,04	36,69	0,04	0,15
Carbono orgánico (%)	7	0,04	0,03	0,03	72,43	0,01	0,09
Fragmentos de roca (%)	7	0,43	0	0,79	183,59	0	2

* DE= Desviación estándar; CV= Coeficiente de variación (%).

La determinación de estas propiedades físicas se llevó a cabo siguiendo los lineamientos del Kellog Soil Survey Laboratory Methods Manual (Soil Survey Staff 2022), donde se describe en detalle los siguientes procedimientos de laboratorio: 1) La distribución del tamaño de partículas se determinó mediante el método de la pipeta; 2) La densidad aparente se determinó mediante el método del agregado estructural; 3) El contenido de carbono orgánico se estimó mediante una combustión seca en un analizador automatizado; 4) el contenido de humedad a 33 kPa se determinó equilibrando una muestra de suelo no alterada mediante una olla de presión y platos cerámicos porosos, para posteriormente determinar su humedad gravimétrica; y 5) el contenido de humedad a 1500 kPa se determinó equilibrando una muestra de suelo alterada (tamizada a <2 mm) mediante una cámara de presión y una membrana porosa. Las metodologías para las determinaciones realizadas para los otros suelos se detallan en Camacho *et al.* (2021).

Ecuaciones empíricas para el cálculo de CC y PMP con datos limitados

Las ecuaciones empíricas por evaluar en el presente trabajo se denominan: 1) Ecuación de Peele, la cual permite el cálculo del contenido de humedad retenido a 33 kPa o CC; 2) Ecuación de Briggs, la cual permite el cálculo del contenido de humedad retenido a 1500 kPa o PMP (Calvo 2005, Fuentes 1996). Dichas ecuaciones se derivan del modelo de cálculo de la humedad equivalente propuesta por Gardner (Briggs y Shantz 1912):

$$H_e = 0,555(A) + 0,187(l) + 0,027(a) \quad [1]$$

donde H_e es el equivalente de humedad gravimétrico (%), A es el contenido de arcilla (%), l es el contenido de limo (%) y a corresponde al contenido de arena (%).

Peele y Beale (1950) propusieron una ecuación lineal para la estimación de la humedad a capacidad de campo (CC) inferida de la humedad equivalente:

$$CC = 0,865(H_e) + 2,62 \quad [2]$$

dónde CC es la humedad gravimétrica a capacidad de campo (%).

Al sustituir en la ecuación 2 el término H_e por la ecuación 1 se obtiene la ecuación de Peele:

$$CC_i = 0,480(A) + 0,162(L) + 0,023(a) + 2,62 \quad [3]$$

donde CC_i es la humedad gravimétrica a capacidad de campo estimada (%) estimada para la “i”-ésima observación.

Para el cálculo de la humedad a punto de marchitez permanente se utilizó el modelo de Briggs y Shantz (1912), el cual deriva de la humedad equivalente:

$$W_c = H_e / 1,84 \quad [4]$$

donde W_c es el coeficiente de marchitez permanente (%).

Al sustituir en la ecuación 4 el término H_e por la ecuación 1 se obtiene la ecuación de Briggs:

$$W_{ci} = 0,302(A) + 0,102(L) + 0,0147(a) \quad [5]$$

donde W_{ci} es la humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente estimada (%) estimada para la “i”-ésima observación.

Para expresar dichos valores CC_i W_{ci} como contenido volumétrico de agua se utilizó la siguiente ecuación siguiendo la recomendación de Topp y Ferré (2002):

$$\theta = w \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad [6]$$

donde w es el contenido gravimétrico de humedad (g g^{-1}) correspondiente a cada valor de CC_i W_{ci} , θ es el contenido volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), ρ_b es el valor correspondiente de densidad aparente del suelo (g cm^{-3}) y ρ_w la densidad del agua ($\sim 1,00 \text{ g cm}^{-3}$).

Funciones de Pedotransferencia (PTFs) disponibles en Rosetta

Se evaluaron las funciones de pedotransferencia del programa informático Rosetta versiones Rosetta1 y Rosetta3. Dichas funciones calculan los parámetros de ajuste de la ecuación propuesta por van Genuchten (1980) para la estimación de la retención de agua y la conductividad hidráulica no saturada del suelo.

La función de van Genuchten (van Genuchten 1980) estima el contenido de humedad del suelo asociado a un valor de potencial hídrico en el suelo, mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_h = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad [7]$$

donde θ_h define el contenido de agua θ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) en función de la presión del agua en el suelo h ($\text{cm H}_2\text{O}$), θ_r y θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) son los contenidos de agua residual y saturado respectivamente, mientras que α ($1/\text{cm}$), n , y m ($1 - 1/n$) son parámetros de ajuste que definen la forma de la curva.

Las funciones de pedotransferencia desarrolladas por Schaap *et al.* (2001) en la versión Rosetta1 se generaron mediante algoritmos basados en utilizar redes neuronales artificiales (ANN) combinadas con un método de remuestreo del tipo “Bootstrap” para estimar los parámetros de la ecuación de van Genuchten (θ_s , θ_r , α , n , y m) a partir de la información correspondiente de PSDA (% arena, % limo, y % arcilla), densidad aparente, carbono orgánico, y los contenidos de humedad obtenidos a 33 kPa (CC) y a 1500 kPa (PMP). Este remuestreo del tipo Bootstrap, se utiliza para restringir la incertidumbre estadística de los datos de entrada.

Recientemente, Zhang y Schaap (2017) recalibraron estas PTFs mediante bases de datos con una mayor cantidad de perfiles de suelo y remuestreos del tipo “Bootstrap” mucho más intensivos, lo cual incrementó su precisión en la estimación de los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten. Dicha recalibración se denominó Rosetta3, y el código para ejecutar dichas PTFs se liberó para su acceso libre y potencial uso de forma gratuita para el apoyo en futuros estudios hidrológicos (Zhang y Schaap 2017).

Análisis estadístico

Para evaluar la similitud de los valores calculados con las PTFs y las ecuaciones empíricas contra los correspondientes valores determinados en el laboratorio, se ajustó un modelo de regresión lineal mediante la siguiente ecuación:

$$y = \beta_1 x + \beta_0 \quad [9]$$

donde y es la variable dependiente correspondiente a los valores estimados, x es la variable independiente correspondiente a los valores determinados o medidos, β_1 es la pendiente y β_0 es el intercepto. Los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas fueron evaluados siguiendo los lineamientos de descritos por Kozak y Piepho (2018).

Para la evaluación de la precisión y alcance de las ecuaciones empíricas y PTFs evaluadas, se calculó cuatro indicadores de desempeño de modelos, siendo estos el error cuadrático medio estándar (RMSE), el indicador de sesgo o error absoluto medio (MBA), y los índices de concordancia de Willmott (d-Index) y de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE).

En este cálculo, se utilizaron los valores de humedad obtenidos a 33 kPa (CC), a 1500 kPa (PMP), el agua disponible (AD) calculada como una diferencia entre CC y PMP provenientes de la base de datos del NCSS (2024) y Camacho *et al.* (2021) como valores determinados o medidos, mientras que los valores estimados con las PTFs de Rosetta1 y Rosetta3 y las ecuaciones de Peele y Briggs, se denominaron como calculados. Estos indicadores de desempeño se determinaron mediante las siguientes fórmulas:

Error cuadrático medio estándar (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_e - \theta_o)^2} \quad [10]$$

Error absoluto medio (MBA):

$$MBA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\theta_e - \theta_o| \quad [11]$$

Índice de concordancia de Willmott (d-Index):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_o - \theta_e)^2}{\sum_{i=1}^n (|\theta_o - \bar{\theta}_o| + |\theta_e - \bar{\theta}_o|)^2} \quad [12]$$

Índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), los cuales se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_o - \theta_e)^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_o - \bar{\theta})^2} \quad [13]$$

Donde n = número de observaciones totales; θ_o = Humedad determinada para la “i”-ésima observación, θ_e = humedad estimada para la “i”-ésima observación, y $\bar{\theta}$ = el valor promedio de las observaciones. Todos estos procedimientos de cálculo de los indicadores de desempeño anteriormente mencionados se realizaron utilizando el programa estadístico R Studio (R v. 4.0.4, 2021-02-15) “Lost Library Book” (Team R Studio 2015).

Resultados

Desempeño de dos ecuaciones empíricas en la estimación de la retención de humedad en suelos de Costa Rica

Los descriptores estadísticos del desempeño de predicción de las dos ecuaciones empíricas evaluadas para la estimación del contenido de agua a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), así como el agua disponible (AD) se detallan en el **Tabla 3**. Los valores obtenidos con ambas ecuaciones empíricas presentaron desvíos considerables respecto a sus correspondientes valores obtenidos en el laboratorio, expresados como valores de error cuadrático medio (RMSE) superiores a $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, con un valor máximo de $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para la ecuación de Peele (**Tabla 3**).

Estos comportamientos se describen de forma más clara en la **Figura 1**, donde se comparan los valores de humedad calculados con ambas ecuaciones, así como el valor de agua disponible calculados como la diferencia entre CC y PMP. Los valores calculados con la ecuación de Peele y sus correspondientes valores medidos no presentaron una tendencia evidente (**Figura 1A**), donde su correspondiente modelo de regresión no presentó significancia estadística ($p\text{-value} > 0,05$). Por otro lado, los valores calculados con la ecuación de Briggs y sus correspondientes valores medidos presentaron una tendencia más clara (**Figura 1B**), con un modelo de regresión que presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0,448, y un valor de la pendiente de 0,47 ($p\text{-value} < 0,05$). Al evaluar los resultados obtenidos para el agua disponible (**Figura 1C**), los valores calculados mediante las ecuaciones empíricas y sus correspondientes valores medidos presentaron una tendencia inversa, donde su correspondiente modelo de regresión lineal presentó una pendiente negativa (-0,278) y un coeficiente de determinación bajo ($R^2 = 0,319$) con significancia estadística ($p\text{-value} < 0,05$).

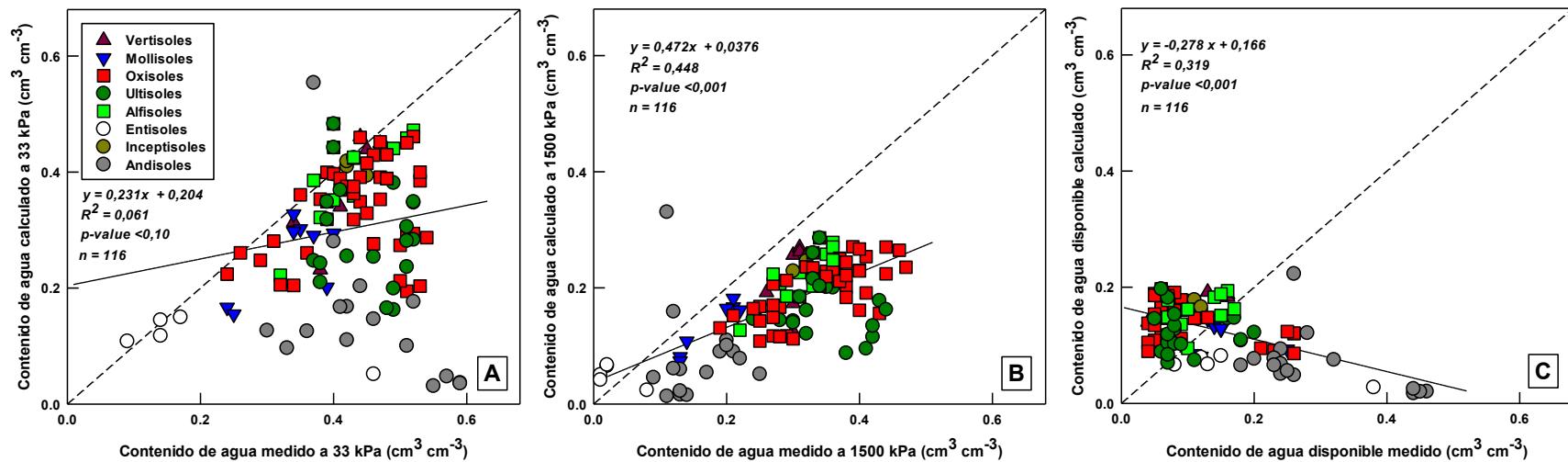


Figura 1. Comparación entre los resultados obtenidos de dos ecuaciones empíricas (Peele y Briggs) y los valores correspondientes obtenidos de los análisis de laboratorio para los contenidos de humedad de órdenes de suelos de Costa Rica: A) determinados a 33 kPa (CC); B) determinados a 1500 kPa (PWP), y C) el contenido de agua disponible del suelo (AD). Líneas discontinuas representan una relación 1:1 de los ejes del gráfico. Línea negra continua representa el modelo de mejor ajuste ($y = \beta_1 x + \beta_0$) entre las variables.

Figure 1. Comparison between the results obtained using two empirical equations (Peele and Briggs) and the corresponding laboratory-measured values of soil moisture content for soil orders in Costa Rica: A) determined at 33 kPa (FC); B) determined at 1500 kPa (PWP); and C) plant-available water content (AW). Dashed lines represent the 1:1 relationship between axes. The solid black line represents the best-fit model ($y = \beta_1 x + \beta_0$) between variables.

Tabla 3. Parámetros de capacidad predictiva para las ecuaciones empíricas para el cálculo de la humedad de capacidad de campo 33 kPa (CC), punto de marchitez permanente 1500 kPa (PMP) y el agua disponible (CC-PMP).

Table 3. Predictive performance metrics for the empirical equations for estimating soil water content at field capacity (33 kPa, FC), and permanent wilting point (1500 kPa, PWP), and plant-available water (FC – PWP).

Ecuación	CC				PMP				AD			
	RMSE*	MBA*	NSE	d-Index	RMSE*	MBA*	NSE	d-Index	RMSE*	MBA*	NSE	d-Index
Peele	0,1803	-0,1190	-2,9845	0,1885	-	-	-	-	-	-	-	-
Briggs	-	-	-	-	0,1372	-0,1137	-0,7644	0,5171	-	-	-	-
Peele - Briggs	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1240	-0,0054	-0,8021	-1,6127

* Valores del Error cuadrático medio (RMSE) and Error absoluto medio (MBA) presentan unidades de $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Índice de efficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el índice de concordancia de Willmott (d-Index) no tienen unidades.

Parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten obtenidos mediante funciones de pedotransferencia en suelos de Costa Rica

Los parámetros de ajuste obtenidos a partir de la función de pedotransferencia Rosetta1 para los horizontes evaluados se resumen en el **Tabla 4**. Al evaluar dichos parámetros en las tres categorías de horizontes genéticos (A, B y C), se observó que el parámetro α presentó la mayor variabilidad (expresada como coeficiente de variación CV) en los horizontes clasificados como A y B (valores de CV entre 102,72 y 62,50%, respectivamente), mientras que en los horizontes C el parámetro θ_r presentó la mayor variabilidad (CV = 121,95%) (**Tabla 4**). Este mismo parámetro (θ_r) presentó una variabilidad considerable (la segunda en magnitud) en los horizontes A y B (CV = 55,91 y 44,47%, respectivamente). Curiosamente, al evaluar los parámetros en los horizontes C, el parámetro α presentó la segunda mayor variabilidad (CV = 48,79%) (**Tabla 4**). Los valores de los parámetros de humedad residual (θ_r) y humedad a saturación (θ_s) presentaron respectivamente, valores promedio de 0,12 y 0,57 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en los horizontes A, mientras que en los horizontes B, dichos valores fueron 0,15 y 0,58 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Particularmente, al evaluar estos parámetros en los horizontes C los valores de θ_r y θ_s fueron menores (0,06 y 0,38 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente) (**Tabla 4**).

Por otro lado, al evaluar estos mismos parámetros de ajuste obtenidos a partir de la función de pedotransferencia Rosetta3, se observaron valores más bajos en los coeficientes de variación que los obtenidos con Rosetta1 (**Tabla 5**). En general, las tendencias en los parámetros de ajuste resultaron muy similares a las obtenidas por Rosetta1. El parámetro α presentó la mayor variabilidad en los horizontes A y B (CV = 76,73 y 49,44%, respectivamente), mientras que en los horizontes C el parámetro θ_r presentó la mayor variabilidad (CV = 98,68%) (**Tabla 5**). Nuevamente, los parámetros θ_r y α presentaron la segunda mayor variabilidad en magnitud en los horizontes A y C (CV = 38,83 y 33,30%, respectivamente), mientras que en los horizontes B el parámetro m presentó un CV = 37,04% (**Tabla 5**). En adición, los valores de los parámetros humedad residual (θ_r) y humedad a saturación (θ_s) evaluados en los horizontes A presentaron respectivamente, valores promedio de 0,14 y 0,55 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, mientras que en los horizontes B, dichos valores fueron 0,18 y 0,56 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. De forma similar, los valores de θ_r y θ_s en los horizontes C (0,08 y 0,38 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente) fueron menores que los observados en los horizontes A y B (**Tabla 5**).

Tabla 4. Resumen de los parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten obtenidos mediante las PTFs Rosetta1 para suelos de Costa Rica.

Table 4. Summary of the van Genuchten model fitting parameters obtained using the Rosetta1 PTFs for soils in Costa Rica.

Variable	n	Media	Mediana	DE*	CV*	Mínimo	Máximo
Horizonte A							
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	34	0,12	0,10	0,07	55,91	0,030	0,280
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	34	0,57	0,59	0,08	13,40	0,420	0,720
α (cm ⁻¹)	34	0,03	0,01	0,04	102,72	0,002	0,120
n	34	1,38	1,32	0,18	12,74	1,150	1,900
m	34	-0,27	-0,24	0,09	32,19	-0,470	-0,130
Horizonte B							
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	75	0,15	0,16	0,07	44,47	0,030	0,300
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	75	0,58	0,59	0,06	11,09	0,400	0,710
α (cm ⁻¹)	75	0,05	0,07	0,03	62,50	0,003	0,120
n	75	1,32	1,25	0,18	13,95	1,110	1,900
m	75	-0,23	-0,20	0,09	39,84	-0,470	-0,100
Horizonte C							
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	7	0,06	0,01	0,07	121,95	0,010	0,200
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	7	0,38	0,37	0,06	15,26	0,320	0,480
α (cm ⁻¹)	7	0,03	0,02	0,02	48,79	0,010	0,060
n	7	1,36	1,37	0,08	5,57	1,210	1,420
m	7	-0,26	-0,27	0,04	16,95	-0,300	-0,170

* DE= Desviación estándar; CV= Coeficiente de variación (%).

Tabla 5. Resumen de los parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten obtenidos mediante las PTFs Rosetta3 para suelos de Costa Rica.

Table 5. Summary of the van Genuchten model fitting parameters obtained using the Rosetta3 PTFs for soils in Costa Rica.

Variable	n	Media	Mediana	DE*	CV*	Mínimo	Máximo
Horizonte A							
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	34	0,14	0,14	0,05	38,83	0,050	0,260
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	34	0,55	0,57	0,06	11,02	0,420	0,680
α (cm ⁻¹)	34	0,02	0,01	0,01	76,73	0,002	0,040
<i>n</i>	34	1,38	1,31	0,17	12,62	1,140	1,820
<i>m</i>	34	-0,26	-0,23	0,08	32,25	-0,450	-0,130
Horizonte B							
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	75	0,18	0,19	0,06	32,11	0,050	0,310
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	75	0,56	0,57	0,06	10,33	0,380	0,670
α (cm ⁻¹)	75	0,02	0,03	0,01	49,44	0,003	0,040
<i>n</i>	75	1,32	1,27	0,17	13,04	1,110	1,870
<i>m</i>	75	-0,23	-0,21	0,09	37,04	-0,460	-0,100
Horizonte C							
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	7	0,08	0,03	0,08	98,68	0,030	0,210
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	7	0,38	0,36	0,06	16,22	0,330	0,490
α (cm ⁻¹)	7	0,02	0,02	0,01	33,3	0,010	0,030
<i>n</i>	7	1,37	1,39	0,07	5,3	1,240	1,460
<i>m</i>	7	-0,27	-0,28	0,04	15,07	-0,310	-0,190

* DE= Desviación estándar; CV= Coeficiente de variación (%).

Desempeño de funciones de pedotransferencia en la estimación de la retención de humedad en suelos de Costa Rica

Los descriptores estadísticos del desempeño de predicción de las funciones de pedotransferencia (PTFs) Rosetta1 y Rosetta3 para la estimación del contenido de agua a CC, PMP, y AD se detallan en la **Tabla 6**. Los valores de humedad para CC y PMP estimados con las funciones de pedotransferencia de Rosetta3 presentaron los menores desvíos con respecto a sus correspondientes valores medidos, expresados como los valores más bajos en los siguientes descriptores estadísticos: 1) RMSE (0,036 y 0,057 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; respectivamente) y 2) MBA (-0,0258 y -0,0446 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) al compararlos con los obtenidos mediante las funciones de Rosetta1 (**Tabla 6**).

De forma similar, los resultados obtenidos mediante las funciones de Rosetta3 presentaron los mejores valores para los índices de Nash-Sutcliffe (NSE) e índice de concordancia de Willmott (d-Index) al compararlos con los obtenidos para la función Rosetta1. En ese sentido, para CC se obtuvo un NSE de 0,832 y un d-Index de 0,9515, valores muy cercanos a 1. En el caso de PMP, los valores obtenidos para estos dos índices fueron menores (0,6729 y 0,8980; respectivamente), pero fueron más elevados que los obtenidos para los resultados correspondientes estimados mediante Rosetta1 (**Tabla 6**). Estos comportamientos se describen de forma más clara en las **Figuras 2** y **3**, donde se comparan los valores de humedad calculados con los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten obtenidos con ambas Rosetta1 y Rosetta3, respectivamente. Al ajustar los modelos de regresión lineal entre los valores medidos en laboratorio y los estimados utilizando Rosetta1 (**Figura 2**) para cada contenido de agua (CC, PMP, y AD) los coeficientes de determinación (R^2) fueron para CC 0,951, PMP 0,931 y AD 0,892, con significancia estadística ($p\text{-value} < 0,05$). Pese a lo anterior, se observaron algunas desviaciones notables de esta tendencia, puntualmente en el orden Andisoles, donde ciertos horizontes en un perfil de suelo específico (señalados con flechas) se desviaron considerablemente en los valores CC (medido a 33kPa) y el agua disponible (**Figura 2A** y **C**).

Por otro lado, al evaluar los resultados obtenidos con Rosetta3 se observó comportamientos similares en el rendimiento predictivo en las mismas condiciones (**Figura 3**). Los coeficientes de determinación (R^2) de los modelos de regresión lineales ajustados para Rosetta3, alcanzaron valores de 0,934, 0,908 y 0,895 para los valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente y agua disponible, respectivamente.

Tabla 6. Parámetros de capacidad predictiva para las funciones empleadas para el cálculo de la humedad de capacidad de campo 33 kPa (CC), punto de marchitez permanente 1500 kPa (PMP) y el agua disponible (CC-PMP).

Table 6. Predictive performance metrics for the Rosetta1 and Rosetta3 PTFs at field capacity (33 kPa, FC), permanent wilting point (1500 kPa, PWP), and plant-available water (FC – PWP).

Función	CC				PMP				AD			
	RMSE*	MBA*	NSE	d-Index	RMSE*	MBA*	NSE	d-Index	RMSE*	MBA*	NSE	d-Index
Rosetta1	0,0520	-0,0464	0,6406	0,8989	0,0768	-0,0688	0,4178	0,8329	0,0326	0,0224	0,7832	0,9378
Rosetta3	0,0360	-0,0258	0,8322	0,9515	0,0575	-0,0446	0,6729	0,8980	0,0343	0,0188	0,7590	0,9158

* Valores del Error cuadrático medio (RMSE) y Error absoluto medio (MBA) presentan unidades de $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Índice de efficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el índice de concordancia de Willmott (d-Index) no tienen unidades.

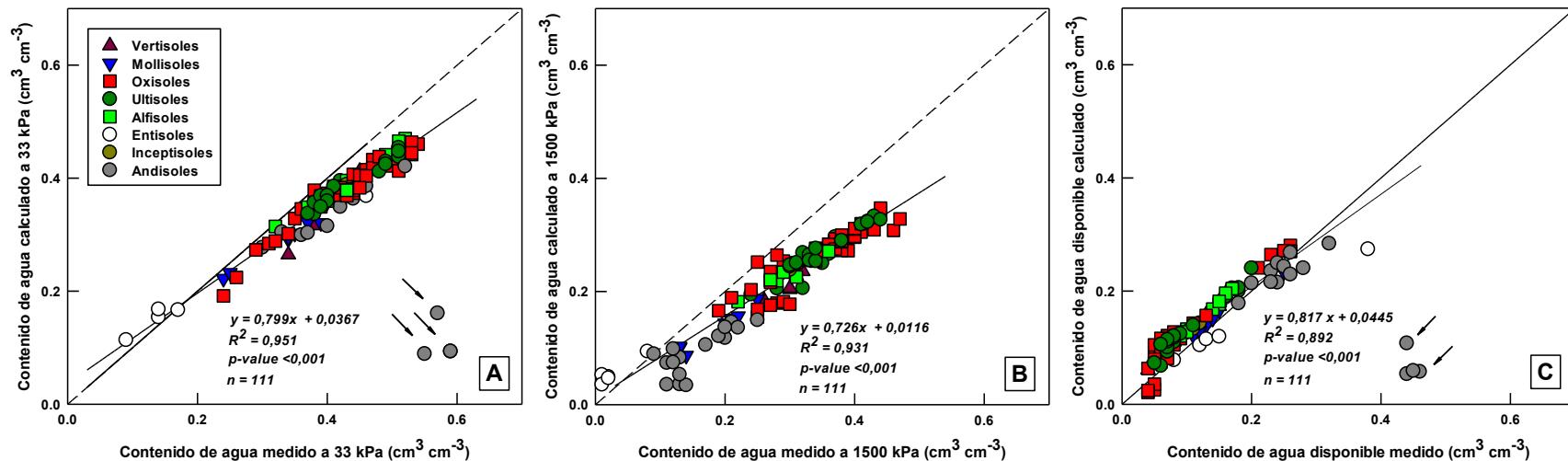


Figura 2. Comparación entre los resultados obtenidos de las funciones de pedotransferencia incluidas en el modelo Rosetta1 y los valores correspondientes obtenidos de los análisis de laboratorio para los contenidos de humedad de órdenes de suelos de Costa Rica: A) determinados a 33 kPa (CC); B) determinados a 1500 kPa (PMP), y C) el contenido de agua disponible del suelo (AD). Líneas discontinuas representan una relación 1:1 de los ejes del gráfico. Línea negra continua representa el modelo de mejor ajuste ($y = \beta_1 x + \beta_0$) entre las variables. Flechas negras señalan valores atípicos, los cuales no se incluyeron en los análisis de regresión.

Figure 2. Comparison between the results obtained using the pedotransfer functions implemented in the Rosetta1 model and the corresponding laboratory-measured values of soil moisture content for soil orders in Costa Rica: A) determined at 33 kPa (FC); B) determined at 1500 kPa (PWP); and C) plant-available water content (AW). Dashed lines represent the 1:1 relationship between axes. The solid black line represents the best-fit model ($y = \beta_1 x + \beta_0$) between variables. Black arrows indicate outliers, which were excluded from the regression analyses.

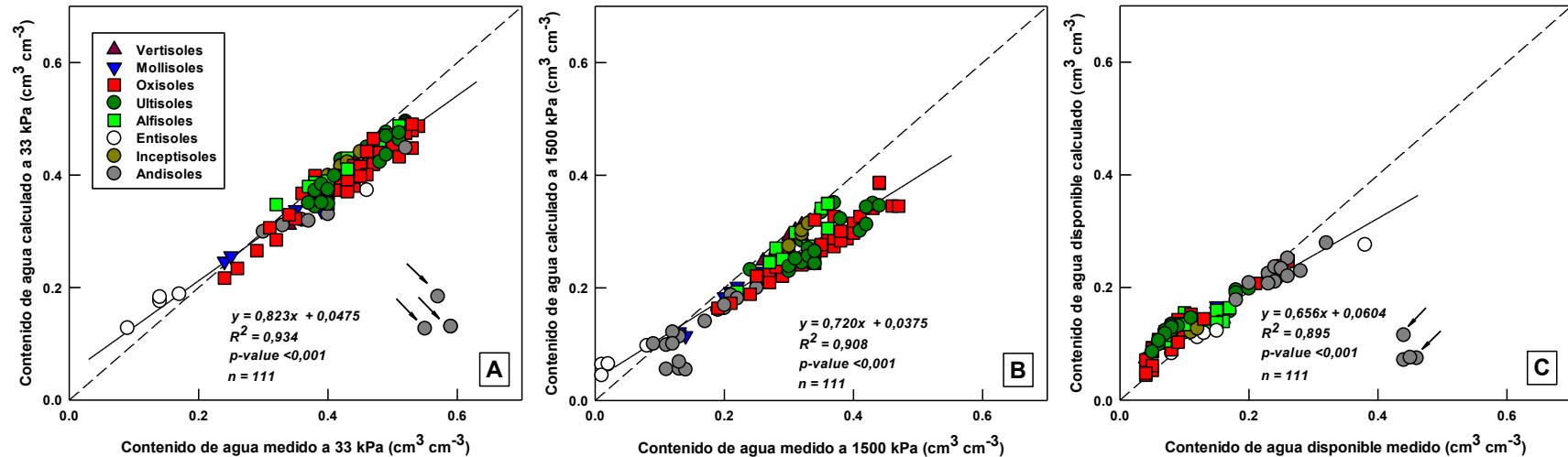


Figura 3. Comparación entre los resultados obtenidos de las funciones de pedotransferencia incluidas en el modelo Rosetta3 y los valores correspondientes obtenidos de los análisis de laboratorio para los contenidos de humedad de órdenes de suelos de Costa Rica: A) determinados a 33 kPa (CC); B) determinados a 1500 kPa (PMP), y C) el contenido de agua disponible del suelo (AD). Líneas discontinuas representan una relación 1:1 de los ejes del gráfico. Línea negra continua representa el modelo de mejor ajuste ($y = \beta_1 x + \beta_0$) entre las variables. Flechas negras señalan valores atípicos, los cuales no se incluyeron en los análisis de regresión.

Figure 3. Comparison between the results obtained using the pedotransfer functions implemented in the Rosetta3 model and the corresponding laboratory-measured values of soil moisture content for soil orders in Costa Rica: A) determined at 33 kPa (FC); B) determined at 1500 kPa (PWP); and C) plant-available water content (AW). Dashed lines represent the 1:1 relationship between axes. The solid black line represents the best-fit model ($y = \beta_1 x + \beta_0$) between variables. Black arrows indicate outliers, which were excluded from the regression analyses.

Discusión

Desempeño de funciones de pedotransferencia en suelos de Costa Rica

Ecuaciones empíricas de Peele y Briggs

Los resultados obtenidos en el presente estudio (**Figura 1** y **Tabla 3**) demostraron un desempeño pobre de ambas ecuaciones para una estimación confiable del contenido de humedad retenido a CC y PMP, así como el AD inferido a partir de estos dos valores. La ausencia de una tendencia evidente y lógica en los valores obtenidos con estas ecuaciones empíricas cuestiona fehacientemente su uso en otros estudios y aplicaciones, pese a su recomendación ante la ausencia de valores de laboratorio (Calvo 2005, Fuentes 1996).

Dichas ecuaciones empíricas se fundamentan en la relación entre la distribución del tamaño de partículas (textura del suelo) y un concepto antiguo denominado “humedad equivalente” (Nemes y Rawls 2004). La determinación de la humedad equivalente se realizaba por medio de la aplicación de fuerza centrífuga (de magnitud 1000 veces la fuerza de gravedad) a una muestra de suelo húmedo, la cual posteriormente se le determina su contenido de humedad gravimétrica (Briggs y McLane 1910). Posteriormente, este equivalente de humedad se relacionó con los valores de humedad a marchitez permanente (Briggs y Shantz 1912) y capacidad de campo (Peele y Beale 1950), para lo cual se desarrollaron ecuaciones que incluyeron los porcentajes de arena, limo y arcilla. Dichos conceptos son obsoletos en la actualidad, y cayeron en desuso a partir de la introducción de las metodologías de platos porosos y cámaras de presión de Richards (Richards y Fireman 1943) así como el uso de técnicas más modernas para la determinación de la retención de humedad (Hidalgo-Campos y Camacho-Umaña 2024).

El uso de estas dos ecuaciones empíricas como alternativa ante la falta de datos de retención de humedad tendría serias repercusiones en la estimación de la lámina de riego, especialmente en Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles, donde los valores de agua disponible se sobreestiman en hasta un 100% (**Figura 1C**). Generalmente, estos suelos altamente meteorizados suelen presentar contenidos bajos ($< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) de agua disponible, asociado con contenidos elevados de caolinita, óxidos de Fe y Al y bajos contenidos de materia orgánica (West *et al.* 1997, Buol y Eswaran 1999, Boul *et al.* 2011, Camacho *et al.* 2021).

Funciones de pedotransferencia disponibles en Rosetta 1 y Rosetta 3

Los resultados obtenidos en el presente estudio (**Figuras 2 y 3**) sugieren que las funciones de pedotransferencia presenta un buen desempeño en la determinación de los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten. Además, de un desempeño medio en la subsecuente estimación del contenido de humedad (**Tabla 6**) a capacidad de campo (33 kPa) y en punto de marchitez permanente (1500 kPa), ya que los parámetros estadísticos indican desvíos considerables desde la perspectiva del contenido de agua en el suelo (**Tabla 6**). Al respecto, Camacho-Umaña *et al.* (2025) en su estudio sobre la estimación del régimen de humedad del suelo y el balance hídrico en suelos altamente meteorizados, evaluaron las ecuaciones de pedotransferencia disponibles en Rosetta1 como alternativa a la determinación directa de la retención de humedad del suelo. Los autores encontraron un bajo desempeño de dichas PTFs en la estimación de los valores de CC, PMP y AD, con una tendencia a sobreestimar el contenido de agua útil (con valores de RMSE de 0,04 cm³cm⁻³).

da Silva *et al.* (2017) evaluaron el desempeño de las funciones de pedotransferencia (PTFs) Splintex y Rosetta para estimar la variabilidad espacial de propiedades hidráulicas del suelo (CC, PMP y AD). Sus resultados indican que ambas PTFs fueron efectivas, aunque su precisión varía debido a la heterogeneidad del suelo y las condiciones ambientales, ya que los mapas hidráulicos calculados para dichas propiedades fueron diferentes a los mapas de los datos medidos. Lo anterior demuestra que las PTFs deben usarse con cuidado, siendo crucial la validación con datos de campo o laboratorio para asegurar la fiabilidad de las estimaciones (Patil y Singh 2016). Hodnett y Tomassella (2002) desarrollaron PTFs para la estimación de los parámetros de van Genuchten en suelos tropicales de Brasil. Estos autores compararon sus resultados con otras PTFs desarrolladas en regiones de clima templado, y encontraron diferencias significativas (p -value < 0,001) en los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten, cuyas diferencias se pueden deber a la génesis del suelo, los minerales secundarios imperantes (caolinita vs montmorillonita) y una subrepresentación de muestras con clases texturales finas y muy finas en las bases de datos empleadas para el desarrollo de las PTFs en regiones templadas (como por ejemplo Rosetta1 y Rosetta3).

Las bases de datos utilizadas en el desarrollo de las funciones de pedotransferencia (PTF) pueden no representar adecuadamente la diversidad de suelos de una región o a nivel global (Hodnett y Tomassella 2002, Tomasella *et al.* 2000). Esto da como resultado que las PTFs tiendan a estar sesgadas hacia las características de las bases de datos en las que se calibraron (Schaap y Leij 1998). Esta limitación resalta la necesidad de una validación cuidadosa y el uso de datos locales para mejorar la precisión de las estimaciones obtenidas con estas funciones (Van Looy *et al.* 2017).

Kubát *et al.* (2024) evaluaron el impacto de las funciones de pedotransferencia y las condiciones iniciales de humedad en la infiltración del agua en el suelo. Encontraron que los parámetros para modelar la infiltración presentaron mayor sensibilidad al utilizar Rosetta3 en comparación con otras PTFs. Además, estos autores resaltaron la importancia de no depender de las propiedades hidráulicas del suelo provenientes de bases de datos sin vínculos con mediciones de campo, lo que pone en duda su correlación. Dicho estudio enfatiza en la necesidad de contar con datos de suelo de alta calidad, aunque resulten costosos y requieran tiempo para mejorar la precisión de los modelos.

Implicaciones de las PTFs en el manejo de sistemas productivos de Costa Rica

El uso de las funciones de pedotransferencia evaluadas en el presente estudio podrían tener serias repercusiones en la gestión de los recursos suelo y agua en las distintas regiones agrícolas de Costa Rica, donde la agricultura representa la principal actividad socioeconómica (Camacho-Umaña *et al.* 2024). Por lo tanto, las estimaciones del contenido de humedad a CC y PMP obtenidas mediante las PTFs disponibles en Rosetta1 y Rosetta3 podrían ajustarse muy bien a los valores obtenidos mediante otros métodos directos de determinación de la retención de humedad (Dane y Hopmans 2002, Hidalgo-Campos y Camacho-Umaña 2024) tal como se ha reportado de forma previa en la literatura para otros suelos Tropicales (Hodnett y Tomassella 2002, Tomasella *et al.* 2000). Sin embargo, es importante considerar que gran parte de estos buenos ajustes se deben a la inclusión en el cómputo de los valores de humedad medidos a CC y PMP (variables de forzamiento), lo cual mejora en gran medida el ajuste del modelo de van Genuchten para el suelo en estudio, y limitando el enfoque de la estimación del agua disponible a partir de otras variables físicas del suelo.

Si bien, los resultados obtenidos en el presente trabajo sugieren un buen desempeño en la estimación de los parámetros de van Genuchten, al evaluar las potenciales predicciones derivadas (en este caso, CC, PMP y AD) podrían presentar diferencias considerables y potenciales errores en la estimación del contenido de humedad del suelo.

Lo anterior coincide con lo reportado por Botula *et al.* (2012) para suelos en la República Democrática del Congo, quienes evaluaron PTF's desarrolladas tanto en regiones templadas como en otras regiones tropicales. Los autores explican que estas desviaciones se deben a las diferencias en los procesos pedogenéticos imperantes en las distintas regiones donde se ajustaron las PTF's, dando como resultado divergencia en los minerales de arcilla (Botula *et al.* (2012). En ese sentido, las arcillas de baja actividad como la Caolinita y los oxihidróxidos de Fe y Al tienen a una menor retención de humedad en comparación con minerales del tipo esmectítico (Montmorillonitas), lo que podría explicar dichas diferencias en las estimaciones del contenido de humedad del suelo, pese que se presente un valor total similar del contenido de arcilla (Medina *et al.* 2002).

De forma similar a lo anteriormente mencionado, al contrastar los valores obtenidos mediante análisis de laboratorio contra los estimados mediante Rosetta1 y Rosetta3 en horizontes A_p con texturas arena franca y franco arenosa (pedones Irazú y Chiguá) se encontró concordancia elevada (**Figura 4A y B**). Sin embargo, estas mismas funciones generaron valores que se desvían dramáticamente de los obtenidos a partir de muestras de laboratorio, como en el caso de dos horizontes B obtenidos en el pedón Palmira (**Figura 4C y D**), con texturas muy similares al horizonte A_p del pedón Chiguá (**Figura 4B**). Al evaluar los posibles valores de agua útil que se calculan a partir de la información obtenida tanto con las PTFs como con los valores medidos para estos cuatro horizontes, se observan diferencias evidentes (**Figura 4C y D**). El horizonte B_h presenta un valor medido de agua útil de 0,44 cm³ cm⁻³ el cual contrasta con 0,16 cm³ cm⁻³ calculado a partir de los parámetros obtenidos mediante Rosetta1 y Rosetta3. De forma similar, en el horizonte B_w del pedón Palmira se observó un valor medido de agua útil de 0,46 cm³ cm⁻³ que es casi ocho veces mayor que el calculado a partir de las PTFs (0,057 cm³ cm⁻³).

Estas diferencias anteriormente mencionadas se pueden asociar con la génesis de estos suelos, la cual les confiere propiedades fisicoquímicas particulares. De forma general, los Andisoles presentan texturas francas y franco arenosas, valores bajos de densidad aparente (<0,9 Mg m⁻³), altos contenidos de carbono orgánico, y una elevada capacidad de retención de humedad (Nanzyo *et al.* 1993, Buol *et al.* 2011).

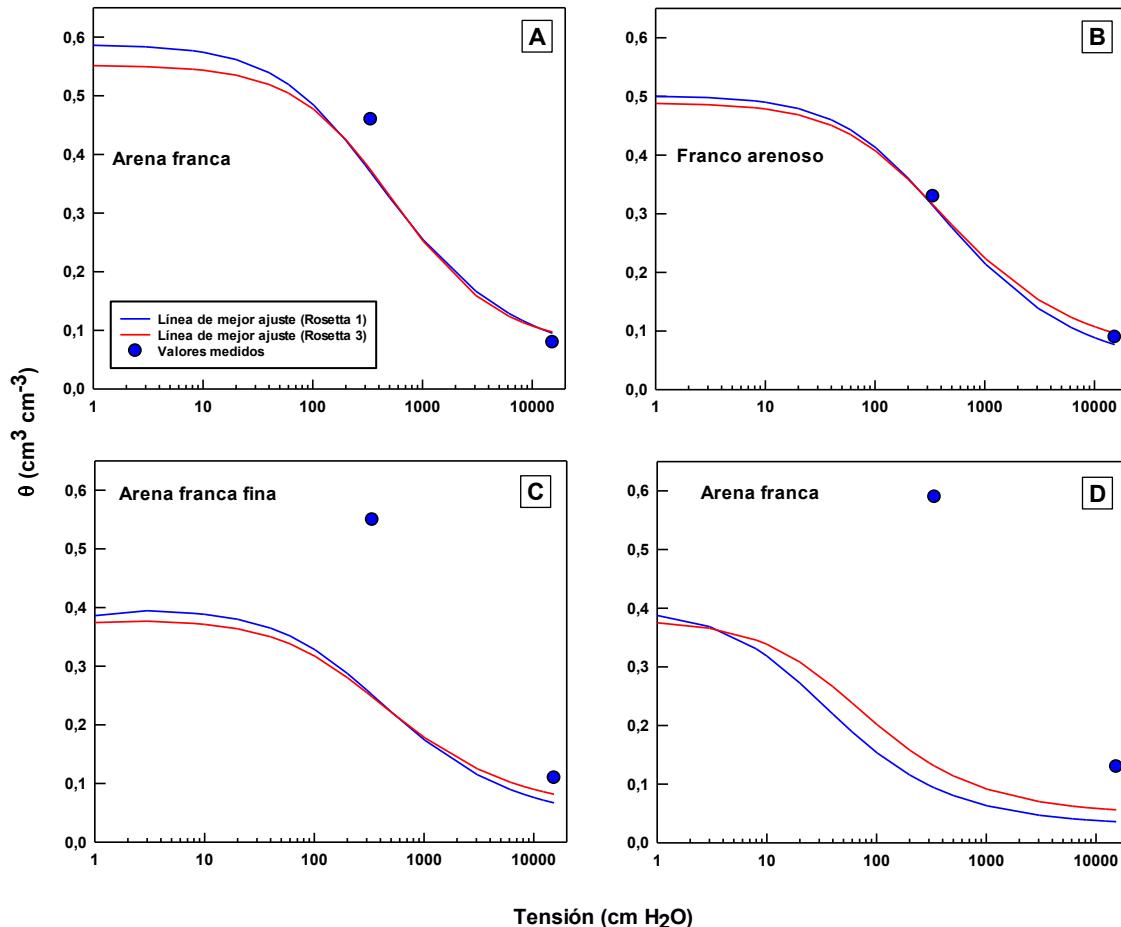


Figura 4. Evaluación del desempeño de las funciones de pedotransferencia incluidas en los modelos Rosetta1 y Rosetta3, sobre la estimación de los contenidos de humedad (θ) a dos puntos (CC y PMP) y su contraste con los valores determinados en laboratorio para cuatro horizontes de suelos de Costa Rica. A) Horizonte A de Irazú. B) Horizonte A_p de Chicuá. C) Horizonte B_h de Palmira. D) Horizonte B_w de Palmira. Líneas azules representan los valores calculados a partir de los resultados obtenidos con Rosetta1, mientras que las líneas rojas representan los obtenidos con Rosetta3. Círculos azules representan los valores obtenidos en laboratorio.

Figure 4. Performance assessment of the pedotransfer functions implemented in the Rosetta1 and Rosetta3 models for estimating soil moisture content (θ) at two reference points (FC and PWP), compared against laboratory-determined values for four soil horizons in Costa Rica. A) A horizon from Irazú. B) A_p horizon from Chicuá. C) B_h horizon from Palmira. D) B_w horizon from Palmira. Blue lines represent values calculated using Rosetta1, while red lines represent those obtained using Rosetta3. Blue circles indicate laboratory-measured values.

La presencia de arcillas del tipo alofanas les permite la retención de elevadas cantidades de agua a valores elevados de tensión, debido a su capacidad de acomodo de moléculas de agua en los vacíos inter e intraesféricos de estos coloides (Nanzyo *et al.* 1993). Este aspecto resulta de suma importancia en la consideración y evaluación de estas PTF's en suelos volcánicos tropicales, de los cuales no se cuenta con reportes en la literatura. Si bien existen estudios como el de Cichota *et al.* (2013) quienes evaluaron PTF's para la retención de humedad en suelos volcánicos de Nueva Zelanda, dichos Andisoles presentan mecanismos pedogenéticos divergentes, lo cual le da un valor agregado los resultados obtenidos en el presente estudio.

Estas discrepancias entre los valores medidos y estimados tienen serias implicaciones en el manejo del riego, ya que al utilizar ambos valores de agua útil (medido vs estimado con PTFs) en el cálculo de la lámina de riego, se podrían obtener diferencias de entre tres y ocho veces la cantidad de agua necesaria para mantener las necesidades de riego (Calvo 2005). En ese sentido estas diferencias observadas en la **Figura 4** no solamente repercuten en el costo económico del recuso agua como insumo fundamental en los sistemas agrícolas, sino también podrían afectar el recurso suelo, ya que la sobreestimación de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo generaría un exceso de aplicación de agua para riego que podría causar problemas de erosión por escorrentía superficial y pérdida de nutrientes por lixiviación. Por el lado contrario, por subestimar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo generaría un déficit de aplicación de agua para riego que podría causar pérdidas en la producción del cultivo. Estos potenciales problemas también se han señalado en la literatura, donde la escogencia de un método de análisis para determinar el agua útil para el cultivo puede generar repercusiones técnicas y económicas importantes en los distintos sistemas agrícolas (Hidalgo-Campos y Camacho-Umaña 2024).

Por otro lado, si bien los resultados obtenidos señalan que las funciones de pedotransferencia evaluadas presentan un buen desempeño en la estimación de los parámetros de van Genuchten, estas funciones requieren una cantidad substancial de parámetros de entrada, así como parámetros de forzamiento, incluyendo los valores de humedad determinados a CC y PMP (Schaap *et al.* 2001; Zhang y Schaap 2017). En ese sentido, el uso de las funciones de pedotransferencia resulta impráctico en sitios carentes de estos datos, en especial si el objetivo de uso es la estimación de la lámina de riego, ya que la determinación directa de estos valores sería más adecuada.

Pese a lo anterior, las funciones de pedotransferencia podrían ser útiles para otras aplicaciones como el modelado hidrológico mediante software como HYDRUS®, donde se requiere los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten como variables de entrada para la simulación del movimiento de agua y solutos en el suelo (Šimůnek *et al.* 2016), simulaciones de productividad de los cultivos y manejo del agua (Raes *et al.* 2009), o estudios sobre modelizado hidrológico superficial y subterráneo (Jaber y Shukla, 2012).

Esto anterior representa una oportunidad para el desarrollo de estudios exploratorios sobre los procesos físicos del suelo e hidrológicos en sitios con disponibilidad de datos como la densidad aparente, contenido de carbono, distribución del tamaño de partículas y los valores de retención de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio demostraron un muy bajo desempeño de las dos ecuaciones empíricas de Peele y Briggs en la estimación de la humedad volumétrica retenida a capacidad de campo (CC) y marchitez permanente (PMP) en suelos de Costa Rica. Estas estimaciones erróneas resultan en sobreestimaciones de los valores de agua útil de hasta un 100% en suelos altamente meteorizados, los cuales de forma general presentan valores bajos de esta propiedad física.

También se observó un buen desempeño de las dos funciones de pedotransferencia evaluadas (Rosetta1 y Rosetta3) en la estimación de los parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten para la mayoría de los suelos evaluados. Pese a lo anterior, las estimaciones de agua útil mediante dichas PTF's presentaron desvíos considerables en ciertos suelos como aquellos clasificados dentro del orden de los Andisoles. Este aspecto es de suma importancia, pues los resultados obtenidos en el presente estudio representan una contribución al manejo de los recursos suelo y agua en regiones tropicales, especialmente en paisajes volcánicos.

En ese sentido, una PTF puede presentar buenas estimaciones de los parámetros de la ecuación de van Genuchten, y sus predicciones derivadas (como los valores de CC y PMP) pueden mostrar un sesgo importante en suelos con características particulares, como texturas francas franco-arenosas derivadas de materiales volcánicos, donde diferencias de entre tres y ocho veces la cantidad de agua necesaria para mantener las necesidades de riego.

Pese a lo anterior, dichas PTFs podrían ser de utilidad en estudios de modelizado hidrológico ante la ausencia de los datos completos de la curva de retención de humedad. Sin embargo, se recomienda que la evaluación de los resultados obtenidos con estas PTFs se verifique contra valores determinados mediante métodos estandarizados de laboratorio.

Se sugiere precaución en el uso de estas dos PTFs (Rosetta1 y Rosetta3) para la estimación directa del contenido de humedad del suelo en suelos de Costa Rica, ya que estos valores podrían tener repercusiones en el manejo adecuado de los recursos agua y suelo. También se recomienda continuar con este tipo de estudios e incluir una mayor cantidad de suelos en Costa Rica, ya que los resultados obtenidos no son extrapolables a la totalidad de suelos del país, debido a la diversidad pedogenética imperante.

Literatura citada

- Briggs, LJ; Shantz, H. 1912. The wilting coefficient and its indirect determination. *Botanical Gazette* 53(1):20-37. DOI: <https://doi.org/10.1086/330708>
- Briggs, LJ; McLane, JW. 1910. Moisture equivalent determinations and their application. *Agronomy journal* 2(1):138-147. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1910.00021962000200010024x>
- Botula, YD; Cornelis, WM; Baert, G; Van Ranst, E. 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (DR Congo). *Agricultural water management* 111:1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.006>
- Buol, SW; Eswaran, H. 1999. Oxisols. *Advances in agronomy* 68:151-195. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60845-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60845-7)
- Buol, SW; Southard, RJ; Graham, RC; McDaniel, PA. 2011. *Soil genesis and classification*. 6 ed. John Wiley & Sons, Chichester, UK, p. 543.
- Calvo, LR. 2005. *Métodos de riego: un enfoque práctico para el diseño*. Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 168 p.

Camacho, ME; Mata, R; Barrantes-Víquez, M; Alvarado, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *Catena* 197:104992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104992>

Camacho-Umaña, ME; Quesada-Román, A; Villatoro-Sánchez, M; Alemán-Montes, B; Mata, R; Henríquez-Henríquez, C; Céspedes-Rivera, J; Céspedes-Rivera, M; Alvarado, A. 2024. Agricultural Landscapes of Costa Rica. *In Landscapes and Landforms of Costa Rica*. Cham: Springer International Publishing. p. 221-258. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-64940-0_11

Camacho-Umaña, ME; Forsythe, WM; Alvarado-Hernández, A. 2025. A simple method to determine soil moisture regime for highly weathered tropical soils. *Agronomía Costarricense* 49:544. DOI: <https://doi.org/10.15517/e0cqs43>

Cichota, R; Vogeler, I; Snow, VO; Webb, TH. 2013. Ensemble pedotransfer functions to derive hydraulic properties for New Zealand soils. *Soil Research* 51(2):94-111. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR12338>

da Silva, AC; Armindo, RA; Brito, ADS; Schaap, MG. 2017. An assessment of pedotransfer function performance for the estimation of spatial variability of key soil hydraulic properties. *Vadose Zone Journal* 16(9):1-10. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0139>

Dane, JH; Hopmans, JW. 2002. 3.3.2 Laboratory. 3.3.2.4. Pressure Plate Extractor. *In* Dane, JH; Topp, GC (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. SSSA Book Series. Soil Science Society of America. Madison, WI. p. 675-719. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabooksr5.4.c25>

Fuentes, JL. 1996. *Técnicas de Riego*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España, Mundi Prensa. 417 p.

Gardner, WR; Miklich, FJ. 1962. Unsaturated conductivity and diffusivity measurements by a constant flux method. *Soil Science* 93(4):271-274.

Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. San Diego, CA, Academic Press. 771 p.

Hidalgo-Campos, CM; Camacho-Umaña, ME. 2024. Potencial hídrico y contenido del agua en el suelo: Métodos de análisis disponibles y sus implicaciones en el manejo de los recursos suelo y agua. *Agronomía Costarricense* 48(2):167-197. DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v48i2.62575>

Hodnett, MG; Tomasella, J. 2002. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma* 108(3-4):155-180 [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00105-2)

Hopmans, JW; Šimůnek, J; Mohanty, BP. 2024. Tribute to Rien van Genuchten, recipient of the 2023 Wolf Prize for Agriculture. *Vadose Zone Journal* 23(4):e20327. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20327>

Jaber, FH; Shukla, S. 2012. MIKE SHE: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4):1479-1489. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.42255>

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In Klute, A (ed.). *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 5.1. 2 ed. Madison, Wisconsin, USA, SSSA Book Series. p. 635-662. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>

Kozak, M; Piepho, HP. 2018. What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. *Journal of agronomy and crop science* 204(1):86-98. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12220>

Kotlar, AM; de Jong van Lier, Q; Barros, AHC; Iversen, BV; Vereecken, H. 2019. Development and uncertainty assessment of pedotransfer functions for predicting water contents at specific pressure heads. *Vadose Zone Journal* 18(1):190063. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2019.06.0063>

Kubát, JF; Strouhal, L; Kavka, P. 2024. Estimation of Infiltration Parameters: The Role of Pedotransfer Functions and Initial Moisture Conditions. *Journal of Hydrology* 633:130954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130954>

Lima, HVD; da Silva, ÁP. 2008. Mesa de tensão com areia: procedimentos para montagem e validação. Revista Brasileira de Ciência do Solo 32: 2209-2214. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500041>

Medina, H; Tarawally, M; del Valle, A; Ruiz, ME. 2002. Estimating soil water retention curve in rhodic ferralsols from basic soil data. Geoderma 108(3-4):277-285. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00135-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00135-0)

Nanzyo, M; Shoji, S; Dahlgren, R. 1993. Physical characteristics of volcanic ash soils. In Shoji, S; Nanzyo, M; Dahlgren, SR (eds.). Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science (21). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. p.189-208.

NCSS (National Cooperative Soil Survey). 2024. National Cooperative Soil Survey Soil Characterization Database. Disponible en <https://ncsslabdatamart.sc.egov.usda.gov/>

Nemes, A; Rawls, WJ. 2004. Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties, Developments in soil Science. Elsevier, Amsterdam, p. 47–70. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(04\)30004-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30004-8)

Pachepsky, Y; Rawls, WJ. 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Elsevier.

Patil, NG; Singh, SK. 2016. Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties: A review. Pedosphere 26(4):417-430. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60054-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60054-6)

Peele, TC; Beale, OW. 1950. Relation of moisture equivalent to field capacity and moisture retained at 15 atmospheres pressure to the wilting percentage. Agronomy Journal 42:604-607. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1950.00021962004200120006x>

Peters, A; Durner, W. 2008. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. Journal of Hydrology 356(1-2):147-162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.016>

Raes, D; Steduto, P; Hsiao, TC; Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101(3):438-447. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

Richards, LA; Fireman, M. 1943. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science* 56(6):395-404.

Saxton, KE; Rawls, W; Romberger, JS; Papendick, RI. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil science society of America Journal* 50(4):1031-1036. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>

Schaap, MG; Leij, FJ. 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science* 163(10):765-779. Disponible en <https://journals.lww.com/soilsci/toc/1998/10000>

Schaap, MG; Leij, FJ; van Genuchten, MT. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251(3-4):163-176. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)

Schindler, U; Müller, L. 2006. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of plant nutrition and soil science* 169(5):623-629. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521895>

Šimůnek, J; Genuchten, MT; Šejna, M. 2016. Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal* 15(7):1-25. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>

Soil Survey Staff. 2022. Kellogg Soil Survey Laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 6.0. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Team, R Studio. 2015. RStudio: integrated development for R. RStudio. Inc., Boston, MA, 700, 879.

Terink, W; Lutz, AF; Simons, GWH; Immerzeel, WW; Droogers, P. 2015. SPHY v2. 0: Spatial processes in hydrology. Geoscientific Model Development 8(7):2009-2034. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2009-2015>

Tomasella, J; Hodnett, MG. 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. Soil science 163(3):190-202.

Tomasella, J; Hodnett, MG; Rossato, L. 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. Soil Science Society of America Journal 64(1):327-338. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641327x>

Tomasella, J; Pachepsky, YA; Crestana, S; Rawls, WJ. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. Soil Science Society of America Journal 67(4):1085-1092. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1085>

Topp, GC; Ferre, PA. 2002. Water Content. In Dane, JH; and Topp GC (ed.). Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. SSSA Book Series. Soil Science Society of America. Madison, WI. p.417-546. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c19>

van Genuchten, MT. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America Journal 44(5):892-898. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Van Looy, K; Bouma, J; Herbst, M; Koestel, J; Minasny, B; Mishra, U; Vereecken, H. 2017. Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. Reviews of Geophysics 55(4):1199-1256. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017RG000581>

West, LT; Beinroth, FH; Sumner, ME; Kang, BT. 1997. Ultisols: Characteristics and impacts on society. Advances in Agronomy 63:179-236. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60244-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60244-8)

Wind, GP. 1968. Capillary conductivity data estimated by a simple method. In Rijtema, PE; Wassink, H (eds.). Water in the unsaturated zone, Proc. Wageningen Symp., June 1966. Vol. 1. IASA, Gentbrugge, Belgium. p. 181-191.

Zhang, Y; Schaap, MG. 2017. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). Journal of Hydrology 547:39-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.004>



Agronomía Costarricense, Universidad de Costa Rica.

Se encuentra licenciada con [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](#).

Para mayor información escribir a rac.cia@ucr.ac.cr