



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>

Artículo

Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo

Moisture retention curves and pedotransfer models in Andosol under different land uses

Silvia Janeth Bejar Pulido¹, Israel Cantú Silva^{1*}, María Inés Yáñez Díaz¹ y Erik Orlando Luna Robles¹

Abstract:

The purpose of this research was to determine the behavior of the moisture retention capacity of an Andosol considering different land uses (forestry and agricultural (conventional avocado, organic avocado and macadamia)), and to determine the field capacity (*CC*), the permanent wilting point (*PMP*) and the available water (*AD* [*CC-PMP*]), as well as to validate six pedotransfer functions for *CC* and *PMP*. The moisture retention curve (*CRH*) was applied with the pressure plate and pressure membrane method at different voltages: 33 (*CC*); 50, 150, 500, 1 000 and 1 500 (*PMP* kPa), using plate extractors on samples collected at two different depths (0-20 and 20-40 cm). The results show that there are significant differences between land uses and between tensions. The *CC* registered values ranging from 55.95 to 69.03 %, and the *PMP*, values between 33.54 and 45.66 % at a depth of 0-20 cm, and of 40.99 to 62.02 % and 25.27 to 36.89 % at a depth of 20-40 cm, respectively, for an Andosol. According to the results, the *FPT* that exhibited the greatest predictive capacity for the determination of water content was that of Rawls and Brakensiek. The change of land use from forest land to agricultural crops modifies the moisture retention capacity of Andosols.

Key words: Available water, Andosol, field capacity, pedotransfer functions, permanent wilting point, land use.

Resumen:

La presente investigación tuvo por objetivos conocer el comportamiento de la capacidad de retención de humedad de un Andosol con presencia de diferentes usos de suelo: forestal y agrícola (aguacate convencional, aguacate orgánico y macadamia); determinar la capacidad de campo (*CC*), el punto de marchitez permanente (*PMP*) y el agua disponible (*AD* [*CC-PMP*]); y validar seis funciones de pedotransferencia para *CC* y *PMP*. La curva de retención de humedad (*CRH*) se aplicó por medio del método de la placa y membrana de presión a distintas tensiones: 33 (*CC*); 50, 150, 500, 1 000 y 1 500 (*PMP* kPa), mediante extractores de placa en muestras recolectadas a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm). Los resultados demuestran que existen diferencias significativas entre usos de suelo y tensiones. La *CC* registró valores en un intervalo de 55.95 a 69.03 %, con un *PMP* entre 33.54 a 45.66 % en la profundidad 0 - 20 cm; y de 40.99 a 62.02 %, con 25.27 a 36.89 % de *PMP* a una profundidad de 20 - 40 cm. De acuerdo a los resultados, la *FPT* que presentó la mayor capacidad de predicción para la estimación del contenido de agua fue la de Rawls y Brakensiek. El cambio de uso del suelo de terrenos forestales a cultivos agrícolas modifica la capacidad de un Andosol para retener humedad.

Palabras clave: Agua disponible, Andosol, capacidad de campo, funciones de pedotransferencia, punto de marchitez permanente, uso de suelo.

Fecha de recepción/Reception date: 17 de septiembre de 2019

Fecha de aceptación/Acceptance date: 27 de febrero de 2020

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, México.7

*Autor por correspondencia; Correo-e: siljan2411@gmail.com

Introducción

Las curvas de retención de humedad (*CRH*) en el suelo expresan la relación existente entre el contenido de humedad y su potencial matricial, además reflejan la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión; dicha relación depende de los factores relacionados con la porosidad del suelo (Teepe *et al.*, 2003; López *et al.*, 2013; Yáñez *et al.*, 2015; Casanova, 2018).

Las propiedades de los andosoles son muy complejas, por su alto contenido de arenas. De acuerdo a Torrealba (2008), los suelos arenosos liberan gran cantidad de agua a muy bajas presiones, puesto que tienen una alta porosidad y bajas densidades que los hace más susceptibles a la pérdida de humedad.

Los suelos que han sido modificados de terrenos preferentemente forestales a cultivos presentan alteraciones en su estructura, que conllevan a un proceso de degradación y afectan, de manera directa, a la capacidad de retención de agua (Meza y Geissert, 2006). Sin embargo, el tipo e intensidad de cultivo son los que definen dicho nivel de impacto sobre las propiedades hidrológicas.

Los estudios referentes a la determinación indirecta de la capacidad de campo (*CC*), punto de marchitez permanente (*PMP*) y agua disponible (*AD*) en los andosoles son escasos; aunque, se han desarrollado algunas Funciones de Pedotransferencia (*FPT*) que estiman estas propiedades a partir de otras variables como: la materia orgánica (*MO*), densidad aparente (*DA*), contenido de arena (*A*), limo (*L*) y arcilla (*R*) (Rawls y Brakensiek, 1985; Delgado y Barreto, 1988; Malavé, 1991; Pecorari, 1988; Peralta y Barrios, 2006; Chicas *et al.*, 2014).

La relación de suelo-agua-uso está representada por la capacidad de retención de humedad, cuyo conocimiento es fundamental para comprender los procesos hidráulicos que ocurren en el suelo. Su determinación directa requiere mucho tiempo y es costosa, pues se necesita un gran número de muestras, debido a la alta variabilidad espacial y temporal de las propiedades hidráulicas del suelo. Una alternativa es el uso de modelos, denominados *FPT*, que estiman la *CRH* a partir de propiedades fáciles de medir, aunque la

predicción depende del tamaño de muestra, así como de las características edáficas (Pineda y Vilorio, 1997; Medeiros *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2016).

El cultivo de aguacate en Michoacán ha detonado un crecimiento económico; sin embargo, ese progreso es la causa de que los procesos de cambio de uso de suelo y deforestación se aceleren, a consecuencia de sus requerimientos específicos (clima y suelo) que coinciden con los de los ecosistemas forestales. Lo anterior, ha originado, principalmente, la pérdida de suelos y la modificación de sus propiedades hidrológicas (Chávez *et al.*, 2012).

El mantenimiento de niveles adecuados de agua en el suelo es fundamental para la agricultura, ya que ello garantiza el éxito de las cosechas; mientras que en los ecosistemas forestales es vital, por la cantidad de servicios ambientales que estos ofrecen (Taboada y Micucci, 2002; Chicas *et al.*, 2014).

El objetivo de la presente investigación fue estimar el comportamiento de la capacidad de retención de humedad en un Andosol a distintas tensiones, mediante la determinación de la *CC*, *PMP* y el *AD*, con el empleo de la *CRH* y *FPT* para evaluar el efecto del cambio de uso de suelo de un sistema forestal al cultivo de aguacate (*Persea americana* L.) (orgánico y convencional) y macadamia (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche).

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el ejido Toreo El Alto, municipio Uruapan, Michoacán; ubicado en las coordenadas 19°28'22.2" latitud N y 102°00'19.7" longitud O; en el Eje Neovolcánico Transversal. El área pertenece a la región del río Balsas y presenta una altitud de 1 890 m; el clima corresponde al tipo templado húmedo, con lluvias en verano (Cw) (García, 2004), con una temperatura media anual entre 10 y 27 °C y registra un promedio pluvial anual que supera los 1 500 mm. El tipo de suelo es Andosol, de origen volcánico (Alcalá *et al.*, 2001).

Muestreo de suelo

Se seleccionaron cuatro parcelas en un Andosol con distintos usos de suelo: uno forestal y tres agrícolas (aguacate convencional, aguacate orgánico y macadamia). En cada una se recolectaron cuatro muestras compuestas de aproximadamente 2 kg, a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm), las cuales se transportaron al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León para su posterior análisis.

Determinación de la capacidad de retención de humedad

Las 32 muestras colectadas fueron secadas al aire libre y tamizadas en un tamiz de 2 mm. La *CRH* se determinó mediante el método de la placa y membrana de presión con muestras perturbadas (Yáñez, 2017).

Se colocaron en anillos de 10 cm de diámetro sobre la placa; posteriormente, se procedió a saturarlas en agua por 12 horas; se sometieron a distintas presiones: 33, 50, 150, 500, 1 000 y 1 500 kPa en extractores de placa (*Soil Moisture Equipment Corp.*). Posteriormente, se secaron por 24 horas a una temperatura de 105° C, y mediante el método AS-05 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002) se determinó la humedad del suelo por gravimetría.

$$\theta g = \frac{(PB + Psh) - (PB + Pss)}{(PB + Pss) - (PB)} * 100$$

Donde:

θg = Contenido de humedad (%)

PB = Peso del bote con tapa (g)

Psh = Peso húmedo del suelo

Pss = Peso seco del suelo (g)

$PB + Psh$ = Peso del bote más peso del suelo húmedo (g)

$PB + Pss$ = Peso del bote más peso del suelo seco (g)

Con los valores obtenidos, se estimó la *CRH*, *CC* (33 kPa), *PMP* (1 500 kPa) y *AD* (diferencia entre *CC* y *PMP*).

Variables complementarias para determinar *FPT*

Generalmente, para la estimación de las *FPT* se emplean variables complementarias, a partir de un sustento verídico y aceptable; en este caso se determinaron: el contenido de *MO* (%) por el método de *Walkley y Black* modificado por *Woerner* (1989); la textura con el método hidrómetro de *Bouyoucos*, con base en la técnica AS-09 de la NOM-021-RECNAT-2000 (*Semarnat*, 2002); y la *DA* (g cm^{-3}) mediante el método gravimétrico (*Woerner*, 1989).

Funciones de pedotransferencia (*FPT*)

Existen numerosas ecuaciones de pedotransferencia generadas a partir de variables edafológicas, con las cuales se han desarrollado modelos matemáticos para la determinación de *CC* y *PMP*.

El cálculo de la retención hídrica se realizó mediante una recopilación de funciones matemáticas de diversas investigaciones (cuadros 1 y 2), a fin de obtener *CC* (33 kPa) y *PMP* (1 500 kPa).



Cuadro 1. Ecuaciones de regresión para determinar el contenido de humedad a 33 kPa (CC).

Modelo	Funciones
Rawls y Brakensiek, 1985	$\theta = 0.026 + 0.005 * R + 0.0158 * MO$
Delgado y Barreto, 1988	$\theta = 16.55 - 0.174 * A - 0.164 * L + 0.154 * R + 1.24 * MO$
Pecorari, 1988	$\theta = 4.04 + 0.252 * R + 0.206 * L$
Malavé, 1991	$\theta = 16.1608 - 0.1877 * A + 1.0528 * MO$
Peralta y Barrios, 2006	$\theta = 15.691 + 0.566 * A + 0.092 * L + 1.787 * MO - 8.412 * DA$
Chicas <i>et al.</i> , 2014	$\theta = 55.05 - 28.97 * DA - 0.23 * R$

θ = Contenido de humedad; *A* = Arena; *L* = Limo; *R* = Arcilla; *MO* = Materia orgánica; *DA* = Densidad aparente.

Cuadro 2. Ecuaciones de regresión para determinar el contenido de humedad a 1 500 kPa (PMP).

Modelo	Funciones
Rawls y Brakensiek, 1985	$\theta = 0.2576 - 0.002 * A + 0.0036 * R + 0.0299 * MO$
Delgado y Barreto, 1988	$\theta = 29.06 - 0.290 * A - 0.253 * L + 0.135 * R + 2.56 * MO$
Pecorari, 1988	$\theta = 6.85 + 0.360 * R + L$
Malavé, 1991	$\theta = 23.953 - 0.2228 * A + 4.6436 * MO$
Peralta y Barrios, 2006	$\theta = 5.387 + 0.469 * A - 0.020 * L + 0.6909 * MO - 4.949 * DA$
Chicas <i>et al.</i> , 2014	$\theta = 67.3 - 33.77 * DA - 0.23 * R$

θ = Contenido de humedad; *A* = Arena; *L* = Limo; *R* = Arcilla; *MO* = Materia orgánica; *DA* = Densidad aparente.

Análisis estadísticos

Se aplicaron pruebas de normalidad para la capacidad de retención de humedad. Dado que los datos no cumplieron con esta, se procedió a utilizar la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis* (Berlanga y Rubio, 2012) para verificar la existencia de diferencias significativas en el contenido de agua a distintas tensiones entre los usos de suelo.

Validación de funciones de pedotransferencia

Para validar los ajustes de los modelos se calculó el cuadrado medio del error (*CME*), a partir de la siguiente expresión (Patil y Singh, 2016):

$$CME = \sum (Z^*i - Zi)^2 / n$$

Donde:

Z^*i = Valor estimado de retención de humedad para la muestra de validación i

Zi = Valor real para la misma muestra

n = Número total de muestras de validación ($n=32$)

El *CME* permite medir el error al calcular el contenido de humedad con la ecuación de regresión. Además, se calculó el coeficiente de determinación (R^2), el cual establece la calidad del modelo para replicar los resultados (Patil y Singh, 2016).



Resultados y Discusión

Capacidad de retención de humedad (CRH)

La prueba de *Kruskal-Wallis* muestra diferencias significativas entre los usos de suelo evaluados a distintas tensiones y profundidades. De acuerdo con Daza *et al.* (2014), los cambios en la cobertura generan la pérdida de humedad sobre el suelo, dicho impacto se refleja sobre los resultados obtenidos en esta investigación (Cuadro 3). En general, todo tipo de práctica agrícola ocasiona la pérdida de cobertura en un tiempo determinado, con la consecuente exposición del suelo al aire y el aumento de la evaporación en su superficie.

Cuadro 3. Valores de χ^2 , según la prueba de *Kruskal-Wallis* para diferentes intervalos de tensiones y valores medios ($n=4$) en los usos del suelo estudiados.

	Tensión de retención de agua kPa					
	33	50	150	500	1 000	1 500
0-20 cm						
χ^2	10.059*	11.294**	11.051*	11.404**	11.404**	11.007*
Forestal	63.65	62.47	48.88	46.45	44.33	42.79
A. Convencional	69.04	61.15	51.36	47.19	45.22	45.66
A. Orgánico	55.95	42.72	40.39	35.96	34.87	33.78
Macadamia	55.95	40.18	39.7	34.78	33.65	33.55
20-40 cm						
χ^2	8.492*	11.801**	13.786**	9.968*	9.992*	10.477*
Forestal	62.03	52.57	42.73	38.81	38.42	34.61
A. Convencional	61.61	60.92	46.84	41.07	39.63	36.89
A. Orgánico	52.56	43.05	37.48	32.05	30.04	28.43
Macadamia	44.31	39.41	31.43	29.03	25.65	23.52

A. Convencional = Aguacate convencional; A. Orgánico = Aguacate orgánico;

*= Diferencia significativa ($P \leq 0.05$); **= Diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$).

Musso y Suazo (2019) lo relacionan con la distribución de partículas minerales (tamaño), especifican que los suelos arenosos son más permeables, a diferencias de los limos y arcillas que retienen mayor cantidad de agua.

Las curvas de retención de humedad muestran que el uso macadamia presentó el menor contenido de humedad en ambas profundidades, caso contrario el uso A. Convencional (Figura 1), en el cual depende de la textura. Los resultados indicaron de 50 a 70 % de arenas en macadamia y de 30 a 40 % en A. convencional (Cuadro 4).

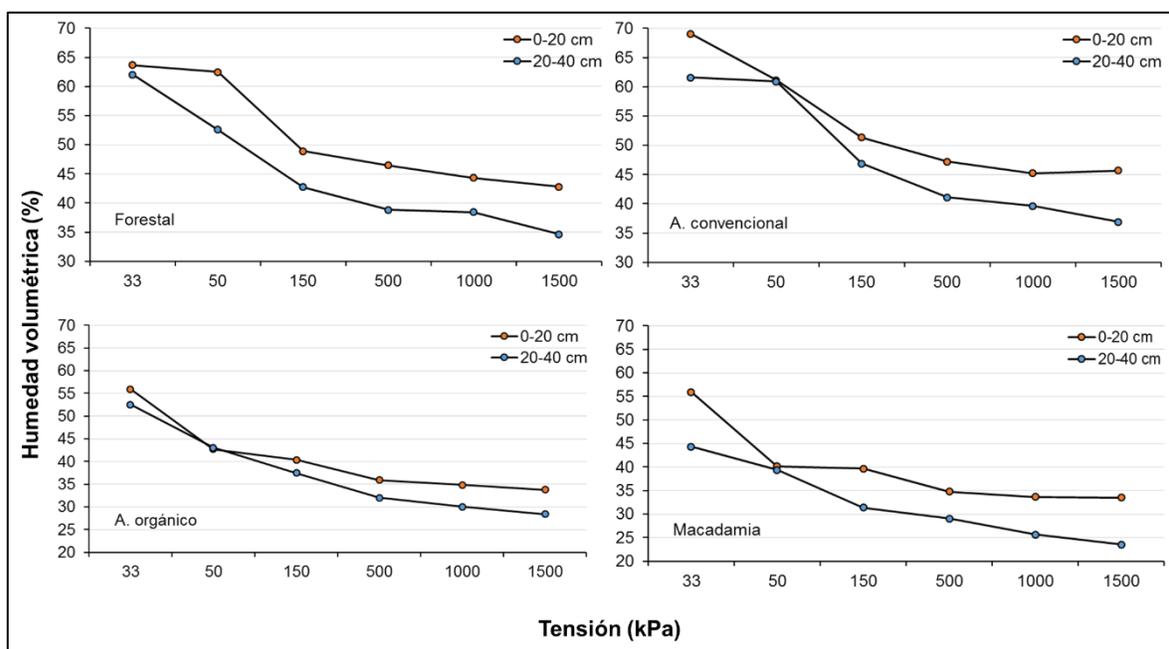


Figura 1. Curvas de retención de humedad a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm) en los distintos usos de suelo.



Cuadro 4. Valores medios \pm desviación estándar de los datos empleados para la validación de modelos ($n=4$).

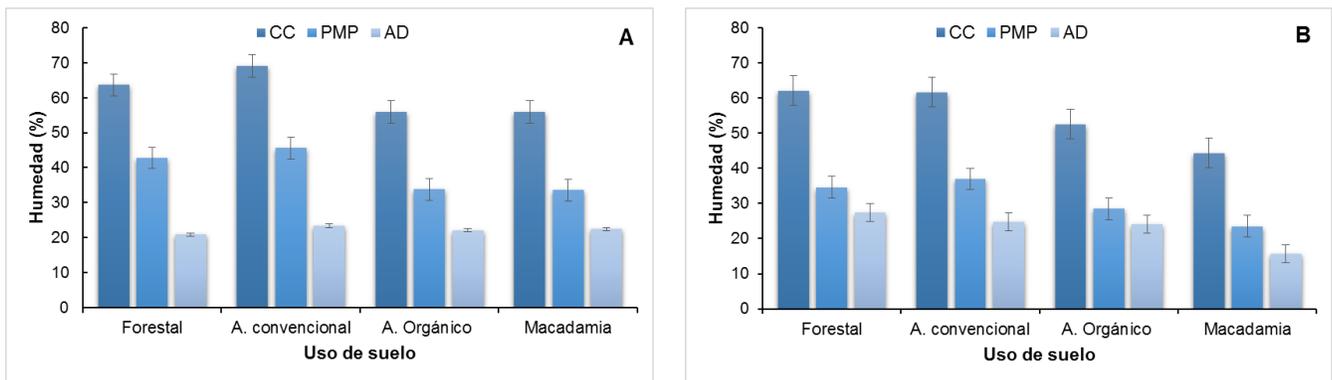
Uso de suelo	MO (%)	DA (g cm⁻³)	A (%)	L (%)	R (%)	Textura
0-20 cm						
Forestal	13.02 \pm 1.94	0.56 \pm 0.10	48.60 \pm 5.89	45.34 \pm 6.86	6.06 \pm 0.99	CA
A. Convencional	16.41 \pm 1.32	0.57 \pm 0.05	27.96 \pm 6.00	60.81 \pm 5.52	11.23 \pm 1.30	CL
A. Orgánico	9.05 \pm 1.20	0.82 \pm 0.12	51.10 \pm 4.30	42.13 \pm 4.29	6.77 \pm 1.78	CA
Macadamia	13.80 \pm 2.32	0.69 \pm 0.06	56.46 \pm 7.03	37.36 \pm 5.77	6.18 \pm 1.91	CA
20-40 cm						
Forestal	6.30 \pm 3.10	0.65 \pm 0.04	56.28 \pm 3.46	37.66 \pm 2.92	6.06 \pm 2.15	CA
A. Convencional	12.63 \pm 0.78	0.59 \pm 0.05	37.05 \pm 6.48	53.22 \pm 7.53	9.73 \pm 2.84	CL
A. Orgánico	5.56 \pm 2.61	0.81 \pm 0.13	59.14 \pm 1.65	32.91 \pm 2.63	7.95 \pm 1.27	CA
Macadamia	6.60 \pm 1.67	0.73 \pm 0.12	67.82 \pm 8.70	27.00 \pm 8.08	5.18 \pm 1.00	CA

MO = Materia orgánica; *DA* = Densidad aparente; *A* = Arena; *L* = Limo; *R* = Arcilla;
 Textura: *CA* =Franco arenosa; *CL* = Franco limosa.

El sistema forestal registró altos contenidos de agua a bajas presiones, con una humedad de 65 y 60 % para la profundidad 0-20 y 20-40 cm, respectivamente. El sistema A. Orgánico inició con humedad de 55 y 50 % en las profundidades 0-20 y 20-40 cm, respectivamente, y perdió 15 % del contenido de humedad en ambas condiciones.

Conforme aumenta la profundidad la capacidad de retención de humedad disminuye, derivado de la presencia de una mayor cantidad de arenas. Volverás *et al.* (2016) determinaron curvas de retención de humedad y el impacto del manejo agrícola, los autores citaron un efecto negativo en la capacidad de retención de humedad por la influencia de la profundidad y pendiente de las áreas evaluadas. Generalmente, la cantidad de agua disponible en el suelo se relaciona con el contenido de *MO*. Minasny y Mcbratney (2018) documentan que el aumento de la cantidad de agua disponible para las plantas por un aumento en la *MO* es incierto y puede sobreestimarse.

La capacidad de retención en el uso forestal a *CC* en la profundidad 0-20 cm fue de 65 % de humedad; en *A. Orgánico* y macadamia se redujo 7 y 13 %, respectivamente; y en *A. Convencional* aumentó 5 %. Para *PMP* (40 % de humedad) se observó la misma tendencia: en *A. Orgánico* disminuyó 9 %, en macadamia 12 %, y en *A. Convencional* se incrementó 3 % (Figura 2).



CC = Capacidad de campo; *PMP* = Punto de marchitez permanente; *AD* = Agua disponible;
Profundidades: A = 0-20 cm; B = 20-40 cm.

Figura 2. Constantes de humedad a dos profundidades (A y B) en un Andosol bajo distintos usos de suelo.

La cantidad de agua disponible está en función de la *CC* y *PMP*, en los primeros 20 cm se estimó en alrededor de 20 % para todos los usos de suelo; de los 20-40 cm, el uso forestal registró un aumento de 30 % en su capacidad de retención (+10 %); en el resto de los usos de suelo hubo un ligero aumento de 1 a 2 %; excepto el uso macadamia que disminuyó 15 % respecto al forestal. La Manna *et al.* (2018), investigaron la capacidad de retención de agua en suelos tipo Andosol con diferentes texturas, señalaron valores de *AD* en texturas Franco arenosas de 7 a 15 %, y en Franco limosas de 13 a 18 %.

Daza *et al.* (2014) obtuvieron una *CC* de 80 % y un *PMP* de 50 % en bosques con vegetación nativa, con suelos de origen volcánico en Colombia; Meza y Geissert (2006) evaluaron la estabilidad de suelos andosoles con uso forestal y cultivos, sus resultados indican una retención de humedad a *CC* y *PMP* de 50 y 20 % para el uso forestal, mientras que para el agrícola de 30 y 10 %, respectivamente. Chicas *et al.* (2014) consignan en suelos de origen volcánico una *CC* entre 13 y 40 % y un *PMP* de 8 a 30 %, los cuales se consideran bajos, respecto a los valores estimados en la presente investigación, ya que para el uso forestal se registró una *CC* de 60 a 70 % y para *PMP* de 30 a 45 % (Figura 2).

Variables complementarias para determinar *FPT*

Para determinar la *FPT* fue necesario evaluar otras variables, generalmente, asociadas a la capacidad del suelo para retener agua. Destacaron los altos contenidos de *MO* en la primera profundidad (0-20 cm), que variaron de 9 a 16 %; baja *DA*, con grandes contenidos de arenas y limos, lo cual resultó en una textura Franco arenosa para la mayoría de los usos de suelo evaluados (Cuadro 4).

Respecto a la profundidad de 20-40 cm, los contenidos de *MO* disminuyeron notoriamente fluctuando de 5 a 12 %; la *DA* se incrementó ligeramente, fue notorio el aumento del contenido de arenas y la disminución de limos, para el caso de las arcillas este fue similar en ambas profundidades, con valores entre 5 y 11 %.

Funciones de pedotransferencia (*FPT*)

En el Cuadro 5 se observa el *CME* de los modelos empleados para la determinación de *CC* y *PMP*. Se aprecia que el modelo de Rawls y Brakensiek (1985) presentó un *CME* bajo (*CC* = 241.10 y *PMP* = 210.25) y un R^2 alto (0.99), el cual refleja que a este modelo le corresponde el mejor ajuste con el menor sesgo; el resto de los modelos tuvieron *CME* más altos: Malavé (1991), seguido de Delgado y Barreto (1988) y Chicas *et al.* (2014), por citar algunos.

Cuadro 5. Valores del cuadrado medio del error (*CME*) de las funciones de pedotransferencia a *CC* (33 kPa) y *PMP* (1 500 kPa), y coeficiente de determinación (R^2).

Modelo	33 kPa	1 500 kPa	R^2
Rawls y Brakensiek (1985)	241.10	210.25	0.99
Delgado y Barreto (1988)	992.05	880.96	0.99
Pecorari (1988)	458.53	737.35	0.96
Malavé (1991)	1 328.03	1 007.69	0.78
Peralta y Barrios (2006)	170.74	120.72	0.39
Chicas <i>et al.</i> (2014)	822.32	443.27	0.99

Peralta y Barrios (2006) señalan que la mejor predicción se representa por el coeficiente de determinación, lo cual expone que las variaciones son explicadas por las variables definidas en la ecuación.

El coeficiente de determinación fue alto para todos los modelos, excepto para Peralta y Barrios (2006), con una R^2 de 0.39, que explica el ajuste de bondad; por lo tanto, el ajuste es el menos confiable, respecto al resto de los modelos (Cuadro 5).

Pineda y Viloría (1997) emplearon las ecuaciones de Rawls y Brakensiek (1985) y Malavé (1991) y obtuvieron *CME* en *CC* de 99.73 y 360.21, respectivamente; mientras que los valores para *PMP* fueron de 27.19 y 195.09, respectivamente. Se aprecia que el modelo de Rawls y Brakensiek (1985) representa un bajo *CME*, al igual que en la investigación que aquí se documenta; por ello se le considera uno de los mejores predictores para la estimación de *CC* y *PMP* en suelos tipo Andosol.

Pineda y Viloría (1997) citan que los modelos de regresión representan una alternativa para la estimación de la retención de humedad en el suelo de modo económico, aunque su precisión depende del número de muestras y variables usadas para su determinación. Por ejemplo, Chicas *et al.* (2014) con solo 57 muestras estiman un coeficiente de determinación de 0.59 % para *CC* y 0.69 % para *PMP*, lo que explica la variabilidad de los datos observados mediante los modelos generados. Por otra parte, Peralta y Barrios (2006) con 22 muestras de suelos obtuvieron un R^2 de 0.83 y 0.70 % para *CC* y *PMP*, respectivamente; en ambos casos, la variación de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente se explican por las variables empleadas en los modelos generados (cuadros 1 y 2).

Conclusiones

El cambio de uso del suelo de terrenos forestales a cultivos agrícolas modifica la capacidad de retención de humedad en un Andosol.

Las funciones de pedotransferencia representan una alternativa para determinar la capacidad de retención de agua; la *DA*, *MO* y el análisis granulométrico son las variables que ofrecen una mayor precisión para la estimación en este tipo suelos.

La ecuación de *Rawls* y *Brakensiek* permite modelar de manera óptima las condiciones de humedad del Andosol en las profundidades de 0-20 cm y de 20 a 40 cm. Los efectos del cambio de uso de la tierra sobre el recurso suelo provocan una reacción en cadena sobre sus propiedades físicas, químicas, ya que entre ellas existe una asociación directa.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Silvia Janeth Béjar Pulido: desarrollo de la investigación en campo, análisis estadístico, interpretación, estructura y diseño del manuscrito; Israel Cantú Silva: diseño, interpretación, análisis estadístico y corrección del manuscrito; María Inés Yáñez Díaz: diseño, interpretación y análisis de los resultados obtenidos, así como corrección de manuscrito; Erik Orlando Luna Robles: toma y procesamiento de datos de campo.

Referencias

- Alcalá D., J. M., A. C. Ortiz S. y M. C. Gutiérrez C. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra Latinoamericana* 19(3): 227-239. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319304.pdf> (2 de julio de 2019).
- Berlanga, V., y H. M. J. Rubio. 2012. Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació* 5(2): 101-113. <http://hdl.handle.net/2445/45283> (24 de Agosto de 2019).

- Casanova, M. 2018. Modelación elastoplástica de la curva de retención de agua en suelos parcialmente saturados. Tesis maestría. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. 55 p.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130976/TFM%20final%20Javier%20Casanova%20M..pdf?sequence=1&isAllowed=y> (22 de mayo de 2019).
- Chávez L., G., L. M. Tapia V., M. Bravo E., J. T. Sáenz R., H. J. Muñoz F., I. Vidales F., A. Larios G., J. B. Rentería A., F. J. Villaseñor R., J. L. Sánchez P., J. J. Alcántar R. y M. Mendoza C. 2012. Impacto de cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate. Libro técnico Núm. 13. INIFAP. Uruapan, Mich., México. 102 p.
https://www.researchgate.net/publication/265125083_Impacto_del_cambio_de_uso_del_suelo_forestal_a_huertos_de_aguacate_IMPACT_OF_FOREST_LAND_USE_CHANGE_TO_AVOCADO_ORCHARDS (21 de junio de 2019).
- Chicas S., R. A., E. A. Vanegas C. y N. García A. 2014. Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 23(1): 41-46.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542014000100007&script=sci_arttext&tlng=en (19 de agosto de 2019)
- Daza T., M. C., F. Hernández F. y F. A. Triana. 2014. Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz-Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín* 67(1): 7189-7200.
Doi:10.15446/rfnam.v67n1.42642.
- Delgado, F. y L. Barreto. 1988. Una aproximación matemática para la elaboración de curvas de retención de humedad en suelos representativos de Los Llanos Occidentales. *Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología* (1-2):45-50.
<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRINVE.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mnfn=003341> (2 de junio de 2019).

- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppén. Sexta edición, Serie libros. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México. 90 p. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1> (30 de junio de 2019).
- La Manna, L., M. Tarabini., F. Gómez., P. A. Noli., B. Vogel. y C. G Buduba. 2018. Estimación de la capacidad de retención de agua de suelos volcánicos en función de variables de fácil determinación a campo. *Asociación Argentina Ciencia del Suelo* 36 (1): 23-29. <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/volumen3612018/pag%2023-29%20CS526%20Estimaci%C3%B3n%20de%20la%20capacidad%20de%20retenci%C3%B3n%20de%20agua%20de%20suelos%20volc%C3%A1nicos.pdf> (10 de junio de 2019).
- López I., F., P. D. Kemp., J. Dörner., C. A. Descalzi., O. A. Balocchi. and S. García. 2013. Competitive strategies and growth of neighbouring *Bromus valdivianus* Phil. and *Lolium perenne* L. plants under water restriction. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199 (6): 449-459. Doi: 10.1111/jac.12032.
- Malavé, N. 1991. Estudio preliminar de las relaciones entre características de retención de humedad y distribución de tamaño de partículas, materia orgánica y densidad aparente. Tesis maestría. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. Macaray, Aragua, Venezuela. 92 p.
- Medeiros, J. C., M. Cooper, J. Dalla R., M. Grimaldi. and Y. Coquet. 2014. Assessment of pedotransfer functions for estimating soil water retention curves for the amazon region. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38(3): 730-743. Doi:10.1590/S0100-06832014000300005.
- Meza P., E. y D. Geissert K. 2006. Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivado. *Terra Latinoamericana*; 24 (2): 163-170. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108002.pdf> (16 de septiembre de 2019).

Minasny, D. and A. B. Mcbratney. 2018. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science* 69(1): 39–47.

Doi:10.1111/ejss.12475.

Musso, J. y G. Suazo. 2019. Determinación de la curva de retención de agua para relaves multimetálicos de la industria minera de Chile. *Obras y Proyectos* 25: 22-29.

Doi:10.4067/S0718-28132019000100022.

Patil, N. G. and S. K. Singh. 2016. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties: A Review. *Pedosphere* 26(4): 417–430. Doi:10.1016/S1002-0160(15)60054-6.

Pecorari, C. 1988. Relaciones empíricas entre contenido de agua, textura y materia orgánica en suelos representativos de la Pampa Ondulada. Informe Técnico Núm. 222. Centro Regional Buenos Aires, Centro Experimental Regional Agropecuaria Pergamino, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. pp. 3–30. <https://biblat.unam.mx/es/revista/informe-tecnico-estacion-experimental-regional-agropecuaria-pergamino-inta/articulo/relaciones-empíricas-entre-contenido-de-agua-textura-y-materia-orgánica-en-suelos-representativos-de-la-pampa-ondulada> (27 de mayo de 2019).

Peralta B., R. y D. J. Barrios O. 2006. Determinación de ecuaciones de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en suelos del municipio de Corozal, Sucre. Tesis doctoral. Universidad de Sucre, Facultad de Ingeniería. Sincelejo, Colombia. 87 p.

<https://repositorio.unisucre.edu.co/jspui/bitstream/001/239/2/T631.4786113%20P426.pdf> (11 de septiembre de 2019).

Pineda, C. y J. Vilorio. 1997. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la Cuenca del lago de Valencia. *Revista Venesuelos* 44(5):39-45.

https://www.researchgate.net/profile/Maria_Pineda7/publication/279689530_FUNCIONES_DE_PEDOTRANSFERENCIA_PARA_ESTIMAR_LA_RETENCION_DE_HUMEDAD_EN_SUELOS_DE_LA_CUENCA_DEL_LAGO_DE_VALENCIA/links/55b9f44d08aed621de08b8b6.pdf

(14 de octubre de 2019).

Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. *In*: Jones, E. E. and T. J. Ward. (eds.) Proceedings of Symposium on Watershed Management in the Eighties. ASCE Convention. Denver, CO, USA. pp. 293–299.

<https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0044472> (18 de mayo de 2019).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2002. Norma oficial mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. México, D.F, México.

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf> (22 de junio 2019).

Souza D., E., E. I. Fernández F., C. E. G. Reynaud S., N. H. Batjes., G. Rodríguez, S. and L. Machado P. 2016. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. *Scientia Agricola*; 73 (6): 525-534. Doi:10.1590/0103-9016-2015-0485.

Taboada M., A. y F. G. Micucci. 2002 Fertilidad física de los suelos. Facultad Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 237 p.

Teepe, R., H. Dilling and F. Beese. 2003. Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166(1): 111-119. Doi:10.1002/jpln.200390001.

Torrealba A., A. A. 2008. Aplicación de un modelo numérico para estimar curvas de evaporación a partir de información de granulometría básica. Tesis maestría.

Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago de Chile, Chile. 111 p.

<https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1421/502315.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (30 de Mayo de 2019).

Volverás M., B., E. Amézquita C. y J. M. Campos Q. 2016. Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 17(3): 361-377.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5615170> (29 de septiembre de 2019).

Woerner, M. 1989. Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Departamento Agroforestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL., México. 105 p.

Yáñez D., M. I. 2017. Caracterización ecopedológica en Vertisoles bajo cuatro sistemas de uso de suelo. Tesis Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Linares, NL., México. 128 p.

<http://eprints.uanl.mx/16722/> (16 de Julio de 2019).

Yáñez, N., D. Dec, J. Clunes y J. Dörner. 2015. Estimación de la curva de retención de agua de un Andisol bajo un cultivo de arándano, a través de funciones de pedotransferencia. *Agro Sur* 43 (3): 63-72. Doi:10.4206/agrosur.2015.v43n3-07.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.