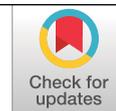


CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELOS CULTIVADOS EN CAFÉ Y OTRAS PROPIEDADES EDÁFICAS RELACIONADAS

Luz Adriana Lince Salazar  *

Lince-Salazar, L. A. (2021). Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72101. <https://doi.org/10.38141/10778/72101>



La capacidad de almacenamiento de agua–CAA es una propiedad determinante de la producción de los cultivos. Cenicafé desarrolló una investigación cuyo objetivo fue estudiar la CAA en lotes cafeteros y las propiedades del suelo con las que se relaciona (textura, materia orgánica–MO, densidad aparente–Da, densidad real–Dr, retenciones de humedad y porosidad total–Pt), a través del perfil del suelo como entre unidades cartográficas. Se utilizaron suelos cultivados en café de las unidades Catarina, Chinchiná, Doscientos, Guamal y Quindío, en cuatro profundidades (entre 0 y 5, 5 y 10, 10 y 20, 20 y 30 cm). Las propiedades que presentaron diferencia de medias en la profundidad del perfil fueron CAA y retención de humedad a capacidad de campo–CC en la unidad Chinchiná, retención de humedad a punto de marchitez permanente–PMP en las unidades Quindío y Catarina, limos en la unidad Doscientos, Pt en la unidad Catarina, Da en la unidad Quindío, Dr en la Unidad Catarina y MO en todas las unidades. Se determinó que entre unidades hay diferencia de las propiedades analizadas, excepto para la Dr. Los modelos de regresión que explicaron las variables fueron en su mayoría exponenciales simples, lineal para MO, y para las unidades estudiadas, la textura y la Da explican la CC y el PMP, las cuales determinan la CAA. Además, se encontró que las unidades de mayor Pt no siempre presentan la mayor CAA, a pesar de que la Pt se relaciona directamente con la CC y el PMP.

Palabras clave. Capacidad de campo, densidad aparente, densidad real, materia orgánica, punto de marchitez permanente, textura.

WATER HOLDING CAPACITY OF SOILS CULTIVATED WITH COFFEE AND OTHER EDAPHIC PROPERTIES

Water holding capacity (WHC) is one of the determining properties of crop production. Cenicafé conducted research in order to study WHC in coffee plots and the related soil properties [texture, organic matter (OM), bulk density (BD), real density (RD), moisture retention, and total porosity (TP)], through soil profile and among cartographic units. Soils cultivated with coffee in the Catarina, Chinchiná, Doscientos, Guamal and Quindío Units were used at four depths (between 0 and 5, 5 and 10, 10 and 20, and 20 and 30 cm). The properties that showed means difference in profile depth were WHC and moisture retention at field capacity (FC) at the Chinchiná Unit, moisture retention at permanent wilting point (PWP) at the Quindío and Catarina Units, slimes at the Doscientos Unit, TP at the Catarina Unit, BD at the Quindío Unit, RD at the Catarina Unit, and OM at all units. The regression models that explained the properties were mostly simple exponential, linear for OM, and for the units studied, texture and BD explain FC and PWP, which determine WHC. Another finding was that the units with the highest TP do not always have the highest WHC, even though TP is directly related to CC and PWP.

Keywords. Bulk density, field capacity, Organic matter, permanent wilting point, real density, texture.

* Investigador Científico I. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-4263-5357>



La capacidad de almacenamiento de agua del suelo-CAA hace referencia a la máxima cantidad de agua que un suelo puede almacenar en la fase aprovechable por las plantas (Veihmeyer y Hendrickson, 1927), como resultado de la combinación de sus propiedades químicas y físicas, entre ellas, textura, materia orgánica-MO, densidades, estructura y retenciones de humedad, entre otras (Lipiec et al., 2007).

La CAA es considerada como una de las variables determinantes en la producción y sostenibilidad de los cultivos (Keller et al., 2007; Lal & Shukla, 2004), ya que desde el punto de vista agrícola afecta las reacciones químicas, los procesos físicos y biológicos que ocurren dentro y fuera del suelo, los cuales influyen en la nutrición, crecimiento y desarrollo de las plantas (Hincapié, 2011).

La CAA se obtiene mediante cálculos matemáticos, entre ellos y el de mayor aplicación es la diferencia volumétrica entre el contenido de agua a capacidad de campo y el contenido a punto de marchitez permanente (Rawls et al., 1982). La capacidad de campo es la máxima capacidad de retención de agua del suelo después de que el agua superficial se haya drenado, es decir, el agua que puede retener el suelo en contra de la gravedad (Nobel, 2009) y es tomada como el límite superior de CAA. El punto de marchitez permanente corresponde a la condición de humedad del suelo que restringe completamente la absorción de agua por las plantas y, por ello, es tomado como el límite inferior en el cálculo de CAA (Kirkham, 2005).

Generalmente, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se determinan en el laboratorio y corresponden a la cantidad de agua en el suelo cuando se alcanza un equilibrio de humedad con tensiones de 0,033 y 1,5 MPa, respectivamente (Toth et al., 2015);

sin embargo, estos valores pueden variar según el interés específico, por ejemplo, la capacidad de campo puede pasar a 0,01 MPa y el punto de marchitez permanente a 1,58 MPa, por ser los valores que mejor se ajusta entre la curva de retención de humedad y los contenidos *in situ* para suelos de varias texturas (Al Majou et al., 2008).

Los valores de referencia para el contenido de agua a capacidad de campo-CC y punto de marchitez permanente-PMP, generalmente están dados a partir de las clases texturales (Costa et al., 2013), en los que los suelos arenosos presentan los contenidos más bajos, alrededor de 12% y 5%, relación volumen-volumen, para CC y PMP, respectivamente, y los suelos arcillosos los contenidos más altos, alrededor de 36% y 22%, relación volumen-volumen, para CC y PMP, respectivamente (Lambers et al., 2008; Or et al., 2011; Bartolini & Albuquerque, 2018).

En la actualidad, muchos estudios relacionados con la CAA se centran en la búsqueda de funciones de edafotransferencia y mapeo geoestadístico, con el fin de extrapolar la información existente a zonas en las que ésta es limitada y es necesaria para optimizar la producción agrícola (Dobarco et al., 2019), pues no es común encontrar evaluaciones de CAA para pequeños predios, ya que requieren de un alto consumo de tiempo, recursos económicos y humanos (Haghverdi et al., 2014; Padarian et al., 2014). Las predicciones de CAA pueden no ser útiles para ciertas aplicaciones, como el modelado del rendimiento de los cultivos, debido a que generalmente, presentan un error relativo muy alto (coeficiente de variación), lo que las hace poco fiables y, en consecuencia, con una gran incertidumbre (Folberth et al., 2016).

Las propiedades del suelo con las que se han logrado correlaciones son densidad

aparente, porosidad total, porosidad capilar (Shao et., 2019), distribución del tamaño de agregados (Lipiec et al., 2007), contenido de MO y distribución de arenas, limos y arcillas (Al Majou et. al., 2008; Dobarco et al., 2019).

La CAA y las propiedades con las que se relaciona, han sido incluidas en numerosos estudios con diversos objetivos en la zona cafetera colombiana, entre ellos se destacan los de caracterización de las unidades cartográficas de suelos realizados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, entre los años 1972 y 1992, para las unidades cartográficas de suelo más representativas del país cafetero, que en cuyo caso, los análisis se realizaron por horizontes diagnóstico con fines de caracterización taxonómica; también se tienen, entre muchos otros, los de Suárez (1980), Suárez et al. (1986), Cardona y Sadeghian (2005), Salamanca y Sadeghian (2005), Sadeghian et al., (2004), Hincapié y Salazar (2011), Farfán e Hincapié (2011) y Lince y Sadeghian (2016), realizados en su mayoría a profundidad máxima de 30 cm, debido a que es allí donde se encuentran aproximadamente el 80% de las raicillas de la planta de café, que tienen como función captar el agua del suelo, enriquecida con nutrientes (Arcila et al., 2007). En algunos de estos estudios, como los de Cardona y Sadeghian (2005), Salamanca y Sadeghian (2005) y los de Medina y Salazar (2009), se tuvieron en cuenta el tipo de horizonte para fundamentar sus hallazgos, los dos primeros con un enfoque de explicación de resultados relacionados con el horizonte A y los segundos con un estudio dirigido al horizonte B.

Pese a que se tiene numerosa información publicada en la que se incluye la CAA de los suelos de la zona cafetera colombiana y demás propiedades con las que se relaciona, estas no se han tomado como eje central para la discusión de su relación con la CAA, y la diferencia tanto en la profundidad del perfil de

mayor interés para el cultivo de café (0 y 30 cm), como entre unidades cartográficas de suelo. Por lo anterior, se realizó una investigación en la región cafetera colombiana, tendiente a estudiar la CAA y las propiedades del suelo con las que la relaciona, tanto a través del perfil del suelo como entre unidades cartográficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se cuantificó la retención de agua a CC (0,033 MPa) y a PMP (1,5 MPa), contenido de MO, textura, densidad real–Dr, densidad aparente–Da, y se calcularon la CAA y la porosidad total–Pt, en las profundidades entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm, y 20 y 30 cm, en las unidades cartográficas Catarina, Doscientos, Guamal y Chinchiná, en el departamento de Risaralda, y unidad Quindío en el departamento de Quindío, las cuales, en su mayoría, son contrastantes en material parental y pedología (Tabla 1) y las tres primeras con incipiente formación del horizonte A.

Por cada una de las unidades de suelo se seleccionaron cuatro lotes, cuyo uso fuera para el cultivo de café por lo menos en los últimos 10 años, en ellos se tomaron tres muestras de suelo disturbadas (1 kg) y muestras sin disturbar, extraídas con cilindros de acero de 5 cm de diámetro por 5 cm de altura. La muestra disturbada se mezcló en el laboratorio y con ella se realizó el análisis de carbono orgánico, que en la investigación se expresó en términos de materia orgánica (MO), textura (T) y Dr. Los análisis de Dr se realizaron por triplicado, al igual que los de Da y las retenciones de humedad, que para los dos últimos se emplearon las muestras sin disturbar. Los métodos empleados para evaluar las propiedades se presentan en la Tabla 2.

El análisis de la información se dividió en tres pasos: i) se determinó la diferencia estadística de las propiedades entre

profundidades, para cada una de las cinco unidades de suelos, por medio de análisis de varianza al 5%. Cuando los análisis indicaron efecto de las profundidades, se realizó prueba de comparación de medias de Duncan al 95% y análisis de tendencia mediante modelos matemáticos presentes en la librería del software SigmaPlot®; iii) se determinó la diferencia estadística de las propiedades entre unidades, para ello se tomaron los 16 datos de cada una de las propiedades por unidad (cuatro lotes y cuatro profundidades), y se realizó un análisis de varianza al 5%. También se evaluaron las interacciones entre profundidad y unidad para las propiedades, y en los casos en que se obtuvo efecto entre unidades se realizó prueba de comparación de medias de Duncan al 95%. Además, los contenidos CC, PMP y CAA, para las diferentes unidades de suelo, se clasificaron según los valores máximos y mínimos para dichas propiedades reportados por Or et al.

(2011), como se presenta en la Tabla 3; y iii) se determinó la relación entre las propiedades por medio de pruebas de correlación y se buscó explicar las propiedades CC y PMP (empleadas para el cálculo de CAA), con las otras propiedades evaluadas por medio de análisis de regresión lineal múltiple con una confianza del 95%; en estos análisis se utilizaron 80 datos por variable (cinco unidades, cuatro lotes, cuatro profundidades), y a diferencia de los pasos anteriores, se emplearon los valores de porcentaje de humedad gravimétrica de CC y PMP, debido a que el contenido volumétrico genera interacciones porque su cálculo incluye Da; también se excluyó la relación de Pt con Da y Dr por ser una variable derivada y no se realizó dicho procedimiento para CAA, para evitar autocorrelaciones, ya que es una variable calculada a partir de las variables evaluadas CC, PMP y Da. En los tres pasos se emplearon *software* Statgraphics® y Excel®.

Tabla 1. Unidades cartográficas de suelo seleccionadas en el estudio, ubicación de muestreo, material parental, clasificación taxonómica según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia FNC (1996 y 1998).

Característica	Unidad cartográfica de suelo				
	Catarina	Chinchiná	Doscientos	Guamal	Quindío
Ubicación del muestreo					
Departamento	Risaralda	Risaralda	Risaralda	Risaralda	Quindío
Municipio	Santuario	Pereira	Marsella	Quinchía	Buenavista
Vereda	La María	El Retiro	La Linda	Los Medios	Paraguay
Material parental	Esquisto talcoso biotítico	Ceniza volcánica	Basalto hornbléndico biotítico	Arenisca olivínica	Ceniza volcánica
Clase taxonómica	Paralithic Udorthents 40%; Typic Eutrudepts 35%; Andic Eutrudepts 10%; otros 15%.	Typic Hapludands 80%; Andic Dystudepts 10%; otros 10%.	Typic Eutrudepts 75%; Paralithic Eutrudepts 15%; otros 10%.	Typic Eutrudepts 75%; Typic Hapludands 10%; Lithic Udorthents 8%; Typic Udorthents 5%.	Typic Melanudands 80%; Entic Hapludands 20%.

Tabla 2. Propiedades evaluadas en la etapa de ajuste metodológico.

Variable	Método de análisis
Carbono orgánico	Walkley – Black – colorimetría
Arena (A), arcillas (Ar), limo (L)	Pipeta (IGAC, 1990)
Densidad aparente (Da)	Cilindro de Coile. (IGAC, 1990)
Densidad real (Dr)	Picnómetro (IGAC, 1990)
Retención de agua (gravimétrica) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)	Ollas y membrana de presión - tensiones entre 0,033 y 1,5 MPa (IGAC, 1990)
Retención de agua (volumétrica) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)	Calculado a partir de: porcentaje retención de humedad gravimétrica X Da (IGAC, 1990)
Capacidad de almacenamiento de agua (CAA)	Calculado a partir de: porcentaje volumen de agua retenido a 0,033 MPa – porcentaje volumen de agua retenido a 1,5 MPa (IGAC, 1990)
Porosidad total (Pt)	Calculado a partir de: $100 \times (Dr - Da)/Dr$ (IGAC, 1990)

Tabla 3. Categorías para la clasificación de retención de humedad a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de almacenamiento de agua (CAA). Límites establecidos según Or et al. (2011).

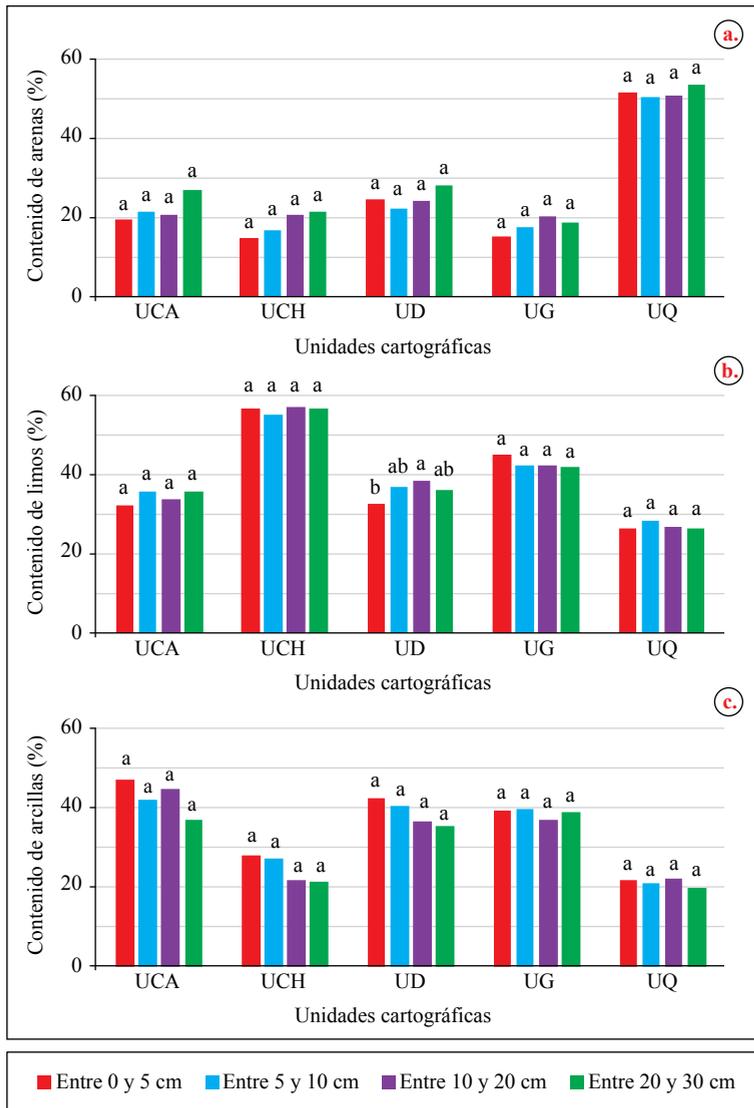
Clase	CC (% volumen)	PMP (% volumen)	CAA (%)
Baja	< 20	< 8	< 12
Media	≥ 20 < 33	≥ 8 < 18	≥ 12 < 15
Alta	≥ 33	≥ 18	≥ 15

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diferencia estadística de las propiedades por profundidad en el perfil

En cuanto al análisis de las propiedades por profundidad y unidad de suelo, las relacionadas con la textura (A, L y Ar) en la mayoría de las unidades no presentaron diferencia estadística,

a excepción de la unidad Doscientos, en la que el contenido de L fue diferente en las profundidades entre 0 y 5 cm y de 10 y 20 cm, con menor valor en la primera profundidad (Figura 1), la cual se explicó mediante un modelo tipo Gaussiano (Tabla 4). En los estudios realizados por Hincapié y Salazar (2011) tampoco se encontró diferencia en el tamaño de partículas por profundidad.



Los contenidos de MO presentaron diferencia de medias en profundidad, en cuatro de las cinco unidades. En las unidades Catarina, Guamal y Doscientos, la diferencia se dio entre 0 y 5 cm (mayores contenidos en todas las unidades) y las profundidades entre 5 y 30 cm. En la unidad Quindío la diferencia se dio entre los 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. En la unidad Chinchiná la MO no presentó diferencia en las profundidades analizadas (Figura 2). En las unidades Catarina, Doscientos, Guamal y Quindío, se explicaron con modelos tipo exponencial simple y en la unidad Chinchiná con un modelo tipo Lineal (Tabla 4). Estos resultados coinciden con lo reportado en otras investigaciones en suelos de la zona cafetera colombiana (Salamanca & Sadeghian, 2005), estudio en el que identificaron disminución de los contenidos de MO a la vez que aumentó la profundidad de muestreo hasta 40 cm. Lo anterior puede ser explicado con base en lo descrito por González et al. (2009) y Zecch et al. (1997), quiénes exponen que debido a que en la parte superior del suelo es donde se alojan los residuos de los materiales orgánicos provenientes de las plantaciones, es allí donde se inicia la transformación de la MO, proceso que se ve favorecido por la radiación solar

al reducir el contenido de agua y aumentar la temperatura y, por consiguiente, facilitar la actividad biológica.

La Da presentó diferencia de medias en la unidad Quindío, en las profundidades entre 10 y 20 cm, y 20 y 30 cm, con valores mayores en la segunda, y en las otras cuatro unidades no se presentó diferencia estadística, pese a que en la Figura 3 para la unidad Doscientos se aprecia que el valor de Da en la profundidad entre 0 y 5 cm es mayor ($1,04 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$) que el de las demás profundidades (entre 5 y 10 cm = $0,93 \pm 0,7 \text{ g cm}^{-3}$; entre 10 y 20 = $0,93 \pm 0,13 \text{ g cm}^{-3}$ y entre 20 y 20 cm = $0,91 \pm 0,13 \text{ g cm}^{-3}$).

Dr y Pt presentaron variación en la unidad Catarina, entre 5 y 10 cm y 10 y 20 cm de profundidad, con mayores valores entre 5 y 10 cm. La variación de estas propiedades no fue posible explicarla por medio de modelos matemáticos preexistentes. Los resultados encontrados difieren con lo presentado por Cardona & Sadeghian (2005) y Salamanca y Sadeghian (2005) para suelos contrastantes en la zona cafetera, en cuyos casos presentaron aumento con la profundidad, específicamente

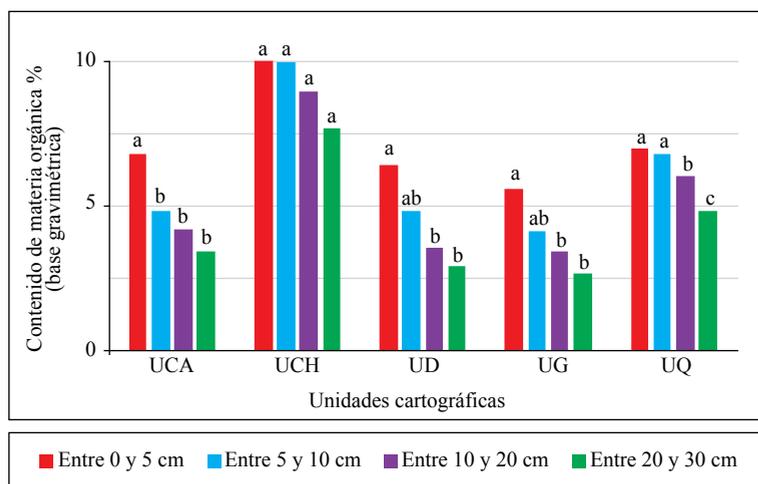


Figura 2. Valores promedio (n=4) de los contenidos de materia orgánica-MO (gravimétricos) para las unidades cartográficas Catarina-UCA, Chinchiná-UCH, Doscientos-UD, Guamal-UG y Quindío-UQ, en las profundidades de muestreo entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. La letra corresponde a la diferencia de medias entre profundidades por unidad de suelos por análisis de Duncan al 95%.

para Da y Pt, lo cual puede atribuirse a que los suelos estudiados por estos autores presentaron horizontes productivos de menor espesor que los acá trabajados, sin embargo, no es algo que pueda asegurarse debido a que dichas publicaciones, al igual que esta, no incluyen descripción de perfil.

La CC –porcentaje gravimétrico– y CAA no presentaron diferencia estadística entre las profundidades analizadas en las unidades

Catarina, Doscientos, Guamal y Quindío; mientras que en la unidad Chinchiná se presentó diferencia entre las profundidades de 0–5 cm y 10–20 cm, la primera con menor valor; en este caso tanto la dinámica de CAA y CC en la unidad Chinchiná fueron explicadas por un modelo tipo exponencial simple. El PMP –porcentaje gravimétrico– no presentó diferencia estadística entre las profundidades analizadas en las unidades Chinchiná, Doscientos y Guamal, a diferencia

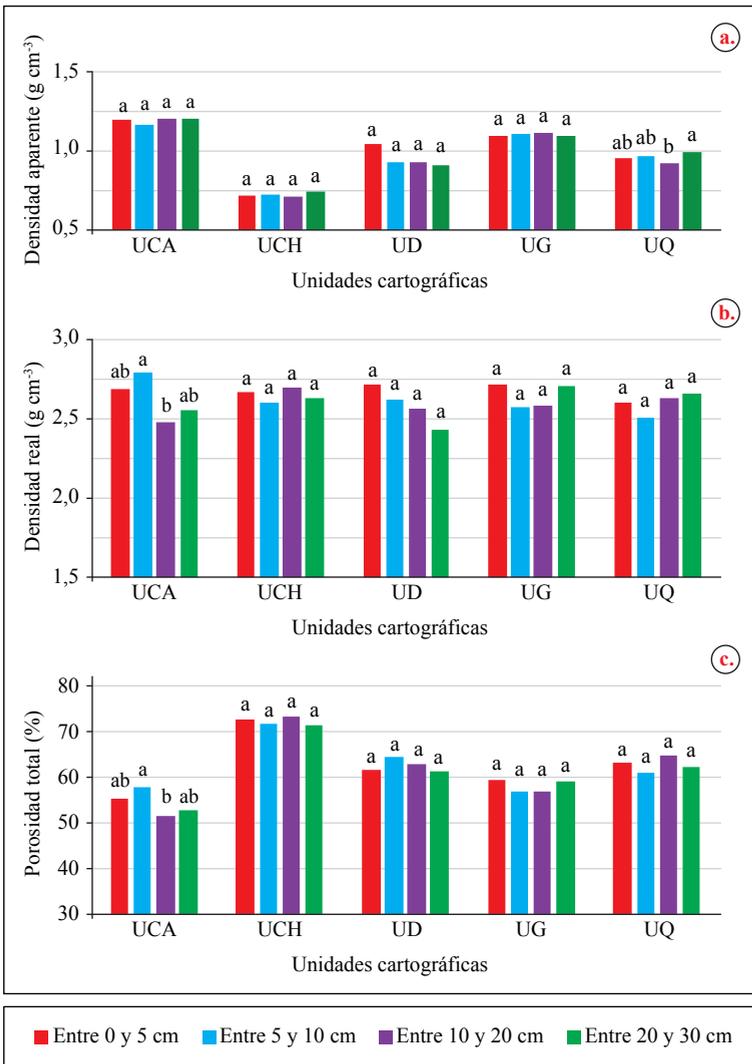


Figura 3. Valores promedio (n=4) de: a) Densidad aparente–Da; b) Densidad real–Dr; c) Porosidad total–Pt, para las unidades cartográficas Catarina–UCA, Chinchiná–UCH, Doscientos–UD, Guamal–UG y Quindío–UQ, en las profundidades de muestreo entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. La letra corresponde a la diferencia de medias entre profundidades por unidad de suelos por análisis de Duncan al 95%.

de las unidades Catarina y Quindío, que en la primera la diferencia se dio entre la profundidad entre 0 y 5 cm (menor valor) con las otras tres profundidades y en la segunda entre las profundidades entre 5 y 20 cm (mayor valor) y entre 20 y 30 cm (Figura 4). Estas variables se ajustaron al modelo exponencial simple (Tabla 4). En estudios realizados en suelos de la zona cafetera colombiana (Cardona & Sadeghian, 2005; Salamanca & Sadeghian,

2005), en los que se conservaron los protocolos de muestreo para el análisis de variación, no se reportan diferencias de la humedad gravimétrica a través del perfil (entre 0 y 40 cm), lo cual indica que en la profundidad de desarrollo de las raíces efectivas de la planta de café, los contenidos de humedad no presentan diferencia una vez el suelo alcanza la estabilidad hídrica, con lo que se corrobora lo encontrado en esta investigación.

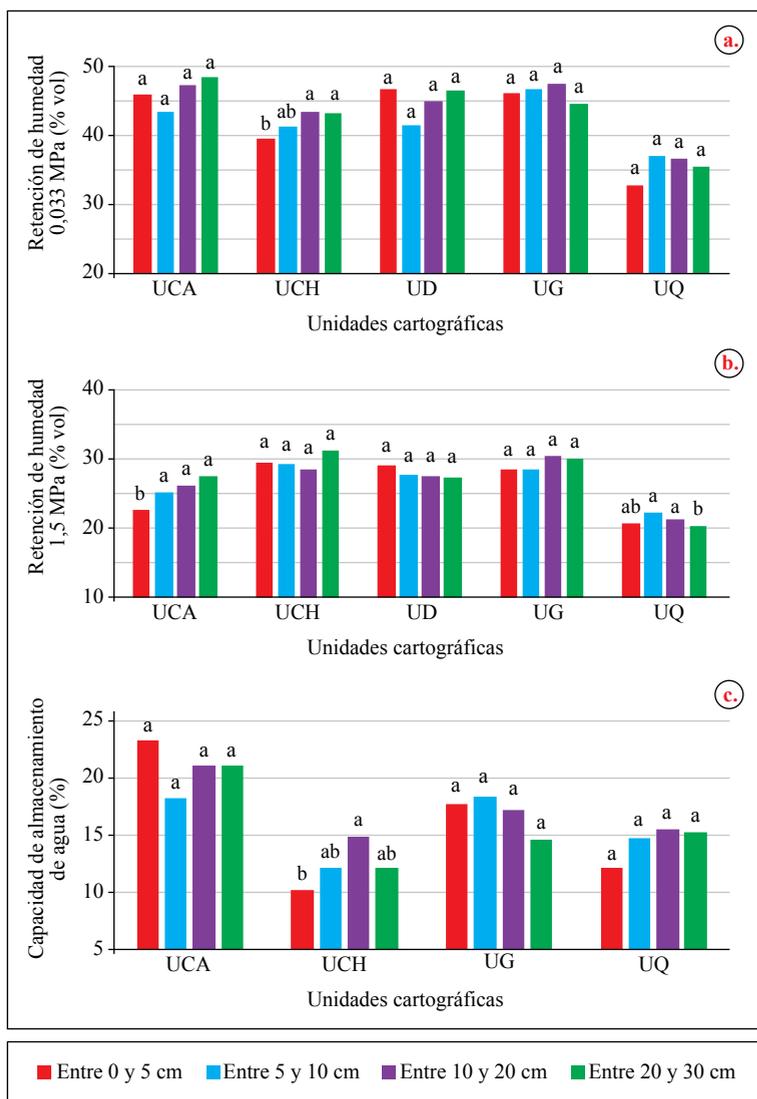


Figura 4. Valores promedio (n=4) de: a) Retención de humedad a 0,033 MPa (capacidad de campo-CC); b) Retención de humedad a 1,5 MPa (punto de marchitez permanente-PMP); c) Capacidad de almacenamiento de agua para las unidades cartográficas Catarina-UCA, Chinchiná-UCH, Doscientos-UD, Guamal-UG y Quindío-UQ, en las profundidades de muestreo entre 0 y 5 cm, 5 y 10 cm, 10 y 20 cm y 20 y 30 cm. La letra corresponde a la diferencia de medias entre profundidades por unidad de suelos por análisis de Duncan al 95%.

Tabla 4. Modelos de regresión para las propiedades analizadas en las unidades cartográficas de interés.

Modelo	R ²
$L-UD = 38,83^{**} \exp(-,5((\text{prof}-2,87^{**})/3,1980^{*})^2)$	0,99
$CC-UCH = 38,71^{***}(1,03^{***\wedge}\text{Prof})$	0,87
$PMP-UQ = 21,70^{**}(0,99^{***\wedge}\text{Prof})$	0,15
$CAA-UCH = 10,49^{***}(1,07^{***\wedge}\text{Prof})$	0,12
$MO-UCA = 8,46^{**} \exp(-0,24^{*} \text{Prof})$	0,97
$MO-UD = 8,51^{**} \exp(-0,28^{**} \text{Prof})$	0,99
$MO-UG = 7,11^{**} \exp(-0,24^{*} \text{Prof})$	0,99
$MO-UQ = 8,07^{**} \exp(-0,11^{*} \text{Prof})$	0,89
$MO-UCH = 11,73^{***} - (0,95^{*} \text{Prof})$	0,98

L-UD: contenido de limos en la unidad Doscientos; CC-UCH: retención de humedad a capacidad de campo en la unidad Chinchiná; PMP-UQ: retención de humedad a punto de marchitez permanente en la unidad Quindío; CAA-UCH: capacidad de almacenamiento de agua en la unidad Chinchiná; MO-UCA, UD, UG, UQ, UCH: contenidos de materia orgánica en las unidades Catarina, Doscientos, Guamal, Quindío y Chinchiná, respectivamente; Prof: profundidad; * = valor $p < 0,05 \geq 0,01$; ** = valor $p < 0,01 \geq 0,001$; *** = valor $p < 0,001$.

Diferencia estadística de las propiedades por unidades cartográficas de suelo

El análisis de varianza entre unidades indicó diferencia estadística entre unidades cartográficas, para siete de las ocho propiedades evaluadas (A, L, Ar, MO, Da, CC_{grav}, PMP_{grav}) y para las dos calculadas (Pt y CAA), en ninguno de los casos hubo interacción entre unidades y profundidades. Las propiedades que presentaron mayor diferencia de medias fueron L, Da y PMP, cada una con cuatro grupos (A a D), seguidas por MO, Pt y CC, cada una con tres grupos (A a C). Las que menos diferencia de medias tuvieron fueron A, Ar y CAA cada una con dos grupos (A a B), y Dr no presentó diferencia de medias (Tabla 5).

Se encontró que las Unidades provenientes de materiales parentales de composición básica y ultrabásica, conservaron una proporción similar en la distribución del tamaño de partículas, con un marcado predominio de los materiales finos (L y Ar) sobre los gruesos (A), y las unidades provenientes de cenizas volcánicas presentaron menores proporciones de Ar en comparación con las ya mencionadas; sin embargo, dicha relación no se conservó en la proporción de A y L, ya que el valor mayor de A lo presentó la unidad Quindío (53,4±6,3% entre los 20 y 30 cm), mientras que la unidad Chinchiná presentó los menores (14,9±7,9% entre 0 y 5 cm de profundidad) y a su vez fue la que presentó mayor contenido de L (57,6±10,6% entre 10 y 20 cm) y la unidad Quindío la de menor (26,6±3,4% entre 0 y 5

cm). Lo anterior, si se mira desde el análisis de laboratorio y la clasificación por tamaño, no es contradictorio y tampoco se aleja de las consideraciones generales para este tipo de suelos, ya que las A van desde 2.000 μm hasta 50 μm y los L desde 50 μm hasta 2 μm , lo que genera que partículas que se encuentren en el límite de la división (cercasas a 50 μm) se puedan contabilizar bien sea como A o L, por mínimas variaciones en algunos factores como la acción del dispersante, el volumen de aforo, pequeños cambios en la temperatura o el desgaste físico de partículas en los procesos de pretratamiento (Kilmer & Alexander, 1949).

Estos resultados, presentan similitud con los expuestos por Medina y Salazar (2009), en los que los suelos provenientes de cenizas volcánicas (en este caso relacionados con las unidades Quindío y Chinchiná) presentan menor contenido de materiales finos (Ar) que gruesos y medios (A y L), en comparación con unidades de material parental ultrabásico (unidad Guamal). Dicha relación se atribuye en la respuesta a la meteorización de los minerales que conforman los materiales parentales de los cuales provienen dichas unidades, que son contrastantes en la serie de cristalización de Bowen y, por ende, en su meteorización.

En cuanto a MO, resultados similares fueron reportados por Salamanca y Sadeghian (2005) para la unidad Chinchiná, que en este caso presentó el valor máximo (10,6% \pm 4,3% entre 0 y 5 cm de profundidad) y por Medina y Salazar (2009) para las unidades Doscientos y Guamal, que en este trabajo presentaron los valores más bajos (UG 2,7% \pm 1,0% entre 20 y 30 cm). Pese a que este último estudio tuvo interés en el horizonte B del suelo, presentó similitud con lo reportado en esta investigación para las unidades Guamal y Doscientos, las cuales, en los sitios muestreados, no presentaron horizonte A o este fue incipiente.

Para Da y Dr los mayores valores se presentaron en la unidad Catarina (1,2 \pm 0,1 g cm⁻³, entre 10 y 20 cm y 2,8 \pm 0,1 g cm⁻³, entre 5 y 10 cm, respectivamente), razón por la cual, dicha unidad también fue la de menor Pt (51,7% \pm 2,4%, entre 10 y 20 cm de profundidad). Estos resultados se encuentran en el mismo rango de otros ya reportados para suelos de la zona cafetera (Cardona & Sadeghian, 2005; Hincapié & Salazar, 2011). Tales estudios coinciden en que el manejo del suelo influye en la variabilidad de alguna de estas propiedades, al indicar que los suelos con mayor contenido de Ar (Salamanca & Sadeghian, 2005), menor contenido de MO (Cardona & Sadeghian, 2005) y/o mayor grado de erosión (Hincapié & Salazar, 2011), tienden a presentar mayor Da, lo que genera una menor Pt. Este comportamiento se ajusta a las condiciones de las unidades Catarina y Guamal, que presentaron los menores valores de Pt.

En CC y PMP, los menores valores se presentaron en la unidad Quindío (32,8% \pm 6,2%, entre 0 y 5 cm y 20,2% \pm 1,1%, entre 20 y 30 cm, respectivamente) y, por ende, los de CAA, lo cual se atribuye a que fue la unidad de mayor contenido de A y dicha condición hace que la CAA sea más limitada en comparación con los suelos que presentan mayor contenido de Ar (Lambers et al., 2008; Or et al., 2011). Los valores encontrados para CC y PMP, se encuentran en el mismo rango que los reportados por Cardona y Sadeghian (2005) para suelos de la zona cafetera colombiana.

Según la clasificación propuesta en esta investigación para CC, PMP y CAA, las cinco unidades presentaron CC y PMP alta (CC \geq 33 y PMP \geq 18), y CAA alta (\geq 15) en las unidades Catarina, Doscientos y Guamal, y CAA media (\geq 12 < 15) en las unidades Chinchiná y Quindío.

Correlación entre las propiedades analizadas

En el análisis de correlación que se presenta en la Tabla 6, se observa como en la mayoría de los casos las propiedades incluidas en esta investigación se relacionan entre ellas. CAA (variable calculada) no presentó correlación directa con MO, A, L y Pt, lo que lleva a que el interés se centre en las variables que se utilizan para su cálculo como son CC_{grav} , PMP_{grav} y Da, y las propiedades que con ellas se correlacionan.

De lo anterior, por medio de un análisis de regresión lineal se encontró que la A y Da explican en 47% la CC_{grav} y todo el grupo textural con Da, explican en 81% la PMP_{grav} (Tabla 7). La relación de Da con los contenidos de humedad coincide con lo expuesto por Al Majou et al. (2008), Dobarco et al. (2019) y Shao et al. (2019) y, por Salamanca y Sadeghian (2005), para suelos de la zona cafetera colombiana.

La MO se correlaciona de forma positiva con las variables CC y PMP, y de forma negativa con Da, y si bien esta propiedad no hace parte directa de los modelos de edafotransferencia (Tabla 7), se relaciona en un 72% con Da (Figura 5), propiedad que sí hace parte de dichos modelos, lo que deja en manifiesto los hallazgos de otras investigaciones relacionadas con el cultivo del café, en las que indican que la Da es significativa para determinar la productividad de los cultivos de café (Suárez, 2000; Valencia, 1999), al igual que MO (Salamanca & Sadeghian, 2005).

La Pt no se correlaciona con la CAA. Esto se debe a que la primera propiedad incluye todos los tamaños de los poros y la segunda únicamente incluye los mesoporos, de esta forma, la segunda propiedad se ve favorecida en suelos con predominio de tamaño de partículas finas en comparación con los de partículas gruesas (Or et al., 2011), como se aprecia en los resultados

de esta investigación, donde la unidad Chinchiná presentó la mayor Pt y la menor CAA y, por el contrario, la unidad Catarina presentó la menor Pt y la mayor CCA (Figura 6).

Los resultados obtenidos permiten concluir que en la mayoría de los casos, y solo con algunas excepciones, la CAA y las propiedades con las que se relaciona, no presentan diferencia estadística entre 0 – 30 cm del perfil del suelo, pero sí presentan variación entre unidades, por lo que se sugiere que los muestreos de suelos para el cálculo de CAA, A, L, Ar, Da, Dr, Pt, CC y PMP, tendientes a ser utilizados para generar recomendaciones de manejo en el cultivo de café en Colombia, se realicen entre los 10 – 20 cm de profundidad, dado que las excepciones se presentaron con la profundidad de 0-5 cm, específicamente en la unidad Chinchiná para CC, MPM y CAA y en las unidades Catarina y Quindío para PMP. Además, para minimizar la variabilidad deben realizarse muestreos por cada unidad cartográfica de suelo y en caso de realizar estudios detallados en suelos de origen volcánico a nivel de lote, es importante tener en cuenta los cambios geomorfológicos del lote como lo indica Hincapié (2011).

Para las unidades cartográficas de la zona cafetera colombiana, el tamaño de partículas desempeña un papel importante en la capacidad de almacenamiento de agua, tal como lo muestran las correlaciones directas entre CAA y Ar, y CC y PMP con L, e indirectas entre CC y PMP con A. Sumado a que los modelos de edafotransferencia para CC y PMP, determinados en esta investigación se fundamentan en A, L, Ar y Da.

En las condiciones del estudio la CAA no está determinada por la Pt, ya que como se muestra con los resultados, unidades de mayor porosidad no siempre presentan la mayor CAA, a pesar de que Pt se relaciona directamente con CC y PMP.

Tabla 5. Prueba de comparación de medias por la prueba de Duncan 95%, para las variables de interés entre unidades cartográficas (cada unidad con 16 observaciones).

Unidad de suelo	%																			
	A	L	Ar	MO	Da	Dr	Pt	CC _{grav}	PMP _{grav}	CAA										
Catarina	22,3	b	34,8	c	42,9	a	4,9	c	1,2	a	2,6	a	54,6	c	39,0	c	21,2	d	21,0	a
Chinchiná	18,6	b	56,8	a	24,6	b	9,4	a	0,7	d	2,7	a	72,6	a	57,9	a	40,7	a	12,3	b
Doscientos	24,8	b	36,4	c	38,8	a	4,5	c	1,0	c	2,6	a	62,8	b	47,6	b	29,7	b	17,9	ab
Guamal	18,0	b	43,2	b	38,8	a	4,0	c	1,1	b	2,7	a	58,3	c	42,4	bc	26,7	c	17,0	ab
Quindío	51,0	a	27,5	d	21,5	b	6,2	b	1,0	c	2,6	a	63,0	b	37,1	c	22,0	d	14,4	ab

A: arena; L: limo; Ar: arcilla; MO: materia orgánica; Da: densidad aparente; Dr: porosidad real; Pt: porosidad total; CC_{grav}: retención de humedad a capacidad de campo; PMP_{grav}: retención de humedad a punto de marchitez permanente; CAA: capacidad de almacenamiento de agua.

Tabla 6. Correlaciones de Pearson entre las propiedades analizadas (n=80), en las unidades cartográficas de interés.

Propiedad	Da	CC _{grav}	PMP _{grav}	MO	CAA	Pt
Da		-0,55***	-0,77***	-0,57***	PD	PD
CC _{grav}	-0,55***		SC	0,32**	PD	0,53***
PMP _{grav}	-0,77***	0,63***		0,46***	PD	0,68***
MO	-0,57***	0,32**	0,46***		SC	0,57***
CAA	PD	PD	PD	SC		SC
Pt	PD	0,53***	0,68***	0,57***	SC	—
A	SC	-0,33**	-0,31**	SC	SC	SC
L	-0,41***	0,49***	0,70***	0,35**	SC	0,37***
Ar	0,61***	SC	-0,30**	-0,39***	0,36**	-0,55***

C. Corr: coeficiente de correlación; * = valor $p < 0,05 \geq 0,01$; ** = valor $p < 0,01 \geq 0,001$; *** = valor $p < 0,001$; Da: densidad aparente; CC_{grav}: retención de humedad a capacidad de campo en % gravimétrico; PMP_{grav}: retención de humedad a punto de marchitez permanente en % gravimétrico; MO: materia orgánica; CAA: capacidad de almacenamiento de agua; Pt: porosidad total; A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; PD: no se presenta el valor porque es propiedad derivada; SC: sin correlación.

Tabla 7. Modelos de regresión lineal para CC_{grav} y PMP_{grav} , en las unidades cartográficas estudiadas.

Modelo (n = 80)	R ²
$CC_{grav} = 89,63^{***} - 37,35^{***} Da - 0,30^{***} A$	0,47
$PMP_{grav} = -176,17 - 29,87^{***} Da + 2,18^* A + 2,45^* L + 2,33^* Ar$	0,81

CC_{grav} : retención de humedad a capacidad de campo % gravimétrico; PMP_{grav} : retención de humedad a punto de marchitez permanente % gravimétrico; * = valor $p < 0,05 \geq 0,01$; ** = valor $p < 0,01 \geq 0,001$; *** = valor $p < 0,001$.

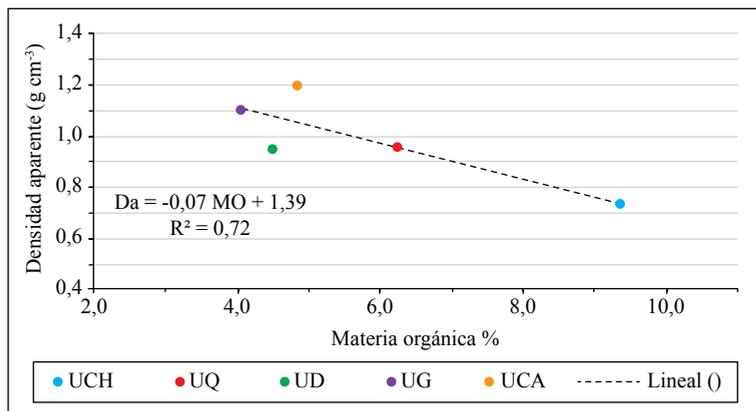


Figura 5. Relación entre MO y Da para las unidades de suelo de interés (promedio de cada unidad con 16 datos).

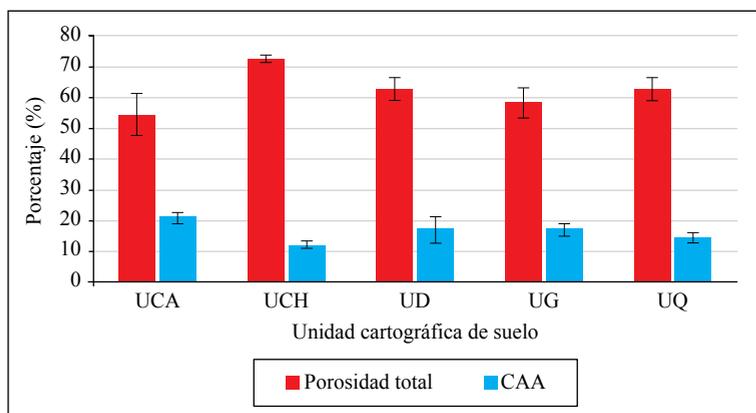


Figura 6. Porosidad total y capacidad de almacenamiento de agua para las unidades de suelo Catarina–UCA, Chinchiná–UCH, Doscientos–UD, Guamal–UG y Quindío–UQ (n=16). Las barras corresponden al error estándar.

AGRADECIMIENTOS

El autor presenta sus agradecimientos a la FNC, financiadora de la investigación, a los integrantes de la Disciplinas de Suelos de Cenicafé, a los

Ingenieros Agrónomos Andrés Felipe Castro y Wadi Andrey Castaño, y al Comité Departamental de Cafeteros de Risaralda, principalmente a los ingenieros Daniel Mauricio Gómez, Norberto Rincón y Sandra Milena García.

LITERATURA CITADA

- Al Majou, H., Bruand, A., & Duval, O. (2008). The use of in situ volumetric water content at field capacity to improve the prediction of soil water retention properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(4), 533–541. <https://doi.org/10.4141/CJSS07065>
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A. M., Salazar, L. F., & Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Bortolini, D., & Albuquerque, J. A. (2018). Estimation of the Retention and Availability of Water in Soils of the State of Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, e170250 <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170250>
- Cardona, D. A., & Sadeghian, S. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Revista Cenicafé*, 56(4), 348–364. <http://hdl.handle.net/10778/197>
- Costa, A., Albuquerque, J. A., Costa, A., Pértile, P., & Silva, F. (2013). Water retention and availability in soils of the State of Santa Catarina-Brazil: Effect of textural classes, soil classes and lithology. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(6), 1535–1548. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600010>
- Dobarco, M. R., Bourennane, H., Arrouays, D., Saby, N. P., Cousin, I., & Martin, M. P. (2019). Uncertainty assessment of *GlobalSoilMap* soil available water capacity products: A French case study. *Geoderma*, 344, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.036>
- Dobarco, M. R., Cousin, I., Le Bas, C., & Martin, M. P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
- Farfán, F., & Hincapié, E. (2011). Valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 62(1), 100–118. <http://hdl.handle.net/10778/476>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1986). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Quindío*.
- Folberth, C., Skalský, R., Moltchanova, E., Balkovič, J., Azevedo, L. B., Obersteiner, M., & van der Velde, M. (2016). Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations. *Nature Communications*, 7(1), 11872. <https://doi.org/10.1038/ncomms11872>
- González, H., Zapata, R., & Sadeghian, S. (2009). Caracterización de los ácidos húmicos en suelos de la zona cafetera de Caldas. *Revista Cenicafé*, 60(1), 25–40. <http://hdl.handle.net/10778/156>
- Haghverdi, A., Öztürk, H. S., & Cornelis, W. M. (2014). Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method. *Geoderma*, 226–227, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.026>
- Hincapié, E. (2011). *Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9296>
- Hincapié, E., & Salazar, L. F. (2011). Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. *Revista Cenicafé*, 62(2), 79–89. <http://hdl.handle.net/10778/490>
- Huang, P. M., Li, Y., & Sumner, M. E. (Eds.). (2011). *Handbook of Soil Sciences, Properties and processes* (2. ed. [compl. rev. and rewritten]). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11267>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1990). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (5ta ed.). IGAC.
- Keller, T., Arvidsson, J., & Dexter, A. R. (2007). Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil and Tillage Research*, 92(1), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.001>
- Kilmer, V. J., & Alexander, L. T. (1949). Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil Science*, 68(1), 15–24. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1949/07000/METHODS_OF_MAKING_MECHANICAL_ANALYSES_OF_SOILS.3.aspx
- Kirkham, M. B. (2005). Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Non-Limiting Water Range. En *Principles of Soil and Plant Water Relations* (pp. 101–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012409751-3/50008-6>
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology* (2nd ed.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>

- Lince, L. A., & Sadeghian, S. (2016). Producción de café (*Coffea arabica* L.) en función de las propiedades del suelo, en dos localidades de Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1), 71–82. <https://doi.org/10.22490/21456453.1547>
- Lipiec, J., Walczak, R., Witkowska-Walczak, B., Nosalewicz, A., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Sławiński, C. (2007). The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.001>
- Medina, S. B., & Salazar, L. F. (2009). Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 60(3), 253–268. <http://hdl.handle.net/10778/155>
- Nobel, P. S. (2009). Chapter 9—Plants and Fluxes. En P. S. Nobel (Ed.), *Physicochemical and Environmental Plant Physiology* (4th ed., pp. 438–505). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374143-1.00009-0>
- Or, D., Wraith, J. M., Robinson, D. A., & Jones, S. B. (2011). Soil water content and water potential relationships. En P. M. Huang, Y. Li & M. E. Sumner (Eds.), *Handbook of soil sciences: Properties and processes* (2nd ed. pp. 41–69). CRC Press.
- Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A. B., & Dalglish, N. (2014). Predicting and mapping the soil available water capacity of Australian wheatbelt. *Geoderma Regional*, 2–3, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.005>
- Rawles, W. J., & Brakensiek, D. L. (1982). Estimating soil water retention from soil properties. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(2), 166–171. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0034246>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Sadeghian, S. (2010). *La materia orgánica: Componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/1113>
- Sadeghian, S., Salamanca, A., & Cardona, D. (2004, octubre 20–22). Indicadores de la calidad del suelo en algunos agroecosistemas de la zona cafetera colombiana. I Taller Nacional sobre Indicadores de Calidad del Suelo: Conceptos y Principios Aplicados a la Evaluación de la Degradación de las Tierras CIAT. Palmira, Colombia.
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 56(4), 381–397. <http://hdl.handle.net/10778/163>
- Shao, X., Wang, Y., Bi, L., Yuan, Y., Su, X., & Mo, J. (2009). Study on soil water characteristics of tobacco fields based on canonical correlation analysis. *Water Science and Engineering*, 2(2), 79–86. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.02.009>
- Suárez, S., Caballero, R., Chavarriaga, G., & Quevedo, P. (1986). Caracterización física, uso, manejo y conservación de algunos suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario de la zona cafetera del departamento del Huila. *Revista Cenicafé*, 37(2), 41–60. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc037%2802%29041-060.pdf>
- Suárez, S. (1980). Caracterización física de algunos suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario del Tolima. *Revista Cenicafé*, 31(3), 105–124. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc031%2803%29105-124.pdf>
- Suárez, S. (2000, julio 24–28). Características físicas de los suelos de la zona cafetera colombiana relacionadas con el uso, manejo y conservación. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Organizador), *Simposio sobre suelos de la zona cafetera colombiana*. Manizales, Caldas, Colombia.
- Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., & Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226–238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>
- Valencia, G. (1999). *Fisiología, nutrición y fertilización del café*. Cenicafé.
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1927). The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Soil Science*, 3, 498–513.
- Warrick, A. W., & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. En D. Hillel (Ed.), *Applications of soil physics* (pp. 319–344). Academic Press.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T. M., Miltner, A., & Schroth, G. (1997). Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, 79(1–4), 117–161. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00040-2)