

**FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA DETERMINAR LA
MICROPOROSIDAD DE UN TYPIC HAPLUDOX SOMETIDO A DOS DIFERENTES
USOS**

EDWIN ESTEBAN REYES ALVAREZ

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA INGENIERIA AGRONÓMICA
VILLAVICENCIO – META
2018**

**FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA DETERMINAR LA
MICROPOROSIDAD DE UN TYPIC HAPLUDEX SOMETIDO A DOS DIFERENTES
USOS**

EDWIN ESTEBAN REYES ALVAREZ

Trabajo de tesis para optar el título de Ingeniero Agrónomo

Director: MSc. Ing. Sergio David Parra González

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA INGENIERIA AGRONÓMICA
VILLAVICENCIO – META
2018**

Nota de aceptación

Director: Sergio David Parra González

Dr. MSc. Amanda Silva Parra
Jurado

Ing. Luis Guarín
Jurado

DEDICATORIA

A mi Madre, porque éste logro también es suyo

A mi Hermano, por su infaltable colaboración

A mi Padre, por sus palabras de apoyo

A todos los familiares que me ayudaron

A la vida, por lo alegría de disfrutarla y la maravilla de descubrirla

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros Jorge, John P, Alex, Iván, Daniel, John A y Bayron, por las experiencias de vida, académicas y profesionales que hemos compartido

Al profesor Sergio Parra por todo el apoyo, por las enseñanzas y por motivarme a crecer como profesional

A la Universidad de los Llanos por permitirme descubrir una diversidad de ideas, pensamientos, personas y demás, en una sociedad que cada día parece más homogénea

A la Universidad Pública porque se resiste a perder su “universalidad en el conocimiento”

CONTENIDO

1.	Resumen	8
2.	Abstract	9
3.	Objetivos.....	10
3.1.	Objetivo general	10
3.2.	Objetivos específicos	10
4.	Introducción	11
5.	Marco teórico.....	13
5.1.	La porosidad de forma general.....	13
5.2.	La microporosidad.....	15
5.3.	Funciones de pedotransferencia	17
6.	Materiales y métodos.....	20
6.1.	Descripción del lugar.....	20
6.2.	Diseño de muestreo	20
6.3.	Variables evaluadas en el suelo.....	20
6.4.	Obtención de la función de pedotransferencia	22
7.	Resultados y Discusión	23
7.1.	Efecto del manejo sobre las propiedades del suelo	23
7.2.	Relaciones (Correlaciones) entre propiedades físicas y químicas del suelo	28
7.3.	Funciones de pedotransferencia para microporosidad y otras propiedades del suelo	32
8.	Conclusiones	37
9.	Bibliografía.....	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación funcional de los poros del suelo	15
Tabla 2. Método y tipo de método para la estimación de las propiedades físicas y químicas a evaluar	21
Tabla 3. Estadística descriptiva y análisis de varianza (SNK $p < 0,05$) de diferentes propiedades del suelo para dos lotes con diferente manejo.....	25
Tabla 4. Correlación de Pearson entre variables estudiadas que mostraron significancia.....	29
Tabla 5. Funciones de pedotransferencia obtenidas, R^2 y significancia del modelo, CP Mallows y significancia de variable regresora, poder de predicción.	33
Tabla 6. Correlación de Pearson entre los valores predichos usando las funciones de la tabla 5 y los valores del set de datos inicial.	35

1. Resumen

Las funciones de pedotransferencia se han convertido en una herramienta útil para estimar de forma indirecta y de bajo costo una propiedad del suelo que es compleja o costosa de medir, en función de otra(s) de menor complejidad y costo en la determinación; como el caso de la curva de retención de humedad, la conductividad hidráulica y la infiltración en función de la textura, la densidad aparente y la materia orgánica. La microporosidad es una propiedad de importancia agronómica por su relación con el crecimiento de las plantas, pero como otras, presenta complejidad en su determinación por el uso de equipos y/o metodologías costosas, el difícil manejo de la información y la variedad de metodologías. Se plantea el uso de funciones de pedotransferencia de tipo continua con regresiones lineales múltiples para estimar la microporosidad de un suelo Typic Hapludox en la vereda Barcelona de Villavicencio (Meta) usando un set de datos con 12 propiedades entre físicas y químicas, de dos lotes sometidos a diferentes usos (cultivo agroforestal y cultivo de semestrales). Se tomaron 24 puntos de muestreo por cada lote en una cuadrícula de 17 x 17m, para el diseño de la cuadrícula de muestreo se usó el software QGis® y para los procedimientos como regresiones lineales, ANAVA y correlación de Pearson fue Infostat®. El uso y manejo del suelo modifica significativamente propiedades como la capacidad de retención de humedad, el contenido de arcillas, el contenido fosforo y el pH, las funciones de pedotransferencia permitieron estimar la microporosidad con R^2 de 0,49 y 0,41 usando la capacidad de campo y la conductividad hidráulica saturada como variables regresoras; otras funciones mostraron un R^2 de 0,65 y 0,64, como la capacidad de campo en función de la microporosidad y la arcilla o en función de la conductividad hidráulica saturada, entre otras, con un poder de predicción moderado pero con posibilidad de mejora si se incluyen más variables independientes que estén muy relacionadas con la naturaleza de la variable dependiente. La correlación entre valores predichos por una función y los valores determinados en el set de datos, es una herramienta para la validación puesto que permite diagnosticar su poder predictivo, la correlación más alta fue de 0,77 para la capacidad de campo en función de la conductividad hidráulica saturada. Los parámetros hidrodinámicos de los suelos evaluados se pueden estimar usando funciones de pedotransferencia pero con sus respectivas mejoras.

Palabras clave: Propiedades físicas del suelo, regresiones lineales, set de datos, porosidad, R^2 , correlación de Pearson.

2. Abstract

The pedotransfer functions have become a useful tool to estimate indirectly and at low cost a property of the land that is complex or expensive to measure, depending on other (s) of less complexity and cost in the determination; as the case of the moisture retention curve, the hydraulic conductivity and the infiltration depending on the texture, the apparent density and the organic matter. Microporosity is a property of agronomic importance because of its relationship with the growth of plants, but like others, it presents complexity in its determination by the use of expensive equipment and / or methodologies, the cumbersome management of information and the variety of methodologies. The use of continuous-type pedotransfer functions with multiple linear regressions is proposed to estimate the microporosity of a Typic Hapludox soil in the Barcelona district of Villavicencio (Meta) using a data set with 12 properties between physics and chemistries, of two batches submitted to different uses (agroforestry and semi-annual crops). 24 sampling points were taken for each lot in a grid of 17 x 17m, for the design of the sampling grid the QGis® software was used and for the procedures such as linear regressions, ANAVA and Pearson's correlation was Infostat®. The use and management of soil significantly modified properties such as moisture retention capacity, clay content, phosphorus content and pH, pedotransfer functions allowed to estimate microporosity with R^2 of 0.49 and 0.41 using the capacity field and saturated hydraulic conductivity as return variables; other functions showed an R^2 of 0.65 and 0.64, such as the field capacity depending on the microporosity and the clay or as a function of the saturated hydraulic conductivity, among others, with a moderate prediction power but with the possibility of improvement if more independent variables are included that are closely related to the nature of the dependent variable. The correlation between values predicted by a function and the values determined in the data set, is a tool for validation since it allows to diagnose its predictive power, the highest correlation was 0.77 for the field capacity according to the saturated hydraulic conductivity. The hydrodynamic parameters of the evaluated soils can be estimated using pedotransfer functions but with their respective improvements.

Key words: Physical properties of the soil, linear regressions, data set, porosity, R^2 , Pearson correlation.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Obtener una función de pedotransferencia mediante el método de las regresiones lineales múltiples, para determinar la microporosidad en función de propiedades físicas de fácil determinación.

3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de diferentes usos del suelo en la aireación y retención de humedad de un suelo.
- Analizar correlaciones existentes entre la microporosidad y todas las propiedades físicas y químicas evaluadas
- Estimar el poder de predicción de la función de pedotransferencia comparado con el método “de la centrifuga”, propuesto por Olarte *et al.*, 1979 (citado en Jaramillo, 2002)
- Proponer funciones de pedotransferencia para propiedades diferentes a la microporosidad, que muestren poder predictivo.

4. Introducción

La capacidad que tiene un suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del ambiente y promover la salud de plantas y animales, se entiende como calidad del suelo (Doran & Parkin, 1994), o de manera más general se puede definir como la capacidad que tiene un tipo de suelo para funcionar (USDA, 1999). Para valorar la calidad de los suelos, es necesario medir o estimar diferentes propiedades de este, que sirven para describir los procesos que ocurren allí, ya sean de tipo físico, químico, biológico o mixtos (bioquímicos, geoquímicos, biogeoquímicos) y que tienen relación directa con su capacidad para cumplir una función en el ecosistema o agroecosistemas (USDA, 1999).

La microporosidad es una propiedad de importancia agroecológica ya que se puede relacionar con procesos de compactación, disponibilidad de oxígeno, actividad biológica, descomposición de la materia orgánica (Reyes, 2014), crecimiento radicular en relación a la macroporosidad (Pla, 1983., citado en Reyes, 2014), disponibilidad de agua para la planta (Rucks, Garcia, Kaplán, Ponde de León, & Hill, 2004), la biodegradación de herbicidas (Calderon, Real, Cornejo, & Hermosín, 2011) y la respuesta productiva de muchos cultivos (Lamer y Shaw, 1941., en Oliveira, 1968); pero tiene también una particularidad y es que los procedimientos propuestos para estimar su valor son tediosos y complejos, principalmente por:

- El manejo de equipos de laboratorio
- El levantamiento y procesamiento de la información necesaria
- Requiere mínimo tres días para adecuar la muestra y generar valores confiables
- Existen diferentes metodologías propuestas que usan información o parámetros diferentes
- Las metodologías de última generación son costosas y complejas

Operativamente esta propiedad es dispendiosa de medir, sin embargo existen métodos matemáticos denominados funciones de pedotransferencia que permiten generar una ecuación (o función) donde se relaciona una propiedad en función de

otra(s) que son más sencillas de determinar (Zimmermann & Basile, 2008), es por este tipo de situaciones que diferentes investigadores han planteado y demostrado la eficacia de las funciones de pedotransferencia para relacionar o predecir alguna propiedad del suelo de costosa y/o difícil medición, a partir de otras que son más sencillas y/o económicas (Rawls & Brakensiek, 1989., Pierce & Larson, 1993., Baker & Ellison, 2007., y Coronado & Medina, 2009); las funciones permiten traducir datos que tenemos en datos que necesitamos (Pachepsky & Rawls, 2004) y de esta forma usar la información en la planeación del uso y el manejo de los suelos; este es un método indirecto y de bajo costo (Souza, y otros, 2016), que usa como insumo las propiedades determinadas en los levantamientos de suelos, este conocimiento se puede aplicar al monitoreo del suelo a través del tiempo de una forma rápida y económica. Estas funciones han sido empleadas para evaluar variables o propiedades del suelo como la conductividad hidráulica (Jaynes & Tyler, 1984., y Casanova, Seguel, Messing, Luzio, & Vera, 2003), curvas de retención de humedad (Schaap y otros, 1998., citados por Saxton & Rawls, 2006., y Zimmermann & Basile, 2008), infiltración (Landini y otros, 2007) y depuración, descomposición y fertilización (Aguilar-Duarte, Cano-González, Ramírez-Silva, & Bautista-Zúñiga, 2015). En Colombia los trabajos de investigación en los que este tema se ha estudiado son incipientes, se han reportado 2 trabajos para suelos volcánicos de ladera (Lozano, Madero, Tafur, Herrera, & Amézquita, 2006., e Hincapié, 2011) y otras publicaciones con diferentes enfoques (FAO, 2012., FAO2, 2012., y Ávila, 2017)

El objetivo de este trabajo es obtener una ecuación de pedotransferencia de tipo continua, por el método de las regresiones múltiples lineales con la finalidad de determinar la microporosidad del suelo en dos lotes con manejos diferentes, a partir de un set de datos mínimo (SDM o MDS por sus siglas en inglés).

5. Marco teórico

5.1. La porosidad de forma general

La porosidad del suelo se define como el volumen de aire y agua contenido en una unidad de volumen de suelo, está determinada principalmente por el acomodo de las partículas sólidas, este acomodo depende del tamaño de las partículas, la estructura, las cargas eléctricas de los coloides y el manejo del suelo, por ejemplo, los suelos arcillosos tienen un rango de porosidad total mayor que un suelo arenoso (Osman, 2013., Narro, 1994), esto se debe a la baja reactividad de sus partículas, pero, en un suelo arenoso los poros son, en promedio, de mayor diámetro que en un suelo arcilloso, por lo tanto, sus características o propiedades (como aireación, infiltración y retención de humedad entre otras) varían en gran medida (Narro, 1994); debido a esto, el autor mencionado ha diferenciado tres características relacionadas con la función de los poros:

- El volumen de poros por unidad de volumen de suelo
- La distribución o porcentaje de los diferentes rangos de diámetro de los poros
- La tortuosidad, relación promedio entre longitud real de los poros y la distancia en línea recta entre los extremos de los poros.

La medida de la porosidad total también se puede expresar en porcentaje y en promedio se mueve en un rango del 30 al 60%, sin embargo, su valor no dice nada sobre el tamaño y forma de la variedad de poros del suelo (Osman, 2013., Hillel, 1998). La geometría de los poros y sus interconexiones controlan el comportamiento del agua y proporcionan mayor información sobre procesos de transferencia y vida en el suelo ya que por estos se mueven, además del agua, ciertos nutrientes y gases de gran importancia para el mantenimiento y desarrollo de la flora, la fauna y la microbiota del suelo; estos organismos favorecen la estabilidad estructural o forman estructura y por ende favorecen también a la porosidad (Pinzon-Pinto, 2009); Honorato (2000), menciona otros aspectos importantes de la porosidad:

- La cantidad y/o calidad del espacio poroso es la principal causa de la variación de la densidad aparente y su determinación es un método práctico para la evaluación de la efectividad de las labores culturales y su impacto en la estructura
- La variación de la porosidad normalmente refleja diferencias en el tipo y grado de estructura
- Sirve en la evaluación de la compactación
- Afecta la aireación, la penetración radical y el arraigamiento.

Los poros han sido clasificados de diferentes maneras de acuerdo al autor, Según Narro (1994), los poros pueden ser macroporos, con más de 30 micras de diámetro y permiten el libre movimiento de agua y aire; y microporos, que miden entre 30 y 0,2 micras y retienen el agua que las plantas utilizan generalmente, Greenland (1977, citado por Honorato, 2000) propuso una clasificación de acuerdo a la función que desempeñan los diferentes poros (tabla 1), similar a lo propuesto por Porta (2003, citado por Pinzon-Pinto, 2009); y según Hillel (1998), en suelos agregados los poros pueden estar entre los agregados (poros inter-pedales) que es también denominada porosidad estructural, son cavidades entre agregados adyacentes que tienen influencia en procesos de infiltración, drenaje y aireación; y también pueden estar dentro de los agregados (intra-pedales), que son importantes en la post-infiltración y retención de agua y solutos en el suelo. El autor mencionado anteriormente, describe los poros capilares, como típicos de suelos de textura media, que forman el menisco de aire-agua (común en tubos capilares) en estado insaturado, el fluido obedece generalmente a las leyes capilares y ley de flujo de Darcy, su anchura está comprendida entre varios micrómetros a unos pocos milímetros.

Tabla 1. Clasificación funcional de los poros del suelo

Tipo de poro	Función	Diámetro cilíndrico equivalente (μm)
Transmisión	Movimiento de aire y del drenaje del exceso de agua	>50
Almacenamiento	Retención de agua contra la gravedad	0.5-50
Residuales	Retención y dispersión de iones en solución	0.005-0.5
Espacios de enlace	Soporta las fuerzas más importantes entre las partículas del suelo	<0.005

Fuente: Greenland, 1977., citado en Honorato, 2000.

Los suelos sometidos a sistemas de producción agrícola intensiva tienden a reducir su porosidad generando procesos de compactación que reducen la productividad (Narro, 1994), ya que el desarrollo vegetal se ve afectado por la distribución del espacio poroso y la relación agua-aire-suelo (Ellies, Ramirez, & Mac Donald, 1993).

5.2. La microporosidad

La microporosidad es también denominada porosidad textural, está compuesta por el volumen de los poros más finos del suelo, estos están encargados de almacenar agua y se encuentran en mayor cantidad dentro de los peds (*intra-pedales*). Pese a esta cualidad de gran importancia agronómica, para una mejor comprensión de las características del suelo es necesario conocer la distribución en que se encuentran los diferentes tamaños de poro, estos controlan las relaciones fundamentales entre las fases: sólida, líquida y gaseosa, influyendo en procesos de drenaje, infiltración, aireación, conductividad térmica y almacenamiento de agua (Kohnke, 1968., citado en Valenzuela y Torrente, 2010., Jaramillo, 2002). Estos poros son comunes en suelos

arcillosos, el agua retenida en los poros delgados es sometida a fuerzas de adsorción lo que la hace diferente a la retenida en los poros anchos. En los poros más delgados pueden ocurrir fenómenos de adsorción e hidratación de cationes, exclusión de aniones y formación de micelas con las sales, que afectan el comportamiento de los fluidos que los penetran y pueden desviarlo de las leyes comunes de capilaridad y flujo Darciano, además, es discontinua y no participa en el fenómeno de flujo de un líquido ordinario (Hillel, 1998). La microporosidad es una propiedad física del suelo de gran importancia, que influencia la compresibilidad, la conductividad hidráulica y la relación suelo-planta-agua-atmósfera (Li & Zhang, 2009), que influyen de forma positiva o negativa en el desarrollo y crecimiento vegetal.

Son varios los autores que han planteado sus metodologías y procedimientos para la medición de la microporosidad de los suelos, según Rucks, Garcia, Kaplán, Ponde de León, & Hill (2004), la microporosidad se puede estimar mediante la diferencia entre la porosidad total y la macroporosidad; pero esta última se calcula mediante la diferencia de peso que tiene una muestra no disturbada cuando está saturada y cuando se ha dejado que pierda toda el agua que no puede retener contra la fuerza gravitatoria (muestra drenada), sumado a esto, se deben tener los valores de densidad aparente y densidad real para calcular la porosidad total; con esa muestra drenada también se puede calcular la microporosidad de manera directa, se debe pesar esta muestra y secar a 105°C; la diferencia de estos pesos es el volumen de agua que ocupa los microporos. Otro método para medir la microporosidad es mediante una *mesa de tensión*, este es un aparato propuesto por Leamer y Shaw en 1941 (Oliveira, 1968), que básicamente funciona generando diferentes presiones (dentro de los 0,20 hasta 1,00 metros de columna de agua o mca) sobre muestras de suelo no disturbadas y saturadas, hasta conocer su contenido de humedad a 0,60 mca que corresponde a la presión límite entre la macro y la microporosidad (poros con diámetro del orden de 0,05cm). Según Pizarro (1978., citado en Jaramillo, 2002), la microporosidad es igual a la humedad volumétrica a capacidad de campo; mientras que Olarte y colaboradores (1979., citado por Jaramillo, 2002), proponen una fórmula en la que se requiere calcular la humedad equivalente, que corresponde al porcentaje de humedad que queda en el suelo después de centrifugar por media hora, a 1000 veces

la fuerza de la gravedad; también se usan la densidad aparente y el porcentaje de tierra fina ($< 2\text{mm}$). Se han propuesto diferentes metodologías para una estimación más precisa de la microporosidad, pero con mayor nivel de complejidad y costo; estas son:

- Curvas de tensión de humedad vs volumen de agua desplazado (Cortés y Malagón, 1984., citado en Jaramillo, 2002).
- El método de Kubiena del analizador granulométrico (Mejía, 1980., citado en Jaramillo, 2002).
- Análisis micromorfológico de suelos (Bullock et al, 1985., citado en Jaramillo, 2002)
- Modelos de dimensión fractal (Pinzón y Domínguez, 1999., citados por Pinzon-Pinto, 2009).
- El porosímetro de mercurio, el porosímetro de Stevens, la picnometría de helio o la resonancia magnética nuclear (Criollo, 2011).

5.3. Funciones de pedotransferencia

Las funciones de pedotransferencia o edafotransferencia, son relaciones que se pueden establecer mediante una ecuación, entre características morfológicas y otras propiedades de interés del suelo y que permiten inferir unas propiedades a partir de otras (Porta, López-Acevedo, & Roquero, 2003), permiten traducir datos que tenemos en datos que necesitamos (Pachepsky & Rawls, 2004); estas han surgido de las investigaciones en la década del 70 sobre el empleo de las grandes bases de datos, el uso de modelos para la descripción de las propiedades hidráulicas del suelo y la modelación computacional del movimiento de agua y solutos, inicialmente se desarrollaron en E.E.U.U. y Europa, ahora en América del Sur y Sudáfrica (Coronado & Medina, 2009), además, se pueden utilizar para complementar las bases de datos de suelos que se manejan de manera pública en países como E.E.U.U para el monitoreo de las tierras (soil survey), este es un método indirecto y de bajo costo (Souza, y otros,

2016), el concepto fue introducido por Bouma en 1989 como un método alternativo para estimar de manera confiable parámetros importantes y específicos (como la relación conductividad hidráulica y retención de humedad), usando datos básicos de levantamiento de suelos tales como textura, contenido de materia orgánica y densidad aparente (de las bases de datos); estos parámetros son usados en modelos de simulación que permiten cuantificar el crecimiento de las plantas o para el estudio de los efectos del cambio climático (Bouma, 2010).

Los beneficios de las funciones se basan en la capacidad que tienen para estimar una propiedad o característica del suelo, que es compleja, costosa o demorada de medir, con base en otras que son más sencillas y económicas además pueden ser usadas en la valoración de la calidad del suelo (Pierce y Larson, 1993., citados por Doran & Parkin, 1994). Los autores citados anteriormente, proponen que un set de datos mínimo (MDS, por sus siglas en inglés) y funciones de pedotransferencia pueden servir de base para los estudios en el acercamiento a la identificación de los cambios generados en la dinámica de los componentes de la calidad del suelo, además de la estandarización de las metodologías y los procedimientos para la toma de los datos; este acercamiento depende de la validez de los datos de entrada y los modelos de simulación y servirá para diseñar sistemas de manejo del suelo que sean sostenibles. La elección de los atributos del suelo para incluir en el MDS, estarán dictados de acuerdo a la necesidad y tienen características como (Doran & Parkin, 1994):

- Atributos sensibles al manejo y cualquier cambio que pueda ser detectado en un tiempo relativamente corto
- Atributos para cada una de las metodologías de medición o del set de datos que son accesibles para más personas
- Atributos para cada función de pedotransferencia

Las funciones de pedotransferencia se han planteado en diferentes ámbitos, siendo mayormente aplicadas para la estimación de parámetros hidráulicos del suelo como la curva de retención de humedad (Sobieraj y otros, 2001., citados por Coronado & Medina, 2009), la infiltración (Landini y otros, 2007), también para la predicción de

características no hidráulicas (Breeuwsma, Wosten, & Vleeshouwer, 1986., y Janssen y otros, 1990); sin embargo, algunos autores plantean que su eficacia se rige a la localidad o al suelo sobre el cual se desarrolló la función (Moreira et al., 2004. citados por Landini, y otros, 2007), son además, el método indirecto más desarrollado y con mayor aplicabilidad para la estimación de las características hidráulicas del suelo (Porta, López-Acevedo, & Roquero, 2003). En Colombia se han desarrollado funciones de pedotransferencia con buenos resultados para el cálculo de la conductividad hidráulica en suelos del Valle de Cauca (Lozano, Madero, Tafur, Herrera, & Amézquita, 2006., e Hincapie, 2011), también se han usado para la estimación de la curva de retención de humedad y la conductividad hidráulica a través del software AquaCrop para los cultivos de arroz (FAO, 2013) y papa (FAO2, 2013) y se han propuesto de manera teórica como un método objetivo y preciso para la estimación de la friabilidad (Avila, 2017).

6. Materiales y métodos

6.1. Descripción del lugar

Se seleccionaron dos áreas de la unidad experimental de la Universidad los Llanos, ubicada en la vereda Barcelona (4.072142N, -72.48725W), municipio de Villavicencio en el departamento del Meta, los suelos con una consociación de Typic Hapludox (IGAC, 2014). El área uno correspondió al jardín clonal de cacao (*Theobroma cacao*) que se encuentra en sistema agroforestal (SAF) con yopo (*Anadenanthera peregrina*) y acacia (*Acacia mangium*), el área experimental dos fue un lote que su uso histórico ha sido la siembra de cultivos semestrales y que ha tenido un manejo de tipo convencional.

6.2. Diseño de muestreo

Inicialmente se midieron las dos áreas seleccionadas con un GPS submétrico, la información obtenida del GPS se exportó al software de licencia libre QGIS versión 2.14 (QGIS Development Team, 2009), usando la herramienta de investigación se diseñó el modelo de muestreo, que consistió en una cuadrícula de 17 x 17 m, totalizando 24 puntos por área de estudio, la georreferenciación de cada uno de los 24 puntos de muestreo se pasó al GPS con la finalidad de ubicarlos en campo, y en este lugar tomar las muestras disturbadas y no disturbadas que se analizaron en el laboratorio. Las muestras disturbadas se tomaron con barreno de punta holandesa y las muestras no disturbadas con barreno tipo up-land.

6.3. Variables evaluadas en el suelo

Las variables son propiedades físicas y químicas estimadas o calculadas de acuerdo a las metodologías consignadas en el libro métodos analíticos de laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006); y pueden dividirse en dos grupos, las determinadas mediante métodos directos (D) y la determinadas por métodos indirectos (I) (tabla 2), en esta tabla también se encuentran las fórmulas

usadas en los métodos indirectos. El valor de Densidad real (Dr) que se usó fue 2,55 gr/cm³ puesto que es el promedio de los reportados para suelos del piedemonte llanero usados en cultivos transitorios y para plantación forestal (González-Nivia, 2014). Para el cálculo de la conductividad hidráulica a saturación (Ksat) se usó el software *Calculador de propiedades hidráulicas* desarrollado por Laboratorios Dr. Calderón (Calderón, 2002) para suelos minerales o de bajo contenido de materia orgánica (MO), que se basa en el porcentaje de arena (A) y arcilla (Ar) para la estimación de 6 propiedades (entre ellas la Ksat). La resistencia a la penetración (RP) se midió con un penetrómetro *EIJKELKAMP*. La microporosidad (MiP) se determinó por el método de “la centrífuga” propuesto por Olarte y otros (1979., citado por Jaramillo, 2002). Los pH en agua y KCl se midieron en relación 1:1 y la diferencia de estos dos fue el delta pH (Δ -pH). Con los resultados obtenidos en el laboratorio se creó una base de datos (set de datos) como insumo para determinar la ecuación de pedotransferencia.

Tabla 2. Método y tipo de método para la estimación de las propiedades físicas y químicas a evaluar

Propiedad	Unidad	Método	Tipo	Formula
Densidad aparente	gr/cm ³	Cilindro	D	
Densidad real	gr/cm ³	Picnómetro	D	
Porosidad total	%	Matemático	I	$1-(D_a/D_r)*100$
Textura	%	Bouyoucos	D	
Conductividad hidráulica saturada	cm/hr	Dr. Calderón Labs	I	% Ar y A
Resistencia a la penetración	MPa	Penetrómetro	D	
Capacidad de campo y punto de marchitez permanente	%	Olla de tensión Schultz	D	
Microporosidad	%	Centrífuga	D	
Materia orgánica	%	Walkley y Black	D	
pH en H ₂ O y KCl	[H ⁺]	Potenciómetro	D	
Δ -pH		Matemático	I	pH KCl - pH agua
Fosforo	ppm	Bray II	D	

Fuente: El autor. D: Directo, I: Indirecto. Da: Densidad aparente, Dr: Densidad real, Ar: Arcilla, A: Arena

Para observar las diferencias entre las propiedades de los dos lotes y determinar efectos del manejo, se realizaron análisis de estadística descriptiva y de varianza con el estadígrafo SNK al 95 % de probabilidad ($p < 0,05$)

6.4. Obtención de la función de pedotransferencia

Se realizó una función de pedotransferencia de tipo continua (Schaap, 1998., citado en Coronado y Medina, 2009) usando el método de las regresiones múltiples lineales (Alves, Ruiz, y Crusoé, 2011., Baker y Ellison, 2007., citados en Coronado y Medina, 2009) calculadas por el procedimiento de los mínimos cuadrados, usando como variable dependiente la microporosidad del suelo y como variables regresoras las propiedades físicas y químicas evaluadas en el laboratorio; mediante el análisis de varianza (ANAVA-estadígrafo de F) se determinó la significancia de cada uno de los términos de la función, el R^2 fue usado como índice de predicción de las funciones de pedotransferencia (de la Rosa, 2008) y se descartaron las funciones con los R^2 más bajos. Cuando alguno de los términos no fue significativo, se usó el método gráfico en el que se pudo observar el comportamiento de los residuos parciales de las variables dependientes y de la variable respuesta (microporosidad), con la finalidad de observar alguna tendencia en la variable regresora evaluada. Los ajustes en el modelo matemático y el análisis del diagrama de dispersión fueron parte de la comprobación final, que consistió en determinar la ausencia de tendencia de las variables regresoras en función de los residuos estudentizados de la variable dependiente (microporosidad), todo esto con auxilio del paquete estadístico Infostat (Di Rienzo y otros, 2016).

Ya que la cantidad de muestras analizadas en el laboratorio no fue igual para todas las propiedades, los espacios vacíos del set de datos fueron completados con la media obtenida para cada variable en su respectivo lote; luego de despreciar valores atípicos mediante un gráfico de cajas o “box plot”, esta última herramienta es propuesta para el procesamiento de grandes volúmenes de datos (Erazo & Sandoval, 2015). Lo

anterior con motivo de fortalecer el set de datos ($n = 24$ en toda las variables) y dar mayor veracidad a la información obtenida del análisis de correlación de Pearson y de las regresiones lineales.

Para el análisis de correlación de Pearson se omitieron las relaciones de variables guardan correlación desde su obtención, es decir, las variables que sirvieron como parámetro para el cálculo de otra como el caso del % de Carbono orgánico (CO) y la materia orgánica (MO); y la densidad aparente (Da) y la porosidad total (Pt) entre otras.

7. Resultados y Discusión

7.1. Efecto del manejo sobre las propiedades del suelo

La textura de los dos lotes fue la misma según el triángulo de texturas (FArA), pero según el ANAVA (tabla 3) mostró diferencias significativas en el contenido de arcillas (Ar) y de limo (L); en cuanto a la textura, y en la capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP) y la conductividad hidráulica saturada (Ksat); propiedades relacionadas con la dinámica del agua. En el lote de cacao se obtuvieron valores mayores de Ar y CC y menores de PMP, esto indica una mayor capacidad de este lote para almacenar agua de tipo aprovechable para las plantas (FitzPatrick, 1996); capacidad que puede estar muy influenciada por la mayor cantidad de arcillas puesto que generan una mayor superficie coloidal y por tanto mayor retención de agua, es decir que un suelo arcilloso puede retener una mayor cantidad de agua útil que uno arenoso (Valenzuela & Torrente, 2010) y se han encontrado casos donde el mismo volumen de precipitación alcanza para llevar un suelo arenoso hasta la CC pero no para uno arcilloso (FitzPatrick, 1996); por otro lado, la labranza aplicada al lote de semestrales puede estar generando efectos negativos en la conservación del agua porque esta es una de las funciones de la labranza (Gill y Vanden Berg, 1967, citados en Amézquita, 2013., Hillel y otros, 1969) y las prácticas inadecuadas de preparación del suelo generan pérdida en la capacidad de retención de humedad (Aguilar y Aguilar, 2002) y en la distribución y estabilidad del sistema poroso (Amézquita, 2013). El

rompimiento continuo de los agregados del suelo por la labranza en exceso (Valenzuela & Torrente, 2010) en el lote de semestrales y las altas precipitaciones de la zona (Bernal, Peña, Díaz, & Obando, 2013) generan procesos de argiluvación (lixiviación de arcillas) ya que las arcillas, desde la dispersión, quedan suspendidas en el agua del suelo y pueden descender por efecto de la gravedad hasta las paredes de poros más secos con posibilidad de llenarlos (Madero Morales, 2010) y formar capas endurecidas por sedimentación como un claypan (Jaramillo, 2002), o acumularse en ciertos puntos por influencia del microrelieve; además, en el lote en mención los coloides tienen una mayor susceptibilidad y tendencia a la dispersión (o descoagulación) por efecto del pH (mayor pero sin diferencia significativa) y la temperatura (se supone mayor por falta de cobertura) puesto que a mayor pH, mayor susceptibilidad a la dispersión y a mayor temperatura, mayor tendencia a descoagularse, a esto se puede sumar que el ΔpH fue mayor con diferencias significativas y las cargas negativas libres influyen en la dispersión (Madero Morales, 2010). La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) fue moderadamente alta en ambos lotes (SSDS, 1993., citado en Jaramillo, 2002) pero presentó diferencias significativas siendo mayor en el lote de semestrales, indicando que en este lote el agua se mueve con mayor facilidad cuando el suelo está saturado; esto difiere con lo mencionado por Jaramillo (2002) "A mayor tamaño de poros, mayor es la conductividad", si se tiene en cuenta que la macroporosidad (MaP) fue más alta en el lote de cacao. Este mismo autor afirma que la K_{sat} depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas. Según Stormont (1995 citado en Dorner y Dec, 2007) el sobrelaboreo puede generar vías preferenciales para el flujo de agua y/o aire (flujo entre laminas y no a través de ellas), estos últimos autores encontraron que además de los cambios estructurales, ocurre un aumento de la K_{sat} vertical mientras disminuye la horizontal en un suelo liviano con sucesivo laboreo; fenómeno que puede estar ocurriendo en el lote de semestrales.

Tabla 3. Estadística descriptiva y análisis de varianza (SNK $p=0,05$) de diferentes propiedades del suelo para dos lotes con diferente manejo.

Propiedad	Lote	n	Media	E..E	C.V	Mín.	Máx.	p-valor
Da	Ca.	24	1,30 ± 0,12 a	0,02	8,87	1,06	1,55	0,2668
	Se.	24	1,33 ± 0,09 a	0,02	7,10	1,15	1,52	
RP	Ca.	24	1,37 ± 0,36 a	0,07	26,42	0,48	1,94	0,1781
	Se.	24	1,49 ± 0,18 a	0,04	12,18	1,08	1,78	
A	Ca.	24	50,04 ± 5,21 a	1,06	10,42	37,30	68,40	0,3207
	Se.	24	51,17 ± 1,72 a	0,35	3,35	48,00	54,00	
L	Ca.	24	25,33 ± 6,32 a	1,29	24,95	8,30	41,40	0,0435
	Se.	24	28,17 ± 2,24 b	0,46	7,96	24,00	34,00	
Ar	Ca.	24	24,63 ± 1,99 a	0,41	8,06	19,30	29,30	<0,0001
	Se.	24	20,67 ± 2,66 b	0,54	12,87	12,00	26,00	
Ksat	Ca.	24	0,42 ± 0,04 a	0,01	8,84	0,29	0,47	<0,0001
	Se.	24	0,70 ± 0,13 b	0,03	18,28	0,42	0,99	
%Pt	Ca.	24	48,94 ± 4,42 a	0,90	9,04	30,90	58,41	0,1566
	Se.	24	50,80 ± 4,50 a	0,92	8,86	43,36	63,21	
%MiP	Ca.	24	27,93 ± 3,95 a	0,81	14,14	21,94	36,28	<0,0001
	Se.	24	35,38 ± 3,17 b	0,65	8,96	29,86	46,36	
%MaP	Ca.	24	20,53 ± 4,30 a	0,88	20,93	10,74	31,82	0,0001
	Se.	24	16,31 ± 1,85 b	0,38	11,35	11,62	19,99	
CC	Ca.	24	31,61 ± 1,49 a	0,30	4,71	26,43	34,12	<0,0001
	Se.	24	25,31 ± 1,22 b	0,25	4,80	22,88	28,44	
PMP	Ca.	24	12,91 ± 1,60 a	0,33	12,37	10,30	16,67	<0,0001
	Se.	24	16,89 ± 0,52 b	0,11	3,06	15,19	18,34	
%MO	Ca.	24	3,34 ± 0,34 a	0,07	0,18	2,53	4,24	0,1859
	Se.	24	3,47 ± 0,33 a	0,07	9,43	2,79	4,19	
%CO	Ca.	24	1,94 ± 0,20 a	0,04	0,18	1,47	2,46	0,1854
	Se.	24	2,01 ± 0,19 a	0,04	9,43	1,62	2,43	
P	Ca.	24	46,77 ± 17,61 a	3,60	37,66	10,60	97,20	0,0031
	Se.	24	35,35 ± 3,25 b	0,66	9,18	29,00	46,32	
pH H ₂ O	Ca.	24	4,03 ± 0,31 a	0,06	7,79	3,49	5,12	0,1581
	Se.	24	4,13 ± 0,06 a	0,01	1,36	4,00	4,27	
pH KCl	Ca.	24	3,53 ± 0,14 a	0,03	4,09	3,24	3,92	0,1062
	Se.	24	3,59 ± 0,05 a	0,01	1,39	3,48	3,74	
Δ pH	Ca.	24	-0,37 ± 0,06 a	0,01	7,18	-0,49	-0,21	<0,0001

Se.	24	-0,49 ± 0,08 b	0,02	7,16	-0,67	-0,31
-----	----	----------------	------	------	-------	-------

Fuente: El autor. Ca: Lote de Cacao, Se: lote de semestrales, EE: Error estándar, CV: Coeficiente de variación. Letras diferentes indican diferencia significativa

La microporosidad (MiP) fue alta para los dos lotes si se consideran como valores óptimos los comprendidos entre 10 a 15% (Amézquita, 2013), con posibles problemas de drenaje y aireación (Jaramillo, 2002); pero fue mayor para el lote de semestrales con diferencia significativa (tabla 3). Un suelo con alta microporosidad puede tener también alta capacidad de retención y almacenamiento de agua (Hincapié, 2011) y si predominan los macroporos se presenta baja capacidad de almacenamiento de agua (Jaramillo, 2002) pero en este caso el lote de semestrales (que tiene mayor microporosidad) tiene menor capacidad de retener humedad y menor macroporosidad que el de cacao, esto indica que la porosidad del segundo puede estar comprendida en su mayoría por poros que retienen humedad aprovechable para las plantas (Kohnke, 1968., citado en Valenzuela y Torrente, 2010), que no se distinguen entre los porcentajes de micro y macroporos estimados en este trabajo; un valor óptimo de mesoporos es el comprendido entre 20 a 25% en los primeros 30 cm de profundidad (Amézquita, 2013). La mayor MiP del lote de semestrales puede ser un efecto de la inadecuada mecanización puesto que estas prácticas generan el incremento de la propiedad en mención (Montenegro y Malagon, 1990), con esto un desequilibrio de la distribución de poros y la reducción del agua disponible para la planta (Forero et al., 1998., citados en Baquero Peñuela, Aristizabal, Rendón , & Salamanca, 2001). La MaP mostró diferencia significativa (así como la MiP, debido a su método de estimación: $MaP = Pt - MiP$), siendo mayor en lote de cacao e indicando posibles problemas de exceso de drenaje (Amézquita, 2013., y Jaramillo, 2002); la menor MaP del lote de semestrales puede ser efecto de la producción agrícola intensiva, puesto que estos suelos tienden a reducir su porosidad (Narro, 1994), así como propiciar la formación de un “pie de arado” (Dorner & Dec, 2007), la porosidad total (Pt) no mostró diferencia significativa y el porcentaje de MiP fue mayor en el lote en mención. En términos de proporción de micro y macroporos, el lote de cacao posee una mejor condición puesto que la diferencia entre esos valores es menor que para el lote de semestrales (mayor

equilibrio entre macro y microporos). La Pt no presentó diferencias significativas pero la MiP y la MaP sí, esto demuestra la importancia de conocer la proporción de los poros para el estudio y valoración de ciertos procesos en el suelo como el flujo de agua y aire y la relación suelo-planta-atmósfera, similar al planteamiento de Hillel, (1998), quien propone que el valor de la Pt no dice nada sobre el tamaño y forma de la variedad de poros del suelo.

El contenido de fósforo (P) fue significativamente mayor para el lote de cacao (tabla 3), demostrando así uno de los servicios ambientales que ofrece un sistema agroforestal con árboles de leguminosas (en este caso *A. peregrina*), “el mantenimiento de la fertilidad del suelo” mediante el aumento del P disponible, el mantillo y los cationes intercambiables; además de favorecer al mantenimiento de las reservas totales de P, K, Ca y Mg en la biomasa (Szott y Palm, 1996., citados en Beer, y otros, 2003). Para el pH en agua (H₂O) y en KCl (KCl) no hubo diferencias significativas pero sí para el delta-pH (Δ pH), siendo de -0,37 y -0,49 para el lote de cacao y de semestrales respectivamente, con diferencias significativas; mostrando predominio de las cargas negativas para ambos lotes ya que H₂O > KCl (Galeano, 1990 citado en (Lara-Silva, 2010), también que la CIC > CIA y que en el lote de cacao hay mayor cercanía al punto isoeléctrico (igualdad de cargas positivas y negativas a cierto pH) y por ende una mayor cercanía a la coagulación, conglomeración y sedimentación de los coloides; además de tener una mayor retención de sales contra el lavado (Lara-Silva, 2010). La densidad aparente (Da) y la resistencia a la penetración (RP) no fueron diferentes significativamente pero fue mayor para las dos propiedades en el lote de semestrales (aun con menor contenido de Ar), con esto se puede decir que en este lote se tiene una tendencia a la compactación si se continúan con las mismas prácticas de manejo del suelo ya que la labranza inadecuada (en número de pases, humedad del suelo durante la labor, implemento) genera dicho fenómeno causando así aumento de la Da y la RP (Valenzuela & Torrente, 2010). El porcentaje de carbono orgánico (CO), así como el de materia orgánica (MO), tampoco tuvieron diferencia significativa, pero fue ligeramente mayor en el lote de semestrales a pesar de tener posiblemente una T° mayor por falta de cobertura en ciertos momentos, este resultado se debe quizá a las aplicaciones constantes de fertilizantes orgánicos, además, porque el tiempo que lleva

establecido el lote de cacao, el tipo de materiales orgánicos aportados así como una buena humedad no han permitido acumular una cantidad significativa de MO o CO en el suelo puesto que la mineralización se ve favorecida bajo esas condiciones (Jaramillo, 2002); se debe tener en cuenta que la tasa de mineralización en los suelos tropicales es mayor que la tasa de acumulación de MO (Baquero-Peñuela, Aristizabal, Rendón , & Salamanca, 2001).

7.2. Relaciones (Correlaciones) entre propiedades físicas y químicas del suelo

Las correlaciones más altas de la microporosidad (MiP) fueron (de mayor a menor) con la CC, el PMP, la Ksat, la Ar y el L (tabla 4); esto indica que la MiP posee una relación intrínseca con la capacidad del suelo para almacenar agua dentro del rango de la aprovechable para las plantas, es decir, del PMP a la CC (FitzPatrick, 1996), en sentido positivo con el PMP (Pearson = 0,64), negativo y mayor con la CC (Pearson = -0,70) y alta significancia ($p = <0,0001$); al igual que la macroporosidad (MaP) pero con correlaciones un poco más bajas, negativa para el PMP (Pearson = -0,51) y positiva para la CC (Pearson = 0,53), según lo anterior, valores bajos de MiP y altos de MaP pueden promover un rango de agua aprovechable más amplio. El agua del suelo está contenida dentro del sistema poroso y la facilidad para las raíces usarla, depende de la energía requerida para extraerla del suelo y llevarla al interior de la planta; cuando el poro es muy pequeño la energía requerida es alta (FitzPatrick, 1996), así, la alta MiP contribuye en un PMP alto (que puede traducirse en baja oferta de agua aprovechable en ese suelo) (tabla 4). La correlación existente entre la MiP y la CC y el PMP, se puede explicar por el uso de la humedad equivalente (He), parámetro usado en la ecuación para estimar la MiP, puesto que tiene relación con la capacidad de retención de humedad y las dos propiedades han sido relacionadas en una función de pedotransferencia donde He es la variable regresora (Montenegro y Malagón, 1990):

$$CC = 0,86He + 2,6$$

De acuerdo con Greenland (1977., citado en Honorato, 2000) el tamaño (diámetro cilíndrico equivalente) de los poros de almacenamiento varían entre los 0,5 y 50 μm , según (FitzPatrick, 1996), los poros que retienen el agua entre la CC (0,1 bar) y el PMP (15 bares) varían entre 10 μm y 300 nm y los poros medianos que retienen el agua están entre 10 a 0,2 μm , denominados también poros de agua útil – PAU (Dorner & Dec, 2007); y según Montenegro y Malagón (1990) los MiP corresponden al rango 0,2 a 0,9 μm . Lo anterior sugiere que los MiP de estos lotes pueden estar dentro de los 0,2 a 50 μm , con mayoría de 0,2 a 10 μm ; además, (Dorner & Dec, 2007) afirman que “La conductividad hidráulica saturada (Ksat) está mejor relacionada con la porosidad efectiva (Pe)” y esta última es la suma de los volúmenes de poros de drenaje lento (PDL) y los de drenaje rápido (PDR) con diámetros de 50 a 10 μm y $> 50 \mu\text{m}$, respectivamente, entonces; la MiP está siendo influenciada además por poros de drenaje que no se distinguen de las porosidades estimadas (MiP x Ksat, Pearson = 0,59), al igual que la MaP pero con una correlación menor y negativa (MaP x Ksat, Pearson = -0,45); haciendo importante la distinción más detallada del tipo de porosidad de acuerdo a su funcionalidad y/o tamaño para el estudio del sistema poroso y los procesos que involucra. La correlación de la MiP con el L y la Ar surge de la relación que tienen la textura y la microporosidad que es también denominada porosidad textural (Jaramillo, 2002), pero, puesto que la estructura y la actividad biológica también generan una fuerte influencia sobre la porosidad (Valenzuela & Torrente, 2010), el uso de estas propiedades podría favorecer la correlación de la MiP. La Ar tuvo una correlación negativa y más alta que el L, indicando que entre mayor sea el contenido de Ar, menor puede ser la MiP

Tabla 4. Correlación de Pearson entre variables estudiadas que mostraron significancia

Variables	Pearson	p-Valor
MiP x Ar	-0,53	0,0001***
MiP x L	0,38	0,0078***
MiP x Ksat	0,59	<0,0001***
MiP x CC	-0,70	<0,0001***
MiP x PMP	0,64	<0,0001***
MaP x Ksat	-0,45	0,0013***

MaP x CC	0,53	0,0001***
MaP x PMP	-0,51	0,0002***
PMP x CC	-0,76	<0,0001***
PMP x Ksat	0,70	<0,0001***
Ksat x CC	-0,81	<0,0001***
PMP x Ar	-0,48	0,0006***
CC x Ar	0,70	<0,0001***
CC x L	-0,40	0,0047***
CC x P	0,37	0,0093***
P x H2O	0,45	0,0013***
Da x CO	-0,51	0,0002***
H2O x KCl	0,57	<0,0001***
MaP x ΔpH	0,37	0,0089***
MiP x ΔpH	-0,48	0,0006***
CC x ΔpH	0,61	<0,0001***
PMP x ΔpH	-0,62	<0,0001***
Ksat x ΔpH	-0,62	<0,0001***
Ar x ΔpH	0,58	<0,0001***
L x ΔpH	-0,35	0,0133**

Fuente: El autor. H2O: pH en H2O, KCl: pH en KCl. p = 0,01*** (Altamente significativo) y p = 0,05** (Significativo).

Las correlaciones más altas encontradas (sin contar la MiP) fueron para Ksat x CC, PMP x CC, PMP x Ksat, y CC x Ar con valores de Pearson -0.81, -0,76, 0,70 y 0,70 respectivamente. La CC y el Ksat tienen una correlación que surge de la relación existente entre CC y Ar, ya que para el cálculo del Ksat se usó la Ar, pero es negativa para el Ksat y positiva para la Ar de lo que se puede inferir que la Ar contribuye significativamente con la retención de humedad a CC, pero con disminución del Ksat, que puede significar en mayor susceptibilidad al encharcamiento en el lote de cacao por el lento movimiento del agua en las Ar (FitzPatrick, 1996) y la baja velocidad del agua cuando el suelo se encuentre saturado (tabla 3); lo anterior estaría en contradicción con lo expuesto por (Madero Morales, 2010) quien menciona que una de las arcillas que predominan en el piedemonte llanero (Kanditas 1:1), dificultan la retención de humedad la cual empeora con el aumento del contenido, pero los óxidos y sesquióxidos de Fe y Al recubiertos de Kanditas (otras Ar que predominan) son estructuras relativamente más estables al agua. El PMP puede aumentar al mismo

tiempo que el Ksat ya que tienen una correlación positiva. La CC y el PMP tienen una correlación de Pearson de -0,76, esto puede ser efecto de la naturaleza de su obtención, son propiedades que se estimaron bajo un concepto similar (contenido de humedad en un suelo después de aplicar X presión de succión, 0,1 o 15 bares respectivamente).

La relación observada entre la Da y el CO (también con MO), ya ha sido reportada anteriormente; por ejemplo De Vos y otros, 2005., y Heuscher y otros, 2005 citados en Rubio, 2010) han comprobado que la MO y el contenido de C orgánico son parámetros de importancia en la predicción de la Da, usando funciones de pedotransferencia en suelos forestales y diferentes tipos de suelos de Estados Unidos; Rubio (2010) concluyó que la MO tiene una relación altamente significativa y negativa con la Da superficial en suelos forestales de España, similar al resultado mostrado en la tabla 4 para Da x CO (Pearson = -0,51).

El ΔpH tuvo correlación (de mayor a menor) con PMP, Ksat, CC, Ar, MiP, MaP y L, coincidiendo los valores de Pearson y significancia más altos para propiedades que se relacionan con el movimiento del agua en el suelo (PMP, Ksat, CC) lo que aparenta una influencia de las cargas eléctricas (iones) predominantes sobre la retención y movimiento del agua, así como sobre algunas propiedades físicas (Ar, L y MiP).

Las relaciones planteadas por algunos autores entre el sistema poroso y la Da densidad aparente (Olarte y otros, 1997., citados por Jaramillo, 2002), la porosidad total (Reyes, 2014., Honorato, 2000) y la resistencia a la penetración (Reyes, 2014); no se observaron en este análisis.

Las correlaciones de Pearson demuestran muchas de las interacciones que han sido reportadas entre diferentes propiedades del suelo, esto permite corroborar o confrontar dicha información y reconocer las interacciones más significativas para un tipo de suelo; las correlaciones no mencionadas en la literatura pueden ser efecto de procesos y dinámicas propias de cada área de estudio.

7.3. Funciones de pedotransferencia para microporosidad y otras propiedades del suelo

Las regresiones lineales simples (RLS) con modelo polinómico (función polinomial) de primer orden fueron las más usadas porque permitieron obtener funciones con niveles de significancia y poder de predicción mayor a las regresiones lineales múltiples (RLM) y los modelos polinómicos de 2do u orden mayor, con excepciones en la función 2 (RLM de primer orden) y las funciones 4, 5 y 10 (RLS de 2do u orden mayor) como se muestra en la tabla 5; donde se relacionan en total 7 propiedades (MiP, CC, PMP, Ar, Ksat, KCl y H₂O) en 14 funciones que tienen p-valor <0,0001 en el modelo. La MiP se propuso como variable dependiente para 5 funciones donde CC, PMP, Ar, Ksat y Ksat² fueron las variables regresoras, con valores para R² de 0,49, 0,41, 0,36, 0,35 y 0,43 respectivamente, todas con alta significancia (p-Valor <0,0001); el mayor poder predictivo de la CC (función 1) puede ser efecto del uso de la humedad equivalente (He) como se mencionó anteriormente, pero su eficacia es baja si se tiene en cuenta que el valor de R² (0,49) indica que el poder predictivo está por debajo del 50%, es decir, que un poco más de la mitad de los datos predichos estarían lejos de los reales. Los mismos valores de R², p-Valor y CP Mallows se obtienen cuando la regresión lineal simple (RLS) se hace cambiando de “rol” a las variables, es decir, dependiente por independiente y viceversa; así, la CC se puede estimar a partir de la MiP [(CC (MiP))], con las mismas capacidades predictivas que en el caso contrario [MiP (CC)] usando las funciones 1 y 1' (tabla 5). Lo anterior es un reflejo de la relación existente entre la MiP con la CC y el PMP (Rucks, Garcia, Kaplán, Ponde de León, & Hill, 2004) e indicio del potencial que tienen las funciones de pedotransferencia como herramienta para complementar bases de datos de una manera indirecta y de bajo costo (Souza, y otros, 2016). Cuando el PMP es la variable regresora (función número 3) el R² (0,41) es menor que usando la CC, haciendo menos acertadas las predicciones con dicha función pero ratificando la relación entre el sistema poroso y la capacidad de retención de agua del suelo; ya otros autores han relacionado (en funciones de pedotransferencia) la retención de humedad y la conductividad hidráulica con la textura, la porosidad y la densidad aparente (Minasny y McBratney, 2002., citados en Coronado

y Medina, 2009). La CC y el PMP son de importancia para el estudio de los suelos porque también pueden funcionar como indicadores de calidad del suelo en Oxisoles del piedemonte llanero (Jamioy, 2011).

Tabla 5. Funciones de pedotransferencia obtenidas, R^2 y significancia del modelo, CP Mallows y significancia de variable regresora, poder de predicción.

Número	Función	R^2	p – Valor	CP Mallows
1	$MiP^{***} = 61,39^{***} - 1,04CC^{***}$	0,49	<0,0001	43,87
1'	$CC^{***} = 43,23^{***} - 0,47MiP^{***}$	0,49	<0,0001	43,87
2	$CC^{***} = 26,31^{***} - 0,30MiP^{***} + 0,52Ar^{***}$	0,64	<0,0001	20,51 21,06
3	$MiP^{***} = 10,48^{***} + 1,42 PMP^{***}$	0,41	<0,0001	32,38
3'	$PMP^{***} = 5,76^{***} + 0,29 MiP^{***}$	0,41	<0,0001	32,38
4	$MiP^{***} = 10,08 + 3,04Ar^{***} - 0,09Ar^2^{**}$	0,36	0,0001	5,22 7,44
5	$MiP^{***} = 3,72 + 82,18 Ksat^{***} - 52,72 Ksat^2^{**}$	0,43	<0,0001	12,82 8,72
5'	$MiP^{***} = 21,60^{***} + 18,06 Ksat^{***}$	0,35	<0,0001	25,16
6	$PMP^{***} = 29,46^{***} - 0,51 CC^{***}$	0,57	<0,0001	61,89
6'	$CC^{***} = 45,21^{***} - 1,12 PMP^{***}$	0,57	<0,0001	61,89
7	$PMP^{***} = 9,54^{***} + 9,63 Ksat^{***}$	0,49	<0,0001	44,00
8	$CC^{***} = 37,66^{***} - 16,53 Ksat^{***}$	0,65	<0,0001	86,29
9	$CC^{***} = 10,57^{***} + 0,79 Ar^{***}$	0,49	<0,0001	44,64
10	$KCI^{***} = -3,76^{***} + 3,23 H2O^{***} - 0,35 H2O^2^{***}$	0,58	<0,0001	34,21 29,16

Fuente: El autor. p = 0,05** (Significativo) y p = 0,01*** (Altamente significativo).

Para el Ksat, el polinomio de 2do orden tuvo un R^2 mayor que el de 1er orden, al igual que con la Ar pero con p-valor = 0,05 para $Ksat^2$ y Ar^2 (nótese los dos asteriscos en las variables de las funciones 4 y 5 de la tabla 5) y menor CP Mallows. Los modelos matemáticos cuadráticos se suelen emplear para explicar patrones presentes en la naturaleza.

Las funciones con los valores de R^2 más altos fueron (de mayor a menor) las número 8, 2, 10, 6 y 6', donde 8, 2 y 6' además de tener los mayores R^2 , tienen a la

CC como variable dependiente, la función 10 al KCl (pH en KCl) y la función 6 al PMP. La función con mayor poder de predicción ($R^2 = 0,65$) fue la número 8, mostrando el potencial que tiene para estimar la CC usando el Ksat; pero la función 2, con MiP y Ar como regresoras (RLM), se asemeja bastante puesto que tuvo un R^2 muy similar (0,64); las funciones 6 y 6' relacionan CC y PMP como variables dependientes y regresoras, con un R^2 de 0,57. La función 10 permite predecir los valores de KCl a partir del pH en agua (H_2O) con una predicción del 58% ($R^2 = 0,58$), a pesar de esta ser una función polinomial de 2do orden, el p-valor de H_2O^2 y el CP Mallows no se redujeron como ocurrió en el caso de Ksat y Ar. Los valores de R^2 se asemejan al reportado por Rubio (2010) de 0,6, quien menciona que este valor representa una “bondad de ajuste moderada”.

La correlación entre valores predichos y valores del set de datos inicial (“reales”) (tabla 6) permitió identificar la función 5 (MiP en función de Ksat y $Ksat^2$) como la más acertada (Pearson = 0,66) para estimar la MiP basada en el método de “la centrifuga” propuesto por Olarte y otros (1987., citado en Jaramillo, 2002), debido posiblemente a que el movimiento del agua está determinado en gran parte por el tamaño y forma de los poros (Amézquita, 2013); los valores predichos con las funciones 1 y 3 (Pearson = 0,65 y 0,64, respectivamente) tienen una certeza similar. Las funciones 5 y 5' evidenciaron que algunas veces el modelo polinómico de 2do orden le confiere un mayor poder de predicción a la función, que el de 1er orden. Las variables Ksat, CC y PMP, generaron las predicciones más altas para la MiP; pero una correlación mayor se podría obtener si la medición de los poros es más detallada, por ejemplo que permita diferenciarlos entre micro, meso y macroporos (inclusive en términos intermedios) para identificar qué tipo de poro estaría más influenciado y correlacionado con la CC y/o PMP, puesto que el tamaño de los poros se puede asociar con su fuerza para retener el agua (Valenzuela & Torrente, 2010).

Tabla 6. Correlación de Pearson entre los valores predichos usando las funciones de la tabla 5 y los valores del set de datos inicial.

Número	Función – Esquema/Resumida	Pearson	p – Valor
1	MiP (CC)	0,65	<0,0001
3	MiP (PMP)	0,64	<0,0001
4	MiP (Ar, Ar ²)	0,60	<0,0001
5	MiP (Ksat, Ksat ²)	0,66	<0,0001
5'	MiP (Ksat)	0,59	<0,0001
2	CC (MiP , Ar)	0,76	<0,0001
1'	CC (MiP)	0,65	<0,0001
6'	CC (PMP)	0,67	<0,0001
8	CC (Ksat)	0,77	<0,0001
9	CC (Ar)	0,67	<0,0001
3'	PMP (MiP)	0,64	<0,0001
6	PMP (CC)	0,67	<0,0001
7	PMP (Ksat)	0,70	<0,0001
10	KCI (H ₂ O, H ₂ O ²)	0,76	<0,0001

Fuente: El autor. Entre paréntesis la variable independiente.

Los valores predichos que más se acercaron a la máxima correlación (Pearson = 1,00) fueron los estimados con las funciones 8, 2 y 10, con valores de Pearson de 0,77, 0,76 y 0,76 respectivamente; las funciones 8 y 2 permiten estimar la CC usando MiP y Ar, pero la número 8 posee mayor poder de predicción además de incurrir en menor costo económico por el uso de una sola variable, el Ksat, que se estimó de forma indirecta usando la textura por Bouyucos, concordando con los datos obtenidos por (Alves, Ruiz, & Crusoé, 2011); con el Ksat también se puede estimar el PMP (función 7) pero con menor precisión en la predicción (Pearson = 0,70). Esto evidencia la viabilidad que tienen las funciones de pedotransferencia para estimar parámetros hidráulicos en los suelos evaluados, con base en la textura; pero, de acuerdo con Tomasella y otros (2000., citados en Coronado y Medina, 2009) la inclusión de la distribución del tamaño de agregados permite estimar de manera certera la curva de retención de humedad, puesto que las propiedades usadas tradicionalmente (textura,

Da y MO) no describen la totalidad de los procesos, la porosidad efectiva también ha sido mencionada como posible (Coronado y Medina, 2009).

La función 10 usa H₂O (pH en agua) para estimar el KCl (pH en KCl), esto disminuye costos cuando se tiene por objetivo conocer el valor de Δ pH y el estudio del punto de carga cero. La mayoría de estas funciones, a pesar de tener un R² que es relativamente bajo si se comparan con algunos de los reportados para otros trabajos como en Alves, Ruiz, y Crusoé (2011) con R² >0,90 y Rubio (2010) con R² de 0,6, la correlación entre los valores predichos con los “reales” (tabla 6) es alta, haciendo de esta una herramienta que sirve para diagnosticar el poder de predicción de la función.

8. Conclusiones

El uso y manejo del suelo, incluida con alta influencia las técnicas de labranza, generan cambios en las propiedades relacionadas con las dinámicas del agua como la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y la conductividad hidráulica saturada, así como en propiedades físicas que influyen en dichas dinámicas como el contenido de limo y arcilla y la microporosidad, inclusive en propiedades químicas como el fósforo y el equilibrio de las cargas (Δ pH).

El estudio de las correlaciones existentes entre diferentes propiedades o incluso procesos del suelo, permite identificar interacciones planteadas por otros autores e inferir posibles influencias no mencionadas que pueden ser intrínsecas de cada tipo de suelo. .

La técnica empleada para la obtención de las funciones, permitió inferir una ecuación o relación que estima la microporosidad con niveles moderados, usando como variable regresora la capacidad de campo; el uso de más propiedades, el aumento del número de datos y una mayor rigurosidad en los procedimientos de toma de muestras y análisis de laboratorio permitiría aumentar los niveles o poder de predicción.

La estimación de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) mediante funciones de pedotransferencia es una técnica que se puede extrapolar a las áreas evaluadas, ya sea para el análisis de la propiedad en concreto (CC o PMP) o para completar bases de datos; teniendo en cuenta el uso de propiedades muy relacionadas con la complejidad propia de cada tipo de suelo.

El Δ pH (Δ pH) es una propiedad que muestra relación con algunos procesos físicos y químicos del suelo, la estimación puede hacerse a partir del pH medido en H₂O y con funciones de pedotransferencia haciendo más económica la estimación de dicha propiedad.

9. Bibliografía

- Aguilar-Duarte, Y., Cano-González, A., Ramírez-Silva, J., & Bautista-Zúñiga, F. (2015). Funciones de pedotransferencia para estimar índices de calidad en suelos agrícolas de zonas kársticas. *Memorias del XL Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo 2015, Año internacional de los suelos: Crear conciencia en la sociedad para el manejo sostenible del suelo* (págs. 623-977). México: Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo.
- Aguilar, S. y Aguilar, N. 2002. Sistemas de labranza de conservación con implementos de tracción animal para el piedemonte casanareño. Boletín técnico n° 27. Corpoica – Pronnata. Colombia.
- Alves, R. B., Ruiz, H., & Crusoé, G. (2011). Funções de pedotransferência para a estimativa da capacidade de campo e ponto de murcha permanente em solos. *XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA: Novos Caminhos para Agricultura Conservacionista no Brasil* (págs. 1-4). Universidade Federal de Viçosa (UFV).
- Amézquita, E. (2013). Propiedades físicas de los suelos de los llanos orientales y sus requerimientos de labranza. En E. Amézquita, I. Rao, M. Rivera, I. Corrales, & J. Bernal, *Sistemas agropastoriles: Un enfoque integrado para el manejo sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia* (págs. 29-53). Colombia, Colombia: CIAT - CORPOICA - MADR.
- Avila, E. (2017). Friabilidad del suelo: métodos de estimación con énfasis en la determinación cuantitativa de la resistencia al rompimiento. *Investigación agraria y ambiental*, 8(1).
- Baker, L., & Ellison, D. (2007). Optimization of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*, 108: 277-285.
- Baquero-Peñuela, J. E., Aristizabal, D., Rendón, W., & Salamanca, C. (2001). Manejo conservacionista de los suelos arroceros de la Orinoquia Colombiana. *Manejo conservacionista de los suelos arroceros de la Orinoquia Colombiana*(32), 1. Bogotá, Colombia: CORPOICA - PRONNATA.

- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 10(37-28), 80-87.
- Bernal, J. H., Peña, A. J., Díaz, N. C., & Obando, D. (2013). Condiciones Climáticas de la Altillanura Plana Colombiana en el Contexto de Cambio Climático. En E. Amézquita, I. Rao, M. Rivera, I. Corrales, & J. H. Bernal, *Sistemas Agropastoriles: Un Enfoque Integrado para el Manejo Sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia* (págs. 14-28). Colombia: CIAT-CORPOICA-MADR.
- Bouma, J. (2010). Functional characterization of soil structure field descriptions. *19th World Congress of Soil Science, soil solutions for a changing world*. Australia.
- Breeuwsma, A., Wosten, J., & Vleeshouwer, J. (1986). Derivation of land qualities to assess environmental problems from surveys. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 186-190.
- Calderón, F. (2002). *Dr. Calderón Labs*. Recuperado el 12 de 05 de 2017, de Métodos de análisis: Calculador Textural:
<http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/AnalisisFísicodeSuelos/Calculador%20Textural.htm>
- Calderón, M., Real, M., Cornejo, J., & Hermosín, M. (2011). *Comportamiento de oxifluorfen en dos suelos andaluces dedicados al cultivo del olivar: estudio de laboratorio*. España: Fundación del Olivar.
- Casanova, M., Seguel, O., Messing, I., Luzio, W., & Vera, W. (2003). FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LADERAS DE SECANO. *R.C. Suelo Nutr. Veg.*, 3(2), 42-48.
- Coronado, J., & Medina, H. (2009). Una revisión sobre las funciones de pedotransferencia en la determinación de las propiedades hidráulicas de suelo. (U. A. Pérez, Ed.) *Ciencias técnicas agropecuarias*, 18(3), 59-62.
- Criollo, R. (2011). *Evaluación de la formulación que determina la porosidad basada en parámetros obtenidos de ensayos hechos con Porosímetro de Mercurio, Ensayo de Permeabilidad con Gradiente Controlado en Célula Triaxial y Microscopio*

- Electrónico de Barrido. (708-TES-EG-570. Universidad de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de ingeniería, España.*
- de la Rosa, D. (2008). *Evaluación agro-ecológica de los suelos para un desarrollo rural sostenible*. España: CSIC - CSIC Press.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. (2016). *InfoStat*, 2016. (Universidad Nacional de Córdoba -Argentina) Recuperado el 02 de 07 de 2017, de Grupo InfoStat: <http://www.infostat.com.ar>
- Doran, J. y Parkin, T. (1994). *Defining soil quality for a sustainable environment: cap 1. Defining and assessing soil quality*. (A. S. Agronomy, Ed.) USA: Society Science Soil of America.
- Dorner, J., & Dec, D. (2007). LA PERMEABILIDAD DEL AIRE Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA COMO HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LOS POROS DEL SUELO. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(2), (1-13).
- Ellies, A., Ramírez, C., & Mac Donald, R. (1993). Cambios en la porosidad de un suelo por efecto de su uso. *Revista Interamericana de ciencias agrícolas: TURRIALBA*, 43(1), 72-76.
- Erazo, E., & Sandoval, D. (2015). Desarrollo de una herramienta geoestadística para elaborar mapas de variabilidad espacial de suelos. (S. C. Suelo, Ed.) *Suelos Ecuatoriales*, 45(1), 36-40.
- FAO. (2013). *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimiento para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta*. Colombia.
- FAO2. (2013). *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá*. Colombia.
- FitzPatrick, E. (1996). *Introducción a la ciencia de los suelos (2a ed.)*. (A. D. González, Trad.) México: Trillas S.A.
- González-Nivia, J. (2014). *Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas y químicas en un suelo del piedemonte llanero*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2018, de Repositorio Universidad Nacional de Colombia: bdigital.unal.edu.co/46801/1/51627124.2014.pdf
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. USA: Academic Press.

- Hincapié, E. (2011). *Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera*. Palmira: Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- Honorato, R. (2000). *Manual de Edafología* (4 ed.). (G. Alfaomega, Ed.) Chile: Universidad Católica de Chile.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. (2006). *Metodos analíticos de laboratorio de suelos* (6 ed.). Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. (2014). Estudio general de suelos del departamento del Meta escala 1:100000. Subdirección de agrología. Colombia. Pags 536.
- Jamioy, D. (2011). *Propuesta de indicadores de calidad edafológicos para valorar la influencia de los sistemas productivos sobre algunas propiedades físicas y químicas en suelos oxisoles del piedemonte Llanero Colombiano* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/7169/>
- Janssen, B., Guiking, F., Smaling, E., van der Eijk, D., Wolf, J., & van Reuler, H. (1990). A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*(46), 199-318.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia: Facultad de Ciencias.
- Jaynes, D. y Tyler, E. (1984). Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. *Soil Science*, 138, 298-305.
- Landini, A., Martínez, D., Díaz, H., Soza, E., Agnes, D., & Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del Suelo*, 25(2), 123-131.
- Lara-Silva, R. (2010). Propiedades químicas del suelo. En H. Burbano, & F. Silva, *Ciencia del Suelo: Principios básicos* (1 ed., págs. 73-142). Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Li, X. y Zhang, L. 2009. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 129-141.

- Lozano, J., Madero, E., Tafur, H., Herrera, O., & Amézquita, E. (2006). La conductividad hidráulica del suelo estudiada en el valle del Cauca con el nuevo indicador del USDA. *Acta Agronómica*, 54(3), 11-18.
- Madero Morales, E. (2010). Principios elementales de génesis y clasificación de suelos. En H. Burbano, & F. Silva, *Ciencia del Suelo: Principios básicos* (1 ed., págs. 5-71). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Montenegro, H. y Malagón, D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Subdirección agrologica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) Págs. 813
- Narro, E. (1994). *Física de suelos con enfoque agrícola* (1 ed.). México: Trillas.
- Oliveira, L. (1968). Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pcsq. agropec, bras.*(3), 197-200.
- Osman, K.T. (2013). *Soils: Principles, Properties and Management*. Springer Dordrecht. 274 p.
- Pachepsky, Y. y Rawls, W. (2004). *Development of Pedotransfer functions in Soil Hydrology* (1 ed., Vol. 30). USA: Elsevier Science.
- Pierce, F. J. y Larson, W. E. (1993). Developing criteria to evaluate sustainable management. *In J.M Kimble*, 8, 7-14.
- Pinzon-Pinto, A. (2009). *Apuntes sobre física de suelos*. Primera edición. K2 Comunicación Visual Ltda. ISBN. 978-958-33-9058-2. Colombia.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Cap 3: Morfología y descripción de suelos* (3 ed.). España: Mundi-prensa.
- Rawls, W. y Brakensiek, D. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. (U. F. practice, Ed.) *Morel*, S, 275-300.
- Reyes, W. (2014). Procesos de compactación en un suelo vertisol bajo cuatro condiciones de manejo en la llanura de Coro, Estado Falcón, Venezuela. *Bioagro*, 26(1), 39-48.
- Rubio, A. M. 2010. La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales. Universidad de Sevilla, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica

- Agrícola. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponde de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Uruguay: Universidad de la República. Facultad de Agronomía.
- Saxton, K. y Rawls, W. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society American*, 70: 1569-1578.
- Souza, E., Fernandes-Filho, E., Gonçalves-Reynaud, C., Batjes, N., Rodrigues - Dos Santos, G., & Machado, L. (2016). Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. *Scientia Agricola.*, 73(6).
- USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad del suelo*. USA: Institute of quality soils.
- Valenzuela, I., & Torrente, A. (2010). Física De Suelos. En H. Burbano, & F. Silva, *Ciencia del Suelo: Principios Básicos* (1 ed., págs. 139-212). Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Zimmermann, E., & Basile, P. (2008). Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelo limosos (Llanura Argentina). *Boletín geológico y minero*, 119(1), 71-80.