

## Análisis textural en la regulación de funciones ecosistémicas en sistemas agroforestales de un oxisol de Piedemonte Llanero en época seca, Colombia

*Textural analysis in the regulation of ecosystem functions in agroforestry systems of an Oxisol from Piedemonte Llanero in the dry season, Colombia*

Amanda Silva Parra<sup>1\*</sup>, Brayan Aldemar Rodríguez Rojas<sup>1</sup>, Nelson Vargas Arrieta<sup>2</sup>

### RESUMEN

En los sistemas agroforestales (SAF), una medición precisa del grado textural permite inferir la importancia de otras propiedades físicas de los suelos con funciones en sus regulaciones ecosistémicas en épocas de baja precipitación. El objetivo de este estudio fue evaluar la textura por los métodos de pipeta y Bouyoucos en un oxisol de Piedemonte Llanero en época seca, en diferentes usos y manejo de suelos: monocultivo de guanábana *Annona muricata* L. (MG) y monocultivo de plátano *Musa paradisiaca* (MP) con agricultura intensiva, labranza convencional y reducida, respectivamente, comparados con sistema agroforestal (SAF) de cacao *Theobroma cacao* L. asociado con yopo *Anadenanthera peregrina* L. y acacia *Acacia mangium* Willd. (SAFC) y SAF de café *Coffea arabica* L. asociado con plátano *M. paradisiaca* (SAFCF) con cero labranza y prácticas de conservación. El experimento fue instalado en un diseño irrestrictamente al azar (DIA) en arreglo factorial (2 métodos texturales x 4 usos del suelo) en 4 repeticiones. Los datos de las evaluaciones fueron sometidos a análisis de variancia y las medias fueron comparadas por el test de Tukey al 5% de probabilidad. Se observó que las fracciones arena y arcilla estuvieron influenciadas por los usos del suelo y los métodos de determinación y su interacción, en tanto que la fracción limo solo por el método analítico. En los sistemas agroforestales, al evaluarse la textura por Bouyoucos se subestima la fracción más fina del suelo correspondiente a arcilla y limo, y sobreestima la fracción gruesa, y están asociados con suelos franco-arenosos. De ahí que el método de pipeta fue más eficiente al precisar estas fracciones y se asociaron con suelos francos, con un mejor balance textural, contribuyendo a una mejor regulación de las propiedades fisicoquímicas en los SAF.

**Palabras clave:** agroforestería, conservación de suelos, hidrómetro, pipeta, arcilla.

### ABSTRACT

*In agroforestry systems (SAF), accurate measurement of the textural degree allows inferring about the importance of other physical properties of the soils with functions in their ecosystem regulations in a season of low precipitation. The objective of this study was to evaluate the texture by the pipette and Bouyoucos methods in an Oxisol from Piedemonte Llanero in the dry season, in different uses and soil management: monoculture of Guanábana *Annona muricata* L. (MG) and monoculture of banana *Musa paradisiaca* (MP) with intensive agriculture, conventional and reduced tillage, respectively; compared to the agroforestry system (SAF) of cocoa *Theobroma cacao* L. associated with yopo *Anadenanthera peregrina* L. and acacia *Acacia mangium* Willd. (SAFC) and SAF of coffee *Coffea arabica* L. associated with banana *M. paradisiaca* (SAFCF) with zero tillage and conservation practices. The experiment was installed in an unrestricted random design (DIA) in a factorial arrangement (2 textural methods x 4 land uses) in 4 replications. The data from the evaluations were subjected to analysis of variance, and the means were compared by the Tukey test at 5% probability. It was observed that the sand and clay fractions were influenced by the land uses and the determination methods and their interaction, while the silt fraction only by the analytical method. In agroforestry systems, when evaluating the texture by Bouyoucos, the finest fraction of the soil corresponding to clay and silt is underestimated, and the sand fraction is overestimated. Being associated with loamy-sandy soils, hence the pipette method was more efficient in specifying these fractions, and they were associated with loamy soils, with a better textural balance, contributing to better regulation of the physicochemical properties in the SAFs.*

**Keywords:** agroforestry, soil conservation, hydrometer, pipette, clay.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Grupo de investigación ISAF, Universidad de los Llanos, Sede Barcelona, Villavicencio, Colombia

<sup>2</sup> Programa Ing. Agronómica. Semillero de Investigación SOLUM, TROPICUS, ÓMICAS. Universidad de los Llanos, Sede Barcelona, Villavicencio, Colombia.

\* Autor para correspondencia: asilvap@unillanos.edu.co

## Introducción

A nivel mundial los oxisoles ocupan un área de aproximadamente 9.61 millones de km<sup>2</sup> que corresponden al 24.5% de los suelos. Se encuentran principalmente en los trópicos en zonas planas o ligeramente onduladas. En América Latina cubren aproximadamente 2,43 millones de km<sup>2</sup> y en Colombia están presentes en los Llanos Orientales, que ocupan más de 20 millones de hectáreas, de los cuales más de 3 millones están sujetos a la producción mecanizada de cultivos (Camacho-Tamayo *et al.*, 2013). Sin embargo, el potencial de los sistemas agroforestales en esta zona ha venido en aumento en los últimos años como alternativa a los sistemas de monocultivo y a la regulación de sus funciones ecosistémicas para zonas más bajas y en épocas de menor precipitación o más secas (Silva-Parra *et al.*, 2017), como también, por los variados beneficios sociales, productivos y ambientales que involucran (Nair *et al.*, 2010; Montagnini *et al.*, 2015).

Los sistemas agroforestales (SAF) involucran la presencia de especies leñosas perennes (i.e. árboles y arbustos), que interactúan con los componentes tradicionales (cultivos, herbáceas forrajeras y animales), todo bajo un esquema integral (Shibu, 2009). La agroforestería según su textura condiciona algunas prácticas sostenibles de bajos insumos que minimizan la alteración de los suelos, enfatizando la vegetación perenne y el reciclaje de nutrientes y regulación del agua, con lo cual contribuye a almacenar carbono a largo plazo (Murray *et al.*, 2014; Silva-Parra *et al.*, 2017).

La textura es un parámetro físico que está ligado a varios procesos fisicoquímicos. La arcilla es la fracción más activa en diversos procesos como la retención de agua, estabilidad de agregados (Six *et al.*, 2002), almacenamiento de carbono (Camacho-Tamayo *et al.*, 2013), nutrientes, capacidad de intercambio catiónico y fertilidad (Silva-Parra *et al.*, 2017). Sin embargo, en oxisoles junto con la fracción limo puede estar ligada a procesos de compactación, sellamiento, y a fijación de fosfatos (Camacho-Tamayo *et al.*, 2013), influyendo en la productividad de los SAF. Por su parte, la fracción arena está más relacionada con los procesos de movimiento del agua e infiltración, erosión y lixiviación de nutrientes (Taboada y Álvarez, 2008; Mazllom *et al.*, 2016). Zhang *et al.* (2004) encontraron una negativa y significativa correlación

entre la erodabilidad del suelo y los contenidos de arcillas ( $r = -0,62$ ;  $P < 0,05$ ). Por lo tanto, es indispensable aplicar metodologías precisas en su determinación, a fin de establecer las relaciones reales de las fracciones granulométricas con las distintas funciones en los suelos y en los SAF. Los métodos texturales más utilizados son los de Bouyoucos o hidrómetro y el de pipeta (La Manna *et al.*, 2016). Sin embargo, en estudios de génesis, caracterización y clasificación de suelos, en los que se requiere una estimación precisa del contenido de arcilla de los horizontes genéticos de un suelo, se recomienda el método de la pipeta (Rodríguez *et al.*, 2011). El método del hidrómetro o de Bouyoucos se basa en el principio de la tasa de sedimentación, que es proporcional al tamaño de la partícula del suelo. Las partículas de arena se sedimentan más rápidamente que las de limo, que a su vez se sedimentan más rápido que las de arcilla (USDA-NRSC 2014). Según Coser *et al.* (2007), el requisito básico para la selección del método más preciso de análisis textural es la dispersión de las partículas de menor tamaño (limo y arcilla) y su estabilidad durante toda la etapa analítica, lo que envuelve procesos fisicoquímicos, los cuales deben emplear la energía suficiente para romper las fuerzas que produce o confiere la estabilidad de los agregados del suelo (La Manna *et al.*, 2016). Los agregados del suelo se establecen por fenómenos electroquímicos, donde partículas cargadas negativamente se unen a través de un puente de carga contraria y depende de la textura (Six *et al.*, 2002). Los oxisoles, con altos contenidos de óxidos de Fe y Al, pueden presentar dificultades en la dispersión, debido a la presencia de microagregados de alta estabilidad, formados por agentes cementantes como la materia orgánica y los óxidos de Fe y Al (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004).

La incompleta dispersión de las partículas de los suelos, asociada a la ineficiencia de los procedimientos utilizados, puede reducir las estimaciones de la fracción arcilla y, en consecuencia, sobreestimar las fracciones de limo y arena (McDaniel *et al.*, 2012). La comprensión de los impactos de los sistemas agroforestales en la calidad física de los suelos permite establecer medidas sostenibles y sustentables más acordes a las condiciones de clima y suelo (Nair *et al.*, 2010). Sin embargo, la textura es una propiedad que cambia poco en el tiempo como consecuencia

del uso o manejo del suelo. Por ello es importante su estudio debido a la influencia que ejerce sobre otras propiedades edáficas, como indicador físico de suelos (McDaniel *et al.*, 2012). La textura es un indicador físico de la calidad del suelo, y es usado como parámetro para el establecimiento de cultivos anuales, agroforestales, prácticas conservacionistas a partir del cálculo de erodabilidad en la ecuación USLE (Mazllom *et al.*, 2016), recomendaciones de encalado (Sandoval *et al.*, 2012), fertilización, uso del agua, mejora de la estabilidad de agregados (Six *et al.*, 2002) y uso de materia orgánica (Silva-Parra *et al.*, 2017). En consecuencia, es esencial que los procedimientos analíticos para su determinación sean eficientes a fin de expresar de manera precisa sus fracciones granulométricas.

En sistemas agroforestales para las zonas del trópico, la determinación de la textura es un criterio clave, como indicador de los distintos servicios ecosistémicos que representan dependiendo del clima, relacionados con el uso del agua, reciclaje de nutrientes, aporte de materia orgánica (Nair *et al.*, 2010) y actividad microbiana (Shibu, 2009). El objetivo de esta investigación fue evaluar la textura del suelo de diferentes usos y manejo de suelos por dos métodos de determinación (Bouyoucos y pipeta), en una zona de Piedemonte de Villavicencio, con el fin de establecer su relación con las funciones ecosistémicas en sistemas agroforestales en época seca.

## Materiales y métodos

### Ubicación

Este estudio fue desarrollado en la Granja Experimental Barcelona de la Universidad de los Llanos, municipio de Villavicencio, con latitud 3° 56' 15" 4' 11' 5" N, longitud 73° 10' 00" 73° 46' 00" E, Oriente de Colombia. Posee un clima tropical húmedo caracterizado por dos estaciones, época lluviosa (abril-noviembre) y época muy seca (diciembre-marzo). El promedio anual de precipitación es de 3856 mm. El ensayo se realizó en época seca en el mes de enero de 2019. El promedio más alto de precipitación es de 526 mm, y ocurre en el mes de mayo, y la más baja precipitación es de 51 mm y se presenta en el mes de enero. El promedio anual de temperatura es de 25.5 °C con un rango de 21 a 28.5 °C (IDEAM 2010). Villavicencio es una zona de baja

altitud (200 msnm), localizada en el Piedemonte Llanero, donde predominan suelos sedimentarios y corresponde a un Typic Hapludox.

### Tratamientos y diseño experimental

Se seleccionaron cuatro usos del suelo en sistemas ya establecidos de la Granja Experimental Barcelona, con distintos tiempos de uso, los cuales correspondieron a: (a) monocultivo de guanábana (*Annona muricata* L.) (MG), donde se realizan prácticas menos intensivas como plateos, fertilización química y/o orgánica y labranza reducida, con un tiempo de uso de 5 años; (b) monocultivo de plátano (*Musa paradisiaca*) (MP), donde se realiza agricultura intensiva y labranza convencional con un tiempo de uso de 1 año; (c) sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) (SAFC) en arreglo forestal con yopo (*Anadenanthera peregrina* L.) y acacia (*Acacia mangium* Willd), con cero labranza, con un tiempo de uso de 7 años, y (d) sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) asociado con plátano (*Musa paradisiaca*) (SAFCF) con labranza cero, con un tiempo de uso de 8 años. Los sistemas agroforestales incluyen prácticas conservacionistas de manejo del sombrero y fertilización orgánica.

Se aplicó un diseño irrestrictamente al azar en arreglo factorial 2 (métodos de determinación) x 4 (usos del suelo) x 4 repeticiones, para un total de 32 repeticiones.

### Análisis fisicoquímico inicial de suelos

Se realizó un análisis fisicoquímico inicial en los diferentes usos de suelo, que incluyó porcentaje de materia orgánica, densidad aparente, porosidad total (micro y macro porosidad), humedad volumétrica a capacidad de campo, con el fin de soportar los resultados finales (USDA-NRCS 2014) (Tabla 1).

### Determinación de textura

El análisis de la granulometría de los suelos, indistintamente del método utilizado, está basado en la determinación de los diámetros equivalentes de la distribución del tamaño de partículas menores a 2 mm y en ella se distinguen tres fracciones granulométricas: arena (>50  $\mu$ ), limo (2-50  $\mu$ ) y arcilla (<2  $\mu$ ). Se colectaron 36 muestras disturbadas del horizonte

Tabla 1. Variables fisicoquímicas analizadas

| Usos del suelo | Variables iniciales analizadas |                          |        |       |       |
|----------------|--------------------------------|--------------------------|--------|-------|-------|
|                | MOS (%)                        | Da (g cc <sup>-1</sup> ) | Pt (%) | M (%) | m (%) |
| Guanábana      | 2,0                            | 1,5                      | 45     | 9,8   | 35,2  |
| Plátano        | 2,0                            | 1,4                      | 40     | 8,0   | 32    |
| SAF Cacao      | 2,5                            | 1,3                      | 50     | 20    | 30    |
| SAF Café       | 2,8                            | 1,2                      | 55     | 25    | 30    |

MOS: Materia orgánica del suelo (Walkley and Black), Da: Densidad aparente (terrón parafinado), Pt: Porosidad total (a partir de Da y Dr), M: Macroporosidad ( $M = Pt - m$ ), m: Microporosidad (a partir de humedad volumétrica a capacidad de campo).

A (20 cm de profundidad) asociadas a diferentes usos y manejo del suelo. En todas las muestras se determinaron las fracciones granulométricas por dos métodos: (a) hidrómetro o Bouyoucos, usando como dispersante hexametáfosfato de sodio. Las lecturas del hidrómetro obtenidas a los 20'' y 2 horas se corrigieron con base en la temperatura (USDA-NRCS 2014); y (b) pipeta. Para el análisis granulométrico por pipeta se adoptó la metodología desarrollada por Zucoloto *et al.* (2008). Se tomaron muestras de 10 g de suelo seco fino al aire (SSFA), se transfirió a una copa plástica o tetero de 100 ml, colocando como dispersante 50 mL de NaOH 0,1 mol l<sup>-1</sup>. El tetero fue colocado en un agitador horizontal por 12 h a 175 rpm para promover la dispersión de las arcillas. Después de la agitación, el contenido de cada tetero fue pasado por un tamiz de 0,210 mm (ABNT. N° 270) y 0,053 mm (ABNT. N° 70), para la separación de las fracciones arena gruesa (AG) y arena fina (AF), llevándose a estufa a 105 °C por 24 h para secado. La suspensión que pasó por el conjunto de tamices fue colocada en una probeta de 1.000 ml, y se completó el volumen con agua destilada hasta ese volumen, y luego se agitó por 1 min con un agitador. Se esperaron 4 min para que ocurriera la sedimentación de las partículas más gruesas.

Enseguida, se sacó de la probeta, usando una pipeta, una alícuota de 25 ml a 10 cm de profundidad, para secado en estufa a 105 °C por 24 h para la determinación de limo + arcilla. La fracción de arcilla (Ar) se obtuvo de acuerdo con la ley de Stokes, extrayendo 25 ml de la suspensión a una profundidad de 5 cm 4 h después de la agitación, y fue llevada para estufa a 105 °C por 24 h. La fracción de limo (L) se obtuvo por diferencia entre el peso de la fracción fina (limo L + arcilla Ar) y el peso de la fracción arcilla Ar. Con el peso de la

fracción de arcilla Ar, limo L, arena total a partir de la AF y AG fueron calculados los porcentajes de cada fracción en el suelo seco fino al aire (SSFA). Las fracciones obtenidas por ambas metodologías se confrontaron en el triángulo textural para determinar la textura (USDA-NRCS 2014).

### Análisis estadístico

El tratamiento estadístico de la información se efectuó mediante análisis de variancia y pruebas de comparación con el test de Tukey al 95% de probabilidad. Los datos se corrieron en el paquete estadístico InfoStat (versión 2017).

### Resultados y discusión

#### Análisis de variancia

La fracción gruesa de arena (A) y la más fina de arcilla (Ar) variaron significativamente en función del método de determinación utilizado y los usos del suelo, así como de la interacción (Tabla 2). En cambio, la fracción de limo (L) fue

Tabla 2. Análisis de variancia de los tratamientos y sus respectivos valores de F (Usos y Métodos), para Arena (A), Limo (L), Arcilla (AR), de un Oxisol.

| Fuente de Variación | A       | L                  | Ar      |
|---------------------|---------|--------------------|---------|
|                     | %       |                    |         |
| Uso del suelo       | 3,03*   | 0,76 <sup>ns</sup> | 5,42*   |
| Método              | 38,38** | 0,82*              | 27,85** |
| Interacción         | 0,90*   | 0,25 <sup>ns</sup> | 0,62*   |
| CV (%)              | 12,47   | 16,04              | 25,30   |

NS No significativo, \*\* Altamente significativo al 1%, \* Significativo al 5% por el test de F.

influenciada solo por el método de determinación utilizado (Tabla 2).

### Efecto de los usos y manejo de suelos y los métodos de determinación de manera independiente en las fracciones granulométricas del suelo

En la Tabla 3 se presentan las distintas fracciones granulométricas obtenidas en los diferentes usos de suelo sin separarlos por el método de determinación. Los monocultivos están sobre suelos franco-arenosos con más contenidos de arcilla y arena, y los sistemas agroforestales sobre suelos francos con una mejor proporción de sus fracciones. El sistema agroforestal de café promovió menores porcentajes de arcilla (Ar), y difirió altamente de guanábana y plátano que fue mayor ( $P < 0,05$ ). En el sistema agroforestal de cacao el porcentaje de Ar fue intermedio entre estos ( $P > 0,05$ ). Por su parte, el sistema agroforestal de café promovió menor porcentaje de arena (A), difiriendo altamente de guanábana, donde fue mayor ( $P < 0,05$ ). El monocultivo de plátano y sistema agroforestal de cacao mostraron valores intermedios de arena (A), y estadísticamente fueron iguales ( $P > 0,05$ ) (Tabla 3). Los usos de suelo no influenciaron la fracción limo (L) del suelo. El efecto del SAF de café en el menor porcentaje de arcilla con respecto a los monocultivos coincidió con los resultados de Zucoloto *et al.* (2008), quienes verificaron que un suelo cultivado con mango presentó mayores contenidos de Ar en relación con un suelo manejado con café, que disminuyó el tamaño de partículas.

Según Shibu *et al.* (2009), los sistemas agroforestales resultan en una menor degradación

física del suelo, comparado con cultivos anuales. Six *et al.* (2002) afirman que un aumento en los contenidos de arcilla mejora la estabilidad de los agregados y los contenidos de carbono orgánico del suelo (Nair *et al.*, 2010). Con respecto a la menor cantidad de arcilla encontrada en los sistemas agroforestales, se observó que estuvo asociada a menor Da, mayor porcentaje de MOS y macroporosidad, y aunque la microporosidad (humedad volumétrica a capacidad de campo) es menor comparada con los monocultivos, existe buena relación entre macro y microporos.

Según Costa *et al.* (2018), en sistemas agroforestales de cacao, una mayor eficiencia en la reducción de las pérdidas de C del suelo en forma de  $CO_2$  está asociada a suelos con más baja humedad, en suelos menos arcillosos y con doseles menos densos, debido a que una mayor cantidad de arcilla y la ausencia de manejo para el control del sombreado contribuyen a aumentar la humedad del suelo. Six *et al.* (2002) verificaron que los procesos de compactación y sellamiento están relacionados con mayor arcilla, la cual puede estar dispersa, resultando en estructuras indeseables funcionalmente semejantes a superficies compactadas. Se pudo comprobar en estos sistemas que los mayores contenidos de arcilla están relacionados con mayor Da y macroporosidad limitante menor al 10%. En la Tabla 3 se observa de modo general que hubo diferencias en la cuantificación de las fracciones granulométricas del suelo por los métodos de pipeta y Bouyoucos, sin considerar la influencia de los usos de suelo evaluados ( $P < 0,05$ ). El método de pipeta permitió recuperar mayores porcentajes de las fracciones

Tabla 3. Test de Tukey de los usos del suelo y métodos usados y sus respectivas significancias para Arena (A), Limo (L), Arcilla (Ar), de un Oxisol.

| Usos del suelo | A (%)               | L (%)              | Ar (%)              | Clase textural |
|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------|
|                | N = 8               |                    |                     |                |
| Guanábana      | 55,74 <sup>a</sup>  | 33,89 <sup>a</sup> | 19,81 <sup>a</sup>  | Franco arenoso |
| Plátano        | 50,48 <sup>ab</sup> | 30,09 <sup>a</sup> | 19,43 <sup>a</sup>  | Franco arenoso |
| SAF Café       | 49,92 <sup>ab</sup> | 32,77 <sup>a</sup> | 17,30 <sup>ab</sup> | Franco         |
| SAF Café       | 46,31 <sup>b</sup>  | 32,21 <sup>a</sup> | 12,05 <sup>b</sup>  | Franco         |
| Método         | N = 16              |                    |                     |                |
| Pipeta         | 43,70 <sup>b</sup>  | 35,10 <sup>a</sup> | 21,20 <sup>a</sup>  | Franco         |
| Bouyoucos      | 57,53 <sup>a</sup>  | 29,38 <sup>b</sup> | 13,10 <sup>b</sup>  | Franco arenoso |

NS No significativo, \*\* Altamente significativo al 1%, \* Significativo al 5% por el test de F.



más finas del suelo (arcilla y limo) y menores de arena, obteniéndose suelos francos. Con el método de Bouyoucos, las distintas fracciones granulométricas se relacionaron con una textura franco-arenosa. Los resultados también fueron coincidentes con los de Norambuena *et al.* (2002), quienes al comparar los porcentajes de arcilla con ambos métodos, encontraron que en el 66% de los casos fue mayor con pipeta; y en aquellos casos en que eso no sucede, el limo se presenta en mayor porcentaje. Esto significa que los pseudoagregados del tamaño arena estarían constituidos por limo y/o arcilla.

Donagemma *et al.* (2003) mencionan que el aumento del porcentaje de la fracción arcilla es un indicador de una mayor efectividad del tratamiento de dispersión utilizado por la disminución en la proporción de pseudocomponentes, especialmente limo. Zhang *et al.* (2004) reportan la alta susceptibilidad a la erosión eólica en suelos predominantemente limosos. Sin embargo, Chaudhari *et al.* (2008), con el método Bouyoucos usando calgón como dispersante cuantificaron mayores contenidos de arcilla frente al de pipeta. El USDA-NRCS (2014) destaca que en suelos con bajo contenido de materia orgánica y que se encuentren libres de sales solubles y de yeso, el método de Bouyoucos tiene un bajo error con respecto al de la pipeta, por lo que los variados resultados generan diferencias significativas que impiden la coincidencia en el análisis textural.

En cuanto a la menor fracción de arena encontrada por el método de pipeta, Borja *et al.* (2015) registraron un 26% de arena utilizando el método de pipeta, a diferencia del 28% obtenido con el método de mezcla de dispersantes y un 32% usando calgón por el método de Bouyoucos.

### Efecto de la interacción de los usos y manejo de suelos y los métodos de determinación en las fracciones granulométricas del suelo

En la Tabla 4 se muestran las fracciones granulométricas y la textura por la interacción entre los usos del suelo y los métodos de determinación, indicando que los dos factores en estudio no actuaron independientemente ( $P < 0,05$ ). Se observa que en todos los usos del suelo mediante pipeta se aumentó la fracción fina del suelo, con diferencias en arcilla, pero no en limo, y disminuyó la arena, correspondiendo a suelos francos, y comparado con Bouyoucos a franco-arenosos (Tabla 4, Figura 1). En la Figura 1 se pueden observar mejor las interacciones. Por el método de pipeta, en el sistema agroforestal de cacao la Ar se incrementó, igualando a guanábana y plátano ( $P > 0,05$ ), y difiriendo del SAF de café, que fue menor ( $P < 0,05$ ) y que se diferenció altamente de café y cacao por el método de Bouyoucos ( $P > 0,05$ ). En los SAF con el método de pipeta se logró recuperar mayor arcilla comparada con Bouyoucos, y esta siempre fue más baja que la

Tabla 4. Test de Tukey de la interacción de los usos del suelo\*métodos usados y sus respectivas significancias para Arena (A), Limo (L), Arcilla (Ar), de un Oxisol.

| Usos del suelo | Métodos   | A (%)                 | L (%)              | Ar (%)              | Clase textural |
|----------------|-----------|-----------------------|--------------------|---------------------|----------------|
|                |           | N = 4                 |                    |                     |                |
| Guanábana      | Pipeta    | 38,22 <sup>cd</sup>   | 37,27 <sup>a</sup> | 24,51 <sup>a</sup>  | Franco         |
|                | Bouyoucos | 54,40 <sup>abc</sup>  | 30,50 <sup>a</sup> | 15,10 <sup>ab</sup> | Franco-arenoso |
| Plátano        | Pipeta    | 44,06 <sup>bcd</sup>  | 32,68 <sup>a</sup> | 23,26 <sup>a</sup>  | Franco         |
|                | Bouyoucos | 56,90 <sup>ab</sup>   | 27,50 <sup>a</sup> | 15,60 <sup>ab</sup> | Franco-arenoso |
| SAF Cacao      | Pipeta    | 40,94 <sup>cd</sup>   | 36,55 <sup>a</sup> | 22,51 <sup>a</sup>  | Franco         |
|                | Bouyoucos | 58,90 <sup>a</sup>    | 29,00 <sup>a</sup> | 12,10 <sup>b</sup>  | Franco-arenoso |
| SAF Café       | Pipeta    | 51,58 <sup>abcd</sup> | 33,92 <sup>a</sup> | 14,51 <sup>ab</sup> | Franco         |
|                | Bouyoucos | 59,90 <sup>a</sup>    | 30,50 <sup>a</sup> | 9,60 <sup>b</sup>   | Franco-arenoso |

NS No significativo, \*\* Altamente significativo al 1%, \* Significativo al 5% por el test de F.

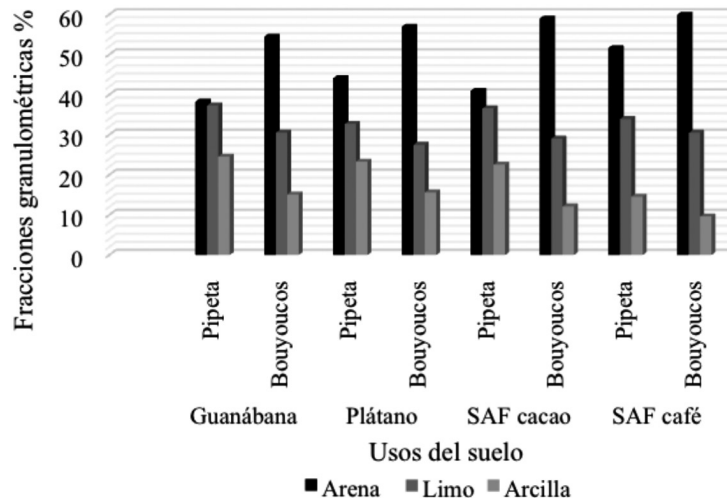


Figura 1. Textura del suelo obtenida con el método de pipeta y Bouyoucos en sistemas agroforestales de café y cacao comparado con monocultivos en un oxisol de Piedemonte Llanero.

obtenida en los monocultivos con ambos métodos (Tabla 4, Figura 1). En los SAF de cacao y café se lograron mayores porcentajes de arena (A) por el método de Bouyoucos ( $P > 0,05$ ), difiriendo de SAF de cacao y guanábana con pipeta ( $P < 0,05$ ). En todos los usos del suelo con el método de pipeta se evidenciaron más bajos porcentajes de arena (Tabla 4) que en los monocultivos mediante Bouyoucos.

En los sistemas agroforestales se estaría subestimando la fracción Ar con Bouyoucos, ya que se alcanzó una mayor precisión en la cuantificación de la fracción fina del suelo con el método de pipeta. Nair *et al.* (2010) mencionan que en los SAF se mejora la agregación y la estabilidad de los agregados del suelo, debido a que las arcillas proporcionan protección de la materia orgánica del suelo. Six *et al.* (2002) reportan que la presencia de complejos orgánicos y arcillas usualmente incrementa la estabilidad de agregados, de ahí que la degradación del suelo y la erodabilidad disminuyen. En los SAF la mayor estabilidad del suelo se debe al incremento de materia orgánica por altos aportes de hojarasca de los árboles. Según Müller y Gama-Rodrigues (2007), un sistema agroforestal de cacao gestionado puede depositar cerca de  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de hojarasca, mejorándose la estructura y la actividad biológica de los suelos (Shibu *et al.* 2009).

Sin embargo, los sistemas agroforestales de café y cacao y los monocultivos por el método

de Bouyoucos dan texturas franco-arenosas, por lo cual esta metodología sobreestima la fracción arena, ya que por el método de pipeta resultan texturas francas, y esta fracción es menor, como lo verificaron Borja *et al.* (2015). Los sistemas agroforestales, mediante la acción de las raíces de los árboles, actúan como subsoladores naturales, mejorando la densidad aparente, la porosidad, la aireación, e influyendo en la eficiencia en la toma de nutrientes y uso del agua (Shibu, 2009). La capacidad en el uso del agua de los SAF evaluados se ve reflejada en los altos porcentajes de humedad volumétrica a capacidad de campo o retención de agua, posiblemente más relacionada con la fracción Ar que con arena y limo. Los sistemas agroforestales que están en suelos muy arenosos son más susceptibles a erodabilidad, al desprendimiento de partículas y pérdida de suelo (Mazllom *et al.*, 2016). Las tasas de infiltración de agua pueden aumentarse con la consecuente lixiviación y pérdida de nutrientes en profundidad.

Sin embargo, se ha encontrado que los sistemas agroforestales en suelos arenosos de zonas secas pueden mejorar la captación de agua y las tasas de infiltración, así como la difusión de gases (Basche y Delonge 2019), y es una estrategia que puede ayudar a reducir los impactos negativos de la alta variabilidad climática debido a la lluvia (Stewart y Peterson 2015). No obstante, los sistemas agroforestales que se encuentran en suelos arenosos están expuestos a procesos erosivos y a una mayor

pérdida de suelo y nutrientes, y pueden requerir mayores prácticas de conservación, como el uso de coberturas y enmiendas orgánicas (Silva-Parra *et al.*, 2017). Según Murray *et al.* (2014), para un suelo arenoso que presentaba baja microporosidad, se recomendó una enmienda orgánica que mejoró la estructura superficial y la infiltración del agua en el suelo.

Para Nair *et al.* (2010), la fracción Ar del suelo influye en la formación de organominerales primarios complejos y la estabilidad de los agregados del suelo, y proporciona protección de la MOS. Por el contrario, las arenas dependen de la unión física por las raíces y las hifas, en lugar de complejos organominerales, de modo que los agregados en suelos arenosos tienden a ser débiles. Six *et al.* (2002) refieren que la disminución del contenido de materia orgánica pudiera estar explicada por la textura más gruesa de los suelos, determinando una menor protección de estos. Se ha señalado previamente que los suelos ubicados en las zonas tropicales poseen bajos contenidos de materia orgánica de suelo; sin embargo, los altos contenidos de óxidos de Fe y Al les pueden imprimir una alta estabilidad (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004).

Según estudios realizados por Murray *et al.* (2014), a los ocho años de implantado el sistema agroforestal en un suelo de textura franco-arcillosa a arcillosa mostró un incremento del 85% de la materia orgánica edáfica en el primer horizonte. Sin embargo, y aunque no se presentaron diferencias en la interacción para la fracción limo, los pseudoagregados que no se dispersaron con el método de Bouyoucos están constituidos en mayor proporción por limo y en menor grado por arcilla cuando se analizan con pipeta. Estos resultados coinciden con los de Norambuena *et al.* (2002).

Según Bonilla y Johnson (2012), la correlación ( $r = 0,607$ ) entre la erodabilidad y limo fue alta.

Estas condiciones texturales asociadas a suelo franco en los sistemas agroforestales evaluados pueden incidir en las regulaciones ecosistémicas de la capacidad de uso del agua, nutrientes, y en la actividad microbiana (Nair *et al.*, 2010), debido a un mejor balance de las fracciones granulométricas del suelo, mejorándose la Da, porosidad, macroporosidad, retención de agua y los contenidos de la MOS en relación con los monocultivos.

### Conclusiones

En los sistemas agroforestales de café y cacao, una evaluación más precisa de la textura por el método de pipeta proporcionó una recuperación más eficiente de la fracción fina del suelo, ya que el método de Bouyoucos subestima esta fracción y sobreestima la fracción arena, dando una textura franca, la cual ejerce mejores relaciones con otras propiedades fisicoquímicas de los suelos y los servicios ecosistémicos que representan. La selección del mejor método para la determinación textural debe indicar en alto grado las condiciones reales de la textura del suelo, que revelen las funciones ecosistémicas que representan sus fracciones granulométricas, aparte de los recursos disponibles para la factibilidad de esta medición.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Ingeniería Agronómica y al Laboratorio de Suelos de la Universidad de los Llanos, por el apoyo en las determinaciones fisicoquímicas.



## Literatura Citada

- Acevedo-Sandoval, O.; Ortiz-Hernández, E.; Cruz-Sánchez, M.; Cruz-Chávez, E.  
2004. El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22 (4): 485-497.
- Basche, A.D.; DeLonge, M.S.  
2019. Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS ONE*, 14 (9): e0215702.
- Bonilla, C.A.; Johnson, O.I.  
2012. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, 189-190: 116-123.
- Borja-Martínez, K.; Mercado-Lázaro, J y Combatt-Caballero, E.M.  
2015. Dispersantes químicos y cuantificación de fracciones texturales por los métodos Bouyoucos y pipeta. *Acta Agronómica*, 64 (4).
- Camacho-Tamayo, J.H; Rubiano-Sanabria, Y.; Santana, L.M.  
2013. Management units based on the physical properties of an-Oxisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13 (4): 767-785
- Costa, E.N.D.d.; Landim de Souza, M.F.; Lima Marrocos, P.C.; Lobão, D.; Lopes da Silva, D.M.  
2018. Soil organic matter and CO<sub>2</sub> fluxes in small tropical watersheds under forest and cacao agroforestry. *PLoS ONE*, 13 (7): e0200550.
- Donagemma, G.K.; Ruiz, H.A.; Fontes, M. P.; Ker, J.C.; Schaefer, C.G.  
2003. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27: 765-772.
- IDEAM.  
2010. Catálogo de Estaciones Hidrometeorológicas. Disponible: <http://www.ideam.gov.co> Consultado: 30/jul/2019.
- La Manna, L.; Rostagno, C.M.; Buduba, C.G.; Irisarri, J.; Navas, A.  
2016. Determinaciones de granulometría en suelos volcánicos: comparación entre distintos métodos analíticos. *Ciencia del suelo (Argentina)*, 34 (2): 355-364.
- Mazllom, U.; Emami, H.; Hossain, G.  
2016. Prediction the soil erodibility and sediments load using soil attributes. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5 (3): 201-208.
- Montagnini, F.; Somarriba, E.; Murgueitio, E.; Fassola, H.; Eibl, B.  
2015. Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie técnica. Informe técnico 402. CATIE, Turrialba, Costa Rica: Editorial CIPAV. 454 p.
- Müller, M.W.; Gama-Rodrigues, A.C.  
2007. Sistemas Agroflorestais com cacauero. In: Valle, R.R. (eds.). *Ciência, tecnologia e manejo do cacauero*. Ilhéus: CEPLAC, 246-271 p.
- Murray, R.M.; Orozco M.G.; Hernández A.; Lemus C.; Nájera O.  
2014. El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18 (1): 23-31.
- Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Kumar, B.M.; Showalter, J.M.  
2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. In *Advances in Agronomy*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 108, 237-307 p.
- Norambuena, V.P.; Luzio, L.W.; Vera, E.W.  
2002. Comparación entre los métodos de la pipeta y Bouyoucos y su relación con la retención de agua en ocho suelos de la zona altiplánica de la provincia de Parinacota, Chile. *Agricultura Técnica*, 62 (1): 150-157.
- Rodrigues, C.; de Oliveira, V. A.; Marques da Silveira, P.; y Guimarães Santos, G.  
2011. Chemical dispersants and pre-treatments to determine clay in soils with different mineralogy. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 1589-1596.
- Sandoval, H.; Gómez, C.; Pardo N.  
2012. Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Revista Facultad de Ingeniería*, 21 (32): 21-40.
- Shibu, J.  
2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76: 1-10.
- Silva-Parra, A.; Colmenares-Parra, C.; Álvarez-Alarcón, J.  
2017. Análisis multivariado de la fertilidad de los suelos en sistemas de café orgánico en Puente Abadía, Villavicencio. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20 (2): 289-298.
- Six, J.; Conant, R.T.; Paul, E.A.; Paustian, K.  
2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and soils*, 241: 155-176.
- Stewart, B.A.; Peterson, G.A.  
2015. Managing green water in dryland agriculture. *Agronomy Journal*, 107: 1544-1553.
- USDA-NRCS.  
2014. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report N° 51, Version 2.
- Zhang, K., Li, S., Peng, W., Yu, B.  
2004. Erodibility of Agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 76 (2): 157-165.
- Zucoloto, M.; Coelho, R.I.; De Souza Lima, J.S.; Gonçalves dos Santos, J.; Dias de Almeida, G.  
2008. Atributos físicos de um latossolo vermelho amarelo sob diferentes coberturas vegetais. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61 (2): 4600-4604.

