

Textura del suelo en sistemas productivos de cacao y ganadería en el departamento de Antioquia, Colombia

Soil texture in cocoa and livestock production systems in the department of Antioquia, Colombia

José Miguel Mira-Giraldo^{1*}, Mario Fernando Cerón-Muñoz¹,
Marisol Medina-Sierra¹

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue describir la textura de los suelos en fincas con sistemas de producción agropecuaria en las subregiones del departamento de Antioquia, Colombia. Se tomaron 1729 muestras de suelos en las nueve subregiones del departamento, de las cuales 415, 622, 376 y 316 pertenecieron a sistemas productivos de cacao, ganadería de carne, lechería especializada y ganadería doble propósito, respectivamente. Las variables de interés fueron los porcentajes de arena, limo, y arcilla, a partir de las cuales se determinaron las texturas de los suelos. Los análisis estadísticos incluyeron modelos aditivos generalizados con efectos como la posición geográfica, la altitud, nivel del trópico, tipo de sistema productivo, municipio y región. Los mejores modelos se seleccionaron con base al mayor coeficiente de determinación y al mayor valor de *deviance*. En los suelos se encontraron las clases texturales arcillosas (Ar), francas (F), franco arcillosas (F-Ar), franco arcillo arenosas (F-Ar-A), franco arenosas (F-A) y arcillo arenosas (Ar-A). En el trópico bajo predominaron suelos de texturas finas y moderadamente finas (F-Ar-A, F-Ar y Ar); en el trópico medio hubo una mayor distribución de clases texturales, predominando texturas de finas a medias y en menor cantidad las gruesas (F-Ar-A, F-Ar, Ar, F, F-A y Ar-A); y en el trópico alto se encontró presencia de suelos con texturas medias y moderadamente gruesas (F-A y F).

Palabras clave: análisis de suelo, clase textural, edafología, producción de cacao, sistemas de información geográfica

¹ Grupo de Investigación en Agrociencias, Biodiversidad y Territorio (GAMMA), Escuela de Producción Agropecuaria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

* Autor correspondiente: José Miguel Mira-Giraldo; josem.mira@udea.edu.co

Recibido: 11 de octubre de 2023

Aceptado para publicación: 20 de mayo de 2024

Publicado: 28 de febrero de 2025

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

ABSTRACT

The aim of this study was to describe the texture of soils on farms with agricultural production systems in the subregions of the department of Antioquia, Colombia. In total, 1 729 soil samples were taken in the nine subregions of the department, of which 415, 622, 376 and 316 belonged to cocoa, beef livestock, specialized dairy and dual-purpose livestock production systems, respectively. The variables of interest were the percentages of sand, silt, and clay, from which the textures of the soils were determined. The statistical analysis included generalized additive models with effects such as geographical position, altitude, tropical level, type of production system, municipality and region. The best models were selected based on the highest coefficient of determination and the highest deviance value. In the soils, the textural classes clay (Ar), loam (F), clay loam (F-Ar), sandy clay loam (F-Ar-A), sandy loam (F-A) and sandy clay (Ar-A) were found. In the low tropics, soils with fine and moderately fine textures (F-Ar-A, F-Ar and Ar) predominated. In the middle tropics there was a greater distribution of textural classes, with fine to medium textures predominating and coarse textures predominating (F-Ar-A, F-Ar, Ar, F, F-A and Ar-A); and in the high tropics the presence of soils with medium and moderately coarse textures (F-A and F) was found.

Keywords: soil analysis, textural class, edaphology, cocoa production, geographic information systems

INTRODUCCIÓN

Una de las tantas desventajas de la agricultura tradicional es que considera un manejo uniforme del suelo, sin tener en cuenta la diferencia espacial que presentan sus propiedades. Esta heterogeneidad influye en diversas características como la retención hídrica, drenaje, fertilidad, dinámica de la fracción orgánica y otras características edáficas de importancia para las plantas (De Baerdemaeker, 2013). La agricultura de precisión tiene como objetivo optimizar los recursos empleados en la agricultura, como lo son el agua y los insumos químicos, esto a partir de la caracterización de cada suelo, con el fin de evitar la aplicación excesiva de los recursos, reduciendo el impacto ambiental y los gastos de producción (De Baerdemaeker, 2013).

La medición de las propiedades del suelo a elevadas frecuencias temporales y espaciales exige mucho tiempo y presenta costos elevados al utilizar métodos convencionales (Pei *et al.*, 2019). Por lo tanto, se requiere de

nuevas alternativas tecnológicas que proporcionen este tipo de información de una manera más rápida, precisa y económica para los productores (Pei *et al.*, 2019). La textura del suelo es una propiedad de interés que se relaciona directamente con los procesos de degradación y potencial de producción (White, 2005). La textura señala el contenido de las partículas de arena, limo y arcilla en el suelo. De igual manera, tiene efecto en diferentes características como densidad, porosidad y, movimiento y almacenamiento de fluidos (aire y agua) en el suelo (Lacasta *et al.*, 2005). Esta propiedad del suelo presenta alta variabilidad espacial, por ende, caracterizar una zona determinada requiere de un elevado número de muestras para obtener resultados con mayor precisión (Lacasta *et al.*, 2005).

Antioquia es un departamento que está ubicado en la zona noroccidental de Colombia, donde cruzan las cordilleras Central y Occidental. Tanto la estructura geológica del departamento como sus depósitos minerales cumplen un papel importante en la formación y constitución de los suelos, así como en la

economía y desarrollo del departamento. Antioquia cuenta con una extensión de tierra de 63 612 km², en los cuales se encuentran diferentes órdenes de suelos, destacando los entisoles, inceptisoles, histosoles, vertisoles, andisoles, molisoles, ultisoles y oxisoles (IGAC, 2007a). La zona de estudio se encuentra ubicada en su mayoría en el paisaje de Montaña, ya que el 66% del departamento de Antioquia presenta este tipo de paisaje, el cual se caracteriza por tener heterogeneidad granulométrica debido a factores variables del clima, material parental y sus diferentes tipos de relieves (IGAC, 2007b).

El 26% del área del departamento en 2016 correspondía a suelos agropecuarios; es decir 16 539 km² de suelo (UPRA, 2016) y dentro de estos se destaca el cultivo de cacao y las producciones ganaderas de leche, de carne y de doble propósito. Antioquia es el departamento con mayor población de ganado bovino en el país, pues el 11.2% se encuentra en el departamento; es decir, 3.2 millones de cabezas (ICA, 2022). Del mismo modo, Antioquia se destaca por su producción de cacao, siendo el tercer productor más grande del país con 6661 t producidas en 2021 (FEDECACAO, 2022). Ante esto, el objetivo del trabajo fue describir la textura de los suelos en fincas con variados sistemas productivos en el departamento de Antioquia, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron 1729 análisis de suelo del departamento de Antioquia, Colombia, en las subregiones Valle de Aburra (48), Bajo Cauca (229), Norte (272), Nordeste (263), Suroeste (195), Occidente (164), Oriente (251), Urabá (243) y Magdalena Medio (64), dividido en los sistemas productivos de cacao (415), ganadería de carne (622), lechería especializada (376) y ganadería doble propósito (316) (Figura 1). Las muestras de suelo fueron re-

colectadas entre 2021 y 2022, a una profundidad aproximada de 20 cm, efectuando un recorrido a manera de zigzag por el terreno a muestrear. Se hizo un hueco en similitud a un cuadrado y de ahí se fueron tomando las submuestras. En general, para cada muestra se colectaron 10 submuestras que fueron mezcladas y homogenizadas en un recipiente, luego fueron empacadas, identificadas y enviadas al laboratorio de AGROSAVIA (Tibaitatá, Cundinamarca) para el análisis de química húmeda, y porcentajes de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar).

Se elaboraron modelos aditivos generalizados con distribuciones de Poisson que incluyeron efectos como la longitud (de -76.83 a -73.91 W), la latitud (de 5.60 a 8.76 N), la altitud (de cero a 2900 msnm), el tipo de trópico (bajo, medio, alto), el sistema productivo (cacao, ganadería de carne, ganadería de leche, ganadería doble propósito) y otros factores como región y municipio.

Posterior a la comprobación de significancia de cada efecto y al mayor coeficiente de determinación y *deviance*, quedó el siguiente modelo (ecuación 1): $\log(E(Y_{ijkl})) = \mu + N_i + M_j + S_k + e_{ijkl}$, donde Y_{ijkl} es la i -ésima observación del porcentaje de arena, 2 de limo o de arcilla (con distribución Poisson), i es el intercepto, N_i es el efecto del nivel de altitud (i = bajo, medio o alto), M_j es el efecto del municipio (j = 1, ..., 72), S_k el efecto del sistema productivo (k = carne, leche, doble propósito o cacao) y e_{ijkl} el efecto residual.

Los modelos aditivos generalizados fueron construidos con la librería *mgcv* (Wood, 2017), del software estadístico R-project (R Core Team, 2022). Posteriormente, con los valores predichos del obtenidos del modelo mencionado anteriormente (219 datos) para las variables Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar), se determinó el tipo de textura de acuerdo con el triángulo textural de la USDA (2014).

Cuadro 1. Contenidos texturales del suelo de Antioquia dedicados a la producción de ganaderías de leche, carne y de doble propósito, y cacao

Variable	Mínimos	1st Qu. ¹	Mediana	Media	3st Qu. ²	Máximos
Arena, %	8.18	36.3	43.9	42.6	49.3	71.6
Limo, %	13.4	23.9	27.1	27.6	32.1	53.4
Arcilla, %	1.40	22.5	29.7	29.8	36.5	60.9

¹ Primer cuartil, ² Tercer cuartil

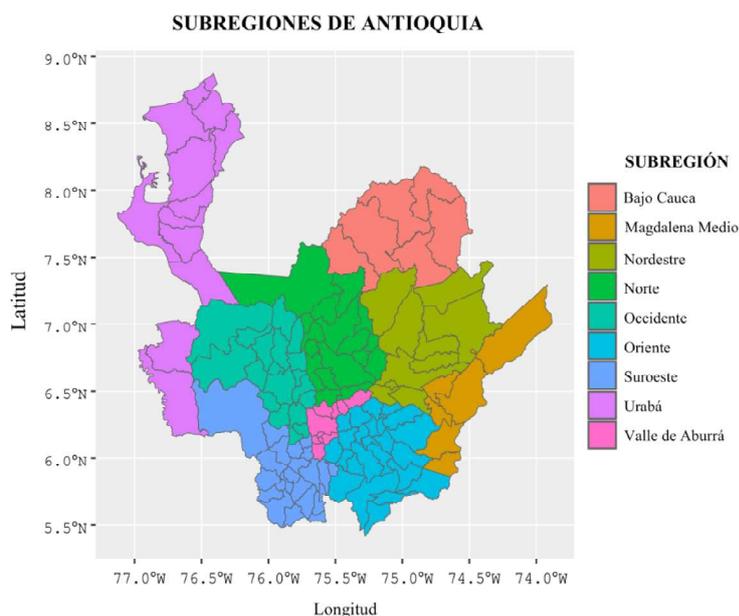


Figura 1. Subregiones del departamento de Antioquia, Colombia, con muestras de suelo colectadas en el estudio

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el modelo utilizado para hallar los predichos de A, el R^2 fue de 0.37 y la *deviance* de 41.4%, en tanto que para los valores predichos de L fue de $R^2= 0.34$ y *deviance*= 38.8%, y para Ar, $R^2= 0.41$ y *deviance*= 45.2%. Los valores predichos de las variables A, L y Ar, se presentan en el Cuadro 1. Se aprecia que los suelos presentan valores medios de A de 42.3% (rango: 8.18-71.6%); para L de 27.6% (rango: 13.4-53.4%) y para Ar de 29.8% (rango: 1.40-60.9%).

En las regiones de trópico bajo (menos de 1000 msnm), en especial las regiones de Bajo Cauca, Nordeste Antioqueño, Urabá y Magdalena Medio (y con una menor participación Oriente y Occidente Antioqueño), se encontró que los suelos que predominan en los sistemas productivos de ganadería de carne, ganadería de doble propósito y cacao están conformados por texturas moderadamente finas y finas (según la clasificación USDA-NRCS, 2014), en los que se destacaron los suelos franco arcillo arenosos (F-Ar-A), franco arcillosos (F-Ar) y arcillosos (Ar) (Figura 2).

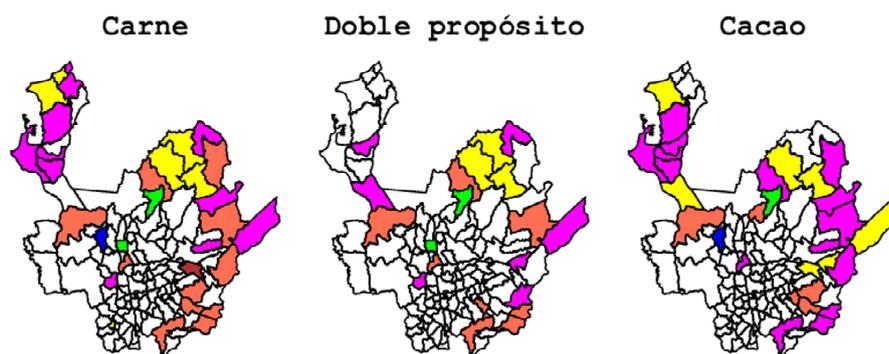


Figura 2. Mapa de los municipios de Antioquia ubicados en el trópico bajo según el sistema productivo. Los colores indican la tendencia textural del suelo en cada municipio: amarillo = arcilloso, verde = franco, azul = franco arenoso, rojo tomate = franco arcillo arenoso, café = arcillo arenoso y magenta = franco arcilloso

En el Bajo Cauca predominan los suelos Ar, en el Nordeste para las ganaderías los suelos F-Ar-A y F-Ar, y para cacao los suelos F-Ar. En Urabá la tendencia es a los suelos F-Ar. En el Magdalena Medio para los sistemas productivos de carne, predominan los suelos con texturas F-Ar-A y F-Ar, para doble propósito F-Ar y para cacao Ar y F-Ar. Por su lado en la región de Oriente, para ganadería de carne predominan los suelos F-Ar-A y para ganadería de doble propósito y cacao los F-Ar-A y F-Ar. En Occidente se encontraron suelos F-Ar-A y F-A para carne y cacao, y F-Ar-A para ganadería de doble propósito (Figura 2).

En las regiones ubicadas en el trópico medio se encontró que, en los sistemas de lechería especializada del Norte, los suelos que predominan son los de texturas Ar, F, F-A y F-Ar-A, de igual forma estas predominan en el Oriente, añadiendo a esta región la presencia de texturas F-Ar. Para los sistemas productivos de ganadería de carne se halló en el Suroeste la prevalencia de texturas F y F-Ar, en el Occidente suelos F, F-Ar, F-Ar-A y Ar, en el Oriente suelos Ar, F-Ar-A y F-A, en el Valle de Aburrá presencia de suelos F-Ar, en el Nordeste suelos de textura

F, F-Ar y Ar-A, y en el Norte suelos con texturas Ar, F y F-A. De igual forma se comportó la textura de los suelos de los sistemas productivos de ganadería de doble propósito en las regiones de Suroeste, Occidente y Nordeste, y en el Valle de Aburrá donde se presentaron texturas F-Ar-A. En el cacao se presentó mayor variabilidad textural del suelo con respecto a los otros sistemas en el trópico medio, en el Suroeste prevaleció la presencia de suelos de texturas F-Ar, en Occidente la de suelos F-A, F-Ar y F-Ar-A, en el Oriente F-Ar y F-Ar-A, en el Nordeste F-Ar y Ar, y en el Norte la presencia de suelos F (Figura 3).

En los sistemas productivos establecidos en el trópico alto se encontró mayor presencia de suelos de texturas moderadamente gruesas. Para los sistemas de lechería especializada los suelos presentaron texturas F-A en mayor proporción y suelos con texturas Ar y F en una menor proporción en la región de Oriente, en el Valle de Aburrá se encontraron suelos Ar-L y F-Ar, mientras que en la zona Norte, las texturas predominantes fueron F-A, Ar y F-Ar-A. En los sistemas de ganadería de carne ubicados en la región de Oriente se encontraron suelos con texturas

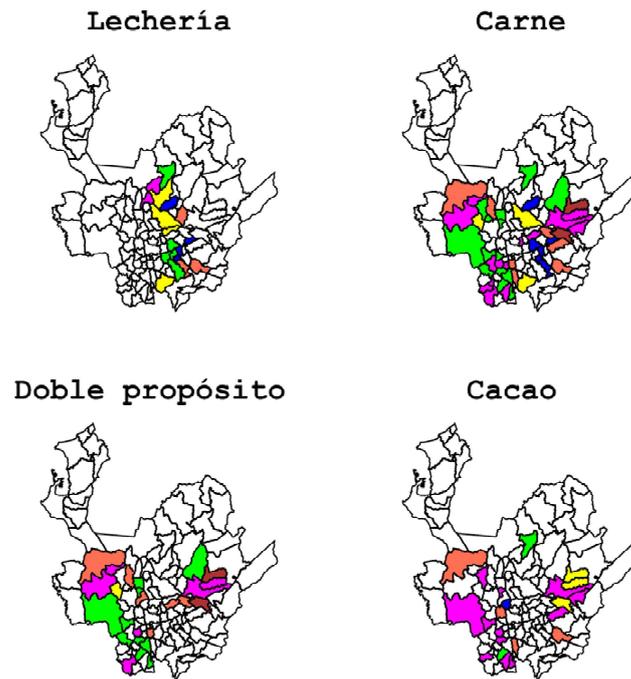


Figura 3. Mapa de los municipios de Antioquia ubicados en el trópico medio según el sistema productivo. Los colores indican la tendencia textural del suelo en cada municipio: amarillo = arcilloso, verde = franco, azul = franco arenoso, rojo tomate = franco arcillo arenoso, café = arcillo arenoso y magenta = franco arcilloso

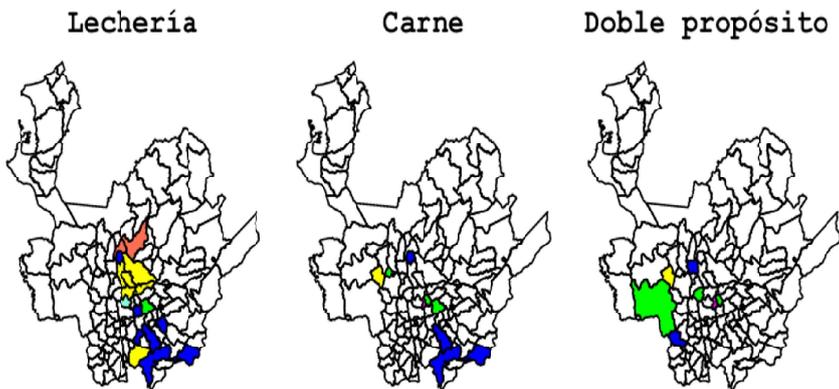


Figura 4. Mapa de los municipios de Antioquia ubicados en el trópico alto según el sistema productivo. Los colores indican la tendencia textural del suelo en cada municipio: amarillo = arcilloso, verde = franco, azul = franco arenoso, rojo tomate = franco arcillo arenoso, café = arcillo arenoso, magenta = franco arcilloso y aguamarina = arcillo limoso

F-A y F, en el Norte texturas F-A, en el Valle de Aburrá suelos F y F-Ar, y en la región de Occidente, suelos de clase textural F y Ar. En los sistemas de ganadería de doble propósito se encontró que en la región del Suroeste predominan los suelos con textura F y F-A, en Occidente los de texturas F, F-Ar y Ar, y en el Valle de Aburrá los suelos de textura F y F-Ar (Figura 4).

En el trópico medio se encontró una mayor distribución de clases texturales, en las que hay presencia de texturas medias, finas y en menor cantidad de gruesas (F-Ar-A, F-Ar, Ar, F y F-A) (Figura 3). En el trópico alto la tendencia es a la presencia de texturas medias (F-A y F) (Figura 4). Estos resultados están dentro de los obtenidos por el IGAC (2007b), en donde determinaron la textura de los suelos del departamento de Antioquia, según el tipo de paisaje y piso climático.

En cuanto a las nueve subregiones del departamento se encontró que, en los suelos del Bajo Cauca, Magdalena Medio, Nordeste, Urabá y Valle de Aburrá la tendencia es a la presencia de suelos de granulometría fina, con mayor presencia de suelos F-Ar y Ar, y con una menor presencia de suelos F-Ar-A. Por su parte, en el Suroeste y en el Occidente la tendencia textural de los suelos es a la presencia de texturas medias, en las que prevalecen los suelos F-Ar, F-A y F. En las subregiones de Oriente y Norte la tendencia es a la presencia de suelos medios y pesados, en donde se encontraron suelos F-A, F y en menor medida suelos F-Ar-A.

En general, en los sistemas productivos de cacao se encontró que predominan los suelos de textura: F-Ar, F-Ar-A y Ar, lo que indica texturas finas y moderadamente finas, suelos adecuados para este cultivo, ya que tienen la capacidad de retener mayor humedad y, a su vez, los nutrientes del suelo (van Vliet *et al.*, 2015). Esta característica puede ser desfavorable en terrenos de topografía plana, ya que por el exceso de agua se pueden presentar inundaciones e influir en el cre-

cimiento y desarrollo de las plantas, debido al deficiente drenaje del suelo. La topografía que predomina en el departamento de Antioquia y donde se cultiva el cacao es de montaña. También se encontró que los sistemas productivos de cacao están ubicados en el trópico bajo y en el trópico medio, al igual que en el departamento de Santander, que es el mayor productor de cacao en el país y que tiene establecidos sus cultivos principalmente en las condiciones del trópico bajo (FEDECACAO, 2022). Autores como Montealegre *et al.* (2021) indican que altitudes superiores a 800 msnm favorecen el cultivo de cacao, aumentando el rendimiento productivo de la planta.

En los sistemas de ganadería de carne se encontró la presencia de suelos finos como F-Ar, F-Ar-A y Ar, y suelos de textura moderadamente gruesa como los F-A. Esta variabilidad se debe principalmente a que este sistema productivo se le encuentra en los tres tipos de trópico, aunque con mayor presencia en los trópicos bajo y medio. Los principales problemas de estas ganaderías se relacionan a una inadecuada alimentación, ya que los pasturas muestran baja relación energía y proteína (Barahona y Sánchez, 2005) y limitada disponibilidad durante la época seca (Barahona *et al.*, 2003). En este sentido, Sossa y Barahona (2015) sugieren que se potencialice la ganadería de carne en el trópico alto, puesto que este trópico presenta características favorables para el engorde de novillos, asociadas a una mayor calidad nutricional de sus pasturas.

En las producciones de ganadería de doble propósito (ubicadas principalmente en el trópico medio y bajo), se encontró que predominan los suelos de texturas: F-Ar, F-Ar-A y Ar; suelos finos y fértiles, para estos sistemas productivos existe una gran variedad de pastos, los cuales son seleccionados dependiendo la capacidad de adaptación a las características del suelo. Según Cardona (2012), los pastos más comunes y utilizados en Colombia en el trópico bajo y medio son

angleton (*Dichanthium annulatum* (Forssk.) Stapf.), pangola (*Digitaria eriantha*, sin. *D. decumbens*) y las bracharias, dependiendo de la fertilidad de los suelos y de su acidez.

En los sistemas ganaderos de lechería especializada predominan los suelos de texturas F y F-A, lo que indica texturas medias y moderadamente gruesas, que cuentan con características adecuadas para la siembra de pastos de trópico alto. Este tipo de lechería especializada es de mayor frecuencia en el departamento (Cardozo, 2008), en donde el pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus* [Hochst. ex Chiov. Morrone]), es una de las gramíneas más utilizadas para la alimentación del ganado lechero. Según Apráez *et al.* (2012), las propiedades físicas del suelo necesarias para que el pasto kikuyo presente un buen comportamiento productivo se dan en suelos con un poco de resistencia a la penetrabilidad, permeables, drenados y con buena aireación, para facilitar el crecimiento radicular, almacenamiento y distribución de agua y de nutrientes, características proporcionadas por los suelos con textura F y F-A.

Los resultados obtenidos de la región de Occidente son comparables con los encontrados por Jiménez-Heredia *et al.* (2010), donde se determinaron las texturas del suelo de un predio en el municipio de Santa Fe de Antioquia y encontraron suelos con clases texturales F, F-Ar, F-Ar-A y franco arcillo arenosa – franco arenosa (F-Ar-A-F-A); mientras que en el presente estudio fueron F-Ar, F-A y F. Estos tipos de suelo, que tienden a ser medios, son aptos para el establecimiento de todos los sistemas productivos en estudio, pero se tendrían que evaluar las variables climáticas de cada lugar para determinar la viabilidad de un sistema productivo u otro. En esta zona se encuentran establecidos principalmente sistemas de ganaderías de carne y de doble propósito, con la ventaja de contar con suelos de drenajes aceptables, lo que disminuye el riesgo de encharcamiento de las pasturas, teniendo en cuenta la alta precipitación anual y la zona de vida del lugar.

Los resultados en la subregión del Oriente se pueden comparar con los publicados por Hermelin (1992), quien predominantemente reporta suelos de la clase franco limosa (F-L), en tanto que en el presente estudio hubo una tendencia de suelos de clases texturales F-A y F-Ar-A. La disimilitud entre estos estudios podría deberse a la diferencia de tiempo, ya que esta propiedad física del suelo tiende a variar en función del tiempo. Las características texturales y altitudinales de estos tipos de suelos y de la región indican que son más adecuados para el establecimiento de sistemas de producción ganaderos (carne, leche y doble propósito).

Chakraborty y Mistri (2015) afirman que la práctica agrícola con la textura adecuada del suelo y la selección adecuada de cultivos produce una productividad óptima con un mínimo de agua y fertilizantes, lo que en consecuencia mantiene la salud del suelo y los sistemas agrícolas en cuestión. Sin embargo, debido a la disponibilidad de recursos para riego y fertilización, pasan por alto las características del suelo, dando como resultado la degradación de este y un producto final más costoso al mercado. Ante esto, resulta importante caracterizar los suelos en los que se va a intervenir, con el fin de seleccionar los que mejores características presenten según las necesidades.

CONCLUSIONES

- Los suelos dedicados a la producción agropecuaria en el departamento de Antioquia se podrían clasificar en su mayoría como suelos francos, donde predominan los suelos de clase textural F, F-A, F-Ar y F-Ar-A. En una menor proporción hay presencia de suelos arcillosos, con la presencia de texturas Ar, Ar-A y arcillo limoso (Ar-L), suelos con características limitantes para las producciones agropecuarias. Estos suelos tienden a presentarse en el trópico bajo, en

el cual predomina la ganadería de carne y los cultivos de cacao.

- La textura del suelo tiende a ser de fina a moderadamente fina en regiones con menor altitud y tiende a ser de texturas medias a moderadamente gruesa, en las regiones con mayor altitud.
- Considerando las clases texturales del suelo que predominan en el trópico alto, este tiene potencial para la implementación de sistemas productivos de ganadería de carne, ya que presentan adecuadas condiciones para el cultivo de forrajes de alto valor nutricional, que favorecen el desarrollo y crecimiento del animal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los productores por el apoyo con la información para la realización de este trabajo. El estudio fue financiado por Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) y el Sistema General de Regalías con el proyecto «Desarrollo y establecimiento del Centro de Desarrollo Agrobiotecnológico de Innovación e Integración Territorial, el Carmen de Viboral, Antioquia, Occidente (CEDAIT)», Subcomponente Sistema Experto; con código BPIN 2016000100060.

LITERATURA CITADA

1. **Apráez JE, Gálvez-Cerón A, Tapia E, Jojoa L, León J, Zambrano D, Zambrano HR, et al. 2012.** Determinación de los factores edafoclimáticos que influyen en la producción y calidad del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) en condiciones de no intervención. *Livest Res Rural Dev* 24(42). [Internet]. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd24/3/apra24042.htm>
2. **Barahona R, Theodorou M, Lascano CE, Owen E, Narvaez N. 2003.** *In vitro* degradability of mature and immature leaves of tropical forage legumes differing in condensed tannin and nonstarch polysaccharide content and composition. *J Sci Food Agr* 83: 1256-1266. doi: 10.1002/jsfa.1534
3. **Barahona-Rosales R, Sánchez-Pinzón M. 2005.** Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales y estrategias para aumentarla. *Corpoica Cienc Tecnol. Agropecu* 6: 69-82.
4. **Cardona J. 2012.** Módulo Pastos y especies forrajeras. Federación Colombiana de Ganaderos. [Internet]. Disponible en: <https://www.fedegan.org.co/modulo-pastos-y-especies-forrajeras>.
5. **Cardozo PF, Sánchez ML, Baquero HI, Ramírez GM, Díaz P, Villaneda E. 2008.** Uso óptimo de insumos y modernas herramientas de costeo: estrategias para la competitividad de la lechería especializada del trópico alto colombiano. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA* 216 p.
6. **Chakraborty K, Mistri B. 2015.** Importance of soil texture in sustenance of agriculture: a study in Burdwan-I CD Block, Burdwan, West Bengal. *Econ Geogr* 21: 475-482.
7. **De Baerdemaeker J. 2013.** Precision agriculture technology and robotics for good agricultural practices. *IFAC Proc Vol46: 1-4*. doi: 0.3182/20130327-3-JP-3017.00003
8. **[FEDECACAO] Federación Nacional de Cacaoteros. 2022.** Producción Nacional de Cacao. [Internet]. Disponible en: <https://www.fedecacao.com.co/economianacional>
9. **Hermelin M. 1992.** Los suelos del oriente antioqueño. Un recurso no renovable. *Bull l'Institut Français d'Études Andines* 21: 25-36. doi: 10.3406/bifea.1992.1054
10. **[ICA] Instituto Colombiano Agropecuario. 2022.** Censos pecuarios nacional. [Internet]. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>

11. [IGAC] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2007a. Estudio general de suelos y zonificación de tierras Departamento de Antioquia. Tomo 1. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. p 61-754.
12. [IGAC] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2007b. Estudio general de suelos y zonificación de tierras Departamento de Antioquia. Tomo 3. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. p 810-820.
13. Jiménez-Heredia Y, Martínez C, Mancera-Rodríguez N. 2010. Características físicas y químicas del suelo en diferentes sistemas de uso y manejo en el centro agropecuario Cotové, Santa Fe de Antioquia, Colombia. Suelos Ecuatoriales 40: 176-188.
14. Lacasta C, Meco R, Maire N. 2005. Evolución de las producciones y de los parámetros químicos y bioquímicos del suelo, en un agrosistema de cereales sometido a diferentes manejos de suelo durante 21 años. En: Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación. Córdoba.
15. Montealegre F, Rojas J, Jaimes Y. 2021. Factores agronómicos y socioeconómicos que inciden en el rendimiento productivo del cultivo de cacao. Un estudio de caso en Colombia. FAVE Sección Ciencias Agrarias 20: 59-73. doi: 10.14409/fa.v20i2.10625
16. Pei X, Sudduth KA, Veum KS, Li M. 2019. Improving in-situ estimation of soil profile properties using a multi-sensor probe. Sensors 19: 1011. doi: 10.3390/s19051011
17. R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
18. Sossa CP, Barahona R. 2015. Comportamiento productivo de novillos pastoreando en trópico de altura con y sin suplementación energética. Rev Med Vet Zoot 62: 67-80. doi: 10.15446/rfmvz.v62n1.49386
19. [UPRA] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. 2016. Evaluaciones Agropecuarias Municipales. [Internet]. Disponible en: <https://upra.gov.co/es-co/Paginas/eva.aspx>
20. USDA-NRCS. 2014. Soil survey investigations report. In: Burt R (ed). Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Lincoln, Nebraska: USDA-NRCS.
21. van-Vliet J, Slingerland M, Giller K. 2015. Mineral nutrition of cocoa. A review. Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands. 57 p/
22. White RE. 2005. Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource. 4th ed. Oxford: Blackwell. 384 p.
23. Wood SN. 2017. Generalized additive models: an introduction with R 2nd ed. Chapman and Hall/CRC. 496 p.