









Soil bulk density and aggregate size control plant root growth of *Megathyrus maximus*

La densidad aparente y el tamaño de agregados del suelo controlan el crecimiento radical de *Megathyrus maximus*

Lucía E. Ocampo Quijano ^{1,4}, Walter N. Osorio Vega ^{1,5}, Judith Martínez Atencia ^{2,6}, Kenneth R. Cabrera Torres ^{3,7}.

¹Universidad nacional de Colombia sede Medellín. Medellín, Antioquía, Colombia. ²Corporación colombiana de investigación agropecuaria Agrosavia.

³Universidad nacional de Colombia sede Medellín. Medellín, Antioquía, Colombia. ⁴  leocampo@unal.edu.co.

⁵  nwosorio@unal.edu.co. ⁶  jcmartinez@agrosavia.co. ⁷  krcabrer@unal.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.88785>

2021 | 70-4 p 353-362 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 01-07-2020 Acep.:23-11-2021

Resumen

La importancia de las propiedades físicas del suelo influye de manera apreciable en su funcionamiento, calidad del agua, control climático, ciclo de los nutrientes y biodiversidad, entre otros. Estas proporcionan más funciones ecosistémicas que solamente el aporte nutricional para la producción agrícola. Actualmente, el suelo está sometido a presión de manejo para la producción de alimentos, energía y materia prima y esto ha llevado a su deterioro físico y degradación. Este trabajo tiene como objetivo evaluar los efectos de la densidad aparente y el tamaño de agregados de suelo de sistemas silvopastoriles (SSP) (proveniente de pasturas del bosque seco tropical) sobre el crecimiento del pasto guinea (*Megathyrus maximus*) cv. Mombasa. Para tal fin, se realizaron dos experimentos separados bajo condiciones de invernadero, estableciendo valores crecientes a cada variable a través de ejercer fuerzas mecánicas (densidad aparente: 0.93-1.80 Mg m⁻³) y tamizado (tamaño medio de agregados: 0.125-7.15 mm) y luego se sembraron semillas del pasto y se dejaron crecer por 30 días. Se encontraron dos modelos funcionales que relacionan la biomasa de las raíces del pasto con el valor de la densidad aparente y con el tamaño medio de agregados del suelo. Se concluye que para ambas variables se detectan modelos de regresión cuadrática, es decir, de punto óptimo; siendo estos valores óptimos para la densidad aparente de 1.0 Mg m⁻³ y de tamaño de agregados de 1.5-2.0 mm. Estos parámetros podrían ser utilizados como indicadores físicos en el diagnóstico de la salud del suelo y de utilidad en el establecimiento de pasturas de la región del Valle del Río Sinú.

Palabras clave: densificación del suelo, indicadores, pasto guinea, sistemas silvopastoriles, salud del suelo

Abstract

The importance of physicals properties of soil has an appreciable influence on their functions, water quality, climate control, nutrient cycling, and biodiversity, among others. These provide more ecosystem functions than just the nutritional contribution to agricultural production. Currently, the soil is under management pressure to the food production energy and raw material, which has led to its physical deterioration and degradation. The objective of this study is to evaluate the effects of bulk density and soil aggregate size silvopastoral systems (from tropical dry forest pastures) on the growth of guinea grass (*Megathyrus maximus*) cv. Mombasa. To this end, two separate experiments were carried out under greenhouse conditions, by establishing increasing values of each variable through exerting mechanical forces (bulk density: 0.93-1.80 Mg m⁻³) and sieved (average size of aggregates: 0.125-7.15 mm) and then grass seeds were sown and allowed to grow for 30 days. Two functional models are found which relate the biomass of grass roots with the value of bulk density and with the average size of soil aggregates. It is concluded that for both variables, quadratic regression models are detected, namely, of optimal point; being these optimal values for the apparent density of 1.0 Mg m⁻³ and of aggregate size of 1.5-2.0 mm. These parameters could be used as physical indicators in the diagnosis of soil health in the Rio Sinú Valley region.

Keywords: soil densification, indicators, pasture guinea, silvopastoral systems, soil health

Introducción

El suelo desempeña un papel destacado en la regulación y aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos (Martínez *et al.*, 2014; Tarrasón, *et al.*, 2016). La estructura del suelo controla muchos procesos, atributos estructurales del suelo como la densidad aparente y el tamaño de agregados pueden regular algunas funciones del suelo como su productividad (Karlen *et al.*, 2011; Andrews *et al.*, 2014; Reinhart *et al.*, 2015) y otras propiedades que se correlacionan con su función, como la aireación, capacidad de infiltración, penetración de las raíces, etc. Además, la estructura del suelo también refleja la susceptibilidad a la erosión, entre otros procesos (Angers, 1992; Rabot *et al.*, 2018) this review intends to evaluate the potential of observable soil structural attributes to be used in the assessment of soil functions. We focus on the biomass production, storage and filtering of water, storage and recycling of nutrients, carbon storage, habitat for biological activity, and physical stability and support. A selection of frequently used soil structural properties are analyzed and discussed from a methodological point of view and with respect to their relevance to soil functions. These are properties extracted from soil profile description, visual soil assessment, aggregate size and stability analysis, bulk density, mercury porosimetry, water retention curve, gas adsorption, and imaging techniques. We highlight the greater relevance of the pore network characterization as compared to the aggregate perspective. We identify porosity, macroporosity, pore distances, and pore connectivity derived from imaging techniques as being the most relevant indicators for several soil functions. Since imaging techniques are not widely accessible, we suggest using this technique to build up an open access “soil structure library” for a large range of soil types, which could form the basis to relate more easily available measures to pore structural attributes in a site-specific way (i.e., taking into account texture, soil organic matter content, etc.). El concepto de salud del suelo ha surgido para integrar las funciones del suelo que permitan la toma de decisiones dirigidas al manejo sostenible del mismo y al mantenimiento de sus servicios ecosistémicos (Ussiri *et al.*, 2005; Tarrasón *et al.*, 2016). Desafortunadamente, a nivel global las intervenciones humanas han provocado la degradación de las tierras a través de la deforestación y explotación de bosques (574 Mha), sobrepastoreo (679 Mha), manejo impropio de suelos agrícolas (552 Mha), sobreexplotación de la vegetación para usos domésticos (133 Mha) y actividades industriales (23 Mha). En América latina la deforestación alcanza (100 Mha), el sobrepastoreo (68 Mha), el manejo de cultivos (64 Mha), la explotación de la vegetación, y actividades bioindustriales (12 Mha) (Mekuria *et al.*, 2018; Raju, *et al.*, 2013).

En Colombia 45 Mha presentan algún grado de degradación de suelos por erosión, 18.5 Mha de estas se encuentran en clima seco, 1.79 Mha de uso agrícola, 2.99 Mha de bosques fragmentados con pastos y cultivos (IDEAM, 2015). El mal manejo de las pasturas para la ganadería (Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019; Andrade *et al.*, 2015), las grandes extensiones de áreas con monocultivos que limitan la producción de biomasa, disminuye de la biodiversidad (Vides-Borrell *et al.*, 2019; Paredes *et al.*, 2018), la baja eficiencia y rentabilidad, así como el deterioro del medio ambiente entre otros (Lipiec y Stepniewski, 1995; López-Vigoa *et al.*, 2017). Lo anterior ha conllevado a un deterioro de propiedades físicas del suelo. Una alternativa para mejorar el manejo de pasturas ha sido el establecimiento de sistemas SSP (Martínez *et al.*, 2014).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una mezcla heterogénea de especies arbustivas, arbóreas o maderables, en compañía de un componente herbáceo, generalmente asociado a gramíneas, suelo y animales (Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019). Entre las gramíneas (*Poaceae*) que se han empleado en SSP están las del género *Megathyrsus*, el cual se caracteriza por su gran producción y calidad del forraje (Fortes *et al.*, 2016), dependiendo del cultivar, tienen la habilidad para tolerar condiciones limitadas de luz por cambios en su fisiología, y mejorar la calidad nutritiva (Silveira *et al.*, 2017). Adicionalmente, los árboles promueven una fuente de alimento extra para los animales, traen nutrientes de mayor profundidad al suelo, regulan el microclima del ecosistema, proveen sombra para el ganado (Portilla *et al.*, 2015; Murgueitio, 1992), que pueden reducir el estrés por calor, redundar en el bienestar animal y aumentar el consumo de alimento (Portilla *et al.*, 2015). Estos sistemas son considerados como un sistema de referencia en la evaluación de la salud del suelo en el bosque seco tropical, debido a que además mejorar el uso del suelo, contribuyen a la rehabilitación de suelos degradados mediante el aporte de materia orgánica a través de la participación de hojarasca, tallos y raíces finas (Martínez *et al.*, 2014), mejoramiento de la estructura del suelo, provisión de forraje para ganado en la estación seca.

A pesar de los beneficios descritos de sistemas silvopastoriles en estos ecosistemas han sido poco estudiados sus efectos en las propiedades físicas del suelo (Martínez *et al.*, 2014; Hargreaves *et al.*, 2019). No se conocen las relaciones funcionales entre los atributos sobre el desempeño del componente herbáceo, el cual es parte fundamental de su éxito y adopción en el SSP (Santiago-Hernández *et al.*, 2016). Lo anterior, es esencial para el desarrollo de indicadores del suelo útiles en el diagnóstico del deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y en el monitoreo de los cambios en el sistema cuando se establecen los programas de restauración como los sistemas silvopastoriles.

La hipótesis de este estudio es que hay una relación positiva entre los atributos físicos del suelo y el crecimiento del pasto. Por tanto, la medición de atributos físicos como la densidad aparente y el tamaño medio de los agregados medidos como indicadores de la productividad del suelo y utilizados en modelos de regresión se pueden usar como indicadores físicos de la salud del suelo y permite evaluar su efecto sobre el crecimiento de pasto guinea. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue modelar los atributos físicos como la densidad aparente y el tamaño de agregados de suelo (proveniente de pasturas del bosque seco tropical), en relación al crecimiento del pasto guinea (*Megathyrus maximus*) cv. Mombasa cultivado en suelos de sistemas silvopastoriles.

Materiales y métodos

Sitio. Se toman muestras del horizonte A (0-10 cm) de un Inceptisol, clasificado como *Aquic Dystrudept*, de una parcela cubierta con la gramínea *Megathyrus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs sin árboles, localizada en el Centro de Investigación-Turipaná (Agrosavia, 08°51'N, 75°49'O, 18 m de altitud), ubicada en el municipio de Cereté (Córdoba-Colombia). Esta zona presenta un período de lluvias de mayo a noviembre y un período seco de diciembre a abril. La precipitación media anual es de 1380 mm, la temperatura promedio de 28 °C, humedad relativa de 81 % y la evapotranspiración potencial de 1240 mm año⁻¹ (Estación climatológica Agrosavia-C.I. Turipaná). Según Holdridge (1971) la zona se clasifica ecológicamente como bosque seco tropical (bs-T). El análisis de suelo, realizado en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, presenta las siguientes características físico-químicas. Ver Tabla 1.

Posteriormente, el suelo se seca al aire durante siete días en el invernadero y luego se pasa por una malla de 5 mm para el estudio de densidad aparente. Las muestras de suelo se transfieren a recipientes de acrílico en el invernadero de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín (6°15'N, 75°34'O, 1491 m de altitud, temperatura ambiente 21-22 °C y humedad relativa 67 %) donde se someten a los tratamientos.

Plantas. Se utilizan semillas certificadas de pasto guinea (*Megathyrus maximus*) cv. Mombasa. Las semillas se germinan en cámara húmeda durante dos días, de allí se toman 16 semillas para la siembra directa a 1 cm de profundidad en materos de acrílico de 20x15 cm. Tres días después se ralean las plántulas para dejar cuatro plantas en cada matero. Las plantas se dejan crecer por un periodo de 30 días, durante el cual permanecen en el invernadero a la luz del día, y reciben agua cada dos días para mantener el suelo a humedad constante.

Tratamientos con densidad aparente. Se generan nueve tratamientos de densidad aparente: 0.93 (control), 0.95, 1.03, 1.06, 1.08, 1.20, 1.4, 1.6 y 1.8 Mg m⁻³. Las cinco primeras densidades cada 200 g de suelo reciben golpes con un peso constante (2.27 kg desde una altura de 12.5 cm), hasta ajustar 800 g por matero; para las densidades mayores la presión sobre el suelo se ejerce con una prensa hidráulica. Esto corresponde a la aplicación de las siguientes presiones (lbf m⁻²): 0 (control), 8.43x10⁻³, 1.686x10⁻³, 5.058x10⁻², 10.116x10⁻², 2.27x10⁵, 8.00x10⁵, 1.33x10⁶, 1.60x10⁶ y 2.40x10⁶, respectivamente. Cada tratamiento tiene cuatro repeticiones, para un total de 36 unidades experimentales.

Tratamientos con el tamaño de agregados. El suelo se pasa por una serie de tamices con el fin de obtener muestras entre dos tamaños de apertura de tamiz (mm) y se expresa en función del valor medio (mm), así: 8.0-6.3: 7.15 mm, 6.3-5.0: 5.65 mm, 4.76-3.0: 3.88 mm, 3.0-2.0: 2.5 mm, 2.0-1.0: 1.5 mm, 1.0-0.5: 0.75 mm, 0.5-0.25: 0.375 mm, ≤ 0.25 mm: 0.125 mm. En cada tamaño medio se obtienen 800 g de suelo, con los cuales se llenaron materos plásticos. Esto representa ocho tratamientos y cada uno tiene cuatro repeticiones, para un total de 32 unidades experimentales.

Variabes. Cada ocho días se mide la altura de plantas (mm) desde la superficie del suelo hasta el extremo de la hoja más alta. Treinta días después de la siembra se hace un corte de las cuatro plantas a una altura de 10 cm de la superficie del material vegetal, el forraje se seca en estufa (60 °C, 2 d) y se pesa en balanza analítica, (Ohaus PRseries) considerándose como la biomasa aérea seca joven (g/planta). Igualmente, se remueve del suelo la biomasa radicular (g/planta), la cual se recolecta con tamices para separar del suelo, el material radical. Éste se seca y se pesa.

Tabla 1. Características físicas y químicas del suelo de pasturas del Valle medio del río Sinú

Arena	Limo	Arcilla	MO	pH	Ca	Mg	K	CICE	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
----- % -----			----- cmol _c kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----							
22	26	52	8.2	5.8	17.4	9.7	10.4	28.1	14	12	184	9	6	4	0.8

*Métodos: Arena, Limo, Arcilla (Bouyoucos), MO: contenido de materia orgánica (Walkley- Black), pH (agua, 1:1), Ca, Mg y K (acetato de amonio 1 M), CICE= capacidad de intercambio catiónico efectiva (suma de cationes de intercambio), P-H₂PO₄ (Bray II), S-SO₄ (fosfato de calcio 0.008 M); Fe, Mn, Cu y Zn (Olsen-EDTA) y B (agua caliente). Detalles de los métodos pueden ser obtenidos en (SSL, 1992, p.693).

Diseño experimental y análisis estadístico. Cada experimento tiene un diseño completamente al azar, balanceado y con efectos fijos. Los datos de cada variable se someten a un análisis de homogeneidad de la varianza, independencia del error, independencia de las medias entre sí, de tal manera que se comprueba que no hubo relación de las medias y las varianzas y se convalidan los supuestos asociados, con errores experimentales aleatorios, independientes y normalmente distribuidos. Posteriormente, los datos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de separación de medias de Tukey. En ambos casos se emplea un nivel de significancia ($P \leq 0.05$). Los análisis se realizan con el software libre R versión 3.6.0 y R estudio versión 1.4.0. Se describe el modelo lineal utilizado para los parámetros biométricos:

$$Y_{ij} = \mu_i + \tau_i + EExp_{ij}$$

Donde: Y_{ij} : valor de la respuesta en la j -ésima observación del i -ésimo tratamiento. μ : media global.

τ_i : efecto del i -ésimo tratamiento y $EExp_{ij}$: error experimental de la i -ésima unidad experimental de la j -ésima observación

Desarrollo de los modelos funcionales. Teniendo en cuenta la base de datos obtenida en los ensayos del efecto de las propiedades físicas del suelo se emplea la metodología de Andrews (2004). Esta consiste en la toma de datos del atributo y a través de un software, en este caso el software *Curve Expert*, se analiza la información con el fin de encontrar el mejor modelo que se ajuste a la función del suelo. Se analizan los datos de biomasa radical de los atributos físicos evaluados.

Resultados

Densidad aparente. Los resultados indican que hay diferencias altamente significativas ($P \leq 0.001$) en los parámetros biométricos en función de la variación de la densidad aparente (Tabla 2), particularmente cuando los valores fueron mayores de 1.08 Mg m^{-3} . Cuando la densidad aparente tiene valores de 0.93 a 1.08 Mg m^{-3} , la altura de las plantas fluctúa entre 578.8 y 609.7 mm, sin presentar diferencias significativas entre sí (Figura 1A). Sin embargo, valores de densidad aparente mayores generan una reducción significativa en la altura de las plantas, alcanzando valores intermedios con 1.20 Mg m^{-3} (449.8 mm) y con 1.40 y 1.60 los valores son aun significativamente menores (307.6 y 207.4 mm, respectivamente) pero no difieren entre sí. Con el valor de densidad aparente más alto (1.80 Mg m^{-3}) las plantas exhibieron un crecimiento muy limitado (20 mm).

La biomasa seca aérea presenta un comportamiento similar (Figura 1B). En las densidades aparentes de 0.93 , 1.02 y 1.08 Mg m^{-3} , la biomasa seca aérea varía significativamente de 1.15 a 1.48 g/planta, sin

presentar diferencias significativas entre sí (Tabla 1). Con densidad aparente de 1.20 Mg m^{-3} la biomasa aérea seca disminuye a un valor de 0.69 g/planta. Además, a mayores densidades aparentes (1.40 , 1.60 y 1.80 Mg m^{-3}) la biomasa aérea seca disminuye de manera significativa obteniéndose valores de 0.25 , 0.04 y 0.0 g/planta, respectivamente.

Por otro lado, la biomasa radical tiene un desempeño diferente en comparación a las anteriores variables y es más sensible que las otras variables (Tabla 1, Figura 1C). Por ejemplo, en la densidad aparente 0.93 Mg m^{-3} presenta un valor de 0.24 g/planta y cuando las densidades tuvieron valores de 0.97 , 1.02 , 1.06 y 1.08 Mg m^{-3} , la biomasa radical está en un rango de 0.32 a 0.45 g/planta, sin que se presentaran diferencias significativas entre ellas. Con el aumento de la densidad aparente de 1.2 hasta 1.6 Mg m^{-3} se evidencia una disminución significativa en la biomasa radical con valores 0.19 , 0.04 y 0.02 g/planta, respectivamente. Con la densidad más alta (1.8 Mg m^{-3}) no se observa crecimiento de la biomasa radical.

Tabla 2. Parámetros biométricos de *Megathyrsus maximus* cv. Mombasa en función de la variación de la densidad aparente

Da (Mg m^{-3})	Altura (mm)	Biomasa aérea (g/planta)	Biomasa radical (g/planta)
0.93	609.7 ^a	1.14 ^b	0.24 ^{bc}
0.97	578.8 ^a	1.93 ^a	0.45 ^a
1.02	592.5 ^a	1.48 ^b	0.43 ^a
1.06	600.3 ^a	1.55 ^{ab}	0.38 ^{ab}
1.08	598.1 ^a	1.33 ^b	0.33 ^{abc}
1.20	449.8 ^b	0.69 ^c	0.19 ^{cd}
1.40	307.6 ^c	0.25 ^d	0.04 ^{de}
1.60	207.4 ^{cd}	0.04 ^d	0.02 ^{de}
1.80	20.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^e

Cada valor es el promedio de cuatro repeticiones. Promedios con letras diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Comparaciones verticales.

Tamaño de agregados. Los resultados muestran que hay diferencias altamente significativas ($P \leq 0.001$) en los parámetros biométricos en función del tamaño medio de agregados (Tabla 3). En general, hay una tendencia a disminuir la altura de las plantas con el incremento del tamaño medio de agregados. Por ejemplo, con los tamaños más bajos de 0.125 , 0.375 , 0.750 y 1.50 mm las alturas varían entre 416.5 - 479.6 mm, respectivamente, sin diferencias significativas entre sí. Cuando el tamaño de agregados aumenta a 2.50 , 3.88 y 5.65 mm, los valores de la altura disminuyen al rango de 398.0 - 375.9 mm, sin diferencias significativas entre ellos. Con el tamaño de agregados más grande (7.15 mm) se restringió el crecimiento de la planta y la altura fue de sólo 324.5 mm.

La biomasa aérea seca muestra un desempeño más o menos similar. En este caso con los tamaños de agregados 0.125 y 0.375 mm la biomasa aérea seca tiene el mismo valor (0.99 g/planta). Con los tamaños intermedios de 0.75 a 3.88 mm se alcanzan los valores de biomasa seca aérea más altos (1.04-1.20 g/planta), sin diferencias significativas entre estos valores. Al aumentar el tamaño de los agregados a valores medios de 5.65 y 7.15 mm, la biomasa aérea seca disminuye significativamente a valores de 0.42 y 0.24 g/planta, respectivamente.

Por su parte, la biomasa radical presenta un comportamiento que fue más sensible a los cambios del tamaño de agregados que las otras variables (al igual que con la densidad aparente). Con los tamaños de agregados más bajos o más altos las raíces muestran pobre crecimiento, mientras que en los valores intermedios se observa mejor desempeño de las plantas. Con los tamaños de 0.125 mm el valor de la variable es de 0.32 g/planta, con los valores de 0.75 a 3.88 aumenta significativamente la biomasa radical a valores de 0.62 a 0.76 g/planta (sin diferencias significativas entre ellos). Con el tamaño agregado de 5.65 mm la biomasa disminuye significativamente hasta valores de 0.21 g/planta (que no difiere con el obtenido al menor tamaño 0.125 mm). Con el tamaño de agregados más grande (7.15 mm) se obtiene el valor más bajo de la biomasa seca radical (0.11 g/planta).

Tabla 3. Parámetros biométricos de *Megathyrsus maximus* cv. Mombasa en función de la variación del tamaño medio de agregado

Tamaño medio de agregado (mm)	Altura (mm)	Biomasa aérea seca (g/planta)	Biomasa radical seca (g/planta)
0.125	479.62 ^a	0.99 ^b	0.32 ^c
0.375	418.75 ^{ab}	0.99 ^b	0.56 ^b
0.750	422.64 ^{ab}	1.20 ^a	0.64 ^{ab}
1.50	416.51 ^{ab}	1.12 ^{ab}	0.76 ^a
2.50	397.95 ^b	1.04 ^{ab}	0.74 ^a
3.88	384.73 ^{bc}	1.18 ^{ab}	0.62 ^{ab}
5.65	375.88 ^{bc}	0.42 ^c	0.21 ^{cd}
7.15	324.48 ^c	0.24 ^c	0.11 ^d

Cada valor es el promedio de cuatro repeticiones. Promedios con letras diferentes, en cada variable, son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Modelos funcionales de la biomasa seca radical y los indicadores físicos del suelo. La tendencia de los parámetros biométricos al efecto de la densidad aparente se muestra en la Figura 1, la cual refleja una relación “menos es mejor”, particularmente con la función de productividad de biomasa aérea seca y la altura. Por otro lado, la biomasa seca radical (g/planta) presenta un pico máximo alrededor de 1.0 Mg m^{-3} , por debajo y por encima de este valor la biomasa radical seca tiende a disminuir su valor (Figura 1).

El crecimiento del pasto guinea en función del tamaño medio de los agregados tiene un comportamiento similar a los efectos observados con los cambios en la densidad aparente. Así, las variables biomasa aérea seca y altura tienden a aumentar en suelos con los agregados de tamaños menores y, por el contrario, cuando aumentan el tamaño medio de los agregados por encima de 2.0 mm se disminuyen los valores de estas variables, con una tendencia de “menos es mejor”. Por su parte, la biomasa radical seca también presenta una tendencia de “pico máximo” alrededor del tamaño de agregados de 1.5-2.0 mm; con los valores extremos de tamaño de agregados disminuye su valor (Figura 2).

A continuación, se presenta el modelo funcional de la biomasa radical de *Megathyrsus maximus* cv. Mombasa en función de la densidad aparente (Figura 3). Se usa esta variable para la modelación, dado que es la más sensible a los cambios del atributo físico del suelo. Este representa la relación del indicador de la planta con la función del suelo, el mejor modelo que se ajusta a la variabilidad fue un *modelo racional* de forma:

$$Y = \frac{a + b}{1 - ex + dx^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Con coeficiente de correlación (r) de 0.926, el coeficiente de determinación (r^2) 0.86 y un valor AICC=-181.45. Los parámetros a , b , c y d son considerados parámetros de localidad, sitio específico dependientes del tipo de suelo y del clima (Linn y Doran, 1984; Karlen *et al.*, 2011). El modelo muestra un comportamiento de “punto óptimo” (Figura 3).

Por otro lado, la biomasa radical y el tamaño medio de agregados tienen el modelo de *Hoerl* como el mejor, con un comportamiento de “punto óptimo”. El modelo tiene un coeficiente de correlación (r) 0.938, un coeficiente de determinación (r^2) de 0.88 y un AICC=-146.27 (Figura 4). El modelo fue de la forma $Y = a \times b^x \times x^c$ (ecuación 2). Los parámetros a , b y c son también considerados parámetros de localidad, sitio específico dependientes del tipo de suelo y clima.

Discusión

Los resultados obtenidos soportan la hipótesis de que hay una relación entre los atributos físicos estructurales del suelo (densidad aparente y tamaño de agregados) y el crecimiento del pasto, de tal manera que al ser modelados como una función del crecimiento del pasto sirven como indicadores de la salud del suelo, dado que pueden representar funciones del suelo.

El aumento de la densidad aparente por fuerza mecánica representa una compactación que conduce a una disminución de todos los valores biométricos de la planta; la biomasa radical seca (g/planta) es

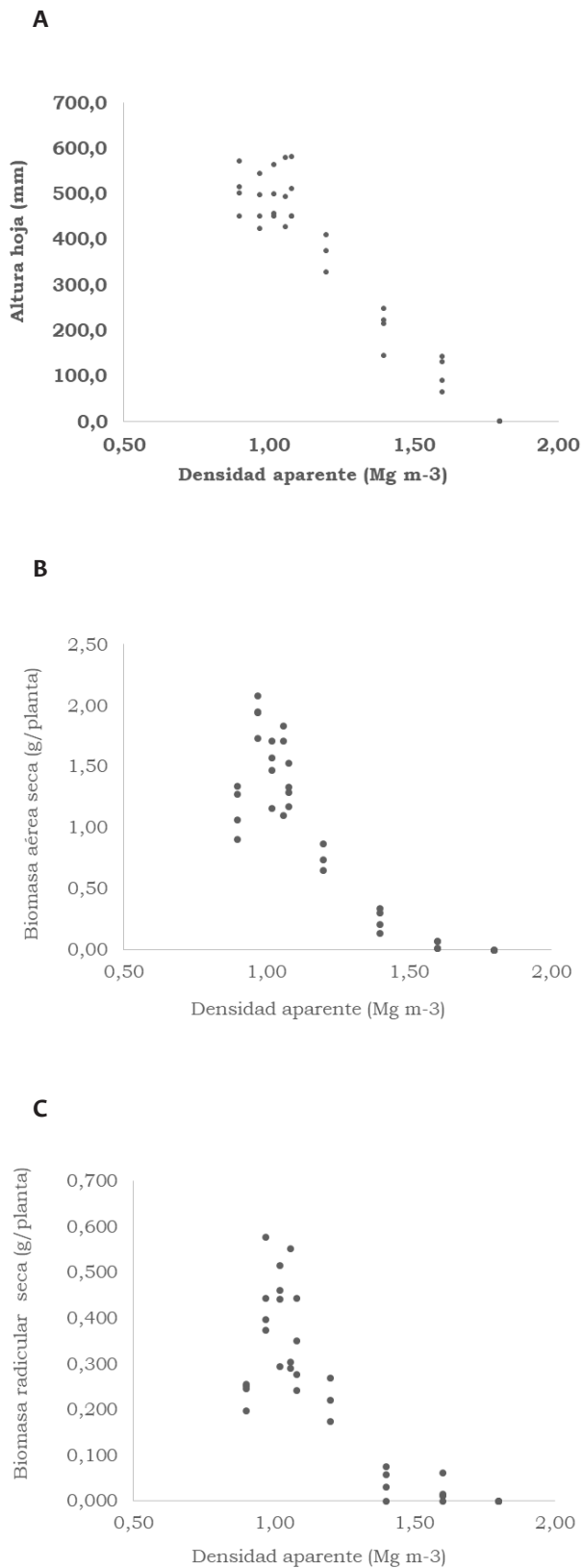


Figura 1. Altura (A) y biomasa aérea seca (B) y radical seca (C) de pasto guinea (*Megathyrus maximus* cv. Mombasa) en función de la densidad aparente de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia

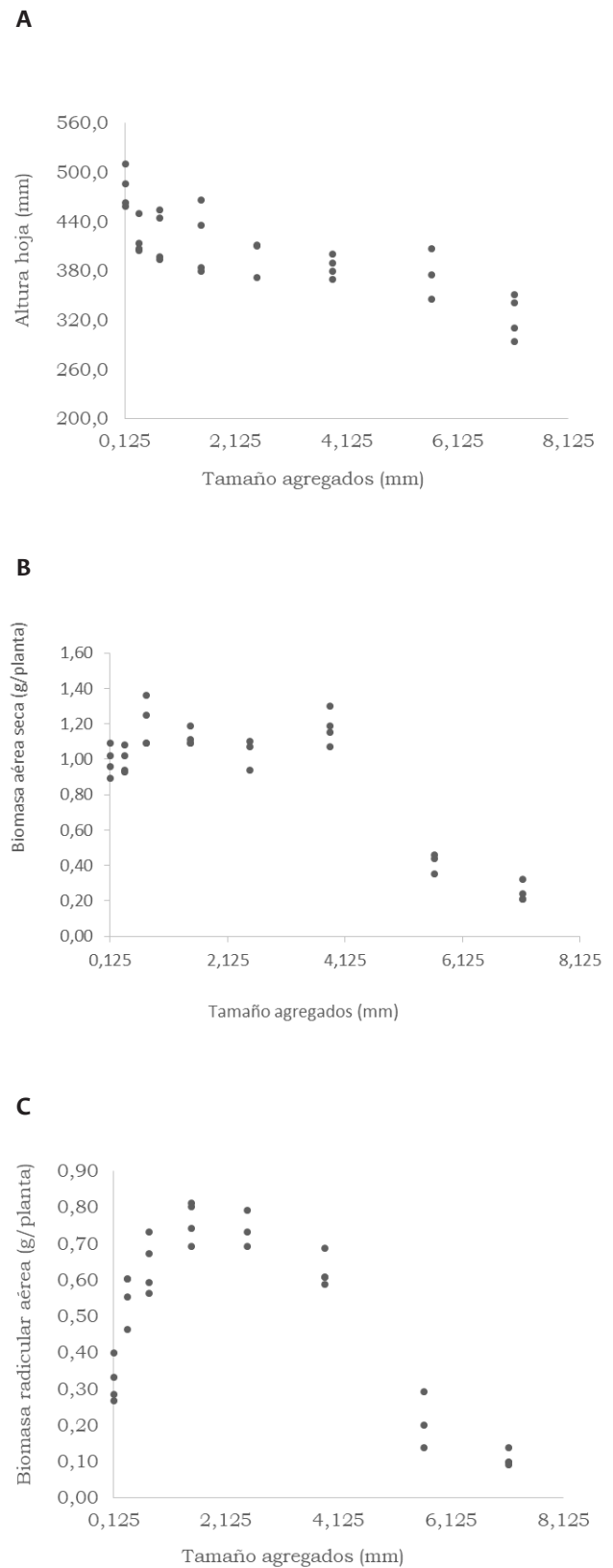


Figura 2. Altura (A) y biomasa seca aérea (B) y radical seca (C) de pasto guinea (*Megathyrus maximus* cv. Mombasa) en función del tamaño medio de agregados de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.

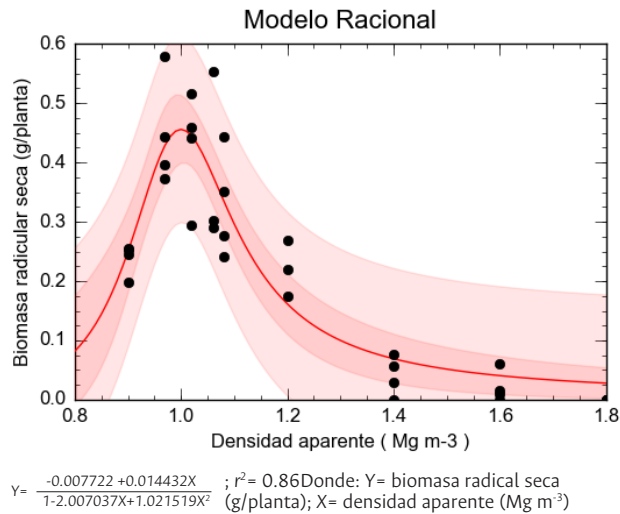


Figura 3. Modelo funcional de biomasa radical seca del pasto guinea cv. Mombasa en función de la densidad aparente de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.

más sensible a los cambios en la densidad aparente. Esta última presenta un pico máximo, en la densidad aparente alrededor de $\sim 1.0 \text{ Mg m}^{-3}$, a diferencia de la biomasa aérea seca (g/planta) y la altura (mm), la cuales alcanzan su valor más alto a una densidad aparente de 0.93 Mg m^{-3} . Por encima de la densidad aparente mayor de 1.0, la biomasa radical disminuye progresivamente. Dicha compactación reduce la porosidad total del suelo y así disminuye la infiltración, la capacidad de retención de agua, la aireación del suelo, la captación de nutrientes, el desarrollo y profundidad de las raíces, como ha sido reportado por Hargreaves *et al.* (2019). Debido a lo anterior, el movimiento y disponibilidad del agua, así como el drenaje y la penetración de las raíces, son influenciadas de manera negativa por el aumento en la densidad aparente (Moebius-Clune *et al.*, 2016) physical, and chemical measurements. These measurements include soil texture (to help interpret other measured indicators.

Las partículas comprimidas reducen el espacio poroso para el movimiento del agua. En un suelo poroso, los espacios porosos permiten el flujo de aire, agua y el crecimiento de las raíces, lo cual tiene efectos sobre el transporte difusivo y de flujo masa desde el suelo hasta las raíces, la transformación de nutrientes y su posterior absorción (Lipiec y Stepniewski, 1995). Lo anterior está particularmente influenciado por alteración del estado de aireación del suelo, factor importante que influye en el potencial redox que a su vez afecta la actividad microbiana, disponibilidad y absorción de nutrientes, particularmente de N, Mn y Fe (Miner *et al.*, 2018).

Es importante aclarar que los efectos de la compactación sobre las funciones del suelo varían según el tipo de suelo (Rabot *et al.*, 2018). En suelos arenosos, debido a sus partículas de suelo más

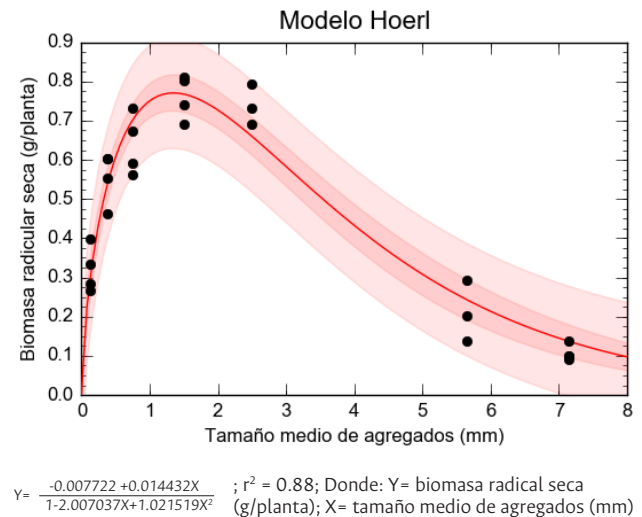


Figura 4. Modelo funcional de biomasa radical seca del pasto guinea cv. Mombasa en función del tamaño de agregados de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.

grandes y el tamaño de poro más grande, son menos susceptibles a la compactación, incluso cuando están húmedos. En contraste, los suelos franco-arcillosos-limosos, como el usado en el presente estudio, con partículas más pequeñas y poros de menor tamaño, son más susceptibles a compactarse, especialmente cuando están húmedos (Horn *et al.*, 1995). Se considera que en los suelos arcillosos densidades aparentes de $\geq 1.4 \text{ Mg m}^{-3}$ limitan el crecimiento de raíces (Hargreaves *et al.*, 2019; Fulton *et al.*, 2002). Este nivel crítico de densidad aparente está por encima de los hallazgos de este estudio ya que el crecimiento de raíces se reduce en 10 % con valores de densidad aparente de $1.05\text{-}1.13 \text{ Mg m}^{-3}$ y en 20 % con valores de $1.07\text{-}1.16 \text{ Mg m}^{-3}$. Estos cambios en la producción de biomasa radical del 10 y 20 % están asociados a cambios relativamente pequeños de densidad aparente, lo cual confirma la sensibilidad de este parámetro biométrico. Varios autores (Pellant, M., P. Shaver, D.A. Pyke, 2005; Reinhart *et al.*, 2015) sugieren que si bien la productividad en biomasa es un parámetro útil, insisten que deberían considerarse medidas funcionales intrínsecas al suelo mismo tales como la infiltración, la conductividad hidráulica, la aireación, el intercambio de gases, entre otras. Por su parte, Rabot *et al.* (2018) soportan que los cambios en el suelo y su estructura deberían concentrarse más en los cambios en el espacio poroso ("perspectiva del poro") que en los cambios en la matriz sólida del mismo. Por ejemplo, en este estudio la porosidad total en [Porosidad (%) = $1 - D_a/D_r$, donde D_a = densidad aparente (Mg m^{-3}) y D_r = densidad real de partículas con valor medio = 2.65 Mg m^{-3}] disminuye del 66.04 % con la densidad aparente más baja a un valor 32.08 % con la densidad más alta. Ya que el valor de densidad aparente más adecuado fue de 1.0 Mg m^{-3} , la porosidad total es de 62.3 % que puede usarse como indicador de referencia.

Vale la pena aclarar que los cambios en la Dap detectados en este estudio están asociados con las texturas FARL y que para otros suelos más arenosos los valores podrían ser diferentes.

El tamaño de agregados en el rango de los meso-agregados (0.125 mm-2.0 mm) presenta los valores más altos de biomasa área seca (g/planta) y altura (mm) (comportamiento “menos es mejor”), mientras que con la biomasa radical ocurre un comportamiento de “punto óptimo” el cual se presentó entre ~1.5-2.0 mm. En general, esto concuerda con Dexter (1989), quien indica que existe una relación inversa entre el tamaño de los agregados y la densidad aparente. Así, al disminuir el tamaño del agregado la fracción de poro en ese tamaño se elimina (< 1 mm) e inhibe el crecimiento vegetal y afecta otras funciones del suelo. Esto fue evidente en este trabajo dado el reducido crecimiento de la biomasa radical en los agregados de menor tamaño (0.125 mm). Se halló que bajo estas condiciones hubo un aumento en la densidad aparente que, presumiblemente, aumenta la resistencia mecánica al crecimiento radical. Igualmente, al aumentar el tamaño de agregados (7.15 mm) se reduce la biomasa radical seca (g/planta), lo cual puede conducir a pérdidas de agua y temperaturas más altas, que a su vez pudo producir estrés hídrico (Ordoñez *et al.*, 2018).

En el rango de los macroagregados > 2.0 mm, se disminuyen todos los parámetros biométricos en proporción al aumento en el tamaño de los agregados, esto se debe probablemente a la elevada macroporosidad en dicho rango. Se puede concluir que para *Megathyrus maximus* se presenta una probabilidad de disminuir su producción y particularmente su biomasa radical si hay agregados del suelo en un gran porcentaje > 2 mm y también cuando hay un buen porcentaje de valores < 0.375 mm. De otro lado, según Braunack y Dexter (1989), la información de los efectos del tamaño a agregados en las propiedades físicas del suelo permitirá el diseño de semilleros con óptimas condiciones físicas para el brote y la germinación, con una producción eficiente de semilleros para diferentes cultivos y varios ambientes (Hosseini *et al.*, 2015; Braunack y Dexter, 1989).

Se estima que el impedimento mecánico para el crecimiento radical es más crítico que el abastecimiento de oxígeno, las raíces crean huecos y espacios porosos para aire y agua actuando como válvulas biológicas. Además, proveen exudados para pegar las partículas del suelo formando y estabilizando macroagregados y suministrando nutrientes para los microorganismos. De esta manera, al existir tales restricciones al crecimiento de las raíces también se ve afectada la capacidad de resiliencia del suelo (López, 2002).

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, en el cual se encuentran los valores de densidad aparente y del tamaño medio de agregados asociados

a puntos óptimos deben ser validados en condiciones de campo. Esto permitiría posteriormente su implementación como indicadores de salud del suelo, ya que valores cercanos y alejados a los puntos máximos se espera que den contrastes en el crecimiento de raíces y de las plantas en general. Igualmente, este escenario podría permitir evaluar el impacto del cambio de estas variables sobre la actividad microbiana del suelo y sobre la disponibilidad de nutrientes (Hosseini *et al.*, 2015). Así mismo, el monitoreo de estas variables y las funciones ecosistémicas del suelo permitirá conocer el grado en que un suelo está deteriorado y como algunas prácticas de uso y manejo del mismo (p.e., SSP, labranza mínima, fertilización orgánica) podrían revertir integralmente los procesos degradativos de la salud del suelo.

Conclusiones

Los cambios en la densidad aparente y el tamaño medio de agregados tuvieron un impacto significativo en el desempeño del pasto *Megathyrus maximus* cv. Mombasa, particularmente en el crecimiento radical, el cual resultó ser muy sensible a tales cambios. Con esta variable los modelos funcionales obtenidos fueron del comportamiento “punto óptimo”, los cuales están alrededor de ~1.0 Mg m⁻³ y en el rango ~1.5-2.0 mm.

Agradecimientos

A Colciencias, por el apoyo de sostenibilidad otorgado para el desarrollo de este trabajo, y al profesor Orlando Ruiz, Coordinador del Laboratorio de Suelos y al área curricular de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, por su colaboración en el análisis de muestras, y el apoyo en la divulgación de los resultados de este trabajo, respectivamente.

Referencias

- Andrade, B.O., Koch, C., Boldrini, I.I., Vélez-Martin, E., Hasenack, H., Hermann, J.M., Kollmann, J., Pillar, V.D. y Overbeck, G.E. (2015). Grassland degradation and restoration: a conceptual framework of stages and thresholds illustrated by southern Brazilian grasslands. *Natureza & Conservação*, 13(2), 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2015.08.002>
- Andrews, S.S. y Carrol, R. (2014). Designing a soil quality assessment tool for sustainable management. *Ecological Applications*, 11(6), 1573-1585. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1573:DASQAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2)
- Angers, D.A. (1992). Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Science Society of America Journal*, 56(4), 1244-1249. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600040039x>
- Barragán-Hernández, W.A., y Cajas-Girón, Y.S. (2019). Cambios bromatológicos y estructurales en *Megathyrus maximum* bajo cuatro arreglos silvopastoriles. *Ciencia y Tecnología*

- Agropecuaria*, 20(2), 231-244. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1458
- Braunack, M.V. y Dexter, A.R. (1989). Soil aggregation in the seedbed: A review. I. Properties of aggregates and beds of aggregates. *Soil and Tillage Research*, 14(3), 259-279. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(89\)90013-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(89)90013-5)
- Fortes González, D., Valenciaga, D., García, C.R., García, M., Cruz, A.M. y Romero, A. (2016). Evaluation of three varieties of *Megathyrus maximus* in the dry period. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 50(1), 131-137. https://www.researchgate.net/publication/313367209_Evaluation_of_three_varieties_of_Megathyrus_maximus_in_the_dry_period
- Hargreaves, P.R., Baker, K.L., Graceson, A., Bonnett, S., Ball, B.C. y Cloy, J.M. (2019). Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. *European Journal of Agronomy*, 109, 125916. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125916>
- Horn R., Domzłal, H., Słowińska-Jurkiewicz, A. y van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 23-36. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00479-C](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-C)
- IDEAM, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A.). (2015). *Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia-2015*. IDEAM, MADS.
- Douglas, K.L., Wienhold, B.J., Kang, S., Zobeck, T.M. y Andrews, S.S., (2011). Indices for soil management decisions. *Soil Management Building a Stable Base for Agriculture*, 39-50. <https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1381>
- Linn, D.M. y Doran, J.W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1267. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x>
- Lipiec, J. y Stepniewski, W. (1995). Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 37-52. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00474-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00474-7)
- López Falcón, R. (2002). *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Segunda edición. Talleres gráficos del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial Universidad de los Andes (CIDIAT), Mérida (Venezuela). (pp. 40-75).
- Bernal Figueroa, A.A., Montaña Santana, J.C., Sánchez Avella, R., Albarran, L. y Forero Ulloa, F.E. (2021). Evaluación de materiales enalantes y orgánicos sobre las bases intercambiables de un suelo sulfatado ácido en invernadero. *Temas Agrarios*, 19(1), 19-31. https://www.researchgate.net/publication/351005545_Evaluacion_de_materiales_enalantes_y_organicos_sobre_las_bases_intercambiables_de_un_suelo_sulfatado_acido_en_invernadero
- López-Vigoa, O., Sánchez-Santana, T., Iglesias-Gómez, J.M., Lamela-López, L., Soca-Pérez, M., Arece-García, J. y Milera-Rodríguez, M. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes*, 40(2), 83-95. <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci-arttext&pid=S0864-03942017000200001>
- Martínez, J., Cajas, Y.S., León, J.D. y Osorio, N.W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/359736>
- Mekuria, W., Wondie, M., Amare, T., Wubet, A., Feyisa, T. y Yitaferu, B. (2018). Restoration of degraded landscapes for ecosystem services in North-Western Ethiopia. *Heliyon*, 4(8), e00764. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00764>
- Miner, G.L., Delgado, J.A., Ippolito, J.A., Barbarick, K.A., Stewart, C.E., Manter, D.K., Del Grosso, S.J., Halvorson, A.D., Floyd, B.A. y Adamo, R.E.D. (2018). Influence of long-term nitrogen fertilization on crop and soil micronutrients in a no-till maize cropping system. *Field Crops Research*, 228, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.017>
- Moebius-Clune, B.N., Moebius-Clune, D.J., Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., Ristow, A.J., van Es, H.M., Thies, J.E., Shayler H.A. y Abawi, G.S. (2016). *Comprehensive assessment of soil health. The Cornell Framework Manual*. <http://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/manual.pdf>
- Murgueitio, E. (1992). Sistemas sostenibles de doble propósito como alternativa para la economía campesina. *Livestock Research for Rural Development*, 4(3), 1-11. <http://www.lrrd.org/lrrd4/3/enrique1.htm>
- Ordóñez, I., López, I.F., Kemp, P.D., Descalzi, C.A., Horn, R., Zúñiga, F., Dec, D. y Dörner, J. (2018). Effect of pasture improvement managements on physical properties and water content dynamics of a volcanic ash soil in southern Chile. *Soil and Tillage Research*, 178, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.013>
- Osman, K.T. (2013). *Soils. Principles, properties and management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>
- Paredes, S.S., Stritzler, N.P., Bono, A. y Distel, R.A. (2018). Perennial warm-season grass monocultures and mixtures: Biomass production and soil improvement in semiarid and shallow soil conditions. *Journal of Arid Environments*, 154, 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.02.008>
- Pellant, M., P. Shaver, D.A. Pyke, and J.E. Herrick. 2005. Interpreting indicators of rangeland health, version 4. Technical Reference 1734-6. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Science and Technology Center, Denver, CO. BLM/WO/ST-00/001+1734/REV05. 122 pp. www.blm.gov/nstc/library/techref.htm
- Portilla Pinzón, D., Barragán Hernández, W.A., Carvajal Bazurto, C.T., Cajas Girón, Y. S. y Rivero Espitia, S.T. (2015). Establecimiento de sistemas silvopastoriles para la región Caribe. Corpoica. https://www.researchgate.net/publication/312164417_Establecimiento_de_sistemas_silvopastoriles_para_la_region_Caribe
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. y Vogel, H.J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reinhart, K.O., Nichols, K.A., Petersen, M. y Vermeire, L.T. (2015). Soil aggregate stability was an uncertain predictor of ecosystem functioning in a temperate and semiarid grassland. *Ecosphere*, 6(11), 1-16. <https://doi.org/10.1890/ES15-00056.1>
- Santiago-Hernández, F., López-Ortiz, S., Ávila-Reséndiz, C., Jarillo-Rodríguez, J., Pérez-Hernández, P. y Guerrero-Rodríguez, J.D. (2016). Physiological and production responses of four grasses from the genera *Urochloa* and *Megathyrus* to shade from *Melia azedarach* L. *Agroforestry Systems*, 90(2), 339-349. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9858-y>
- Silveira Júnior, O., dos Santos, A.C., Dias Rodrigues, M.O., Dias Rodrigues, M. O. y Martins Alencar, N. (2017). Productive efficiency of mombasa grass in silvopastoral system under pasture deferment and nitrogen fertilizer. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(5), 3307-3318. <https://www.researchgate.net/>

[publication/320342587_Productive_efficiency_of_mombasa_grass_in_silvopastoral_system_under_pasture_deferment_and_nitrogen_fertilizer](#)

SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report No. 42, version 3.0. United States Department of Agriculture (USDA). 693 p. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054247

Tarrasón, D., Ravera, F., Reed, M.S., Dougill, A.J. y Gonzalez, L. (2016). Land degradation assessment through an ecosystem services lens: Integrating knowledge and methods in pastoral

semi-arid systems. *Journal of Arid Environments*, 124, 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.002>

Ussiri, D.A.N. y Lal, R. (2005). Carbon sequestration in reclaimed minesoils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 151-165. <https://doi.org/10.1080/07352680591002147>

Vides-Borrell, E., Porter-Bolland, L., Ferguson, B.G., Gasselin, P., Vaca, R., Valle-Mora, J. y Vandame, R. (2019). Polycultures, pastures and monocultures: Effects of land use intensity on wild bee diversity in tropical landscapes of southeastern Mexico. *Biological Conservation*, 236, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.04.025>