

Incidencia de sistemas agroforestales con *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. sobre propiedades físicas de suelos de lomerío en el departamento de Caquetá, Colombia

Incidence of agroforestry systems *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. on physical properties of soil hilly in Caquetá department, Colombia

Gelber Rosas Patiño^{1*}; Jader Muñoz Ramos² y Juan Carlos Suárez Salazar¹

¹Universidad de la Amazonia, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería Agroecológica, Florencia - Caquetá, Colombia. ²Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, Ibagué - Tolima, Colombia. *Autor para correspondencia: grosas@udla.edu.co

Rec.: 23.08.2014 Acep.: 27.05.2015

Resumen

Entre los meses de abril y julio de 2010, se evaluaron los efectos de diferentes sistemas agroforestales con caucho (*Hevea brasiliensis* Muell) sobre las propiedades físicas del suelo en área de lomerío en los municipios Belén de los Andaquíes, Florencia y El Doncello (Departamento de Caquetá, Colombia). Se compararon los sistemas *Hevea brasiliensis* Muell asociado con frutales (SAF), *H. brasiliensis* Muell con vegetación secundaria (SAR), y *H. brasiliensis* Muell en monocultivo (Mhe) contra bosque secundario (Bs) y pastura nativa (Pna). Se usó un diseño bifactorial completamente al azar, con cinco tratamientos (SAF, SAR, Mhe, Bs, Pna) y dos horizontes (H-A, H-B). Las relaciones entre las variables físicas entre tratamientos se exploraron mediante un análisis de componentes principales y se evaluó el efecto de los arreglos agroforestales con una prueba de Monte Carlo. La compactación, la densidad real y humedad gravimétrica fueron similares ($P > 0.05$) entre H-A de Mhe y Pna. Se encontró un efecto significativo positivo ($P < 0.05$) de *H. brasiliensis* Muell en la densidad aparente, la compactación del suelo y la porosidad total en H-A de los sistemas SAF y SAR en comparación con las mismas propiedades en el sistema Bs. En general, se observa la incidencia de los arreglos agroforestales sobre la modificación de variables físicas del suelo en el piedemonte amazónico.

Palabras clave: Especies promisorias, arreglos agroforestales, manejo de suelos, piedemonte amazónico

Abstract

Between April and July 2010, the effects of different agroforestry systems with rubber (*Hevea brasiliensis* Muell) on the physical properties of soil in hilly area in the municipalities of Belén de los Andaquíes, Florencia and El Doncello (Department of Caquetá, Colombia) were evaluated. *H. brasiliensis* Muell as monoculture and associated with fruit trees (SAF) and secondary vegetation (SAR) were compared against secondary forest (Bs) and native pasture (PNA). A completely randomized two-factor design was arranged with five treatments (SAF, SAR, Mhe, Bs, and PNA) and two horizons (H-A, H-B). Relationships between physical variables between treatments were explored by using a principal component analysis, and the effect of agroforestry arrangements was assessed with a test of Monte Carlo. Compaction, real density and gravimetric moisture were similar ($P > 0.05$) in H-A of Pna and Mhe. A positive significant effect ($P < 0.05$) of *H. brasiliensis* Muell in bulk density, soil compaction and total porosity in H-A of SAF and SAR systems compared with the same properties in Bs was found. In general, the incidence of agroforestry arrangements modifying soil physical variables in the Amazon piedmont was observed.

Keywords: Promising species, agroforestry arrangements, soil management, Amazon piedmont

Introducción

Las propiedades físicas son componentes importantes de la calidad de los suelos que resultan del equilibrio entre las fases sólida, líquida y gaseosa (Astier *et al.*, 2002). La calidad relaciona la retención de humedad, la aireación, la actividad de los organismos, el desarrollo de raíces y el soporte de las plantas (Veun *et al.*, 2014) con la productividad del suelo.

Los efectos de la deforestación y los sistemas de cultivos causan cambios drásticos en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo (Li *et al.*, 2007). En el Departamento de Caquetá (Colombia) la sustitución de la vegetación natural por pasturas y cultivos comerciales se encuentra en constante incremento, lo que ocasiona cambios no reversibles en las propiedades físicas del suelo. Los suelos más afectados por estas prácticas son aquellos formados en paisaje de lomerío caracterizado por un alto contenido de fracciones finas (arcillas) que se incrementa en el horizonte B (H-B), alta resistencia a la penetración y poca profundidad efectiva en el horizonte A (H-A), la cual varía entre 4 y 11 cm en sistemas agroforestales (SAF) con caucho (Zuluaga y Escobar, 2000). Estas propiedades físicas son modificadas por los cambios de cobertura de bosque natural a pasturas debido a que el porcentaje de microporos aumenta cuando los suelos están sometidos a pastoreo (Martínez y Zinck, 2004).

Los SAF ofrecen estrategias para la conservación de los suelos y contribuyen con residuos vegetales (hojarasca) y presencia de raíces (Idol *et al.*, 2011), como se ha observado en plantaciones bajo sistemas agroforestales para rehabilitar Ultisoles degradados por la actividad ganadera (Escobar, 2004). Por tanto, el objetivo de esta investigación fue determinar la incidencia de sistemas agroforestales con *Hevea brasiliensis*

Muell en las propiedades físicas de los suelos formados en paisaje de lomerío intervenido del Departamento de Caquetá.

Materiales y métodos

Localización y área de estudio

Las áreas de estudio se encuentran en los municipios Belén de los Andaquíes, Florencia y El Doncello (Figura 1, Tabla 1) en el departamento de Caquetá (Colombia) bajo sistemas de coberturas de caucho (*Hevea brasiliensis* Muell) asociado con

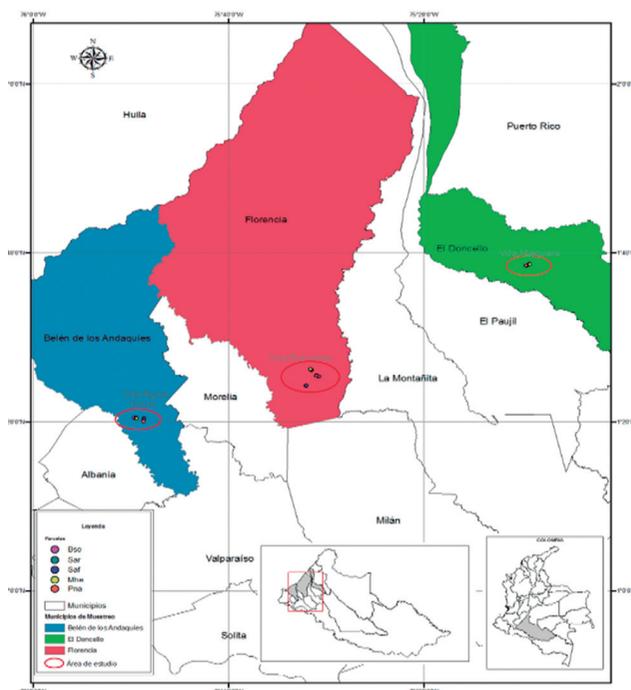


Figura 1. Sitios de muestreo de sistemas agroforestales evaluados en los municipios de El Doncello, Florencia y Belén de los Andaquíes, Caquetá, Colombia.

Tabla 1. Ubicación de los sitios de muestreo en zonas de lomerío del Departamento de Caquetá, Colombia.

Municipio	Característica	Coberturas				Pastura nativa
		Bosque secundario	Sistema agroforestal (frutales-maderables)	Sistema agroforestal (rastrero)	Monocultivo <i>H. brasiliensis</i>	
El Doncello	Ubicación	N 1°38'42" W 75°9'14,6"	N 1°38'31,8" W 75°9'29,6"	N1°38'39,2" W 75°9'12,3"	N1°38'39,2" W 75°9'12,3"	N 1°38'31,7" W 75°9'36"
	Vereda	Maguaré	Maguaré	Maguaré	Maguaré	Maguaré
	Propietario	Héctor Llanos	Lida Ortiz	Héctor Llanos	Gladis Sanabria	Abel M. Ortiz
Florencia	Ubicación	N 1°25'23,5" W 75°30'46,2"	N1°24'16,6" W 75° 32' 4,8"	N 1°26'9,2" W 75°31'31,1"	N 1°26'14,1" W 75°31'36,5"	N 1°25'30,5" W 75°31'2,2"
	Vereda	Balkanes	Germania	Balkanes	Balkanes	Balkanes
	Propietario	Universidad de la Amazonia	Vitelio Almarino	Edgar Antonio Nuñez	Duverney Casanova	Universidad de la Amazonia
Belén de los Andaquíes	Ubicación	N 1°20'28,4" W 75°49'38,5"	N1°20'27,5" W 75°48'39,0"	N 1°20'28,7" W 75°49'27,4"	N 1°20'27,2" W 75°49'23,9"	N 1°20'5,6" W 75°48'43,4"
	Vereda	Agua dulce	Agua dulce	Agua dulce	Agua dulce	Agua dulce
	Propietario	Guillermo Leyton	Rosalba Restrepo	Alcira Olaya	Guillermo Leyton	Arnovi Portela

frutales (SAF), con vegetación secundaria (SAR), y en monocultivo (Mhe), que fueron comparadas con sistemas de bosque secundario (Bs) y Pastura nativa (Pna) (Tabla 2). La región se caracteriza por una temperatura media mensual de 24.8 °C, evaporación de 88.4 mm/mes, humedad relativa media de 87.1 %, brillo solar promedio de 121 h/mes y precipitación de 280.4 mm/mes (Corpoamazonia, 2009). La fisiografía corresponde a coberturas establecidas en suelos de lomas o colinas al interior del paisaje de lomerío que hace parte de la provincia fisiográfica Caquetá Amazónico.

Tabla 2. Sistemas agroforestales en el Centro de Investigaciones Maca-gual Cesar Augusto Estrada González. Departamento del Caquetá, Colombia.

Código de sitio	Descripción
Bs	Bosque secundario mayor de 30 años, con especies nativas, desarrollados por descanso de áreas intervenidas; con especies nativas, desarrollados por descanso de áreas intervenidas, donde predominan especies correspondientes a las familias Cyatheaceae, Tiliaceae, Cecropiaceae, Heliconiaceae, Araceae, Rubiaceae, Mimosaceae, entre otras (Corpoamazonia, 2009).
SAF	Arreglo Agroforestal con <i>H. brasiliensis</i> Muell asociado con frutales establecidos a partir de plantaciones de <i>H. brasiliensis</i> Muell (clon FX3864) con más de 20 años de establecidas desde pasturas nativas, en fase de producción y plantadas en surcos de 4 m entre plantas y 7 m entre calles. Se fertiliza anualmente con cal dolomita (500 g/árbol) y fertilizante compuesto (Macro y micronutrientes) Remital® (500 g/árbol). Asociado con frutales como <i>Bactris gasipaes</i> Kunth (Chontaduro), <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao común), <i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Sprengel) Schumann (copoazú), <i>Psidium guajava</i> L. (guayaba), <i>Eugenia stipitata</i> Mc Vaught (arazá), <i>Citrus sp.</i> (Cítricos), <i>Borojia patinoi</i> Cuatrecasas (borojó), <i>Pourouma cecropifolia</i> Mart. (uva caimaron) e <i>Ingas sp.</i> (Guamos) y maderables como <i>Laurus nobilis</i> L. (laurel), <i>Cariniana pyriformis</i> Miers (abarco), <i>Couma macrocarpa</i> Barb. Rodr. (perillo), <i>Trattinnickia burserifolia</i> Mart. (caraño) y <i>Luma apiculata</i> (DC.) Burret. (Arrayán).
SAR	Arreglo Agroforestal con <i>H. brasiliensis</i> Muell y rastrojo: corresponde a plantaciones de <i>H. brasiliensis</i> Muell (clon FX3864) con más de 20 años de establecidas a partir de pastura nativa, en fase de producción y plantadas en surcos de 4 m entre plantas y 7 m entre calles. Los productores realizan prácticas de limpieza con guadañadora y machete en los surcos pero dejan cubiertas las calles con rastrojo en donde predominan las especies propias de la regeneración natural en la zona, entre ellas, <i>Miconia sp.</i> (Chilco), <i>Cecropia membranacea</i> Trécul (yarumo), <i>Piper arboreum</i> Aubl. (Cordoncillo), <i>Vismia brasiliensis</i> Choisy (lacre), <i>Arundo donax</i> L. (carrizo), <i>Clidemia hirta</i> (L.) D. Don (azulejo) y <i>Bellusia grossularoides</i> (guayabo coronillo).
Mhe	<i>H. brasiliensis</i> Muell en monocultivo: plantación de <i>H. brasiliensis</i> Muell (clon FX3864) con más de 20 años de establecidas a partir de pastura nativa, en fase de producción y plantadas en surcos de 4 m entre plantas y 7 m entre calles. Durante los últimos tres años se ha fertilizado con cal dolomita (500 g árbol ⁻¹) y 500 g.árbol ⁻¹ de Remital®. Estas plantaciones continúan soportando carga animal que pastorea la grama nativa.
Pna	Pastura nativa Pna: potreros con más de 30 años de establecidos, conformados principalmente por <i>Paspalum notatum</i> Flügge (grama dulce) y <i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase (guaduilla), con pastoreo permanente de ganado bovino y equino; presentan niveles de erosión entre fuerte (terracetos, surcos) y extremadamente fuerte (cárcavas y remoción en masa).

Toma y análisis de muestras

Las muestras de suelos fueron recolectadas en ambos horizontes en los diferentes sistemas agroforestales en cada uno de los municipios y estuvieron compuestas por cinco submuestras tomadas por triplicado cada 5 m en dirección opuesta a la pendiente. El análisis de las características físicas básicas del suelo aparece en la tabla 3.

Tabla 3. Métodos para la determinación de las características físicas de las muestras de suelo. Modificado de Zamudio et al. (2006).

Característica	Método
Densidad aparente (g/cm ³)	Método del cilindro.
Densidad real (g/cm ³)	Método del picnómetro.
Arena, limos y arcillas (%)	Bouyoucos.
Humedad gravimétrica (%)	Gravimetría.
Temperatura (°C)	Termómetro análogo de sondeo.
Penetrabilidad (Mpa)	Penetrómetro de mano Eijkelkamp®
Porosidad (%)	Cálculo a partir de las densidades real y aparente (Fies et al. 1972, citado por Vilche et al. 2002).

Diseño y análisis de datos

Los tratamientos fueron evaluados en los horizontes H-A y H-B, con nueve repeticiones en un modelo bifactorial con diseño completamente al azar en parcelas divididas. La parcela principal fue la cobertura y la subparcela cada horizonte. El modelo aplicado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + Cbi + \epsilon_i + Hj + SEij + \epsilon_k(ij)$$

Donde: Y_{ijk} = una observación, μ = media, Cbi = efecto del i -ésima cobertura, ϵ_i = error debido a la cobertura, Hj = efecto de la j -ésimo horizonte, $CbHij$ = interacción cobertura x horizonte, $\epsilon_k(ij)$ = error debido al horizonte.

Análisis estadístico

Las variables físicas del suelo se analizaron mediante pruebas de estadística descriptiva y análisis de separación de medias mediante la prueba de LSD Fisher ($P < 0.05$). Además, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para determinar la similitud entre las coberturas y explorar las relaciones entre dichas variables. Para evaluar el efecto de los arreglos agroforestales se hizo una prueba de Monte Carlo. El análisis de coordenadas principales se realizó utilizando el paquete R versión 3.1.1, utilizando la librería Ade4.

Resultados y discusión

El análisis de clúster mostró diferencias ($P < 0.05$) entre las tipologías de uso de suelo y entre los horizontes del mismo (Figura 2), posiblemente

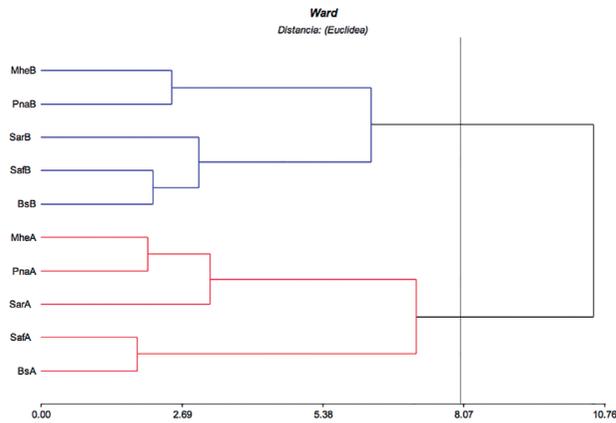


Figura 2. Dendrograma con tipología de uso de suelo enfocado a sistemas agroforestales con caucho en suelos de lomerío del Departamento de Caquetá. Las letras mayúsculas (A y B) hacen referencia al horizonte de muestreo.

debido a la variación de los contenidos de arcillas entre H-A y H-B las cuales inciden en los contenidos de agua y aire en el suelo (Rucks *et al.*, 2004). Dentro de los clúster se encontró que el sistema Pna se asocia principalmente al sis-

tema Mhe, hecho atribuible a que ambos tenían tipos iguales de pastura manejadas en pastoreo continuo.

Los valores medios de las variables físicas por horizonte y cobertura (Tabla 4) mostraron diferencias ($P < 0.05$) entre esta última para las variables penetrabilidad y temperatura, y diferencias ($P < 0.05$) entre horizontes para las variables profundidad, penetrabilidad y arcilla (%).

Los valores más altos de densidad aparente (Da) ocurrieron en los sistemas Mhe y Pna, que presentaban pasturas sometidas a pastoreo. Las densidades del H-B de estas mismas coberturas (1.4 y 1.37 g/cm^3) presentaban valores próximos al umbral crítico para el desarrollo radicular de las gramíneas, establecido en 1.46 g/cm^3 por Vehimeyer y Hendrickson (1948). En este sentido, Pinzón y Amézquita (1991), encontraron que en los suelos del paisaje de lomerío amazónico colombiano, a medida que aumenta la profundidad aumenta la Da y con ella la resistencia a la penetración, y disminuye la porosidad.

De la misma forma, la resistencia a la penetración en el H-B de los sistemas Mhe y Pna presentó valores cercanos a 2 MPa (Tabla 3), lo cual es atribuible al pisoteo por los animales. Glinski y Lipiec (1990) consideran que valores de resistencia a la penetración por encima de 2 MPa impiden el crecimiento radical. No obstante la compactación y posible alteración radicular,

Tabla 4. Análisis de varianza entre las diferentes variables físicas de suelos de lomerío intervenido en el Departamento de Caquetá, Colombia. Discriminados por horizonte y cobertura.

Variable	H-A					H-B					Uso e suelo	H	Uso x H
	Bs	Mhe	Pna	Saf	Sar	Bs	Mhe	Pna	Saf	Sar			
Profundidad (cm)	11.67 ± 0.88	6.67 ± 1.20	5.33 ± 0.88	8.67 ± 1.2	11.33 ± 1.33	38.33 ± 0.88	43.33 ± 1.20	44.67 ± 0.88	41.33 ± 1.20	38.67 ± 1.33	sd	**	**
Da (g/cm³)	1.14 ± 0.17	1.30 ± 0.08	1.25 ± 0.12	1.25 ± 0.17	1.21 ± 0.08	1.28 ± 0.08	1.40 ± 0.07	1.37 ± 0.04	1.36 ± 0.11	1.35 ± 0.09	sd	sd	sd
Dr (g/cm³)	2.35 ± 0.08	2.54 ± 0.10	2.62 ± 0.08	2.40 ± 0.1	2.52 ± 0.04	2.73 ± 0.15	2.60 ± 0.15	2.65 ± 0.18	2.64 ± 0.03	2.51 ± 0.06	sd	sd	sd
Porosidad T. (%)	51.43 ± 7.30	48.68 ± 1.24	52.30 ± 3.53	48.58 ± 4.95	51.93 ± 2.41	53.03 ± 0.57	45.31 ± 5.54	47.88 ± 3.63	48.29 ± 4.54	45.94 ± 3.85	sd	sd	sd
Penetrabilidad (Mpa)	0.83 ± 0.17	0.82 ± 0.10	1.37 ± 0.36	0.61 ± 0.05	0.77 ± 0.04	1.28 ± 0.32	1.99 ± 0.67	3.50 ± 0.22	1.18 ± 0.09	1.24 ± 0.08	**	**	**
Hum. grav. (%)	33.01 ± 10.12	34.06 ± 6.70	36.17 ± 6.98	35.56 ± 9.44	31.42 ± 8.12	30.67 ± 8.10	29.51 ± 4.86	28.65 ± 3.90	31.27 ± 7.39	29.42 ± 6.61	sd	sd	sd
Temperatura (°C)	24.67 ± 0.33	27.67 ± 0.33	28.33 ± 0.88	25.67 ± 0.33	28.33 ± 1.86	25.33 ± 0.33	27.33 ± 0.88	27.67 ± 0.88	25.00 ± 0.00	27.00 ± 1.53	**	sd	sd
Arena (%)	50.57 ± 20.55	26.77 ± 9.29	23.87 ± 10.30	48.30 ± 18.73	42.87 ± 17.63	46.93 ± 14.97	21.23 ± 6.44	20.50 ± 9.17	41.47 ± 20.69	30.67 ± 15.26	sd	sd	sd
Limo (%)	24.77 ± 14.19	45.47 ± 10.63	42.83 ± 8.23	27.20 ± 11.47	29.97 ± 13.77	19.03 ± 5.00	42.10 ± 8.23	36.00 ± 7.66	25.20 ± 8.95	29.27 ± 10.97	sd	sd	sd
Arcilla (%)	24.63 ± 8.38	28.00 ± 2.39	33.30 ± 2.99	24.50 ± 9.37	27.20 ± 6.57	34.07 ± 11.03	36.67 ± 3.12	43.50 ± 4.44	33.40 ± 12.71	40.10 ± 5.93	sd	**	sd

Bs: Bosque secundario; Mhe: Monocultivo de *H. brasiliensis* Muell; Pna: Pastura nativa; Saf: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* Muell con frutales; Sar: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* Muell con rastrojo, H: Horizonte. * y **: Diferencias estadísticas con $P < 0.05$ y $P < 0.001$, respectivamente; según la prueba de LSD Fisher; sd: sin diferencia.

estas coberturas continúan en producción, debido, posiblemente al suministro de recursos como agua y minerales a través de la aplicación de fertilizantes y las precipitaciones adecuadas para la planta (Sadras *et al.*, 2005).

En el análisis de las interacciones entre el uso del suelo y los horizontes (Tabla 4) se presentó efecto ($P < 0.05$) para las variables penetrabilidad y profundidad, debido posiblemente a que la cobertura del suelo sólo alcanza a ejercer su efecto en las capas superficiales menos compactas y no en la zona profunda caracterizada por el sellamiento de poros y mayor densidad.

Los resultados más relevantes en la profundidad se evidenciaron en el H-A, con valores más altos para las coberturas Bs, Sar, y Saf, sin diferencias entre sí (Tabla 4, Figura 3a). Este hecho es atribuible a que los bosques y los sistemas agroforestales protegen el suelo de la erosión e incorporan materia orgánica para el mejoramiento de las propiedades del suelo, mientras que los cambios de cobertura para el establecimiento de

pasturas conllevan pérdida de suelo superficial en áreas de pendientes y altas precipitaciones (Spain y Gualdrón, 1997).

En el caso de la penetrabilidad (Tabla 4, Figura 3b) se observaron similitudes entre coberturas con presencia de especies leñosas perennes (SAF, SAR, Mhe y Bs). Las diferencias fueron observadas entre los horizontes H-A y H-B de suelos bajo coberturas de pasturas nativas con y sin *H. brasiliensis* Muell (Mhe y Pna, respectivamente). Ambas coberturas estaban manejadas con pastura nativa en uso permanente, pero la presencia de especies con estructura radicular leñosa en Mhe disminuye la resistencia del suelo a la penetración ocasionada por el pisoteo continuo del ganado.

En general, las coberturas con presencia de *H. brasiliensis* Muell asociado a otras especies presentaban mejores características físicas de suelos en términos de profundidad y penetrabilidad. Resultados similares fueron reportados por Zuluaga y Escobar (2000), al evaluar el efecto del manejo agroforestal en el desarrollo y producción de caucho (*H. brasiliensis* Muell) en dos áreas del piedemonte del Caquetá, debido a que la reducción en la compactación del suelo se debe, entre otros factores, a la modificación en la estructura radicular generada por los cambios de cobertura.

En la Figura 3, se observa el proceso agrada-cional de rehabilitación del suelo. Las variables profundidad y penetrabilidad (resistencia a la penetración) se comportaron mejor en las coberturas que presentaban mayor cantidad de especies leñosas perennes. Esto coincide con lo planteado por Serrão (1993), quien afirma que la presencia de árboles en el suelo a partir de los sistemas agroforestales mejora la sostenibilidad y el equilibrio del suelo y el ecosistema natural en todos sus componentes.

La profundidad del suelo se relacionó de manera positiva con la penetrabilidad sólo en H-B (Tabla 5) debido a que debajo de la capa orgánica, a medida que aumenta la profundidad, aumenta la compactación y con ello la resistencia a la penetración.

La densidad aparente (D_a) se correlacionó positivamente con el contenido de arena (%) y la densidad real (D_r) en el H-A, hecho atribuible a que estas propiedades varían en función de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica, entre otros factores. La D_a se correlacionó negativamente en el H-B con el porcentaje de arcilla en el suelo, que es más abundante en este horizonte y de manera negativa con la porosidad total (Pt) y la humedad gravimétrica (Hg), lo cual, según Taboada y Álvarez (2008), se atribuye al hecho que en la medida que se incrementan los valores de D_a , disminuyen los espacios porosos

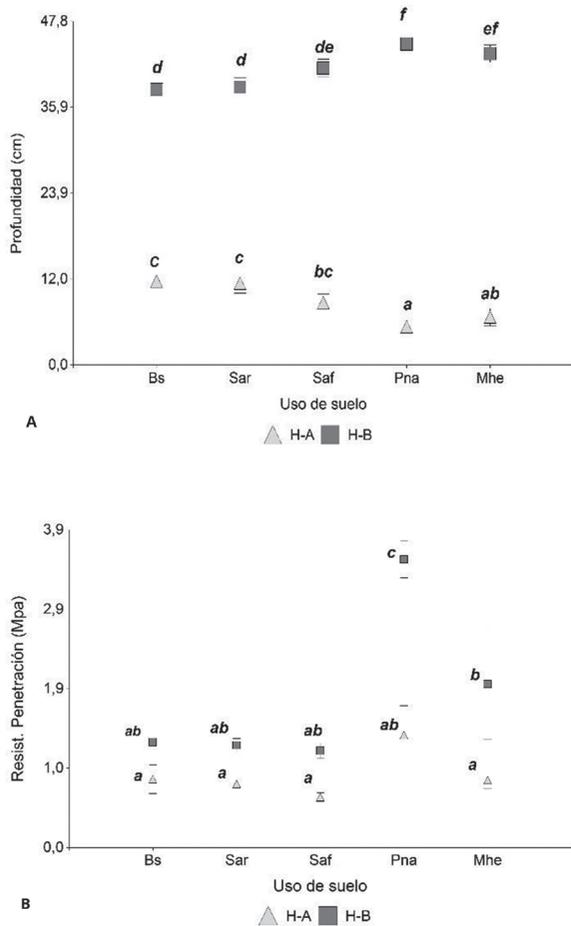


Figura 3. Puntos de comparación de medias para las variables que presentan interacción entre usos del suelo y horizonte. A. Profundidad. B. Penetrabilidad. Letras minúsculas distintas representan diferencias significativas ($P < 0.05$) según la prueba de LSD Fisher

Tabla 5. Análisis de correlación entre las variables físicas en el horizonte A de diferentes usos del suelo en la Amazonia colombiana mediante un análisis de componentes principales.

	Prof.	Da	Dr	Pt	Pn	Hg	T	% Arena	% Limo				
Prof	1												
Da	-0.13	1											
Dr	-0.34	0.59	0.0196	1									
Pt	0.0039	-0.92	<0.0001	-0.24	1								
Pn	-0.27	-0.07		0.19	0.18	1							
Hg	-0.19	-0.9	<0.0001	-0.44	0.87	<0.0001	0.14	1					
T	-0.43	-0.15		0.33	0.33		0.14	0.36	1				
% Arena	0.36	0.52	0.0472	0.12	-0.58	0.0240	-0.48	-0.58	0.0248	-0.28	1		
% Limo	-0.30	-0.29		-0.07	0.34		0.41	0.32		0.14	-0.94	<0.0001	1
% Arcilla	-0.35	-0.76	0.001	-0.18	0.83	<0.0001	0.45	0.86	<0.0001	0.46	-0.76	0.0009	0.5

Da: Densidad aparente. Dr: Densidad real. Pt: Porosidad total. Pn: Penetración. Hg: humedad gravimétrica. T: Temperatura.

Tabla 6. Análisis de correlación entre las variables físicas en el horizonte B de diferentes usos del suelo en la Amazonia colombiana mediante un análisis de componentes principales.

	Prof	Da	Dr	Pt	Pn	Hg	T	% Arena	% Limo			
Prof	1											
Da	0.0051	1										
Dr	0.24	-0.07	1									
Pt	0.12	-0.8	0.0003	0.65	0.009	1						
Pn	0.7	0.0035	0.06	-0.11	-0.13	1						
Hg	0.06	-0.91	<0.0001	-0.16	0.60	0.017	-0.02	1				
T	0.49	-0.02		-0.12	-0.06	0.61	0.016	0.07	1			
% Arena	-0.37	0.42		0.42	-0.05	-0.34	-0.54	0.0361	-0.21	1		
% Limo	0.38	-0.01		-0.4	-0.25	0.27	0.15		0.13	-0.87	<0.0001	1
% Arcilla	0.24	-0.76	0.0011	-0.31	0.38	0.31	0.83	0.0001	0.24	-0.82	0.0002	0.44

Da: Densidad aparente. Dr: Densidad real. Pt: Porosidad total. Pn: Penetración. Hg: humedad gravimétrica. T: Temperatura.

para el almacenamiento de aire y agua (Tablas 5 y 6).

También se encontraron correlaciones positivas entre Pt y Hg en H-A y H-B, ya que los espacios porosos determinan la disponibilidad de aire y agua en el suelo (Cerisola *et al.*, 2005). La penetrabilidad presentó correlación con el porcentaje de arcilla, ya que los suelos arcillosos son más susceptibles a la compactación (Meek, 1996). La Hg se correlacionó de manera negativa con el porcentaje de arena y positiva con el de arcilla, debido a que la presencia de fragmentos gruesos en los horizontes del suelo disminuyen la retención de humedad hasta en 25 %. Las variables texturales se correlacionaron negativamente entre ellas (Tablas 5 y 6).

En la Figura 4, se observa la ubicación espacial de los arreglos agroforestales en el plano factorial F1/F2 del ACP de las variables físicas del suelo. El F1, que explica 45.3% de la varianza, opone sistemas (especialmente Bs y Pna) debido a su condición de uso que afecta variables como la densidad real (Dr). La prueba de Monte Carlo de permutación de las coordenadas de los puntos, indica que la separación entre los arreglos agroforestales es altamente significativa ($P < 0.001$) y explica 42.5% de la varianza. En general, se observaron diferencias contrastantes entre las coberturas en sistemas Bs y Pna, principalmente en la penetrabilidad, atribuidas al uso continuo de las pasturas, que conlleva mayor compactación (Pinzón y Amézquita 1991). De la misma forma, el control positivo (Bs) presentó fuerte correlación positiva e interacción con las coberturas Saf y Sar, debido al comportamiento de Da,

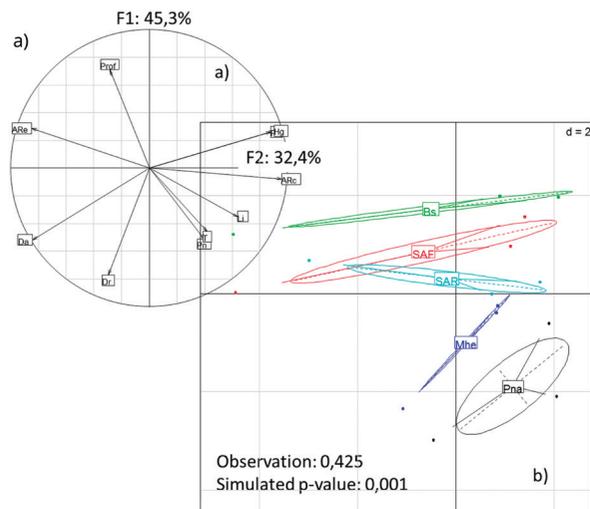


Figura 4. Ordenación de los sistemas agroforestales incluidos en la muestra en el plano factorial de un análisis de componentes principales de las variables físicas del suelo. **a** = Círculo de correlación. Da: Densidad aparente. Dr: Densidad real. Pt: Porosidad total. Pn: Penetración. Hg: humedad gravimétrica. T: Temperatura. **b** = La ordenación de los sistemas agroforestales incluidos en la muestra en el plano definido por los dos primeros ejes.

Letras corresponden a los baricentros de los sistemas agroforestales muestreados Bs: Bosque secundario; Mhe: Monocultivo de *H. brasiliensis* Muell; Pna: Pastura nativa; Saf: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* Muell con frutales; Sar: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* Muell con rastrojo (Prueba de Monte Carlo en los sistemas agroforestales significativa, $P < 0.001$, observación = 0.425).

Pt y profundidad. La cobertura Mhe se encontró fuertemente ligada a la Pna por la similitud de las variables Pn, Dr y Hg.

Conclusión

Las propiedades físicas del suelo debidas al establecimiento de sistemas agroforestales con *H. brasiliensis* Muell sobre suelos de lomerío del Departamento de Caquetá (Colombia) son similares a las encontradas bajo bosque secundario, principalmente en densidad aparente, porosidad total, penetrabilidad y profundidad del horizonte A.

Cuando se establece *H. brasiliensis* Muell en monocultivo, las propiedades físicas de los suelos, principalmente la densidad real y la humedad gravimétrica, son similares a las encontradas bajo una cobertura de pasturas nativas.

Agradecimientos

A la Asociación de Reforestadores y Cultivadores de Caucho del Caquetá (ASOHECA); a la Universidad de la Amazonia; al Dr. Cesar Augusto Estrada González (Q.E.P.D).

Referencias

Astier, M.; Mass-Moreno, M.; y Etchevers, B. J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agroc.* 36(5):605.
Cerisola, C.; García, M.; y Filgueira, R. 2005. Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (Alfisol) en

condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Rev. Cienc. Suelo* 23(2):167 - 178.
Corpoamazonia (Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia). 2009. Plan de ordenación y manejo de la cuenca de la quebrada La Resaca (Belén de los Andaquíes). Caquetá. 120 p.
Escobar, C. 2004. El cultivo del caucho (*Hevea brasiliensis* Muell) en agroforestería para rehabilitar Ultisoles degradados en el piedemonte de Caquetá. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Regional 10. Florencia (Caquetá, Colombia). 9 p.
Glinski, J. y Lipiec, J. 1990. Soil physical conditions and plant roots. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida, USA. 250 p.
Idol, T.; Hagggar, J.; y Cox, L. 2011. Ecosystem services from smallholder forestry and agroforestry in the tropics. In: Integrating agriculture, conservation and ecotourism: examples from the field. Springer Netherlands. P. 209 - 270.
Li, X. G.; Li, F. M.; Zed, R.; y Zhan, Z. Y. 2007. Soil physical properties and their relations to organic carbon pools as affected by land use in an alpine pastureland. *Geoderma* 139(1):98 - 105.
Martinez, L. J. y Zinck, J. A. 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil Tillage Res.* 75(1):3 - 18.
Meek, F. 1996. Effects of skidder traffic on two types of forest soils. Forest Engineering Research Institute of Canada. Techn. Rep. TR117. 12 p.
Pinzón, A. y Amézquita, E. 1991. Compactación de suelos por el pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Pasturas Tropicales* 13(2):21 - 26.
Rucks, L.; García, F.; Kaplán, A.; Ponce de León, J.; y Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay. 68 p.
Sadras, V.; O'Leary, G. J.; y Roget, D. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91(2-3):131-148.
Serrão, A. 1993. Tecnologías y políticas para detener la deforestación en los bosques húmedos tropicales. En: Alfaro, M.; De Camino, R.; Mora, M.; Oram, P. Mem. Taller regional: Necesidades y prioridades de investigación en políticas forestales y agroforestales para Latinoamérica. IICA. Costa Rica. 295 p.
Spain, J. y Gualdrón, R. 1997. Degradación y rehabilitación de pasturas. En: Lazcano, C y Spain, J. Establecimiento y renovación de pasturas: conceptos, experiencias y enfoque de la investigación. Centro Internacional de Agricultura Tropical -CIAT-. Cali, Colombia. 421p.
Taboada, M. A. y Álvarez, C. R. 2008. Introducción a la fertilidad física de los suelos. En: Taboada, M. A. y Álvarez, C. R (eds.). Fertilidad física de los suelos. Buenos Aires (Argentina): Universidad de Buenos Aires. 227 p.
Veihmeyer, F. y Hendrickson, A. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Sci.* 65(6):487 - 493.
Veun, K. S.; Goyne, K. W.; Kremer, R. J.; Miles, R. J.; y Sudduth, K. A. 2014. Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. *Biogeochem.* 117(1):81-99.
Vilche, M.; Alzugaray, C. y Montico, S. 2002. Efecto de la labranza y duración de las praderas sobre la condición física de un suelo arguido-vertico de Argentina. *Rev. Cien. Invest. Agraria* 29(3):159 - 169.
Zamudio, A.; Carrascal, C.; Pulido, J.; Gallardo, E.; Ávila, M.; y Vargas-Vera, D. 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6ª ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá, D. C. 648 p.
Zuluaga, J. y Escobar, C. 2000. Efecto del manejo agroforestal en el desarrollo y producción del caucho (*Hevea brasiliensis* Muell) en dos áreas del piedemonte del Caquetá. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Florencia (Caquetá, Colombia). Bol. Div. No. 2. 9 p.