

# LA DENSIDAD APARENTE Y SU RELACIÓN CON OTRAS PROPIEDADES EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

Alveiro Salamanca Jiménez\*; Siavosh Sadeghian Khalajabadi\*\*

---

## RESUMEN

**SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN KH., S. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 56(4):381-397. 2005.**

En ocho unidades cartográficas de la zona cafetera colombiana, se midió la densidad aparente (DA) y su relación con 12 propiedades físicas y químicas del suelo para cuatro agroecosistemas: cafetales tecnificados y tradicionales, potreros y bosques/guaduales. Los valores promedios de la DA estuvieron entre 0,58 y 1,46g.cm<sup>-3</sup> para los ocho suelos, debido a las diferencias en su material parental y a los efectos del uso y manejo. En la mayoría de las unidades, las densidades promedio fueron menores en los cafetales tradicionales y los bosques/guaduales, intermedias en los cafetales tecnificados y mayores en los potreros. La DA aumentó con la profundidad en todas las unidades y presentó una alta relación con los contenidos de materia orgánica y humedad del suelo.

**Palabras clave:** Suelo, densidad aparente, propiedades físicas

---

## ABSTRACT

Soils from eight cartographic units of the Colombian coffee region were evaluated by measuring the bulk density (BD) and 12 physical and chemical properties, in four agroecosystems: technified and traditional coffee plantations, grasslands and forests/guaduals. The BD mean values ranged between 0.58 and 1.46g.cm<sup>-3</sup> due the parental material differences and the effects of the soil use and management. In most of the units, the mean densities were lower in the traditional coffee plantations and forests/guaduals, media in the technified plantations and higher in the grasslands. BD increased whit deep and was highly related with the soil organic matter and moisture contents.

**Keywords:** Soil, bulk density, physical properties.

---

\* Asistente de Investigación. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

\*\* Investigador Científico I. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

La densidad aparente (DA) es una propiedad del suelo ampliamente utilizada en la agricultura, relacionada principalmente con las prácticas de manejo de los suelos y de las aguas. Recientemente ha aumentado la preocupación respecto a la determinación y exactitud en su medición, debido al incremento del uso de irrigación, de tierras cultivadas sin labranza y a la compactación del suelo (6).

La DA es la característica que en mayor grado influye sobre la productividad de los cultivos, debido a su estrecha relación con otras propiedades del suelo (24, 19). Incluso, en algunas especies ejerce un mayor efecto que el mismo uso de fertilizantes, el cual puede ser más notable cuando no se aplican estos últimos (19). Este comportamiento está asociado con las condiciones de disponibilidad y la tasa de difusión de los nutrientes en el suelo (25).

Cuando la densidad aparente del suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad (7), limitando a su vez el crecimiento de las raíces (25, 5, 17). La DA es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso (5), el cual a su vez está determinado principalmente por la materia orgánica del suelo - MO (20). A medida que aumenta la MO y el espacio poroso, disminuye la DA y viceversa. En suelos de textura fina la DA varía entre 1 y  $1,2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , mientras que en suelos arenosos es mayor y puede variar entre 1,2 y  $1,6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (5). La naturaleza, las dimensiones y el arreglo de las partículas del suelo (2), además de otros factores relacionados con su formación (6), también influyen sobre los valores de la DA.

Wolf y Snyder (25), aseguran que además de la MO y la textura del suelo, la variación de la DA está asociada con las prácticas de

manejo. Cuando un suelo suelto es ligeramente compactado, la humedad volumétrica aumenta y la longitud de la ruta de difusión de los nutrientes se acorta, pero cuando un suelo se compacta, las partículas se unen a tal magnitud que la ruta de difusión se hace más tortuosa y la solución del suelo debe moverse alrededor de las partículas, reduciendo su tasa de difusión y absorción.

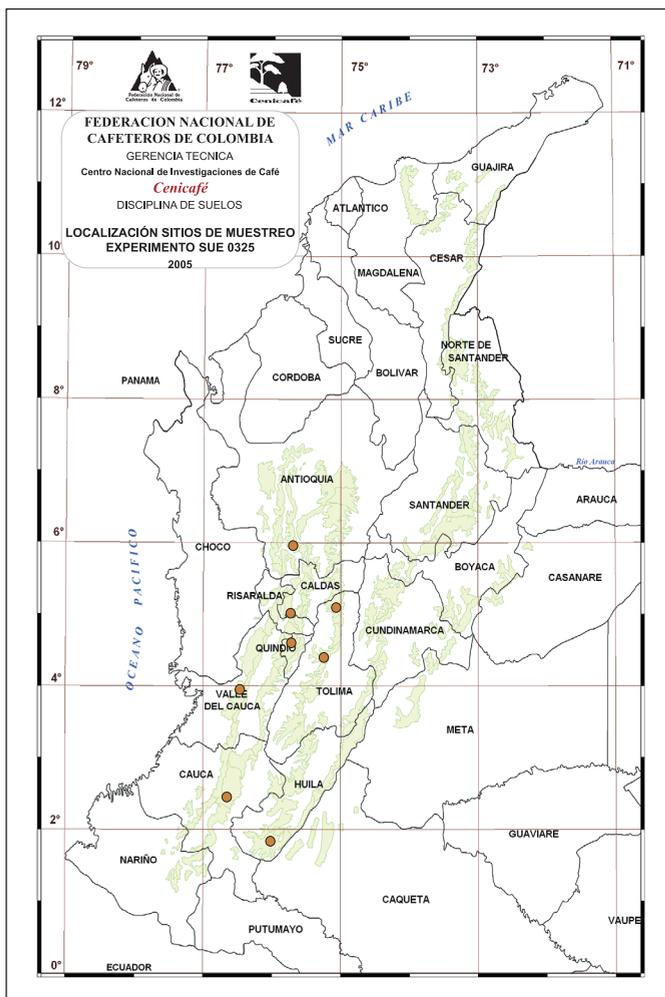
Dick (5), al correlacionar la producción de semillas en pastos con las propiedades del suelo, mostró una relación significativa entre ésta y la DA, la resistencia a la penetración, el contenido de carbono en la biomasa microbiana y el pH; propiedades que junto con la actividad de algunas enzimas permitieron predecir el rendimiento.

Valencia (23) considera la DA como uno de los factores clave para determinar la productividad de los suelos sembrados en café en Colombia y Suárez (22), sugiere tener en cuenta esta propiedad para calcular el volumen efectivo del suelo a ser explorado por las raíces del café.

Internacionalmente, la medición de la DA se ha orientado a establecer su relación con otras características del suelo y con algunos parámetros biológicos. En Colombia son pocos los trabajos registrados al respecto por tanto, en esta investigación se estudió la relación entre la DA y algunas propiedades del suelo para condiciones de la zona cafetera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente estudio se tomaron muestras de suelo en ocho unidades cartográficas representativas de la zona cafetera colombiana, ubicadas en ocho municipios del país (Figura 1), contrastantes en su material de origen. En la Tabla 1, se presentan algunas



**Figura 1.** Ubicación geográfica de los sitios en la zona cafetera colombiana.

**Tabla 1.** Información general sobre los sitios y unidades donde se obtuvieron las muestras de suelo.

Departamento	Municipio	Ecotopo	Unidad Suelo	Material Parental	Origen	Clase Taxonómica
Caldas	Chinchiná	206A	Chinchiná	Ceniza volcánica	Volcánico	Melanudands
Tolima	Fresno	206B	Fresno	Ceniza volcánica	Volcánico	Fulvudands
Cauca	Tambo	218A	Timbio	Ceniza volcánica	Volcánico	Melanudands
Quindío	Quimbaya	210A	Montenegro	Ceniza volcánica	Volcánico	Hapludands
Tolima	Ibagué	209B	San Simón	Granito biotítico	Ígneo	Eutropept
Valle	Dagua	105A	200	Basalto	Ígneo	Dystropept
Antioquia	Fredonia	203A	Salgar	Pizarra	Metamórfico	Dystropept
Huila	Pitalito	319A	Guadalupe	Arenisca	Sedimentario	Dystropept

características generales de los sitios donde se obtuvieron las muestras.

Por cada unidad de suelo se seleccionaron cuatro agroecosistemas de la zona cafetera: **café tecnificado, café tradicional, potrero y bosque o guadual**, con base en los siguientes criterios generales:

- Homogeneidad en la unidad de suelo.
- Cercanía entre los agroecosistemas.
- Tiempo mínimo de 10 años bajo el uso actual del suelo.
- Tamaño del lote mayor que media hectárea. En el caso de los bosques o guaduales este criterio fue más flexible.

De igual forma, cada agroecosistema reunía condiciones particulares como:

#### a) **Café tecnificado**

- Densidad de siembra: entre 4.000 y 10.000 plantas/ha
- Variedad: Colombia o Caturra
- Edad: entre 3 y 5 años
- Manejo: según prácticas y recomendaciones de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

#### b) **Café tradicional**

- Densidad de siembra: menor de 5.000 plantas/ha
- Variedad: Caturra
- Edad: entre 5 y 7 años
- Especie de sombrío: guamo (*Inga* sp) o nogal cafetero (*Cordia alliodora*)
- Manejo: con uso reducido de fertilizantes, herbicidas y plaguicidas en general

#### c) **Potrero**

- Tipo de explotación: ganadería intensiva o extensiva
- Especies: nativas o introducidas comunes en cada localidad

#### d) **Bosque o guadual**

▪ Ecosistemas con poca intervención antrópica. Se tuvieron en cuenta como patrones de comparación con respecto a la alteración de algunas características del suelo, provocadas por las actividades agropecuarias.

Dentro de cada agroecosistema se realizaron tres calicatas y se tomaron muestras de suelo en seis rangos de profundidad: 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 y 30-40cm. Por cada rango se evaluaron 13 propiedades para un total de 576 datos por cada una.

Las metodologías utilizadas para medir las 13 propiedades descritas en la Tabla 2, corresponden a las citadas por Carrillo (4) y Montenegro y Malagón (13).

#### **Análisis estadístico**

Se realizaron los siguientes análisis:

- Correlaciones entre la DA y las demás propiedades evaluadas.
- Regresión múltiple para determinar las propiedades mejor relacionadas con la DA, tanto para el grupo de las unidades como para cada una de ellas.
- Regresión basada en la prueba de supuestos a partir de las dos variables de mejor relación y transformación de la variable DA para obtener su ecuación de predicción.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados obtenidos para la variable DA fueron analizados en cuatro niveles de detalle, de la siguiente manera:

**Comportamiento de la DA por unidad de suelo.** Como se observa en la Figura 2, las unidades de suelo muestran valores contrastantes en su DA promedio, similares a los reportados por Pinzón (15) y Suárez (22), quienes evaluaron esta característica en

93 y 41 perfiles de suelo de la zona cafetera colombiana, respectivamente, teniendo como criterio de separación los horizontes pedogenéticos.

Las diferencias registradas a este nivel de detalle se relacionaron principalmente con el material parental y su grado de evolución, afectado por los factores climáticos. Lo an-

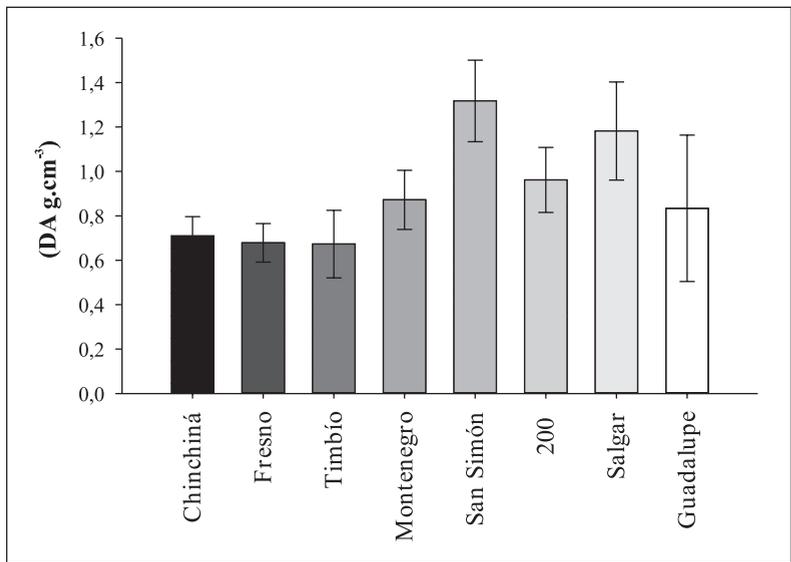
terior tiene implicaciones prácticas, ya que según Kooijman *et al.* (11), la variación en la textura del suelo y por ende, de la DA derivadas del material parental, determinan la retención de agua y al mismo tiempo la disponibilidad de algunos nutrientes.

Para los suelos derivados de cenizas volcánicas, las unidades Chinchiná, Fresno y

**Tabla 2.** Propiedades evaluadas y métodos utilizados.

Propiedad	Método utilizado
Densidad aparente (DA)*	Cilindro
Resistencia a la penetración en el campo (RP)	Penetrómetro de bolsillo
Humedad de campo (HC)	Gravimétrico (Estufa)
Conductividad hidráulica (CH)*	Permeámetro de cabeza constante
Porosidad total (PT)	Indirecto
Retención de humedad a:(H)*	
- 1/3atm de presión (Capacidad de Campo CC)	Olla y plato de presión
- 15atm de presión (Punto de Marchitez PM)	Membrana de presión
Densidad real (DR)	Picnómetro
Textura (arenas A, limos L y arcillas Ar)	Bouyucos
Distribución de Agregados en Seco (DAS)	Rotap
Diámetro medio ponderado en húmedo (DMPH)	Yoder
Estabilidad de Agregados (EA)	Yoder
Materia Orgánica (MO)	Walkey y Black

\* Muestras sin disturbar



**Figura 2.** Valores promedio de la DA para ocho unidades del suelo en los primeros 40cm del perfil.

Timbío, mostraron valores promedio de DA entre 0,67 y 0,71g.cm<sup>-3</sup>, en comparación con la unidad Montenegro en la cual se registró una mayor DA (0,87 g.cm<sup>-3</sup>), la cual se caracteriza por su menor contenido de MO y mayor porcentaje de arenas, que según Henao (8), se explican por la granulometría de su material de origen, correspondiente a cenizas de grano medio.

Al comparar las unidades derivadas de rocas ígneas, la DA promedio varió de acuerdo al tamaño de sus partículas. En la unidad 200, este valor fue menor (0,96g.cm<sup>-3</sup>), debido a que los basaltos por ser granos finos originan texturas arcillosas que aumentan la proporción de poros, mientras que los granitos biotíticos, de los cuales proviene la unidad San Simón, por ser partículas gruesas dan lugar a texturas arenosas con menor porosidad y mayor peso del suelo seco por unidad de volumen (1,32g.cm<sup>-3</sup>). Según Kooijman *et al.* (11), los suelos derivados de granito presentan baja retención de humedad, la cual afecta la productividad de los cultivos.

Para la unidad Salgar, derivada de rocas metamórficas, el tamaño de las pizarras y la presencia de material parental consolidado cerca a la superficie dio lugar a valores altos de DA promedio en los primeros 40cm del perfil (1,18g.cm<sup>-3</sup>).

En la unidad Guadalupe, derivada de areniscas de grano fino (material sedimentario), el tamaño de partículas también ejerció un efecto notable sobre la DA, originando un valor intermedio (0,83g.cm<sup>-3</sup>), incluso menor al de la unidad Montenegro.

Algunas de las relaciones antes mencionadas derivadas del material parental, entre la DA y las propiedades evaluadas, pueden observarse en la Tabla 3, en la cual se presenta el promedio ( $\bar{x}$ ) y el coeficiente de

variación (C.V.) de todas las características para las ocho unidades de suelo.

**Comportamiento de la DA por unidad de suelo y profundidad.** En la Figura 3 se observan las variaciones de la DA al profundizar en el perfil para las ocho unidades de estudio. En todos los suelos las densidades más bajas se registraron en la superficie (0-5cm); sin embargo, su comportamiento respecto al incremento con la profundidad varió entre unidades. A este nivel de detalle los cambios estuvieron asociados tanto con el material de origen como con el contenido de MO y la clase textural.

Los valores de DA para las diferentes unidades de la zona cafetera colombiana, registrados por otros autores (15, 22), corresponden a mediciones realizadas por horizontes del perfil y permiten tener un estimativo general de su comportamiento. Sin embargo, como se observa en la Figura 3, esta propiedad puede variar dentro de un mismo horizonte, más precisamente en los primeros 40cm de profundidad, que es la zona donde se desarrolla más del 90% de las raíces del café (21).

Las unidades Chinchiná, Fresno y Timbío, presentaron poca variación de la densidad para las seis profundidades con relación al promedio (C.V.<7,4%), asociada al espesor y la homogeneidad de su horizonte A, como resultado de la acumulación continua de alófanos y MO a través del tiempo. A diferencia de lo anterior, el incipiente grado de evolución de los suelos de la unidad Montenegro (8), no ha permitido que estos materiales se acumulen en la misma proporción, dando lugar a perfiles menos profundos y con mayor variación de sus propiedades, entre ellas la DA la cual presentó un C.V. de 11,5% entre las seis profundidades.

**Tabla 3.** Promedios y coeficientes de variación (%) de algunas propiedades del suelo en ocho unidades de la zona cafetera.

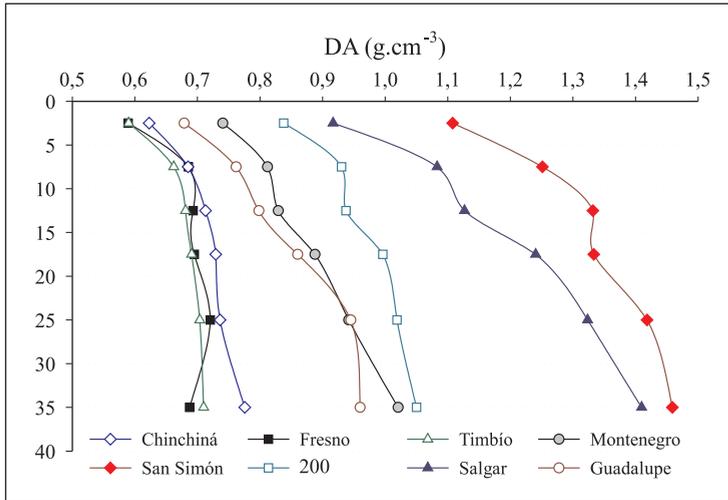
		Unidad de Suelo							
		Chinchiná	Fresno	Timbío	Montene- gro	San Simón	200	Salgar	Guadalupe
RP	$\bar{x}$	1,72	0,86	1,65	2,46	2,56	3,00	SD	2,00
(kg.cm <sup>-2</sup> )	C.V.	44,12	54,80	51,92	37,29	42,79	30,57	SD	55,89
HC	$\bar{x}$	62,87	80,52	74,92	52,30	20,47	42,79	32,29	56,71
(%)	C.V.	22,17	13,34	18,81	21,81	23,14	16,59	28,61	37,82
CH	$\bar{x}$	11,66	20,42	30,41	6,80	24,30	11,46	69,16	21,53
(cm.día <sup>-1</sup> )	C.V.	17,09	35,01	43,01	11,33	30,53	35,36	120,32	44,99
PT	$\bar{x}$	70,24	71,95	70,36	64,86	50,13	63,61	54,27	65,33
(%)	C.V.	4,45	4,34	6,45	7,70	12,73	8,48	14,61	18,02
HCC	$\bar{x}$	74,76	77,71	75,28	53,93	25,88	49,39	30,32	64,25
(%)	C.V.	14,01	11,61	13,12	11,27	5,62	8,46	10,64	26,13
HPM	$\bar{x}$	45,22	47,73	50,49	37,28	15,71	40,35	21,32	49,19
(%)	C.V.	7,63	6,68	8,70	7,48	4,60	4,57	5,99	17,20
DR	$\bar{x}$	2,38	2,42	2,25	2,48	2,64	2,64	2,58	2,36
(g.cm <sup>-3</sup> )	C.V.	4,13	3,12	8,58	4,71	1,86	2,88	3,08	7,73
A	$\bar{x}$	48,12	47,66	42,73	53,12	53,42	16,68	41,68	31,86
(%)	C.V.	7,10	10,70	16,55	5,17	8,23	42,82	30,51	41,60
L	$\bar{x}$	35,79	33,76	25,39	29,29	16,76	24,86	16,26	32,52
(%)	C.V.	11,30	15,95	25,27	11,20	11,93	16,52	29,09	26,56
Ar	$\bar{x}$	16,09	18,57	31,88	17,60	29,82	58,46	42,06	35,62
(%)	C.V.	19,04	23,35	35,97	18,98	13,24	15,46	23,85	50,24
DAS	$\bar{x}$	3,25	3,74	3,08	2,65	3,56	4,37	3,96	3,17
(mm)	C.V.	18,92	23,23	23,08	21,67	16,40	11,34	18,54	37,15
DMPH	$\bar{x}$	3,14	3,19	3,20	3,19	1,91	2,88	1,33	3,07
(mm)	C.V.	0,09	0,12	0,21	0,10	0,56	0,38	0,70	0,36
EA	$\bar{x}$	98,05	98,00	98,82	98,26	66,41	97,28	52,95	97,37
(%)	C.V.	0,98	1,51	0,73	0,84	22,30	1,97	41,74	2,94
MO	$\bar{x}$	10,84	12,31	16,33	7,65	5,87	7,07	7,64	10,80
(%)	C.V.	26,81	17,64	44,03	28,26	32,73	34,36	41,95	63,34

SD: Sin Dato

En la unidad 200 la DA exhibió un comportamiento entre profundidades similar a la unidad Chinchiná (C.V. 8%), mientras que en Guadalupe, se presentó una mayor variación de la DA a través del perfil (C.V. 13,1%). La variación de la DA en estas unidades estuvo asociada con su textura arcillosa y

la disminución de los contenidos de MO al profundizar en el suelo.

Los perfiles de las unidades San Simón y Salgar también presentaron una gran alteración de esta variable entre profundidades, con coeficientes de variación de 9,6 y 15,0%



**Figura 3.** Comportamiento de la DA a través del perfil para las ocho unidades de suelos

respectivamente, debido a que la presencia de horizontes poco profundos y partículas grandes de material de origen no permiten la agregación o acumulación de MO, y dan lugar a densidades cercanas a  $1,5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , las cuales pueden llegar a ser limitantes para el crecimiento radical de las plantas. Según Schroth (18), algunos polisacáridos orgánicos cementantes participan en dicha agregación y la fuerza de los enlaces es mayor en suelos con altos contenidos de arcilla; Mtambanengwe *et al.* (14) aseguran que los contenidos de materia orgánica en suelos de diferentes texturas están asociados con la accesibilidad de los microorganismos que participan en su mineralización, determinada por la distribución del tamaño de poros y la continuidad de los mismos; y de acuerdo con Lado *et al.* (12), al aumentar dicho contenido de materia orgánica también se favorece la estabilidad de los agregados y su resistencia a la acción erosiva del agua.

Por todo lo anterior, en los suelos donde la DA es muy cambiante en la zona de mayor presencia de raíces, como en las unidades Montenegro, San Simón, 200, Salgar y Guadalupe, la toma de un sólo

dato en el primer horizonte no es suficiente para determinar su valor, ya que puede subestimarse o sobrestimarse la misma y conducir a errores en la toma de decisiones al momento de manejar un cultivo o realizar una determinada práctica en el suelo.

**Comportamiento de la DA por unidad de suelo y por agroecosistema.** En la Figura 4, se presentan los valores promedios de la DA en los primeros 40cm del perfil, obtenidos para cada uno de los agroecosistemas en las ocho unidades evaluadas. En general, no se encontró una relación uniforme o semejante entre el uso y el manejo del suelo y la DA para todos las unidades; solamente en algunas unidades de suelos se evidenciaron efectos similares a los reportados en la literatura. A este nivel de detalle, dentro de la variación de la DA también se encontró relación con la humedad del suelo.

La DA registrada en los cafetales tecnificados, estuvo muy relacionada con el contenido de humedad del suelo al momento del muestreo, debido a la ausencia de coberturas. En aquellos sitios donde la humedad fue baja como en las unidades Chinchiná,

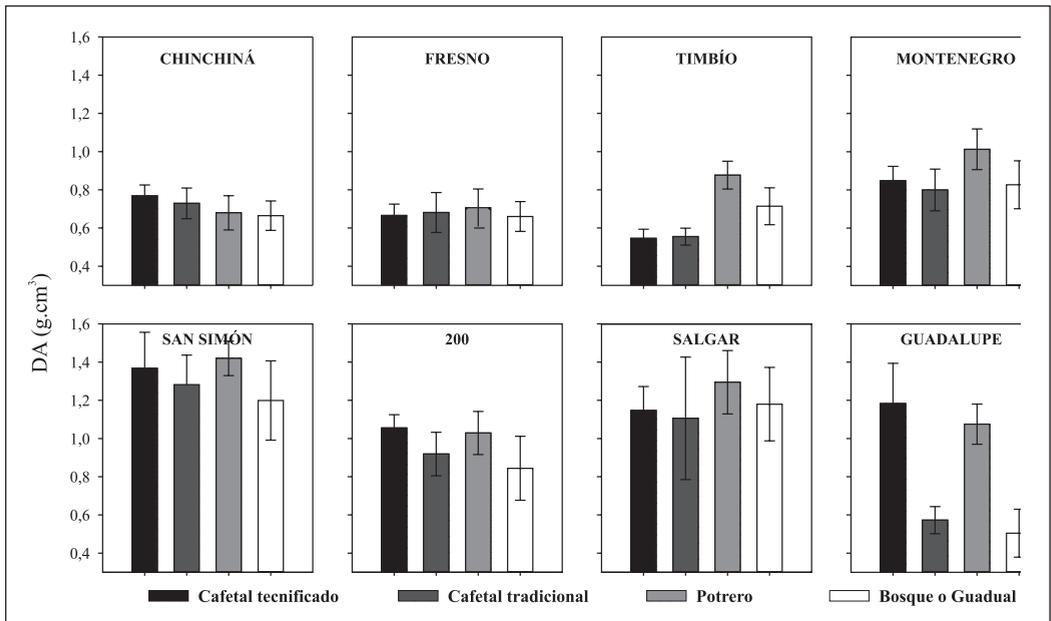


Figura 4. Comportamiento de la DA entre agroecosistemas por unidad de suelo

200 y Guadalupe, los valores de la DA fueron superiores, aún por encima de los registrados en los potreros.

Los cafetales tradicionales comparados con los otros sistemas, principalmente con el manejo tecnificado, exhibieron las densidades más bajas, fenómeno que estaría relacionado con el aporte continuo de biomasa procedente del sombrero, el cual contribuye al mejoramiento de las condiciones físicas del suelo y reduce las pérdidas de la capa superficial por erosión.

En los potreros de las unidades Fresno, Timbío, Montenegro, San Simón y Salgar, el pisoteo del ganado a través del tiempo y la subsecuente compactación del suelo se reflejan en una mayor DA promedio en los primeros 40 cm del perfil.

Entre los suelos con poca intervención antrópica las menores densidades se observaron en aquellas unidades donde las muestras

fueron tomadas en relictos de bosque (San Simón, 200 y Guadalupe), lo cual indica que la conservación de estos sistemas ejerce un efecto benéfico sobre el suelo y la sostenibilidad del mismo. De hecho, la menor DA promedio ( $0,5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) encontrada en la unidad Guadalupe, debido a la presencia de una capa superficial orgánica de aproximadamente 20cm de espesor, permite afirmar que el aporte continuo de residuos orgánicos a través del tiempo, reduce la DA hasta valores inferiores a este valor en las primeras profundidades del perfil.

Cabe destacar que los sistemas poco intervenidos de las unidades Salgar y Timbío, mostraron un comportamiento diferente, debido a que en algún momento pudieron corresponder a lotes degradados o con características desfavorables, y que por presentar limitaciones para su manejo fueron destinados a este uso. Así mismo, los guaduales de las demás unidades han tenido implicaciones poco favorables sobre el suelo como un

aumento en la compactación y por tanto, de su densidad aparente.

Para ilustrar mejor las variaciones de la DA asociadas con la humedad y los contenidos de MO del suelo, en la Tabla 4 se presentan los valores promedio por agroecosistema de estas dos propiedades, encontrados para las ocho unidades evaluadas.

### Comportamiento de la DA por unidad de suelo, agroecosistema y profundidad.

Al evaluar el comportamiento de la DA a través del perfil para cada uno de los agroecosistemas en las ocho unidades de suelo (Figura 5), hubo un incremento en los valores de esta propiedad a medida que se profundizó en el suelo en la mayoría de ellos, asociado también con el material de origen, los contenidos de MO, la humedad de campo y la clase textural.

Las unidades Chinchiná, Timbío, Montenegro, 200 y Fresno, mostraron tendencias similares de la DA a través del perfil entre los agroecosistemas y su comportamiento solo varió en las primeras cuatro unidades para los 10cm superiores, debido a la acumula-

ción de MO y los cambios en la humedad del suelo que ésta origina. En las unidades Timbío y Montenegro, cuyos contenidos de MO en el potrero fueron menores a los otros agroecosistemas, se evidenció una mayor compactación del suelo por el pisoteo, condición que aumenta los riesgos de la erosión. Por lo anterior, dentro el manejo de este sistema deben considerarse prácticas que disminuyan la degradación del suelo, tales como sistemas silvopastoriles bajo esquemas de rotación, regulación de la capacidad de carga y evitar el sobrepastoreo.

Klein y Libardi (10), aseguran que el principal efecto de la compactación causada por algunas labores de uso y manejo del suelo sobre la DA se ve reflejado en la porosidad, ya que al aumentar la DA disminuyen los macroporos y aumentan los microporos, causando deficiencias de aireación para el sistema radical de las plantas por periodos mayores a 24 horas.

En las unidades San Simón y Salgar, debido a la presencia de material consolidado cerca a la superficie, ocurrió una mayor variación de la DA tanto a través del perfil como en

**Tabla 4.** Valores promedio de los contenidos de humedad gravimétrica y materia orgánica para los cuatro agroecosistemas en cada uno de los suelos estudiados.

Unidad de suelo	Humedad gravimétrica (%)				Materia orgánica (%)			
	Cafetal tecnificado	Cafetal tradicional	Potrero	Bosque o gradual	Cafetal tecnificado	Cafetal tradicional	Potrero	Bosque o gradual
Chinchiná	49,04	73,61	67,81	61,04	9,67	11,28	10,51	11,88
Fresno	79,10	73,81	86,49	82,68	12,34	12,64	11,54	12,71
Timbío	85,61	86,50	58,15	69,44	24,47	19,41	8,24	13,20
Montenegro	51,60	54,80	44,06	58,71	8,06	8,77	5,92	7,85
San Simón	17,89	19,20	20,01	24,79	5,08	5,29	5,58	7,52
200	37,24	38,94	43,97	51,01	6,19	7,10	7,39	7,58
Salgar	26,73	35,42	31,74	35,28	7,37	9,64	6,67	6,87
Guadalupe	32,49	75,57	44,09	74,68	6,46	12,09	6,24	18,41

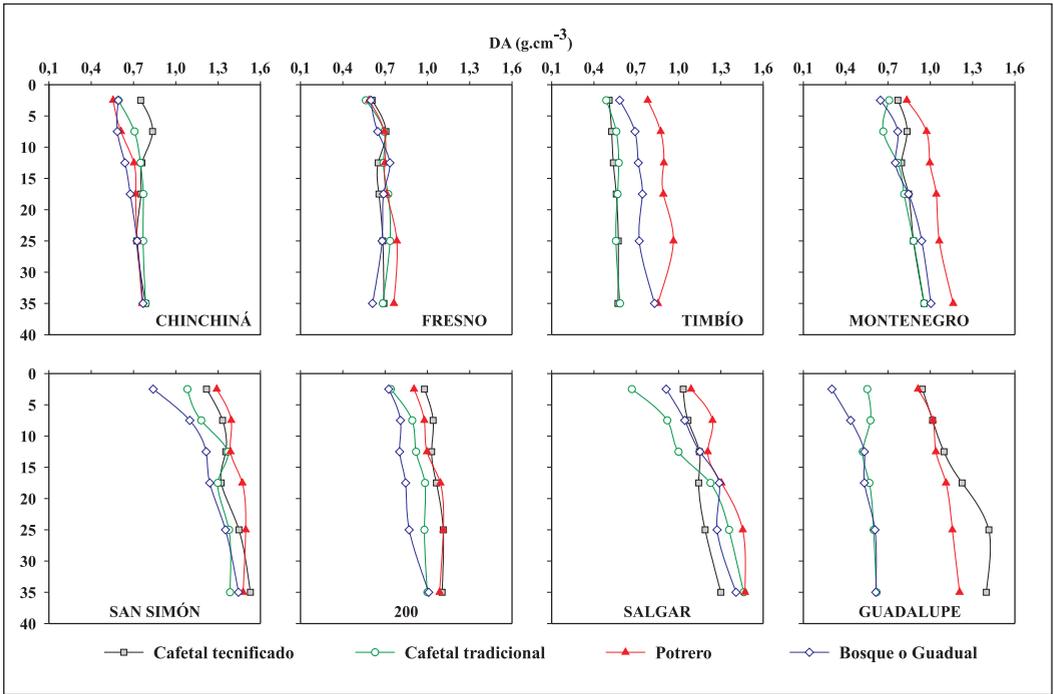


Figura 5. Comportamiento de DA a través del perfil para los cuatro agroecosistemas en las ocho unidades del suelo

los primeros centímetros de profundidad, lo cual indica que el aporte continuo de MO en los cafetales tradicionales y el bosque a través del tiempo, contribuye a mejorar las condiciones físicas de estos suelos. En estas unidades, el aporte e incorporación de materiales orgánicos se constituye en una práctica importante para el manejo de suelos.

La diferencia observada entre agroecosistemas en la unidad Guadalupe, estuvo más asociada con la ubicación de los lotes y el tiempo de uso. El cafetal tecnificado y el potrero tuvieron valores de DA similares en las primeras profundidades ( $1,0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), pero debido al alto grado de la pendiente del cafetal, la presencia de material consolidado dio lugar a mayores densidades en la capa subsuperficial ( $>1,2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). Entre el cafetal tradicional y el bosque, la DA sólo varió en las primeras profundidades, como

resultado de la acumulación de residuos en el bosque durante muchos años que originó la formación de una capa superficial netamente orgánica, con bajos valores de DA ( $<0,6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) y alta retención de humedad a capacidad de campo (80%).

#### Relación entre la DA y otras propiedades.

Teniendo en cuenta que las variaciones de la DA en las ocho unidades de suelo estuvieron asociadas con el material parental y otras propiedades como la MO, la textura y el contenido de humedad, se estimó y corroboró la proporción de estas relaciones, mediante las pruebas de correlación entre la DA y algunas de las variables evaluadas.

Las propiedades del suelo que mejor estuvieron relacionadas con la DA, tanto a nivel general (las ocho unidades) como por unidad cartográfica, fueron seleccionadas con

base en su significancia y los altos coeficientes de correlación (Tabla 5).

A nivel general, las características mejor correlacionadas con la DA en forma positiva fueron la densidad real (DR) y la resistencia a la penetración en el campo (RP), mientras que inversamente lo hicieron la porosidad total (PT), la humedad a capacidad de campo (HCC), la humedad a punto de marchitez permanente (HPM), la humedad de campo (HC), el diámetro medio ponderado en húmedo (DMPH), el contenido de materia orgánica (MO), la estabilidad de los agregados (EA) y el porcentaje de limos (L). La PT mostró los niveles de correlación más altos debido a que el cálculo de este valor depende directamente de la DA.

A nivel individual, en la unidad Guadalupe se presentó una tendencia similar a la general, incluso con porcentajes de correlación mucho mayores para todas las variables excepto para el porcentaje de limos (L), y una alta relación con los contenidos de arcillas (Ar) y arenas (A).

Solamente tres propiedades se correlacionaron significativamente con la DA en las ocho unidades de suelo: HC, HCC y MO. La DR afectó directamente la DA solo en siete unidades de suelo y la RP presentó un efecto similar en seis, con coeficientes de correlación entre 0,50 y 0,95.

La estrecha correlación entre la densidad aparente y la estabilidad de los agregados, principalmente en las unidades San Simón y Salgar, indica que esta característica tiene implicaciones importantes al estimar la susceptibilidad de estos suelos a la erosión. A medida que aumenta el tamaño de las partículas del suelo se reduce la agregación y la estabilidad de los mismos, permitiendo que las partículas de menor tamaño y agentes agregantes sean arrastrados con mayor facilidad por el agua, con lo que se aumentan los riesgos de erosión y disminuye la fertilidad de los suelos.

Comportamientos similares, incluso con coeficientes más altos de correlación entre

**Tabla 5.** Coeficientes de correlación de Pearson entre la DA y todas las propiedades físicas evaluadas por unidad de suelo.

Propiedad	Densidad Aparente								
	General	Chinchiná	Fresno	Timbío	Montenegro	San Simón	200	Salgar	Guadalupe
DR	0,791*	0,654*	0,554*	0,931*	0,749*	0,747*	0,352	0,737*	0,881*
RP	0,694*	0,264	0,596*	0,499*	0,703*	0,908*	0,829*	SD	0,950*
DAS	0,479*	0,396	0,300	0,868*	0,105	0,533*	0,655*	0,508*	0,849*
Ar	0,442*	0,005	0,167	0,883*	0,400	-0,243	-0,189	-0,205	0,908*
PT	-0,992*	-0,950*	-0,970*	-0,982*	-0,992*	-0,995*	-0,977*	-0,992*	-0,996*
HCC	-0,947*	-0,898*	-0,531*	-0,914*	-0,855*	-0,914*	-0,780*	-0,810*	-0,978*
HPM	-0,914*	-0,780*	-0,237	-0,772*	-0,909*	-0,836*	-0,815*	-0,695*	-0,975*
HC	-0,912*	-0,589*	0,442*	-0,895*	-0,844*	-0,814*	-0,603*	-0,807*	-0,969*
DMPH	-0,780*	-0,555*	0,148	-0,097	0,145	-0,879*	-0,518*	-0,703*	-0,748*
MO	-0,766*	-0,715*	-0,632*	-0,893*	-0,948*	-0,859*	-0,708*	-0,873*	-0,820*
EA	-0,724*	-0,542*	-0,259	0,432*	0,312	-0,873*	-0,565*	-0,576*	-0,787*
L	-0,685*	-0,499*	0,474*	-0,659*	-0,369	0,469*	0,325	-0,015	-0,566*
A	-0,105	0,620*	-0,594*	-0,898*	-0,062	0,036	0,066	0,151	-0,928*
CH	0,013	-0,421*	-0,500*	-0,692	-0,659*	-0,673*	-0,172	-0,185	-0,307

\* Correlación significativa (P<0,05).

la DA y las propiedades físicas evaluadas, fueron observados tanto para todo el perfil (0-40cm) como en las seis profundidades (Tabla 6); estos resultados indican que cambios en las características o en la condición del suelo afectan la DA en las diferentes capas de suelo

Las altas correlaciones encontradas entre la DA y los contenidos de humedad y la MO, también pueden observarse en el comportamiento promedio de estas características a través del perfil (Figura 6). Los suelos que por su tamaño de partículas presentan los mayores valores de DA como en la unidad San Simón, son aquellos que tienden a mostrar menores contenidos de MO y retienen menos humedad. A medida que se incrementan los contenidos de MO, disminuyen los valores de la DA y aumenta la retención de agua disponible para los cultivos. Según Burbano (3) y Primavesi (16), este efecto benéfico de la MO se debe a que la agregación del suelo facilita el flujo de aire, retiene la humedad, disminuye la resistencia a la penetración y

por ende, mejoran las condiciones físicas para el crecimiento de las raíces.

A partir de las correlaciones mostradas en la Tabla 6, también puede afirmarse que la DA depende en gran parte de las condiciones de humedad del suelo al momento del muestreo y su retención de agua aprovechable entre CC y PMP, las cuales a su vez dependen de los contenidos de MO del suelo.

A medida que aumentan los contenidos de MO, mejora la retención de humedad del suelo y disminuyen los valores de resistencia a la penetración y de densidad. La interacción de estas tres propiedades es la que mayor implicación tiene sobre las condiciones que determinan la disponibilidad de agua y aire, el área a ser explorada por las raíces y el crecimiento de las plantas.

Debido a que varias de las propiedades analizadas estuvieron estrechamente relacionadas con la DA, a partir del análisis de

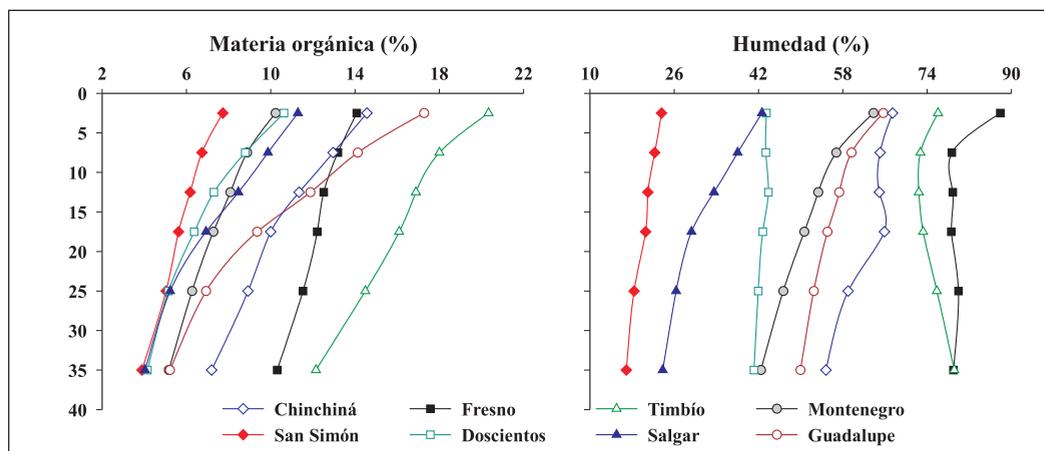


Figura 6. Comportamiento a través del perfil de los contenidos de la materia orgánica (MO) y la humedad de campo (HC) en ocho unidades de suelo.

**Tabla 6.** Coeficientes de correlación de Pearson entre la DA y todas las propiedades físicas evaluadas por profundidad.

PROPIEDAD	Densidad Aparente						
	0-40cm	0-5cm	5-10cm	10-15cm	15-20cm	20-30cm	30-40cm
DR	0,791*	0,803*	0,790*	0,783*	0,789*	0,775*	0,779*
RP	0,694*	0,530*	0,639*	0,675*	0,753*	0,741*	0,765*
DAS	0,479*	0,515*	0,527*	0,497*	0,474*	0,478*	0,404*
Ar	0,442*	0,418*	0,466*	0,468*	0,490*	0,504*	0,469*
PT	-0,992*	-0,987*	-0,990*	-0,991*	-0,991*	-0,993*	-0,995*
HCC	-0,947*	-0,888*	-0,944*	-0,956*	-0,966*	-0,970*	-0,976*
HPM	-0,914*	-0,882*	-0,916*	-0,932*	-0,942*	-0,933*	-0,946*
HC	-0,912*	-0,861*	-0,919*	-0,949*	-0,954*	-0,926*	-0,930*
DMPH	-0,780*	-0,658*	-0,700*	-0,731*	-0,763*	-0,803*	-0,856*
MO	-0,766*	-0,788*	-0,796*	-0,766*	-0,760*	-0,742*	-0,709*
EA	-0,724*	-0,648*	-0,696*	-0,721*	-0,717*	-0,727*	-0,779*
L	-0,685*	-0,531*	-0,709*	-0,796*	-0,770*	-0,791*	-0,863*
A	-0,105	-0,189	-0,157	-0,088	-0,084	-0,065	-0,048
CH	0,013	-0,030	0,158	0,139	0,122	0,169	0,350*

\* Correlación significativa ( $P < 0,05$ ).

regresión múltiple stepwise se obtuvieron las variables cuya relación con la DA fue altamente significativa para todas y cada una de las unidades de suelo. A nivel general no se consideró la variable RP, debido a que el análisis excluía a la unidad Salgar por no tener datos para esta variable; sin embargo, si se tuvo en cuenta en el análisis individual para cada unidad de suelos. Las variables seleccionadas por el análisis estadístico para todos los datos, a un nivel de significancia del 5%, fueron en el siguiente orden: HCC, DAS, Ar, MO y DR. En la Tabla 7, se presentan los modelos obtenidos por el análisis para cada unidad de suelo, en comparación con el grupo general, el cual incluyó todos los datos obtenidos en las ocho unidades.

Las propiedades físicas que mejor explicaron el comportamiento de la DA, tanto a nivel general como para la mayoría de las unidades de suelo fueron la retención de humedad a capacidad de campo, la distribución de agregados en seco y la materia orgánica. Cuando se incluyó resistencia a la penetración en el campo esta tuvo una relación significativa con la DA dentro del

grupo de las siete unidades, pero a nivel individual sólo fue relevante para las unidades San Simón, 200 y Guadalupe.

En relación con lo anterior, Heuscher *et al.* (9), en un estudio para predecir la DA a partir de otras propiedades, utilizando el análisis stepwise, también encontraron que la variable que mayor peso tuvo sobre dicha predicción fue el contenido de carbono orgánico y que la predicción fue mejor cuando se analizaron los datos a nivel de subórdenes de suelo. Otras variables significativas fueron los contenidos de arcillas y humedad, y en una menor proporción el porcentaje de limos y la profundidad. Relaciones similares fueron registradas por Bernoux *et al.* (1).

Con el fin de tratar de explicar la variabilidad de la DA en función de unas pocas variables, se escogieron la HCC y la MO, dadas sus altas relaciones con esta propiedad y la facilidad para su medición en el laboratorio. La variable DAS se eliminó debido a la dificultad para medirla y porque dentro del análisis de supuestos no fue significativa en el modelo generado

para las tres variables. A partir de las dos variables seleccionadas se realizó nuevamente una regresión lineal múltiple basada en la prueba de supuestos estadísticos, de tal manera que la ecuación originada a partir de dicha regresión tuviera el mejor ajuste y cumpliera todos los supuestos.

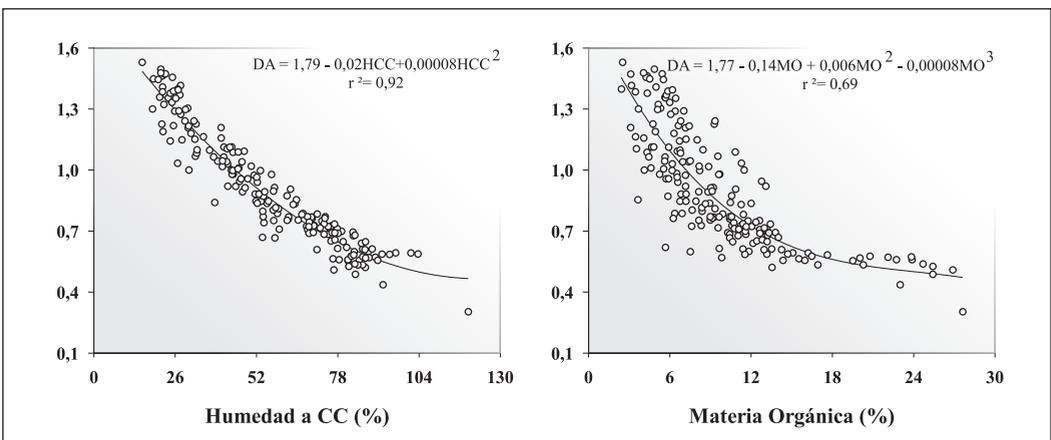
En la Figura 7, se presenta la relación entre estas dos propiedades y la DA, así

como las ecuaciones de mejor ajuste, ya que la distribución de los datos y los coeficientes de regresión lineal no fueron los más altos, indicando que las dos propiedades no están relacionadas linealmente con la DA.

Con el fin de obtener una relación lineal de mejor ajuste que incluyera la DA con estas variables, mediante el análisis de supuestos se transformó la variable DA y

**Tabla 7.** Resultados y modelos del análisis de regresión stepwise, para todos los datos y por unidad de suelo.

Unidad	Intercepto	HCC	DAS	MO	RP	DMPH	DR	HPM	Ar	L	A	EA	HC	R <sup>2</sup>
Todas sin RP	2,179	-0,0073	0,063	-0,011		-0,060	-0,260		-0,0014				-0,0024	0,939
Todas con RP	2,364	-0,0076	0,050	-0,010	0,025		-0,236					-0,0062		0,966
Chinchiná	1,689	-0,0048	0,029			-0,228								0,879
Fresno	1,122	-0,0049	0,050								-0,0053			0,777
Timbio	0,445	-0,0096					0,350			0,0066				0,976
Montenegro	1,454			-0,040				-0,0074						0,944
San Simón	1,258	-0,0205	0,067		0,045				0,0079					0,953
200	0,751	-0,0066			0,065					0,0137				0,880
Salgar	1,540	-0,0236		-0,040				0,0313						0,897
Guadalupe	1,791	-0,0038	0,035		0,043	-0,190		-0,0066						0,994



**Figura 7.** Regresiones entre la densidad aparente (DA) y la humedad a capacidad de campo (HCC) y entre la DA y la materia orgánica (MO)

se originó una gráfica a partir de la cual puede estimarse la densidad, con base en los valores de HCC y MO (Figura 8).

La ecuación resultante del modelo con un coeficiente de ajuste del 94,7% fue:

$$\text{Log DA} = 0,332 - 0,006(\text{HCC}) - 0,017(\text{MO}) + 0,0001(\text{HCC} * \text{MO})$$

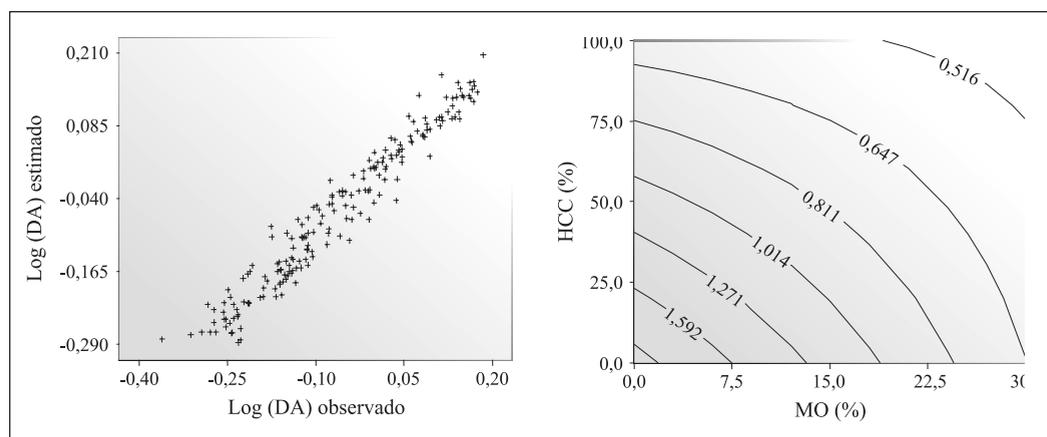
Ecuación que confirma la relación inversa de la HCC y la MO con el Log (DA), pero muestra que la interacción (HCC x MO) tiene una relación positiva. Conociendo estas dos propiedades en el campo, también puede estimarse el valor de la DA en suelos con condiciones similares a las estudiadas y a su vez, predecir las posibles limitaciones de los mismos con el fin de tomar las medidas necesarias para obtener un ambiente físico favorable para el buen crecimiento de las raíces y por consiguiente el desarrollo de las plantas. En otros suelos debe corroborarse su estimación con mediciones realizadas directamente en el campo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a todas las instituciones y personas que hicieron posible la realización de este trabajo, especialmente a los caficultores por permitir la toma de las muestras y a quienes coordinaron dicha labor: a los jefes de las Estaciones Experimentales Naranjal, El Rosario y El Tambo, a los Comités de Caficultores y Extensionistas de los municipios de Ibagué, Fresno, Quimbaya, Dagua y Pitalito.

## LITERATURA CITADA

1. BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 62: 743-749. 1998.
2. BRADY, N.C.; WEIL, R.R. The nature and properties of soils. New Jersey, Prentice-Hall, 1999. 881 p.
3. BURBANO, H. Lo biorgánico en el manejo productivo del suelo. In: MANEJO productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento. Palmira, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2001. p. 109-128.



**Figura 8.** Gráficas de ajuste del modelo y de estimación de valores de la densidad aparente (DA) a partir de la humedad a capacidad de campo (HCC) y la materia orgánica (MO)

4. CARRILLO P., I.F. Manual de laboratorio de suelos. Chinchiná, Cenicafé, 1985. 111 p.
5. DICK, R.P. Soil Biological, chemical, and physical dynamics during transition to nonthermal residue management grass seed systems. Online Internet. Oregon, GSCSSA, 2004. Progress reports FY00. Disponible en: <http://gscssa.wsu.edu/progress/00/100.htm>. (Consultado en Julio de 2005)
6. FOLEGATTI, M.V.; BRASIL, R.P.C. DO; BLANCO, F.F. Sampling equipment for soil bulk density determination tested in a Kandialfic Eutrudox and a Typic Hapludox. *Scientia Agricola* 58: 833-838. 2001.
7. HADDAD, N. Introduction - Why Study Earth System Science. Online Internet. Cambridge, TERC, 2004. Disponible en: <http://serc.carleton.edu/files/eet/globe/EarthSysInt.pdf>. (Consultado en Julio de 2005)
8. HENAO T., M.C. Caracterización de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona cafetera central colombiana. In: SUELOS del eje cafetero. Pereira, UTP-GTZ, 2001. p. 57-77.
9. HEUSCHER, S.A.; BRANDT, C.C.; JARDINE, P.M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal* 69: 51-56. 2005.
10. KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 26: 857-867. 2002.
11. KOOIJMAN, A.M.; JONGEJANS, J.; SEVINK, J. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in NE Spain. *Catena* 59: 55-68. 2005.
12. LADO, M.; PAZ, A.; BEN-HUR, M. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal* 68:935-942. 2004.
13. MONTENEGRO, H.; MALAGÓN, D. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá, IGAC, 1990. 813 p.
14. MTAMBANENGWE, F.; MAPFUMO, P.; KIRCHMANN, H. Decomposition of Organic Matter in Soil as Influenced by Texture and Pore Size Distribution. In: MANAGING Nutrient Cycles to Sustain Soil Fertility in Sub-Saharan Africa. Nairobi, Academy Science Publishers - Tropical Soil Biology and Fertility Institute of CIAT, 2004. p 261-275.
15. PINZÓN, A. Propiedades físicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 23: 22-30. 1993.
16. PRIMAVESI, A. Manejo ecológico del suelo; la agricultura en regiones tropicales. 5. Ed. Buenos Aires, El Ateneo, 1984. 499 p.
17. SALAMANCAJ., A.; SADEGHIAN K., S. La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del café. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 326: 1-8. 2004.
18. SCHROTH, G. Measuring the role of soil organic matter in aggregate stability. In: TREES, crops and soil fertility. Concepts and research methods. Wallingford, CABI Publishing, 2003. p. 204-207.
19. STEWART, D.P.; CAMERON, K.C.; CORNFORTH, I.S.; SEDCOLE, J.R. Effects of spent mushroom substrate on soil physical conditions and plant growth in an intensive horticultural system. *Australian Journal of Soil Research* 36(6): 899-912. 1998.
20. STINE, M.A.; WEIL, R.R. The relationship between soil quality and crop productivity across three tillage systems in South Central Honduras. *American Journal of Alternative Agriculture* 17: 2-8. 2002.
21. SUÁREZ DE C., F.; RODRÍGUEZ, A. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de suelos en Colombia. Chinchiná, FNC, 1962. 474 p.
22. SUÁREZ V., S. Características físicas de los suelos de la zona cafetera colombiana, relacionadas con el uso, manejo y conservación. In: SIMPOSIO sobre Suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Chinchiná, Julio 24-28, 2000. Ponencias. Chinchiná, Cenicafé, 2000. 17 p.
23. VALENCIA A., G. Fisiología, nutrición y fertilización del café. Chinchiná, Cenicafé-Agroinsumos del Café, 1999. 94 p.
24. WILD, A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Madrid, Ediciones Mundiprensa, 1992. 1045 p.
25. WOLF, B.; SNYDER, G. Sustainable soils; the place of organic matter in sustainable soils and their productivity. New York, Food Products Press, 2003. 352 p.