

Producción de café (*Coffea arabica* L.) en función de las propiedades del suelo, en dos localidades de Quindío, Colombia

Production of coffee (*Coffea arabica* L.) depending on soil properties, in two localities of Quindío, Colombia

Produção de café (Coffea arabica L.) em função das propriedades do solo, de duas localidades em Quindío, Colômbia

¹Luz Adriana Lince Salazar & ²Siavosh Sadeghian Khalajabadi

¹Geóloga, Estudiante de maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente en la Universidad de Manizales, Colombia. ²Ingeniero Agrónomo, Magister en Ciencias Agrarias énfasis Suelos, Doctor en Ciencias Agropecuarias énfasis Fisiología Vegetal.

^{1,2}Centro Nacional de Investigaciones de Café- CENICAFE. Manizales. Colombia.

¹luz.lince@cafedecolombia.com, ²siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

Resumen

La producción agrícola es afectada por los componentes suelo, clima y manejo del sistema, los cuales al interactuar originan más de 50 factores que influyen de diferente forma en el cultivo. Con el objetivo de identificar las propiedades del suelo que determinan en mayor grado la producción de café, se realizó una investigación en dos localidades del departamento del Quindío, Colombia, entre los años 2011 y 2012, en lotes de café de 1,0 ha, plantados con variedad Castillo® de tres años de edad y fertilizados según los análisis de suelos. Se tomaron muestras de suelo cada 10 m en forma de retícula, a una profundidad de 0 a 20 cm y se analizaron 31 propiedades físicas y químicas. Cada muestra estaba conformada por cuatro muestras simples, tomadas en el plato de los árboles colindantes, a los que se les registró la producción de café cereza durante 21 meses. En general, la producción fue explicada entre 17,89% y 41,16%, por pocas propiedades, entre ellas porosidad, textura, profundidad del horizonte A, y contenidos de materia orgánica, S, B y Mn.

Palabras clave: porosidad, humedad gravimétrica, boro, materia orgánica.

Abstract

Agricultural production is affected by the climate, soil, and crop management components. Which interacting to originate the more than 50 factors that influencing differently in the crop. With the objective of identifying the variables of the soil that determine to a greater degree coffee production, a study was developed in the Department of Quindío, between 2011 and 2012, in three-year old Castillo® variety coffee plantations, handled in conventional way, and fertilized according to soil analysis. Were taken Soil sample every 10 m crosshair at a depth of 0 to 20 cm, and were analyzed 31 physical and chemical properties. Each sample was made up of four simple samples, taken on the plate of the neighboring trees, to which were recorded cherry coffee production for 21 months. In general, was explained the production between 17,89% and 41,16%, by a few

properties, including porosity, texture, depth of horizon A, and content of organic matter, S, B and Mn.

Key-words: Porosity, gravimetric moisture, organic matter, boron

Resumo

A produção agrícola é afetada pelos componentes solo, clima e manejo do sistema, quando eles interagem dão origem a mais de 50 fatores que influenciam de forma diferente nas culturas. Com o objetivo de identificar as propriedades do solo que determinam maiormente a produção de café, foi realizada uma pesquisa em duas localidades do estado de Quindío, Colômbia, entre 2011 e 2012, em

parcelas de café de 1,0 hectare, plantados com a variedade Castillo® de três anos de idade e fertilizados segundo as análises de solo. Foram coletadas amostras de solo cada 10 m na forma de retícula, a profundidade foi de 0 a 20 cm e analisaram-se 31 propriedades físicas e químicas. Cada amostra consistiu de quatro amostras simples, coletadas na placa de árvores adjacentes, com produção de café cereja registrada durante 21 meses. De forma geral, a produção foi explicada entre 17,89% e 41,16%, por poucas propriedades, entre elas porosidade, textura, profundidade do horizonte A, y conteúdos de matéria orgânica, S, B y Mn.

Palavras-chave: porosidade, umidade gravimétrica, boro, matéria orgânica.

Introducción

La producción agrícola es afectada por los componentes suelo, clima y manejo del cultivo, los cuales interactúan y originan más de 50 factores que influyen en ella de diferente forma (Havlin, Beaton, Tisdale & Nelson, 2004). Dichos componentes presentan variabilidad espacial y temporal, la cual en muchas ocasiones se ve también reflejada en la producción.

Entre estos factores, el suelo es el que presenta la variabilidad más estable (Xia, Zhao, Hao & Zhang, 2015); es decir sus propiedades químicas y físicas no varían en el corto tiempo (horas, días, meses), a no ser que se vean afectadas por el manejo. Esta variabilidad se da a largas y cortas distancias, en virtud del material parental y la topografía, que son contempladas como factores limitantes de la producción (de Moraes *et al.* 2016; Silva *et al.*, 2015; Munkholm, Heck, & Deen, 2013; Jin *et al.*, 2011). A pesar de lo anterior, en la mayoría de investigaciones enfocadas a la variabilidad de la producción, no se incluye la variabilidad edáfica (Stadler *et al.*, 2015), debido a que genera altos costos en análisis y demanda más tiempo a causa del muestreo (Heil & Schminhalter, 2012). Sin embargo, hoy en día se adelantan estudios de las propiedades de la

superficie del suelo por métodos de sensoramiento geofísico no invasivo, que tienden a disminuir los costos y el tiempo de evaluación (Sudduth, Kitchen, Myers & Drummond, 2010; Abdu, Robinson, Seyfried & Jones, 2008; Corwin & Lesch, 2005), lo cual puede llevar a que se incrementen los estudios de variabilidad del suelo a una escala más detallada.

Entre las formas de evaluar la influencia de la variabilidad de las propiedades del suelo en la producción están los modelos de rendimiento espacial (Rosenzweig *et al.*, 2013); en estos se evalúan el área foliar, la materia seca y/o la producción de frutos (Hakojärvi, Hautala, Ristolainen & Alakukku, 2013; Stadler *et al.*, 2015) en función de indicadores, tales como contenidos de elementos nutritivos en el suelo (Tahvanainen y Rytönen, 1999; Kersebaum *et al.*, 2005) y conductividad eléctrica (Stadler *et al.*, 2015). Sin embargo, algunos autores como Stadler *et al.* (2015) y Hakojärvi *et al.* (2013) indican que es difícil predecir la acumulación de biomasa a partir de las propiedades del suelo, ya que es difícil separar la influencia de otros factores como clima, enfermedades, manejo y pendiente del terreno, y para Mirschel *et al.* (2014) estos modelos deben utilizarse con precaución, ya que la extrapolación de los

datos es riesgosa y presenta incertidumbre, especialmente cuando se aplican a condiciones para las que no fueron calibrados.

Para la producción de café y su relación con las propiedades del suelo, Castro-Tanzi *et al.* (2012) identificaron los contenidos de N, K, P y Mg como los de mayor influencia; Sadeghian (2008) halló relaciones entre los contenidos de N, K y P del suelo y la producción de café; Valencia (1999) propuso la densidad aparente como uno de los factores determinantes de la producción de café en Colombia, y Salamanca & Sadeghian (2005) encontraron, para etapa de almacigo, que esta propiedad influye en la producción de biomasa; DaMatta & Ramalho (2006) determinaron que el estrés hídrico puede disminuir la producción del cultivo hasta en un 80%; lo cual tiene relación con el reporte de Suárez (1996) al indicar que un volumen poroso reducido impide que el sistema radical se desarrolle y que se puedan absorber la cantidad de agua y nutrientes necesarios, especialmente en épocas secas. Bermúdez (1954) encontró una relación directa entre el desarrollo de las raíces y la porosidad del suelo, al igual que con profundidad del horizonte A, textura, humedad y aireación, además indicó que el sistema radical tiene forma de cono invertido, cuya extensión y diámetro dependen del tipo de suelo, lo que hace que la planta de café no tenga un sistema de raíces típico, sino uno modificado según el tipo de suelo.

A pesar de que se han realizado investigaciones en torno a la influencia de las propiedades del suelo en la producción de café, no se encuentran reportes de la influencia de los elementos menores ni de la mayoría de propiedades físicas, por tal razón se investigó en la identificación de más variables del suelo que limiten la producción de café a nivel de lote.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en dos fincas de vocación cafetera, Buenos Aires y El Cortijo, ubicadas en la región central del departamento de Quindío, Colombia a 4°29'01"N, 75°42'00" W y 4°34'50" N, 75°38'43" W, respectivamente. Entre los años 2011

y 2012, según los registros de precipitación (3528 mm/año en 2011 y 2685 mm/año 2012, medidos en la estación meteorológica La Pradera – Federación Nacional de Cafeteros de Colombia), estuvieron afectados por el fenómeno de La Niña. Las unidades cartográficas de suelo correspondieron a Chinchiná y Quindío (*Typic Melanudands* y *Typic Hapludands* respectivamente), según la denominación de la FNC.

Los lotes seleccionados en las fincas Buenos Aires y El Cortijo, cada uno de 1,0 ha, estaban plantados con café variedad Castillo®, con edades de 26 y 36 meses y densidades de siembra de 7.700 y 7.000 plantas/ha, respectivamente, a plena exposición solar y manejo agronómico recomendado por Cenicafe, en el cual se incluía la fertilización definida por el análisis de suelos (Tabla 1) y las recomendaciones a nivel nacional (Sadeghian, 2010), con el fin de suplir las necesidades de elementos mayores y corrección de acidez.

Los lotes fueron georreferenciados mediante un sistema en retícula de 10 m x 10 m y en cada punto se colectó una muestra compuesta a partir de cuatro muestras simples tomadas a una profundidad de 0 a 20 cm. En total, se muestrearon 92 puntos en la Finca Buenos Aires y 96 en El Cortijo. Las propiedades químicas evaluadas fueron pH, MO, P, K, Ca, Mg, S, Al, Fe, Mn, Zn, Cu, B y capacidad de intercambio catiónico (CIC) según las metodologías descritas por Carillo (1985) y las físicas fueron textura, densidad aparente (Da), densidad real (Dr), estabilidad de agregados en húmedo (Ea), resistencia a la penetración (Rp), conductividad hidráulica (Ch), retención de humedad (Rh) a 0,33 y 15 atm, distribución de agregados en seco (Das) y profundidad del horizonte A (PHA), según las metodologías descritas por IGAC; además, se calculó la saturación de K, Ca, Mg, Al y las porosidades macro, meso, micro y total, a partir de las retenciones de humedad en relación con las densidades.

Como variable de respuesta se registró la producción de café cereza de los cuatro árboles colindantes a los puntos georreferenciados, de abril de 2011 a diciembre de 2012. Se realizó un análisis de

estadística descriptiva, análisis de regresión lineal múltiple con confianza del 95% entre las propiedades del suelo y las producciones de los años 2011, 2012 y la total; además se realizó un análisis de correlación entre las propiedades del suelo con una confianza del 95%. El software utilizado fue Statgraphics Centurion 15.2.11.0.

Tabla 1. Dosis de nutrientes y cal aplicadas en los lotes evaluados.

Nutriente	Dosis kg/ha/año	
	Finca Buenos Aires (n=92)	Finca El Cortijo (n=96)
Nitrógeno – N	300	260
Fósforo – P ₂ O ₅	40	40
Potasio – K	300	180
Magnesio – MgO	60	40
Azufre – S	0	50
Cal	1000	400

Resultados y discusión

Según lo establecido para el cultivo del café en Colombia (Sadeghian, 2008), el pH del suelo en las fincas estuvo en rango intermedio, y en promedio la finca Buenos Aires presentó contenidos bajos de MO y K, medios de Ca y Mg, y altos de P y S; mientras que la finca El Cortijo registró contenidos bajos de Ca, Mg, P y S, y medios de MO y K. La descripción estadística de las 31 propiedades evaluadas se presenta en Tabla 2.

La producción registrada en la finca Buenos Aires durante el año 2011 fue de 1601,2 kg (en 368 plantas) con un valor mínimo de 9,3 kg/4 plantas, máximo de 27,0 kg/4 plantas y promedio de 17,4 kg/4 plantas; y con resultados similares, la finca El Cortijo tuvo una producción total de 1703,4 kg (en 400 plantas), valor mínimo de 9,2 kg/4 plantas, máximo de 32,7 kg/4 plantas y promedio de 17,1 kg/4 plantas. En ambas localidades la distribución de la producción fue normal (Figura 1), con sitios de mayor producción en

el centro de los lotes (Figura 2), y coeficientes de variación de 23,1 % y 25,9 % para las fincas Buenos Aires y El Cortijo, respectivamente.

La producción en las dos localidades se explicó mediante modelos lineales; para la Finca Buenos Aires la producción correspondiente al año 2011 se explicó en 24,37 % con uno que incluyó de forma directa P, contenido de Ar y macroporosidad (Map) (Tabla 3), la correspondiente al año 2012 en 23,68 % por Mn y Ar de forma directa, y por PHA de forma inversa, y la total (2011 – 2012) en 17,89 % por P, Ar y Map de forma directa. En la finca El Cortijo la producción para el año 2011 se explicó en 33,47 % por arena y B de forma directa, y Da y HG de forma inversa; la producción del 2012 en 38,96 % por B de forma directa y por MO, S, Da y HG de forma inversa; y finalmente la total (2011 – 2012) en 41,16 % por B y arena de forma directa, y Da y HG de forma inversa. Estos resultados indican que para la producción de café, fuera de las propiedades ya mencionadas por Sadeghian, García, & Montoya (2006) y Castro-Tanzi *et al.* (2012), hay otras que también la afectan, como son algunos elementos menores y propiedades físicas.

Entre las propiedades químicas que explicaron la producción en la finca Buenos Aires se encuentran P y Mn. El P fue una de las que mayor peso tuvo, a pesar de que más del 50% de los datos presentaron valores altos según los requerimientos del cultivo de café (Sadeghian, 2008), esta respuesta se puede atribuir a la alta variabilidad del elemento en el suelo, ya que a pesar de que se trató de controlar la respuesta al elemento mediante aplicación de fertilizantes, la dosis de 40 kg.ha⁻¹.año⁻¹ pudo haber sido insuficiente para aquellos sitios que reportaron valores por debajo de 10 mg.kg⁻¹ del elemento. Para Mn, al igual que P, los valores en el suelo fueron altos (según la clasificación de Lora, 1991), por lo cual, su influencia en la producción puede estar relacionada con las correlaciones directas con K, Ca y Mg, e inversa con Al, que en altas concentraciones puede ser tóxico para el cultivo.

En cuanto a las propiedades físicas que explicaron la producción en la finca Buenos Aires, el contenido de Ar fue incluido de forma positiva, lo que es probablemente atribuido a la correlación significativa

con CIC y MO (Tablas 4 y 5), debido a que las Ar hacen parte de la fracción coloidal del suelo, la cual es considerada como el mayor reservorio de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) aprovechables por las plantas (Sadeghian, 2012). Otra variable física que influyó de forma directa en la producción fue Map, posiblemente atribuido a su función de rápido drenaje de los suelos, y favorecimiento de la circulación de oxígeno y agua, para la nutrición de la planta y desarrollo de raíces. Y finalmente la PHA intervino de forma inversa, lo que se puede explicar dadas sus correlaciones con la Rp y la Ch; la Rp se correlaciona de manera positiva, es decir las capas más profundas de suelo presenta mayor Rp, lo que es negativo para el desarrollo de las raíces, y con respecto a la Ch, ésta se correlacionó de manera negativa, por lo tanto a mayor profundidad, menor Ch, lo que es perjudicial para la planta ya que limita la dinámica de agua en el suelo y con ello la distribución de los nutrientes.

La producción en la finca El Cortijo se explicó con modelos que indicaron una influencia positiva de B, posiblemente explicada por la alta variabilidad del elemento en el suelo, con valores que van de 0,11 a 2,79 mg.kg^{-1} , los cuales según la clasificación de Lora (1991) abarcan tanto los rangos bajos ($<0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$) como altos ($>0,4 \text{ mg.kg}^{-1}$); y la relación entre las demás propiedades incluidas en los modelos (Tabla 3), correspondientes a HG, A, Da, MO y S, presentan correlaciones entre ellas (Tablas 6 y 7). Todas las variables incluidas en los modelos, probablemente, explican la producción en respuesta a la dinámica del agua en el suelo, ya que los años

2011 y 2012 tuvieron la influencia del fenómeno de La Niña.

Los tres modelos para la finca El Cortijo, indicaron que HG influyó de manera negativa en la producción, por consiguiente, da indicios de que el suelo estaba muy húmedo o incluso saturado, en los sitios de menor producción. Sumado a lo anterior, en los modelos se incluyeron Da, A y MO, propiedades que se relacionan con la cantidad de agua en el suelo; para la primera se tienen que a mayor Da menor es el espacio de mesoporos en el suelo, lo que conlleva a un deficiente continuo hídrico a través del perfil, en el que se favorece el encharcamiento y la disminución de la difusión del oxígeno en el suelo, lo que concuerda con Bermúdez (1954) en la importancia de la Da en la producción de café. La relación directa con el contenido de arenas, se explica en que a mayor cantidad de arenas la porosidad aumenta y el drenaje se ve facilitado; y para MO, que intervino de forma inversa en la producción, posiblemente se explica en que al aumentar el contenido de MO, aumenta la capacidad de retención de agua (Salamanca & Sadeghian, 2005), condición poco conveniente para el cultivo en épocas de fuertes precipitaciones, como la presentada en el desarrollo del experimento.

El hecho de que los modelos para cada localidad incluyeran variables diferentes, concuerda con lo expuesto por Hakojärvi *et al.* (2013), Mirschel *et al.* (2014) y Stadler *et al.* (2015), al indicar que los modelos son sensibles a cambios climáticos y de manejo; además de que varían según las localidades.

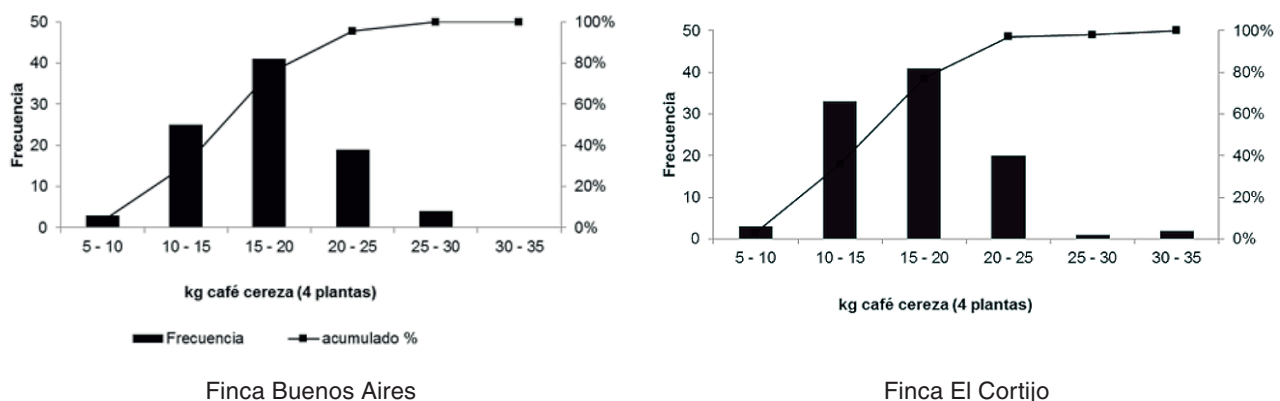


Figura 1. Histograma de distribución de producción de café cereza para los lotes de las fincas Buenos Aires y El Cortijo.

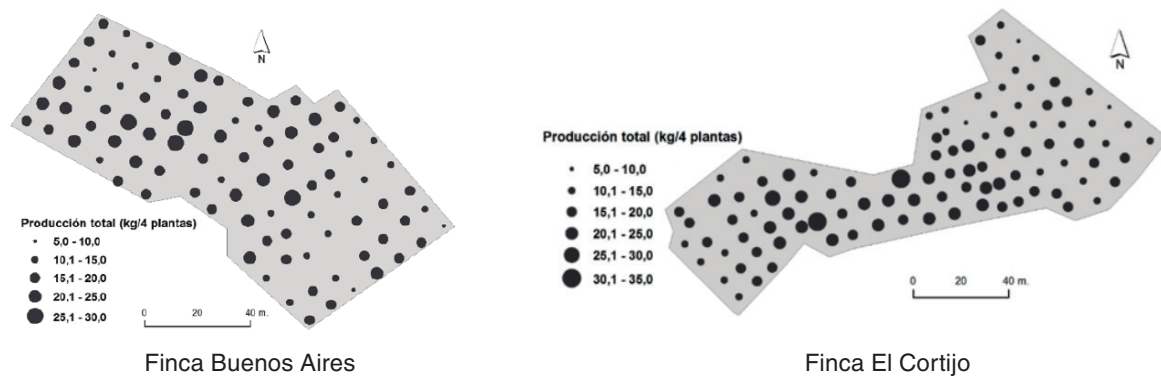


Figura 2. Variabilidad espacial de la producción de café cereza para los años 2011 a 2012, en los lotes de las fincas Buenos Aires y El Cortijo.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos para las propiedades físico-químicas de los suelos evaluados.

Propiedad	Finca Buenos Aires (n = 92)					Finca El Cortijo (n = 96)				
	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	CV (%)	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	CV (%)
pH	5,23	5,20	6,70	4,60	6,0	5,07	5,10	6,20	4,70	4,0
MO, %	6,41	6,40	16,10	2,10	24,0	12,03	12,00	18,10	5,50	16,0
K, cmol _c .kg ⁻¹	0,26	0,22	0,69	0,07	55,0	0,42	0,39	1,08	0,19	39,0
Ca, cmol _c .kg ⁻¹	2,35	2,12	14,80	0,36	83,0	1,32	1,06	9,30	0,39	84,0
Mg, cmol _c .kg ⁻¹	0,74	0,61	2,99	0,16	67,0	0,41	0,35	1,43	0,15	54,0
Na, cmol _c .kg ⁻¹	0,01	0,01	0,04	0,01	41,0	0,02	0,02	0,10	0,01	58,0
Al, cmol _c .kg ⁻¹	0,71	0,65	1,60	0,10	56,0	1,06	1,00	2,10	0,10	36,0
CIC, cmol _c .kg ⁻¹	18,50	18,00	29,00	9,00	18,0	24,41	24,00	37,00	14,00	15,0
P, mg.kg ⁻¹	66,85	54,00	253,00	8,00	75,0	15,03	14,00	40,00	6,00	39,0
Fe, mg.kg ⁻¹	116,49	114,00	319,00	57,00	29,0	111,32	106,00	226,00	50,00	27,0
Mn, mg. kg ⁻¹	13,88	13,50	22,00	8,00	25,0	17,59	17,00	34,00	5,00	34,0
Zn, mg. kg ⁻¹	5,15	4,80	11,20	2,60	35,0	3,34	3,15	9,70	1,40	39,0
Cu, mg.kg ⁻¹	13,55	11,75	60,10	1,40	64,0	2,13	1,90	10,20	1,00	54,0
S, mg.kg ⁻¹	22,92	22,30	55,50	1,60	52,0	4,41	3,60	29,70	0,10	108,0
B, mg.kg ⁻¹	0,41	0,39	1,22	0,11	51,0	0,46	0,36	2,79	0,11	85,0
Sat. K, %	1,47	1,22	4,36	0,39	59,0	1,74	1,62	4,39	0,73	40,0
Sat. Ca, %	4,62	3,35	18,37	0,57	79,0	8,87	7,74	31,00	2,80	57,0
Sat. Mg, %	0,65	0,56	2,99	0,12	68,0	0,41	0,33	2,86	0,16	81,0
Sat. Al, %	23,64	19,09	71,43	0,59	77,0	36,01	36,31	67,52	0,86	49,0
Ar, %	15,54	16,00	21,00	7,00	16,0	19,93	20,00	22,00	16,00	7,0
L, %	18,41	18,00	24,00	14,00	12,0	22,91	21,00	30,00	17,00	15,0
A, %	66,12	66,50	75,00	58,00	5,0	57,19	58,50	65,00	50,00	7,0
Da, gr.cm ⁻³	0,96	0,95	1,25	0,63	9,0	0,73	0,72	0,91	0,63	8,0
Dr, gr.cm ⁻³	2,47	2,49	2,61	2,32	3,0	2,33	2,32	2,47	2,18	3,0
HG, %	35,12	35,14	49,98	21,14	14,0	65,02	67,50	87,49	37,85	17,0
Ch, cm.h ⁻¹	0,75	0,66	2,51	0,17	54,0	0,15	0,08	1,72	0,01	144,0
Ea (DMP), mm	2,83	2,89	3,12	1,84	7,0	3,05	3,07	3,21	2,38	4,0
Das (DMP), mm	1,63	1,62	2,79	0,79	26,0	3,24	3,29	5,00	2,24	16,0
Rp, MPa	0,46	0,47	0,69	0,27	16,0	0,64	0,63	1,00	0,41	20,0
PHA, cm	38,87	40,00	40,00	20,00	8,0	38,15	40,00	40,00	14,00	11,0
RH 0,3 Atm, %	30,41	29,35	43,28	16,62	19,0	48,32	48,02	68,44	31,75	14,7
RH 15 Atm, %	18,14	19,02	25,28	7,71	22,0	32,28	31,52	45,26	19,66	16,8
PT, %	61,13	61,13	75,34	51,42	5,16	68,62	69,05	72,76	58,53	3,59
Map, %	32,09	31,66	56,99	19,77	19,11	19,76	21,27	35,90	2,06	34,17
Mep, %	11,79	12,16	18,62	4,68	30,88	16,04	15,43	29,06	7,67	28,60
Mip, %	17,24	18,10	22,91	8,57	18,73	32,33	31,52	45,26	19,66	16,78

Ar: arcilla; L: limo; A: arena; DA: densidad aparente; Dr: densidad real; HG: humedad gravimétrica; Ch: conductividad hidráulica; Ea: estabilidad de agregados al agua; Das: distribución de agregados en seco; Rp: resistencia a la penetración; PHA: profundidad del horizonte A; Rh: retención de humedad; Pt: porosidad total; Map: macroporos; Mep: mesoporos; Mip: microporos.

Tabla 3. Modelos de regresión lineal para la producción de café cereza en función de las propiedades químicas y físicas del suelo en los lotes evaluados.

AÑO	MODELO	R ²
Lote finca Buenos Aires (n = 92)		
2011	Prod = -4,042 + 0,035 ^{***} P + 0,455 ^{**} Ar + 0,134 ^{**} Map	24,37
2012	Prod = 10,887 ^{***} + 0,151 ^{**} Mn + 0,149 [*] Ar - 0,195 ^{***} PHA	23,68
Total	Prod = 0,551 + 0,039^{***}P + 0,599^{**}Ar + 0,154[*]Map	17,89
Lote finca El Cortijo (n = 96)		
2011	Prod = 23,019 ^{**} + 1,937 ^{***} B + 0,183 ^{**} A - 27,348 ^{***} DA - 0,131 ^{***} HG	33,47
2012	Prod = 42,319 ^{***} + 1,542 [*] B - 0,516 ^{**} MO - 0,223 ^{***} S - 19,834 [*] DA - 0,157 ^{**} HG	38,96
Total	Prod = 41,847^{**} + 3,165^{***}B + 0,477^{***}A - 47,718^{***}DA - 0,288^{***}HG	41,16

Prod: producción de café cereza; total: 2011 – 2012; A: arena; Ar: arcilla; Map: macroporosidad; PHA: profundidad del horizonte A; Da: densidad aparente; HG: humedad gravimétrica.

Tabla 4. Correlación entre las propiedades químicas del suelo para el lote de la finca Buenos Aires

Finca Buenos Aires	MO	K	Ca	Mg	Al	CIC	P	Fe	Mn	Zn	Cu	S	B
pH	-0,25 [*]	0,62 ^{***}	0,84 ^{***}	0,68 ^{***}	-0,84 ^{***}	-0,22 [*]	0,49 ^{***}		0,33 ^{**}	0,39 ^{***}	0,23 [*]	-0,39 ^{***}	
MO					0,31 ^{**}	0,70 ^{***}	-0,38 ^{***}						
K			0,55 ^{***}	0,66 ^{***}	-0,59 ^{***}		0,33 ^{**}		0,28 ^{**}	0,56 ^{***}		-0,35 ^{**}	
Ca				0,75 ^{***}	-0,70 ^{***}		0,41 ^{***}		0,49 ^{***}	0,48 ^{***}	0,24 [*]	-0,26 [*]	
Mg					-0,71 ^{***}		0,37 ^{***}		0,55 ^{***}	0,58 ^{***}	0,29 ^{**}		
Na					0,22 [*]								
Al							-0,42 ^{***}		-0,41 ^{***}	-0,34 ^{***}	-0,28 ^{**}	0,40 ^{***}	
CIC							-0,42 ^{***}		0,22 [*]	0,35 ^{***}			
P								0,21 [*]	0,23 [*]			-0,27 ^{**}	
Fe											0,28 ^{**}		
Mn										0,58 ^{***}			0,29 ^{**}
S													-0,25 [*]

Tabla 5. Correlación entre las propiedades físicas y químicas del suelo para el lote de la finca Buenos Aires.

Finca Buenos Aires	Ar	L	A	Da	Ch	Ea	Das	Rp	PHA	Pt	Map	Mep	Mip	HG
pH	-0,36***	0,27**		0,28**	0,24'	-0,35**	-0,37***	-0,33**		-0,24'			-0,37***	
MO	0,62***		-0,60***	-0,35**	-0,25'			0,26'	0,26'	0,31**			0,40***	0,49***
K		0,29**		0,21'		-0,26'	-0,21'	-0,29**						0,24'
Ca	-0,25'	0,44***				-0,25'		-0,21'						
Mg		0,39***						-0,24'						
Al	0,46***	-0,27**			-0,22'	0,22'	0,26'	0,40***			-0,26'	0,24'	0,32**	
CIC	0,62***	0,37***	-0,69***	-0,44***	-0,30**	0,21'	0,25'		0,28**	0,41***			0,53***	0,56***
P	-0,54***		0,45***	0,54***		-0,51***	-0,35***			-0,52***			-0,44***	-0,42***
Fe								0,23'						
Mn		0,31**												0,29**
Zn	0,26'	0,36***	-0,42***						0,23'					0,38**
Cu														0,26'
B												-0,23**		
Ar			-0,76***	-0,32**	-0,31**	0,21'	0,22'			0,24'	-0,30**	0,27'	0,51***	0,62***
L			-0,65***							0,25'				0,26'
A				0,34***	0,25'					-0,31**	0,24'	-0,21'	-0,52***	-0,65***
Da					0,24'	-0,39***	-0,34***	-0,21'		-0,94***	-0,44***	0,25'	-0,37***	-0,46***
Ch							-0,29**		-0,26'		0,22'		-0,47***	-0,33***
Ea							0,39***	0,21'		0,35***			0,44***	
Das								0,27**		0,29**			0,59***	
Rp									0,32**			-0,25'		
PHA												-0,23'		
Pt											0,58***	-0,36***	0,28**	0,38**
Map												-0,81***	-0,42***	
Mip														0,55***

Tabla 6. Correlación entre las propiedades químicas del suelo para el ote de la finca El Cortijo

Finca El Cortijo	MO	K	Ca	Mg	Al	CIC	P	Fe	Mn	Zn	Cu	S	B
pH	-0,23 [*]	0,62 ^{***}	0,76 ^{***}	0,64 ^{***}	-0,69 ^{***}	-0,29 ^{**}	0,22 [*]	-0,29 ^{**}	-0,29 ^{**}			-0,24 [*]	
MO					0,49 ^{***}	0,40 ^{***}		0,25 [*]		0,23 [*]	-0,20 [*]		0,22 [*]
K			0,47 ^{***}	0,40 ^{***}	-0,46 ^{***}		0,24 [*]					-0,25 [*]	
Ca				0,86 ^{***}	-0,63 ^{***}		0,51 ^{***}			0,27 ^{**}			
Mg					-0,65 ^{***}		0,52 ^{***}			0,21 [*]			
Na					0,23 [*]								
Al							-0,25 [*]	0,31 ^{**}					
CIC								0,32 ^{***}	0,34 ^{***}				-0,20 [*]
P								0,25 [*]		0,30 ^{**}	0,38 ^{***}		
Fe									0,58 ^{***}	0,35 ^{***}	0,33 ^{***}	0,26 ^{**}	
Mn										0,35 ^{***}		0,22 [*]	
Zn											0,29 ^{**}		
Cu												0,49 ^{***}	

Tabla 7. Correlación entre las propiedades físicas y químicas del suelo para el lote de la finca El Cortijo.

Finca El Cortijo	Ar	L	A	Da	Ch	Ea	Das	Rp	PHA	Pt	Map	Mep	Mip	HG
pH	-0,25 [*]	-0,24 [*]	0,31 ^{**}	0,37 ^{***}	0,30 ^{**}	-0,36 ^{***}		-0,40 ^{***}		-0,33 ^{***}				-0,37 ^{***}
MO	0,27 ^{**}	0,40 ^{***}	-0,46 ^{***}	-0,44 ^{***}			0,26 ^{**}		0,26 [*]	0,37 ^{***}	-0,36 ^{***}	0,31 ^{**}	0,36 ^{***}	0,36 ^{***}
K	-0,25 [*]			0,21 [*]				-0,25 [*]						-0,24 [*]
Ca					0,34 ^{***}	-0,39 ^{***}								
Mg					0,33 ^{***}									
Na											-0,24 [*]	0,29 ^{**}		
Al	0,37 ^{***}	0,26 ^{**}	-0,38 ^{***}	-0,35 ^{***}		0,22 [*]		0,38 ^{***}		0,35 ^{***}		0,29 ^{**}		0,38 ^{***}
CIC		0,39 ^{***}	-0,34 ^{***}	-0,31 ^{**}		0,21 [*]	0,26 [*]	0,23 [*]		0,22 [*]			0,20 [*]	0,27 ^{**}
P														
Fe	0,20 [*]	0,67 ^{***}	-0,68 ^{***}	-0,46 ^{***}				0,50 ^{***}	0,22 [*]	0,46 ^{***}		0,21 [*]		0,42 ^{***}
Mn	0,23 [*]	0,52 ^{***}	-0,52 ^{***}	-0,33 ^{***}				0,45 ^{***}		0,33 ^{***}		0,22 [*]		0,34 ^{***}
Zn				-0,20 [*]							-0,21 [*]			
Cu	0,23 [*]	0,22 [*]	-0,26 [*]	-0,27 ^{**}				0,25 [*]		0,21 [*]				0,29 ^{**}
S	0,34 ^{***}	0,29 ^{**}	-0,34 ^{***}	-0,27 ^{**}				0,21 [*]		0,24 [*]	-0,21 [*]	0,23 [*]		0,32 ^{**}
B	0,25 [*]													
Ar		0,22 [*]	-0,51 ^{***}	-0,35 ^{***}		0,24 [*]		0,32 ^{***}	0,20 [*]	0,33 ^{***}		0,31 ^{**}		0,36 ^{***}
L			-0,94 ^{***}	-0,59 ^{***}				0,46 ^{***}	0,31 ^{**}	0,57 ^{***}		0,41 ^{***}		0,57 ^{***}
A				0,64 ^{***}				-0,51 ^{***}	-0,34 ^{***}	-0,62 ^{***}		-0,45 ^{***}		-0,63 ^{***}
Da								-0,45 ^{***}	-0,39 ^{***}	-0,93 ^{***}		-0,30 ^{**}		-0,89 ^{***}
Das											-0,37 ^{***}		0,34 ^{**}	0,26 [*]
Rp										0,42 ^{***}				0,51 ^{***}
PHA										0,41 ^{***}				0,34 ^{***}
Pt												0,27 ^{**}		0,84 ^{***}
Map												-0,75 ^{***}	-0,75 ^{***}	
Mep										0,25 [*]	-0,58 ^{***}			0,38 ^{***}

Conclusiones

La producción de café se explicó por propiedades edáficas diferentes a los elementos mayores (controlados con fertilización), de las cuales se resalta textura, distribución de poros, humedad gravimétrica y contenidos de S, Mn y B; relación que fue explicada por las condiciones de alta pluviosidad durante el experimento.

Dado que en cada lote la producción fue explicada por propiedades diferentes, se corrobora que ésta es sensible a cambios ambientales y de manejo.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Comité Departamental de Cafeteros del Quindío, especialmente a los ingenieros Germán Huertas y Gloria Hincapié, a los colaboradores Anderson Artundua y Santiago Arango. A los caficultores propietarios y administradores de las fincas experimentales. A Cenicafé, a los investigadores científicos Hernán González y Alveiro Salamanca, al señor Arturo Gómez y a los colaboradores de la estación experimental Paraguacito.

Literatura Citada

- Abdu, H., Robinson, D.A., Seyfried, M. & Jones, S.B. (2008). Geophysical imaging of watershed subsurface patterns and prediction of soil texture and water holding capacity. *Water resources research*, 44, WOOD18, doi: 10.1029/2008WR007043.
- Bermúdez, S. (1954). Distribución del sistema radicular del *Coffea arabica* var., *typica* en cinco tipos de suelo. Instituto interamericano de ciencias agrícolas, Turrialba, Costa Rica. 66p.
- Carrillo, L (1985). Análisis de Arcillas en Rocas Sedimentarias mediante Difracción de rayos X. (Tesis de pregrado). Escuela de Química, UIS.
- Castro-Tanzi, S., Dietsch, T., Urena, N., Vindas, L. & Chandler, M. (2012). Analysis of management and site factors to improve the sustainability of smallholder coffee production in Tarrazú, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 155, 172-181.
- Corwin, D.L. & Lesch, S.M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1), 11-43.
- DaMatta, F.M.; Ramalho, J.D.C. (2006). Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.18, p. 55-81
- de Moraes, M.T., Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., da Silva, V.R. & da Luz, F.B. (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 155, 351-362.
- Hakojärvi, M., Hautala, M., Ristolainen, A. & Alakukku, L. (2013). Yield variation of spring cereals in relation to selected soil physical properties on three clay soil fields. *European Journal of Agronomy*, 49, 1-11.
- Havlin, J.L; Beaton, J.D; Tisdale, S.L. & Nelson, W.R. (2004) Soil Fertility and Fertilizers, An introduction to Nutrient 7 edición Pearson. Management. Pearson Education/Prentice-Hall, New Jersey. 528 p.
- Heil, K. & Schmidhalter, U. (2012). Characterisation of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site. *Computers & Geosciences*, 39, 98-110.
- Jin, H., Hongwen, L., Rasaily, R. G., Qingjie, W., Guohua, C., Su, Y., ... & Lijin, L. (2011). Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming. *Soil & Tillage Research* 113, 48-54.
- Kersebaum, K.C., Lorenz, K., Reuter, H.I., Schwarz, J., Wegehenkel, M. & Wendroth, O. (2005). Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(1), 59-67.
- Lora, R. (1991). Análisis de suelos para micronutrientes. En: Instituto Colombiano Agropecuario, (ICA). (1992). Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Manual de Asistencia Técnica, (25).
- Mirschel, W., Wieland, R., Wenkel, K.-O., Nendel, C., & Guddat, C. (2014). YIELDSTAT – A spatial yield model for agricultural crops. *European Journal of Agronomy* 52, 33-46.
- Munkholm, L. J., Heck, R. J., & Deen, B. (2013). Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil and Tillage Research* 127, 85-91.
- Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K. J., Thorburn, P., ... & Winter, J. M. (2013). The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP):. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 166-182.
- Sadeghian, S., García, J.C. & Montoya, E.C. (2006). Respuesta del cafeto a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del departamento del Quindío. *Cenicafé* 56(4):58-69.
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. Boletín técnico N° 32 Cenicafé.
- Sadeghian, S. (2010). Evaluación de la fertilidad del suelo para una adecuada nutrición de los cultivos. Caso café. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Santo Domingo, Ecuador 17 – 19 noviembre.

20. Sadeghian, S. (2012). Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almácigo. Medellín, Colombia. (Tesis de doctorado en Ciencias Agrarias). Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias Agropecuarias.
21. Salamaca, A. & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé* 56(4):381-397.
22. Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D. & Curi, N. (2015). Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. *Soil and Tillage Research*, 154, 103-113.
23. Stadler, A., Rudolph, S., Kupisch, M., Langensiepen, M., Van der Kruk, J. & Ewert, F. (2015). Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. *European Journal of Agronomy*, 64, 8-20.
24. Suárez, S. (1996). Relación entre las condiciones físicas de los suelos de la zona cafetera, la producción y la fertilización de café. Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Santa Marta, Colombia, octubre 2-5.
25. Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Myers, D.B. & Drummond, S.T. (2010). Mapping depth to argillic soil horizons using apparent electrical conductivity. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 15(3), 135-146.
26. Tahvanainen, L. & Rytönen, V.M. (1999). Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass and Bioenergy*, 16(2), 103-117.
27. Valencia, G. (1999). Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Chinchiná, Cenicafé – Agroinsumos del café. 94p.
28. Xia, M., Zhao, B.Z., Hao, X.Y. & Zhang, J.B. (2015). Soil quality in relation to agricultural production in the North China Plain. *Pedosphere*. 25(4): 592–604
29. Zhang, B., Zhang, Y., Chen, D., White, R.E. & Li, Y. (2004). A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China. *Geoderma*, 123(3), 319-331.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Recibido: 26 de julio de 2015

Aceptado: 02 de septiembre de 2015