

CALIBRACIÓN DE ANÁLISIS DE SUELO EN CAFETALES AL SOL Y BAJO SEMISOMBRA

Siavosh Sadeghian Khalajabadi¹

En Colombia, el café se cultiva bajo diferentes sistemas de manejo; en el extremo más tradicional se encuentran plantaciones de variedad Típica con bajas densidades de siembra y sombrío denso, y en el más tecnificado, aquellas que se establecen con variedades Colombia, Caturra y Variedad Castillo®, en altas densidades y a plena exposición solar. Entre éstos se halla una considerable gama de sistemas intermedios con rendimientos contrastantes.

Actualmente, el 15.7% del área cafetera en el país (137 454 ha) está dedicada al sistema tradicional, y el restante 84.3% (740 259 ha) corresponde a plantaciones tecnificadas; de las cuales el 46.7% se cultiva a plena exposición solar, el 21.6% bajo semisombra, y solo el 16% con sombrío denso (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2007).

Se define como lote cafetero a plena exposición solar “aquel en el cual el efecto de regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea permanente, inferior a 20 árboles por hectárea y/o inferior de 300 especies arbustivas semipermanentes”, y lote cafetero con semisombra como “aquel en el cual el efecto de regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea superior a 20 e inferior a 50 árboles por hectárea, y/o cualquier especie arbustiva semipermanente con más de 300 y menos de 750 plantas por hectárea (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1993).

El uso de sombrío, el cual fue común en Colombia hasta finales de la década de los 70 del siglo pasado, puede traer como ventajas la regulación de las temperaturas extremas durante el día, la disminución de la evapotranspiración, la conservación de los suelos, un menor efecto de los vientos fuertes, del granizo y de la sequía, así como la regulación del ciclaje de nutrientes (Beer et al., 1998; Jaramillo, 2005).

Gómez et al. (2000), con base en el origen de los suelos de la región cafetera, sugieren el uso de sombra en algunos suelos derivados de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que presentan limitaciones físicas; mientras que en suelos originados a partir de cenizas volcánicas, consideran que se pueden establecer plantaciones con altas densidades de siembra y a libre exposición solar.

En lo referente a la fertilización, se ha demostrado que

resulta antieconómico realizar esta práctica en cafetales viejos y bajo sombra (Valdes y Herrón, 1966). Mestre (1996) recomienda no emplear más de 500 kg ha⁻¹ del fertilizante 17-6-18-2 en cafetales no envejecidos y con sombrío, aclarando que para aumentar la producción se debe incrementar el ingreso de la luz a la plantación. A su vez, Farfán y Mestre (2004) demostraron que el grado de la respuesta a la fertilización se reduce conforme aumenta el sombrío.

Para cafetales a plena exposición solar, el efecto del nitrógeno (N) ha sido positivo en casi todas las localidades en donde se ha evaluado su respuesta, independiente de los contenidos de materia orgánica del suelo (MO) (Uribe y Mestre, 1976). Sadeghian y Duque (2003) recomiendan tener en cuenta la MO para la recomendación de N, dada su alta correlación (Sadeghian, 2003; Valencia, 1999).

Uribe y Mestre (1976) registraron respuesta al suministro de potasio (K), cuando sus niveles en el suelo eran bajos. El efecto del fósforo (P), solo o en combinación con abonos orgánicos, no ha sido contundente, pues su aplicación en pocos casos ha servido para aumentar el rendimiento de manera sostenida (Uribe, 1983; Uribe y Mestre, 1976). Incluso, se reportan efectos contraproducentes en algunas ocasiones (Uribe, 1983).

En una investigación desarrollada por Uribe y Salazar (1981), se determinó el efecto de magnesio (Mg), sin obtener respuesta a su aplicación y, en un estudio reciente, Sadeghian (2006) reporta incrementos cercanos al 10% sobre la producción al suministrar 30 kg ha⁻¹ año⁻¹ de MgO.

Referente a la densidad de siembra, tanto en Colombia (Uribe y Mestre, 1988) como en otros países productores, como Brasil (Pavan et al., 1994), se ha demostrado que el aumento en el número de plantas por unidad de área conlleva al incremento de la producción. Para densidades menores a 4400 plantas ha⁻¹, se sugiere reducir en 20% la cantidad del fertilizante con respecto a la dosis recomendada para densidades más altas (Uribe y Salazar, 1981).

En cuanto a la fertilidad del suelo se refiere, uno de los pasos más importantes de los estudios de la nutrición mineral es calibrar los resultados de los análisis de suelos frente a la respuesta de los cultivos en el campo,

¹ Investigador. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Colombia. Correo electrónico: siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

de lo contrario, los valores obtenidos mediante cualquier método de laboratorio tendrán poco significado. Un análisis de suelo apropiadamente calibrado identifica de manera correcta el grado de deficiencia o suficiencia de un elemento y provee una estimación de la cantidad de nutriente para eliminar la deficiencia (Evans, 1987). Mediante la calibración se busca determinar los niveles crítico y de suficiencia, para un nutriente en particular. El primer término se refiere al contenido del elemento en el suelo, por debajo del cual existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización; mientras que el segundo sugiere un nivel por encima del cual deja de haber respuesta al suministro del elemento. Al respecto, Nelson (1999) asegura que el eslabón más débil en la cadena que determina la utilidad de los análisis de suelos es el trabajo de campo y no el de laboratorio, para lo cual se recomiendan estudios específicos en 20 sitios o más. Zapata (1997) hace hincapié en que la calibración debe ser una práctica continua, pues es posible que un método químico pierda su capacidad de diagnóstico y prognosis, debido a que la calidad de los suelos y las tecnologías de producción cambian con el paso de tiempo. Pese a la necesidad obligatoria de la calibración, en Colombia esta labor se quedó casi inactiva después de que el ICA publicara en los años 80 la “Guía para la Fertilización en Diversos Cultivos. Quinta Aproximación” (Guerrero, 2004).

La mayor parte de los resultados en torno a la nutrición de los cafetales en Colombia ha sido obtenida en las Subestaciones Experimentales de Cenicafé, ubicadas en las diferentes regiones del país y con características agroclimáticas contrastantes; a pesar de ello, el número de estas localidades puede ser considerado reducido para estudios como los de calibración de los análisis de suelos. Con respecto a la fertilización de los cultivos con semisombra, los estudios realizados hasta ahora no han tenido en cuenta los diferentes elementos de manera individual.

Mediante la realización de este trabajo se buscó i) determinar para cafetales al sol y con semisombra, el efecto de la fertilización con N, P, K y Mg, en diferentes regiones de la zona cafetera de Colombia contrastantes en su fertilidad, y ii) calibrar la respuesta obtenida en producción frente a los análisis de suelo.

Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo entre los años 2000 y 2004, en 32 localidades de la zona cafetera colombiana (26 fincas cafeteras y 6 Subestaciones Experimentales de Cenicafé), ubicadas en 32 veredas, pertenecientes a 25 municipios y 10 departamentos. Se seleccionaron 20 plantaciones tecnificadas de café variedad Colombia o Caturra, a libre exposición solar, y 12 bajo sombrero parcial de guamo (*Inga* spp.) o de plátano (*Musa* sp.), con densidades de café entre 4000 y 10 000 árboles ha⁻¹,

y edades entre 2 y 3 años, es decir, iniciando el ciclo productivo. Éstas habían recibido un adecuado manejo cultural (control de plagas y enfermedades, manejo de arvenses, etc.) y antes de iniciar el experimento no presentaban síntomas visibles de deficiencias nutricionales. En cuanto a la fertilización, los planes habían incluido básicamente N y P, y en algunos casos K y cales.

En la **Tabla 1** se presenta la información acerca de la ubicación geográfica de los sitios, las características generales de las plantaciones y las propiedades químicas del suelo.

Se evaluaron cinco tratamientos, por medio de los cuales se buscó determinar la respuesta al suministro de N, P, K y Mg, y calibrar los resultados de los análisis de suelos. Éstos consistieron en un testigo en el que fueron suministrados los cuatro nutrientes objeto de estudio (N, P, K, Mg), en cantidades que, de acuerdo con lo establecido por Sadeghian y Duque (2003), se consideran adecuadas para obtener producciones relativamente altas y sin causar toxicidad a las plantas, y otros cuatro tratamientos definidos con base en el criterio del elemento faltante (**Tabla 2**).

Como fuentes se emplearon urea (46% de N), superfosfato triple-SFT (46% de P₂O₅), cloruro de potasio-KCl (60% de K₂O) y óxido de magnesio (88% de MgO); las cuales son de uso común en la región cafetera del país, a excepción de SFT, cuya elección apuntó al empleo de un fertilizante fosfatado que no contuviera N, como es el fosfato diamónico-DAP.

Los fertilizantes se fraccionaron en dos aplicaciones anuales, la primera entre los meses de marzo y abril, y la segunda entre agosto y septiembre; períodos en los cuales inician las lluvias en las diferentes regiones.

En todos los sitios, a excepción de cuatro, se estableció una sola repetición de cada tratamiento; lo anterior conscientes de la variabilidad espacial que existe en la fertilidad del suelo aun a cortas distancias, factor que se trató de minimizar mediante la selección de un área homogénea en lo relacionado con la pendiente, el relieve del lote, el número de árboles y el nivel de sombra. En la Subestación El Rosario (Antioquia) y en la finca La Arcadia (Tolima) se instalaron dos repeticiones, y en las dos fincas localizadas en el departamento de Quindío (Mónaco y San Alberto) se ubicaron tres repeticiones, establecidas bajo diseño de bloques completos al azar. Para el caso de este trabajo, los resultados de los anteriores sitios se presentan como promedio de las dos o tres repeticiones.

Las dimensiones de las parcelas experimentales y su arreglo espacial fueron diferentes en cada sitio, como consecuencia de las variaciones en las densidades de siembras de las plantaciones y la forma de los lotes.

Tabla 1. Información sobre la ubicación de los sitios, las características de las plantaciones y las propiedades químicas del suelo.

Departamento	Municipio	Vereda	Finca	Altura msnm	Variiedad	Densidad planta ha ⁻¹	Sistema	pH	MO %	P mg kg ⁻¹	Ca	Mg cmol _c kg ⁻¹	K	AI
Antioquia	Veneza	El Cerro	El Rosario*	1630	Colombia	10 000	AS	4.5	12.8	3	1.3	0.3	0.43	5.4
Caldas	Manzanares	Cantadelicia	Cantadelicia	1500	Caturra	4800	AS	6.2	9.4	26	9.1	1.6	0.64	0.0
Caldas	Palestina	Los Lobos	Chaparral	1265	Colombia	10 000	AS	6.0	8.9	6	7.5	1.5	0.99	0.0
Caldas	Anserma	Cauya	Cuba	1650	Colombia	10 000	AS	5.1	18.9	63	1.6	0.5	0.20	2.0
Caldas	Salamina	Colorados	El Edén	1846	Caturra	6000	SS	5.3	8.3	53	4.8	1.4	0.22	0.3
Caldas	Chinchiná	Guacamayo	La María	1400	Colombia	6944	SS	5.1	12.7	26	2.0	0.8	0.23	1.0
Caldas	Pensilvania	San Miguel	La Palma	1450	Caturra	4000	AS	5.8	18.6	4	5.3	1.3	0.39	0.1
Caldas	Manizales	El Rosario	La Pradera	1430	Colombia	10 000	AS	5.3	6.3	6	1.5	0.3	0.42	0.8
Caldas	Chinchiná	La Floresta	San José	1300	Colombia	10 000	AS	5.0	12.1	12	1.3	0.6	0.27	1.3
Caldas	Salamina	El Tigre	Santa Rosa	1750	Colombia	6400	AS	5.3	7.8	7	3.5	0.8	0.22	0.5
Caldas	Pácora	El Topacio	Toledo	1840	Caturra	5500	SS	5.4	16.9	2	0.6	0.3	0.23	0.5
Cauca	Timbó	Urubamba	Atlanta	1700	Caturra	5550	SS	5.1	29.0	5	1.4	0.5	0.23	3.0
Cauca	Timbó	Guacas	El Rastrojo	1760	Colombia	6666	AS	5.2	9.5	4	3.3	1.1	0.68	0.7
Cauca	Popayan	Figueroa	La Esperanza	1760	Colombia	5555	SS	5.3	24.2	7	3.7	1.0	0.63	1.4
Cauca	Piendamó	Cañadulce	La Trinidad	1650	Caturra	9050	AS	5.1	28.9	9	1.7	0.5	0.34	1.2
Cesar	Pueblo Bello	Cuestaplata	Bella Vista	1640	Colombia	5128	SS	4.7	8.0	1	2.4	0.8	0.29	2.5
Cesar	La Paz	La Laguna	La Norteña	1400	Caturra	9800	SS	4.6	8.4	4	4.5	0.6	0.30	1.2
Cesar	Fonseca	Las Colinas	Las Aguas	1320	Colombia	8300	SS	5.4	11.6	37	11.2	1.1	0.46	0.2
Cesar	Codazzi	San Jacinto	Los Andes	1490	Caturra	7400	SS	4.1	7.3	4	1.1	0.7	0.22	7.9
Cesar	Pueblo Bello	Pueblo Bello	Pueblo Bello*	1380	Caturra	6200	SS	4.8	10.3	60	4.6	0.9	0.48	0.5
Cundinamarca	Sasaima	Santa Teresa	El Paraíso	1650	Caturra	5900	SS	5.1	21.2	2	1.6	0.6	0.21	1.8
Cundinamarca	Sasaima	S. Bernardo	Sta. Bárbara*	1450	Colombia	5000	AS	5.3	22.6	46	0.8	0.4	0.20	0.8
Cundinamarca	Sasaima	S. Bernardo	Villa Gilma	1450	Caturra	4500	SS	5.0	17.4	4	2.0	0.2	0.21	1.4
Quindío	Córdoba	Río Verde	Mónaco	1350	Caturra	10 000	AS	5.4	4.9	30	4.2	1.2	0.69	0.2
Quindío	Bellavista	Los Balsos	San Alberto	1520	Caturra	7700	AS	5.3	8.0	6	0.9	0.2	0.18	0.9
Risaralda	Pereira	El Retiro	La Catalina*	1350	Colombia	10 000	AS	5.0	10.2	5	4.6	0.8	0.59	1.1
Santander	Bucaramanga	El Gualilo	El Gualilo	1380	Colombia	7690	AS	4.9	10.5	56	10.1	2.4	0.85	1.1
Santander	Bucaramanga	La Capilla	Sabaneta	1570	Colombia	5555	AS	4.7	4.9	21	0.2	0.1	0.23	1.9
Santander	Floridablanca	Vericute	Santander*	1495	Colombia	10 000	AS	4.8	7.8	18	2.8	0.5	0.30	0.8
Tolima	Líbano	Paraíso	La Arcadia	1450	Colombia	10 000	AS	5.1	18.2	3	2.5	0.5	0.26	1.1
Tolima	Líbano	La Marcada	La Marcada	1400	Caturra	10 000	AS	6.2	12.9	5	5.0	0.7	0.29	0.1
Tolima	Líbano	La Unión	S.E. Líbano	1500	Colombia	10 000	AS	5.2	18.7	1	4.7	1.0	0.19	0.9

* Subestación, AS: Al sol, SS: Semisombra

Tabla 2. Tratamientos evaluados y las respectivas cantidades de nutrientes suministradas.

Tratamiento	Elemento faltante	Cantidad suministrada, kg ha ⁻¹ año ⁻¹			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Testigo (NPKMg)	-	240	80	240	60
Sin N (PKMg)	N	0	80	240	60
Sin P (NKMg)	P	240	0	240	60
Sin K (NPMg)	K	240	80	0	60
Sin Mg (NPK)	Mg	240	80	240	0

El área ocupada por cada tratamiento, incluyendo su borde, fluctuó entre 100 y 120 m², para un total de 500 a 600 m², correspondientes a los cinco tratamientos, los cuales se asignaron de manera aleatoria.

Se recolectó el café cereza en cada uno de los países y se totalizó por año. En la mayoría de las localidades, el experimento se inició en el año 2000 y tuvo una duración de tres años; en 11 de ellas se evaluó el efecto de los tratamientos durante cuatro años (las Subestaciones Pueblo Bello, Santander y Líbano, y las fincas La Norteña, Los Andes, Mónaco, San Alberto, Sabaneta, La Arcadia y La Marcada).

Antes de aplicar por primera vez los tratamientos y dos años después, se tomaron muestras de suelo por parcela, a 20 cm de profundidad, en la zona del “plato” del árbol, es decir, donde se aplican los fertilizantes. Se analizaron las siguientes propiedades: pH (método potenciométrico relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), materia orgánica (método Walkley-Black y valoración por colorimetría a 585 nm), P (extracción con Bray II, coloración Bray-Kurtz y lectura por colorimetría a 660 nm), K, Ca y Mg (extracción con acetato de amonio 1 N a pH 7.0 y lectura por espectrofotometría de absorción atómica) y Al (extracción con KCl 1 N y valoración por espectrofotometría de absorción atómica).

Se tomó el contenido de MO como indicador de la disponibilidad de N, dada la alta correlación entre estas dos propiedades en la zona cafetera de Colombia (Sadeghian, 2003), y por ser la MO un buen indicador de la disponibilidad de N para las plantas (Agboola y Ayodele, 1987).

Para el análisis de varianza se consideró a cada localidad como un bloque. Se empleó la prueba Duncan al 5% para comparar los tratamientos, para cada una de las variables de respuesta (producción y propiedades químicas del suelo), en cada uno de los dos sistemas (al sol y semisombra). Asimismo, se aplicó la prueba t al 5% para comparar los promedios de los sistemas.

Con el fin de calibrar el análisis de suelo, se correlacionó el rendimiento relativo (RR) con respecto al nivel del nutriente en el suelo, para cada sistema y

año. El RR se calculó al dividir la producción obtenida sin la aplicación del elemento (rendimiento con el nutriente al mínimo) por la producción más alta registrada (rendimiento máximo estable), expresada en términos de porcentaje. Dado que el número de sitios para el cuarto año se redujo a 11, la calibración sólo se llevó a cabo para los primeros tres años.

Para determinar el nivel crítico se empleó el modelo rectilíneo-discontinuo (Cate y Nelson, 1971), y para el nivel de suficiencia, el modelo lineal-plateau (Nelson y Anderson, 1977). Adicionalmente, se seleccionó el modelo cuadrático para la MO, dado el comportamiento de la respuesta.

Resultados y discusión

Cambios en la fertilidad del suelo

En general, se presentó una amplia variación en los registros obtenidos, en especial para los contenidos de P, Mg y K (**Figura 1**). Cuando se excluyó el N de los planes de fertilización, se incrementó el pH en los dos sistemas, resultado que se puede asociar a la acidez generada por la nitrificación del amonio proveniente de la urea (Zapata, 2004). Un comportamiento similar ha sido registrado por Sadeghian et al. (2006), en el departamento del Quindío. Pavan et al. (1999) justifican el descenso del pH en suelos cultivados con café, como resultado de un excedente de iones H⁺ que se genera en la nitrificación de amonio, provenientes de la fertilización nitrogenada y que no es neutralizado por la liberación de iones OH⁻ en el proceso de absorción de NO₃⁻ por las raíces de las plantas.

En los dos sistemas, los niveles de P, K y Mg aumentaron con su aplicación; mientras tanto, el suministro de N vía urea contribuyó a la pérdida de K, resultado que puede asociarse con factores como la acidez generada en la nitrificación del amonio-NH₄⁺ (Zapata, 2004), la competencia del NH₄⁺ en el complejo de cambio (Bohn et al., 1993), la menor selectividad por el K frente a otros cationes intercambiables de mayor valencia (Sparks, 1995) y la alta solubilidad de la fuente empleada (KCl) (Guerrero, 2004).

Efecto en la producción

En los cafetales a plena exposición solar, el promedio de la producción de café cereza fue mayor que bajo semisombra, durante los cuatro años de evaluación (**Figura 2**). Lo anterior puede relacionarse con aspectos como la densidad de siembra, el nivel de sombra y los factores ambientales. En este estudio, el promedio de la densidad en los cafetales al sol fue de 8340 plantas ha⁻¹, frente a 6400 plantas ha⁻¹ en las plantaciones con semisombra. De acuerdo con Duque (2004), en variedades de

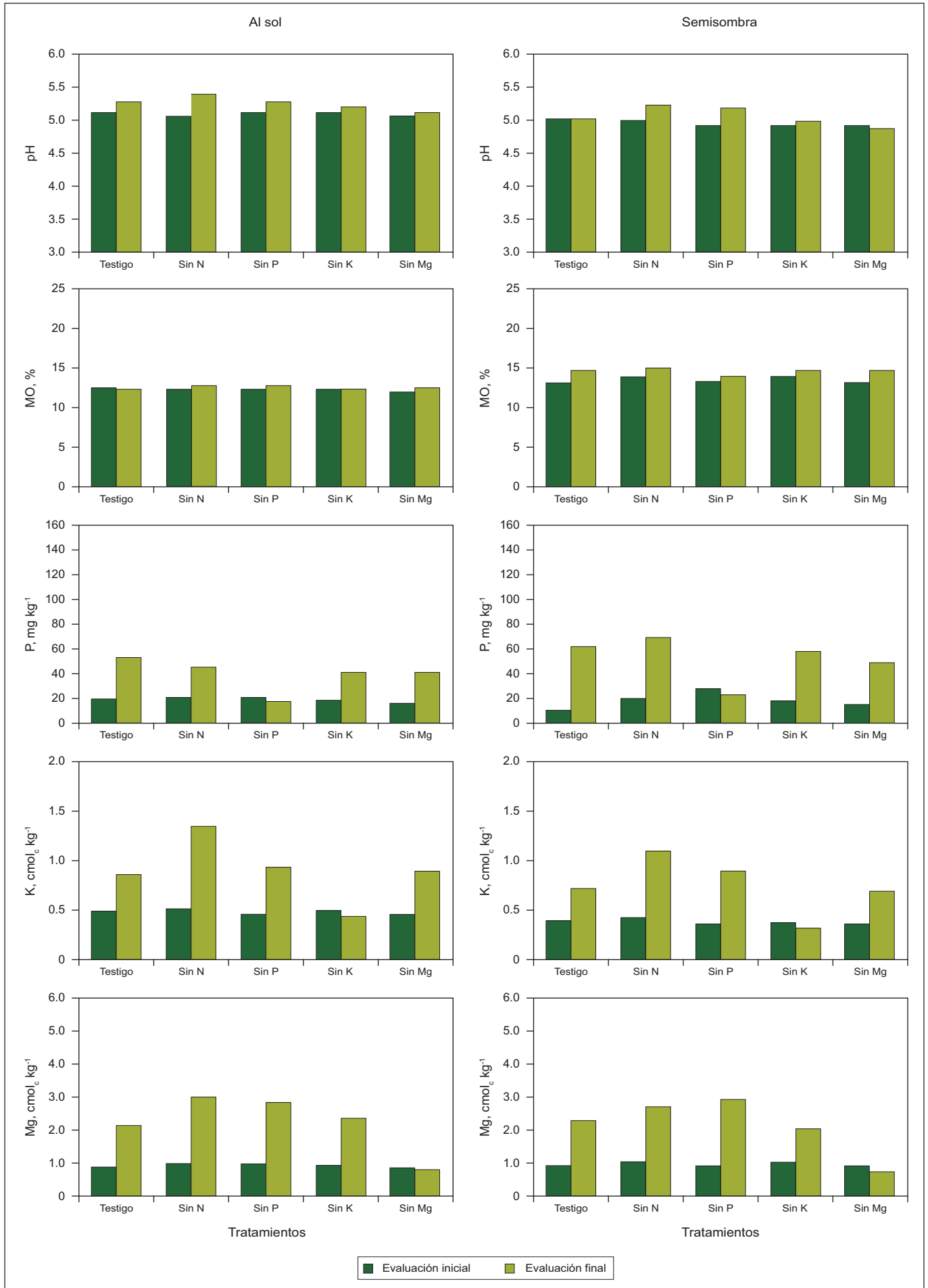


Figura 1. Cambios en el pH y en los contenidos de MO, P, K y Mg por el efecto de los tratamientos.



porte bajo, el efecto de la densidad sobre la producción sigue una función cuadrática, con un máximo biológico cercano a 11 000 plantas ha⁻¹. Con respecto a la radiación solar, se ha demostrado una relación inversa entre el nivel de la sombra y la producción de café (Farfán y Mestre, 2004). En cuanto a los factores ambientales, la mayoría de las plantaciones bajo semisombra estaban ubicadas en los departamentos de Cesar y La Guajira (**Tabla 2**), los cuales presentan un déficit hídrico marcado en algunos meses del año (Jaramillo y Arcila, 1996), que afecta negativamente la producción, adicional a las limitaciones de índole físico que exhiben los suelos de esta región, que en su mayoría son de origen ígneo y en menor grado metamórfico y sedimentario (Gómez et al., 2000).

En el primer año no se registraron diferencias significativas entre los tratamientos en los dos sistemas; resultado que estaría relacionado con una baja demanda de nutrientes por la menor cosecha en este ciclo productivo y la disponibilidad de reserva de los elementos requeridos en el suelo y en la planta al iniciar el experimento. Sobre el tema, Mestre (1977) sostiene que el efecto de la fertilización en la producción de café puede que no se manifieste en el primer año en el que se inicia el trabajo de investigación sino al siguiente, debido a que el fertilizante suministrado influye

principalmente sobre el crecimiento de ese año y la producción del grano tiene lugar en las ramas formadas el año anterior. Uribe y Mestre (1976) al evaluar la respuesta al N, P y K, en ocho localidades de la zona cafetera, sólo registraron efecto de P y K para la primera cosecha en una localidad, y para el N en cinco. Un comportamiento similar se reporta para el Mg (Uribe y Salazar, 1981) y para el P (Uribe, 1983).

En el segundo y el tercer año se encontró respuesta a la aplicación de N, tanto en los cafetales a plena exposición solar como bajo semisombra. En el cuarto año, la tendencia registrada fue similar a los últimos dos ciclos, pues el rendimiento más bajo correspondió al tratamiento sin N; pese a ello, solamente se detectaron diferencias en las plantaciones a plena exposición solar. El hecho de que no se haya presentado efecto de los tratamientos en los cafetales bajo semisombra estaría relacionado con el efecto conjugado del menor número de sitios (repeticiones) para esta cosecha y la alta variabilidad asociada. Para esta última cosecha, la carencia de los otros nutrientes, especialmente el K, afectó levemente el rendimiento en ambos sistemas, sin que fuera detectado estadísticamente.

Carvajal (1984) sostiene que en ocasiones el efecto de la aplicación de K y P tiene una ocurrencia a largo plazo,

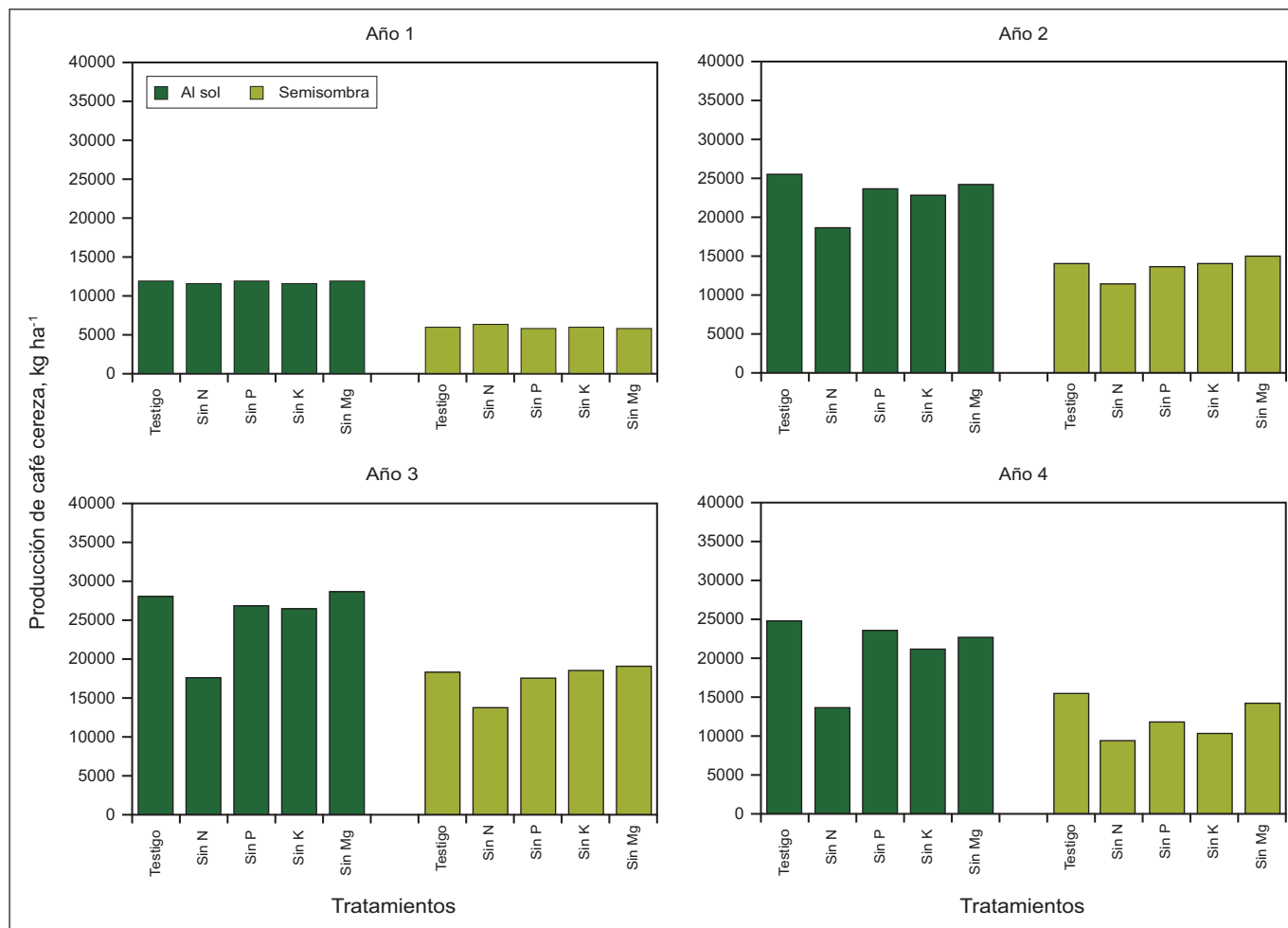


Figura 2. Promedios de la producción de café cereza obtenidos durante cuatro años.

Tabla 3. Promedios de producción de café cereza (kg ha⁻¹) y coeficientes de variación (CV) por tratamientos y sistema, correspondientes a cuatro cosechas.

Tratamiento	Sistema				Promedio	CV, %
	Al sol		Semisombra			
	Promedio	CV, %	Promedio	CV, %		
NPKMg-Testigo	22 172 A	54.00	12 856 A	57.31	18 777 A	60.81
PKMg-Sin N	15 514 B	57.90	10 171 A	63.34	13 567 B	62.79
NKMg-Sin P	21 127 A	51.71	12 102 A	62.49	17 838 A	60.11
NPMg-Sin K	20 412 A	51.60	12 577 A	59.23	17 556 A	58.19
NPK-Sin Mg	21 677 A	51.01	13 177 A	62.25	18 579 A	58.54
Promedio	20 181 a	54.23	12 177 b	60.99	17 263	61.01

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre los sistemas, según prueba t al 5%.
 Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos para un mismo sistema, según prueba Duncan al 5%.

pudiéndose observar su respuesta después del segundo o tercer año. Pese a lo anterior, para el caso particular de este estudio, el análisis de los datos de manera global no revela el comportamiento en referencia. Los anteriores resultados coinciden con los obtenidos por Sadeghian et al. (2006), quienes reportan efecto del suministro de N a partir del segundo año de evaluación, y de K solo en el cuarto año, mientras que para el P y Mg no hubo respuesta. Al considerar los promedios obtenidos durante cuatro años, solo se presentó una disminución significativa en el rendimiento por la falta de N en los cafetales al sol (Tabla 3). En el sistema de producción bajo semisombra, la magnitud de la reducción fue menor y no alcanzó a detectarse estadísticamente. Cuando se comparan los promedios de los cinco tratamientos en los dos agroecosistemas, se obtienen los mismos resultados que en el sistema a plena exposición. De acuerdo a lo anterior, se puede señalar al N como el nutriente más crítico en la producción de café bajo las condiciones evaluadas, y particularmente para las plantaciones a libre exposición solar. Se hubiera esperado una respuesta similar para el caso de K, tal como lo reportan Uribe y Mestre (1976) y Hernández et al. (2004).

Calibración del análisis de suelo

Materia orgánica

Para el primer año de evaluación, la MO del suelo como indicador de la disponibilidad de N, no se relaciona con el rendimiento relativo (RR) en los dos sistemas, sea por separado o analizado conjuntamente (Figura 3).

En el segundo año, la tendencia registrada se ajustó a un modelo cuadrático, la cual fue más evidente para el siguiente ciclo, independiente del sistema de manejo. Los puntos de inflexión de las curvas obtenidas estuvieron entre 17 y 20% de MO, con un promedio cercano a 18%. En suelos con niveles de MO menores al 8% o mayores al 30%, el RR se redujo en más del 50% al eliminar el N de los planes de fertilización. Lo anterior pone de

manifiesto que, en el caso de este estudio, el modelo rectilíneo discontinuo no sería un buen estimador estadístico para describir el comportamiento de la producción en función de la MO, pues éste determina un nivel crítico en particular, después del cual la respuesta a la fertilización se hace cada vez menor, lo cual no ocurrió.

En un estudio de calibración para arroz (Agboola y Ayodele, 1987), desarrollado en Nigeria, se encontró una relación lineal entre el rendimiento del cultivo y la MO del suelo; comportamiento que estaría relacionado con los contenidos más bajos de la MO (entre 1.1 y 7.7%). Para Colombia, el ICA (1992) se basa en el piso térmico como indicador de la disponibilidad del N en función de la MO, en este sentido, para regiones de clima medio o templado (como es el caso de café), se cataloga como un nivel alto aquel suelo cuyo contenido sea mayor a 5%, límite que corresponde a los valores más bajos encontrados en este trabajo. Lo anterior se debe al hecho de que la gran mayoría de los suelos en cuestión tienen origen volcánico o influencia de cenizas, resistentes a la mineralización, en respuesta a la presencia de la alofana como mineral predominante (Zech et al., 1997).

Para algunas condiciones de Brasil (Chaves, 2002) o Kenia (CRF, 1991), no se considera el contenido de la MO para ajustar las dosis de N en el cultivo de café. Esta recomendación puede deberse a las pocas variaciones que presentan estos suelos, los cuales son relativamente pobres en esta propiedad. En contraposición, en Colombia sí se tiene en cuenta la MO para ajustar la fertilización nitrogenada (Sadeghian y Duque, 2003), pues en la zona cafetera del país existe una amplitud considerable entre los niveles.

Fósforo

El nivel crítico para el P, determinado por el modelo lineal-discontinuo, presentó ciertas variaciones a través de tiempo, pero el rango en el que fluctuó fue relativamente reducido (Figura 4).

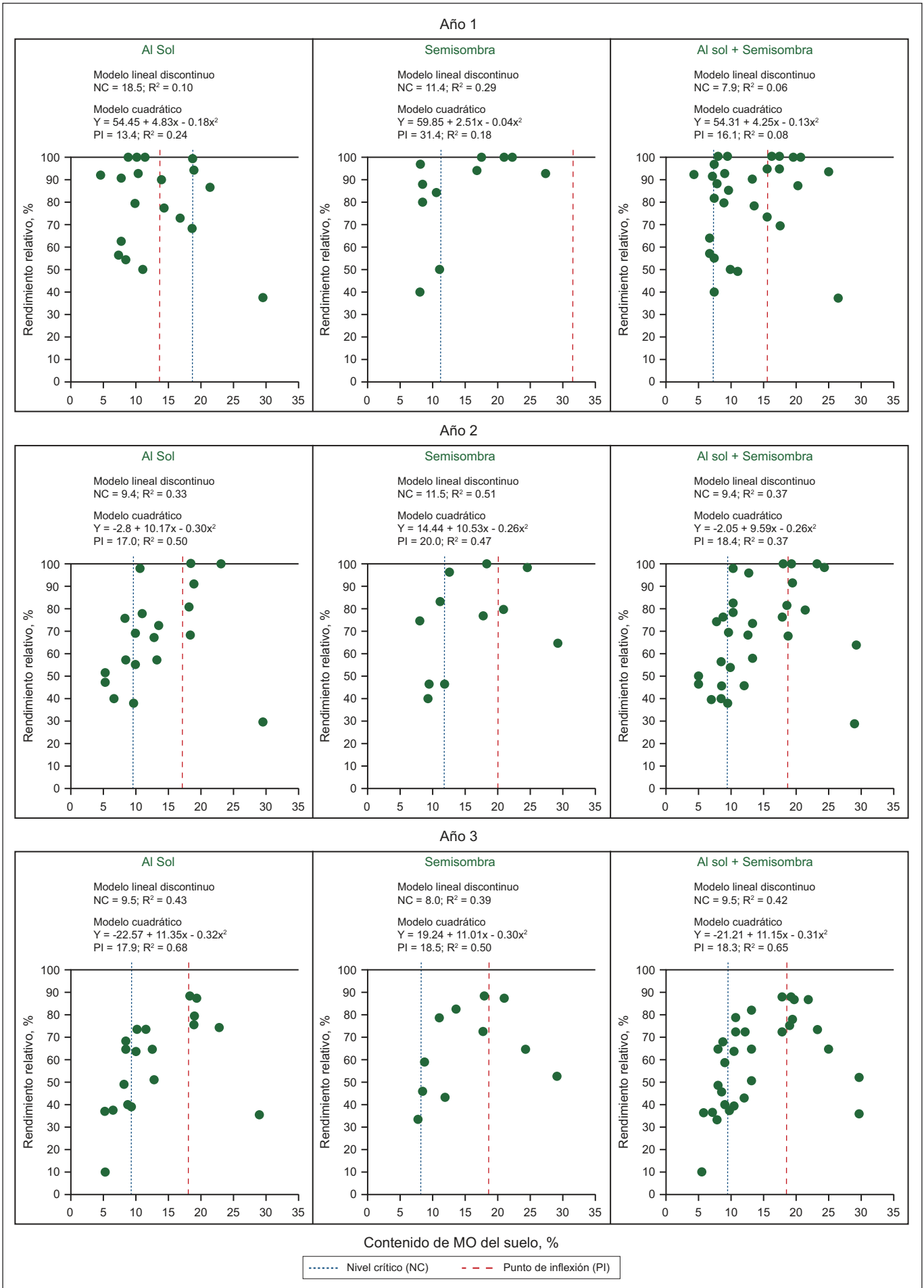


Figura 3. Relación entre el contenido de MO del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

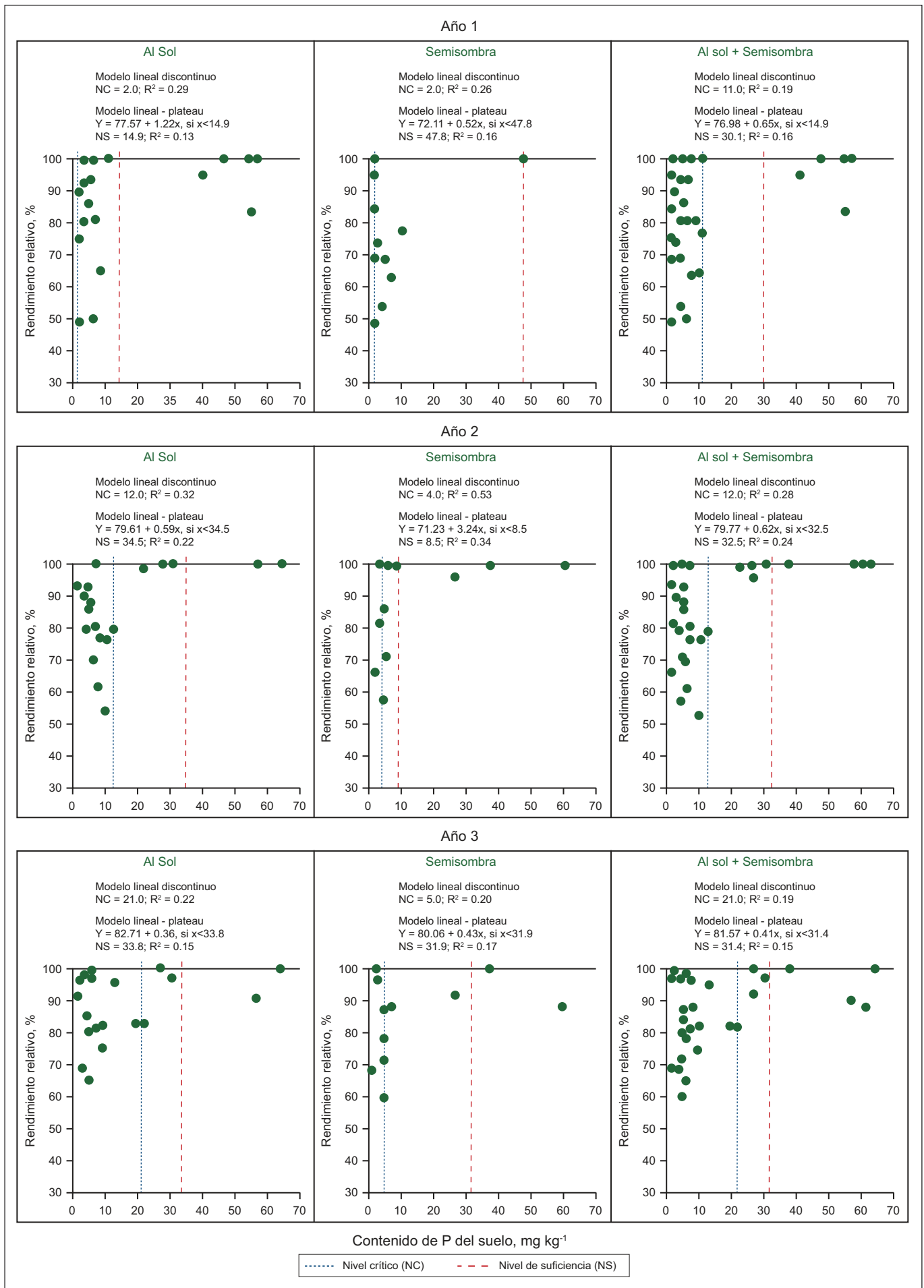


Figura 4. Relación entre el contenido de P del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

En el primer año se encontró un valor muy bajo del nivel crítico para los dos sistemas (2 mg kg^{-1}), pese a ello, el análisis conjunto de los resultados (sol + semisombra) sugiere un nivel de 11 mg kg^{-1} , el cual se aproxima a lo establecido actualmente para la etapa de producción (10 mg kg^{-1}), según lo reportado por Sadeghian y Duque (2003), quienes resumen los criterios establecidos en el programa “Reporte e Interpretación del Análisis de Fertilidad de Suelos”. En los siguientes dos años, el nivel crítico para los cafetales al sol se incrementó consecutivamente hasta 21 mg kg^{-1} , mientras que para el sistema bajo semisombra permaneció por debajo de 5 mg kg^{-1} , comportamiento que podría estar asociado con una mayor extracción en el sistema a plena exposición solar. Con base en los registros de producción obtenidos y la extracción de elementos por los frutos de café (Sadeghian et al., 2006), la remoción de P por la cosecha en cafetales al sol se estima en $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, frente a $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ bajo semisombra. Al considerar los dos sistemas, los valores hallados para los últimos dos años estuvieron entre 11 y 21 mg kg^{-1} .

En general, se obtuvieron valores cercanos a 30 mg kg^{-1} para el nivel de suficiencia, mediante el empleo del modelo lineal-plateau; solo en dos oportunidades (sistema al sol en el primer año y semisombra en el segundo año), los niveles encontrados fueron menores al nivel en referencia.

Los resultados mencionados presentan algunas variaciones frente a los reportados por países productores de café, posiblemente en respuesta a factores como el método de laboratorio empleado, origen de los suelos y manejo, entre otros. CRF (1991) considera para Kenia como bajo $P < 15 \text{ mg kg}^{-1}$ y alto $P > 30 \text{ mg kg}^{-1}$; Chaves (2002) establece los siguientes rangos de fertilidad para Brasil: menor de 15 mg kg^{-1} , entre 15 y 22 mg kg^{-1} y mayor de 22 mg kg^{-1} ; a su vez, Raju (1988) define como nivel crítico 7 mg kg^{-1} para condiciones de India.

Potasio

Los valores del nivel crítico de K, determinados por medio del modelo rectilíneo-discontinuo, presentaron algunas variaciones a través de tiempo, sin que hubiera una tendencia que indicara un efecto del sistema de manejo (Figura 5). En general, el ajuste del modelo fue mejor (mayor R^2) para cafetales al sol, lo cual estaría relacionado con un mayor número de registros para este sistema; por ello, el análisis conjunto de los datos (al sol + semisombra) fue más concluyente y con un rango de valores más estrechos, los cuales estuvieron comprendidos entre 0.20 y $0.30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Los niveles de suficiencia, evaluados mediante el modelo lineal-plateau, estuvieron entre 0.36 y $0.80 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; en este caso tampoco se evidenció una tendencia clara que indicara influencia del sistema. Al

analizar de manera conjunta los resultados, las variaciones fueron bajas, pues el rango de los valores encontrado sólo fue de $0.05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (entre 0.43 y $0.48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Con base en lo anterior se puede concluir que para valores inferiores al nivel crítico (0.20 ó $0.30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), existe una alta probabilidad de respuesta al suministro de K, y, por lo tanto, se deben aplicar las máximas dosis con el fin de incrementar su nivel en el suelo para obtener altas producciones, de acuerdo a la oferta ambiental. En este mismo sentido, cuando el contenido de K sea mayor al nivel de suficiencia (0.43 ó $0.48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), no se espera un efecto considerable de la fertilización potásica; sin embargo, se podrá suministrar cierta cantidad del elemento para mantener la fertilidad en niveles superiores y evitar así su agotamiento en el suelo.

Para Colombia sólo existe un reporte de calibración para K en café, el cual corresponde a lo determinado por Bravo (Bravo, 1978); éste indica que para contenidos mayores a $0.35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ la probabilidad de encontrar respuesta a la fertilización es menor al 5%. Valencia (1999), en base en el valor en referencia y el nivel de confianza para las determinaciones de K en el laboratorio ($\pm 0.06 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), establece como rango óptimo el intervalo entre 0.29 y $0.41 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, el cual se aproxima a 0.30 y $0.40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Para otros países productores de café como Brasil, Kenia e India, en general, los niveles señalados varían entre 0.20 y $0.45 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Chaves, 2002; CRF, 1991; Raju, 1988), rango que se asemeja a lo encontrado en este trabajo.

Magnesio

Para el primer año se presentó una alta dispersión de los datos (Figura 6), posiblemente como consecuencia del efecto de labores que pueden afectar la disponibilidad de Mg en el suelo, tales como el encalamiento, práctica que incrementa el pH y los niveles de Ca.

Los niveles críticos obtenidos mediante el modelo lineal-discontinuo para este primer ciclo fueron altos frente a los siguientes dos años ($\geq 1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y $\leq 0.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). Como se mencionó anteriormente, la respuesta al Mg en producción fue baja, resultado que se ve reflejado en los altos valores del RR para la mayoría de los datos, especialmente en los últimos dos años de evaluación. Para Colombia se han propuesto como nivel bajo de Mg, contenidos menores a $0.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Sadeghian y Duque, 2003), valor diferente al registrado en este estudio para el primer año, pero cercano a los encontrados en los años siguientes.

En contraposición al P y K, no fue posible determinar un nivel de suficiencia para Mg, resultado que se relaciona con la falta de correlación entre los niveles del elemento en el suelo y la respuesta en producción a la fertilización.

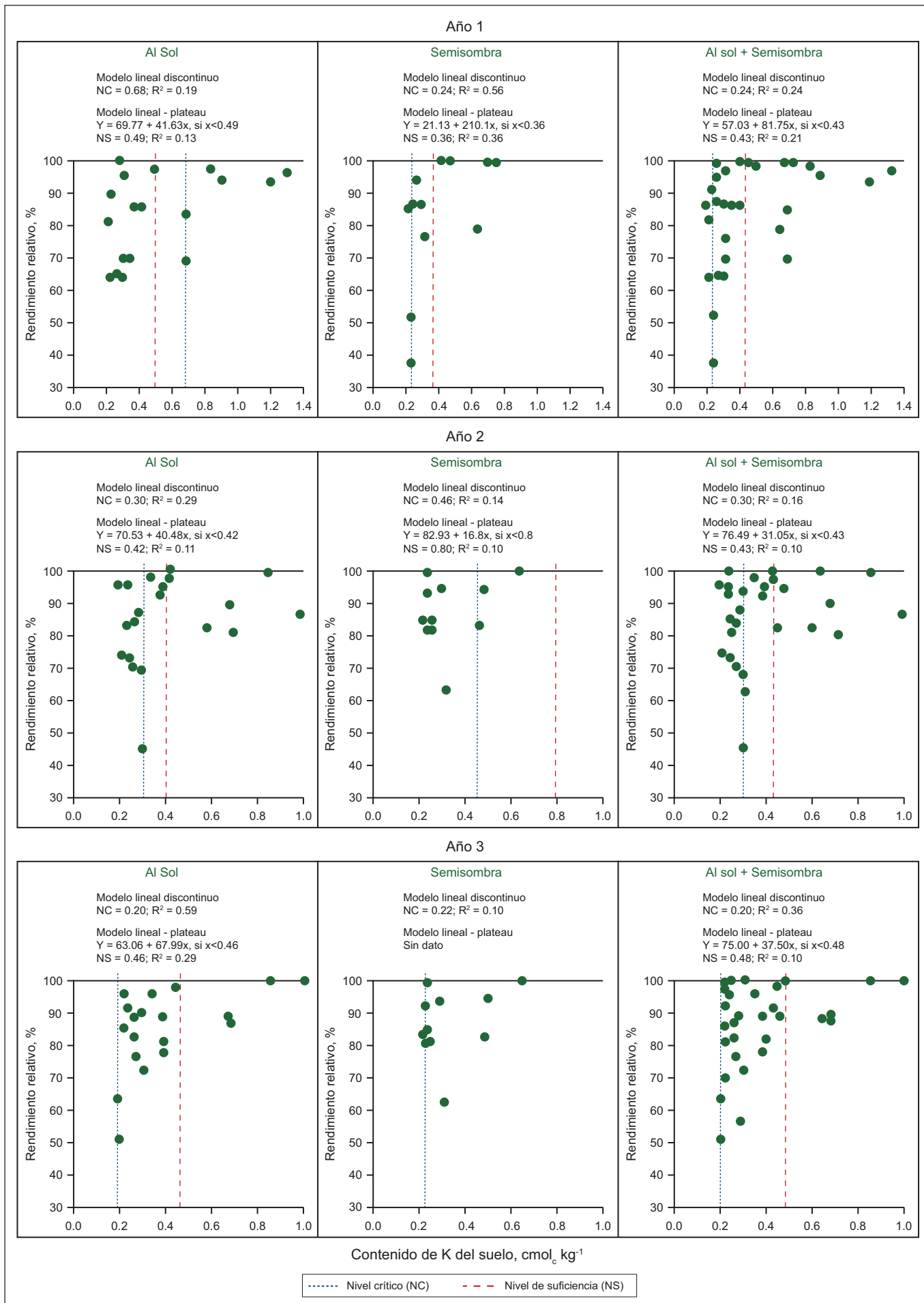


Figura 5. Relación entre el contenido de K del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

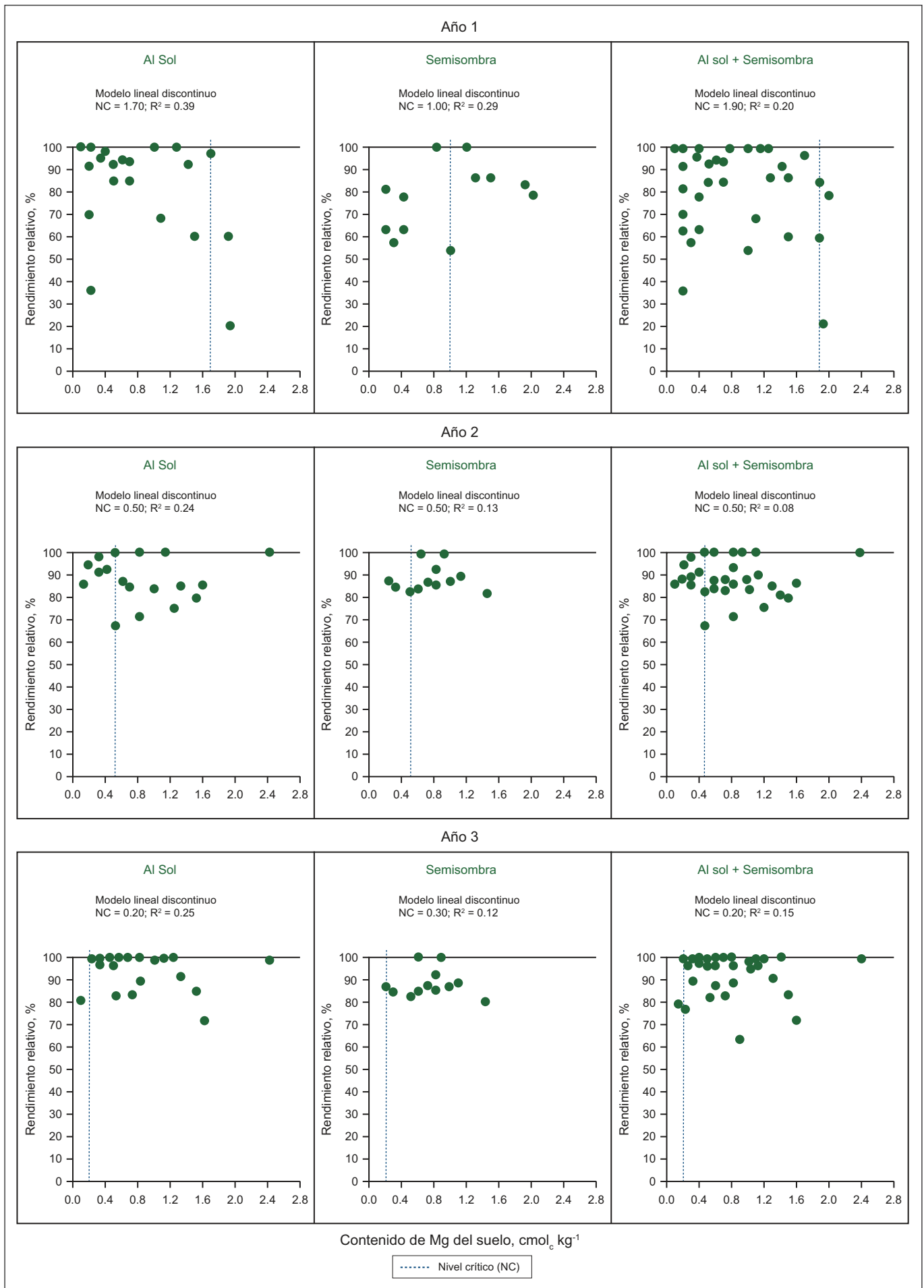


Figura 6. Relación entre el contenido de Mg del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

Agradecimientos

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a los propietarios de las fincas en donde se llevó a cabo el experimento, a los Extensionistas y los Líderes de Extensión de los Comités Departamentales de Caldas y Cesar-Guajira: Sergio Granada, Luis G. Cortés, Francisco Bustamente, Arturo Valencia, Carlos A. León, Roberto Mejía, Edgar de los Ríos, Jorge H. Paez, Flor A. Zuluaga, Fredy M. Aguirre, Felipe E. Toro, Milton M. Herrera, Gabriel García, Arturo Valencia, Armando Pavón, Víctor Pacheco, José Molina y Euder Maestre. A los jefes de las Subestaciones Experimentales de Cenicafé: Juan C. García, John W. Mejía, Jorge C. Torres, Celso Arboleda (q.e.p.d.), José D. Arias, José E. Baute, Piedad D. Henao, Carlos R. Solarte y Pedro M. Sánchez. A Eduardo Hernández G., Esther C. Montoya R. y Rubén D. Medina.

Bibliografía

- Agboola, A., y O. Ayodele. 1987. Soil test calibration for upland rice in south western Nigeria. *Fertilizar Research*. 14:235-244.
- Beer, J.W., R.G. Muschler, D. Kass, y E. Somarriba. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38:139-164.
- Bohn, H.L., B.L. Mcneal, y G.A. O'connor. 1993. Química del suelo. Mexico, Editorial Limusa. S.A., 370 p.
- Bravo, G. 1978. Fertilización potásica en café. *Suelos Ecuatoriales* 9(2):68-75.
- Carvajal, J.F. 1984. Cafeto: Cultivo y fertilización. 2ed. Berna, International Potash Institute, 1984. 254 p.
- Cate, R.B., y L.A. Nelson. 1971. Simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into tow classes. *Soil Science Society of American*, 35:658-660.
- Chaves, J.C.D. 2002. Manejo do solo. Adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, Circular No. 120. 36 p.
- Coffee Research Foundation (CRF), 1991. Standard recommendations for fertilizer, Kenya Coffee 56:1153-1160.
- Duque, H. 2004. Cómo reducir los costos de producción en la finca cafetera. 2ed. Chinchiná, Cenicafé. 101 p.
- Evans, C.E. 1987. Soil test calibration. In: BROWN, J.R. Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation. Madison, Soil Science Society of America., pp. 23-30.
- Farfán, F., y A. Mestre. 2004. Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes. *Cenicafé* 55(2):161-174.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 1993. Manual de uso de fotografías aéreas. Aplicación al Sistema de Información Cafetera. Bogotá, FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2007. Sistema de Información Cafetera: Encuesta nacional cafetera SICA. Estadísticas Cafeteras. Bogotá, FNC.
- Gómez, L., A. Caballero, y J.V. Baldión. 2000. Ecotopos cafeteros de Colombia: Zonificación Agroecológica. In: SIMPOSIO sobre Suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Julio 24-28. Chinchiná, Cenicafé. 24 p.
- Guerrero, R. 2004. El diagnóstico cuantitativo de la fertilidad del suelo. In: BOLETÍN de Suelos. No. 42. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, pp. 12-17.
- Guerrero, R. 2004. Propiedades generales de los fertilizantes sólidos. 4ed. Bogotá, Monómeros Colombo Venezolanos, 46 p.
- Hernández, E., S. Sadeghian, y M. Ross. 2004. Avances sobre el efecto de fuentes y dosis de potasio en la producción y calidad del café. In: CONGRESO Latinoamericano, 16; Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 12. Cartagena (Colombia), Septiembre 26-Octubre 1, 2004. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 10 p.
- Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5ed. Tibaitatá, ICA. 64 p.
- Jaramillo, A. 2005. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé. 196 p.
- Jaramillo, A., y J. Arcila. 1996. Épocas recomendables para la siembra de los cafetos. Chinchiná, Cenicafé. 8 p. (Avances Técnicos No. 229).
- Mestre, A. 1977. Determinación de la rata óptima de fertilización en plantaciones de café sin sombrío. *Cenicafé* 28(2):51-60.
- Mestre, A. 1996. Respuesta del café bajo sombra a la fertilización. Chinchiná, Cenicafé, 1996. 4 p. (Avances Técnicos. No. 231).
- Nelson, L. 1999. Estadística en la investigación del uso de fertilizantes. Ottawa, INPOFOS, 66 p.
- Nelson, L., y R. Anderson. 1977. Partitioning of soil test-crop response probability. In: Peck et al. Soil testing: Correlation and interpreting the analytical results. Madison, ASA Special Publication. 29. ASA, CSSA, and SSSA. pp. 19-38.
- Pavan, M.A., J.C.D. Chaves, A. Androcioli. 1994. Produção de café em função da densidade de plantio, adubação e tratamento fitossanitário. *Turrialba* 44(4):227-231.
- Pavan, M.A., J.C. Dias, R. Siqueira, A. Androcioli, A. Colozzi, y E. Libro. 1999. High coffee population density to improve fertility of an Oxisol. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 34(3):459-465.
- Raju, T. 1988. Calibration of soil test values for coffee. *Journal of Coffee Research* 18(1):28-35.
- Sadeghian, S. 2003. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé* 54(3):242-257.
- Sadeghian, S. 2006. Efecto de fuentes solubles de magnesio y azufre en la producción y calidad del café. In *Cenicafé. INFORME Anual de Actividades de Investigación 2005-2006*. Chinchiná, Cenicafé. 13 p.
- Sadeghian, S., y H. Duque. 2003. Análisis de suelos: importancia e implicaciones económicas en el cultivo del café. Chinchiná, Cenicafé. 8 p. (Avances Técnicos No. 308).
- Sadeghian, S., J.C. García, y E.C. Montoya. 2006. Respuesta del café a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del departamento del Quindío. *Cenicafé* 57(1):58-69.
- Sadeghian, S., B. Mejía, y J. Arcila. 2006. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 57(4):251-261.
- Sparks, D.L. 1995. Environmental soil chemistry. San Diego (California), Academic Press. 267 p.
- Uribe, A. 1983. Efecto del fósforo en la producción de café. *Cenicafé* 34(1):3-15.
- Uribe, A., y A. Mestre. 1976. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Cenicafé* 27(4):158-173.
- Uribe, A., y A. Mestre. 1988. Efecto de la densidad de población y de la disposición de los árboles en la producción de café. *Cenicafé* 39(2):31-42.
- Uribe, A., y N. Salazar. 1981. Distancias de siembra y dosis de fertilizante en la producción de café. *Cenicafé* 32(3):88-105.
- Uribe, A., y J.N. Salazar. 1981. Efecto de los elementos menores en la producción de café. *Cenicafé* 32(4):122-142.
- Valdes, H., y A. Herrón. 1966. Respuesta a la aplicación de fertilizantes en dos proyectos de cafetos bajo sombra. *Cenicafé* 17(4):142-146.
- Valencia, G. 1999. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Chinchiná, Cenicafé-Agroinsumos del Café. 94 p.
- Zapata, R.D. 1997. Fundamentos químicos para evaluar la fertilidad del suelo. In: Diagnóstico químico de la fertilidad del suelo. Comité Regional de Antioquia. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Medellín, Ecográficas Ltda., pp. 1-11.
- Zapata, H.R. 2004. Química de la acidez del suelo. Cali, Cargraphics. 208 p.
- Zech, W., N. Senesi, G. Guggenberger, K. Kaiser, J. Lehman, T. Miano, A. Miltner, y G. Schorff. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79(1197):117-161. □