

EVALUACION DE LA FERTILIDAD DEL SUELO PARA UNA ADECUADA NUTRICION DE LOS CULTIVOS. CASO CAFE

Siavosh Sadeghian Khalajabadi¹

¹ Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Colombia. Correo electrónico: Siavosh.Sadeghian@cafedecolombia.com

INTRODUCCION

Uno de los factores determinantes de la productividad agrícola es la fertilidad del suelo; de allí la importancia que tiene su evaluación para establecer estrategias de manejo. A medida que los agricultores ignoran este componente y definen planes generales para la nutrición de sus cultivos, aumentan los riesgos económicos y ambientales, pues estarían aplicando fertilizantes y enmiendas cuya respuesta es incierta; por lo tanto, se hace necesario conocer el estado de la fertilidad del suelo con el fin de adoptar las mejores alternativas.

Existen diferentes herramientas para evaluar la fertilidad del suelo, siendo el análisis químico la más estudiada y divulgada. Mediante éste se diagnostica la disponibilidad de los nutrientes y otras propiedades del suelo que afectan el crecimiento de las plantas; sin embargo, para que los resultados de los análisis de suelos tengan validez es necesario que las metodologías empleadas en el laboratorio correlacionen de manera confiable con la toma de los nutrientes; además, y para poder generar una recomendación práctica en términos de la dosis del fertilizante, debe haberse calibrado la disponibilidad del nutriente en el suelo en función de la producción en el campo. El anterior procedimiento es costoso y demanda mucho tiempo, especialmente para cultivos perennes como el café, pues en estos casos la investigación se convierte en una “carrera de resistencia” y no de “velocidad”.

En Colombia, el costo de los fertilizantes para el cultivo de café hoy día representa entre el 10% y 15% de los costos totales de la producción, y entre el 80% y 90% de los insumos requeridos. Estas cifras parecen no tener mucha importancia como valor porcentual; sin embargo, su magnitud toma otra proporción al conocer que la cantidad que ella representa equivale a más de 250.000 toneladas de abono por año, con un costo que actualmente se aproxima a los 300 mil millones de pesos (150 millones de dólares).

La posibilidad de conocer la fertilidad del suelo mediante un análisis de laboratorio puede aliviar estos costos y reducir el impacto ambiental. En ocasiones esta herramienta no conlleva a la disminución de costos, pero sugiere la realización de prácticas que son necesarias para una alta producción según las condiciones locales.

En este documento se hace una breve reseña acerca de la fertilidad del suelo, mediante ejemplos aplicados al cultivo de café, particularmente para las condiciones de Colombia.

FERTILIDAD DEL SUELO

La producción de las especies cultivadas depende del medio ambiente en el que se desarrollan (suelo y clima), y de la habilidad de los productores en identificar y reducir al mínimo los factores que disminuyen su rendimiento potencial, sin perder de vista los aspectos económicos y ambientales (Havlin et al., 1999). Las variables climáticas son prácticamente inmodificables, pues sólo se puede tener influencia sobre algunas de ellas bajo condiciones controladas o semicontroladas, no así muchas de las propiedades del suelo, las cuales determinan en últimas su fertilidad.

Dada la naturaleza compleja del suelo, definir su fertilidad no resulta fácil. Una definición general es aquella que la relaciona con la capacidad que tiene el medio edáfico para suplir los elementos esenciales que demandan las plantas para su metabolismo. Según este concepto, un suelo fértil posee

una reserva adecuada y balanceada de nutrientes, suficientemente disponible para soportar los requerimientos de las especies vegetales (Foth Y Ellis, 1997).

Algunos autores definen la fertilidad en función de la capacidad global del suelo en sus aspectos físicos, químicos y biológicos, para garantizar el crecimiento y la producción de los cultivos, mediante el suministro de agua y nutrientes (Malavolta, 2006). Otros, en cambio, sostienen que no se debe expresar la fertilidad en términos de productividad (producción por unidad de área); razón por la cual, la relacionan básicamente con la capacidad química del suelo en “ceder” elementos esenciales a las plantas (Dias y Álvarez, 1996). Según este enfoque, un suelo puede ser fértil mas no productivo, pero un suelo productivo será fértil; además, un suelo fértil puede llegar a perder su fertilidad por un manejo inadecuado (Lopes y Guilherme, 2007).

Sims (1999) resalta que la fertilidad, como ciencia o disciplina, es compleja y demanda la integración de conocimientos básicos de biología, física y química de suelo, y por lo tanto requerir el desarrollo de prácticas de manejo de nutrientes que no sólo persiguen altas productividades, sino también la protección del medio ambiente.

Para evaluar la fertilidad del suelo se deben realizar análisis químicos y físicos, cuyos resultados sirven de guía para determinar la cantidad de cada nutrimento en particular, y en ocasiones la aplicación de enmiendas (principalmente calces, yeso y materia orgánica), con el fin de corregir la acidez o remediar otro tipo de problemas como la compactación, y limitaciones en la aireación y retención de humedad, entre otros. El éxito del análisis de suelo está relacionado estrechamente con tres pasos: (1) la obtención de la muestra, (2) la calidad del análisis y (3) la interpretación de los resultados analíticos a la luz de la información existente (SICCPHA, 2004). Otros indicadores como la composición elemental de los tejidos, en especial las hojas, las pruebas biológicas, la caracterización microbiológica del suelo, la sintomatología de deficiencia y el estado de desarrollo del cultivo, entre otros, también son útiles y pueden complementar los planes del diagnóstico y pronóstico (Foth y Ellis, 1997; Havlin et al., 1999).

Para generar una información que sirva de guía a los productores en el manejo de la fertilidad del suelo, es necesario desarrollar previamente un programa ordenado de investigación que incluya los siguientes aspectos: (1) técnicas de muestreo de suelos, (2) métodos de análisis de suelos, (3) sistemas para correlacionar los análisis de suelos y la respuesta del cultivo, (4) modelos para interpretar la respuesta del cultivo a fertilizantes en experimentos de campo, y (5) procedimientos para la recomendación de fertilizantes con base en condiciones económicas sólidas (Wough et al., 1973).

MUESTREO DE SUELO

Las propiedades del suelo que determinan su fertilidad presentan una alta variabilidad, aun en cortas distancias, debido al efecto de la acción e interacción de los factores y procesos de formación; hecho que toma mayor relevancia en condiciones montañosas, como son muchas de las regiones en donde se cultiva café en el mundo. Ante esta situación no resulta fácil obtener una muestra que represente la realidad del campo.

Si se consideran los primeros 20 cm de profundidad del terreno – donde se encuentran la mayoría de las raíces de café – el peso correspondiente a una hectárea de suelo puede variar aproximadamente entre 1,4 y 2,8 millones de kilogramos. Ejemplo de este contraste son los andisoles, con baja densidad aparente ($0,7 \text{ g cm}^{-3}$), y suelos arenosos con alta densidad aparente ($1,4 \text{ g cm}^{-3}$). Mediante el análisis de suelo se busca representar la fertilidad correspondiente a los valores en referencia, por medio de una muestra que no supere 1,0 kg; de allí, los cuidados que se deban tener en cuenta. En este sentido, los aspectos más importantes se relacionan con el área del lote y el número de submuestras para conformar una muestra compuesta, además de la época, el equipo, el sitio y la profundidad del muestreo (Sadeghian, 2008).

En la **Tabla 1** se presentan los parámetros estadísticos, correspondientes a los resultados de los análisis del suelos en dos lotes de café, en los que se realizaron muestreos sistemáticos de 10 m x 10 m. Se destaca el hecho que en uno de ellos (Naranjal) existe una menor variación de todas las propiedades del suelo analizadas con respecto al otro (Paraguaicito); pese a ello, en los dos sitios el comportamiento de la distribución de los datos tiende a ser similar, pues la asimetría es casi siempre a la derecha. En las dos localidades se presenta una menor variación para el pH y la materia orgánica (M.O.); además, para estas variables los valores de la moda son relativamente similares a los del promedio. Lo anterior tiene implicaciones sobre el grado de acierto que se pueda tener en las recomendaciones de la fertilización con base en los resultados de los análisis de suelos a nivel de lote.

En la **Figura 1** se puede observar la frecuencia de la distribución de K para las dos localidades; en Paraguaicito el 51% de los puntos muestreados son deficientes en K (contenidos inferiores a 0,40 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), y por lo tanto, las dosis a recomendar deberían ser altas; sin embargo, el valor promedio de este elemento (0,43 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), sugiere suministrar cantidades bajas. En contraposición, la variabilidad de K en Naranjal es menor, pues el 76% del área tiene niveles muy bajos de K y el restante 24% contenidos que se consideran bajos.

Tabla 1. Parámetros estadísticos asociados a las propiedades del suelo, resultantes de un muestreo de 10 m x 10 m (100 muestras), en dos localidades de la zona cafetera de Colombia.

Propiedad	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	CV (%)	Distribución
Paraguaicito							
pH	3,80	5,60	4,60	4,50	4,20	9,90	AD
M.O. (%)	5,20	9,79	7,10	7,11	6,20	14,79	AD
K, ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,10	0,95	0,43	0,4	0,29	42,39	AD
Ca ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,20	9,50	2,21	0,75	0,50	105,5	AD
Mg ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,00	1,90	0,40	0,20	0,10	103,6	AD
Al ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,10	4,20	2,11	2,65	2,90	64,35	AI
P (mg kg^{-1})	2,00	134,00	38,94	29,00	5,00	88,14	AD
Naranjal							
pH	4,60	5,20	4,80	4,90	5,00	2,90	AI
M.O. (%)	10,80	16,80	14,26	14,25	14,00	7,87	AD
K ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,11	0,28	0,18	0,18	0,19	21,44	AD
Ca ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,70	4,80	1,78	1,70	1,10	45,03	AD
Mg ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,20	1,80	0,57	0,50	0,40	40,59	AD
Al ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,20	1,40	0,88	0,90	1,10	31,46	AD
P (mg kg^{-1})	1,00	5,00	2,59	3,00	3,00	28,56	AD

Fuente: Ochoa (2001). AD = Asimétrica hacia la derecha. AI = Asimétrica hacia la izquierda. CV = Coeficiente de variación.

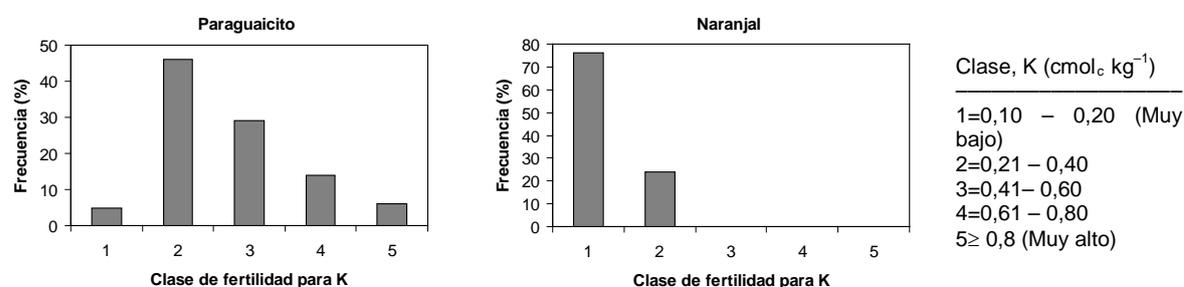


Figura 1. Frecuencia de distribución de K, correspondiente a un muestreo de 10 m x 10 m (100 muestras), en dos localidades de la zona cafetera de Colombia.

El número de submuestras necesarias para obtener una muestra compuesta depende de la variación que presenta cada propiedad analizada y el error relativo de estimación (E), asociados a un nivel de confiabilidad. Con base en los datos originales de la Tabla 1, se calculó el número mínimo de submuestras para un nivel de confianza del 90% y E del 10% y 20% (Tabla 2). Como es de esperarse el número de submuestras aumenta conforme al incremento del CV; debido a ello, para el pH y la M.O. el número de submuestras es relativamente bajo, no así para el resto de las propiedades, especialmente si se quiere reducir el error.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el muestreo se relaciona con la profundidad a la cual se lleva a cabo el muestreo, dado que algunas características presentan variaciones considerables, no sólo según el tipo de suelo sino con la profundidad. Un ejemplo de lo anterior se presenta para la M.O. en la **Figura 2**.

En áreas cultivadas la fertilidad del suelo se modifica a través de tiempo, de acuerdo a los sistemas de uso y manejo. Las aplicaciones repetidas de los fertilizantes incrementan los niveles de los nutrientes, pero en ocasiones afectan negativamente la concentración de otros elementos en el suelo, por el efecto de la competencia y/o cambios en la acidez y salinidad de los suelos. En un experimento con fines de evaluar el efecto de N y K en la producción de café, se determinaron las variaciones del pH y los contenidos de nitratos (NO_3^-) y K durante un semestre, después de aplicar tres años consecutivos los tratamientos (**Figura 3**).

Los resultados indican que cuando se utiliza urea como fertilizante, en los primeros 10 días se incrementa sustancialmente el contenido de N – nítrico, de acuerdo a las dosis aplicadas. Posteriormente hay un descenso en la concentración de esta fracción, hasta alcanzar los niveles iniciales después de casi dos meses. En cuanto al K^+ , se observaron diferencias en su contenido al momento de comenzar la evaluación (día cero), como resultado de la aplicación diferencial de los tratamientos durante tres años. A partir de este momento, se registró un incremento de K^+ , resultante de una nueva aplicación, con una residualidad de casi tres meses. Además, se puede notar que la dinámica de este nutriente guarda relación con las dosis de N, cuya aplicación se traduce en una reducción del pH (como consecuencia de la nitrificación del amonio), con efectos más marcados durante los primeros dos a tres meses. La anterior información es útil para definir el momento de muestreo de elementos muy móviles como el N o poco móviles como el K^+ .

Tabla 2. Número mínimo de muestras, de acuerdo una confiabilidad DEL 90% y errores relativos de estimación del 10 y 20%.

Propiedad	Paraguacito		Naranjal	
	E = 10%	E = 20%	E = 10%	E = 20%
pH	1,6	0,4	1,5	0,4
M.O. (%)	3,6	0,9	1,0	0,3
K ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	29,9	7,5	4,6	1,2
Ca ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	184,9	46,2	26,6	6,7
Mg ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	172,0	43,0	24,2	6,0
Al ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	68,1	17,0	20,4	5,1
P (mg kg^{-1})	129,3	32,3	14,0	3,5

Ecuación empleada para determinar el número de submuestras: $N = (t \text{ CV}/E)^2$, donde: N = número de submuestras, t = el valor de la tabla de distribución t (Student) para un nivel de probabilidad $\alpha/2$ (bilateral) y número de grados de libertad (n - 1, siendo n es el número de total de las muestras tomadas en el estudio), CV = coeficiente de variación (%), E = Error relativo de estimación.

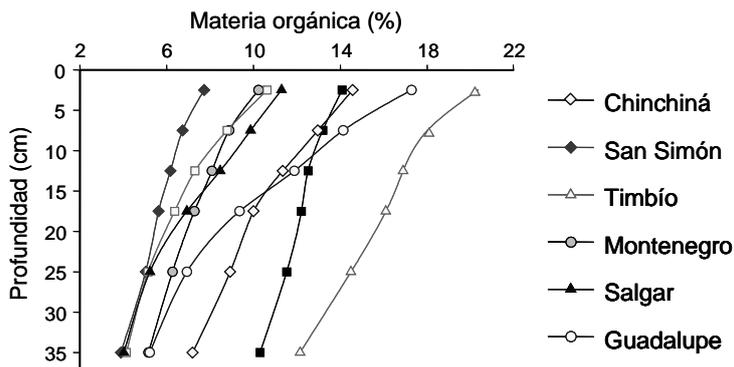


Figura 2. Variaciones de los contenidos de la materia orgánica con la profundidad, en ocho unidades de suelos de la zona cafetera. Tomado de Salamanca y Sadeghian (2005).

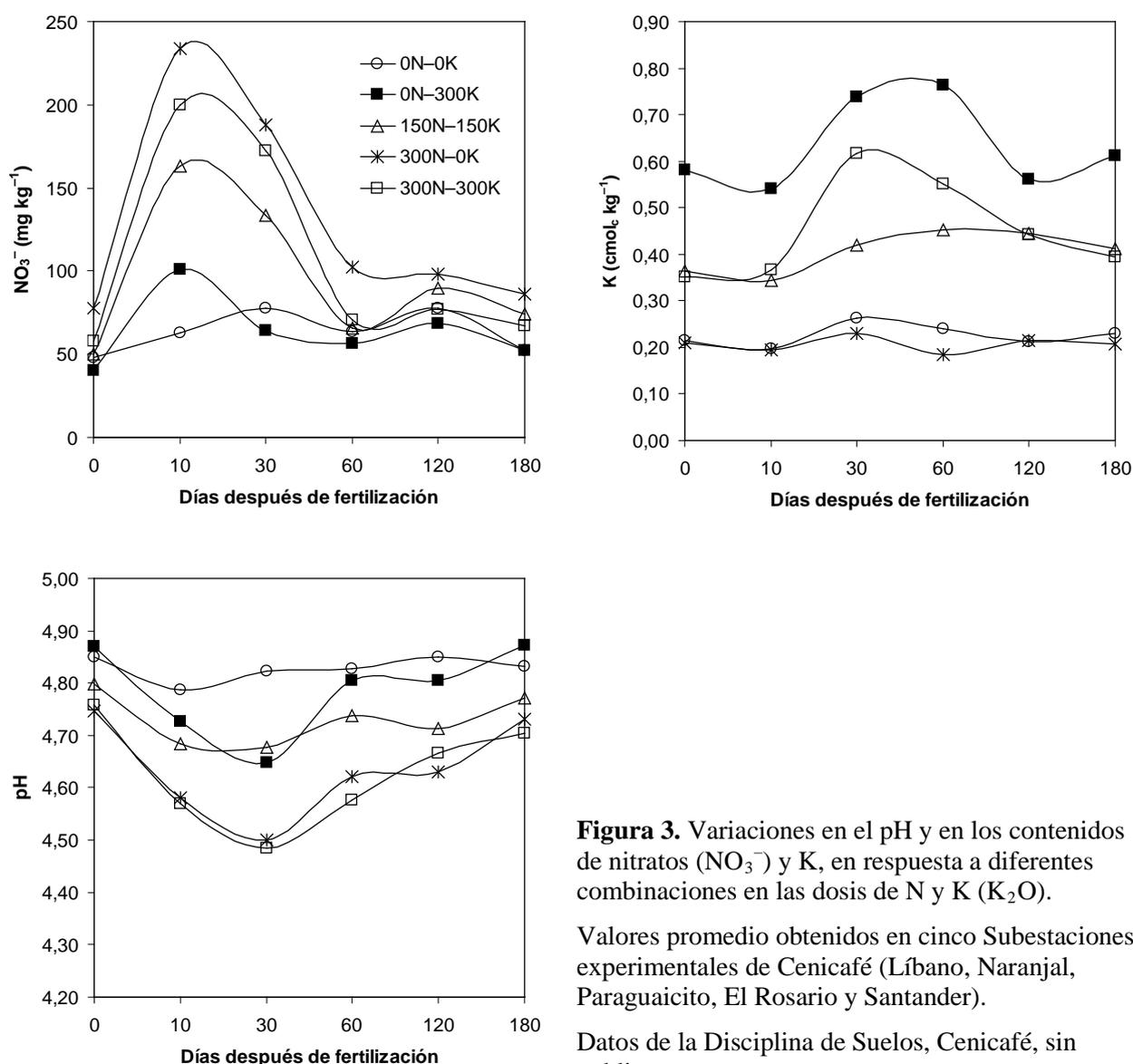


Figura 3. Variaciones en el pH y en los contenidos de nitratos (NO₃⁻) y K, en respuesta a diferentes combinaciones en las dosis de N y K (K₂O).

Valores promedio obtenidos en cinco Subestaciones experimentales de Cenicafé (Líbano, Naranjal, Paraguaicito, El Rosario y Santander).

Datos de la Disciplina de Suelos, Cenicafé, sin publicar.

Durante los años recientes ha sido frecuente hablar de la agricultura de precisión y el manejo específico de la fertilidad del suelo por sitio. Cabe aclarar que las técnicas en mención tienen una aceptada y acertada aplicación en áreas relativamente grandes, de acuerdo al cultivo, debido a que es diferente referirse a hortalizas o flores que a pastos, palma de aceite o soya. Respecto al café, la aplicabilidad del Manejo Específico por Sitio (MES) para la nutrición también cambia según las condiciones; por ejemplo, no es lo mismo una explotación mediana o grande en Brasil que en Colombia. En Colombia el 55% de los 527.000 cafeteros poseen menos de 1 ha en café y el 87% menos de 2 ha. Por esta razón promover el tema de la agricultura de precisión para ellos, no tiene las mismas connotaciones que para el 1,7% de los productores que poseen más de 10 ha. Si a lo anterior se suma el tema de la renovación por siembra o zoca, de una parte de la plantación, el promedio del área de cada lote para los pequeños productores sería muy reducido, hecho que conlleva a pensar que muchos productores ya estarían dando un MES a sus cafetales, si emplean los análisis de suelos.

En la práctica, para el caso de café, se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

Área del muestreo. La finca se debe dividir en lotes homogéneos, de acuerdo con aspectos como el tipo de suelo, la topografía, la densidad de siembra, el nivel de sombrero, la edad de las plantaciones y las prácticas culturales realizadas.

Época del muestreo. Las muestras se deben tomar por lo menos 3 ó 4 meses después de la última fertilización; esto reducirá el riesgo de sobrevalorar o subvalorar algunas propiedades del suelo que se afectan temporalmente por las prácticas realizadas anteriormente. Es importante contar con los resultados del análisis antes de efectuar las nuevas siembras, pues de acuerdo a éstos se define la pertinencia de llevar a cabo labores como la aplicación de enmiendas (principalmente calces), cuya efectividad es mayor cuando se incorpora el producto al suelo, labor que difícilmente se puede realizar después de la siembra.

Equipo del muestreo. Se deben emplear herramientas limpias y adecuadas como barreno o palín, balde y bolsas plásticas. Quizá el barreno tipo holandés es el instrumento más versátil para la toma de las submuestras, y el que menos daño ocasiona a las raíces de las plantas. Se recomienda que la punta sea de acero inoxidable para evitar que se oxide y contamine la muestra.

Sitio y profundidad del muestreo. Las muestras deben tomarse en el plato del árbol, a 20 cm de profundidad. En el caso de los cultivos intercalados, es prudente tomar muestras por separado en las calles.

Número de submuestras. Se debe recorrer el lote en zigzag y tomar al menos cinco o seis submuestras por hectárea. Éstas se mezclan para formar una muestra compuesta no superior a 1,0 kg, la cual se envía al laboratorio.

ANÁLISIS DE LABORATORIO

Havlin et al. (1999), con relación los extractantes, consideran como método efectivo de análisis, aquel que mejor simula la remoción de un nutrimento específico por la planta, con la subsecuente reposición por parte de las reservas del suelo, como factor que controla la disponibilidad del elemento. Es necesario tener en cuenta que *"el análisis del suelo no mide la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas; en realidad, mide un índice de la cantidad de nutrientes del suelo, que luego se correlaciona con la probabilidad de una respuesta al fertilizante por medio de la calibración del análisis de suelo"* (SICCPHA, 2004).

En ocasiones, se atribuyen a la calidad de los análisis de laboratorio algunos resultados incoherentes, antes de cuestionar si fue correcto o no el procedimiento para el muestreo de suelo. Por lo tanto, se debe recordar que *"los resultados analíticos obtenidos en el laboratorio no pueden ser mejores que la muestra sometida al análisis"* (SICCPHA, 2004).

En la **Tabla 3** se hace un resumen de las metodologías comúnmente empleadas en los análisis químicos de suelos en Colombia.

Tabla 3. Métodos comúnmente empleados en Colombia para el análisis químico de suelos en café.

Elemento o propiedad	Método
pH	Potenciométrico en relación suelo:agua 1:1 (p/p)
Materia orgánica	Walkley Black y determinación por colorimetría a 485 nm
N	Kjeldahl
P	Extracción con Bray II y determinación por Bray – Kurtz colorimétrica a 660 nm
Ca, Mg, K	Extracción con NH ₄ OAc 1N – pH 7,0 y determinación por EAA
Al	Extracción con KCl 1N y determinación por EAA
S	Extracción con fosfato de calcio monohidratado 0,008M y determinación turbidimétrica a 420 nm
Fe, Mn, Zn, Cu	Extracción con EDTA 0,01M en NH ₄ OAc 1N – pH 7,0 y determinación por EAA
B	Extracción con agua caliente y determinación por colorimetría con azometina – H a 410 nm
CIC	Extracción con NH ₄ OAc 1N – pH 7,0 y determinación por colorimetría con reactivo de Nessler a 410 nm

DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES

La disponibilidad de los nutrientes en el suelo se puede definir de tres maneras: (1) **real**, (2) **conceptual** y (3) **operacional** (Álvarez, 1994).

La forma real hace referencia a la medición de la cantidad del nutriente que puede ser absorbido por el cultivo durante el ciclo vegetativo. En este caso, se considera que la cantidad disponible es el resultado del balance entre las pérdidas y las ganancias del nutriente en el suelo (**Figura 4**).

Con respecto a las entradas, algunos ejemplos para el cultivo de café en Colombia incluyen los siguientes procesos:

Ingreso de nutrientes al sistema vía abonos y residuos. La cantidad de nutrientes que ingresan al suelo vía fertilizantes varía sustancialmente, de acuerdo con factores como la etapa del cultivo, el sistema de producción, los criterios de manejo, el nivel de producción y los componentes económicos, entre otros. En este sentido, normalmente los caficultores aplican cada año hasta 300 kg de N y K₂O, 80 kg de P₂O₅, MgO y S, y 3 kg de B y Zn por hectárea, adicional a las enmiendas. En el caso que se devuelva al lote, la pulpa que se genera en el proceso de la producción, por cada 1.000 kg de café almendra obtenidos (2.700 kg de pulpa fresca) retornarían al sistema 10,2 kg de N, 0,61 kg de P, 19,8 kg de K, 1,6 kg de Ca, 0,48 kg de Mg y 0,13 kg de S (Sadeghian et al., 2007).

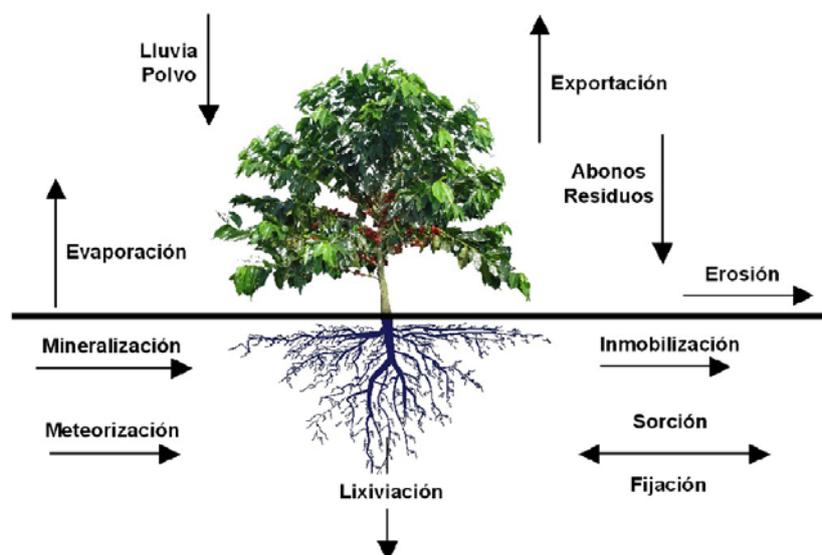


Figura 4. Disponibilidad de un nutriente, como resultado del balance entre sus pérdidas y ganancias en el suelo. Adaptado de Álvarez (1994).

Descomposición. En el monocultivo de café a libre exposición solar hay un ingreso anual de $4,5 \text{ t ha}^{-1}$ de material orgánico (principalmente hojarasca), el cual se descompone a una tasa anual (k) de 1,5. Esta cantidad llega a aportar en promedio 95 kg de N, 6,6 kg de P, 45,7 kg de K, 66,2 kg de Ca, 10,3 kg de Mg, 0,95 kg de Fe, 1,1 kg de Mn, 0,06 kg de Zn y 0,24 kg de B (Cardona y Sadeghian, 2005).

Lluvia. Los nutrientes que ingresan a los cafetales a través de la lluvia varían entre sitios y años; por ejemplo, Jaramillo (2003) reporta los siguientes valores para dos localidades ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$):

- Paraguaicito: K 9,9, Ca 27,9, Mg 8,6, NO_3^- 36,0.
- Cenicafé: K 13,3, Ca 75,0, Mg 19,5, NO_3^- 32,5.

En cuanto a las pérdidas de los nutrientes, se puede hacer mención de los siguientes aspectos:

Exportación. Por cada 1.250 kg de café pergamino seco, equivalentes a 1.000 kg de café almendra, el cultivo de café extrae 30,9 kg de N, 2,3 kg de P, 36,9 kg de K, 4,3 kg de Ca, 2,3 kg de Mg, 1,2 kg de S, 107,3 g de Fe, 61,4 g de Mn, 17,8 g de Zn, 33,0 g de Cu y 49, 8 g de B (Sadeghian et al., 2006).

Volatilización. Al aplicar fuentes nitrogenadas que contienen o generan el ión amonio, tales como la urea, se puede perder alrededor de 30% de la cantidad aplicada durante 20 días después de la fertilización; con las mayores pérdidas (25%) en los primeros cinco días (Leal et al., 2007).

Erosión y escorrentía. Las pérdidas por erosión varían según las propiedades del suelo, la pendiente del terreno, la precipitación y la cobertura. Aunque en el proceso de la erosión también se pierden nutrientes, generalmente se prefiere hacer referencia a las pérdidas del suelo como tal, dado su mayor impacto ambiental y económico. Por ejemplo, en los andisoles de la zona cafetera de Colombia, con pendiente del 60% y precipitación anual promedio de 2.600 mm, se pierden entre 50 y $3.600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de suelo, según el sistema de manejo (tipo y nivel de sombra, densidad de siembra, presencia de arvenses o de *mulch* y prácticas de control de conservación de suelos, entre otros) (Cenicafé, 1982). El proceso más directamente relacionado con el transporte y el desgaste de los elementos es la escorrentía, cuya magnitud también varía de acuerdo a los factores antes mencionados (Tabla 4).

Fijación. A pesar de que este fenómeno ocurre para algunos elementos, sus implicaciones son de mayor importancia para el caso de fósforo, especialmente en los suelos del trópico, donde se cultiva el café. En este sentido, se estima que algunos andisoles de Colombia tienen un poder de fijación mayor de 80% (López, 1960; Bravo y Gómez, 1974).

Tabla 4. Valores promedio de escorrentía y nutrientes perdidos por la escorrentía en cuatro sistemas de uso y manejo en la zona cafetera central de Colombia.

Cobertura	Escorrentía (mm)	Nutrientes perdidos (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)				calcio	Magnesio	Total
		Nitratos	Otras formas de N	Fósforo	Potasio			
Suelo desnudo	1.730	6,95	18,29	0,98	24,03	238,63	151,66	440,54
Potrero	517	2,46	4,12	0,15	5,58	24,84	26,39	63,54
Cafetal joven	190	1,03	7,54	0,06	2,14	4,71	5,09	20,57
Cafetal viejo	59	0,99	0,64	0,08	1,12	2,04	2,12	6,99

Tomado de Suárez De C. y Rodríguez (1962). Promedio de tres años.

Lixiviación. Las pérdidas por lixiviación varían de acuerdo a la naturaleza del elemento, las propiedades del suelo y la precipitación. Para suelos cafeteros de Colombia se estimaron los siguientes valores de nutrientes aplicados como fertilizantes: N entre el 23% y 44%, K entre 30% y 97% y P hasta el 9% (Arias, 2008). En el anterior estudio también se concluye que algunas propiedades del suelo ejercen una mayor influencia sobre estas pérdidas, que la textura del suelo.

La forma conceptual se refiere al resultado de la acción integrada de los factores Intensidad (I), que estima la concentración del nutriente en la solución del suelo; Cantidad (Q), que se refiere a la reserva lábil del nutriente, es decir, la cantidad adsorbida o precipitada que puede pasar a la solución; y Capacidad (C), también llamada capacidad tampón, la cual es la medida de resistencia que ofrece el suelo para dejar modificar la cantidad de nutriente en la solución. Un ejemplo se presenta en la **Figura 5**, en la cual se observa el comportamiento del Mg para tres localidades cafeteras de Colombia.

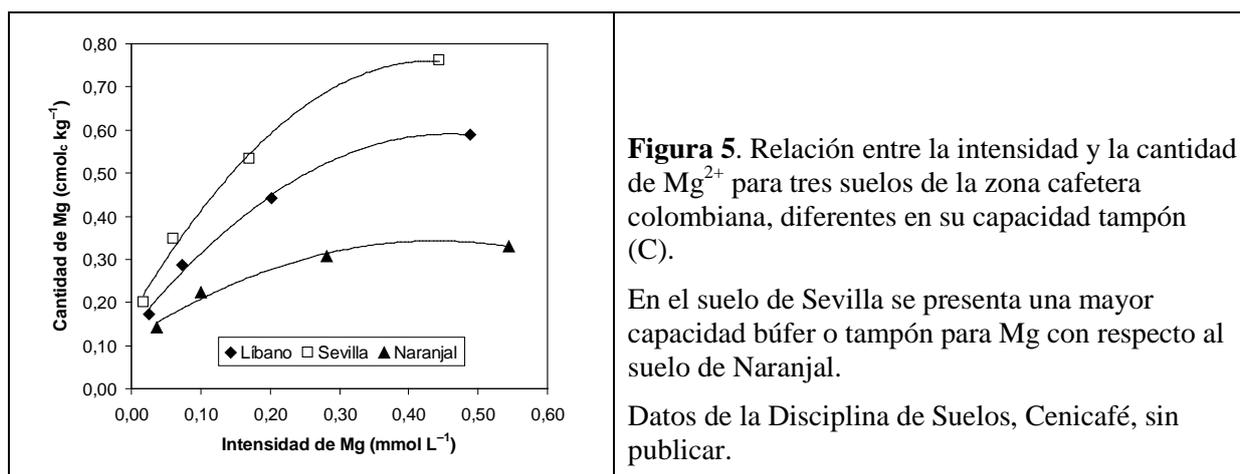


Figura 5. Relación entre la intensidad y la cantidad de Mg²⁺ para tres suelos de la zona cafetera colombiana, diferentes en su capacidad tampón (C).

En el suelo de Sevilla se presenta una mayor capacidad búfer o tampón para Mg con respecto al suelo de Naranjal.

Datos de la Disciplina de Suelos, Cenicafé, sin publicar.

En la forma operacional se mide la cantidad de nutriente recuperado del suelo por un método de extracción, que se correlaciona estrictamente con el contenido del nutriente en la planta o la producción. Durante la fase de correlación se prueban diferentes metodologías de extracción y se seleccionan aquellas que más se aproximan al método patrón, es decir, la cantidad absorbida del nutriente por las raíces de la planta (**Figura 6**). Los valores obtenidos en el análisis de suelo mediante determinado método de extracción sólo tendrán sentido cuando se correlacionan con la respuesta de los cultivos (Raij, 1991).

A veces, además de la cantidad de nutriente en el suelo se justifica incluir en el análisis de correlación, otras variables independientes como pH, materia orgánica y textura, cuando existen razones para creer que estas características influyen sobre la disponibilidad del nutriente objeto de estudio (Sims y Jonson, 1991, citado por Álvarez, 1994). Un ejemplo de lo anterior se presenta en la **Figura 7**, la cual muestra el incremento del pH y el contenido de Ca del suelo en respuesta a dosis crecientes de cal, y el subsecuente efecto de esta práctica en la concentración foliar de Ca y el crecimiento de café en la etapa de almácigo. Conforme al aumento de las dosis de cal también se incrementa el peso de las plantas, hasta alcanzar un punto (9,8 g de CaCO₃ dm⁻³) a partir del cual el efecto de esta enmienda es perjudicial. Debido a que existe una alta correlación entre las cantidades de cal aplicadas y las

variables independientes (Ca recuperado y pH), se presenta el mismo comportamiento de respuesta para el peso seco de las plantas en función de éstas, con el máximo peso registrado cuando el Ca es igual a 8,0 y el pH de 5,7. Pese al efecto conjugado de estas dos propiedades, se espera que sea mayor la participación del pH sobre el crecimiento del café con respecto al contenido de Ca.

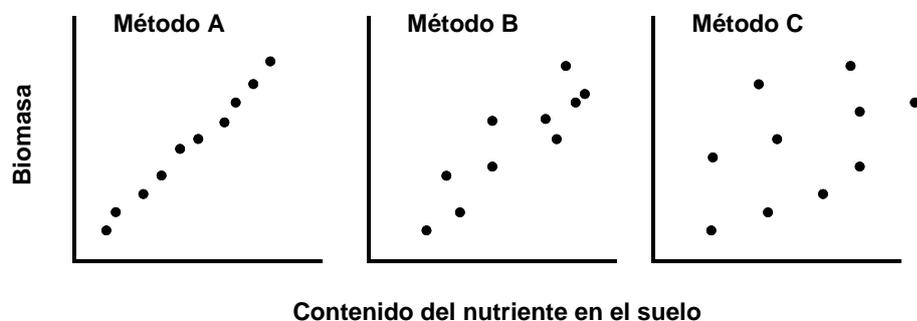


Figura 6. Correlación entre el contenido del nutriente en el suelo, determinado por tres métodos, y la biomasa.

Método A: alta correlación.

Método B: correlación media

Método C: baja correlación.

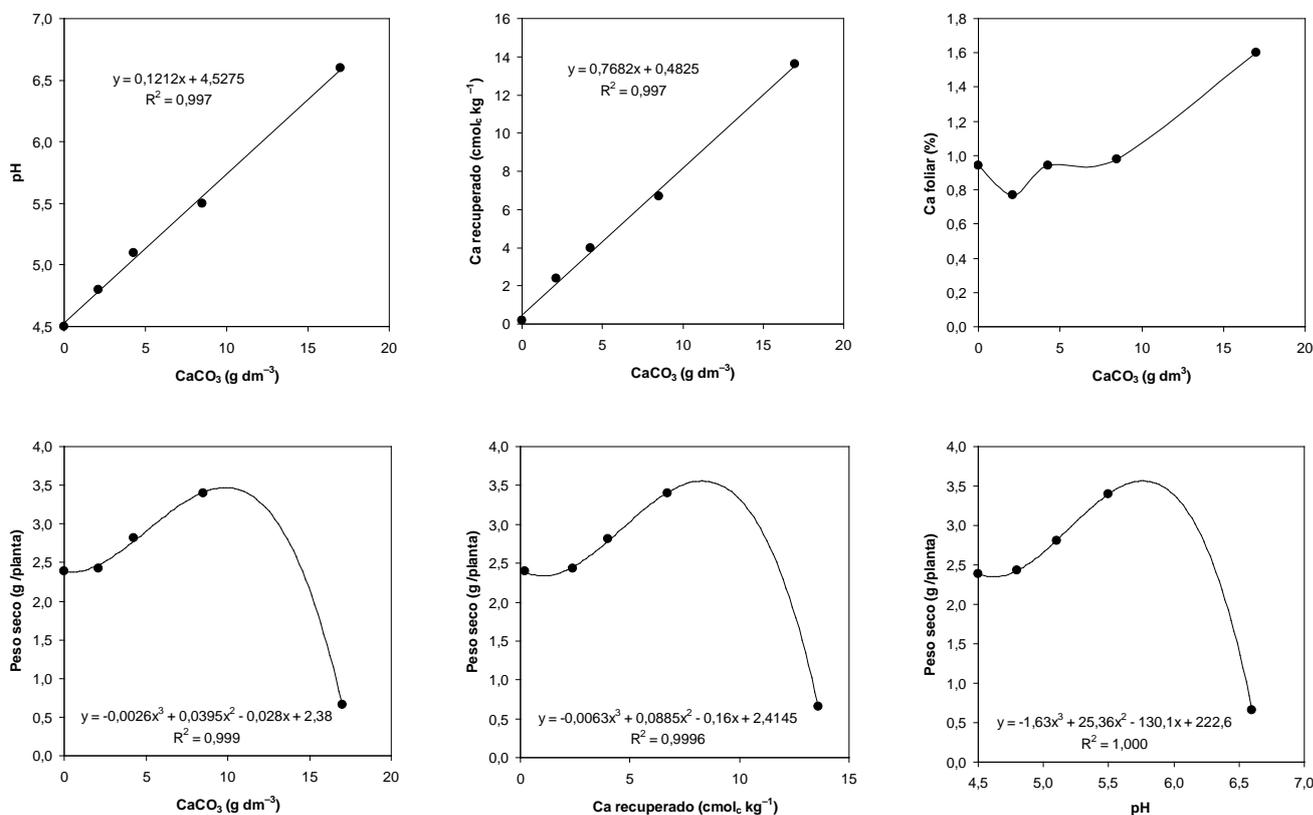


Figura 7. Variaciones del pH, Ca intercambiable y Ca foliar en respuesta al encalado, y su efecto sobre el crecimiento de café en un Tepic Dystropepts, ubicado en el municipio de Jamundí (departamento Valle del Cauca, Colombia). Datos originales tomados de Díaz (2006).

CALIBRACION

La calibración determina el significado del análisis del suelo en términos de la respuesta de la planta a un nutriente aplicado, bajo cierto nivel de fertilidad del suelo (Dahnke, 1993). Éste constituye uno de los pasos más importantes de los estudios de la nutrición mineral, pues 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).

Existen diferentes vías para calibrar los análisis de suelos; sin embargo, todos deben llegar a un punto en común: un diagrama de dispersión x–y, en el cual se exprese el rendimiento relativo (RR) del cultivo, en función de la concentración del nutriente objeto de estudio en el suelo. El siguiente paso consiste en escoger un modelo matemático que permita separar los datos en al menos dos poblaciones, una con bajo nivel del nutriente en el suelo, por debajo del cual existe una alta probabilidad de obtener respuesta a su aplicación, y otra con alto nivel de nutriente en el suelo y baja o nula probabilidad de respuesta a su suministro. La línea divisoria entre estas dos clases o categorías se conoce como el nivel crítico (NivCri). En muchos casos es posible establecer tres clases de fertilidad: “alto” (A), “medio” (M) y “bajo” (B), y en ocasiones hasta cinco; incluyendo las clases “muy bajo” (MB) y “muy alto” (MA).

Tratándose del modelo estadístico para determinar el NivCri y las clases de fertilidad, no existe un consenso entre los investigadores. Algunos prefieren utilizar aquellos modelos mediante los cuales se llega a un valor discreto; por ejemplo: rectilíneo discontinuo (Cate y Nelson, 1971), lineal plateau (Nelson y Anderson, 1977) y cuadrático plateau (SAS Institute, 2008) (**Figura 8A**). En cambio, otros prefieren los modelos curvilíneos continuos, como exponencial (principalmente Mitscherlich), inverso y cuadrático (**Figura 8B**); en este caso se selecciona un valor arbitrario del RR como NivCri (por ejemplo 90%), o el punto de la inflexión de la curva; incluso algunos emplean el óptimo económico (Álvarez, 1996).

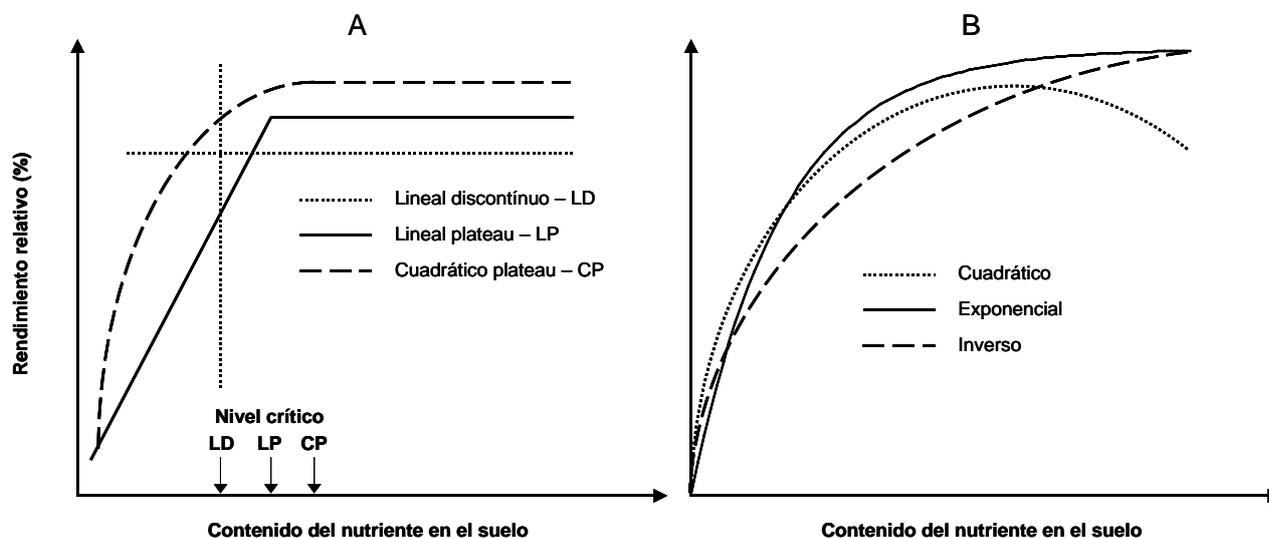


Figura 8. Modelos discontinuos (A) y continuos (B), comúnmente empleados en los trabajos de calibración de los análisis de suelos.

Cuando el comportamiento de la respuesta se ajusta a los modelos curvilíneos continuos, se podrán establecer más de dos clases de fertilidad; por ejemplo, Cantarutti et al. (2007) y Havlin et al. (1999) sugieren basarse en los siguientes valores del RR para modelos exponenciales: menor de 50% MB, entre 50% y 70% B, entre 70% y 90% M, entre 90% y 100% A, y 100% MA (**Figura 9A**). Otro procedimiento consiste en delimitar primero la clase A, cuyo límite inferior es el NivCri (por ejemplo, para RR=90%), y el límite superior dos veces este valor; las clases MB, B y M se obtienen al dividir el NivCri en tres, y la clase MA corresponde a los valores que superen a la clase A (Wendling et al., 2008) (**Figura 9B**). Raij (1991) sostiene que una ecuación de tipo $y=a+b/x$ se ajusta muy bien a la mayoría de los resultados, con la ventaja adicional que tiene en cuenta los valores de RR superiores al 100%. Este autor sugiere los siguientes rangos de fertilidad para nutrientes como P y K, los cuales se

caracterizan por su baja movilidad: menor de 70% MB, entre 70% y 90% B, y entre 90% y 100% M; el rango del contenido del elemento en el suelo comprendido entre el 100% del RR y dos veces este valor conforman la case A, y los contenidos superiores a éste la clase MA (Figura 9C).

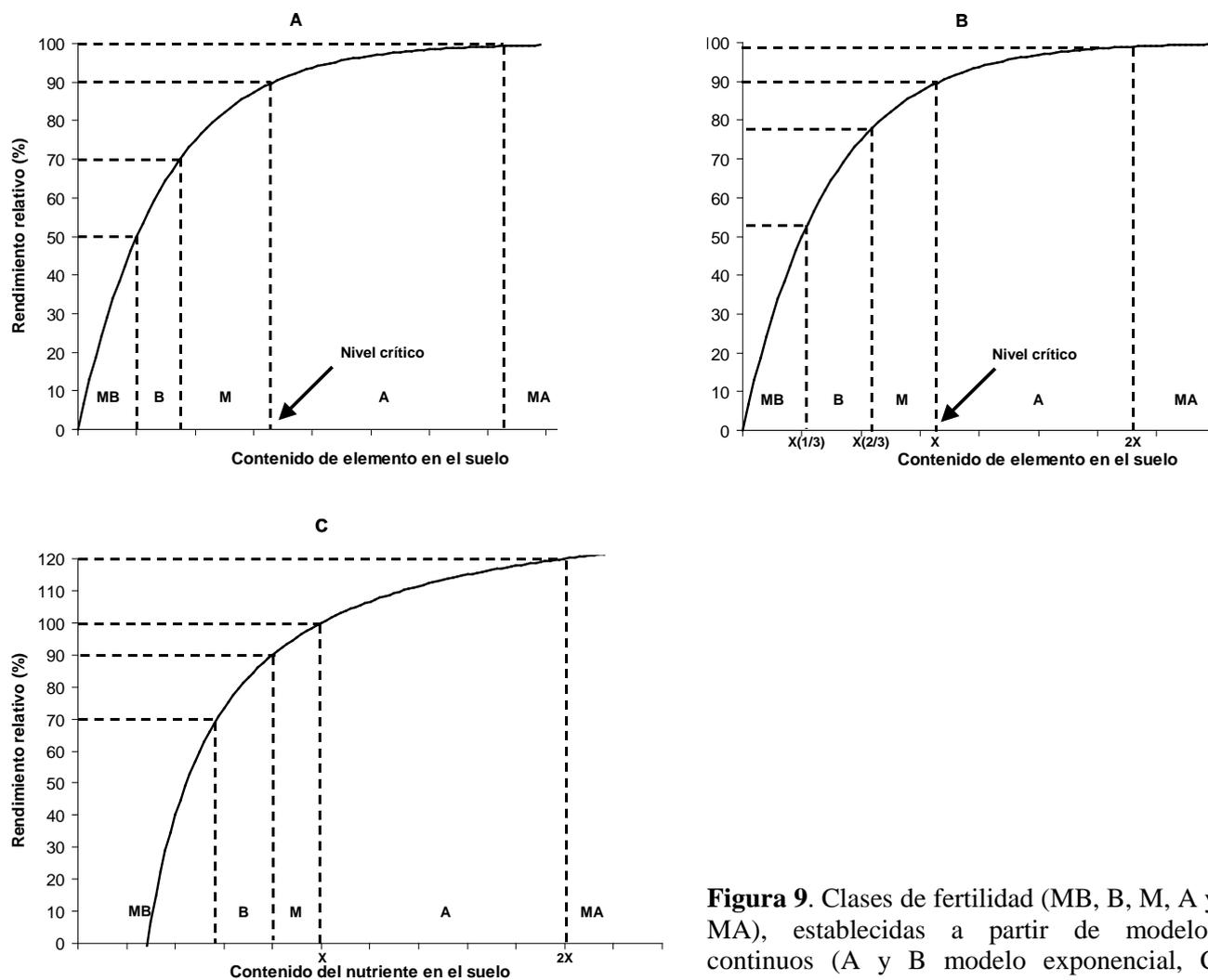


Figura 9. Clases de fertilidad (MB, B, M, A y MA), establecidas a partir de modelos continuos (A y B modelo exponencial, C modelo inverso).

Una de las rutas más convencionales para la calibración es a través de experimentos que se diseñan específicamente para tal fin; otra vía consiste en aprovechar la información que se genera en los trabajos de investigación dirigidos a determinar la respuesta del cultivo a diferentes dosis de un mismo nutriente. A continuación se dan algunos ejemplos de ellos para café.

Experimentos específicos de calibración. Esta metodología busca evaluar, mediante la técnica del elemento faltante, el efecto de uno o más nutrientes sobre la producción del cultivo en diversas localidades de una región o país (preferiblemente más de 20). Cuando se quiere calibrar un solo nutriente, en cada sitio se evalúa el efecto de dos tratamientos sobre la producción; en uno se suministran cantidades suficientes, más no excesivas, de todos los elementos que se consideran necesarios para obtener una alta producción, y en el otro tratamiento se elimina del plan de fertilización el nutriente objeto de estudio. El RR se expresa en términos porcentuales, y resulta de la relación entre la producción obtenida sin el nutriente (rendimiento con el nutriente al mínimo), y la producción registrada con todos los elementos (rendimiento máximo estable), así:

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimiento con el nutriente al mínimo}}{\text{Rendimiento máximo estable}} * 100.$$

Para construir el diagrama de dispersión se utilizan los datos pareados del RR y el contenido del nutriente en el suelo, el cual se analiza antes de iniciar el experimento, mediante un muestreo general del lote, o al finalizar el trabajo en el tratamiento sin el elemento. Para especies perennes como el café, en las cuales se recomienda evaluar la producción de dos o más años, es preferible utilizar este último procedimiento, debido a que el contenido del nutriente tiende a disminuir a través de tiempo, y por lo tanto cambia el comportamiento de la respuesta a la adición del nutriente.

Un ejemplo para este tipo de experimentos se presenta en la **Figura 10**, el cual expresa el RR de café en función de la disponibilidad de nitrógeno en términos de la materia orgánica del suelo (M.O.). El modelo cuadrático sugiere una disminución de la producción cuando el contenido de la M.O. supera el punto de inflexión de la curva (18,3%), como consecuencia de la reducción de la tasa de mineralización. Puesto que el valor más alto del RR es inferior al 90%, no será posible aplicar los criterios antes mencionados para establecer las clases de fertilidad; además, se puede esperar respuesta al suministro de N aún con niveles altos de M.O.

Otro ejemplo se presenta para el fósforo (**Figura 11**). El modelo lineal discontinuo (LD) señala un NivCri con alta probabilidad de respuesta a la fertilización fosfórica para valores inferiores a 12 mg kg⁻¹, y el modelo lineal plateau (LP) indica otro nivel – probablemente de suficiencia – por encima del cual no hay efecto del suministro de este elemento vía fertilización.

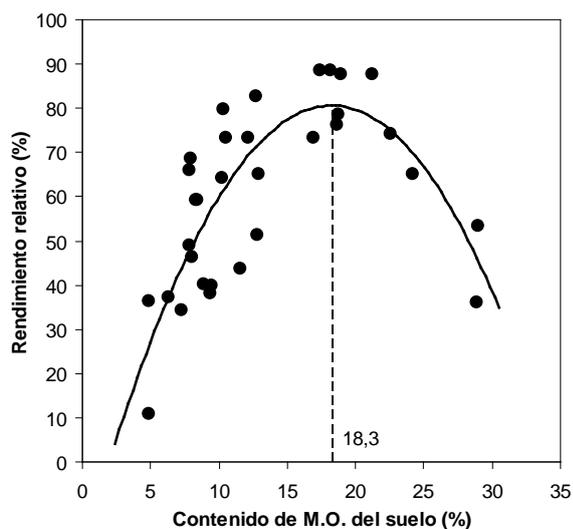


Figura 10. Relación entre el contenido de la M.O. del suelo y el rendimiento relativo de café, obtenida en el tercer año de evaluación.

Tomado de Sadeghian (2009).

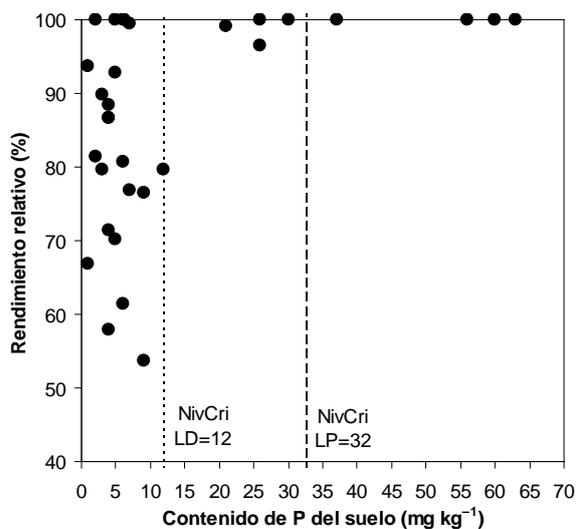


Figura 11. Relación entre el contenido de P del suelo y el rendimiento relativo de café, obtenida en el segundo año de evaluación.

LD: modelo lineal discontinuo. LP: modelo lineal plateau.

Tomado de Sadeghian (2009).

Calibración a partir de experimentos con dosis de nutriente. En este tipo de trabajos existen distintas alternativas; una consiste en usar los datos generados en un mismo experimento, establecido en varias localidades. Para ilustrar este caso se utilizará parte de la información obtenida por Uribe y Mestre (1976) en una investigación en la que se evaluó la respuesta de café a tres dosis de K (Tabla 5). A partir de los datos pareados de RR y el contenido de K en el suelo (uno sólo para cada sitio) se

construyó el diagrama de dispersión y se determinó el NivCri para los modelos de interés (Figura 12). El NivCri hallado para el modelo lineal discontinuo es el más bajo de todos y corresponde a un contenido de K en el suelo, por debajo del cual se presenta una alta respuesta a la fertilización, mientras que los modelos lineal plateau y cuadrático plateau establecen más bien un contenido de K por encima del cual hay una muy baja respuesta. Para el caso del modelo exponencial la probabilidad de hallar respuesta a la fertilización es prácticamente nula.

Tabla 5. Producción de café en respuesta a tres dosis de K, contenido de K en el suelo y rendimiento relativo (RR) en siete localidades de la zona cafetera de Colombia.

Sitio	Producción de café ^{1/} (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)			K en el suelo (cmol _c kg ⁻¹)	Ecuación ^{2/} / Significancia	Dosis óptima de K ₂ O ^{3/} (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Producción obtenida con la dosis óptima (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	RR ^{6/} (%)
	0	120	240					
Cenicafé	3.513	3.668	3.635	0,34	No significativo	–	3.605 ^{4/}	97
La Trinidad	2.819	3.072	3.297	0,60	No significativo	–	3.063 ^{4/}	92
Mesitas	1.204	2.119	2.232	0,18	y=1203,5+10,975x-0,02788x ²	197	2.284 ^{5/}	53
Naranjal	3.038	4.603	4.990	0,22	y=3037,8+17,945x-0,04088x ²	220	5.007 ^{5/}	61
Paraguaicito	4.518	4.660	4.833	0,61	No significativo	–	4.670 ^{4/}	97
Piamonte	616	969	1.107	0,17	y=615,8+3,839x-0,00747x ²	257	1.109 ^{5/}	56
El Rosario	1.807	3.753	4.047	0,14	y=1806,5+23,110x-0,05740x ²	201	4.133 ^{5/}	44

⁽¹⁾ Promedios de 4 ó 5 años.

⁽²⁾ Generada a partir de los valores promedio de la producción

⁽³⁾ Calculada a partir de la ecuación de regresión

⁽⁴⁾ Promedio de la producción de las tres dosis de potasio

⁽⁵⁾ Producción obtenida al reemplazar la dosis óptima en la ecuación

⁽⁶⁾ Se calculó así: (producción sin K/producción con la dosis óptima)*100

Datos de producción y K en el suelo tomados de Uribe y Mestre, 1976.

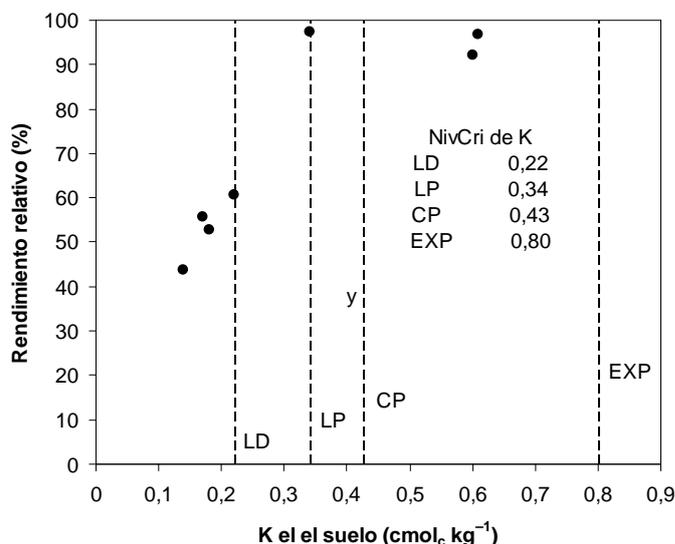


Figura 12. Rendimiento relativo de café en función del contenido de K en el suelo.

Modelo Lineal Discontinuo (LD)

Modelo Lineal Plateau (LP):
y = 8,8561 + 251x si x < 0,34

Modelo Cuadrático Plateau (CP):
y = -24,747 + 565,2x - 666,8x² si x < 0,43

Modelo Exponencial-Mitscherlich:
y = 102(1 - 10^{-4,33x}). NivCri para 99% del RR.

Adaptado de: Uribe y Mestre (1976).

Los resultados de los análisis de suelos, obtenidos en un solo sitio, también pueden calibrarse frente a la respuesta del cultivo, cuando se suministran dosis crecientes de un nutriente. A continuación se presenta el procedimiento que se emplea en esta técnica, aprovechando los resultados de una investigación realizada con K en café (Sadeghian y Álvarez, 2010). El primer paso consiste en generar la ecuación de regresión que explica las variaciones de K extraído del suelo en función de las dosis

aplicadas (**Figura 13**). En un segundo paso se genera una ecuación para explicar las variaciones en la producción de café en respuesta a las dosis (**Figura 14**), a partir de la cual se calcula la dosis de K que se debe aplicar tanto para obtener la máxima producción como para el óptimo económico. Al sustituir la dosis aplicada para alcanzar la máxima producción en la ecuación del contenido de K en función de las dosis adicionadas ($\hat{y} = 0,132 + 0,00105 * 272,7$), se halla un primer NivCri para K de $0,42 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Cuando se realiza el mismo procedimiento con la dosis óptima económica, se obtiene un segundo NivCri de $0,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Álvarez (1996), sugiere tener en cuenta este último valor de NivCri para los estudios de calibración. Para el caso de este estudio los valores obtenidos son similares, lo cual se debe a la poca diferencia entre las anteriores dosis óptimas; sin embargo, ante otro escenario de precios para café y fertilizante potásico, es posible hallar una mayor brecha entre estos niveles críticos. Por lo anterior, surge la duda si se debería modificar el NivCri a través de tiempo por las variaciones en los precios de los productos, o si más bien considerar este parámetro fijo, como lo fue concebido inicialmente.

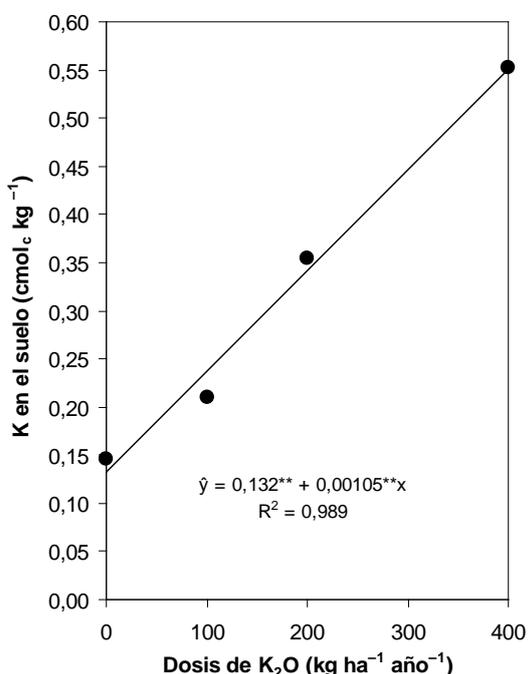


Figura 13. Contenido de K en el suelo, en respuesta a las dosis de K.

K recuperado (extraído) con acetato de amonio 1 N pH 7,0.

Tomado de Sadeghian, 2010.

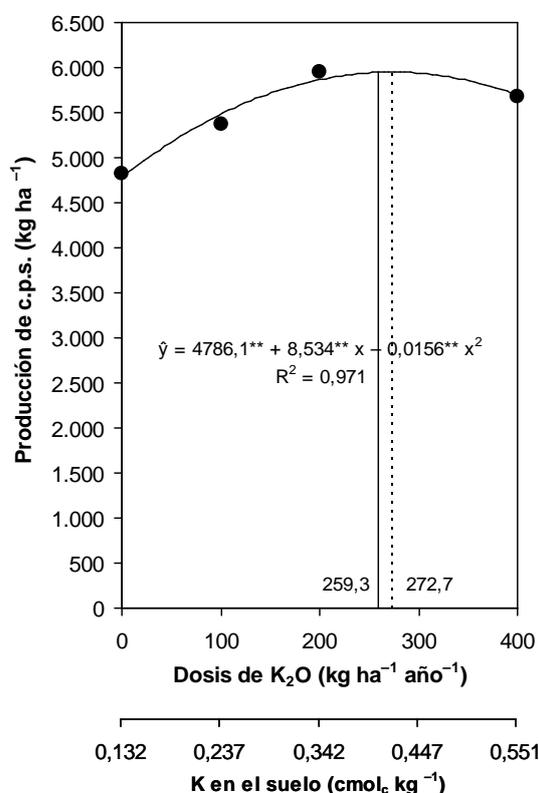


Figura 14. Producción de (c.p.s.), en respuesta a la fertilización con K.

La línea punteada señala el óptimo biológico y la línea sólida el óptimo económico.

En un siguiente paso se calcula el RR para cada dosis de K, a partir de la ecuación de producción en función de la cantidad aplicada, mediante la siguiente fórmula:

$$RR (\%) = \frac{\text{Producción con dosis Xi}}{\text{Producción máxima}} * 100.$$

Dentro de un diagrama de dispersión se expresa el RR de cada dosis en función del respectivo contenido de K en el suelo (datos obtenidos a partir de la ecuación de regresión), con el fin de generar un modelo, a partir del cual se establecen las clases de fertilidad y los respectivos rangos (**Figura 15**).

Por último, se calculan las dosis recomendadas a partir del tenor de K disponible en el suelo y la pendiente (tasa) de la recta de recuperación del K por el método de análisis (K recuperado/K₂O adicionado), así:

$$\text{Dosis recomendada} = \frac{\text{Nivel crítico de K} - \text{K disponible}}{\text{Tasa de recuperación de K}}$$

Con la anterior información se puede generar una ecuación para expresar de forma continua la dosis de K en función de su contenido en el suelo (**Figura 16**).

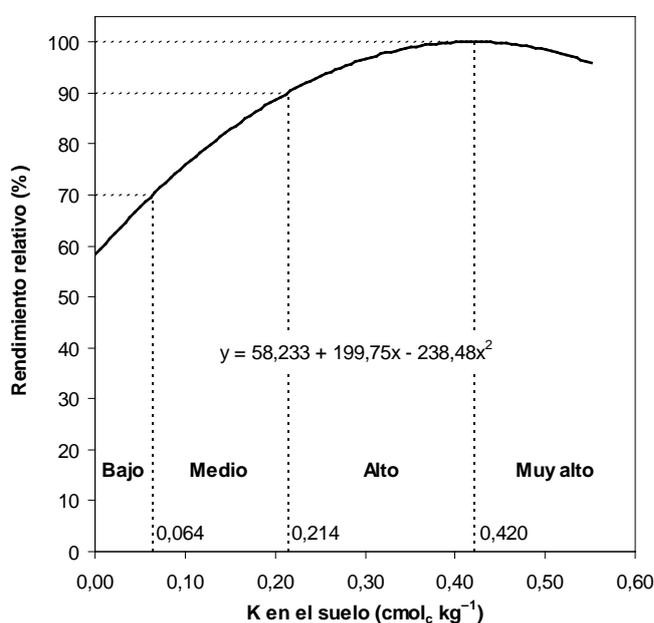


Figura 15. Rendimiento relativo en función del contenido de K en el suelo.

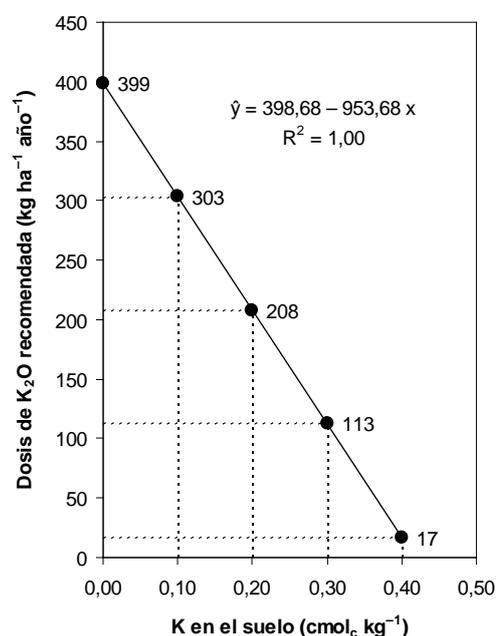


Figura 16. Dosis recomendadas de K (K₂O) en función del contenido de K en el suelo.

SUELO COMO RESERVA DE NUTRIENTES

La **Figura 17** ilustra la respuesta del café a dosis crecientes de nitrógeno (N) en dos localidades de Colombia, disímiles en su porcentaje de M.O.: Paraguaicito con 5% y Líbano con 19%. Cuando en Paraguaicito no se aplica N (dosis cero) sólo se logra el 64% de la máxima producción (3.790 kg ha⁻¹ año⁻¹ de café pergamino seco), mientras que en Líbano se alcanza el 82% de producción más alta (3.873 kg ha⁻¹ año⁻¹ de café pergamino seco). Esta diferencia radica en el aporte del nutriente que proviene del suelo en cada sitio, y se puede estimar de una manera tentativa con la proyección de las curvas hasta el intercepto en el eje x; en este sentido, en Paraguaicito hay un aporte de N equivalente a 200 kg ha⁻¹ año⁻¹ por parte del suelo, frente a 500 kg ha⁻¹ año⁻¹ en Líbano.

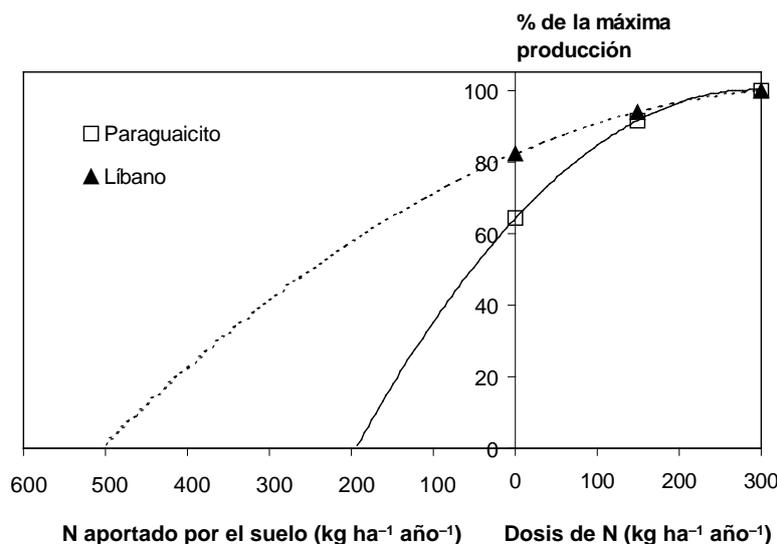


Figura 17. Porcentaje de la máxima producción de café en respuesta a la fertilización con nitrógeno (N) en dos subestaciones experimentales de Cenicafé.

Datos de la Disciplina de Suelos, Cenicafé, sin publicar.

En la **Figura 18** se presenta otro ejemplo para ilustrar el aporte de nutrientes por parte del suelo; basados en los datos expuestos en la **Figura 14**. En el tratamiento testigo – sin fertilización potásica – la producción de café pergamino seco fue de 4.786 kg ha⁻¹ año⁻¹, la cual se obtuvo con los aportes del K nativo del suelo, cantidad que de acuerdo a la ecuación de regresión equivale a 344 kg de K₂O ha⁻¹ año⁻¹. Ahora bien, si se expresa la producción en términos del contenido de K, se puede tener un estimativo del efecto de la fertilidad del suelo sobre la producción (**Figura 14**). Otra forma de presentar la anterior información sería a través del incremento porcentual de la producción en respuesta al contenido de K en el suelo (Figura 19). Para este caso, con la dosis óptima (272,7 kg de K₂O ha⁻¹ año⁻¹) se logra incrementar la concentración de K en el suelo a 0,42 cmol_c kg⁻¹ y la producción en 18%.

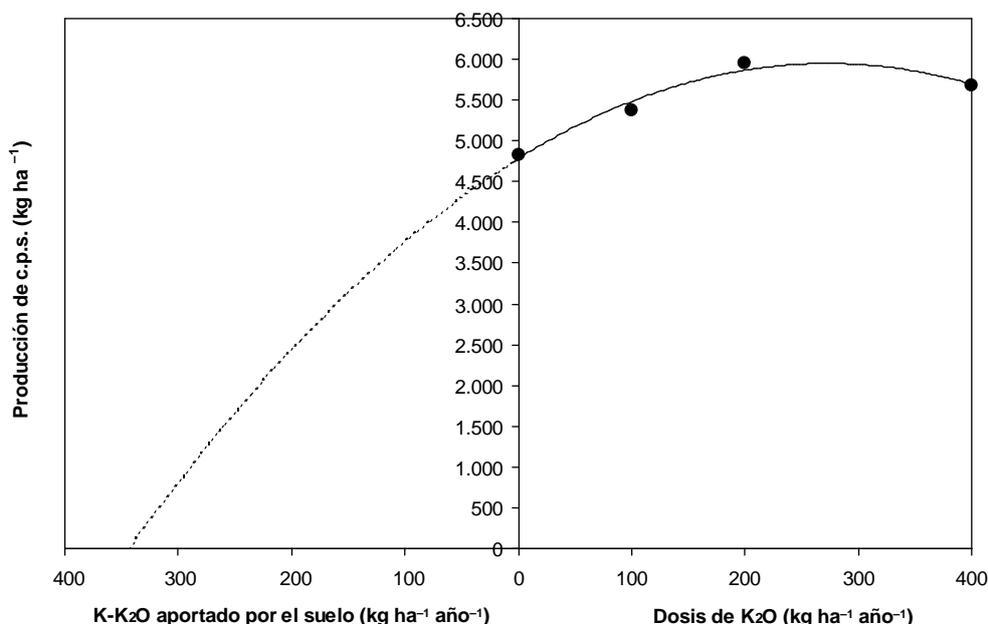


Figura 18. Respuesta de café a dosis crecientes de potasio y el aporte de potasio por parte del suelo en un andisol de Colombia.

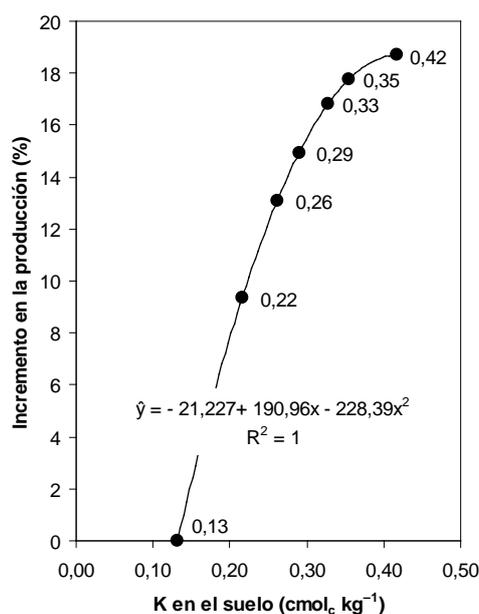


Figura 19. Incremento porcentual de la producción de café en función del contenido de K en el suelo.

IMPLICACIONES ECONOMICAS DE LA FERTILIDAD DEL SUELO

Cuando los resultados de un análisis indiquen que el suelo es fértil, se podrá prescindir parcial o totalmente del uso de los fertilizantes, con lo cual se reducirán los costos de producción. En el caso de que este análisis revele una baja fertilidad del suelo o identifique factores que limitan la disponibilidad de nutrientes, será necesario tomar las medidas necesarias para remediar dicha condición mediante la aplicación de fertilizantes y enmiendas, buscando mejorar o sostener la productividad. En ambos casos, el análisis de suelos contribuirá a tomar decisiones más acertadas y será considerada una inversión económicamente beneficiosa.

Si las cantidades de los elementos que se aplican son superiores a los requerimientos definidos mediante el análisis de suelos, se incurre en costos adicionales que no son compensados en la producción y que pueden generar contaminación del medio ambiente (principalmente suelo y agua). Si se aplica una dosis menor a la requerida (subdosis), el rendimiento se verá afectado negativamente, disminuyendo los ingresos.

Actualmente, el análisis básico de suelos (pH, materia orgánica, P, K, Ca, Mg y Al) para la recomendación de fertilizantes y enmiendas en café en países como Colombia, tiene un costo por muestra de 25 dólares, que es válida por un período de dos años, lo cual significa que el costo anual del análisis será de 12,5 dólares. Sin embargo, el área de un lote cafetero es variable, desde lotes menores de 1 ha hasta lotes mayores de 10 ha. En este sentido, el costo del análisis por hectárea y por año estará relacionado con el área del lote. Tal como se observa en la **Figura 20** el costo real de un análisis de suelos, tiende a hacerse menor a medida que el área en café del lote aumenta. Así, mientras para un lote de 0,5 ha el costo es de 25 dólares por año, para otro lote de 5 ha, dicho costo será de \$2,5 dólares y para un lote de 10 ha equivaldría a 1,25 dólares. Estas cifras muestran que en realidad el costo de conocer la fertilidad del suelo, como base para la toma de decisiones en el manejo de cafetales, es realmente bajo en comparación con los beneficios que de él se pueden obtener (Adaptado de Sadeghian y Duque, 2003).

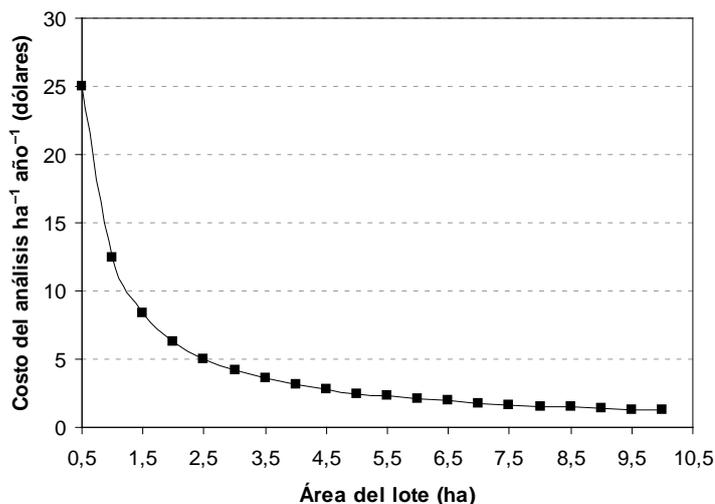


Figura 20. Costo del análisis de suelos en función del área en café del lote.

Adaptado de Sadeghian y Duque (2003).

De acuerdo con el costo del análisis, y según el área en café del lote, pueden estimarse una serie de relaciones Beneficio/Costo, como se describen en la **Figura 21** para el fósforo. Se deduce que la relación Beneficio/Costo para suelos con contenidos de fósforo superiores a 10 mg/kg es siempre mayor que la unidad, lo que indica la viabilidad de llevar a cabo el análisis de suelos. En la medida que aumenta el contenido de este elemento, la relación será aún más alta, pues para el mismo costo del análisis se obtendrán ahorros de mayor valor.

Cuando el suelo es deficiente en un nutriente, como ocurre para el caso de K en la **Figura 14**, con la aplicación de la primera dosis se logra incrementar la producción de manera significativa. Mediante la siguiente dosis también se logra incrementar la producción, pero no en igual proporción a la primera. Consecutivamente, la respuesta al incremento del nutriente va disminuyendo hasta un punto en el cual el último valor del incremento en el rendimiento apenas iguala el costo del fertilizante (**Figura 22**).

Con base en la función de la producción de la **Figura 14** se calcularon las dosis óptimas económicas para diferentes precios de café y K (**Figura 23**). Como se puede observar, los cambios en los precios poco afectan las dosis óptimas, encontrándose sólo una diferencia de 27 kg $ha^{-1} año^{-1}$ entre los valores más extremos (264 kg de K_2O vs. 237 kg de K_2O); es decir, cuando el precio de la venta del café al productor es el más alto (3,5 dólares/kg) y el costo del fertilizante potásico es el más bajo (1,0 dólares/kg), frente el precio más bajo de café (1,5 dólares/kg) y el costo más alto del fertilizante (1,7 dólares/kg). Según Duque y Mestre (1999), el anterior comportamiento se debe a que la relación entre el precio del fertilizante y el del café es muy pequeña. El anterior ejercicio permite concluir que para nutrientes como el potasio, cuya demanda por el cultivo de café es alta, será beneficiosa económicamente la fertilización, aun con precios bajos de café y altos del insumo.

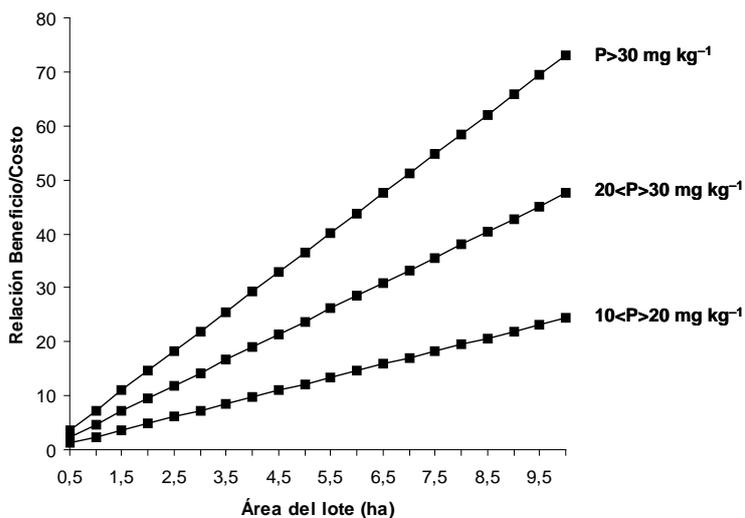


Figura 21. Relación Beneficio/Costo del análisis de suelos para lotes con diferentes áreas en café y tres rangos del contenido de fósforo (P).

Adaptado de Sadeghian y Duque (2003).

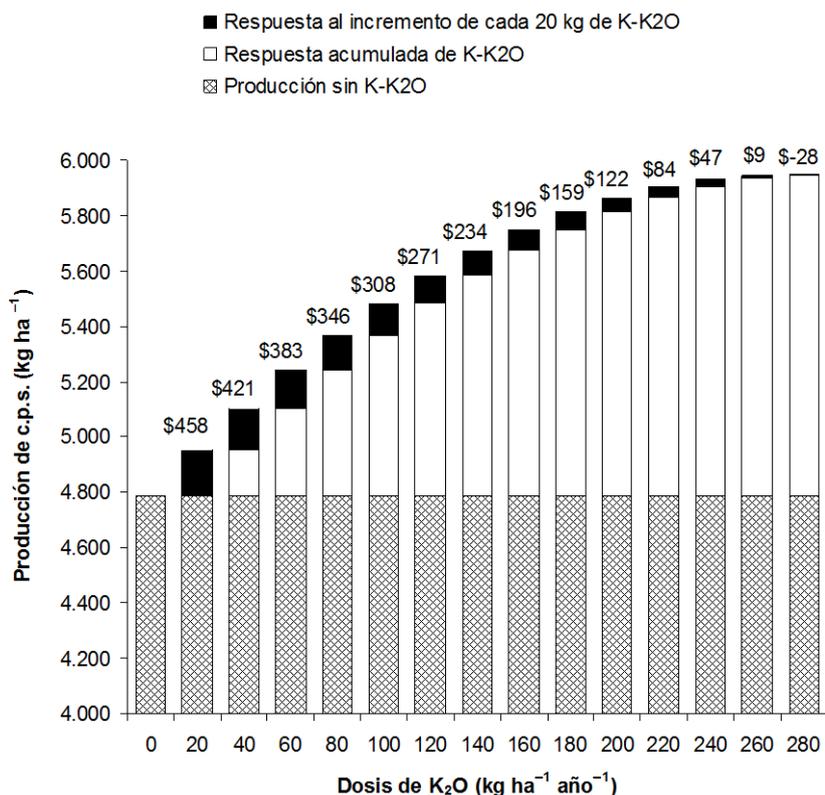


Figura 22. Reducción del retorno económico en respuesta a las dosis crecientes del fertilizante potásico.

Los valores sobre las barras indican la ganancia neta en dólares.

Supuestos:

precio de café pergamino seco = 2,8 dólares/kg

precio K₂O = 1,2 dólares/kg

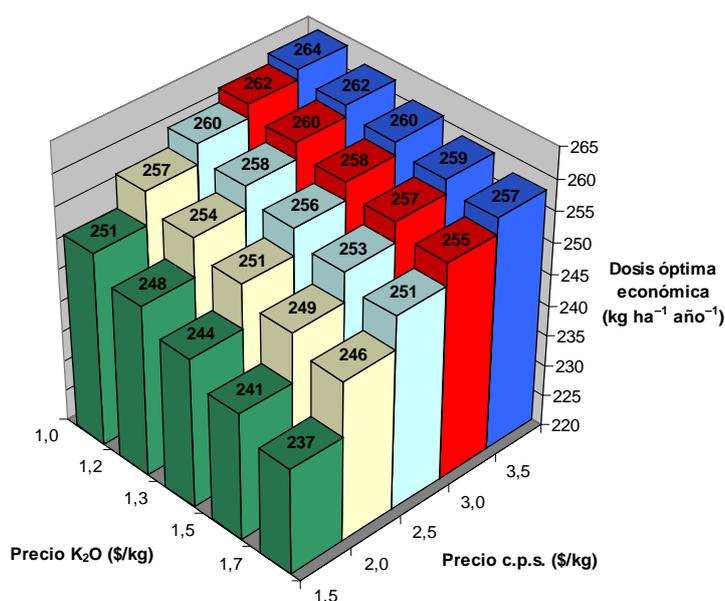


Figura 23. Dosis óptimas económicas para diferentes precios de café y potasio (K₂O).

Dosis calculadas a partir de la función de producción de la Figura 14.

BIBLIOGRAFIA

- Álvarez V., V.H. 1994. Avaliação da fertilidade do solo. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior – ABEAS – Brasília/DF. Curso de fertilidade e manejo do solo – Módulo 11.
- Álvarez V., V.H. 1996. Correlação e Calibração de métodos de análise de solos. In: Álvarez V., V. H.; Fontes, L.E.F.; Fontes, M. P. F. (ed.) O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG: SBCS. p. 615 – 646.
- Arias S., E. 2008. Efecto de la textura del suelo sobre las pérdidas por lixiviación de nitrógeno, fósforo y potasio, aplicados en la fertilización. Manizales (Colombia), Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 96 p. (Tesis Ingeniero Agrónomo).
- Bravo G., E.; Gómez A., A. 1974. Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé, Chinchiná, Colombia. 25(1):19–29.
- Cardona C., D.A.; Sadeghian K., S. 2005. Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrero de /Inga/ spp. Cenicafé (Colombia) 56(2):127–141.
- Cantarutti, R.B.; De Barros, N. F.; Prieto, H.E.; Novais, R.F. 2007. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: Fertilidade do solo. SBCS, Viçosa. Novais, R.F.; Álvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.Lf.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (ed.). p. 769–850.
- Cate, R.B.; Nelson, L. A. 1971. Simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into tow classes. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 35, 658–660.
- Centro Nacional De Investigaciones De Café – Cenicafé. Chinchina. Colombia. 1982. Cuarenta años de investigación en Cenicafé. Vol. 1. Suelos. Chinchiná (Colombia), Cenicafé.
- Dahnke, W.C. 1993. Soil test interpretation. Commun. Soil Sci. Plant anal., 24 (1 y 2): 11 – 27.
- Dias, L.E.; Álvarez V., V.H. 1996. Introdução à fertilidade do solo. Associação Brasileira de

Educação Agrícola Superior – ABEAS/DF. Curso de fertilidade e manejo do solo – Módulo 2.

- Díaz M., C. 2006. Efecto del enclamiento sobre el crecimiento de las plantas de café en la etapa de almácigo. Manizales, Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Tesis: Ingeniera Agrónoma.
- Duque O., H.; Mestre M., A. 1999. Óptimos económicos en la respuesta del café a la fertilización. Avances Técnicos Cenicafé. No. 270:1–4.
- Evans, C.E. 1987. Soil test calibration. In: BROWN, J.R. (ed.). Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation. Madison, Soil Science Society of America. p. 23–30.
- Foth, H.D.; Ellis, B.G. 1997. Soil fertility. 2. ed. Boca Raton, Lewis Publishers.
- Gómez G., L.; Caballero R., A.; Baldión R., J.V. 1991. Ecotopos cafeteros de Colombia. Bogotá, FNC. 131p.
- Havlin, J.L.; Beaton, J.D.; Tisdale, S.L.; Nelson, W.L. 1999. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6. ed. Upper Saddle River, Prentice Hall.
- Leal V., L.A.; Salamanca J., A.; Sadeghian K., S. 2007. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. Cenicafé (Colombia) 58(3):216–226.
- Lopes, A.S.; Guilherme, L.R.G. 2007. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: Fertilidade do solo. SBCS, Viçosa. Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.Lf.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (ed.). p. 1–64.
- López A., M. 1960. Valoración de las formas de fósforo, orgánica e inorgánica, de un suelo de la zona cafetera de Colombia. Cenicafé (Colombia) 11(7):189–204.
- Malavolta, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo. Editora Agronômica Ceres Ltda.
- Nelson, L.A.; Anderson, R.L. 1977. Partitioning of soil test–crop response probability. p. 19–38. In: Peck et al. (ed.) Soil testing: Correlation and interpreting the analytical results. ASA Spec. Publ. 29. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Ochoa M., W.A. 2001. Variabilidad espacial del Nitrógeno disponible en dos andisoles de la zona cafetera. Palmira (Colombia), Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 90 p. Tesis: Ingeniero Agrónomo.
- Raij, B. van. 1991. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato.
- Sadeghian K., S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. Boletín Técnico No. 32. Chinchiná : CENICAFE. 43 p.
- Sadeghian K., S. 2009. Calibración de análisis de suelo para N P K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. Cenicafé 60(1):7–24.
- Sadeghian K., S.; Álvarez V., V. H. 2010. Calibración de análisis de suelos para potasio en café a partir de resultados obtenidos en una localidad. In: Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 15. Pereira, Colombia, Octubre 27-29, 2010. Memorias. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Sadeghian K., S.; Mejía M., B.; Arcila P., J. 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.
- Sadeghian K., S.; Mejía M., B.; Arcila P., J. 2007. Composición elemental de los frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 364:1–8.
- Sadeghian K., S.; Duque O., H. 2003. Análisis de suelos: importancia e implicaciones económicas en el cultivo del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, Chinchiná, Colombia, No. 308:1-8.
- Salamanca J., A.; Sadeghian K., S. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56(4):381–397.
- SAS Institute. 2008. The SAS system for windows. Version 9.2 TS2M0. SAS Institute, Cary, NC.
- Sims, J.T. 1999. Soil fertility evaluation. In: SUMMER, M.E. (ed.). *Handbook of soil science*. New York, CRC Press. p.D113–D153.
- Soil Improvement Committee California Plant Health Association – SICCPHA. 2004. *Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento*. México, Noriega Editores.
- Suárez de C., F.; Rodríguez G., A. 1962. *Investigaciones sobre la erosión y conservación de suelos en Colombia*. FNC, Chinchiná, Colombia.
- Uribe H., A.; Mestre M., A. 1976. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el Potasio sobre la producción de café. *Cenicafé* 27(4):158–173.
- Waugh, D.L., Cate, R. B. and Nelson, L. A. 1973. Discontinuous models for rapid correlation, interpretation, and utilisation of soil analysis and fertilizer response date. *International soil fertility evaluation and improvement program*. North Carolina State University. Raleigh, N.C. Technical Bulletin No. 7.
- Wendling, A., Flávio Luiz Foletto Eles, F.L., Cubilla M.M., Amado, T.J, Mielniczuk, J. 2008. *Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai*. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1929-1939.