

Dosis óptimas de nutrientes para cafetales en producción. Consideraciones económicas

La fertilización, al igual que las demás prácticas agrícolas, debe justificarse desde el punto de vista económico. El suministro de nutrientes en cantidades más bajas a las requeridas afecta de manera negativa la productividad de los cultivos y reduce la rentabilidad de los sistemas productivos; a su vez, la aplicación de dosis mayores a las recomendadas genera consecuencias similares, además de ocasionar contaminación.

Cuando la disponibilidad de un nutriente en el suelo es alta, la producción no se afecta si éste se excluye de los planes de fertilización; caso contrario ocurre cuando el nivel del elemento en el suelo es bajo. La respuesta de los cultivos a la fertilización en escenarios de baja disponibilidad de los nutrientes puede explicarse por la **“Ley de los rendimientos decrecientes”**, la cual indica que los aumentos en la producción, como consecuencia del suministro de un elemento deficiente en el suelo, se hacen cada vez menores a medida que se incrementan las cantidades suministradas; así, las primeras dosis producen un mayor efecto en el rendimiento que las posteriores (Figura 1). Adicionalmente, el exceso de un nutriente o fertilizante puede conducir a la disminución de la producción; efecto que se explica mediante la **“Ley del máximo”**.





Cenicafé
Ciencia, tecnología
e innovación
para la caficultura
colombiana

Autores

Siavosh Sadeghian Khalajabadi

Investigador Científico III
<https://orcid.org/0000-0003-1266-0885>
Disciplina de Suelos, Cenicafé

Hernando Duque Orrego

Gerente Técnico -FNC
<https://orcid.org/0000-0001-5284-3577>

Centro Nacional de Investigaciones
de Café - Cenicafé
Manizales, Caldas, Colombia
DOI (Digital Object Identifier)
<https://doi.org/10.38141/10779/0533>

Edición

Sandra Milena Marín López

Fotografías

Archivo Cenicafé

Diagramación

Carmenza Bacca Ramírez

Imprenta

ISSN-0120-0178

ISSN-2145-3691 (En línea)

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

Manizales, Caldas, Colombia
Tel. 606 + 8500707
A.A. 2427 Manizales
www.cenicafe.org

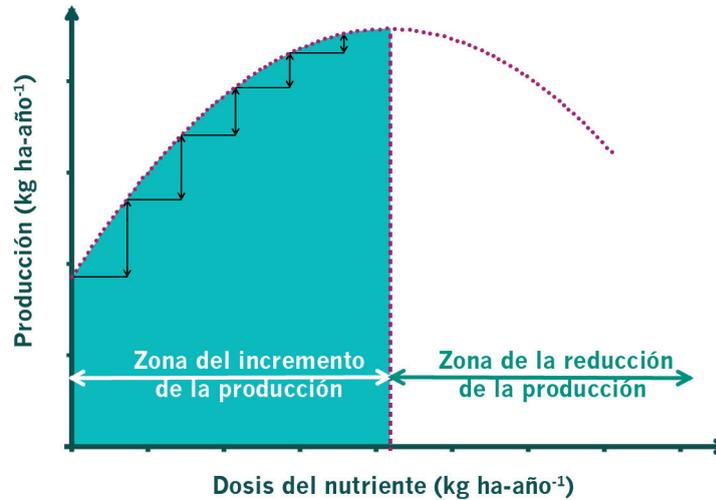


Figura 1.
Representación de la ley de los rendimientos decrecientes y la Ley del máximo.

Óptimos biológicos y económicos

El **óptimo biológico** se refiere a la dosis del nutriente con la cual se obtiene la máxima producción agronómica y el **óptimo económico** hace referencia a la dosis del nutriente con la cual se obtiene el máximo ingreso neto por hectárea (Havlin et al., 2014), tal como se aprecia en la Figura 2.

El óptimo biológico se determina a través de la investigación para una especie o variedad bajo condiciones particulares de suelo, clima y manejo, y corresponde a un valor fijo, mientras que el óptimo económico es variable, pues depende de los precios de los

fertilizantes y del producto agrícola comercializado, en nuestro caso el café pergamino seco (c.p.s.).

Para estimar el óptimo biológico se toma la función de respuesta del cultivo al nutriente específico, se calcula la primera derivada de esa función y se iguala a cero, para encontrar dicho óptimo. Por ejemplo, para nitrógeno (N), se presenta en la Expresión <1>:

$$\frac{\partial y}{\partial N} = 0 \quad <1>$$

Posteriormente, se resuelve la ecuación resultante y se obtiene la dosis de nitrógeno, para el óptimo biológico.

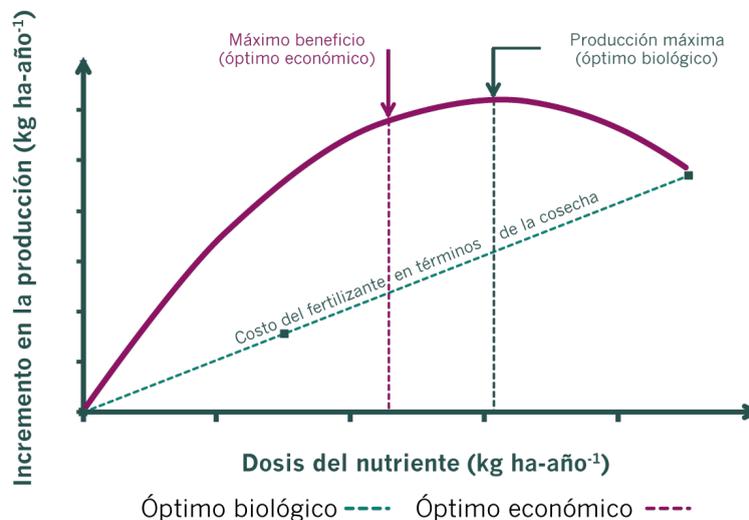


Figura 2.
Representación gráfica de las dosis requeridas del nutriente para obtener el óptimo biológico y económico.

Para una función matemática, en la que se expresa la producción del cultivo en función de dosis de un nutriente, la derivada señala el cambio en la producción con la aplicación de una dosis en particular. Cuando se deriva la función y se iguala a cero, se busca hallar la dosis del nutriente con la cual se obtiene la máxima producción. En este punto, la pendiente de la función es igual a cero y, por lo tanto, la aplicación de dosis mayores afectará negativamente el rendimiento.

Para estimar el óptimo económico, también se parte de la función de respuesta al nutriente, se calcula la primera derivada y se iguala a la razón entre el precio unitario del nutriente (kilogramo de nitrógeno, por ejemplo) y el valor de venta unitario del producto (en nuestro caso, kilogramos de c.p.s.). Para el N, en el cultivo de café, se presenta en la Expresión <2>:

$$\frac{\partial y}{\partial N} = \frac{P_n}{P_y} \quad <2>$$

Donde, P_n es el costo de 1,0 kg de N y P_y el valor de venta de 1,0 kg de c.p.s.. Entonces, se resuelve la ecuación resultante y se encuentra la dosis de N, para el óptimo económico.

Para el cultivo de café se ha demostrado que, generalmente existe poca diferencia entre el óptimo biológico y el óptimo económico, debido a que la relación entre el precio unitario del nutriente y el valor unitario de café es muy pequeña, y relativamente cercana a cero (Duque & Mestre, 2001); situación que normalmente no se observa en la agricultura, para otros cultivos.

A medida que se reduce el precio del fertilizante o se incrementa el precio del café, se justifica aplicar más fertilizante, sin que la cantidad supere la estimada para el óptimo biológico.

Cuando las recomendaciones de la fertilización se basan en los resultados de investigación, se minimizan los riesgos económicos y ambientales; de allí la importancia de conocer la información científica que se ha generado al respecto. Este Avance Técnico tiene como objetivo presentar algunas consideraciones

técnicas y económicas que soportan las recomendaciones de las dosis de nutrientes en café para condiciones de Colombia.

Óptimos biológicos y económicos para café

A continuación, se presentan los resultados de algunas investigaciones relacionadas con la respuesta del cultivo de café a la aplicación de nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg) y azufre (S), en plantaciones con altas densidades de siembra (entre 7.500 y 10.000 plantas/ha) y poca sombra (menor de 30%). Las dosis para alcanzar los óptimos biológicos y económicos corresponden, en su mayoría, a las máximas encontradas y, por lo tanto, pueden tomarse como referente cuando la fertilidad del suelo es baja o, en su defecto, cuando no se cuenta con los resultados de análisis de suelos.

Nitrógeno. Se considera el nutriente que más limita la producción de café en Colombia (Sadeghian, S., 2009). En cafetales tecnificados se ha encontrado respuesta a la aplicación de dosis cercanas a 300 kg ha-año⁻¹ de N, como se muestra en la Figura 3 para un experimento realizado en la Estación Experimental El Rosario (municipio de Venecia, Antioquia). En esta investigación se encontró la siguiente función de respuesta al suministro de N (Expresión <3>):

$$\hat{y} = 4.866,7 + 12,49 N - 0,0207 N^2 \quad <3>$$

Para hallar el **óptimo biológico** se deriva esta función cuadrática y se iguala a cero, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$12,49 - 2 \times 0,0207 N = 0$$

Se despeja la dosis de N (kg ha-año⁻¹) en la ecuación:

$$\frac{12,49}{2 \times 0,0207} = N$$

Se realiza la operación y se halla la dosis óptima biológica de N: 301,7 kg ha-año⁻¹

Para hallar el **óptimo económico**, se deriva la función y se iguala a la relación P_n/P_y . En este caso se tuvieron en cuenta los precios a diciembre del año 2020 (1,0 kg de N=\$3.135 y 1,0 kg de c.p.s.=\$8.400):

$$\frac{12,49}{2 \times 0,0207} = \frac{3.135}{8.400}$$

$$\frac{12,49}{2 \times 0,0207} = 0,373$$

Se despeja la dosis de N (kg ha-año⁻¹) en la ecuación:

$$\frac{12,49 - 0,373}{2 \times 0,0207} = N$$

Se realiza la operación y se halla la dosis óptima económica de N: 292,7 kg ha-año⁻¹

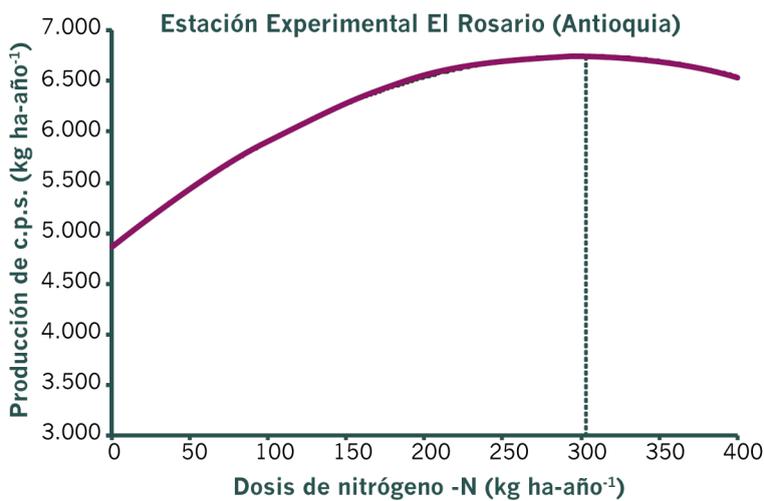


Figura 3. Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta al suministro de nitrógeno (N). La línea punteada señala el óptimo biológico (302 kg ha-año⁻¹ de N).

Debido a que las diferencias entre las dosis para los dos óptimos y las productividades correspondientes son bajas, estas se consideran prácticamente iguales. De otro lado, el óptimo económico también puede determinarse a través del análisis marginal (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 1988). El propósito de este análisis es revelar hasta qué momento los beneficios netos son positivos (Lopera et al., 1991). En este análisis se expresa la tasa de retorno marginal (TRM) en función de las dosis del nutriente; al respecto, el óptimo económico se alcanza cuando la TRM llegue a cero, como se muestra en la Figura 4 para la respuesta de café al suministro de N en la Estación Experimental El Rosario. Los valores negativos de TRM observados a partir de la dosis del óptimo económico, indican que cantidades adicionales de N no generan rentabilidades marginales y, por lo tanto, no son económicamente recomendables.

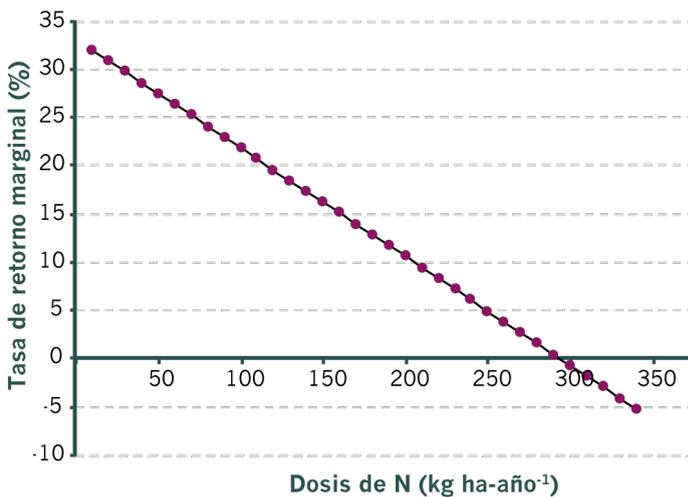


Figura 4. Tasa de retorno marginal (TRM) para café en función de dosis de nitrógeno (N) en la Estación Experimental El Rosario. En el punto de cruce entre la TRM y las dosis de N, se alcanza el óptimo económico (292,7 kg ha-año⁻¹ de N).

En la Tabla 1 se presenta el procedimiento para calcular la TRM para nitrógeno.

Tabla 1. Parámetros para calcular la TRM para el nitrógeno.

Dosis de N (kg ha-año ⁻¹)	Producción (kg ha-año ⁻¹) [*]	Ingreso neto (\$ ha-año ⁻¹)	Ingreso marginal (\$ ha-año ⁻¹)	Costo marginal (\$/10 kg N)	TRM (%)
0	4.867	40.880.700	0	0	
10	4.990	41.912.220	1.000.172**	31.348	31,9
20	5.108	42.908.460	964.892***	31.348	30,8
30	5.223	43.869.420	929.612	31.348	29,7
40	5.333	44.795.100	894.332	31.348	28,5
50	5.439	45.685.500	859.052	31.348	27,4
...					
300	6724	56.479.500	-22.948	31.348	-0,7

* Calculada con base en la función, ** (41.912.220 – 40.880.700), *** (42.908.460 – 41.912.220)

Potasio. Con base en la frecuencia y la magnitud de la respuesta al suministro de nutrientes, el K ocupa el segundo lugar después de N (Sadeghian, S., 2009). En cafetales con densidades altas y a libre exposición solar, la dosis requerida de este nutriente (expresada como K₂O) para conseguir el óptimo biológico de un ciclo productivo puede variar entre 260 y 270 kg ha-año⁻¹ (Duque & Mestre, 2001; Sadeghian & Álvarez, 2011), como se muestra en la Figura 5 para una finca en el departamento de Quindío.

Para este caso, se encontró la siguiente función (Expresión <4>):

$$\hat{y} = 4.786,1 + 8,5335 K_2O - 0,0156 K_2O^2 \quad <4>$$

Se realiza el procedimiento descrito anteriormente para hallar el **óptimo biológico**:

$$8,5335 - 2 \times 0,0156 K_2O = 0$$

$$\frac{8,5335}{2 \times 0,0156} = K_2O$$

La dosis óptima biológica de K₂O = 273,5 kg ha-año⁻¹

Para hallar el **óptimo económico**, asumiendo un precio de \$2.355 para un kg de K₂O:

$$\frac{8,5335}{2 \times 0,0156} = \frac{2.355}{8.400}$$

$$\frac{8,5335}{2 \times 0,0156} = 0,280$$

$$\frac{8,5335 - 0,280}{2 \times 0,0156} = K_2O$$

La dosis óptima económica de K₂O = 264,5 kg ha-año⁻¹

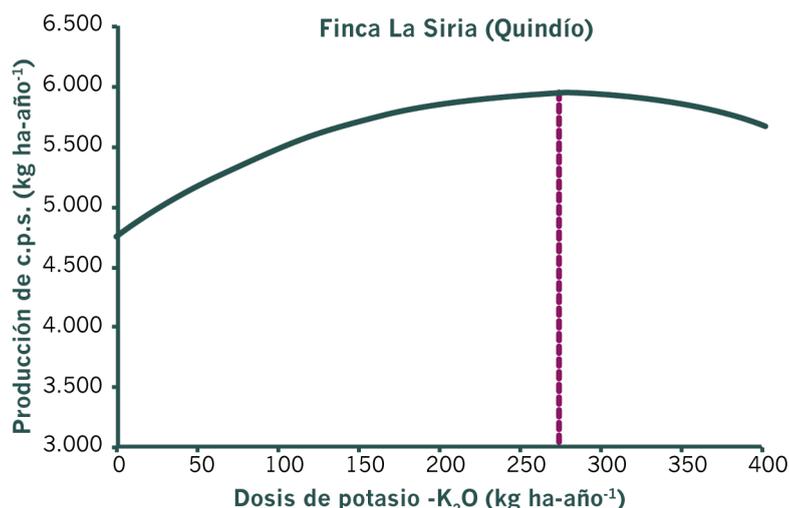


Figura 5. Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta al suministro de potasio. La línea punteada señala el **óptimo biológico** (273,5 kg ha-año⁻¹ de K₂O). Tomado de Sadeghian y Álvarez (2011).

Al igual que el N, las dosis de K requeridas para alcanzar el óptimo biológico y económico son muy cercanas y, en la práctica, se consideran iguales.

La Figura 6 ilustra el cambio de la TRM en función de las dosis de K, pudiéndose distinguir en ella la cantidad del nutriente a suministrar para alcanzar el óptimo económico. Los valores negativos de TRM observados a partir de la dosis del óptimo económico, indican que

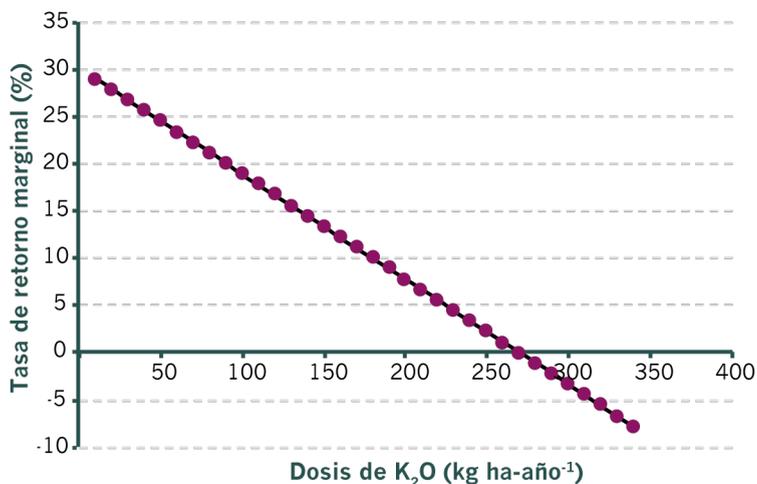


Figura 6. Tasa de retorno marginal (TRM) para café en función de dosis de K en una finca del departamento del Quindío. En el punto de cruce entre la TRM y las dosis de K se alcanza el óptimo económico (264,5 kg ha-año⁻¹ de K₂O).

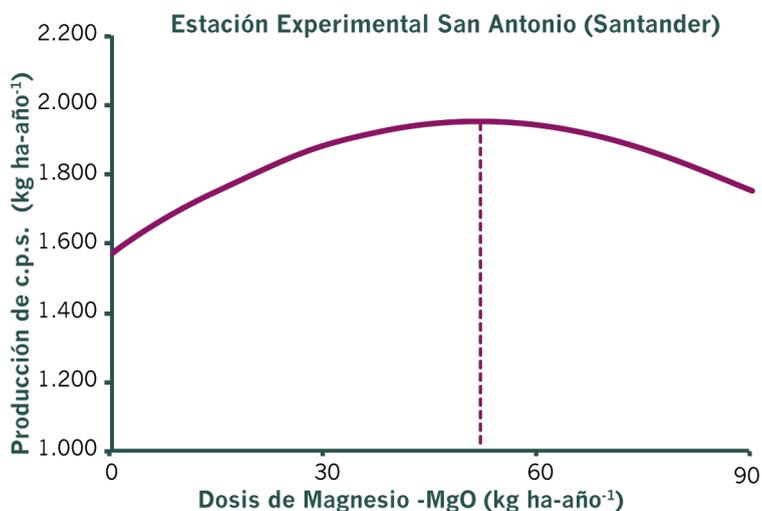


Figura 7. Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta al suministro de magnesio. La línea punteada señala el óptimo biológico (52,1 kg ha-año⁻¹ de MgO).

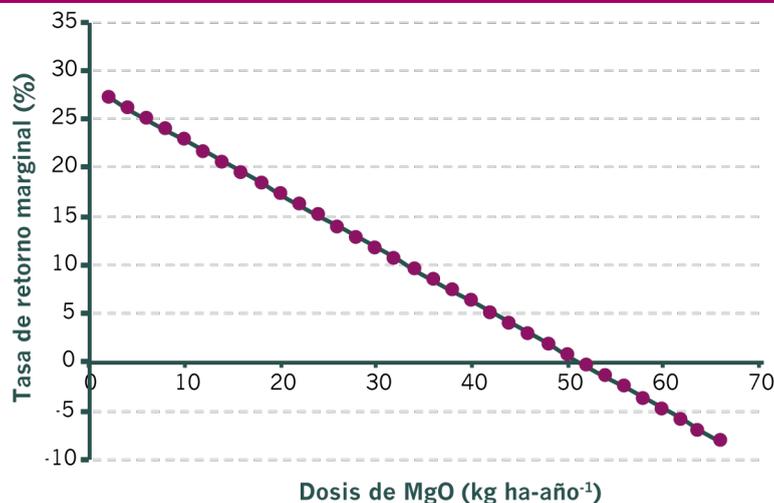


Figura 8. Tasa de retorno marginal (TRM) para café en función de la dosis de Mg en la Estación Experimental San Antonio (Floridablanca, Santander). En el punto de cruce entre la TRM y las dosis de Mg se alcanza el óptimo económico (51,6 kg ha-año⁻¹ de MgO).

cantidades adicionales de K no generan rentabilidades marginales y, por lo tanto, no son económicamente recomendables.

Fósforo. Los requerimientos de P son menores que los de N y K. Las investigaciones desarrolladas en torno a este nutriente durante la etapa de producción han demostrado que la respuesta a su aplicación es ocasional y de baja magnitud (Uribe & Mestre, 1976), resultado que se relaciona con la poca absorción del P proveniente de los fertilizantes (1%) (Parra & McCormik, 1963). Actualmente, se sugiere suministrar hasta 60 kg ha-año⁻¹ de fósforo (expresados como P₂O₅).

Magnesio. En algunas regiones del país, especialmente cuando los suelos son ácidos, se presentan deficiencias de Mg (Sadeghian & Duque, 2017). En sistemas tecnificados de producción se han obtenido respuesta hasta 60 kg ha-año⁻¹ de MgO, suministrados en forma de óxido o sulfato de Mg (MgO). En este caso, la función (Expresión <5>) que se obtuvo a través de un experimento desarrollado en la Estación Experimental San Antonio (departamento de Santander) (Figura 7):

$$\hat{y} = 1.573,4 + 14,443 MgO - 0,1386 MgO^2 <5>$$

Una vez realizados los procedimientos descritos para N y K, se obtienen las dosis de MgO para alcanzar la óptima biológica y la óptima económica (Figura 8), de 52,1 kg ha-año⁻¹ y 51,6 kg ha-año⁻¹, respectivamente.

Como se puede notar, el óptimo biológico de 52,1 kg ha-año⁻¹ de MgO difiere sólo en 0,5 kg ha-año⁻¹ con respecto al óptimo económico. Al igual que en los casos de N y K, las diferencias entre las dosis son bajas (<4%), e igualmente la diferencia en las productividades estimadas. De esta manera, los óptimos para este nutriente, son prácticamente iguales.

Azufre. Frecuentemente, no hay respuesta del café al suministro de azufre (S) para condiciones de la zona cafetera de Colombia esta condición que se relaciona, en muchos casos, con los altos contenidos de la materia orgánica del suelo, la cual constituye la principal fuente de este nutriente. La aplicación de dosis entre 50 y 60 kg ha-año⁻¹ de S, suministrada en forma de yeso agrícola (sulfato de calcio), sulfato de amonio y sulfato de magnesio, ha mostrado ser suficiente para alcanzar las mayores producciones (Figura 9). Económicamente, la dosis óptima puede fluctuar entre 50 y 55 kg ha-año⁻¹ de S, según el precio del café y la fuente empleada.

Cabe resaltar que los óptimos biológicos pueden presentar variaciones según las condiciones predominantes, principalmente debido a la fertilidad de los suelos. Así mismo, los óptimos económicos cambian parcialmente en consecuencia de las fluctuaciones de los precios, tanto de los fertilizantes como de café; sin embargo, las diferencias son generalmente pocas (Sadeghian, 2010).

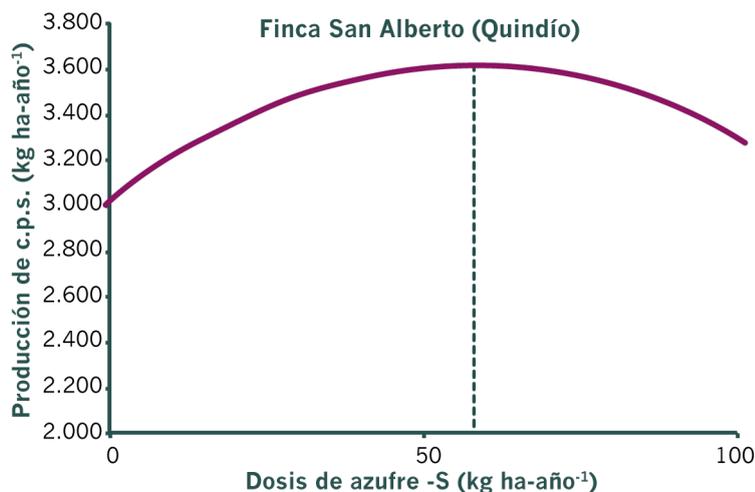


Figura 9. Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta al suministro de azufre. La línea punteada señala el óptimo biológico (57,9 kg ha-año⁻¹ de S). Función: $\hat{y} = 3032,4 + 20,335 S - 0,1757 S^2$



Literatura citada

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (1988). La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica. CIMMYT. <http://hdl.handle.net/10883/1063>

Duque, H. & Mestre, A. (2001). Óptimos biológico y económico de la respuesta del café a la fertilización en dos localidades de Colombia. *Revista Cenicafé*, 52(1), 74–89. <http://hdl.handle.net/10778/770>

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers : an introduction to nutrient management*. (8a ed.). Pearson.

Lopera, J., & Lopera, H. (1986). Manual de análisis socioeconómico de resultados de ajuste de tecnología (Núm. 37; Manual de Asistencia Técnica, p. 99). Instituto Colombia Agropecuario ICA. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/23575>

Parra, J., & McCormick, A. (1963). Cómo aprovecha el café los fertilizantes: estudio con radiofósforo. *Revista Cenicafé*, 14(2), 95–110. <http://hdl.handle.net/10778/4271>

Sadeghian, S. (2009). Calibración de análisis de suelo para N, P, K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. *Revista Cenicafé*, 60(1), 7–24. <http://hdl.handle.net/10778/179>

Sadeghian, S. (2010). Evaluación de la fertilidad del suelo para una adecuada nutrición de los cultivos. Caso café. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 46–64.

Sadeghian, S. & Álvarez, V. (2011). Calibración de análisis de suelos para potasio en café a partir de resultados obtenidos en una localidad. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 2, 13–15. <http://nla.ipni.net/article/NLA-3023>

Sadeghian, S., & Duque, H. (2017). Formulaciones generales de fertilizantes: Alternativas para una nutrición balanceada de los cafetales en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 483, 1–4. <http://hdl.handle.net/10778/4272>

Uribe, A. & Mestre, A. (1976). Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Revista Cenicafé*, 27(4), 158–173. <http://hdl.handle.net/10778/4273>



Amigo caficultor

La aplicación de las dosis correctas de fertilizantes, derivadas de los resultados de investigación, contribuye a maximizar la rentabilidad de los cafetales y minimiza los riesgos económicos y ambientales. Establezca planes adecuados de nutrición con base en los resultados de análisis de suelos, ajustados a los sistemas de producción de su finca.