

ÓPTIMOS BIOLÓGICO Y ECONÓMICO DE LA RESPUESTA DEL CAFÉ A LA FERTILIZACIÓN EN DOS LOCALIDADES DE COLOMBIA

Hernando Duque-Orrago*; Alfonso Mestre-Mestre**

RESUMEN

DUQUE O., H.; MESTRE M., A. Óptimos biológico y económico de la respuesta del café a la fertilización, en dos localidades de Colombia. Cenicafé 52(1):74-89. 2001

Como un acercamiento económico a la fertilización, se analizó la respuesta del café haciendo uso de los conceptos de la economía de la producción. Para ello se tomaron funciones de respuesta del café a la fertilización, provenientes de un experimento de Cenicafé. Se analizó concretamente la respuesta al nitrógeno en Paraguaicito (Quindío) y la respuesta al nitrógeno y potasio en la Hacienda Mesitas (Cundinamarca). En ambos casos hubo rendimientos marginales decrecientes, lo cual concuerda con los procesos biológicos conocidos y los supuestos del modelo. El modelo de respuesta al nitrógeno permitió establecer que los óptimos biológico y económico coincidieron para este caso. Se comprobó también que la elasticidad de la producción de café a aplicaciones de nitrógeno fue negativa por encima de 231 kg de N por hectárea año. En el modelo de respuesta al nitrógeno y al potasio, se encontró de igual forma que los óptimos biológico y el económico fueron coincidentes, deduciéndose de ambas funciones que el agricultor debe aplicar fertilizante buscando el máximo rendimiento biológico, pues para esa misma dosis se alcanzará el óptimo económico. Finalmente, se muestra cómo utilizando la técnica de las isocuantas el agricultor puede ser eficiente produciendo café, asignando adecuadamente sus recursos en el caso del capital disponible limitado.

Palabras claves: Café, funciones de respuesta, fertilización, óptimos biológicos, óptimos económicos.

ABSTRACT

As an economic approach to fertilization, the response on coffee productivity due fertilization was analyzed by using the production economics concepts. The response functions from experiments carried out in Cenicafé were considered. The response functions to nitrogen in Paraguaicito (Quindío) as well as the response function to nitrogen and potassium in Mesitas farm (Cundinamarca) were specifically analyzed. In both cases, these functions described diminishing marginal returns, which correspond to the biological processes known and the model assumptions. The model of nitrogen response allowed establishing that the biological and economic optimums were coincident. The elasticity of coffee production to nitrogen application was negative above 231 kilograms of N per hectare per year. In the response model to nitrogen and potassium, it was found also that the biological and economic optimums were coincident. Therefore can be concluded that coffee farmers in these locations should apply fertilizers looking for obtaining the maximum of the biological yield, since for the same amount of fertilizer will be reached the economic optimum. Finally it is demonstrated how using the isoquants technique, farmers can be efficient producing coffee, allocating adequately their resources, if there is a lack of capital.

Keywords: Coffee, response functions, fertilization, biological optimum, economic optimum.

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

**Investigador Científico III. Fitotecnia, hasta Junio de 2000. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

De las decisiones que se llevan a cabo en el manejo de cultivos una de las que tiene mayor importancia es la relacionada con la fertilización. Además, durante los últimos años el uso racional y económico de los fertilizantes ha adquirido especial trascendencia dentro de la tecnología para la producción de cosechas. En este sentido, Tisdale y Nelson (31), opinan que debe reconocerse la importancia de un adecuado suministro de elementos nutritivos a las plantas para mantener una producción eficiente de las mismas.

De acuerdo con Guerrero (19), la racionalidad en el uso de fertilizantes se sustenta en dos aspectos: primero, la incorporación de variedades altamente productivas que suponen un incremento de las necesidades de nutrición del cultivo y por tanto, mayores requerimientos en la fertilización; y segundo, por el incremento relativo en costos que han tenido las fuentes fertilizantes.

Para el caso del café, la fertilización es una de las actividades más importantes que deben llevarse a cabo si se desean obtener buenos rendimientos en el cultivo. De hecho, al fertilizar se suministran los nutrimentos que la planta requiere para producir mejores cosechas (15). De esta forma, con buenas fertilizaciones se obtienen plantas vigorosas y sanas cuya producción se aumenta considerablemente, pues en ausencia de fertilizantes los cafetos producen poco, se "palotean" más rápido y son más sensibles a plagas y enfermedades (16). Es considerable entonces la importancia de la adecuada fertilización de los cultivos de café, en el propósito de obtener buenas producciones dentro de una racionalidad económica para el productor.

Los estudios llevados a cabo por Cenicafé y relacionados con la respuesta del café a la fertilización en Colombia son extensos y completos. De hecho, es posible encontrar abundante literatura en este campo, la cual discurre

a través de: la nutrición mineral del café (37), las relaciones entre la presencia de enfermedades del café y la fertilización (7), la fertilización foliar en almácigos de café (20, 36), épocas de aplicación de fertilizantes en cafetales renovados por zoca (33), encalamiento de cafetales (34), comparación de formas de aplicación del fertilizante (28), uso de fuentes simples (39), fertilización de cafetales (35), respuesta del café bajo sombrío a la fertilización (25), interacciones entre manejo de cafetales y fertilización (29), y otros tópicos más.

Pero también y paralelo a esta información, Cenicafé ha desarrollado conocimientos claves en lo relacionado con los análisis de suelos como ayuda para la recomendación de fertilización de los cafetales. Debido a la complejidad en la interpretación de estos análisis y para una mejor aplicación de los criterios de los técnicos, Cenicafé ha publicado información en la serie Avances Técnicos (3, 4, 38).

Adicionalmente, se han llevado a cabo validaciones de las recomendaciones generadas por dichos análisis en las cuales se encontró que los agricultores estaban aplicando dosis de fertilizante superiores a las recomendadas por los análisis de suelos, para obtener producciones similares a las logradas con base en la recomendación (14); estas validaciones demostraron cómo por encima de ciertos niveles de fertilizante no hay respuesta en producción y se puede presentar una etapa irracional como productor, desde el punto de vista económico, pues para mayores costos se obtienen menores ganancias. En este sentido deben hacerse dos comentarios: primero, a pesar de los beneficios derivados de la utilización del análisis de suelos, esta práctica no ha sido aún adoptada masivamente por los caficultores colombianos; y segundo, al analizar la estructura de costos en la producción de café, se observa que los fertilizantes no constituyen más del 10 o 12% de los costos totales de producción (17), pero en cambio son responsables en gran medi-

da por los volúmenes de producción obtenidos. Situación que se torna compleja bajo el actual escenario de la caficultura, el cual impone la producción de café bajo condiciones de eficiencia y competitividad, lo que implica por supuesto racionalidad económica. Y la única manera para que un agricultor pueda mantenerse en el negocio a través del tiempo es generando ganancias suficientes (30).

De otro lado, la producción de cultivos es el resultado de una serie de actividades que transforman los insumos en rendimiento. Por ello, una función de producción representa la cantidad de producto que podría obtenerse empleando diferentes dosis o cantidades de insumos, en este caso fertilizante. Las funciones de respuesta más frecuentemente utilizadas para explicar la respuesta de las plantas a los fertilizantes son diversas: cuadráticas, cúbicas, Cobb-Douglas, etc. Debe mencionarse también el enfoque de los modelos discontinuos rectilíneos que permiten también interpretaciones económicas (10, 13). Sin embargo, las más utilizadas son las funciones cuadráticas o de segundo grado, que describen una relación curvilínea entre la producción esperada y la cantidad de fertilizante aplicado (23). En esta función se espera normalmente un signo positivo para el término lineal (B1) y negativo para el segundo o término cuadrático (B2); estos signos implican que la producción del cultivo aumenta a una tasa marginal decreciente a medida que las dosis de fertilizante también aumentan hasta llegar a un punto máximo, luego del cual la producción decrece.

El presente estudio tuvo como objetivo estimar los óptimos técnico y económico o las mejores combinaciones económicas de nutrientes para las funciones seleccionadas, contribuir a la comprensión económica de la producción de café, proponer y difundir una metodología de análisis que puede ser empleada en otras funciones de respuesta del café, utilizando los principios de la economía de la

producción en funciones de respuesta del café a la fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar los análisis correspondientes, se trabajó sobre los resultados del Proyecto C-6 de Cenicafé (6). Este proyecto evaluó en diferentes localidades, distintas dosis de nitrógeno, fósforo y potasio para observar la respuesta del café, variedad Caturra, a las dosis de los nutrientes y a su interacción. Se efectuó un ensayo en el cual los tratamientos estuvieron constituidos por las combinaciones factoriales de tres niveles de cada uno de los elementos nitrógeno, fósforo y potasio. Los niveles que se emplearon fueron 0, 120 y 240kg/ha/año de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente. Como fuentes de los elementos se usaron el sulfato de amonio del 21% de N, el superfosfato triple de 46% de P₂O₅ y el sulfato de potasio del 48% de K₂O. En la distribución de los tratamientos en el campo, los 27 tratamientos se dividieron en bloques en tal forma que la componente W de la interacción de los tres factores, quedara totalmente confundida con los bloques. Se emplearon dos repeticiones de este diseño básico. La variedad Caturra se sembró a una distancia de 1,5m por 1,5m, al cuadro, que equivale a una densidad de 4.444 árboles de café por hectárea (32).

El Experimento se instaló en diferentes localidades del país: Cenicafé (Chinchiná), Estación Central Naranjal (Chinchiná), Paraguaicito (Quindío), Líbano (Tolima), Fresno (Tolima), Subestación El Rosario (Antioquia), Piamonte (Antioquia), Granjas (Cundinamarca), Mesitas (Cundinamarca), Gigante (Huila) y Albán (Valle). Los rendimientos estudiados corresponden a kilogramos de café pergamino seco, promedio de cuatro cosechas y para año civil (enero a diciembre). La utilización del promedio de las cuatro cosechas para la construcción del modelo se apoya en la estimación de una función de producción pro-

medio para un ciclo normal del cultivo, siguiendo la tecnología propuesta por Cenicafé. De acuerdo con las funciones de respuesta originales obtenidas, se seleccionaron dos de ellas para llevar a cabo los análisis. Las funciones correspondieron a las localidades de Paraguaicito (26), donde se encontró respuesta a un nutrimento y para la Hacienda Mesitas (27), donde se encontró respuesta del café a dos nutrimentos y a su interacción. Las funciones se estimaron sobre los años civiles y como unidad de la variable de respuesta se trabajó con kilogramos de café pergamino seco por hectárea; para ello se recurrió a los datos originales, los cuales reposan en la Disciplina de Fitotecnia de Cenicafé.

Para estimar los óptimos económicos se trabajó con el precio oficial del café al momento de los análisis y el costo de los nutrimentos en su forma como N o K₂O. No se incluyeron los costos de transporte del fertilizante y su aplicación, puesto que varían entre fincas y son, por tanto, de difícil estimación. En julio del año 2000 se actualizaron los óptimos de acuerdo a los precios vigentes y no hubo variación, en comparación con los cálculos anteriores basados en precios de 1999.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las funciones de respuesta utilizadas en este análisis correspondieron a las localidades de Paraguaicito y Mesitas.

Localidad Paraguaicito: Función de Respuesta. En esta localidad la respuesta del café fue significativa a nitrógeno, lo cual tipifica la relación factor : producto, la cual se analizó desde el punto de vista de economía de la producción.

Los resultados de la regresión aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la regresión

Estadísticas de la Regresión	Valores
R-cuadrado	0,730464
R-cuadrado Ajustado	0,708003
Error estándar	514,0801
Observaciones	27

El R² estimado muestra que el modelo tiene buen ajuste y que el 73% de la variación en la producción está explicado por las variaciones en la fertilización. De otro lado, al realizar el análisis de varianza se encontró que el modelo fue significativo con valores de F, inferiores al 1%. Los coeficientes calculados para la regresión, su valor y significancia aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de la regresión

Término	Coeficientes	P-Valor
Intercepto (B ₀)	4119,0594	2,65811E-18
Nitrógeno (B ₁)	16,1352	0,000126096
Nitrógeno*Nitrógeno (B ₂)	-0,03424	0,024232861

De esta forma la función obtenida es del tipo cuadrático, resultado coincidente con la mayoría de experimentos que estudian la respuesta en producción de las plantas a las aplicaciones de fertilizante (2, 23). En concordancia, la ecuación es la siguiente:

$$Y = 4119,0594 + 16,1352 N - 0,03424 N^2$$

<< 1 >>

Donde:

- Y = Producción promedia de cuatro cosechas (kg de cps/ha).
- N = Dosis de nitrógeno, expresada en kg de N por hectárea.
- N² = Dosis de nitrógeno, elevada al cuadrado y expresada en kg de N por hectárea.

De acuerdo con la función obtenida, la representación gráfica aparece en la Figura 1.

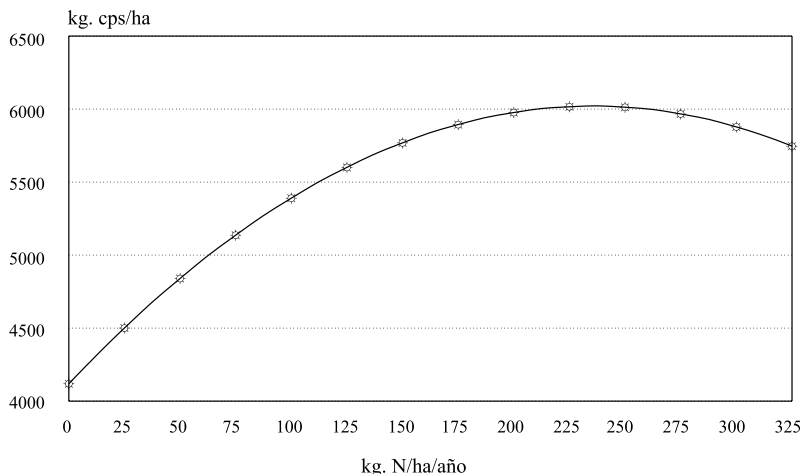


Figura 1.
 Respuesta del café a las aplicaciones de nitrógeno. Paraguaicito (Quindío)

La gráfica muestra el comportamiento de una función de segundo grado cuando el coeficiente del término cuadrático es negativo, tipificándose un rendimiento marginal decreciente.

Óptimo Biológico. Para estimarlo es necesario calcular la dosis de nitrógeno que generará la máxima producción física o biológica. En este caso se toma la función obtenida y se halla la derivada de primer orden que es equivalente también al producto marginal de la función.

$$Y = 4119,0594 + 16,1352 N - 0,03424 N^2$$

$$\frac{\delta Y}{\delta N} = \frac{\delta (4119,0594)}{\delta N} + \frac{\delta (16,1352 N)}{\delta N} - \frac{\delta (0,03424 N^2)}{\delta N}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta N} = 16,1352 - 0,06848 N$$

<< 2 >>

Esta derivada de primer orden se iguala a cero (0) y se obtiene entonces la dosis de nitrógeno que optimiza la producción física de café. En este caso la dosis es de 235,61 kg.

Para comprobar si esta cantidad estimada de nitrógeno corresponde a un máximo, se obtiene la derivada de segundo orden, la cual debe ser menor que cero para que el punto encontrado sea verdaderamente un máximo lo cual ocurrió

en este caso. Luego se procede a estimar la máxima producción promedio, reemplazando en la ecuación original la dosis de N obtenida:

$$Y_{\text{óptimo biológico}} = 6019,94 \text{ kg cps / ha} = 481,59 \text{ @ cps / ha}$$

<< 3 >>

Óptimo Económico. La tasa óptima de aplicación de fertilizante a un cultivo es aquella que produce el máximo retorno económico (8). Para obtener el óptimo económico se iguala la ecuación de producto marginal a la relación inversa entre el precio del insumo y el precio del producto.

$$\frac{\delta Y}{\delta N} = 16,1352 - 0,06848 N = \frac{P N}{P Y}$$

<< 4 >>

Donde:
 P N = Precio de kg de N
 P Y = Precio de kg de café pergamino seco (cps)

Asumiendo el precio del kilogramo de N en \$ 704 (9), y el precio de venta del café en \$ 2640/kg (precio oficial a la fecha de los análisis), se obtendría un óptimo económico de 231,32 kg

Para esta dosis la producción esperada sería:

$$Y_{\text{óptimo biológico}} = 6019,94 \text{ kg cps / ha} = 481,59 @ \text{ cps / ha} \\ \ll 5 \gg$$

Esta producción es prácticamente igual a la del óptimo físico. Esto se explica porque la razón entre el precio del nitrógeno y el del café es una cifra de muy bajo valor (0,266) la cual ocurre porque la diferencia en precios entre ambos productos es muy amplia. Dicho de otra forma, el precio del café es tan alto con relación al nitrógeno que los óptimos físicos y económicos prácticamente coinciden. Sin embargo, si los precios del café o de los nutrientes presentaran cambios importantes, tales como decrecimiento en el primero o aumentos severos en el de los fertilizantes, el óptimo económico también presentaría variaciones.

Producto total y producto marginal. El incremento en la producción causada por la última (marginal) unidad de nitrógeno a cada nivel de uso es llamado Producto Marginal. De esta forma el producto marginal del nitrógeno en este caso, es el incremento en el producto total (kilogramos de café pergamino seco) produci-

do por la última unidad de ese insumo, mientras todos los otros insumos permanecen constantes (22). Sin embargo, por encima de cierto nivel de producto (kilogramos de café pergamino seco) unidades adicionales de N harán declinar la producción total. En el caso bajo estudio, unidades adicionales de N por encima del óptimo producirán disminución en la producción. De acuerdo con los conceptos de economía de la producción, el producto marginal es igual a cero cuando la producción total alcanza su máximo (Figura 2).

Se observa cómo la curva de producción total PT (eje Y1) decae por encima de los puntos óptimos técnico y económico (que en este caso coinciden), lo que significa que aplicaciones de N mayores a 231,6/ha/año, originarán mermas en la producción total. En estas circunstancias el productor estaría incursionando en la etapa 3 o etapa irracional de la producción. La gráfica también muestra la curva de producto marginal (Pmg) sobre el eje Y2, la cual va descendiendo a medida que la curva de producto total llega a la más alta producción (6019,94kg de cps/ha o 481,59 @ de cps/ha). Nótese que cuando el producto marginal es igual a cero (no hay mayor producción de

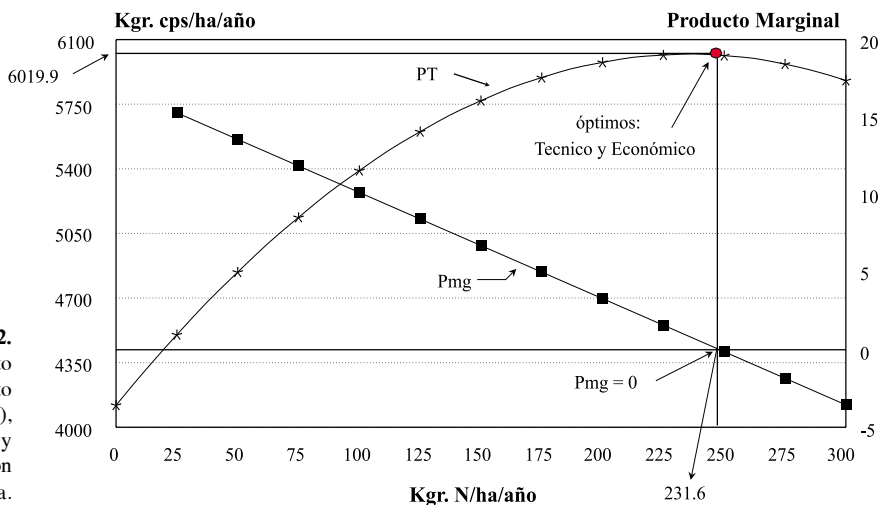


Figura 2. Curvas de producto total (PT), Producto marginal (Pmg), dosis óptima de N y máxima producción esperada.

café por efecto de la aplicación de unidades adicionales de N), coincide con los óptimos técnico y físico. La adición de más unidades de N sólo generaría un costo adicional que no se verá retribuido por una producción adicional de café y se estaría produciendo a pérdida. Mediante este método se comprueban los resultados obtenidos por otros métodos como el cálculo diferencial.

Análisis Marginal. Se refiere al análisis económico de los aumentos en valor de la producción y su relación con los aumentos en el costo del fertilizante utilizado (24). El análisis marginal de la función de respuesta del café al fertilizante en Paraguaicito se lleva a cabo gráficamente en la Figura 3. Para elaborarlo se calculan los incrementos en producción por efecto de la aplicación de unidades adicionales de nitrógeno. Multiplicando las diferencias en aumentos en producción por el precio del café se determina el valor de los incrementos en producción. Como se observa en la Figura, estos valores son más altos a niveles bajos de N y disminuyen a medida que la dosis de N aumenta. De otro lado, estos valores deben relacionarse con el costo marginal (costo de las unidades adicionales de insumo. En este caso se tomaron 15kg de N a \$ 704 c/u) del uso del N el cual es constante, de donde se deduce en cual punto se encuentra la dosis óptima de fertili-

zante. Al graficar la curva de ingreso marginal y la de costo marginal se observa claramente el punto en el cual se logra el óptimo económico.

Es claro, por la gráfica, que aplicaciones adicionales de nitrógeno por encima de 231,6kg originarán ingresos marginales negativos lo cual implica pérdidas para el productor.

Elasticidad de la Producción (Ep). La elasticidad de la producción en agricultura se define como: “el porcentaje de cambio en el producto dividido por el porcentaje de cambio en el insumo, cuando el nivel del insumo usado cambia” (12). Para estimar la elasticidad de la producción de café de acuerdo a los niveles de N utilizados se aplica la fórmula:

$$E_p = \frac{\text{producto MARGINAL}}{\text{producto MEDIO}} = \frac{\delta Y / \delta N}{Y/N}$$

<< 6 >>

Donde:

Y = Producción de café

N = kg de N/ha/año

De acuerdo con esta expresión, las elasticidades de la producción de café con respecto a cambios en las dosis de N, aparecen en la Figura 4. La curva de producto total (eje Y1), decae

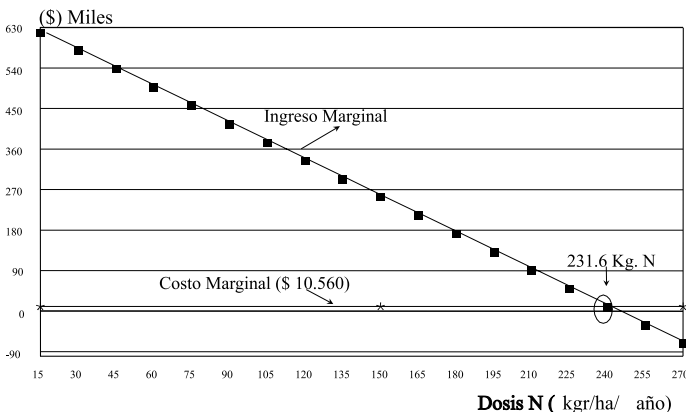


Figura 3. Curvas de Ingreso Marginal y Costo Marginal de la fertilización nitrogenada

por encima del óptimo técnico (que coincide con el económico).

La gráfica también describe la curva de elasticidad de la producción cuya escala se ubica sobre el eje Y2. La elasticidad de la producción presenta dos tipos de valores; en un tramo de la curva los valores de E_p oscilan entre $1 < E_p > 0$, mientras que en otra son $E_p < 0$. De esta forma es claro que la función de respuesta analizada se ubica sobre dos etapas de la función de producción (etapa 2), cuando la elasticidad toma valores entre $1 < E_p > 0$, lo cual indica que el producto marginal es positivo aunque decreciente. Por esta razón, los recursos productivos son usados racionalmente cuando el proceso productivo se encuentra en la etapa dos de producción. Esta fase es llamada Etapa Racional de la Producción. Cuando la E_p es < 0 , entonces se entra en la Etapa 3, donde el producto marginal toma valores negativos con una producción decreciente, indicando que a mayores cantidades de N la cantidad de café pergamino seco será menor que en el máximo. Por esto se denomina a esta Etapa Irracional pues el caficultor estaría produciendo a pérdida. Es importante señalar que cuando en una función cuadrática como la que se ha venido estudiando, el coeficiente B_2 toma valores negativos permite retornos marginales decre-

cientes y un punto máximo, enmarcándose en la ley de los rendimientos decrecientes (2). En estas funciones la elasticidad de la producción no es constante y declina conforme se incrementa el uso del factor variable, nitrógeno en este caso.

Abranches (2), opina que una de las limitaciones de las funciones cuadráticas es que no permiten tener en la misma curva las tres etapas de la función de producción. Estas funciones pueden representar la etapa 1 o las etapas 2 y 3, como ha ocurrido en la función analizada. Por esta razón no se ha estudiado el comportamiento del Producto Medio, que es otra variable clave es este tipo de análisis. Además, al analizar la curva de producto marginal (Figura 2), esta se observa rectilínea cuando no lo es; pero al faltar la Etapa 1 de producción se impide observar el comportamiento del producto marginal a lo largo de la función de producción.

Localidad Hacienda Mesitas. Función de respuesta. En esta localidad la respuesta del café fue significativa a nitrógeno y potasio, lo cual tipifica la relación factor : factor, que se analizó desde el punto de vista de economía de la producción. Los resultados de la regresión aparecen en la Tabla 3.

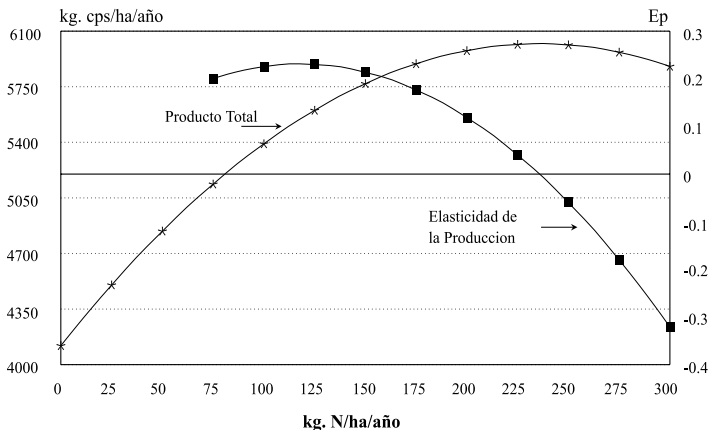


Figura 4. Curvas de Producto Total (PT) y Elasticidad de la Producción (E_p).

Tabla 3. Resultados de la Regresión

Estadísticas de la Regresión	Valores
R-Cuadrado	0,862020
R-Cuadrado Ajustado	0,82752
Error Estándar	262,79
Observaciones	27

El R2 estimado indica que el modelo tiene buen ajuste, pues el 86% de la variación en la producción está explicado por las variaciones en la fertilización. De otro lado, al realizar el análisis de varianza, se encontró que el modelo fue significativo con valores de F, inferiores al 1%.

Los coeficientes calculados, su valor y la significancia aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de la Regresión

Términos	Coefficientes	P-Valor
Intercepto (B_0)	818,914	4,34E-05
Nitrógeno (B_1)	5,5706	0,012493
Nitrógeno * Nitrógeno (B_2)	-0,0204	0,012566
Potasio (B_3)	7,6642	0,001233
Potasio * Potasio (B_4)	-0,0268	0,001973
Nitrógeno * Potasio (B_5)	0,0223	0,001078

De acuerdo con estos resultados, se obtiene una función de tipo cuadrática. Esto coincide con la opinión de varios autores que mencionan que la respuesta en producción de las plantas a las aplicaciones de fertilizantes, puede ser estudiada bajo este tipo de funciones, que son en realidad polinomios de segundo grado (2, 5, 18, 23). En concordancia, la ecuación es la siguiente:

$$Y = 818,914 + 5,5706 N - 0,0204 N^2 + 7,6642 K - 0,0268 K^2 + 0,0223 N K$$

<<7>>

Donde:

Y = Producción promedio de cuatro cosechas, expresadas en kg de cps/ha/año.

N = Dosis de nitrógeno, expresada en kg de N/ha

N^2 = Dosis de nitrógeno, elevada al cuadrado y expresada en kg de N/ha

K = Dosis de potasio, expresada en kg de K₂O/ha

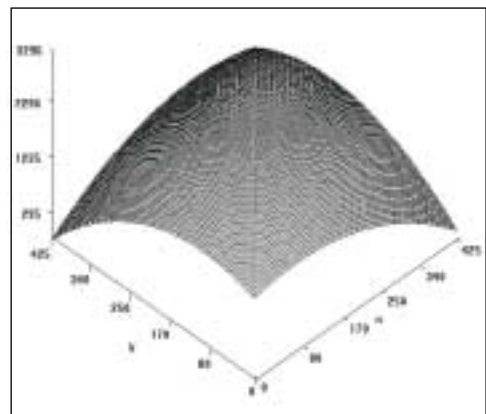
K^2 = Dosis de potasio, elevada al cuadrado y expresada en kg de K₂O/ha

$N*K$ = Dosis de nitrógeno multiplicada por la dosis de potasio, expresadas en kg/ha

De acuerdo con la función obtenida, la representación gráfica aparece en la Figura 5.

Óptimo Biológico. Para conocer el óptimo biológico de producción se deben estimar las dosis de nitrógeno y potasio que permitirán obtener la más alta producción. Para ello se hace uso de las herramientas de la economía de la producción.

En este caso se toma la función obtenida y hallan las derivadas parciales de primer orden, que son equivalentes al producto marginal de cada uno de los nutrientes.

**Figura 5.** Respuesta del café al nitrógeno, potasio e interacción $N*K$, en Mesitas.

$$\frac{\delta Y}{\delta N} = \frac{\delta(818,914)}{\delta N} + \frac{\delta(5,5706 N)}{\delta N} - \frac{\delta(0,0204 N^2)}{\delta N} + \frac{\delta(7,6642 K)}{\delta N} - \frac{\delta(0,0268 K^2)}{\delta N} + \frac{\delta(0,0223 N*K)}{\delta N}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta K} = \frac{\delta(818,914)}{\delta K} + \frac{\delta(5,5706 N)}{\delta K} - \frac{\delta(0,0204 N^2)}{\delta K} + \frac{\delta(7,6642 K)}{\delta K} - \frac{d(0,0268 K^2)}{d K} + \frac{\delta(0,0223 N*K)}{\delta K}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta N} = 5,5706 - 0,0408 N + 0,0223 K$$

$$\frac{\delta Y}{\delta K} = 7,6642 - 0,0536 K + 0,0223 N$$

Estas derivadas de primer orden se igualan a cero (0) y se obtienen la dosis de nitrógeno y potasio que maximizan la producción física de café. En este caso las dosis equivalen a 277,45 kg. y 258,02 kg.

Para corroborar si estas cantidades de nitrógeno y potasio corresponden realmente a un máximo, se calcula la derivada parcial de segundo orden de la función con respecto al nitrógeno (f_{11}), la cual debe ser menor que cero, para cumplir la condición necesaria para el máximo de una función.

$$f_{11} < 0$$

Posteriormente se obtienen las derivadas parciales de segundo orden del potasio (f_{22}) y las segundas derivadas parciales cruzadas de N y K (f_{12} y f_{21}), Donde de acuerdo al teorema de Young $f_{12} = f_{21}$; de esta forma se verifica el cumplimiento de la condición suficiente para determinar el máximo de la función de producción (12). Para la función bajo estudio, las dos condiciones se cumplen. De esta manera:

$$f_{11} * f_{22} > f_{12} * f_{21}$$

Así, el punto encontrado es verdaderamente un máximo. Luego se procede a estimar la máxima producción promedio, reemplazando

en la ecuación original las dosis de N y K obtenidas:

$$Y_{\text{máx. biológico}} = 2583,83 \text{ kg cps / ha} = 206,7 @ \text{ cps / ha}$$

Óptimo Económico. Para determinar el óptimo económico de la función o la maximización de la ganancia cuando se produce con dos insumos, asumiendo los demás fijos y dados debe averiguarse cuánto de los dos fertilizantes o factores de producción debe aplicarse para hacer máxima la ganancia. Si la ecuación de ganancia es igual a:

$$\Pi = \text{TVP} - \text{TFC} \quad \ll 8 \gg$$

- Donde:
- Π = Ganancia
- TVP = Valor total de la producción
- TFC = Costo total de los factores

Sin embargo esta ecuación puede también ser expresada así:

$$\Pi = pY - v_1 N - v_2 K \quad \ll 9 \gg$$

Donde los términos equivalen a:

- Π = Ganancia
- p = Precio del café, por kilogramo
- Y = Función de producción
- v_1 = Precio del nitrógeno, por kilogramo
- v_2 = Precio del potasio, por kilogramo
- N = Cantidad utilizada de nitrógeno, en kilogramos
- P = Cantidad utilizada de potasio, en kilogramos

Las derivadas de primer orden o condición necesaria para la máxima ganancia son:

$$\delta \Pi / \delta N = \frac{\delta (pY)}{\delta N} - \frac{\delta (v_1 N)}{\delta N} - \frac{\delta (v_2 K)}{\delta N} = 0$$

$$\delta \Pi / \delta K = \frac{\delta (pY)}{\delta K} - \frac{\delta (v_1 N)}{\delta K} - \frac{\delta (v_2 K)}{\delta K} = 0$$

Que en este caso equivaldría a:

$$\Pi_1 = p f_1 - v_1 = 0 \quad \ll 10 \gg$$

$$\Pi_2 = p f_2 - v_2 = 0 \quad \ll 11 \gg$$

Donde:

- Π_1 = Máxima ganancia para el nitrógeno
- Π_2 = Máxima ganancia para el potasio
- p = Precio del café, por kilogramo
- f_1 = Primera derivada de la función de producción, con respecto a N
- f_2 = Primera derivada de la función de producción, con respecto a K
- v_1 = Precio del nitrógeno, por kilogramo
- v_2 = Precio del potasio, por kilogramo

En las ecuaciones anteriores, (1) y (2), se requiere que la pendiente de la función de valor total de la producción, TVP, con respecto a cada nutriente sea igual a la pendiente de la función de costo total de los factores, TFC, de cada insumo, lo cual conlleva a:

$$p f_1 = v_1 ; \quad \text{donde} \quad f_1 = v_1 / p \quad \ll 12 \gg$$

$$p f_2 = v_2 ; \quad \text{donde} \quad f_2 = v_2 / p \quad \ll 13 \gg$$

Este acercamiento, empleando las funciones de respuesta del café, en Mesitas se representa así:

Para la ecuación <<12>>:

$$5,5706 - 0,0408 N + 0,0233 K = \frac{704}{2640}$$

$$5,5706 - 0,0408 N + 0,0233 K = 0,266$$

$$5,304 - 0,0408 N + 0,0233 K = 0$$

Para la ecuación <<13>>:

$$7,6642 - 0,0536 K + 0,0233 N = 0,208$$

$$7,456 - 0,0536 K + 0,0233 N = 0$$

Se resuelven como dos ecuaciones de primer grado con dos incógnitas, para encontrar las dosis de nitrógeno y potasio que maximizan las ganancias. Estas son iguales a N : 278,7 kg y K : 260,08 kg, respectivamente.

Como puede observarse, las dosis que maximizan las ganancias son prácticamente las mismas que maximizan la producción biológica. De esta forma al igual que en el caso de Paraguaicito, el óptimo físico y económico coinciden. Sin embargo, para esta situación se considera que el agricultor dispone de los recursos suficientes para adquirir las cantidades necesarias de ambos nutrimentos, para maximizar el ingreso neto.

Estimación de las Isocuantas. Pero de otro lado, es frecuente que el productor tenga restricciones de presupuesto para adquirir las cantidades de N y K que maximizan el ingreso neto para una función de producción dada (1). Si este es el caso el caficultor puede decidir que volumen de producción alcanzaría con las cantidades de N y K que puede comprar a precios de mercado, disponiendo de un capital fijo. De esta forma las cantidades de N y K multiplicadas por su precio no deben superar el capital disponible convirtiéndose entonces en una línea de isocosto. Por ejemplo, si el agricultor tuviera \$91.954 para comprar fertilizante, cualquier combinación de N y K que él decida hacer no podrá superar ese costo. Esta línea de isocosto se calcula dividiendo el capital disponible por el precio de cada elemento para así determinar el intercepto sobre los ejes correspondientes, tal como se observa en la Figura 6.

Para solucionar este problema del capital disponible, se hace uso de la técnica de las Isocuantas, con el propósito alcanzar la cantidad de café con una nueva combinación óptima de N y K donde el costo sea mínimo,

maximizando así su ingreso neto para esa nueva situación. En realidad, muchas combinaciones de nitrógeno y potasio pueden resultar en exactamente el mismo nivel de producción de café.

La línea que conecta las diferentes combinaciones de N y K, para producir una cantidad dada es una curva llamada Isocuenta (o Isoproducto), la cual identifica todos los puntos en el espacio que generan la misma cantidad de producto (11). De esta forma cada punto en la línea tiene en mismo rendimiento, en kg de cps, pero cada punto en la línea representa diferentes combinaciones de los dos insumos.

Las ecuaciones de isocuantas se derivan de la función de producción respectiva. En estas ecuaciones un elemento es expresado como una función del otro y de un rendimiento prefijado (21). Para la función en estudio (Hacienda Mesitas), las isocuantas se calculan tomando la función y fijando el rendimiento y las dosis de un nutrimento, se estima el otro. La gráfica que una los puntos de la combinación de los dos para obtener la producción establecida, corresponde a la isocuenta para esa producción.

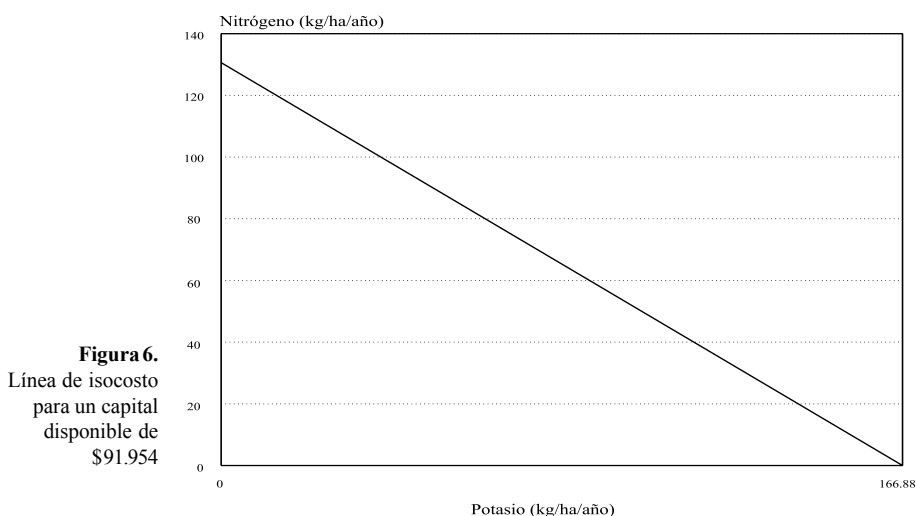


Figura 6.
Línea de isocosto
para un capital
disponible de
\$91.954

$$Y = 818,914 + 5,5706 N - 0,0204 N^2$$

$$+ 7,6642 K - 0,0268 K^2 + 0,0223 NK$$

<<14>>

Donde:

- Y = producción prefijada de café, por ejemplo 130 @ (1625kg de cps)
- K = dosis de K definidas
- N = dosis de N, que se encontrarán en función de K y Y

Re-arreglando términos:

$$1625 = 818,914 + 5,5706 N - 0,0204 N^2 + 7,6642 K - 0,0268 K^2 + 0,0223 NK$$

$$0 = 1625 - 818,914 + 5,5706 N - 0,0204 N^2 + 7,6642 K - 0,0268 K^2 + 0,0223 NK$$

De donde se expresa N en función de Y y K para, como se mencionó anteriormente, calcular la isocuanta. La Figura 7 ilustra la isocuanta para producir 130 @ por hectárea o 1625 kilogramos de café pergamino seco por hectárea.

Pueden presentarse entonces dos situaciones: primero, hallar una óptima combinación de insumos que minimice los costos para una isocuanta determinada o segundo, para unos costos dados encontrar la isocuanta que maximiza la producción para esos costos limitados con antelación. En cada caso se logra un óptimo económico. El óptimo en cada isocuanta se alcanza cuando la pendiente de la línea de isocosto es tangente con la curva de isocuanta, allí se obtienen los mínimos costos. Para este ejemplo los mínimos costos para obtener 130 arrobas se logran combinando 91,53kg y 58,98kg de nitrógeno. Así mismo, en un mapa de isocuantas pueden encontrarse varios óptimos, uno por isocuanta. La línea que une los óptimos de cada isocuanta, se llama Isoclina, pues tiene pendiente constante y en su recorri-

do señala el camino o ruta de expansión, por el cual se puede transcurrir cuando se dan cambios técnicos y se accede a isocuantas de mayor producción. Se sabe que el óptimo físico y económico para la función de Mesitas es igual a 206 arrobas por hectárea año, ese sería el punto final que alcanzaría la ruta de expansión, pues producciones superiores a ella llevarían al agricultor a producir en una etapa irracional económicamente.

La Figura 8 muestra diferentes isocuantas que pueden calcularse a partir de la ecuación de la función de respuesta del café en Mesitas, la isoclina y la ruta de expansión.

El concepto de isocuantas es muy útil para optimizar económicamente la producción de aquellos agricultores que no accedan, por diversas razones, a la máxima producción sino que se ubiquen en producciones intermedias.

En conclusión, se encontró que las respuestas en producción en los dos casos estudiados, presentaron rendimientos decrecientes tal como lo muestra el signo negativo de los coeficientes de las variables cuadráticas. Esto concuerda con los procesos biológicos conocidos y los supuestos del modelo. El modelo de respuesta al nitrógeno permitió establecer que los óptimos físicos y económicos coincidieron para este caso. Situación no común en los análisis de óptimos económicos pero que en café, debido a que la razón entre el precio del insumo y el precio del café es tan pequeña y mucho menor que la unidad, los óptimos coinciden. Caso contrario ocurriría si el precio del insumo fuera mayor que el del producto (caso del maíz por ejemplo).

Se comprobó que la elasticidad de la producción del café a las aplicaciones de nitrógeno se torna negativa por encima de 231kg de N/ha/año. Dosis mayores conducirían al agricultor a entrar en una etapa de producción irracional desde el punto de vista económico.

Figura 7.
Isocuanta para una
producción de 1625kg de cps.

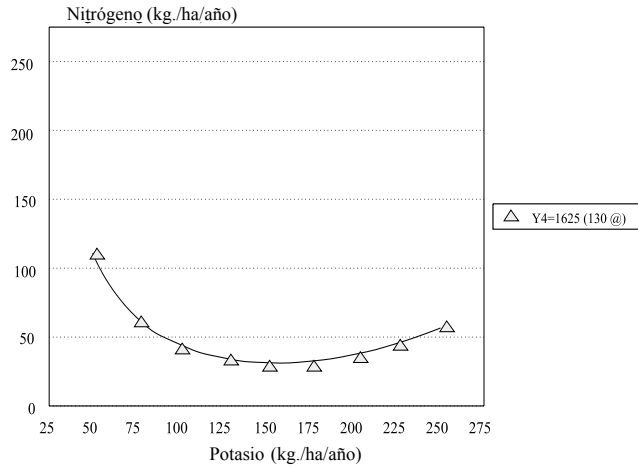
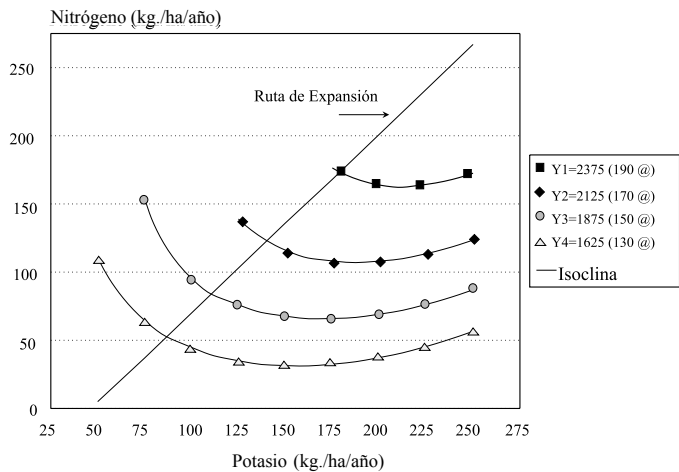


Figura 8.
Isocuantas para
producción de café,
óptimos, isoclina y
ruta de expansión.



Se demostró también que el óptimo económico se alcanza cuando el costo marginal del factor es igual al valor del producto marginal. Situación que se logra a los 231kg de N/ha/año.

El modelo de respuesta al nitrógeno y al potasio, permitió conocer que los óptimos físicos y económicos también coincidieron para este caso; debido a que la razón entre el precio del insumo y el precio del café es tan pequeña y mucho menor que la unidad, los óptimos coinciden.

Utilizando la técnica de las Isocuantas se demostró cómo el agricultor puede ser eficiente

te produciendo café, asignando adecuadamente sus recursos en el caso del capital disponible limitado. En ambos casos se demuestra la efectiva respuesta económica del café a la fertilización, razón que justifica plenamente que el agricultor al fertilizar busque alcanzar el óptimo biológico, pues para esa misma dosis alcanzará el óptimo económico.

Finalmente, el uso de las herramientas que ofrece la economía de la producción permite conocer y analizar con más profundidad resultados obtenidos en la experimentación agrícola. Estos análisis adicionan valor agregado a la investigación pues ofrecen una mayor com-

presión de los resultados mismos y sirven de base para llevar a cabo recomendaciones a los productores.

LITERATURA CITADA

1. ACOSTA, J.; FLÓREZ, V.; LONDOÑO, D.; OROZCO, R.; NARANJO, A. Administración de empresas agropecuarias. Tibaitatá, Instituto Colombiano Agropecuario-ICA, 1979. 208 p. (Manual de Asistencia Técnica No. 21).
2. ABRANCHES, P. F. Análisis económico en experimentación agropecuaria. Botucatu, Universidad Estatal Paulista. Facultad de Ciencias Médicas y Biológicas de Botucatu. Departamento de Economía Rural, 1976. 64 p. (Mimeografiado).
3. CARRILLO P., F. El Servicio de análisis de suelos y la fertilización racional de los cafetales. Avances Técnicos Cenicafé No. 147: 1-8. 1990.
4. CARRILLO P., F.; SUÁREZ V., S.; SANZ U., J. Cómo obtener una buena muestra para el análisis de suelos. Avances Técnicos Cenicafé No. 214: 1-4. 1995.
5. CASTELLANOS, T.; HERNÁNDEZ, J. R.; GUERRA, W.; MARTIN, J. R.; Aplicación de las curvas de respuesta en la obtención de dosis óptimas económicas. Cultivos Tropicales 8(1): 33-39. 1986.
6. CENTRONACIONALDEINVESTIGACIONESDECAFÉ. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio, solos y combinados a diferentes niveles sobre la producción del café. Proyecto C-6. Chinchiná, Cenicafé, 1966. 4 p. (Mecanografiado).
7. CENTRONACIONALDEINVESTIGACIONESDECAFE. Fertilización del café y su relación con la incidencia de la mancha de hierro. Avances Técnicos Cenicafé No. 13: 1-2. 1972.
8. COLWELL, J. D. Estimating fertilizer requirements (A quantitative approach). Wallingford, CAB International, 1994. 262 p.
9. COMITE DEPARTAMENTAL DE CAFETEROS DE CALDAS. Listado de precios de provisión agrícola. Manizales, 1999. 37 p.
10. COX, F. R. Economic phosphorus fertilization using a linear response and plateau function. *In*: HOOD, T; BENTON, J. Soil and plant analysis in sustainable agriculture and environment. New York, Marcel Dekker, 1997. p. 757-769.
11. CRAMER, L. G.; JENSEN, C. W. Agricultural economics and agribusiness. Singapore, John Wiley & Sons, 1994. 533 p.
12. DEBERTIN, D. Agricultural production economics. New York, Macmillan Publishing Company - University of Kentucky, 1986. 366 p.
13. DONOVAN, L. W.; CATE, R. B.; NELSON, L. A. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelos y las respuestas a los fertilizantes. Raleigh, North Carolina State University, s. f. p. 62-78. (Contract AID 1a-646)
14. ECHEVERRIY L., M. La fertilización de los cafetales basada en el análisis de suelos, la mejor inversión. Avances Técnicos Cenicafé No. 202: 1-8. 1994.
15. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Manual del cafetero colombiano. 3. ed. Bogotá, FEDERACAFÉ, 1969. 398 p.
16. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Manual del cafetero colombiano. 4. ed. Bogotá, FEDERACAFÉ, 1979. 209 p.
17. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Costos de producción de café, Zona Central Cafetera. Santafé de Bogotá, FEDERACAFÉ, 1999. 13 p. (Mecanografiado).
18. GUERRA, W.; CASTELLANOS, T.; HERNÁNDEZ, J. R.; MARTIN, J. Aplicación de funciones de respuesta en la obtención de la dosis óptima económica de fertilizantes en el cultivo del café. Documentos de Ciencia y Tecnología, No. 4: 87-100. 1985.
19. GUERRERO R., R. La recomendación de fertilizantes: fundamentos y aplicaciones. *In*: Curso sobre Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo - FEDERACAFÉ, 1979. 40 p.
20. GUZMÁN G., C.; RIAÑO H., N. Respuesta de las plantas de café en estado de almácigo a la fertilización foliar. Avances Técnicos Cenicafé No. 232: 1-4. 1996.
21. HEADY, E. O.; PESEK, J.; BROWN, W.; DOLL, J. Crop response surfaces and economic optima in fertilizer use. *In*: HEADY, E. O.; DILLON, J. L. Agricultural production functions. Ames, Iowa State University, 1969. p. 475-525.
22. HILL, B. An introduction to economics for students of agriculture. 2. ed. Oxford, Pergamon Press, 1990. 388 p.

23. MARTINEZ R., A. La función de producción: análisis marginal. *In: Curso sobre Análisis Estadístico y Económico sobre Uso de Fertilizantes*. Cali, noviembre 4-21, 1986. Cali, CIAT, 1986. 9 p.
24. MARTINEZ R., A. Introducción al análisis económico de datos experimentales. *In: Curso en Análisis Estadístico y Económico sobre Uso de Fertilizantes*. Cali, julio 11-29 de 1988. Cali, Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes (IFDC) - CIAT, 1988. 13 p.
25. MESTRE M., A. Respuesta del café bajo sombra a la fertilización. *Avances Técnicos Cenicafé No. 231: 1-4*. 1996.
26. MESTRE M., A. Proyecto C-6 Hacienda Mesitas. Chinchiná, Cenicafé, 1970. (Mecanografiado).
27. MESTRE M., A. Proyecto C-6 Subestación Paraguaicito. Chinchiná, Cenicafé, 1970. (Mecanografiado)
28. MESTRE M., A.; SALAZARA, N. Comparación de cinco formas de aplicación del fertilizante en café. *Avances Técnicos Cenicafé No. 153: 1-4*. 1990.
29. MESTRE M., A.; SALAZAR A., N. La investigación agronómica del café en Colombia. *In: Centro Nacional de Investigaciones de Café, 50 años, 1938-1988. Conferencias Conmemorativas*. Chinchiná, Cenicafé, 1990. p. 65-69.
30. POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE. Manual de fertilidad de suelos. Atlanta, Potash & Phosphate Institute, 1988. 85 p.
31. TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Fertilidad de suelos y fertilizantes. Barcelona, Montaner & Simon, 1970. 760 p.
32. URIBE H., A.; MESTRE M., A. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Cenicafé 27(4): 158-173*. 1976.
33. URIBE H., A.; SALAZARA, N. Época de fertilización de las zocas de café. *Avances Técnicos Cenicafé No. 117: 1-4*. 1984.
34. VALENCIA A., G. Encalado del suelo en cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé No. 140: 1-4*. 1988.
35. VALENCIA A., G. Fertilización de los cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé No. 175: 1-8*. 1992.
36. VALENCIA A., G. Fertilización foliar en almácigos de café. *Avances Técnicos Cenicafé No. 49: 1-2*. 1975.
37. VALENCIA A., G. Nutrición mineral del cafeto. *In: Centro Nacional de Investigaciones de Café, Tecnología del cultivo del café*. Chinchiná, Cenicafé-Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, 1987. p. 113-131.
38. VALENCIA A., G.; CARRILLO P., F. Interpretación de análisis de suelos para café. *Avances Técnicos Cenicafé No. 115: 1-8*. 1983.
39. VALENCIA A., G.; CARRILLO P., F. Uso de fertilizantes simples en cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé No. 149: 1-8*. 1990.