

RELACIÓN ENTRE ALGUNOS ÍNDICES DE PRODUCTIVIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DE LUZ, AGUA Y NUTRIENTES EN UN CAFETAL DURANTE SU PRIMERA PRODUCCIÓN DE FRUTOS

E. Velasco[✉], L. Rodríguez, R. Medina, Idalmis Fonseca y J. Verdecia

ABSTRACT. An essay was undertaken with the aim of getting a deeper insight at the relationship between two groups of variables: leaf area and fruit production, as variables featuring the productive potential of a coffee plantation (*Coffea arabica*, L.) on one side and the daily mean irradiance, soil moisture, leaf content of nitrogen, phosphorus and potassium, as variables characterizing available ecosystem resources, on the other side, by means of the multivariate approach of canonical correlations on correlation matrixes. Data were gathered within an experimental area located in «Buey Arriba», Granma province, at 450 m above sea level, using «Caturra Rojo» cv. and a design including plots under a gradient of solar exposition, from open sun to 45 % sun. For the statistical analysis, leaf area, soil moisture and contents of N, P and K were evaluated in 30 randomly distributed plants in the whole area; they were separated according to flowering, fruit growth and harvest stages, then a value of 0.7384 was obtained, which was significant according to χ^2 test ($p < 0.05$) for canonical correlation, taking into account harvesting data. Such correlation was not significant for data of the other stages. The interpretation of analytical results based on correlations between the roots obtained by the method and variables observed denotes the effect of a strong defoliation of plants at open sun and a negative relationship between fruit production and K content at harvesting. The method employed shows relationships among imperceptible variables in the single correlation matrixes.

Key words: productivity, *Coffea arabica*, irradiation, soil water content, mineral nutrients

INTRODUCCIÓN

El tránsito de la fase juvenil a la reproductiva de un cafetal ocurre generalmente durante el segundo año después del trasplante, constituyendo esta una etapa crítica del desarrollo de la plantación, debido a los cambios fisiológicos asociados con la floración y el desarrollo de

RESUMEN. El trabajo se realizó con el objetivo de profundizar en la relación que se establece entre dos grupos de variables: el área foliar (AF) y la producción de frutos, como variables que caracterizan el potencial productivo de un cafetal (*Coffea arabica* L.) por un lado, y la irradiancia media diaria, la humedad del suelo (HS) y el contenido foliar de nitrógeno, fósforo y potasio, variables que en su conjunto caracterizan los recursos disponibles en el ecosistema por otro, utilizando el método multivariado de correlaciones canónicas sobre las matrices de correlación. Los datos se tomaron en un área experimental establecida en el Municipio de Buey Arriba, provincia Granma, a 450 m snm utilizando la variedad Caturra Rojo y con un diseño que generó un gradiente de exposición a la radiación desde parcelas a plena exposición solar hasta parcelas con un exceso de sombra. Para el análisis estadístico, el AF, la HS y los contenidos del N, P y K, se evaluaron en 30 plantas distribuidas al azar en toda el área; se agruparon por separado para las etapas de floración, crecimiento de los frutos y cosecha. Se obtuvo un valor de 0.7384, significativo según la prueba de χ^2 ($P < 0.05$), para la correlación canónica considerando los datos de la etapa de cosecha; para los datos de las otras etapas dicha correlación no resultó significativa. La interpretación de los resultados del análisis, basada en las correlaciones entre las raíces obtenidas por el método y las variables observadas, resalta el efecto de una fuerte defoliación en las plantas a plena exposición solar y una relación negativa entre la producción de frutos y el contenido de K durante la cosecha. El método utilizado refleja relaciones entre las variables que son imperceptibles en las matrices de correlaciones simples.

Palabras clave: productividad, *Coffea arabica*, irradiación, contenido de agua en el suelo, nutrientes minerales

los frutos; de la forma en que la plantación evolucione durante esta etapa, que comúnmente se le denomina “despunte”, dependerá en gran medida la producción de los años siguientes.

La relación entre el contenido de minerales en las hojas y la producción de café ha sido estudiada ampliamente en Cuba (1, 2); de igual forma se conocen las afectaciones asociadas al régimen pluviométrico en determinadas etapas de desarrollo de la plantación (3) y el efecto del nivel de energía radiante disponible para los cafetos durante su desarrollo (4, 5). Sin embargo, son escasos los trabajos que de conjunto abordan la relación entre estas variables y la respuesta productiva de la planta-

E. Velasco, Investigador Auxiliar; Ms.C. L. Rodríguez y Ms.C. R. Medina, Investigadores Agregados; Idalmis Fonseca, Investigadora y J. Verdecia, Especialista del Departamento de Fisiología Vegetal, Instituto de Investigaciones Agropecuarias “Jorge Dimitrov”, CITMA, Gaveta Postal 2140, Bayamo, Granma, CP 85100

✉ ervalasco@udg.co.cu

ción, dada no sólo por la producción de frutos sino también por el desarrollo foliar, el cual en esta etapa no ha alcanzado aún su valor óptimo.

Este trabajo tiene como objetivo cuantificar el grado de asociación existente entre dos conjuntos de variables: el primero dado por el desarrollo foliar y la producción de frutos, como variables respuesta de la plantación – denominados *efectos* - y el segundo dado por los recursos del ecosistema: la disponibilidad de luz, agua y nutrientes – *controles* -, para lo cual se utilizó el método de correlaciones canónicas con el fin de adaptarse al objetivo planteado (6).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la finca Calila, cercana a la localidad de Banco Abajo, Municipio de Buey Arriba, Provincia de Granma, situada a los 20°7'N y 76°47'W, sobre un suelo Fersialítico Pardo Rojizo (7), con limitaciones en su fertilidad dadas por su bajo contenido de materia orgánica y potasio (8). Se establecieron, según se muestra en la Figura 1, tres áreas de 20 x 60 m cada una con las siguientes variantes de sombreado: plena exposición solar (eliminación total de los árboles sombreadores), sombra regulada (se manejaron los árboles de sombra para dar entrada al 70 % de radiación solar) y sombra no regulada (los árboles de sombra se dejaron a libre crecimiento). Las especies de sombra fueron *Gliricidia sepium*, *Samanea saman* e *Inga vera*. El área se encuentra a 450 m snm y la dirección del azimut topográfico es aproximadamente al norte, con una pendiente de entre 20 y 30°. Cada área con una variante de sombreado se dividió en tres parcelas y estas a su vez en dos subparcelas, en cada una de las cuales se trasplantó la variedad Caturra Rojo utilizando dos distancias de plantación (0.40 m y 0.70 m entre plantas y 2 m entre hileras).

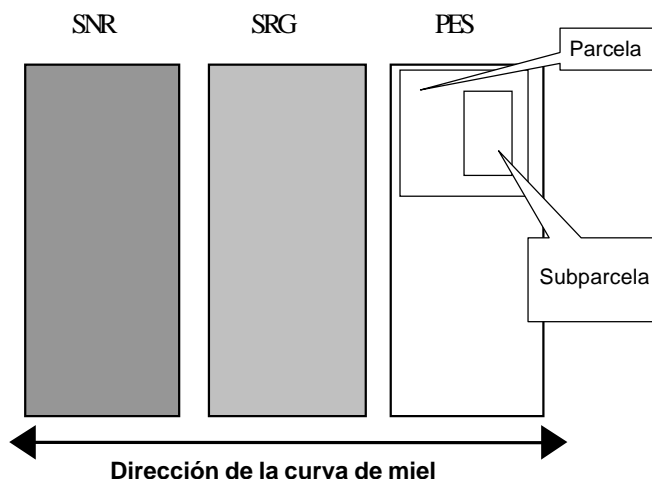


Figura 1. Representación simplificada del diseño experimental

Para la evaluación de la irradiancia integral diaria (Q, radiación solar global), se utilizaron piranómetros cuyos sensores se colocaron sobre plataformas situadas siempre a un nivel superior al follaje de los cafetos. La irradiancia se registró cada 15 minutos durante la duración del brillo solar, determinándose Q por integración manual. La humedad del suelo (HS) se determinó por gravimetría, a 20 y 40 cm de profundidad, y luego se promediaron los valores de ambas profundidades. Los contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) se evaluaron en hojas representativas del estado nutricional de la planta, en cinco plantas por subparcela en los meses de febrero y abril (etapa de floración-FLO), junio (etapa de crecimiento de los frutos-CFR) y septiembre y noviembre (etapa de maduración-MAD).

Para la evaluación del área foliar (AF), se midieron en el campo las longitudes de todas las hojas de cada una de 30 plantas seleccionadas al azar dentro de toda el área experimental y diez por cada variante de sombreado; luego se utilizó un modelo matemático obtenido en la misma plantación (9) mediante el cual, conociendo la longitud de la hoja, se puede calcular su área foliar. La producción de café cereza (PF) se evaluó en las mismas plantas.

Las variables denominadas *controles* se evaluaron a nivel de parcela (Q) o subparcela (HS, N, P y K), asignándose dichos valores a los individuos (plantas) en dependencia de la parcela en que estaban situados. En el caso de Q, el valor es la media anual y como tal se asignó a todas las etapas. La HS, al igual que los contenidos de minerales y el AF se evaluaron por etapas. Con los datos de cada etapa se conformó la matriz de datos originales (30 individuos) y se aplicó el método de correlaciones canónicas por separado para cada etapa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La correlación entre la PF y el AF-efectos- varió en dependencia de la etapa fenológica en que se evaluó esta última; la máxima correlación se verificó con la evaluación del AF realizada en la etapa de FLO con un valor de 0.7594. En las etapas subsiguientes de CFR y MAD las correlaciones bajaron a 0.5070 y 0.4029, las cuales resultaron significativas para $p < 0.05$, confirmándose la estrecha relación existente entre estas variables. La máxima correlación entre estas variables en la etapa de FLO indica que las plantas que en este momento tengan mayor AF están mejor preparadas para una buena cosecha.

Dentro de los controles se encontraron las correlaciones más altas entre el contenido foliar de fósforo con la energía disponible (luz) y con la humedad del suelo en las etapas de FLO y COS, y de estas dos últimas variables entre sí en todas las etapas (Tabla I). Además de estas correlaciones, se registraron otras entre los elementos nutrientes en determinadas etapas y finalmente una de las correlaciones más altas pero negativa entre el nivel de exposición a la radiación solar y el contenido de potasio en las hojas en la etapa de COS.

Tabla I. Coeficientes de correlación simple entre las variables del segundo grupo según etapa de evaluación. Los valores en negritas son significativos para $p < 0.05$

	Q	HS	N	P	K
	Floración				
Q	1.0000	0.6161	-0.3418	0.5616	0.1674
HS		1.0000	-0.5019	0.4481	0.3544
N			1.0000	-0.0141	-0.5679
P				1.0000	0.4382
K					1.0000
	Crecimiento de los frutos				
Q	1.0000	0.4851	0.1490	0.1425	-0.3250
HS		1.0000	-0.0467	-0.0961	0.0698
N			1.0000	0.1485	0.0078
P				1.0000	-0.3872
K					1.0000
	Cosecha				
Q	1.0000	0.6153	0.0462	0.5030	-0.6371
HS		1.0000	0.1382	0.6422	-0.1885
N			1.0000	0.4505	0.0308
P				1.0000	-0.2509
K					1.0000

En la Tabla II se presentan los coeficientes de correlación entre las variables observadas de diferente grupo por etapas, donde puede apreciarse que ninguno de estos coeficientes de correlación resultó significativo en las etapas de FLO y CFR; en la etapa de MAD resultaron significativos los coeficientes de correlación negativos entre el área foliar y la disponibilidad de luz, de agua en el suelo y de fósforo foliar. La producción de frutos no se correlacionó significativamente con ninguna variable de este grupo en ninguna de las etapas.

Tabla II. Coeficientes de correlación simple entre las variables de distinto grupo. Los valores en negritas son significativos para $p < 0.05$

	Q	HS	N	P	K
	Floración				
PF	-0.0719	-0.0592	0.2250	0.0949	0.0313
AF	0.0454	0.0229	0.2288	0.2589	0.1575
	Crecimiento de los frutos				
PF	-0.0719	-0.1620	0.2497	0.3224	-0.3036
AF	0.1454	0.1881	-0.1752	0.0593	-0.1596
	Cosecha				
PF	-0.0719	-0.2909	0.2341	-0.1339	-0.1951
AF	-0.5075	-0.6337	0.1514	-0.4792	0.3457

La asociación positiva del nivel de exposición a la radiación con la humedad del suelo y el contenido de fósforo en las hojas pone de relieve el efecto del cultivo a plena exposición solar sobre los recursos del ecosistema, de forma directa en el caso de la humedad del suelo e

indirecta al tratarse del contenido de fósforo. Se dice directa para la humedad del suelo, porque la eliminación de los árboles sombreadores puede traer como consecuencia un aumento en la humedad del suelo, al elevarse la efectividad de las lluvias -debido a que se anula la interceptación de las precipitaciones por el estrato sombreador (10)- y también al aumentar la cantidad de rocío que se deposita en las áreas expuestas en comparación con las sombreadas (11). El más alto contenido de fósforo en las hojas de plantas más expuestas a la radiación se aprecia como efecto indirecto, que se manifiesta a consecuencia de la mayor tendencia al estado reproductivo de los cafetos a plena exposición solar en relación con los cafetos sombreados, respecto a la asociación positiva que existe entre el contenido de fósforo foliar y la tendencia a dicho estado (12).

El análisis de correlaciones canónicas para los datos en la etapa de FLO dio un valor para la primera correlación canónica de 0.4574 (sin significación estadística: $\chi^2=6.38$, $p=0.7825$) y de 0.6310 en la etapa de CFR ($\chi^2=14.067$, $p=0.17$), tampoco estadísticamente significativo. En cambio, para los datos de la etapa de MAD la correlación canónica alcanzó el valor de 0.7384, con una probabilidad de error de 0.00696 para el rechazo de la hipótesis de correlación canónica nula. El valor de esta correlación supera, de acuerdo con la teoría (13), el máximo valor de las correlaciones simples entre variables de distinto grupo (Tabla II).

En la Tabla III se presenta la estructura de las raíces extraídas por el método, la cual viene dada por las correlaciones entre dichas raíces y las variables observadas, elementos importantes para interpretar los resultados del análisis. La primera raíz está correlacionada positivamente con la disponibilidad de luz, agua y fósforo y negativamente con el área foliar; el rendimiento y el contenido de potasio foliar, actuando en sentido contrario, caracterizan la segunda raíz. Entre las dos raíces extraen más de la mitad de la varianza total del grupo de los controles y la redundancia total en este grupo es inferior a la cuarta parte de la varianza total, denotando esto último que una parte considerable de la varianza del mismo no está directamente relacionada con los efectos (el desarrollo foliar y la producción de frutos). La redundancia total del grupo de los efectos es de aproximadamente el 40 %. El análisis de correlaciones canónicas fue utilizado para relacionar un grupo de indicadores fisiológicos de dos especies forestales con las variables climáticas del lugar de origen (14) de cada una con resultados cuantitativos similares a los de este trabajo.

La combinación del primer grupo perteneciente a la primera raíz está fuertemente correlacionada con el área foliar y contiene aproximadamente el 57 % de la varianza total de este grupo. Su contrapartida del segundo grupo, que extrae el 32 % de la varianza contenida en este, está correlacionada con la exposición a la radiación, con la humedad del suelo, y con el contenido foliar de fósforo. La interpretación de esta correlación canónica conduce a

reconocer que las plantas bajo altas irradiancias, a las que están asociados altos contenidos de fósforo foliar y relativamente altos niveles de humedad del suelo tienen poca área foliar. La defoliación ocurrida en este ensayo, más intensa en las parcelas al sol fue informada anteriormente (8). El hecho de que esta relación se manifieste en la etapa de cosecha induce a pensar en un posible efecto o relación entre tal defoliación y la producción de frutos; sin embargo, la estructura de la raíz no apoya esta razón, ya que la producción de frutos se correlaciona en el mismo sentido que el área foliar con esta raíz. Una explicación alternativa podría estar basada en la observación de que las hojas que han crecido bajo niveles altos de irradiancia, adquieren durante su desarrollo características apropiadas para realizar la fotosíntesis en estas condiciones, como puede ser un punto relativamente alto de compensación de luz, lo cual las torna fotosintéticamente ineficientes cuando, producto de la intercepción de la luz por la parte superior del follaje, quedan expuestas a bajas irradiancias (15). Esta diferencia las pondría en tal desventaja en la competencia por los productos de la fotosíntesis en relación con las hojas de la parte superior del dosel que se aceleraría su senescencia (16).

Tabla III. Estructura de las raíces extraídas para los datos correspondientes al muestreo de cosecha

Correlación canónica	0.7384** (p<0.01)	
	Raíz-1*	Raíz-2
Primer Grupo		
Área Foliar	-0.9999	-0.0051
Rendimiento	-0.3983	-0.9173
Varianza extraída	0.5793	0.4207
Redundancia	0.3159	0.0841
Segundo Grupo		
Radiación	0.6882	-0.3182
Humedad del suelo	0.8579	0.0943
Nitrógeno foliar	-0.2037	-0.425
Fósforo foliar	0.6494	-0.1393
Potasio foliar	-0.4707	0.8134
Varianza extraída	0.3189	0.1944
Redundancia	0.2066	0.0388

(*): Los valores representan las correlaciones entre las raíces y las variables observadas

La segunda raíz proporciona una combinación en el primer grupo estrechamente correlacionada con la producción de frutos y su contrapartida en el grupo de los controles está fuertemente correlacionada con el contenido de potasio foliar. Las conocidas extracciones de potasio que realiza la cosecha de café (1) indudablemente están latentes en esta segunda raíz. Es aquí donde se evidencian las potencialidades del método de correlaciones canónicas, ya que a nivel de correlaciones simples no se encontró correlación entre la producción de frutos y el contenido de potasio foliar en ninguna de las etapas.

A esta segunda raíz se asocia una porción notable de la varianza (Tabla II), principalmente en el primer grupo (42 %). Este resultado debe ser interpretado sobre la base de la regla del análisis multivariado, de que la relación entre el contenido de K y la PF no se manifiesta directamente individuo a individuo; recuérdese que la correlación simple entre ambas variables fue notablemente baja (Tabla II), sino que es un resultado de la variación conjunta de todas las variables que entran en el análisis.

No debe pasarse por alto el hecho de que las raíces canónicas están incorrelacionadas, lo cual significa que, según la interpretación propuesta, la defoliación ocurrida entre la etapa del CFR y la MAD no está correlacionada con la extracción de K foliar que realizan los frutos. Esto quiere decir que con el modelo propuesto se desvincula el descenso del potasio foliar con la defoliación. No obstante, este aspecto requiere más evidencias, además de tener en cuenta que el método se ha aplicado en un escenario concreto, caracterizado por plantas (individuos) sometidas a diferente intensidad de radiación solar y que en otras circunstancias pueden manifestarse otras relaciones. Por ejemplo, se ha encontrado que un incremento en el suministro de K redujo la caída de hojas en condiciones de estrés hídrico en seis clones de *Populus sp* (17). Observando con más atención la estructura de la primera raíz, se puede apreciar cierta participación del contenido de K precisamente en el mismo sentido que el área foliar, lo que está relacionado sin duda con la correlación positiva entre estas variables (Tabla II).

REFERENCIAS

- Rivera, R. Metodología para calcular los requerimientos nutricionales del cafeto. *Cultivos Tropicales*, 1993, vol. 14, no. 1, p. 28-34.
- González, C. /et al./ Extracción de nutrimentos por el cafeto hasta los 52 meses de plantado. Vías para restituirlos. Simposio Internacional de Café y Cacao CUBACAFÉ99, Programa, Conferencias y Resúmenes. (1999 nov. 25-27 : Santiago de Cuba). p. 65.
- Bustamante-González, C. y González-Labrada, J. A. Influencia de algunas variables climáticas en el crecimiento de *Coffea arabica* en las condiciones del III Frente. En: Simposio Internacional de Café y Cacao CUBACAFÉ99, Programa, Conferencias y Resúmenes. (1999 nov. 25-27 : Santiago de Cuba). p. 49.
- Cortés, Sara y Simón, Estela. Diferentes tecnologías de cultivo del cafeto *Coffea arabica* L. *Cultivos Tropicales*, 1991, vol. 12, no. 3, p. 76-79.
- Ramos, R. y Cortés, Sara. Diferentes tecnologías de cultivo en el cafeto (*Coffea arabica* L.) evaluadas en las localidades de Sagua de Tánamo. *Cultivos Tropicales*, 1994, vol. 15, no. 1, p. 36-39.
- Varela, M. Análisis Multivariado de datos. Aplicación a las Ciencias Agrícolas. San José de las Lajas, INCA, 1998.
- Cuba. Instituto de Suelos. Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba. La Habana: AGRINFOR. Ciudad de la Habana, 1999, 64 p.

8. Rodríguez, L. A. /et al./ Niveles óptimos de radiación solar y su relación con el crecimiento vegetativo, desarrollo foliar y la productividad del cafeto (*Coffea arabica* L.). *Cultivos Tropicales*, 1999, vol. 20, no. 4, p. 45-49.
9. Rodríguez-L., L. y Pérez-A., O. Estimación indirecta del área y la biomasa foliar en plantas de cafeto al sol y bajo sombra. *Centro Agrícola*, 1995, vol. 4, p. 23-26.
10. Jaramillo-R., A. y Chávez-C., B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *CENICAFÉ*, 1999, vol. 50, no. 2, p. 97-105.
11. Dell'amico, J. /et al./ Evaluación del aporte de agua de rocío en el cultivo del tomate. *Cultivos Tropicales*, 1996, vol. 17, no. 1, p. 39-41.
12. Salisbury, F. B., Ross, C. W. *Plant Physiology*. Wadsworth Pub. Co. Belmont, 1992. 325 p.
13. Jonhson, R. A., Wichern, C. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 2ed. New York. Prentice-Hall, 1988. 607 p.
14. Benowicz, A., Guy, R. D. y El Kassaby, Y. A. Geographic pattern of genetic variation in photosynthetic capacity and growth in two hardwood species from British Columbia. *Oecologia*, 2000, vol. 123, no. 2, p. 168-174.
15. Taiz, L. y Zeiger, E. *Plant Physiology*. Sunderland. Sinauer Associates, 1998, 792 p.
16. Thomas, H.; Howarth, C. J. Five ways to stay green. *J. Exp Bot.*, 1999, vol. 51, p. 329-337.
17. Harvey, H. P. y Van den Driessche, R. Nitrogen and potassium effects on xylem cavitation and water use efficiency in poplars. *Tree Physiology*, 1999, vol. 19, no. 4, p. 943-950.

Recibido: 5 de marzo del 2001

Aceptado: 17 de septiembre del 2001