

ASOCIACIÓN ENTRE CRECIMIENTO VEGETATIVO Y CARGA DE FRUTOS EN FORMACIÓN CON PROGENIES DE *Coffea arabica* L

Andrés Felipe León-Burgos  *, José Raúl Rendón  *, Alexander Jaramillo Jiménez  *, Luis Carlos Imbachi  **, Claudia Patricia Flórez Ramos  ***

León-Burgos, A. F., Rendón, J. R., Jaramillo-Jiménez, A., Imbachi, L. C., & Flórez, C. P. (2024). Asociación entre crecimiento vegetativo y carga de frutos en formación con progenies de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75201. <https://doi.org/10.38141/10778/75201>



Los incrementos en la carga de frutos de café a nivel de la planta pueden modificar el desarrollo foliar. El objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre el crecimiento vegetativo y la cantidad de frutos en formación con progenies de *Coffea arabica*. Las evaluaciones se realizaron en plantas de café de tres años de edad y en siete progenies. Se seleccionó una población total de 54 plantas y en estas se registró el crecimiento de las hojas y ramas, acumulación de masa seca y se calcularon algunos índices de crecimiento. También se estimó la altura, número de ramas productivas y frutos en cada progenie por planta. Se definieron cuatro grupos en relación con los frutos por rama, donde G1 y G2 agruparon alrededor del 75% de la población de CU1819 y CU1825, con cargas de frutos entre 75 a 95 frutos por rama en promedio. El análisis de componentes principales explica las alteraciones en las medidas de formación foliar y acumulación de masa seca con cargas mayores a 75 frutos por rama. Por otro lado, por planta se registraron en promedio 174,92 cm en altura, 39 ramas productivas y 1.337 frutos. Estos resultados indican que hay una correlación negativa entre cargas mayores a 75 frutos por rama con el crecimiento vegetativo; de igual forma, fueron identificados rasgos fenotípicos compartidos y propios de la población evaluada, lo que resalta la utilidad del análisis multivariado para los estudios de diversidad genética de las variedades de café desarrolladas en Colombia.

Palabras clave: Mejoramiento de café, acumulación de masa seca, análisis de componentes principales, componentes de producción, rasgos agronómicos, relación área foliar por fruto, Colombia.

RELATIONSHIP BETWEEN VEGETATIVE GROWTH AND BORE PINHEAD FRUIT LOADS FOR *Coffea arabica* L PROGENIES

The increased fruit load for coffee plants can modify foliar formation. The objective of this study was to evaluate the relationship between vegetative growth and fruit loads in *C. arabica* progenies. The experiment was carried out on three-year-old trees and with seven progenies. A population of 54 plants was established, and the growth of leaves, branches, and dry mass accumulation per branch were evaluated, and growth indices were calculated. Likewise, height, number of productive branches, and fruits per plant were estimated for each progeny. Four groups were defined according to fruits per branch, where G1 and G2 grouped around 75% of the CU1819 and CU1825 population, which registered between 75 to 95 fruits per branch on average. The principal components analysis explains the alterations for the leaf formation and dry mass accumulation with loads greater than 75 fruits per branch. On the other hand, for each plant, an average of 174.92 cm in height, 39 productive branches, and 1,337 fruits were reported. These results indicate that with more than 75 fruits per branch, there is a negative correlation with vegetative growth; likewise, shared and specific phenotypic traits in the population of plants were identified, which highlights the usefulness of multivariate analysis for studies of the genetic diversity of coffee varieties developed in Colombia.

Keywords: Coffee breeding, agronomic traits, dry mass accumulation, leaf area-to-fruit ratio, principal component analysis, yields components, Colombia.

* Asistente de Investigación, Investigador Científico I y Auxiliar de Investigación. Disciplina de Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones del Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-9765-0223>, <https://orcid.org/0000-0002-5676-4670> y <https://orcid.org/0000-0003-4580-1613>, respectivamente.

** Asistente de investigación. Disciplina de Biometría, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-4356-694X>

*** Investigador Científico III. Disciplina de Mejoramiento Genético, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-2859-3496>



El cultivo de *Coffea arabica* L en Colombia es sembrado en rangos altitudinales entre los 1.000 a 2.000 m, bajo esta franja se ha reportado que existe una complejidad climática con variabilidad temporal en las condiciones ambientales respecto a los diferentes pisos térmicos donde es establecido el cultivo (Jaramillo, 2018; García et al., 2014). Esta particularidad ha permitido determinar que la disponibilidad de agua y radiación solar interviene en el comportamiento específico de la planta e influye en los niveles de producción para cada región (DaMatta et al., 2018; Arcila et al., 2007). Así mismo, las diferencias en las condiciones ambientales establecen un reto para mantener la resistencia genética a enfermedades como la roya del café (Silva et al., 2022; Quiroga-Cardona, 2021). Por consiguiente, evaluar el desempeño agronómico de las progenies de café mejoradas en los diferentes rangos altitudinales del país, constituye una de las alternativas más resilientes del programa de mejoramiento genético de café en Colombia (Cenicafé, 2021).

Las variedades de café desarrolladas por Cenicafé implementan como eje central la diversidad genética, es decir, están conformadas por varias progenies, como una de las estrategias para garantizar la resistencia genética durable a enfermedades y reunir rasgos agronómicos de interés (Flórez et al., 2021; Maldonado y Giraldo, 2020; Flórez et al., 2016). En estos materiales se destaca su alta capacidad productiva, buenas características físicas del grano y excelente calidad sensorial de la bebida (Flórez et al., 2017). También ha sido corroborada la adaptación tanto a los sistemas de producción a libre exposición solar como bajo sombra, y se ha explorado que presentan una tolerancia moderada a escenarios de déficit y excesos hídricos del suelo (Lince et al., 2024; León-Burgos et al., 2022ab; Cenicafé, 2020). Por estas razones, la adopción de las variedades de café mejoradas se constituye en

uno de los componentes clave para asegurar la productividad y rentabilidad de los caficultores colombianos (Duque et al., 2021).

La etapa productiva del cultivo de café para Colombia inicia entre los 18 hasta 24 meses después del establecimiento en el campo, con impactos en el crecimiento vegetativo de la parte aérea y en el manejo agronómico del cultivo (Rendón, 2020; Arcila et al., 2007). Ha sido reportado que hay una correlación negativa entre crecimiento vegetativo y la cantidad de frutos, lo que ha explicado las reducciones en la magnitud y velocidad del crecimiento de las ramas plagiotrópicas y en la formación foliar, cuando se incrementa la carga de frutos a nivel del árbol (Rakocevic et al., 2020; Echeverría-Beirute et al., 2018). Así mismo, en ciertas edades de la planta, se concentra un gran volumen en la producción durante el ciclo productivo con el uso de variedades mejoradas y esto podría conllevar un desbalance en el área foliar requerida para el desarrollo de los frutos de café, particularmente, en plantaciones establecidas a libre exposición solar (Unigarro et al., 2021; Almeida et al., 2021). Todas estas implicaciones generan limitaciones en la expresión del desempeño agronómico de las plantas, puesto que el sistema de producción a libre exposición solar es el de mayor área sembrada en Colombia (FNC, 2022).

Los frutos de café son órganos vertederos con alta capacidad para competir por carbohidratos y nutrientes respecto a las hojas en formación y al crecimiento plagiotrópico de las ramas, generalmente, cuando inicia su crecimiento acelerado o etapa de llenado (León-Burgos et al., 2024a; Toro-Herrera et al., 2024; Chave et al., 2012). Esto ha conducido a postular la hipótesis que una alta producción de frutos de café compite fuertemente con el crecimiento vegetativo, en el que puede alterar los patrones de producción por reducciones en la cantidad de nudos vegetativos formados en

etapas de crecimiento previas (Cambou et al., 2021; Castro-Tanzi et al., 2014). Sin embargo, en la etapa de crecimiento lento o desarrollo inicial de los frutos, caracterizada por los altos costos respiratorios e inicio de extracción de nutrientes, se ha explorado poco el balance del crecimiento vegetativo y reproductivo y sus implicaciones en la relación fuente-vertedero, como un aspecto crucial para comprender los desbalances en la formación foliar reportados en etapas posteriores del desarrollo del fruto (Ságio et al., 2013; Ocampo et al., 2010; DaMatta et al., 2008).

Métodos estadísticos univariados y multivariados han sido empleados para agrupar las respuestas o variabilidad genética de genotipos o progenies en diversos ambientes (Baraki et al., 2020; Malik et al., 2014). Los análisis multivariados constituyen uno de los métodos más eficientes para comparar los rasgos y desempeño genético de los genotipos, dado que puede proporcionar muchas opciones que resumen las respuestas fenotípicas y su asociación, para categorizar individuos dentro de grupos, con el fin de estudiar las respuestas idénticas presentes en una población (Zafar et al., 2022; Baraki et al., 2020). El análisis de componentes principales y por clúster son las técnicas más usadas porque permiten explorar diferencias entre diversas variables y sus posibles asociaciones, que en conjunto proporciona un entendimiento del grado de relación y su naturaleza entre rasgos (Zafar et al., 2022; Rathinavel, 2014). Por lo tanto, estas herramientas estadísticas pueden ser útiles para mejorar el entendimiento de los rasgos agronómicos como los niveles de productividad compartidos entre las progenies que conforman las variedades de café desarrolladas en Colombia (Gebreselassie et al., 2024; Weldemichael Abrha et al., 2022; Montagnon & Bouharmont, 1996).

Se ha considerado que, para expresar una mayor productividad en variedades

desarrolladas en café, se requiere de la adopción de un plan de manejo agronómico oportuno y adecuado (Duque et al., 2021). En relación con lo anterior, si es necesario fortalecer las recomendaciones técnicas o agronómicas del manejo del cultivo, hay que determinar el impacto del crecimiento y la producción de frutos a nivel de la planta, en particular, en progenies reconocidas por su alta capacidad productiva en el país (Cenicafé, 2020; Arcila et al., 2007). Por consiguiente, se formula el siguiente planteamiento de hipótesis: con las técnicas multivariadas es posible establecer rasgos agronómicos adecuados para determinar correlaciones negativas entre crecimiento vegetativo y reproductivo, así como identificar rasgos compartidos e idénticos en las progenies. De esta manera, el objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre el crecimiento vegetativo y la cantidad de frutos en formación con progenies de *C. arabica*, por medio del enfoque multivariado en una plantación establecida a plena exposición solar, ubicada en la zona central cafetera de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio, condiciones climáticas y material vegetal

Este estudio fue realizado en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, localizada en el municipio de Chinchiná, departamento de Caldas-Colombia (04° 58' N; 75° 39' W), ubicada sobre los 1.381 m de altitud. Se utilizaron plantas de café de tres años, edad que representa una de las cosechas anuales más abundantes del cultivo (Rendón, 2020). Durante el período del estudio desde enero hasta abril del 2022, se presentaron las siguientes condiciones climáticas promedio: temperatura media de 20,68°C ± 0,18 (± corresponde al error estándar), 17°C de temperatura mínima ± 0,17, temperatura máxima de 25,95°C ±

0,37, precipitación acumulada de 1.242 mm \pm 2,84, brillo solar acumulado de 478,3 h \pm 0,50 y una humedad relativa de 83,97% \pm 0,92. Los datos climáticos fueron tomados de la red meteorológica de tipo convencional perteneciente a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, disponibles en la plataforma Agroclima. (2024).

El material vegetal es proveniente de la especie *C. arabica* de los cruzamientos entre variedad Caturra y el híbrido Timor, son resistentes a *Hemileia vastatrix* (roya del café) y a *Colletotrichum kahawae* conocida como la enfermedad de la cereza del café (Flórez et al., 2016). Se usaron siete progenies procedentes de la Colección Colombiana de Café (Arias, 2023), codificadas de la siguiente manera: CU1819 (diez plantas), CU1825 (nueve), CU1953 (seis), CU1993 (diez), CU2021 (siete), CU2034 (seis) y CX2866 (seis). En total, se evaluó una población de 54 plantas, la plantación fue establecida a libre exposición solar con un distanciamiento de 1,4 m entre surcos x 1,0 m entre plantas y una densidad de siembra de 7.142 plantas/ha. Se priorizaron prácticas agronómicas para la producción comercial de café, las cuales incluyeron aplicación de enmiendas, fertilizantes y control de plagas y enfermedades (Cenicafé, 2021). Finalmente, para el seguimiento de las mediciones en cada planta y por progenie, se seleccionaron cuatro ramas plagiotrópicas en la parte media del dosel de las plantas (zona más productiva), de acuerdo con lo reportado por Arcila et al. (2007).

Mediciones de crecimiento

Crecimiento vegetativo aéreo. Se muestrearon las ramas plagiotrópicas seleccionadas de cada planta y por progenie, durante los 35 hasta 60 días después de la floración principal-DDFP (fase lenta de crecimiento del fruto), donde no se evidencian cambios representativos

en la acumulación de la masa seca de los frutos (Arcila et al., 2007). Se evaluaron medidas de crecimiento como longitud de ramas plagiotrópicas (LRP), número de hojas totales (NHT), número de nudos totales (NNT), área foliar por hoja (AF) y relación del área foliar por fruto (RAFF). El NHT y NNT se estimaron por conteos directos en cada una de las ramas. La LRP se midió desde la base donde se une al tallo principal hasta el ápice de la rama, por medio de un flexómetro.

El AF fue estimada midiendo el largo de la lámina foliar (sin incluir el peciolo) y el ancho de la parte media de cada hoja, usando una regla. Las mediciones se realizaron en todas las hojas disponibles en cada rama. Luego, los datos fueron incorporados en la Ecuación <1> propuesta por Unigarro-Muñoz et al. (2015):

$$EAF = 0,99927 * (L * (-0,14757 + 0,60986 * W)) <1>$$

Donde, EAF es la estimación del área foliar por hoja, L longitud de la hoja y W ancho de la hoja. La relación del área foliar por fruto (RAFF) se calculó por medio de la acumulación del área foliar (AFT) y la cantidad de frutos registrados en la rama.

Acumulación de masa seca. Se determinó la masa seca total (MST) y su partición en los órganos de la parte aérea (rama, hojas y frutos) en cada una de las ramas, entre los 35 hasta 60 DDFP. Las muestras se secaron en una estufa a 65°C por 72 h, hasta peso constante, y posteriormente se pesaron en una balanza analítica con precisión de 0,01 g, donde se determinó la masa seca de la rama (MSR), masa seca de las hojas (MSH), masa seca de los frutos (MSF) y masa seca total (MST). Posteriormente, la partición de la MST se calculó como la relación de la masa de las ramas (RMR=MSR/MST), relación de la masa

de las hojas ($RMH=MSH/MST$) y relación de la masa de los frutos ($RMF=MSF/MST$). También se estimaron medidas de crecimiento indirectas como la relación del área foliar ($RAF=AFT/MST$) y área foliar específica ($AFE= AFT/MSH$), de acuerdo con Hunt. (1990).

Cuantificación de la cantidad de frutos

Se registró el número de frutos por planta y progenie en abril del 2022, por conteo directo en cada rama plagiotrópica productiva y solo se consideraron frutos denominados “cabeza de alfiler”, los cuales tenían un desarrollo entre 35 a 60 DDFP, asociados con la etapa fenológica BBCH71. La época de muestreo fue definida con base en los registros de los botones florales, los cuales se estimaron con la metodología propuesta por Rendón y Montoya (2015). En consecuencia, la fecha de muestreo en la que se estimó la cantidad de los frutos, abarca alrededor del 75% de los eventos de floración para la cosecha principal del área de estudio.

Análisis estadísticos

El análisis de los datos se llevó a cabo mediante un enfoque multivariado, en el cual se consideró la población total (54 plantas). Antes de realizar los análisis respectivos, se estandarizaron los valores para cada variable por medio de su media y desviación estándar. Este proceso tiene como objetivo garantizar una contribución equitativa de todas las variables, donde se uniformizan las varianzas; así, se logra reflejar con precisión las relaciones subyacentes entre las variables, con una interpretación más fiable y robusta de los datos. Se utilizó una agrupación jerárquica con distancia Manhattan como medida de disimilitud y se agrupó con el método de Ward, para categorizar los grupos según el número de frutos por rama en cada progenie. Posteriormente, se exploraron las relaciones entre las medidas de crecimiento,

cantidad de frutos por rama y su contribución porcentual en cada componente con un análisis de componentes principales (ACP) y los grupos asignados fueron graficados en relación a la primera y segunda componente principal (CP1) y (CP2). Para este análisis se usó el paquete factextra versión 1.0.7 (Kassambara y Mundt, 2020). Se aplicó una prueba t-Student ($p < 0,05$) para identificar diferencias en las medidas de crecimiento y los grupos definidos con los análisis descritos anteriormente, después de cumplir con los supuestos de normalidad (prueba de Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianzas (prueba Levene).

También se empleó un análisis de correlación Spearman entre las medidas de crecimiento y el número de frutos por rama mediante el paquete estadístico Corrplot versión 0.92 (Wei y Simko, 2021). Todos los análisis fueron realizados en el software R versión 4.0.4 con el paquete estadístico Stats (R Development Core Team, 2021) y para las gráficas se usó Sigmaplot versión 10.0 (Inpixon, Systat Software Inc, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las progenies según el crecimiento vegetativo y carga de frutos

Con el análisis de agrupamiento se determinaron cuatro grupos o clúster según el número de frutos en formación por rama, en la población con las siete progenies evaluadas. Con este número de clúster se estabilizó la variabilidad intra grupos del conjunto de los datos (dato no mostrado). Así fueron definidos para el grupo-G1, ocho plantas en las que se registraron entre 88 a 111 frutos por rama, el G2 agrupó 19 plantas con 65 a 85 frutos, el G3 con 13 plantas desde 22 a 39 frutos y, por último, en el G4 se asociaron 14 plantas con 43 a 57 frutos por rama (Figura 1a). De acuerdo con la carga de frutos por rama, los grupos se

clasificaron de la siguiente manera: G1 muy buena (93 frutos por rama en promedio), G2 buena (75), G3 baja (31) y G4 intermedia (64). También, en la Figura 1b, se muestra la distribución de las plantas por progenie, en la que pueden resaltarse CU1819 y CU1825 porque agrupan alrededor del 75% en promedio de su población con cargas de frutos entre buena y muy buena para este estudio. Estos resultados demuestran que el análisis por clúster es una herramienta útil para identificar las respuestas idénticas de los componentes de rendimiento entre progenies (Zafar et al., 2022), lo cual ha sido usado para comparar la estabilidad de los rendimientos en genotipos de *C. arabica* (Gebreselassie et al., 2024; Weldemichael Abrha et al., 2022).

Una vez definidos los grupos, es necesario explorar las asociaciones o rasgos compartidos en el comportamiento del crecimiento vegetativo aéreo de las plantas. Para las medidas de formación foliar hay diferencias significativas ($F= 18,25$; $p=0,00000002$) en RAFF comparadas entre los grupos (Tabla 1). Se demostró para G3 mayor valor promedio de RAFF con diferencias estadísticas en relación a G1, G2 y G4. Con estos resultados se evidencia que, a mayor número de frutos en formación por rama, se detecta que hay una reducción en la relación funcional del área foliar a valores por debajo del estándar de 20 cm^2 por fruto para *C. arabica* (DaMatta et al., 2008). Así mismo, con la disminución de RAFF indirectamente puede asociarse un desbalance prematuro de la relación fuente y vertedero (Bote y Vos, 2016), particularmente, para G1 y G2 al registrar los menores valores. Este hallazgo podría reflejar anticipadamente que las plantas pertenecientes a estos grupos, en etapas de desarrollo del fruto posteriores a las evaluadas en este estudio, se afecta considerablemente su crecimiento vegetativo aéreo y esto ha sido confirmado para variedades de café mejoradas en Colombia (León-Burgos

et al., 2024b; Unigarro et al., 2021). En tanto a las otras medidas como NHT, NNT, AF y LRP, no se detectó diferencias estadísticas, por lo que puede presumirse que los grupos comparten respuestas similares en estas medidas de formación foliar para este estudio.

Para todas las medidas de acumulación de la masa seca, se presentaron variaciones en los grupos definidos, contrario a los resultados con las medidas de formación foliar descritos anteriormente. En los grupos G1 y G2 al registrar mayor número de frutos por rama se incrementó la RMF y RMR con diferencias estadísticas ($F= 5,736$; $p= 0,001$ y $F=3,88$; $p =0,01$) respecto a G3 y esto se explica por la correlación positiva y significativa de estas medidas reportadas en este estudio (Figura 2a). El aumento en la carga de frutos también favoreció la mayor acumulación de MST en G1, G2 y G4 en comparación con G3 con diferencias significativas ($F=16,5$; $p=0,0000001$) y este resultado es asociado por la correlación positiva entre NFR y MST (Figura 2a). Los resultados de las interrelaciones entre incremento de la carga de frutos y MST han sido previamente reportados para *C. arabica* en la etapa fenológica madurez fisiológica del fruto por León-Burgos et al. (2024b) y Vaast et al. (2005).

Caso contrario ocurrió para RMH, RAE y AFE donde hay mayores valores promedios para G3, con diferencias en relación con G1, G2 y G4 ($F=8,25$; $p=0,001$, $F= 10,21$; $p= 0,00002$ y $F=4,269$; $p=0,009$, respectivamente) (Tabla 2). Esto último ha sido relacionado por la fuerza vertedero de los frutos de café que ocasiona mayor asignación de carbono (alta competencia) con impactos negativos en los órganos vegetativos (Bote y Vos, 2016). Con estos resultados, preliminarmente se corrobora que en etapas de crecimiento inicial del fruto de café existe una competencia prematura por

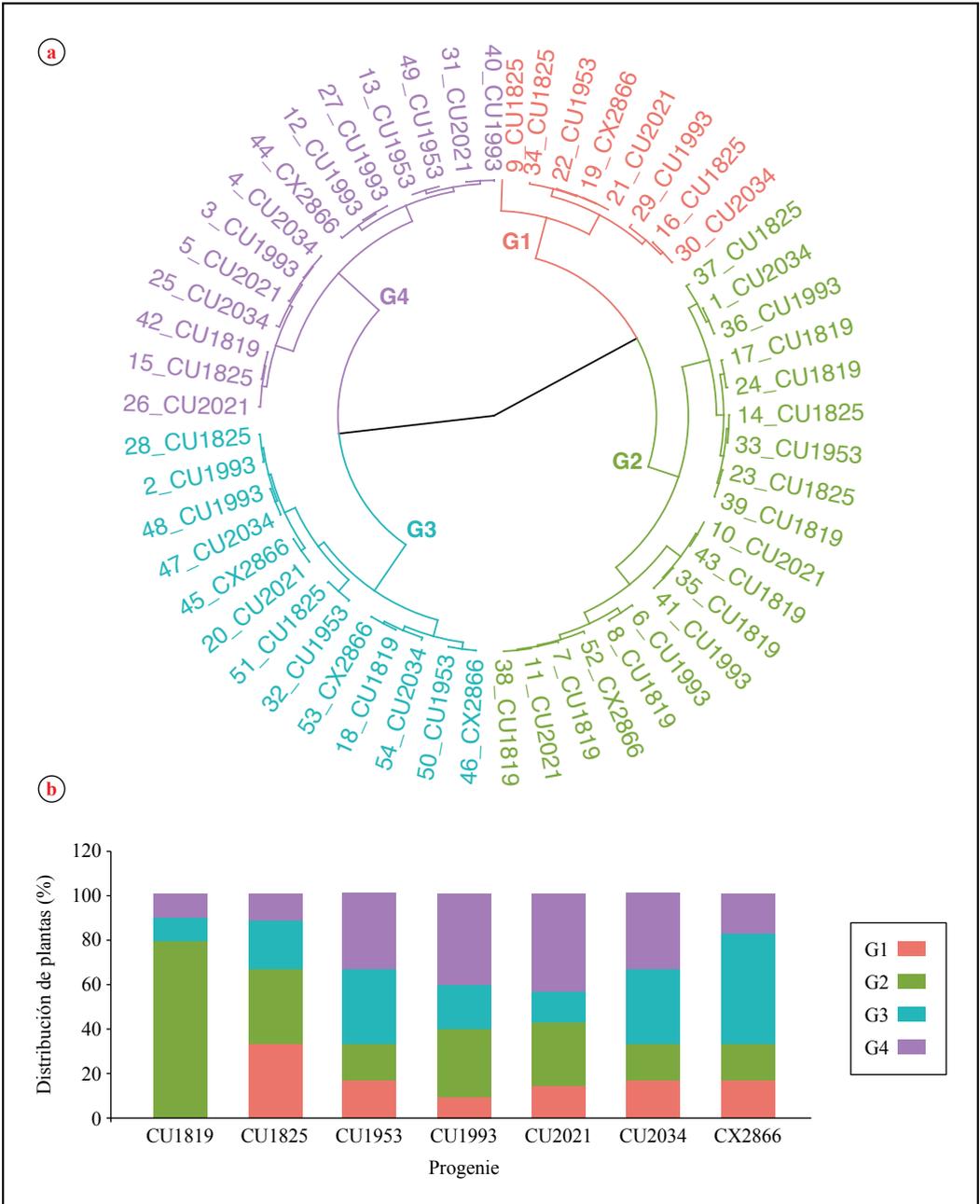


Figura 1. Dendrograma que muestra el análisis de clúster (a) y la distribución de plantas (b), que describe el agrupamiento entre el número de frutos por rama y progenies de *C. arabica*. Las abreviaciones G1 a G4 describen los grupos definidos según la carga de frutos por rama. Cada color diferencia los grupos definidos. Para el gráfico (b) cada barra corresponde al promedio de la cantidad de plantas por progenie.

la asignación y partición de carbono entre órganos vegetativos y reproductivos (Vaast et al., 2005, Rakocevic et al., 2020). Por otro lado, se ha reportado que la acumulación de la masa seca total en las ramas con elevada carga de frutos, se distribuye más del doble en los frutos y tan solo menos del 13% es asignada a las hojas, en un ciclo de

producción anual para variedades de café Cenicafé 1 y Costa Rica 95 (León-Burgos et al., 2024b; Vaast et al., 2005). En efecto, Bote y Vos. (2016) evidencia que en ramas con mayor carga de frutos para el cultivar Etíope 74-40 hay menor peso seco foliar, lo que alteró las medidas RAE y AFE, como se observó en este estudio.

Tabla 1. Medidas de formación foliar en los grupos definidos según el número de frutos por rama en las progenies de *C. arabica*. Cada dato es la media \pm error estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre los promedios de los grupos según prueba t-Student ($p < 0,05$).

Grupo	NHT	NNT	AF	RAFF	LRP
			cm ²	cm ² /fruto	cm
1	25 \pm 8,85 a	18,31 \pm 0,55 a	79,58 \pm 28,14 a	12,36 \pm 1,65 c	77,77 \pm 4,14 a
2	23 \pm 5,26 a	17,62 \pm 0,51 a	68,56 \pm 15,73 a	13,03 \pm 0,89 bc	70,10 \pm 2,75 a
3	22 \pm 6,18 a	16,63 \pm 0,67 a	66,42 \pm 18,42 a	26,75 \pm 2,08 a	65,33 \pm 3,48 a
4	22 \pm 5,87 a	17,43 \pm 0,65 a	69,40 \pm 18,55 a	17,99 \pm 1,61 b	70,33 \pm 3,53 a

NHT: Número de hojas totales, **AF:** área foliar, **RAFF:** relación de área foliar por fruto, **NNT:** número de nudos totales y **LRP:** longitud de la rama plagiotrópica.

Tabla 2. Medidas de acumulación de masa seca en los grupos definidos según el número de frutos por rama en las progenies de *C. arabica*. Cada dato es la media \pm error estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre los promedios de los grupos según prueba t-Student ($p < 0,05$).

Grupo	RMF	RMH	RMR	MST	RAE	AFE
	g	g	g	g	cm ² g ⁻¹	cm ² g ⁻¹
1	0,17 \pm 0,01 a	0,46 \pm 0,02 b	0,38 \pm 0,01 a	44,05 \pm 3,12 a	26,72 \pm 2,85 b	50,85 \pm 21,51 b
2	0,15 \pm 0,01 a	0,51 \pm 0,01 b	0,33 \pm 0,01 a	34,54 \pm 2,39 b	27,83 \pm 2,32 b	54,77 \pm 12,56 b
3	0,08 \pm 0,02 b	0,61 \pm 0,03 a	0,31 \pm 0,01 b	19,53 \pm 1,81 c	46,29 \pm 3,46 a	76,51 \pm 21,22 a
4	0,11 \pm 0,01 ab	0,54 \pm 0,02 ab	0,35 \pm 0,01 ab	29,86 \pm 1,39 b	28,19 \pm 2,14 b	53,43 \pm 14,28 b

RMF: relación de masa seca de frutos, **RMH:** relación de masa seca de hojas, **RMR:** relación de masa seca de rama, **MST:** masa seca total, **RAE:** relación del área foliar específica y **AFE:** área foliar específica

En la Figura 2a, se evidencia una asociación negativa y significativa ($p < 0,05$) entre NFR y RMF con las medidas que relaciona la masa seca de los órganos vegetativos (RMH, RAE y AFE), lo que puede respaldar los resultados descritos anteriormente. Estas correlaciones han sido previamente reportadas por León-Burgos et al. (2024b) y resalta que estos datos son de interés porque las medidas de RMH, RAE y AFE están asociadas a la capacidad de interceptación de la radiación solar por unidad de área foliar y de la eficiencia fotosintética de las plantas (Taiz et al., 2015). También en este análisis se destaca el alto grado de correlación, positivo y significativo ($p < 0,05$) entre las medidas NNT, AF y LRP, variables que han sido relacionadas con los patrones de producción de café debido a su influencia en la formación de las estructuras reproductivas que soportan las futuras cosechas (Somarriba y Quesada, 2022; Castro-Tanzi et al., 2014). Lo anterior, está relacionado dado que en cultivos perennes como el café ha sido reportado que hay formación periódica de hojas y nudos en el año, y cuando ocurre la diferenciación de las yemas reproductivas, las cosechas se desplazan hacia los extremos plagiotrópicos y ortotrópicos de la planta (Arcila et al., 2007; DaMatta et al., 2007).

Un análisis de componentes principales-ACP en el que se resumen las asociaciones del crecimiento vegetativo de las plantas por progenie según los grupos definidos por el NFR, se muestra en la Figura 2b. Se graficó en relación a la primera y segunda componente que explica alrededor del 78% de la variabilidad acumulada de los datos. El ACP revela que LRP (17%), MST (16%), NNT (16%) y AF (13%) son las medidas clave que explican la variabilidad del CP1. Las variables RAFF (25%), RAE (23%), AFE (13%), NFR (11%) y RMH (8%) explican la variabilidad del CP2, y en conjunto son las medidas que aportan al entendimiento de

la asociación del crecimiento vegetativo y cantidad de frutos de las progenies en este estudio. Según la confianza de las elipses en el biplot (95%), fácilmente pueden reconocerse agrupaciones según la intensidad de la carga de frutos en formación por rama. En el cuadrante a la izquierda fueron agrupados G1 y G2, reconocidos por presentar mayores valores de NFR, RMF y MST. En el cuadrante a la derecha se reporta el G3 y G4 con valores altos de RAFF, RAE, RMH y AFE (Figura 2b).

Los resultados de ACP demuestran que mayor cantidad de frutos en formación tienen una correlación negativa con el crecimiento vegetativo y esto explica que con cargas mayores a 75 frutos por rama, hay alteraciones en las medidas de formación foliar y acumulación de masa seca determinadas en las progenies. Estos resultados concuerdan con los estudios de DaMatta et al. (2008) y Bote y Vos. (2016) en el que evidenciaron los efectos en el crecimiento de plantas de café con cargas entre 50 a 130 frutos por rama. Finalmente, las técnicas multivariadas usadas permitieron identificar rasgos idénticos entre la población evaluada en este estudio y constituyen una alternativa eficaz para identificar la diversidad genética y rasgos similares de las progenies que conforman las variedades de café desarrolladas en Colombia (Zafar et al., 2022; Baraki et al., 2020), incluso esta técnica ya ha sido implementada en programas de mejoramiento genético de otros países cafeteros, para el reconocimiento de los rendimientos en diversos genotipos de *C. arabica* (Gebreselassie et al., 2024; Weldemichael Abrha et al., 2022; Montagnon & Bouharmont, 1996)

Variación del desempeño agronómico por progenie

La altura, el número de ramas productivas y la cantidad de frutos en toda la planta fueron evaluadas como medidas fenotípicas, para

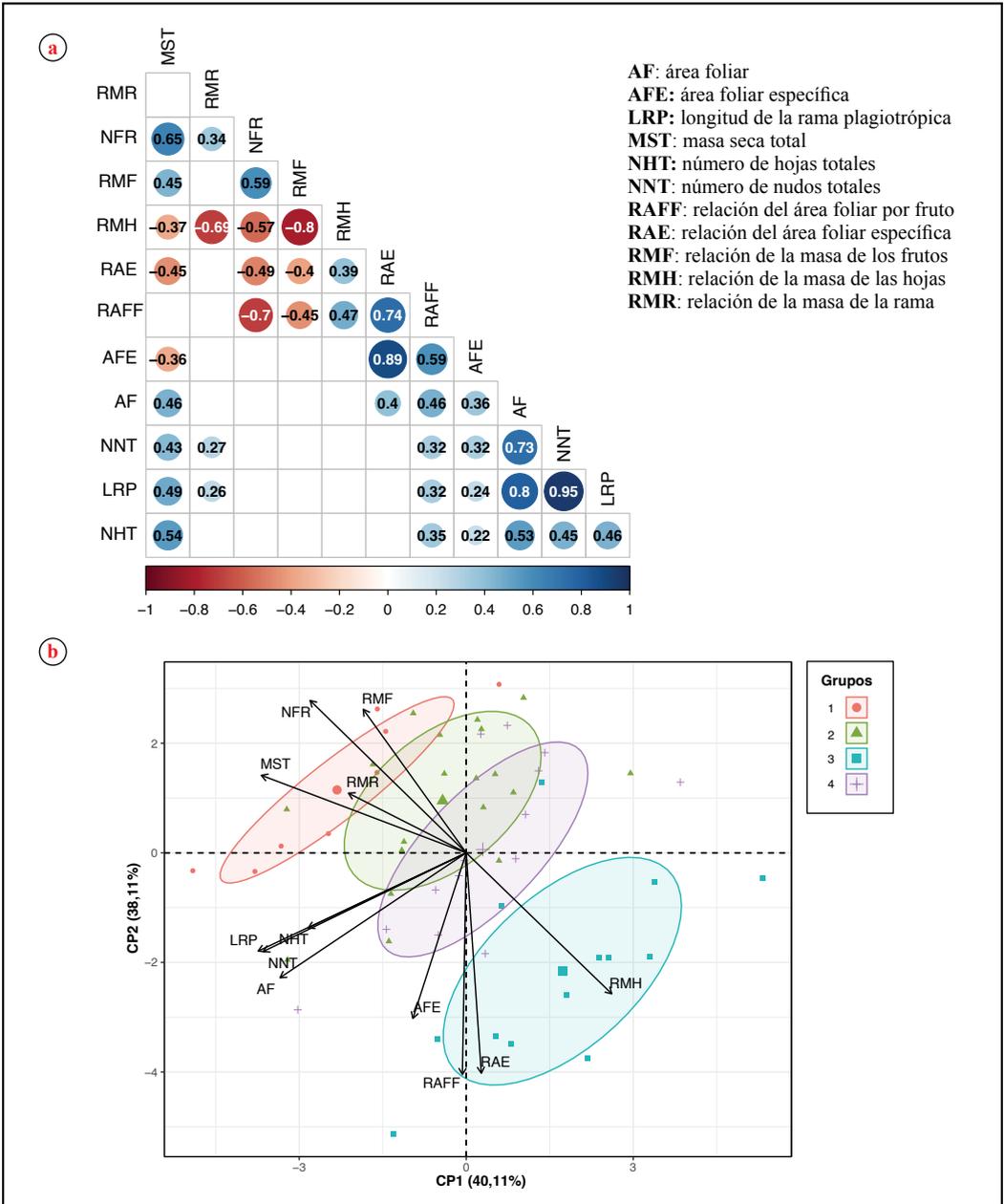


Figura 2. Comparación entre los grupos definidos por el número de frutos por rama y variables de formación foliar y acumulación de masa seca determinadas en las progenies de *C. arabica*. (a) Matriz de correlación Spearman. Correlaciones positivas y significativas (color azul), correlaciones negativas y significativas (color rojo) y no correlación (cuadros blancos). Significancia de correlación: $p < 0,05$. (b) Análisis de componentes principales (ACP) en relación con la primera y segunda componente, con elipses de confianza agrupadas por la cantidad de frutos por rama.

dilucidar el desempeño agronómico de cada progenie, dado que han sido consideradas como componentes de producción o productividad del cultivo de café (Unigarro et al., 2017; Arcila et al., 2007; DaMatta et al., 2004). De manera general, por planta se registraron en promedio 174,92 cm \pm 0,32 (error estándar) en altura, 39 ramas productivas \pm 1,68 y 1.337 frutos \pm 117,63 (Figura 3). En cuanto al análisis por progenie se destaca en altura CU1993 al tener el mayor promedio (179,19 cm \pm 0,25) y CU2034 (172,77 cm \pm 0,39) con la menor altura (Figura 3a). Para la cantidad de ramas productivas, se registró el mayor dato en CU2034 (42 \pm 1,59) y con el menor número de ramas productivas en CU2021 (37 \pm 1,39). Mientras que, para la cantidad de frutos por planta, se resalta la progenie CU1819, con los mayores promedios 1.612 frutos \pm 130,53 en comparación con CU1993 que registró el menor promedio (1.241 \pm 92,68) (Figura 3c).

La cantidad de frutos por planta para CU1819 también es correspondiente a los resultados descritos en la sección anterior, en el que alrededor del 80% de la población de esta progenie fue reportado con cargas de frutos clasificadas como buenas (75 frutos por rama). Por lo tanto, este material se considera con características agronómicas deseables y esto fue previamente reportado por Flórez et al. (2016).

Finalmente, con estos resultados se confirma la variabilidad en rasgos fenotípicos en las progenies de café mejoradas en Colombia, lo cual está relacionado a los procesos de selección y a la interacción con el ambiente (Flórez et al., 2017). Estas características son deseadas en la estrategia de diversificación genética para garantizar resistencia durable a enfermedades y un conjunto de rasgos agronómicos de interés,

que potencializan la adopción de estos materiales por parte de los caficultores, al influir en la productividad y rentabilidad del cultivo (Duque et al., 2021; Flórez et al., 2021). Sin embargo, es necesario profundizar con estudios más detallados, los cuales, corroboren si el efecto de la carga de frutos en el crecimiento vegetativo, puede estar asociado a la diversidad genética presente en las variedades de café desarrolladas en Colombia y con esto constituir si podría ser una estrategia técnica para contrarrestar los agotamientos de las plantas durante y después de años de alta producción.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que hay una relación negativa entre la carga de frutos en formación y el crecimiento vegetativo de las progenies evaluadas en este estudio. Esto constituye un referente en el que se evidencia un desbalance temprano en la relación fuente-vertedero para etapas de crecimiento inicial de los frutos. Se confirma que con cargas mayores a los 75 frutos en formación por rama, hay modificaciones significativas en las medidas de acumulación de la masa seca, lo que evidencia que los frutos de café son órganos que compiten prematuramente en la asignación de carbono. Por otro lado, se provee evidencia en el que se corrobora la hipótesis donde se soporta que las técnicas multivariadas empleadas definieron rasgos agronómicos relacionados con el impacto negativo en el crecimiento de órganos vegetativos y reproductivos, así como se identificó rasgos fenotípicos compartidos y propios de la población estudiada, en el que se resalta las progenies CU1819 y CU1825 por su capacidad de carga de frutos en las ramas. Con esto se destaca la utilidad de estas herramientas estadísticas para los estudios de diversidad genética de las variedades de café desarrolladas en Colombia.

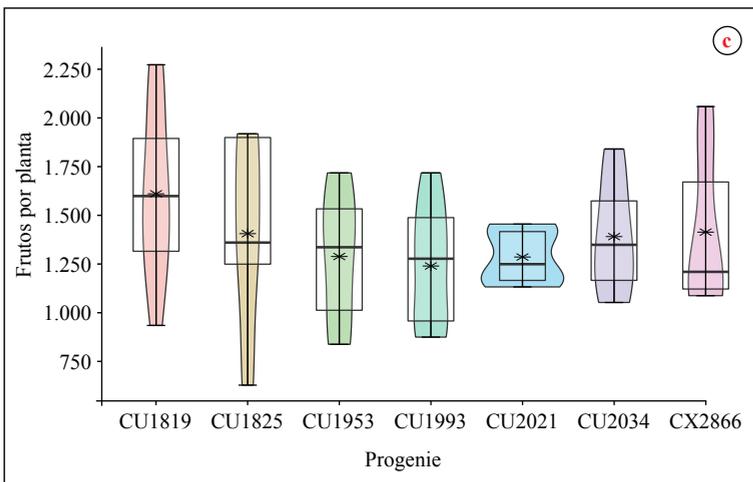
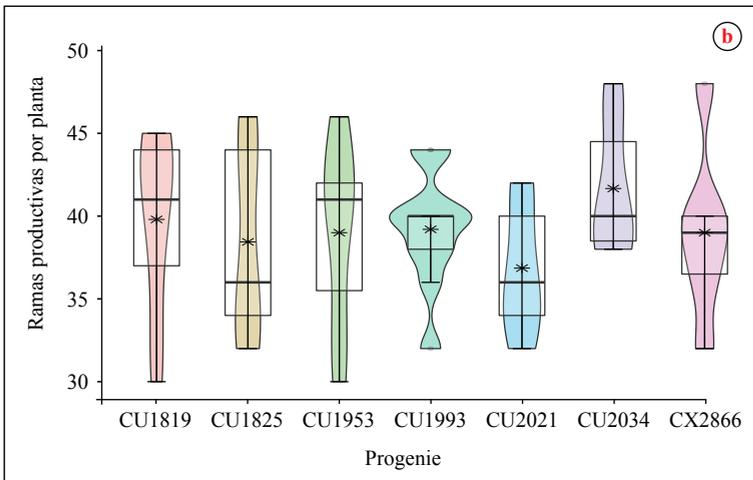
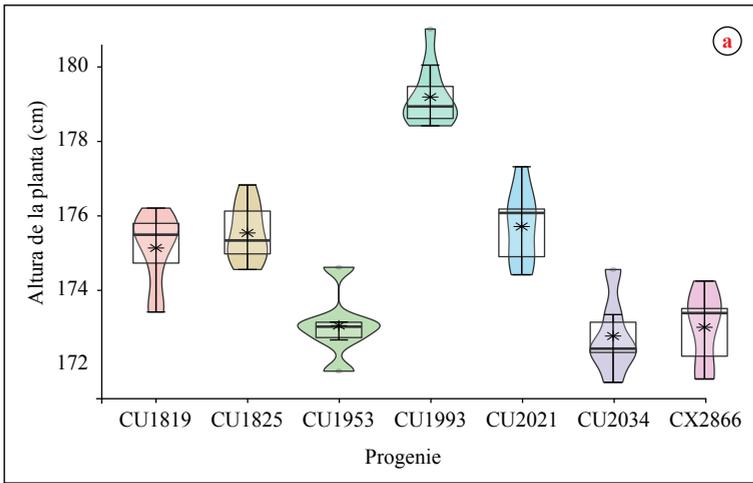


Figura 3. Medidas fenotípicas asociadas al componente de producción por progenie de *C. arabica*. Cada asterisco corresponde a la media y la línea transversal denota la mediana del conjunto de los datos. Los colores diferencian las progenies evaluadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y al Centro Nacional de Investigaciones del Café-Cenicafé por el soporte y financiamiento de esta investigación (Crossref Funder ID 100019597), adscrito al proyecto FIT102035. También a Jhon Félix Trejos, Carlos Gonzalo Mejía y Andrea Monroy García por su apoyo en las mediciones de campo.

Contribución de autores: **AFLB**; Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos,

Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Software, Supervisión, Visualización, Redacción–borrador original, Redacción–revisión y edición. **JRR**; Conceptualización, Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Redacción–revisión y edición. **AJJ**; Curación de datos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Redacción–revisión y edición. **LCI**; Análisis formal, Metodología, Software, Visualización, Redacción–revisión y edición. **CPF**; Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Redacción–revisión y edición. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Agroclima-Agroclimática cafetera. (2024). Plataforma, disponible en: <https://agroclima.cenicafe.org/> (Consultada en febrero, 2024).
- Almeida, W. L., Ávila, R. T., Pérez-Molina, J. P., Barbosa, M. L., Marçal, D. M. S., de Souza, R. P. B., Martino, P. B., Cardoso, A. A., Martins, S. C. V., & DaMatta, F. M. (2021). The interplay between irrigation and fruiting on branch growth and mortality, gas exchange and water relations of coffee trees. *Tree Physiology*, *41*(1), 35-49. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa116>
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A. M., Salazar, L. F., & Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Arias, J. C. (2023). *La Colección Colombiana de Café: Conservando la diversidad genética para una caficultura sostenible*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0021>
- Baraki, F., Gebregergis, Z., Belay, Y., Berhe, M., Teame, G., Hassen, M., Gebremedhin, Z., Abadi, A., Negash, W., Atsbeha, A., & Araya, G. (2020). Multivariate analysis for yield and yield-related traits of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Heliyon*, *6*(10), e05295. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05295>
- Bote, A. D., & Jan, V. (2016). Branch growth dynamics, photosynthesis, yield and bean size distribution in response to fruit load manipulation in coffee trees. *Trees*, *30*(4), 1275–1285. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1365-x>
- Cambou, A., Thaler, P., Clément-Vidal, A., Barthès, B. G., Charbonnier, F., Van den Meersche, K., Aguilar Vega, M. E., Avelino, J., Davrieux, F., Labouisse, J.-P., de Melo Virginio Filho, E., Deleporte, P., Brunet, D., Lehner, P., & Rouspard, O. (2021). Concurrent starch accumulation in stump and high fruit production in coffee (*Coffea arabica*). *Tree Physiology*, *41*(12), 2308–2325. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab075>
- Castro-Tanzi, S., Flores, M., Wanner, N., Dietsch, T. V., Banks, J., Ureña-Retana, N., & Chandler, M. (2014). Evaluation of a non-destructive sampling method and a statistical model for predicting fruit load on individual coffee (*Coffea arabica*) trees. *Scientia Horticulturae*, *167*, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.013>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2021). *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed.). Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0014>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). *Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0002>
- DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C. V., & Ramalho, J. C. (2018). Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*(21), 5264-5274. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>

- DaMatta, F. M., Cunha, R. L., Antunes, W. C., Martins, S. C. V., Araujo, W. L., Fernie, A. R., & Moraes, G. A. B. K. (2008). In field-grown coffee trees source-sink manipulation alters photosynthetic rates, independently of carbon metabolism, via alterations in stomatal function. *New Phytologist*, 178(2), 348–357. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02367.x>
- DaMatta, F. M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: A review. *Field Crops Research*, 86(2–3), 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001>
- Duque-Orrego, H., Salazar, H. M., Rojas-Sepúlveda, L. A., & Gaitán, Á. (2021). *Análisis económico de tecnologías para la producción de café en Colombia*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0016>
- Echeverría-Beirute, F., Murray, S. C., Klein, P., Kerth, C., Miller, R., & Bertrand, B. (2018). Rust and Thinning Management Effect on Cup Quality and Plant Performance for Two Cultivars of *Coffea arabica* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(21), 5281–5292. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03180>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC. (2022). Publicaciones en Informe de Gestión 2022. <https://doi.org/10.38141/10793/2022>. (Consultado, mayo, 2024).
- Flórez, C. P., Quiroga-Cardona, J., & Arias, J. C. (2021). Variedades del Café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 11–29). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_1
- Flórez, C. P., Arias, J. C., & Duque-Orrego, H. (2017). Guía para la caracterización de las variedades de café: Claves para su identificación. *Avances Técnicos Cenicafé*, 47(6), 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0476>
- Flórez, C. P., Maldonado, C. E., Cortina, H. A., Moncada, M. D. P., Montoya, E. C., Ibarra, L. N., Unigarro, C. A., Rendón, J. R., & Duque-Orrego, H. (2016). Cenicafé 1: Nueva variedad de porte bajo altamente productiva resistente a la roya y al CBD con mayor calidad física del grano. *Avances Técnicos Cenicafé*, 46(9), 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0469>
- García, J. C., Posada-Suárez, H., & Läderach, P. (2014). Recommendations for the Regionalizing of Coffee Cultivation in Colombia: A Methodological Proposal Based on Agro-Climatic Indices. *PLOS ONE*, 9(12), e113510. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113510>
- Gebreselassie, H., Tesfaye, B., & Gedebo, A. (2024). Genetic diversity of Arabica coffee genotypes in south Ethiopia using quantitative agro-morphological traits. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(7), 3485–3506. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01853-9>
- Hunt, R. (1990). *Basic Growth Analysis*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9117-6>
- Jaramillo-Robledo, A. (2018). *El clima de la caficultura en Colombia*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0031>
- Kassambara, A. (2020). *factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses* (Versión 1.0.7, p. 1.0.7) [Software]. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- León-Burgos, A. F., Rendón, J. R., Imbachi, L. C., Toro-Herrera, M. A., Unigarro, C. A., Osorio, V., & Balaguera-López, H. E. (2024). Increased fruit load influences vegetative growth, dry mass partitioning, and bean quality attributes in full-sun coffee cultivation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1379207. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1379207>
- León-Burgos, A. F., Sáenz, J. R., Imbachi, L. C., Unigarro, C. A., Osorio, V., Sadeghian, S., & Balaguera-López, H. E. (2024). Varying fruit loads modified leaf nutritional status, photosynthetic performance, and bean biochemical composition of coffee trees. *Scientia Horticulturae*, 329, 113005. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113005>
- León-Burgos, A. F., Unigarro, C. A., & Balaguera-López, H. E. (2022a). Soil Waterlogging Conditions Affect Growth, Water Status, and Chlorophyll “a” Fluorescence in Coffee Plants (*Coffea arabica* L.). *Agronomy*, 12(6), 1270. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061270>
- León-Burgos, A. F., Unigarro, C. A., & Balaguera-López, H. E. (2022b). Can prolonged conditions of water deficit alter photosynthetic performance and water relations of coffee plants in central-west Colombia? *South African Journal of Botany*, 149, 366–375. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.034>
- Lince, L. A., Sadeghian-Khalajabadi, S., & Sarmiento Herrera, N. G. (2024). Evaluación de parámetros relacionados con el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta al déficit hídrico del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 11–34. <https://doi.org/10.22490/21456453.6805>
- Maldonado, C. E., & Ángel-Giraldo, L. (2020). Resistencia genética a la Enfermedad de la Cereza del Café en variedades cultivadas en Colombia. *Revista Cenicafé*, 71–I, 68–90. <https://doi.org/10.38141/10778/1121>
- Malik, R., Sharma, H., Sharma, I., Kundu, S., Verma, A., Sheoran, S., Kumar, R., & Chatrath, R. (2014). Genetic diversity of agro-morphological characters in Indian wheat varieties using GT biplot. *Australian Journal of Crop Science*, 8(9), 1266–1271. https://www.croplink.com/malik_8_9_2014_1266_1271.pdf

- Montagnon, C., & Bouharmont, P. (1996). Multivariate analysis of phenotypic diversity of *Coffea arabica*. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 43(3), 221–227. <https://doi.org/10.1007/BF00123274>
- Ocampo, D. M., Riaño, N. M., López-Ruiz, J. C., & López-Forero, Y. (2010). Intercambio de dióxido de carbono y cambios bioquímicos del pericarpio durante el desarrollo del fruto del café. *Revista Cenicafe*, 61(4), 327–343. <http://hdl.handle.net/10778/507>
- Quiroga-Cardona, J. (2021). La resistencia incompleta del café a la roya: Una revisión. *Revista Cenicafe*, 72(2), e72208. <https://doi.org/10.38141/10778/72208>
- R Software Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing (4.4.2). [Computer software]. <https://www.r-project.org>
- Rakocevic, M., Braga, K. S. M., Batista, E. R., Maia, A. H. N., Scholz, M. B. S., & Filizola, H. F. (2020). The vegetative growth assists to reproductive responses of Arabica coffee trees in a long-term FACE experiment. *Plant Growth Regulation*, 91(2), 305–316. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00607-2>
- Rathinavel, K. (2018). Principal Component Analysis with Quantitative Traits in Extant Cotton Varieties (*Gossypium hirsutum* L.) and Parental Lines for Diversity. *Current Agriculture Research Journal*, 6(1), 54–64. <https://doi.org/10.12944/CARJ.6.1.07>
- Rendón, J. R. (2020). Administración de sistemas de producción de café a libre exposición solar. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café* (pp. 34–71). Cenicafe. https://doi.org/10.38141/10791/0002_2
- Rendón, J. R., & Montoya, E. C. (2015). ¿Cómo registrar las floraciones en los cafetales?. *Avances Técnicos Cenicafe*, 45, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0455>
- Ságio, S. A., Lima, A. A., Barreto, H. G., De Carvalho, C. H. S., Paiva, L. V., & Chalfun-Junior, A. (2013). Physiological and molecular analyses of early and late *Coffea arabica* cultivars at different stages of fruit ripening. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(11), 3091–3098. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1342-6>
- Silva, M. D. C., Guerra-Guimarães, L., Diniz, I., Loureiro, A., Azinheira, H., Pereira, A. P., Tavares, S., Batista, D., & Várzea, V. (2022). An Overview of the Mechanisms Involved in Coffee-Hemileia vastatrix Interactions: Plant and Pathogen Perspectives. *Agronomy*, 12(2), 326. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020326>
- Somarriba, E., & Quesada, F. (2022). Modeling age and yield dynamics in *Coffea arabica* pruning systems. *Agricultural Systems*, 201, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103450>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology & Development* (6a ed.). Oxford University Press.
- Toro-Herrera, M. A., Pennacchi, J. P., Vieira, D. A., Costa, V. E., Honda Filho, C. P., Barbosa, A. C. M. C., & Barbosa, J. P. R. A. D. (2024). Source-sink patterns on coffee trees related to annual climate variability: An approach through stable isotopes analysis. *Annals of Applied Biology*, 184(2), 183–195. <https://doi.org/10.1111/aab.12872>
- Unigarro, C. A., Bejarano, L. M. D., & Acuña, J. R. (2021). Effect of fruit load of the first coffee harvests on leaf gas exchange. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 51, e69865. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v51i69865>
- Unigarro, C. A., Medina, R. D., & Flórez, C. P. (2017). Relación entre producción y características fenotípicas en *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafe*, 68(1), 62–67. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/816>
- Unigarro, C. A., Hernández-Arredondo, J. D., Montoya-Restrepo, E. C., Medina, R. D., Ibarra-Ruales, L. N., Carmona-González, C. Y., & Flórez, C. P. (2015). Estimation of leaf area in coffee leaves (*Coffea arabica* L.) of the Castillo® variety. *Bragantia*, 74(4), 412–416. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0026>
- Vaast, P., Angrand, J., Franck, N., Dauzat, J., & Genard, M. (2005). Fruit load and branch ring-barking affect carbon allocation and photosynthesis of leaf and fruit of *Coffea arabica* in the field. *Tree Physiology*, 25(6), 753–760. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.753>
- Wei T, & Simko V. (2021). R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix. <https://github.com/taiyun/corrplot>. R package Version 0.92.
- Weldemichael Abrha, G., Kebede, S. A., Bedada, L. T., Berecha Yadessa, G., & Adugna Gutu, A. (2022). Genotype by Environment Interaction and Yield Stability of Coffee (*Coffea arabica* L.) Genotypes Evaluated in Western Ethiopia. *Plant Production Science*, 25(4), 467–483. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2022.2136722>
- Zafar, M. M., Jia, X., Shakeel, A., Sarfraz, Z., Manan, A., Imran, A., Mo, H., Ali, A., Youlu, Y., Razzaq, A., Iqbal, M. S., & Ren, M. (2022). Unraveling Heat Tolerance in Upland Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Using Univariate and Multivariate Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 727835. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.727835>