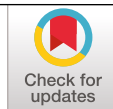


EVALUACIÓN DEL GERMOPLASMA ETÍOPE COMO RECURSO PARA EL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE *Coffea arabica* L.

Juan Carlos Arias Suárez *, Rubén Darío Medina Rivera **

Arias, J. C., & Medina-Rivera, R. (2025). Evaluación del germoplasma etíope como recurso para el mejoramiento genético de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76103. <https://doi.org/10.38141/10778/76103>



Ante el impacto económico de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br) para el cultivo de *Coffea arabica* L., la resistencia genética ha sido uno de los propósitos de los programas de mejoramiento. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial de diversas fuentes de resistencia, en cruzamiento con germoplasma etíope, para la obtención de genotipos con atributos agronómicos deseables. Se evaluaron 44 progenies F4 y F5, por un ciclo de cultivo, en dos lotes experimentales, en un diseño de bloques completos al azar, registrando variables relacionadas al crecimiento, producción, características de grano y resistencia a la roya. La información obtenida en el ANOVA fue utilizada para calcular los parámetros Coeficiente de Variación Experimental (CVE), Coeficiente de Variación Genética (CVg) y Heredabilidad (h_a^2). Los CVE y CVg fueron menores al 8,0% para las variables relacionadas al crecimiento, superando este umbral para las demás variables. La h_a^2 fue superior al 78,5% en todos los casos. Estos valores indican una fuerte fijación de las características agronómicas, permitiendo mejoras en los atributos del grano y rendimiento a través de selección, mientras se conserva un crecimiento compacto. En cuanto a la resistencia a la roya, aunque todas las progenies son resistentes, el 25,0% presenta los valores más bajos de incidencia, lo que indica un alto potencial de selección. El 9,0% de las progenies cumplen con los criterios de selección establecidos por el programa y pueden ser potencialmente evaluadas en pruebas de adaptación regional, para su utilización futura en la caficultura colombiana.

Palabras clave: Recursos genéticos, fitomejoramiento, diversidad genética, fuentes de resistencia a la roya, variedades de café, Colombia, café, Cenicafé.

EVALUATION OF ETHIOPIAN GERMOPLASM AS A RESOURCE FOR THE GENETIC IMPROVEMENT OF *Coffea arabica* L.

Given the economic impact of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br) on the cultivation of *Coffea arabica* L., genetic resistance has been one of the basic objectives of breeding programs. The aim of this study was to evaluate the potential of various sources of resistance, in crossing with germplasm of Ethiopian origin, to obtain genotypes with desirable agronomic attributes. For this purpose, 44 progenies F4 and F5 were evaluated over one crop cycle in two experimental plots, using a randomized complete block design, recording variables related to growth, yield, bean characteristics, and resistance to coffee leaf rust. The data obtained from the ANOVA was used to calculate the Experimental Coefficient of Variation (CVE), Genetic Coefficient of Variation (CVg) and heritability (h_a^2) parameters. The CVE and CVg were less than 8% for growth-related variables, but exceeded this threshold for other variables. Meanwhile, h_a^2 was greater than 78.5% in all cases. These values indicate a strong fixation of agronomic traits, enabling improvements in bean characteristics and yield through selection while maintaining compact growth. In terms of rust resistance, although all progenies are resistant, 25% exhibit the lowest incidence values, indicating a high selection potential. The set of results identified that 9% of the progenies meet the selection criteria established by the program and can potentially be evaluated in regional adaptation trials, with a view to their future use in Colombian coffee growing.

Keywords: Genetic resources, plant breeding, genetic diversity, sources of resistance to coffee leaf rust, coffee varieties.

* Investigador Científico I. Disciplina de Mejoramiento Genético, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-5004-2423>

** Investigador Científico II. Disciplina de Biometría, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-9753-9613>



Con un consumo estimado de 400 billones de tazas por año, sustento de más de 60 millones de personas en docenas de países (Sachs et al., 2019), posicionan al café como uno de los cultivos de mayor importancia económica a nivel mundial. La producción está soportada en dos especies, *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* Pierre ex A. F., siendo la primera la de mayor importancia económica y de alto reconocimiento por la calidad de su bebida. Desde el punto de vista biológico, esta especie destaca además por su adaptación a un amplio rango de ambientes, principalmente en la zona intertropical, entre los 20°N y 24°S, en rangos altitudinales entre los 700 a 2.000 m (Jaramillo, 2018). A su vez, sobresale por la diversidad de sistemas productivos donde es utilizada, desde pequeños agroforestales hasta monocultivos mecanizados a gran escala (McCook & Montero-Mora, 2024).

Estos aspectos contrastan con la baja diversidad genética de las variedades de *C. arabica* cultivadas, originada a partir de unas pocas semillas (Scalabrin et al., 2020), haciéndolas particularmente vulnerables a plagas y enfermedades. Dentro de éstas, la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) es la de mayor impacto económico, causando pérdidas en la producción superiores al 30% en ausencia de medidas de control (Rivillas et al., 2005). Desde antes de la llegada de la enfermedad a América, programas de mejoramiento genético de los países productores de la región, con el apoyo del CIFC (Centro de Investigação das Ferrugens do Cafeeiro -Portugal), iniciaron la obtención de variedades con resistencia genética, método económica y ambientalmente de mayor viabilidad. El Híbrido de Timor, híbrido natural entre *C. arabica* x *C. canephora*, fue la fuente por excelencia para este propósito, dando origen a un sinnúmero de variedades a nivel mundial, algunas de estas siendo utilizadas recientemente en la producción de híbridos F1 (Bertrand

et al., 2011). Sin embargo, muchas de las variedades obtenidas a partir de esta fuente son actualmente consideradas susceptibles (Cortina et al., 2012), posible consecuencia de la alta flexibilidad que tiene el patógeno para generar nuevas variantes en comparación a la rigidez del cultivo. En Colombia, se utilizó esta misma fuente para la obtención de las diferentes variedades, implementando la diversidad genética como estrategia para extender la durabilidad de la resistencia (Castillo & Moreno, 1988; Moreno, 2004), y estudios posteriores han demostrado su efectividad en presencia de razas compatibles (Alvarado & Moreno, 2005; Arias, 2019).

En especies perennes como el café, la obtención de variedades requiere una alta inversión en área, recursos y tiempo, los cuales, en el caso de la resistencia a la roya contrasta con la rapidez con que la enfermedad es capaz de vencerla. Ante este panorama, es necesario recurrir a diferentes fuentes, conservadas y evaluadas en los bancos de germoplasma, que permitan alcanzar los objetivos propuestos (Arias, 2023), ampliando además la diversidad genética de las variedades cultivadas. Dentro de este, recurrir al acervo genético secundario representado por las especies diploides ha sido una constante, y frecuentemente resaltado (Bertrand et al., 2023), principalmente por sus atributos intrínsecos, producto de los ambientes en los cuales evolucionaron. No obstante, su uso significa resolver problemas como las diferencias en ploidía con *C. arabica* (tetraploide vs diploide), genes deletéreos, además de un mayor tiempo de selección. En contraste, el acervo genético primario ha sido pobremente aprovechado, con la concepción de la estrecha base genética que dio origen a la especie (Scalabrin et al., 2020). Sin embargo, las evaluaciones realizadas sobre el germoplasma silvestre procedente de Etiopía, centro de origen y diversidad de la especie, denotan su potencial para diversos atributos

(Arias et al., 2025; Arias & Flórez, 2023; Molina & Medina, 2022; Romero y Cortina, 2004). El uso de este germoplasma ha sido particularmente propuesto para la producción de híbridos F1 (Bertrand et al., 2011; Georget et al., 2019) y selección (Benti et al., 2021), siendo pocos los casos donde son incluidos para mejoramiento a través de hibridación (Gichuru et al., 2021; Molina et al., 2022).

Es de tener en cuenta que, fuera de Etiopía, el acceso a germoplasma silvestre está restringido al existente en los bancos de germoplasma, que en el caso de Colombia es conservado en la Colección Colombiana de Café (Arias, 2023). Desde el ingreso de germoplasma silvestre a la CCC, este ha sido sometido a diversas caracterizaciones, que incluyen comportamiento agronómico (Castillo, 1977), características de grano (Castillo, 1978), resistencia a roya (Castillo et al., 1976), resistencia a plagas (Romero & Cortina, 2004), factores abióticos (Acuña & Sadeghian, 2020; Molina & Medina, 2022) y calidad sensorial (Arias et al., 2025), entre otros. Estos han sido valiosos aportes en el conocimiento del potencial del germoplasma conservado, y han definido su utilización en el mejoramiento genético (Castillo et al., 1976; Castillo & Moreno, 1988; Molina et al., 2022).

A pesar del gran número de variedades de *C. arabica* existentes, son escasas las que incluyen el germoplasma de procedencia etíope bajo el esquema de hibridación. Este hecho puede ser debido a la necesidad de largos periodos de evaluación y selección, que al final pueden ser compensados por la facilidad de distribución través de semilla. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar el potencial del germoplasma de procedencia etíope seleccionado en cruzamiento con otras fuentes de origen diverso en la obtención de variedades, a través del comportamiento agronómico y de resistencia a roya de 44 progenies de generaciones avanzadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Los lotes experimentales se establecieron en un área 0,5 ha en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé (Chinchiná, Caldas), con ubicación 04°58' N y 75°39' O, a 1.381 m de altitud, con un promedio de precipitación anual de 2.556 mm, 1.816 horas de brillo solar al año, humedad relativa de 78% y temperatura media de 20,8°C. La evaluación de las progenies se realizó entre los años 2018 y 2024, comprendiendo un ciclo productivo del cultivo.

Progenies. Se sembraron 44 progenies, 31 F4 y 13 F5, las cuales fueron producto del cruzamiento entre progenitores de diversos orígenes. El 70% de estas utilizan como progenitor recurrente progenies F3RC1 producto de la hibridación interespecífica (HIE) entre *C. arabica* x *C. canephora* seleccionadas (Alvarado & Cortina, 1997), el 22% emplea derivados de Caturra x Híbrido de Timor 1343 (CatxHdT), y en la fracción restante intervienen progenies F3 derivadas de Sudán Rumé x Catuai. Como progenitor recurrente se emplearon en 36 de las progenies 15 accesiones de origen etíope, mientras en los restantes se utilizaron progenies que involucran la variedad N.197 (Tabla 1).

Los progenitores que intervienen en los diferentes cruzamientos fueron seleccionados principalmente por resistencia a la roya del cafeto (*H. vastatrix*). En todas las generaciones se ejerció presión de selección por este aspecto, además de otras características agronómicas de interés, como producción, altura de planta, calidad sensorial, tamaño de grano, resistencia a roya, entre otros aspectos que se ilustran en la Tabla 2 (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2016).

Tabla 1. Genealogía de las 44 progenies F4 y F5 evaluadas en dos lotes experimentales.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
1	1	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1072	MEG2.32(2006-2) #5858	MEG2.32(2009-14) #1419	
	2		MEG2.32(2006-2) #6245	MEG2.32(2009-14) #889	
	3	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.50		MEG2.32(2009-14) #72	
	4		MEG2.32(2006-2) #6310	MEG2.32(2009-14) #78	
	5		MEG2.32(2006-2) #2997	MEG2.32(2009-14) #1282	
	6		MEG2.32(2006-2) #2947	MEG2.32(2009-14) #1465	
	7	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.173		MEG2.32(2009-14) #1200	
	8		MEG2.32(2006-2) #2985	MEG2.32(2009-14) #1199	
	9			MEG2.32(2009-14) #942	
	10	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.175	MEG2.32(2006-2) #4516	MEG2.32(2009-14) #598	
	11		MEG2.32(2006-2) #2123	MEG2.32(2009-14) #399	
	12	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1055		MEG2.32(2009-14) #1013	
	13		MEG2.32(2006-2) #3130	MEG2.32(2009-14) #487	

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
1	14	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.250	MEG2.32(2006-2) #5782	MEG2.32(2009-14) #1057	
	15			MEG2.32(2009-14) #62	
	16	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.304	MEG2.32(2006-2) #5614	MEG2.32(2009-14) #503	
	17	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.338	MEG2.32(2006-2) #5685	MEG2.32(2009-14) #951	
	18	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x [Catuaí x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2006-2) #4444	MEG2.32(2009-14) #403	
	19	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.50	MEG2.32(2006-2) #6454	MEG2.32(2009-14) #620	
	20	{[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x [Catuaí x (Caturra x N.197)]} x CCC.175	MEG2.32(2006-2) #4250	MEG2.32(2009-14) #1308	
	21	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.249	MEG2.32(2006-2) #636w9	MEG2.32(2009-14) #1070	
	22		MEG2.32(2006-2) #6328	MEG2.32(2009-14) #1331	

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
2	1		MEG2.32(2006-2) #4426	MEG2.32(2009-13) #333	FIT102009(Vitrina) #427
	2	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x [Catuaí x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2006-2) #4478	MEG2.32(2009-13) #958	FIT102009(Vitrina) #493
	3		MEG2.32(2006-2) #4394	MEG2.32(2009-13) #53	FIT102009(Vitrina) #480
	4		MEG2.32(2006-2) #4405	MEG2.32(2009-13) #195	FIT102009(Vitrina) #460
	5	{{(Caturra x HDT) x [(Caturra x Ennarea) x HDT]} x CCC.291	MEG2.32(2006-2) #216	MEG2.32(2009-13) #85	FIT102009(Vitrina) #218
	6	[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x [Catuaí x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2006-2) #5365	MEG2.32(2009-13) #66	FIT102009(Vitrina) #116
	7	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.173	MEG2.32(2006-2) #2979	MEG2.32(2009-13) #242	FIT102009(Vitrina) #364
	8		MEG2.32(2006-2) #2975	MEG2.32(2009-14) #1563	
	9	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1055	MEG2.32(2006-2) #3139	MEG2.32(2009-13) #604	FIT102009(Vitrina) #612
	10	{{(Caturra x HDT) x [Caturra x (Caturra x HDT)]} x CCC.50	MEG2.32(2006-2) #14	MEG2.32(2009-13) #572	FIT102009(Vitrina) #341
	11				FIT102009(Vitrina) #728

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Cruzamiento	F2	F3	F4
	12		MEG2.32(2006-2) #567	MEG2.32(2009-13) #155	FIT102009(Vitrina) #621
	13	[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x CCC.1162			FIT102009(Vitrina) #633
	14		MEG2.32(2006-2) #569	MEG2.32(2009-13) #585	FIT102009(Vitrina) #635
	15	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x [Catuai x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2007-7) #731	MEG2.32(2010-5) #34	
	16	[(Caturra x HDT) x (Caturra x HDT)] x CCC.1049	MEG2.32(2007-7) #73	MEG2.32(2010-5) #67	
2	17	(Caturra x HDT) x CCC.1166	MEG2.32(2007-7) #523	MEG2.32(2010-5) #197	
	18		MEG2.32(2007-7) #563	MEG2.32(2010-5) #461	
	19	(Sudan Rume x Catuai) x CCC.249		MEG2.32(2010-5) #205	
	20		MEG2.32(2007-7) #545	MEG2.32(2010-5) #528	
	21	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x [Catuai x (Caturra x N.197)]	MEG2.32(2007-7) #760	MEG2.32(2010-5) #384	
	22	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i>)] x CCC.1060	MEG2.32(2007-7) #668	MEG2.32(2010-5) #633	

Fuente: Evaluación de poblaciones con resistencia a la roya, derivadas del Híbrido de Timor (MEG102004). Informe anual. Cenicafé 2016.

Tabla 2. Evaluación de poblaciones con resistencia a la roya, derivadas del Híbrido de Timor (MEG102004).

Lote	Progenitor	Progenie	Producción (kg/planta)	Altura a 24 meses (cm)	Calidad sensorial (SCAA)	Tamaño de grano (% supremo)	% Plantas <3 (Eskes)	Color de fruto	Color de hojas jóvenes
1	MEG2.32(2006-2) #5858	1	10,3	145,0	83,3	74,9	90,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6245	2	9,2	135,1	81,0	64,7	85,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6310	3, 4	9,3	144,7	83,0	74,1	94,7	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #2997	5	9,1	147,1	83,5	68,1	100,0	Rojo	Bronce
	MEG2.32(2006-2) #2947	6	7,3	147,3	83,5	79,0	100,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #2985	7, 8	8,1	147,4	83,0	82,1	90,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #4516	9, 10	9,8	139,0	81,0	78,9	95,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #2123	11	7,8	145,3	83,8	68,3	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #3130	12, 13	7,2	133,3	82,5	59,1	75,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #5782	14, 15	6,4	139,4	83,3	71,8	75,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #5614	16	6,8	138,7	-	83,2	100,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #5685	17	5,7	123,0	-	80,3	100,0	Rojo, segrega	Verde
	MEG2.32(2006-2) #4444	18	8,9	144,6	-	82,6	85,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6454	19	7,5	143,8	83,0	79,1	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #4250	20	9,4	143,0	83,0	55,8	77,8	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6369	21	7,3	139,6	82,5	72,5	85,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2006-2) #6328	22	7,1	142,3	80,5	63,2	70,0	Rojo, segrega	Verde

Continúa...

...continuación.

Lote	Progenitor	Progenie	Producción (kg/planta)	Altura a 24 meses (cm)	Calidad sensorial (SCAA)	Tamaño de grano (% supremo)	% Plantas <3 (Eskes)	Color de fruto	Color de hojas jóvenes
2	MEG2.32(2009-13) #333	1	8,8	151,0	85,5	62,9	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2009-13) #958	2	9,6	166,0	86,6	48,7	100,0	Rojo, segrega	Bronce
	MEG2.32(2009-13) #53	3	11,8	173,0	84,3	68,7	100,0	Rojo	Bronce, segrega
	MEG2.32(2009-13) #195	4	11,0	167,0	-	-	100,0	Rojo, segrega	Bronce
	MEG2.32(2009-13) #85	5	10,5	146,0	-	77,2	100,0	Rojo	Bronce, segrega
	MEG2.32(2009-13) #66	6	14,1	156,0	83,4	56,3	100,0	Rojo	Bronce, segrega
	MEG2.32(2009-13) #242	7	9,8	145,0	-	-	100,0	Rojo, segrega	Bronce, segrega
	MEG2.32(2006-2) #2975	8	7,0	148,9	83,3	81,3	95,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2009-13) #604	9	9,3	150,0	-	-	100,0	Rojo	Bronce
	MEG2.32(2009-13) #572	10, 11	7,7	148,0	-	-	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2009-13) #155	12	6,8	148,0	-	-	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2009-13) #585	13, 14	7,4	163,0	-	-	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #731	15	14,1	158,5	80,5	35,3	94,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #73	16	15,2	159,5	83,6	72,1	85,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #523	17	13,4	123,9	82,5	22,7	89,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #563	18	12,7	146,8	81,6	47,4	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #545	19, 20	11,0	139,3	80,6	37,2	90,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #760	21	12,4	155,0	81,0	46,5	100,0	Rojo	Verde
	MEG2.32(2007-7) #668	22	11,0	156,8	81,3	49,4	94,0	Rojo	Verde

Fuente: Informe anual. Cenicafé 2016.

Diseño experimental. Las progenies se establecieron bajo el modelo de bloques completos al azar con seis bloques, donde la parcela experimental fue un surco con diez plantas, de las cuales ocho fueron efectivas, y la unidad de observación fue la planta. Además de las 44 progenies se incluyeron dos variedades comerciales utilizadas como control así, la variedad Caturra como control susceptible, mientras que la variedad Castillo® fue utilizada como control resistente a la roya.

Antes del establecimiento de las progenies en el campo, en la etapa de almácigo dentro de cada progenie se eliminaron las plantas anormales y de escaso crecimiento, siendo solo establecidas aquellas que conservaron el fenotipo de la progenie. De igual manera, durante esta etapa se identificó la segregación o no para el gen *Ct* que condiciona porte bajo en todas las progenies evaluadas.

En el lote experimental, las progenies se establecieron a una densidad de 7.142 plantas/ha (distancias de siembra de 1,0 m entre plantas y 1,4 m entre surcos), con un tallo por sitio. Se realizó el reemplazo de sitios perdidos durante los primeros seis meses, utilizando plantas establecidas para este propósito. No se realizó control químico de enfermedades en ninguna de las etapas de establecimiento y evaluación. La fertilización y corrección de acidez se realizó de acuerdo a los resultados del análisis de suelos.

Evaluación agronómica. Se evaluaron solo aquellas variables de interés agronómico, las cuales se relacionan con la densidad de siembra y ciclos de renovación (crecimiento), valor y aceptación comercial del producto (características del grano), potencial productivo (producción) y resistencia a enfermedades (roya).

Altura de la planta (ALT) y diámetro de copa (DCOP). Estas variables se evaluaron a los 24 meses después del establecimiento en el campo. Para la altura de la planta se tomó la distancia en centímetros (cm) desde la base del suelo hasta el ápice, mientras que para el diámetro de copa se tomó la distancia (en cm) entre las ramas plagiotrópicas opuestas de mayor longitud.

Características de fruto y grano. Los muestreos para su evaluación se realizaron en las semanas de mayor producción, determinando: porcentaje de granos vanos (GVAN), definido como el número de frutos maduros sanos que flotan en una muestra de 100 granos tomada al azar de la masa recolectada. El porcentaje de grano tipo caracol (GCAR) se determinó contando el número de granos con esta forma, existentes en una muestra de 400 granos tomada al azar. Para la estimación del tamaño de grano se utilizó una muestra de 90 a 100 gramos de café almendra (sin pergamino), y se determinó mediante el porcentaje del peso total retenido sobre una malla de orificios circulares de tamaño 17/64 de pulgada después de un minuto de agitación. Comercialmente, este tipo de café es denominado como café supremo (GSUP).

Adicionalmente, mediante observaciones de campo se denotó la segregación o no para color de fruto en las progenies evaluadas. Esta actividad se realizó por la importancia que sobre la calidad puede tener la presencia de frutos amarillos, debido la dificultad de reconocimiento del grado de madurez óptimo.

Producción. Para determinar el potencial productivo de las progenies, se registró la cantidad en kilogramos de café cereza en cada uno de los pases para cada planta, desde el inicio del período productivo durante tres años consecutivos (PACU).

Resistencia a la roya. Se utilizó la infección bajo condiciones de campo para determinar la resistencia de las progenies, teniendo la variedad susceptible como punto de referencia para determinar la presencia de la enfermedad y condiciones ambientales favorables para su desarrollo. Para la evaluación, se empleó la escala I (Eskes & Toma-Braghini, 1981), la cual considera el árbol entero como unidad de observación, asignando un valor ascendente entre 0 y 9, dependiendo del número de lesiones esporuladas y su posición en el árbol. Se realizaron seis mediciones, dos por año a partir de los 18 meses después de la siembra, en los periodos de mayor incidencia de la enfermedad para la zona de estudio.

Análisis de la información

Se verificó la consistencia de los valores para las variables en cada una de las unidades de observación, descartando aquellos que provenían de plantas con problemas de desarrollo o afectación mecánica. Para la variable producción, se sumaron los kilogramos de café cereza obtenidos en cada planta durante el período evaluado. En el caso de las características de grano, se verificó la consistencia entre períodos, y se promediaron los valores por planta. Para las variables cuantitativas, se realizó el análisis de varianza (ANAVA) para un diseño en bloques completos al azar, utilizando el procedimiento GLM del programa estadístico SAS V 9.4. Cuando el ANAVA mostró diferencias estadísticamente

significativas, se realizó la prueba de Dunnett para identificar diferencias a favor de progenies con respecto a la variedad resistente (testigo). Los estimadores coeficiente de variación experimental (CV_e), coeficiente de variación genética (CV_g) y heredabilidad en sentido amplio (h_a^2) se determinaron por el método de los cuadrados medios esperados de los componentes de la varianza y el cociente entre los desvíos estándar respectivos y la media de cada variable, respectivamente (Barriga et al., 1983; Johnson et al., 1955).

Para determinar la resistencia de las progenies evaluadas se tomó la calificación máxima obtenida en cada unidad de observación, como el nivel que la enfermedad puede alcanzar, y se realizaron distribuciones de frecuencia para cada progenie. Las plantas con calificaciones iguales o menores a tres pueden ser consideradas resistentes (Eskes et al., 1990), por lo que, en este estudio se definió una progenie como resistente, cuando al menos el 90% de las plantas evaluadas presentan valores máximos menores o iguales a tres en la escala.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación agronómica. En términos generales, en los lotes experimentales se observaron progenies con atributos agronómicos de gran interés que denotan la fijación de estos, así como la posibilidad de obtener avances significativos a través de selección (Tabla 3).

Tabla 3. Valores medios y error estándar (EE) para las variables agronómicas de 44 progenies F4 y F5 evaluadas en los dos lotes experimentales.

Lote	Trat.	Progenie	Variable											
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE
1	1	MEG2.32(2009-14) #1419	125,4*	1,6	140,5*	2,2	5,4	0,3	16,2*	0,6	47,1*	2,0	9,7	0,3
	2	MEG2.32(2009-14) #889	155,5	2,2	151,0	2,3	5,9	0,4	12,4*	0,4	55,8*	2,1	9,3	0,2
	3	MEG2.32(2009-14) #72	128,9*	3,9	121,6*	5,8	3,6	0,3	11,8	0,4	49,6*	2,7	7,1*	0,5
	4	MEG2.32(2009-14) #78	125,8*	3,1	118,3*	4,7	4,3	0,7	11,1	0,6	51,6*	3,5	4,8*	0,3
	5	MEG2.32(2009-14) #1282	141,0	2,6	145,7	2,8	9,3	0,8	17,0*	0,9	47,0*	2,6	10,2	0,5
	6	MEG2.32(2009-14) #1465	156,5	3,3	149,0	3,9	7,1	0,4	10,2	0,6	56,0*	2,2	10,2	0,3
	7	MEG2.32(2009-14) #1200	131,8*	3,3	122,3*	4,0	6,5	0,7	12,4*	0,9	50,3*	3,0	9,1	0,5
	8	MEG2.32(2009-14) #1199	131,7*	2,8	132,4*	3,2	6,1	0,5	14,2*	0,6	35,9*	2,5	9,6	0,5
	9	MEG2.32(2009-14) #942	161,4*	2,4	157,4	2,2	4,6	0,5	9,7	0,5	75,2	1,3	10,8	0,4
	10	MEG2.32(2009-14) #598	150,6	2,3	145,1	3,5	3,8	0,3	16,7*	0,5	81,5	0,6	10,6	0,3
	11	MEG2.32(2009-14) #399	145,7	1,8	131,7*	2,0	7,0	0,4	13,8*	0,7	78,9	0,9	7,4*	0,3
	12	MEG2.32(2009-14) #1013	145,8	3,6	149,3	4,2	6,8	0,5	13,3*	0,7	59,9*	2,5	11,4	0,5

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Progenie	Variable											
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE
1	13	MEG2.32(2009-14) #487	139,8*	2,4	136,1*	3,4	6,8	0,6	10,5	1	23,5*	2,7	7,3*	0,4
	14	MEG2.32(2009-14) #1057	142,3	2,5	142,5	2,5	4,3	0,2	14,2*	0,5	59,8*	2,0	8,5	0,3
	15	MEG2.32(2009-14) #62	139,6	2,5	135,1*	2,3	6,2	0,4	14,4*	0,5	72,4	1,1	8,8	0,3
	16	MEG2.32(2009-14) #503	142,7	2,1	142,9	3,2	3,8	0,4	7,2	0,4	40,8*	2,1	11,3	0,4
	17	MEG2.32(2009-14) #951	137,3	3,2	144,7	3,1	3,6	0,2	10,7	0,6	83,8	1,1	7,6*	0,4
	18	MEG2.32(2009-14) #403	146,0	2,1	147,3	2,6	7,8	1,2	11,6	0,7	80,5	1,9	10	0,4
	19	MEG2.32(2009-14) #620	135,4*	2,5	144,9	3,3	4,3	0,3	13,9*	0,5	45,9*	2,5	10,1	0,4
	20	MEG2.32(2009-14) #1308	147,8	2,7	147,0	2,3	5,7	0,4	16,6*	1	67,4*	2,0	8,3	0,4
	21	MEG2.32(2009-14) #1070	135,6*	2,2	136,2*	3,1	7,9	1	15,1*	0,6	66,0*	1,6	8,6	0,5
	22	MEG2.32(2009-14) #1331	145,1	2,3	149,8	3,1	6,6	0,7	12,4*	0,5	66,9*	2,4	9,3	0,4
Variedad Resistente			151,0	3,2	151,8	3,9	5,6	0,4	9,7	0,5	79,1	1,9	9,7	0,4
Variedad Susceptible			154,3	2,0	150,7	2,2	7,2	0,9	11,0	0,6	42,7*	2,6	4,9*	0,3

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Progenie	Variable											
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE
2	1	FIT102009(Vitrina) #427	146,2	2,4	140,5*	3,1	4,4	0,3	15,2*	0,5	71,6	1,8	9,1*	0,4
	2	FIT102009(Vitrina) #493	178,1*	1,9	169,1	2,1	4,6	0,3	12,2	0,4	38,3*	2,9	11,9*	0,3
	3	FIT102009(Vitrina) #480	170,1*	2,0	163,8	2,1	6,3	0,7	14,2*	0,6	66,1*	2,6	9,4*	0,3
	4	FIT102009(Vitrina) #460	156,6	3,6	150,7*	3,3	9,1	0,8	15,9*	0,6	71	2,0	8,9	0,4
	5	FIT102009(Vitrina) #218	175,8*	2,2	176,6*	2,2	7,8	0,9	15,5*	0,7	83	1,2	10,8*	0,4
	6	FIT102009(Vitrina) #116	160,3	2,7	149,7*	3,3	4,6	0,3	15,2*	0,8	73,5	2,0	9	0,4
	7	FIT102009(Vitrina) #364	169,8*	1,8	164,3	2,2	3,5	0,2	11,8	0,3	65,6*	2,4	12,2*	0,5
	8	MEG2.32(2009-14) #1563	165,2*	2,3	165,8	3,0	6,3	0,7	13,7	0,8	60,1*	2,2	9,4*	0,3
	9	FIT102009(Vitrina) #612	153,9	1,9	150,7*	2,0	7,0	0,4	12,4	0,4	77,4	1,7	9,3*	0,4
	10	FIT102009(Vitrina) #341	152,0	1,9	150,9*	2,8	3,4	0,7	17,0*	1,2	45,1*	4,7	6,3	0,3
	11	FIT102009(Vitrina) #728	148,9	2,0	156,3	1,9	4,0	0,9	15,9*	1,9	30,2*	5,4	5,8*	0,3
	12	FIT102009(Vitrina) #621	151,3	2,6	146,9*	2,2	6,8	1,1	16,6	1,9	67,8*	3,0	5,9*	0,3

Continúa...

...continuación.

Lote	Trat.	Progenie	Variable											
			ALT (cm)	EE	DCOP (cm)	EE	GVAN (%)	EE	GCAR (%)	EE	GSUP (%)	EE	PACU (kg/cc/p)	EE
2	13	FIT102009(Vitrina) #633	157,4	2,1	137,7*	2,2	4,6	0,6	12,8*	1,1	38,6*	3,7	6,1*	0,3
	14	FIT102009(Vitrina) #635	145,8	2,2	141,6*	2,2	6,5	0,7	13	0,8	48,9*	3,7	7,0	0,3
	15	MEG2.32(2010-5) #34	173,5*	2,1	166,0	2,5	4,7	0,5	16,1*	0,9	53,8*	2,6	9,1*	0,3
	16	MEG2.32(2010-5) #67	166,2*	2,4	153,0	2,5	6,3	0,5	7,6	1	90,3	1,1	8,8	0,3
	17	MEG2.32(2010-5) #197	153,1	2,4	138,8*	2,1	5,6	0,5	17,8*	0,9	62,5*	3,0	7,8	0,4
	18	MEG2.32(2010-5) #461	169,6*	2,6	161,2	3,0	3,8	0,3	12,7	0,5	61,9*	2,3	9,0	0,4
	19	MEG2.32(2010-5) #205	146,8	2,5	150,2*	3,7	7,2	0,8	18,4*	0,7	71,7	1,5	8,0	0,4
	20	MEG2.32(2010-5) #528	141,8*	2,0	146,9*	2,0	7,4	0,8	20,2*	1	67,0*	2,5	6,0*	0,3
	21	MEG2.32(2010-5) #384	168,0*	2,5	164,9	3,1	5,0	0,5	10,6	0,5	70,0	1,2	9,2*	0,3
	22	MEG2.32(2010-5) #633	158,7	3,7	151,7*	3,1	4,3	0,3	14,5	0,5	73	1	9,8*	0,3
Variedad Resistente			154,0	2,2	163,6	3,0	8,9	0,9	9,5	0,7	87,7	0,8	7,6	0,3
Variedad Susceptible			152,8	3,2	148,4*	3,6	3,3	0,3	10,2	0,4	52,8*	1,7	6,9	0,3

* Indica diferencias estadísticamente significativas con respecto a la variedad comercial (Variedad Castillo®) según prueba de Dunnett al 5%.

ALT: Altura de planta, DCOP: diámetro de copa, GVAN: contenido de granos vanos, GCAR: tipo caracol, GSUP: tamaño de grano y PACU: producción acumulada.

Adicional al comportamiento agronómico de los genotipos evaluados, en el mejoramiento genético los estimadores CV_e , CV_g y h_a^2 son de gran relevancia. El primero es un indicativo de la variabilidad de los datos registrados en el lote experimental, además de permitir cuantificar de forma práctica la influencia del ambiente sobre la expresión de una determinada característica. Así mismo, el CV_g indica la cantidad de variabilidad genética entre familias y las medias poblacionales respectivas, mientras la h_a^2 expresa la confiabilidad del valor fenotípico como estimador del valor genético, convirtiéndose en un valor predictivo del comportamiento de la población (Falconer, 1987). De acuerdo con este, a mayor valor de heredabilidad, mayor será la ganancia genética por selección. En resumen, estos estimadores representan la magnitud de la variabilidad genética existente e indican que la selección de las progenies con los mejores valores repercutirá en la mejora de estos atributos en la población (Piza et al., 2023).

En las progenies el CV_e presentó valores bajos (<10%) para tres de las seis variables evaluadas, para el caso de aquellas relacionadas al crecimiento de la planta (ALT, DCOP) los valores fueron similares en el parámetro CV_g , mientras para el contenido de GSUP fue cerca de un tercio de su valor (Tabla 4). Este comportamiento permite denotar la imposibilidad de seguir reduciendo el porte de las plantas a través de selección, mientras que la variación debida al componente genético en el tamaño de grano, así como para las demás variables permite obtener avances importantes en la población.

Para el caso de las variables ALT y DCOP, fenotípicamente para ambos lotes experimentales todas las progenies fueron consideradas de crecimiento compacto por dos razones fundamentales: primero, los valores para las variables relacionadas (ALT,

DCOP) no se alejaron de los observados para este tipo de crecimiento; segundo, en las observaciones realizadas en almácigo y durante el establecimiento no se denotó en ninguna de las progenies la presencia de entrenudos de mayor longitud, característico de variedades de porte alto.

Adicionalmente, el bajo CV_g puede estar relacionado con el determinismo genético de esta variable en la especie, donde a pesar de ser de tipo cuantitativo, se han identificado tres genes dominantes (*Ct*, *Sb* y *Sr*) (Carvalho et al., 1984) que reducen de manera significativa la longitud de entrenudos, siendo las progenies evaluadas de constitución *CtCt*. Adicionalmente los valores de h_a^2 , superiores al 78% para estas variables manifiestan la posibilidad de predecir su comportamiento en generaciones posteriores. Es de tener en cuenta que las estimaciones realizadas son el resultado de su interacción en un único ambiente, por lo que los valores de h_a^2 determinados pueden ser sobreestimados (Johnson et al., 1955; Servellón, 1996), siendo necesaria su comprobación temporal y espacial. Sin embargo, en *C. arabica* la variación observada para estas variables son mayoritariamente de origen genético por lo que, si bien es reconocida una interacción con el ambiente, las diferencias entre progenies tienden a mantenerse a través de estos (Castillo & Moreno, 1988).

Caso contrario ocurre con las características de grano, donde los mayores valores de CV_g y h_a^2 fueron observados para las progenies evaluadas en ambos lotes experimentales, denotando la posibilidad de obtener avances debido al control genético existente. En el caso de los defectos de grano, su ocurrencia está relacionada con abortos en estados tempranos (grano caracol) o tardíos (grano vano) de desarrollo del grano (Bertrand et al., 2011) que, bajo condiciones óptimas de cultivo tienen un componente genético importante, de mayor

Tabla 4. Parámetros estadísticos para distintas variables medidas en 44 progenies F4 y F5 evaluadas en los dos lotes experimentales.

Variable	QM _{Pro}				QM _{Res}		μ _{Pr}		CVe		CVg		h ² _a	
	Lote 1	p-value	Lote 2	p-value	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2
ALT (cm)	590,0	1,9 E-12	703,6	2,4 E-15	88,4	79,3	141,9	159,6	6,6	5,6	6,5	6,4	85,0	88,7
DCOP (cm)	597,0	3,1 E-8	684,9	9,1 E-12	128,2	102,2	141,3	154,6	8,0	6,6	6,3	6,4	78,5	85,1
GVAN (%)	13,0	3,4 E-14	10,4	1,1 E-13	1,6	1,5	5,6	5,4	22,7	23,1	24,7	22,7	87,5	85,7
GCAR (%)	41,2	6,7 E-23	31,3	7,2 E-12	2,9	5,0	13,1	13,7	13,1	16,5	19,5	15,4	93,1	84,2
GSUP (%)	1603,0	1,2 E-24	1291,5	6,3 E-47	32,6	25,5	59,3	64,0	9,8	8,1	27,4	23,1	98,0	98,0
PACU (kg/cc/p)	16,6	1,9 E-16	19,8	4,1 E-20	2,3	1,6	9,1	8,6	18,4	15,4	18,2	20,8	86,0	91,7

QM_{Pro} cuadrado medio progenie; QM_{Res}, cuadrado medio del residuo; μ_{Pr}, media de progenies; CVe, coeficiente de variación experimental; CVg, coeficiente de variación genética; h²_a, heredabilidad en sentido amplio.
 ALT: Altura de planta, DCOP: diámetro de copa, GVAN: contenido de granos vanos, GCAR: tipo caracol, GSUP: tamaño de grano y PACU: producción acumulada.

frecuencia en poblaciones de origen híbrido (Alvarado & Cortina, 1997; Cortina & Castro, 2015). A su vez, para el tamaño de grano se reconoce una alta influencia ambiental (Castillo & Moreno, 1982) y efectos heteróticos (Castillo & Moreno, 1988).

En el cultivo de café la variación existente para las características de grano ha permitido cambios importantes, donde el mayor tamaño y reducido contenido de defectos (vanos y caracol) son la constante y un prerrequisito de aceptación (Alvarado, 2002). Entre lotes experimentales, las progenies evaluadas presentan valores similares, donde las diferencias entre las medias no supera el 8,0%, por lo que podrían considerarse uniformes. Este hecho está posiblemente relacionado a los criterios de selección establecidos en generaciones anteriores, aspecto que se refleja principalmente en el contenido de GVAN, donde todas las progenies presentaron valores dentro del rango de aceptación comercial (<10%) (Tabla 3). Este comportamiento es concordante con otros estudios (Castillo & Moreno, 1988), que resaltan la alta respuesta a la selección de esta variable, con h_a^2 entre 0,51 y 0,86, valores similares a los observados en este estudio (0,87 – 0,85).

Entre tanto, el contenido de GCAR tuvo una media de 13,1 y 13,7, donde el 20% de las progenies presentan valores por debajo del valor fijado como criterio de selección (<10%), mientras en 73% de estas no supera el 15% (Tabla 3), valor común en variedades comerciales de amplia aceptación (Castillo & Moreno, 1988).

El mayor contenido de este tipo de grano en las progenies evaluadas puede tener relación con los progenitores utilizados. En primer lugar, el 70% de estas utilizan derivados de hibridación interespecífica (*C. arabica* x *C. canephora*) donde una

alta frecuencia de este tipo de grano es característico (Alvarado & Cortina, 1997; Cortina, 2019; Cortina & Castro, 2015). En segundo lugar, como progenitor recurrente es utilizado germoplasma de procedencia etíope, donde este tipo de grano es predominante (Meyer et al., 1968). Estos hechos demuestran la importancia del conocimiento de las fuentes a utilizar por los programas de mejoramiento genético, del cual dependerá la intensidad de selección requerida cuando se quiere hacer selección para diversos atributos. Este aspecto es resaltado (Bertrand et al., 2005), y aunque el valor de h_a^2 observado en las poblaciones bajo estudio es mayor a 84%, los CV_g inferiores al 20% indicarían que la ganancia agronómica posiblemente sea baja en generaciones posteriores. Sin embargo, al igual que para las variables de crecimiento, los valores para los defectos observados en las progenies no son una limitante importante. En contraste, variables como el tamaño de grano, rendimiento y especialmente resistencia a la roya del cafeto, son clave para el uso y aceptación comercial de cualquier genotipo.

En las progenies bajo estudio se observó un contenido de GSUP comprendido entre el 21,7% y el 88,3%, siendo para el 54% de ellas superior al 60%, valor de referencia en variedades tradicionales (Tabla 3). A pesar de que se ha indicado una h_a^2 de 0,39 (Castillo & Moreno, 1982) y la presencia de efectos heteróticos, los cuales tienden a disminuir a través de generaciones, el contenido de GSUP es después de la resistencia a la roya, la variable donde mayores logros se ha obtenido en las variedades actuales (Alvarado, 2002; Flórez et al., 2016). Los contenidos de GSUP han pasado de alrededor de 60% a valores por encima del 80% (Flórez et al., 2016), preferidas por los caficultores, dada su relación directa con un mayor valor comercial del producto

(Alvarado, 2002). Contrario a otros estudios (Castillo & Moreno, 1982), en este la h_a^2 tomó valores en ambos lotes mayores al 95%, que sumado a los CVg mayores al 20% indican la posibilidad de seleccionar progenies con altos contenidos de GSUP y que esta característica posiblemente será mantenida en generaciones posteriores. Este hecho es resaltado por Castillo & Moreno (1988), donde además indican que existe una correlación alta ($>0,67$) entre progenitores y progenie para esta variable. No obstante, en este estudio solo el 25% de las progenies presentaron un comportamiento similar al de su progenitor, siendo en el lote experimental uno, el contenido menor al esperado, mientras en el lote experimental dos ocurrió el caso opuesto.

Es de anotar que el comportamiento para esta variable en las familias que dieron origen a las progenies evaluadas en el lote experimental dos, pudo ser influenciado por condiciones ambientales o de manejo agronómico, dado que las variedades comerciales utilizadas como control presentaron contenidos inferiores a los esperados (datos no mostrados). Si bien los valores de h_a^2 y CVg son favorables para la selección, los factores no genéticos también deben ser considerados.

El potencial productivo es un objetivo básico de los programas de mejoramiento genético, debido a que otros aspectos como calidad y resistencia a enfermedades pierden interés cuando la producción es baja. Las progenies evaluadas produjeron entre 4,8 y 12,2 kg/planta de café cereza (cc), la media entre lotes experimentales, difirió en 0,5 kg/planta de cc, mientras los valores extremos difirieron entre 0,8 y 1,0 kg/planta de cc (Tabla 3). En ambos lotes experimentales, los parámetros de h_a^2 y CVg mostraron valores de utilidad para la selección, similares a los reportados en otros estudios (Castillo

& Moreno, 1982), que en conjunto con las demás características evaluadas podrían denotar el potencial de estas progenies. Aunque la selección de las progenies de mayor producción asegura ganancias considerables en las generaciones siguientes (Castillo & Moreno, 1988), los valores de CVg no superaron el 20%, lo que limitaría dicha ganancia. De igual manera, para el lote experimental uno, el CVe (18,43%) fue similar al CVg (18,16%), consecuencia posiblemente de la alta interacción genotipo x ambiente, la cual condiciona la expresión de esta variable.

Resistencia a la roya

En el caso de la resistencia a la roya, principal propósito de desarrollo de las progenies bajo estudio, aunque en las generaciones anteriores se hizo selección por esta característica (Tabla 2), se observó una considerable variación en su respuesta bajo condiciones de campo. De acuerdo con los criterios de selección establecidos, el 25% de las progenies evaluadas se destaca por su resistencia a la roya, mientras en las demás se observó un comportamiento variable, sin alcanzar en ningún caso valores similares a los de la variedad susceptible (Tabla 5).

En café, la resistencia a la enfermedad se rige bajo la teoría de gen por gen (Flor, 1971), hecho que permitió la identificación de genes y su transferencia para la obtención de variedades resistentes mediante selección asistida (Mayne, 1932; Rodrigues et al., 1975). Después de la llegada de la enfermedad a América, la infección natural en el campo fue implementada por los programas de mejoramiento genético (Moreno, 2004), dado que una mayor diversidad de variantes de la enfermedad hacía poco eficiente la selección previamente realizada con razas conocidas (Alvarado & Cortina, 1997).

Tabla 5. Distribución de frecuencia para la calificación máxima de incidencia por roya en 44 progenies F4 y F5 evaluadas en dos lotes experimentales.

Lote	Tratamiento	Progenie	Porcentaje de plantas de cada en cada grado de la escala I de Eskes y Braghini			Total Plantas	Moda
			0-3	4-5	6-8		
1	1	MEG2.32(2009-14) #1419	66,7	22,9	10,4	48	3
	2	MEG2.32(2009-14) #889	8,3	56,3	35,4	48	2
	3	MEG2.32(2009-14) #72	58,1	41,9	0,0	43	1
	4	MEG2.32(2009-14) #78	64,6	31,3	4,2	48	4
	5	MEG2.32(2009-14) #1282	20,8	47,9	31,3	48	5
	6	MEG2.32(2009-14) #1465	100,0	0,0	0,0	47	0
	7	MEG2.32(2009-14) #1200	68,1	17,0	14,9	47	0
	8	MEG2.32(2009-14) #1199	93,6	6,4	0,0	47	0
	9	MEG2.32(2009-14) #942	23,4	55,3	21,3	47	4
	10	MEG2.32(2009-14) #598	79,2	20,8	0,0	48	3
	11	MEG2.32(2009-14) #399	27,1	58,3	14,6	48	4
	12	MEG2.32(2009-14) #1013	80,0	17,8	2,2	45	3
	13	MEG2.32(2009-14) #487	10,4	50,0	39,6	48	5
	14	MEG2.32(2009-14) #1057	6,3	87,5	6,3	48	4
	15	MEG2.32(2009-14) #62	16,7	81,3	2,1	48	4
	16	MEG2.32(2009-14) #503	100,0	0,0	0,0	48	0
	17	MEG2.32(2009-14) #951	91,1	8,9	0,0	45	2
	18	MEG2.32(2009-14) #403	14,6	70,8	14,6	48	4
	19	MEG2.32(2009-14) #620	85,4	14,6	0,0	48	0
	20	MEG2.32(2009-14) #1308	10,4	77,1	12,5	48	4
	21	MEG2.32(2009-14) #1070	72,9	25,0	2,1	48	3
	22	MEG2.32(2009-14) #1331	66,7	31,3	2,1	48	4
		Variedad Susceptible	0	0	100	48	8

Continúa...

...continuación.

Lote	Tratamiento	Progenie	Porcentaje de plantas de cada en cada grado de la escala I de Eskes y Braghini			Total Plantas	Moda
			0-3	4-5	6-8		
2	1	FIT102009(Vitrina) #427	72,9	16,7	10,4	48	3
	2	FIT102009(Vitrina) #493	93,8	6,3	0,0	48	2
	3	FIT102009(Vitrina) #480	100,0	0,0	0,0	48	0
	4	FIT102009(Vitrina) #460	50,0	41,7	8,3	48	5
	5	FIT102009(Vitrina) #218	100,0	0,0	0,0	48	0
	6	FIT102009(Vitrina) #116	66,7	25,0	8,3	48	1
	7	FIT102009(Vitrina) #364	89,6	10,4	0,0	48	0
	8	MEG2.32(2009-14) #1563	29,2	58,3	12,5	48	4
	9	FIT102009(Vitrina) #612	100,0	0,0	0,0	47	0
	10	FIT102009(Vitrina) #341	55,3	44,7	0,0	47	4
	11	FIT102009(Vitrina) #728	85,4	14,6	0,0	48	5
	12	FIT102009(Vitrina) #621	12,5	83,3	4,2	48	4
	13	FIT102009(Vitrina) #633	4,2	70,8	25,0	48	5
	14	FIT102009(Vitrina) #635	10,4	58,3	31,3	48	5
	15	MEG2.32(2010-5) #34	31,3	33,3	35,4	48	6
	16	MEG2.32(2010-5) #67	27,1	64,6	8,3	48	4
	17	MEG2.32(2010-5) #197	81,3	16,7	2,1	48	0
	18	MEG2.32(2010-5) #461	53,2	27,7	19,1	47	2
	19	MEG2.32(2010-5) #205	20,8	79,2	0,0	48	4
	20	MEG2.32(2010-5) #528	66,7	29,2	4,2	48	3
	21	MEG2.32(2010-5) #384	89,6	10,4	0,0	48	2
	22	MEG2.32(2010-5) #633	93,8	6,3	0,0	48	1
		Variedad Susceptible	0,0	22,9	77,1	48	7

Es necesario tener en cuenta que, si las condiciones ambientales no son favorables, las infecciones naturales pueden conducir a una sobrestimación de la resistencia de determinado genotipo y, por lo tanto, la fijación de la característica en la población. En este sentido, la observación de la respuesta frente a la roya, en progenies descendientes de una misma familia F3, contribuye a validar los resultados, dado que en el 90% de ellas, la incidencia de la enfermedad fue comparable. Para el caso de las progenies MEG2.32(2009-14) #1199 y MEG2.32(2009-14) #1200 fue contrastante, dado que las plantas de la segunda se distribuyeron en siete de los nueve valores de la escala, a diferencia de la primera cuyo valor máximo registrado en las plantas fue de cuatro (Tabla 5). Este comportamiento puede obedecer a una posible segregación en los genes que condicionan la resistencia en uno de estos genotipos o a un posible escape de la enfermedad.

En relación a la correspondencia entre el progenitor y su progenie, se denotó que en aquellas seleccionadas por tener el 100% de sus plantas con los valores más bajos en la escala (0-3), conllevó en el 43% de los casos a una respuesta similar en su progenie. Así mismo, a medida que disminuyó la resistencia en el progenitor, aumentó la incidencia en su progenie, evidenciando la necesidad de una fuerte presión de selección desde etapas tempranas. El control susceptible, utilizado para determinar el grado de infección natural y las condiciones ambientales favorables para su desarrollo, presentó en ambos lotes experimentales valores en la escala ≥ 5 , con moda de ocho y siete en el lote experimental uno y dos, respectivamente, siendo así el de mayor afectación. En contraste, ninguna de las progenies evaluadas fue similar a esta, prevaleciendo valores intermedios en la escala de evaluación, predominando

modas de tres y cuatro, las cuales podrían considerarse como moderadamente resistentes (Eskes et al., 1990).

Si bien es cierto que en café la resistencia de tipo cualitativo o vertical (Van der plank, 1963) ha demostrado ser poco durable (Eskes et al., 1990), su utilización dentro de la estrategia de diversidad ha sido efectiva para el manejo de la enfermedad, como lo han demostrado las variedades compuestas utilizadas en la caficultura colombiana (Moreno, 2004). Esta afirmación es soportada por dos aspectos fundamentales: (i) los parámetros para determinar su eficacia son cumplidos (período de tiempo utilizadas, área ocupada y condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la enfermedad) (Johnson, 1984); y (ii) a diferencia de variedades tales como Costa Rica 95 o Lempira 98 de liberación posterior y usadas a menor escala, la variedad Colombia (Castillo & Moreno, 1988) continúa siendo considerada resistente. Adicionalmente, las observaciones realizadas señalan como en café el uso de esta estrategia, ante la presencia de variantes compatibles, limita el desarrollo de la enfermedad, evitando alcanzar niveles de daño económico (Alvarado & Moreno, 2005; Arias, 2019).

Así mismo, para *C. arabica* a los genes responsables de la resistencia cualitativa le han sido atribuidos efectos residuales que condicionan la resistencia cuantitativa una vez la primera es vencida (Herrera et al., 2009). En este sentido, son diversos los estudios en café que señalan este hecho, en su gran mayoría realizados bajo condiciones controladas, a través de la estimación de diferentes componentes de este tipo de resistencia (Alvarado & Solórzano, 2001; Eskes et al., 1990; Zambolim, 2016). En genotipos considerados resistentes, ante la

presencia de variantes de roya compatibles y fuera del esquema de diversidad, la enfermedad puede alcanzar en el tiempo valores similares a los observados en genotipos susceptibles (Arias, 2019). Este comportamiento también fue observado en *Plantago lanceolata*, donde genotipos seleccionados por resistencia cuantitativa bajo condiciones controladas, eran afectadas de forma similar que los susceptibles en condiciones de campo (Susi & Laine, 2015). Por tal motivo, una alta intensidad de selección debe ser realizada y aunque las progenies con valores intermedios podrían poseer resistencia de tipo cuantitativo, el desconocimiento de su durabilidad, sumado al largo ciclo de cultivo de la especie (>20 años) restringiría su uso.

Potencial de selección

Si bien, la importancia económica de la roya del café indica la necesidad de ser un objetivo básico en el mejoramiento genético de la especie, en la práctica es un atributo más dentro del conjunto agronómico deseado. En las progenies evaluadas, como se denotó anteriormente, la variación observada en el crecimiento (ALT, DCOP) y defectos de grano (GVAN, GCAR) no distan de las observadas en las variedades comerciales, por lo que no son limitantes. Caso contrario ocurre con GSUP y la PACUM, donde una amplia variación fue observada, siendo además variables clave para definir su aceptación o rechazo de una determinada progenie. La Tabla 6 muestra el comportamiento para estas variables en las progenies consideradas de mayor resistencia.

El tamaño de grano es quizás la principal limitante de selección para las progenies resistentes a la roya, dado que el contenido de

GSUP en seis de ellas es significativamente inferior al de las variedades actualmente utilizadas (Dunnett $p < 0,05$), identificando incluso tres casos con menos del 50% de grano supremo. Caso opuesto ocurre con el potencial productivo, el cual es igual (Dunnett $p > 0,05$) o con diferencias a favor (Dunnett $p < 0,05$) al observado en el testigo comercial de mejor rendimiento, exceptuando la progenie MEG2.32(2009-14) #951. La selección conjunta por diversos atributos permite identificar cuatro progenies, equivalentes al 9% de la población, con potencial para su evaluación en pruebas de adaptación regional, con miras a ser utilizadas en la caficultura colombiana en el corto plazo.

Un punto importante a considerar está relacionado con el origen genético de la resistencia a la roya de estas progenies, dado que proceden de diferentes híbridos, hecho que indicaría la presencia de diversos genes de resistencia. En tres de los casos se usó como progenitor femenino derivados de HIE, y uno proveniente de CatxHdT, mientras que como donante de polen se utilizaron tres accesiones etíopes recolectadas por la FAO y ORSTOM en Etiopía (Meyer et al., 1968; Guillaumet & Halle, 1978), y la variedad N.197 proveniente del programa de mejoramiento genético de Tanzania (Indian Coffee Board, 1953). El origen del germoplasma utilizado puede ser considerado diverso, no explotado de forma comercial y bajo el esquema de diversidad utilizado en las variedades compuestas, contribuirá de forma importante en la durabilidad de la resistencia. Es este sentido, la inclusión de la mayor cantidad posible de heterogeneidad genética de resistencia dentro de una variedad repercutirá en su durabilidad (Clin et al., 2022), limitando la diseminación de los cambios en el patógeno con la capacidad de vencerla.

Tabla 6. Comportamiento agronómico de las progenies con menor incidencia de la enfermedad (>90% plantas con calificaciones ≤3).

Lote	Trat.	Progenie	(Porcentaje de plantas con incidencia ≤3 escala de Eskes & Braghini)	GSUP (Porcentaje de granos sobre malla 17/64)	PACU (kg/planta de cc)
1	6	MEG2.32(2009-14) #1465	100%	56,0* [↓]	10,2
	8	MEG2.32(2009-14) #1199	94%	35,9* [↓]	9,6
	16	MEG2.32(2009-14) #503	100%	40,8* [↓]	11,3
	17	MEG2.32(2009-14) #951	91%	83,8	7,6*
2	2	FIT102009(Vitrina) #493	94%	38,3* [↓]	11,9* [↑]
	3	FIT102009(Vitrina) #480	100%	66,1* [↓]	9,4
	5	FIT102009(Vitrina) #218 [‡]	100%	83,0	10,8* [↑]
	7	FIT102009(Vitrina) #364	90%	65,6* [↓]	12,2* [↑]
	9	FIT102009(Vitrina) #612 [‡]	100%	77,4	9,3* [↑]
	22	MEG2.32(2010-5) #633 [‡]	94%	73,0	9,8* [↑]
	21	MEG2.32(2010-5) #384 [‡]	90%	70,0	9,2* [↑]

*Dentro de cada lote experimental, el valor de la progenie presenta diferencias estadísticas significativas con respecto a la variedad comercial, según prueba de Dunnett al 5%. [↓] valor inferior o [↑]superior al testigo comercial.

[‡] Progenies con atributos agronómicos con potencial para selección.

Puede concluirse que la obtención de variedades en café, debido al largo ciclo de cultivo, requiere de un esfuerzo en tiempo y recursos, donde las fuentes a utilizar y la presión de selección ejercida impactará el cumplimiento de los objetivos propuestos. La evaluación realizada demuestra este hecho, donde después de 20 años de haber sido elegidas las fuentes y formadas las poblaciones, fue posible obtener un grupo de progenies con las características agronómicas propuestas. Adicionalmente, es la primera vez que germoplasma de otros orígenes, diferentes a Caturra x Híbrido de Timor, especialmente etíope, es utilizado en la obtención de progenies avanzadas, las cuales pueden ser fácilmente distribuidas a través de semillas. Es importante anotar que, la utilización de estos orígenes ha sido ampliamente aprovechada en la obtención de híbridos F1, no obstante, la ausencia de técnicas prácticas a precios razonables para su distribución han sido su principal limitante (McCook & Montero-Mora, 2024), por lo que su área cultivada es mínima. El uso comercial de las progenies seleccionadas estará condicionado por los resultados de las pruebas de adaptación regional, paso siguiente en el proceso de fitomejoramiento, que de ser favorables impactará de manera positiva a la caficultura.

AGRADECIMIENTOS

A los colaboradores del Programa de Mejoramiento Genético, especialmente a los señores Jhon Esteban Quintero Arango, Juan Pablo Montoya y Gilbert Rodríguez. Al ingeniero agrónomo Jhon Félix Trejos y demás colaboradores de la Estación Experimental Naranjal. La investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), código MEG102004.

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

LITERATURA CITADA

- Acuña-Zornosa, R. & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2020). Identification of acid-tolerant coffee genotypes in a coffee germplasm collection in Colombia. *Coffee Science*, 15, e151727. <https://doi.org/10.25186/v15i.1727>
- Alvarado, G. (2002). Mejoramiento de las características agronómicas de la variedad Colombia mediante la modificación en su composición. *Avances Técnicos Cenicafe*, 304, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0304>
- Alvarado, G., & Cortina, H. (1997). Comportamiento agronómico de progenies de híbridos triploides de *C. arabica* var. Caturra x (Caturra x *C. canephora*). *Revista Cenicafe*, 48(2), 73–91.
- Alvarado, G., & Moreno, G. (2005). Cambio de la virulencia de *Hemileia vastatrix* en progenies de Caturra X Híbrido de Timor. *Revista Cenicafe*, 56(2), 110–126.
- Alvarado, G., & Solórzano, L. (2001). Caracterización de la resistencia incompleta a *Hemileia vastatrix* en genotipos de café en Colombia. *Revista Cenicafe*, 52(1), 5–19. <http://hdl.handle.net/10778/765>
- Arias, J. C. (2019). Efecto de mezclas y unidad del área del genotipo sobre el incremento progresivo de *Hemileia vastatrix* Berk. y Br. *Revista Cenicafe*, 70(2), 30–44. <https://doi.org/10.38141/10778/70203>

- 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>
- Arias, J. C., & Flórez, C. P. (2023). Identification of sources of male sterility in the Colombian Coffee Collection for the genetic improvement of *Coffea arabica* L. *PLOS ONE*, 18(9), e0291264. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291264>
- Arias, J. C., López-Monsalve, L. F., Medina-Rivera, R. D., & Flórez-Ramos, C. P. (2025). Sensory characterization of the Ethiopian germplasm of *Coffea arabica* L. conserved in the Colombian Coffee Collection. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1497350. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1497350>
- Barriga, P., Fuentes, R., Carrillo, B., & Jobet, C. (1983). Heredabilidad de algunos caracteres agronómicos y morfofisiológicos en triticales hexaploide. *Agro Sur*, 11(1), 43–48
- Benti, T., Gebre, E., Tesfaye, K., Berecha, G., Lashermes, P., Kyallo, M., & Kouadio Yao, N. (2021). Genetic diversity among commercial arabica coffee (*Coffea arabica* L.) varieties in Ethiopia using simple sequence repeat markers. *Journal of Crop Improvement*, 35(2), 147–168. <https://doi.org/10.1080/15427528.2020.1803169>
- Bertrand, B., Alpizar, E., Lara, L., SantaCreo, R., Hidalgo, M., Quijano, J. M., Montagnon, C., Georget, F., & Etienne, H. (2011). Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with american pure line cultivars. *Euphytica*, 181(2), 147–158. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0372-7>
- Bertrand, B., Davis, A. P., Maraval, I., Forestier, N., & Mieulet, D. (2023). Potential beverage quality of three wild coffee species (*Coffea brevipes*, *C. congensis* and *C. stenophylla*) and consideration of their agronomic use. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(7), 3602–3612. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12347>
- Bertrand, B., Etienne, H., Cilas, C., Charrier, A., & Baradat, P. (2005). *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. *Euphytica*, 141(3), 255–262. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-7681-7>
- Carvalho, A., Medina Filho, H. P., Fazuoli, L. C., & Costa, W. M. da. (1984). Number of loci and gene action of short stature factors in *Coffea arabica* L. *Bragantia*, 43, 425–442. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051984000200014>
- Castillo, J. (1977). Producción, variabilidad y distribución de la cosecha en introducciones de café, *Revista Cenicafé*, 28(3), 82–107. <http://hdl.handle.net/10778/4311>
- Castillo, J. (1978). Características de grano de introducciones de café. *Revista Cenicafé*, 29(1), 3–17. <http://hdl.handle.net/10778/4310>
- Castillo, J., & Moreno, G. (1982). Selección de cruzamientos derivados del Híbrido de Timor en la obtención de variedades mejoradas de café para Colombia. *Revista Cenicafé*, 32(2), 37–53.
- Castillo, J., & Moreno, G. (1988). *La Variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del cafeto*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0023>
- Castillo, J., Moreno, G., & López, S. (1976). *Uso de resistencia genética a Hemileia vastatrix Berk. & Br. Existente en el germoplasma de café en Colombia*. *Revista Cenicafé*, 27(1), 3–25. <http://hdl.handle.net/10778/994>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2016). *Informe Anual Cenicafé 2016*. <https://doi.org/10.38141/10783/2016>
- Clin, P., Groggnard, F., Andrivon, D., Mailleret, L., & Hamelin, F. M. (2022). Host mixtures for plant disease control: Benefits from pathogen selection and immune priming. *Evolutionary Applications*, 15(6), 967–975. <https://doi.org/10.1111/eva.13386>
- Cortina, H. (2019). Evaluación de progenies f4rc1 de (Caturra x *Coffea canephora*) x Caturra. *Revista Cenicafé*, 70(1), 44–64. <https://doi.org/10.38141/10778/70104>
- Cortina, H., & Castro, B. (2015). Evaluación de híbridos interespecíficos de *Coffea arabica* x *Coffea canephora* con resistencia a *Hemileia vastatrix* y *Ceratocystis colombiana*. *Revista Cenicafé*, 66(2), 17–29.
- Cortina, H. A., Moncada, M., & Herrera, J. C. (2012). Variedad Castillo®: Preguntas frecuentes. *Avances Técnicos Cenicafé*, 426, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0426>
- Esques, A. B., Hoogstraten, J. G. J., Toma-Braghini, M., & Carvalho, A. (1990). Race-specificity and inheritance of incomplete resistance to coffee leaf rust in some Icatu coffee progenies and derivatives of Híbrido de Timor. *Euphytica*, 47(1), 11–19. <https://doi.org/10.1007/BF00040356>
- Esques, A. B., & Toma-Braghini, M. (1981). Métodos de evaluación de la resistencia contra la roya del cafeto

- (*Hemileia vastatrix* Berk. et Br.). *Boletín Fitosanitario FAO*, 29(3-4), 56–66.
- Falconer, D. S. (1987). *Introducción a la genética cuantitativa*. Compañía Editorial Continental.
- Flor, H. H. (1971). Current Status of the Gene-For-Gene Concept. *Annual Review of Phytopathology*, 9(1), 275–296. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.09.090171.001423>
- 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*, 469, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0469>
- Meyer, F. G., Fernie, L. M., Narasimhaswamy, R. L., Monaco, L. C., & Greathead, D. J. (1968). *FAO Coffee Mission to Ethiopia 1964-1965*. FAO.
- Georget, F., Marie, L., Alpizar, E., Courtel, P., Bordeaux, M., Hidalgo, J. M., Marraccini, P., Breitler, J., Déchamp, E., Poncon, C., Etienne, H., & Bertrand, B. (2019). Starmaya: The first arabica F1 coffee hybrid produced using genetic male sterility. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1344. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01344>
- Gichuru, E., Alwora, G., Gimase, J., & Kathurima, C. (2021). Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*) in Kenya—A Review. *Agronomy*, 11(12), 2590. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122590>
- Guillaumet, J. L., & Halle, F. (1978). Échantillonnage du matériel *Coffea arabica* récolté en Éthiopie. En A. Charrier (Ed.), *Etude de la structure et de la variabilité génétique des caféiers: Résultats des études et des expérimentations réalisées au Cameroun, en Côte d'Ivoire et à Madagascar sur l'espèce Coffea arabica L. collectée en Ethiopie par une mission ORSTOM en 1966- Bulletin IFCC 14* (pp. 13–18). IFCC.
- Herrera, J. C., Alvarado, G., Cortina, H. A., Combes, M. C., Romero, G., & Lashermes, P. (2009). Genetic analysis of partial resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) introgressed into the cultivated *Coffea arabica* L. from the diploid *C. canephora* species. *Euphytica*, 167(1), 57–67. <https://doi.org/10.1007/s10681-008-9860-9>
- Indian Coffee Board. (1953). *The sixth annual report of the research department of the Indian Coffee Board (1952 – 53)* (Núm. 6; Bulletin Research Department, pp. 7–27).
- Jaramillo, A. (2018). *El Clima de la Caficultura en Colombia*. Cenicafé.
- Johnson, H., Robinson, H. F., & Comstock, R. E. (1955). Estimates of Genetic and Environmental Variability in Soybeans I. *Agronomy Journal*, 47(7), 314–318. <https://doi.org/10.2134/agronj1955.00021962004700070009x>
- Johnson, R. (1984). A Critical Analysis of Durable Resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 22(1), 309–330. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.22.090184.001521>
- Mayne, W. W. (1932). Physiological Specialisation of *Hemileia vastatrix* B. and Br. *Nature*, 129(3257), 510–510. <https://doi.org/10.1038/129510a0>
- McCook, S., & Montero Mora, A. (2024). Coffee breeding in a time of crisis: F₁ hybrids in Central America since 1990. *Plants, People, Planet*, 6(5), 1070–1079. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10480>
- Molina, D., & Medina Rivera, R. (2022). Identifying Coffea genotypes tolerant to water deficit. *Coffee Science*, 17, e171994. <https://doi.org/10.25186/v17i.1994>
- Molina, D., Moncada-Botero, M. P., Cortina-Guerrero, H. A., & Benavides, P. (2022). Searching for a Coffee variety with antibiosis effect to *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Curculionidae). *Euphytica*, 218(7), 97. <https://doi.org/10.1007/s10681-022-03047-3>
- Moreno, G. (2004). Obtención de variedades de café con resistencia durable a enfermedades, usando la diversidad genética como estrategia de mejoramiento. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 187–200. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.28\(107\).2004.1988](https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(107).2004.1988)
- Piza, M. R., Luz, S. R. O. T. D., Andrade, V. T., Figueiredo, V. C., Abrahão, J. C. D. R., Bruzi, A. T., & Botelho, C. E. (2023). Multiple Traits Selection Strategies: A Proposal for Coffee Plant Breeding. *Agronomy*, 13(8), 2033. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082033>
- Rivillas, C., Leguizamón, J., Gil, L. F., & Duque, H. (2005). Recomendaciones para el manejo de la roya del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé*, 19, 1–36. <https://doi.org/10.38141/10781/019>
- Rodrigues, C. J., Bettencourt, A. J., & Rijo, L. (1975). Races of the Pathogen and Resistance to Coffee Rust. *Annual Review of Phytopathology*, 13(1), 49–70. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.13.090175.000405>
- Romero, J. V., Bustamante, L. A., Cortina, H., & Moncada, M. P. (2012). Evaluación por resistencia a *Hypothenemus hampei* Ferrari en poblaciones derivadas de cruces entre

- Caturra e introducciones etiopes. *Revista Cenicafé*, 63(2), 31–49. <http://hdl.handle.net/10778/534>
- Romero, J. V., & Cortina, H. (2004). Fecundidad y ciclo de vida de *Hypothenemus hampei* (Coleoptera:Curculionidae:Scolytinae) en introducciones silvestres de café. *Revista Cenicafé*, 55(3), 221–231.
- Sachs, J. D., Cordes, K., Rising, J., Toledano, P., & Maennling, N. (2019). Ensuring Economic Viability and Sustainability of Coffee Production. Columbia Center on Sustainable Investment.
- Scalabrin, S., Toniutti, L., Di Gaspero, G., Scaglione, D., Magris, G., Vidotto, M., Pinasio, S., Cattonaro, F., Magni, F., Jurman, I., Cerutti, M., Suggi Liverani, F., Navarini, L., Del Terra, L., Pellegrino, G., Ruosi, M. R., Vitulo, N., Valle, G., Pallavicini, A., ... Bertrand, B. (2020). A single polyploidization event at the origin of the tetraploid genome of *Coffea arabica* is responsible for the extremely low genetic variation in wild and cultivated germplasm. *Scientific Reports*, 10(1), 4642. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61216-7>
- Servellón, R. (1996). Estimación de parámetros genéticos y de respuestas a la selección en la población de arroz irrigado CNA1. *Agronomía Mesoamericana*, 7(2), 50–57. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5546862>
- Susi, H., & Laine, A. (2015). The effectiveness and costs of pathogen resistance strategies in a perennial plant. *Journal of Ecology*, 103(2), 303–315. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12373>
- Van Der Plank, J. E. (1963). The Control of Plant Disease Studied as Part of Epidemiology. En *Plant Diseases* (pp. 1–6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-711450-7.50004-4>
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 41(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>