



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

APTITUD COMBINATORIA Y HETEROSIS EN VARIABLES DE PLÁNTULA Y DE RESISTENCIA A ROYA (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) DE SEIS VARIEDADES DE CAFÉ (*Coffea arábica* L.)

DALIA REYES LANDA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: **Aptitud combinatoria y heterosis en variables de plántula y de resistencia a roya (*Hemileia vastatrix* Berk, & Br.) de seis variedades de café (*Coffea arabica* L.)**

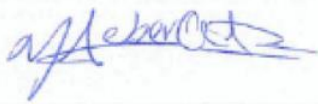
realizada por la alumna: Dalia Reyes Landa

bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



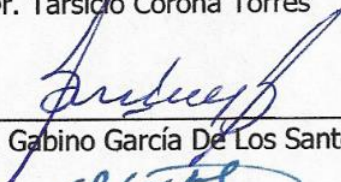
Dr. Víctor Heber Aguilar Rincón

ASESOR



Dr. Tarsicio Corona Torres

ASESOR



Dr. Gabino García De Los Santos

ASESOR



Dr. Esteban Escamilla Prado

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2020

**APTITUD COMBINATORIA Y HETEROSIS EN VARIABLES DE PLÁNTULA Y
DE RESISTENCIA A ROYA (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) DE SEIS
VARIETADES DE CAFÉ (*Coffea arabica* L).**

Dalia Reyes Landa, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

La cafecultura en México es una actividad estratégica económica, social y ambiental de importancia. Sin embargo, pocos esfuerzos se han realizado para generar variedades o materiales con características de acuerdo al sistema de producción mexicano. El mejoramiento genético de café en México necesita explotar herramientas que permitan vislumbrar el comportamiento de variedades candidatas en el desarrollo de un programa. Por esto, el objetivo de la presente investigación fue analizar parámetros genéticos de la cruce de seis variedades de café (*Coffea arabica* L.) en variables de vigor en plántula y de resistencia a roya del cafeto. Por lo que bajo un sistema dialélico se obtuvieron los híbridos de las variedades Java, Geisha, Oro Azteca, Maracatú, Catucaí rojo y Garnica; los cuales fueron evaluados a nivel vivero con las variables de respuesta altura de planta (ADP), diámetro del tallo (DDT), número de pares de hojas (PDH) y número de cruces (NDC) (ramas o crecimiento plagiotrópico), y mediante la determinación de sus aptitudes combinatorias generales (ACG) y específicas (ACE), heterosis y heterobeltiosis, encontrándose tipo de acción génica tanto aditiva, como no aditiva. También que Geisha es el progenitor con valores más altos y significativos de ACE para diámetro y número de cruces y el segundo mejor para altura. Las cruces Geisha x Catucaí rojo y Catucaí rojo x Geisha son las únicas que presentan, cada una, al menos tres valores positivos y significativos para efectos de ACE. En la heterosis se encontraron predominantemente valores negativos para las variables de respuesta, lo cual sugiere dominancia y que las características de la descendencia se reducirían, lo cual resulta conveniente para la variable altura, pero no para las demás variables. La cruce Geisha x Catucaí Rojo presenta valores con

diferencias estadísticamente significativas en el análisis de heterobeltiosis en diámetro del tallo y número de cruces. Por otro lado, se realizó el análisis de la respuesta de los 30 híbridos y sus progenitores a la inoculación del hongo causante de la roya del caféto (*Hemileia vastatrix*), bajo condiciones de laboratorio, mediante el análisis de ACG y ACE de las variables, Periodo de incubación (PDI), Periodo de latencia (PDL), Lesiones visibles por disco (LVD), Porcentaje de discos esporulantes (PDE), Tipo de reacción (TR), Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE). Se encontraron diferencias significativas en todas las variables, tanto entre materiales como en cuanto a la ACG y ACE. Sobresalieron las variedades Catucaí Rojo con respecto a su ACG, y las cruces Catucaí Rojo x Java y Java x Maracatú en su ACE.

Palabras clave: *Coffea arabica* L. mejoramiento genético en café, dialélico, vigor híbrido, resistencia genética a roya, *Hemileia vastatrix*

**COMBINING ABILITY AND HETEROSIS IN SEEDLING VARIABLES AND
RESISTANCE TO LEAF RUST (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) OF SIX
VARIETIES OF COFFEE (*Coffea arabica* L.)**

Dalia Reyes Landa, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

Coffee farming in Mexico is an important economic, social and environmental strategic activity. However, few efforts have been made to generate varieties or materials with characteristics according to the Mexican production system. The genetic improvement of coffee in Mexico needs explicit tools that need to glimpse the behavior of candidate varieties in the development of a program. For this reason, the objective of the present investigation was to analyze genetic parameters of the cross of six coffee varieties (*Coffea arabica* L.) in variables of seedling vigor and resistance to coffee rust. So under a diallelic system, hybrids of the Java, Geisha, Oro Azteca, Maracatú, Catucaí Rojo and Garnica varieties were obtained; which were evaluated at nursery level with the response variables height, stem diameter, number of leaf pairs and number of crosses (branches or plagiotropic growth), and by determining their general (ACG) and specific (ACE) combinatorial skills), heterosis and heterobeltiosis, being a type of genetic action both additive and non-additive. Also that Geisha is the parent with the highest values and ACE parameters for diameter and number of crosses and the second best for height. The Geisha x Catucaí Rojo and Catucaí Rojo x Geisha crosses are the only ones that each have at least three positive and specific values for ACE effects. In heterosis, negative values are predominantly found for the response variables, which we identify dominance and which characteristics of the offspring will be reduced, which is convenient for the height variable, but not for the other variables. The Geisha x Catucaí Rojo cross presents values with statistically variable differences in the analysis of heterobeltiosis in stem diameter and number of crosses. On the other hand, the analysis of the response of the 30 hybrids and their parents to the inoculation of the fungus that causes coffee rust (*Hemileia vastatrix*) was carried out,

under laboratory conditions, by means of the analysis of ACG and ACE of the variables, Incubation period (PDI), Latency period (PDL), Visible disc lesions (LVD), Percentage of sporulating discs (PDE), Reaction type (TR), Area under the curve of disease progress (ABCPE). Differences were found in all variables, both between materials and in terms of ACG and ACE. The Red Catucaí varieties stood out with respect to their ACG, and the Red Catucaí x Java and Java x Maracatú crosses in their ACE.

Key words: *Coffea arabica* L. breeding coffee, diallel, hybrid vigor, genetic resistance to leaf rust, *Hemileia vastatrix*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca para realizar mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por la oportunidad de realizar mis estudios de Postgrado.

Al Dr. Víctor Heber Aguilar Rincón por la iniciativa de trabajar con mejoramiento genético en café en instituciones públicas en México, por la oportunidad, paciencia, todo el conocimiento y consejos tanto profesionales como personales que ha compartido conmigo.

Al Dr. Esteban Escamilla por su apoyo, iniciativa, conocimientos y observaciones.

Al Dr. Tarsicio Corona Torres por aceptar ser parte de este proyecto y su disposición, apoyo y conocimientos compartidos en el aula.

Al Dr. Gabino García de los Santos por sus observaciones que ayudaron en el desarrollo de este trabajo, apoyo, y amabilidad.

Al Dr. Fernando Castillo González por su paciencia, por su ayuda en el análisis de los datos, su amabilidad y comprensión.

Al Dr. Jesús García Zavala por los conocimientos compartidos, por alentarme y ayudarme con el análisis de mis datos.

Al Dr. Ángel Reyes Domínguez por su apoyo y comprensión en esta etapa tan difícil en mi vida. Gracias por siempre alentarme papi.

A Ninfa Landa Solano, mi mamá y a Monserrath, mi hermana por ayudarme a cuidar a mi hijo, cuando más lo necesitábamos.

A mi hermana Brenda por ayudarme, comprenderme, escucharme y alentarme.

A la familia Cornejo Cornejo por considerarme como parte de la suya, por sus consejos y su apoyo. Siempre están en mi corazón.

A mis compañeros José Luis, Cielo, Elideth y Gerardo por formar parte de este grupo en pro de la investigación en mejoramiento genético de café.

Al Técnico Alejandro Paz González por su compromiso en el bienestar de los híbridos en el invernadero y en campo.

Al MC. Leví Saúl Ortiz Rubio por su apoyo en el CRUO en la parte experimental.

Al MC. José Domingo Robledo Martínez por estar siempre en la mejor disposición en cuestión de material, sus consejos y apoyo.

A Nahúm Paz González por su apoyo en la toma de datos y mantenimiento de los híbridos.

A Ekzel Alexander por su apoyo durante la recolección de cerezas F1 en campo.

A mis amigos, Bogar Gizet Gatica y Jorge Cárcamo Pérez por su amistad y apoyo.

DEDICATORIA

Para Farid Rafael: Gracias por lo que has venido a enseñarme. Te adoro con toda mi vida.

Para mi familia: son el mejor equipo de vida. Gracias.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	v
LISTA DE CUADROS.....	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Objetivos.....	4
Hipótesis.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Origen y distribución	5
Importancia económica	5
Aspectos botánicos	7
Citogenética de <i>Coffea</i>	7
Bancos de germoplasma.....	8
Aspectos fitopatológicos	9
Principales enfermedades del cafeto en México.....	10
Mejoramiento genético	12
Mejoramiento genético para resistencia a enfermedades.....	13
Aptitud combinatoria: importancia en el mejoramiento genético	14
Heterosis.....	16
CAPÍTULO I. PARÁMETROS GENÉTICOS DEL VIGOR DE LAS CRUZAS DE SEIS VARIEDADES DE CAFÉ.....	24
1.1 RESUMEN	24
1.2 ABSTRACT	25
1.3 INTRODUCCIÓN	26
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	28
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
1.6 CONCLUSIONES	42
1.7 LITERATURA CITADA.....	42
CAPÍTULO II. PARÁMETROS GENÉTICOS EN LA RESISTENCIA A ROYA (<i>Hemileia vastratix</i> Berk. and Br.) DE LA CRUZA DE SEIS VARIEDADES DE CAFÉ	45
2.1 RESUMEN	45

2.2	ABSTRACT	46
2.3	INTRODUCCIÓN	47
2.4	MATERIALES Y MÉTODOS	50
2.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
2.6	CONCLUSIONES	60
2.7	LITERATURA CITADA	60
	CONCLUSIONES GENERALES	65

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO II

Cuadro 1.1. Principales características de los materiales usados en el dialélico de café.....	29
Cuadro 1.2. Dialélico según el método I de Griffing y progenitores de café usados.....	30
Cuadro 1.3. Cuadrados medios del análisis dialélico de seis variedades de café en las variables de vigor híbrido	32
Cuadro 1.4. Efectos de aptitud combinatoria (ACG) de los progenitores para las variables de respuesta registradas	34
Cuadro 1.5. Valores promedio para variables evaluadas en variedades de café	34
Cuadro 1.6. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas de café para las variables evaluadas.....	37
Cuadro 1.7. Valores promedio de variables de respuesta de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas de café	38
Cuadro 1.8. Heterosis del dialélico de variables altura, diámetro del tallo, pares de hojas, y cruces.....	41

CAPITULO II

Cuadro 2.1. Origen y características agronómicas de variedades de café utilizadas en el diseño I de cruzas dialélicas de Griffing.....	50
Cuadro 2.2. Cuadrados medios del análisis dialélico de seis variedades de café en las variables de resistencia a <i>H. vastatrix</i>	54
Cuadro 2.3. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de los progenitores para las variables de respuesta registradas.	56
Cuadro 2.4. Valores promedio para variables evaluadas en variedades de café	56

Cuadro 2.5. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas de café para las variables evaluadas.....	58
--	-----------

INTRODUCCIÓN GENERAL

El origen del café en México se remonta alrededor del año 1790, tuvo dos introducciones, la primera del Caribe a Veracruz donde se cultivó y se empezó a exportar, y la segunda desde Guatemala al estado de Chiapas (Martínez, 2016) actualmente es cultivado en 14 estados de la República (SIAP, 2019). México produce cafés de excelentes calidades, ya que su topografía, altura, climas y suelos le permiten cultivar y producir variedades clasificadas dentro de las mejores del mundo (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2001). El café en México tuvo un periodo de auge a partir de la Revolución Verde y existía un organismo gubernamental clave: el Instituto Mexicano del Café (INMECAFÉ) dedicado a la transferencia tecnológica, regulación de la comercialización y beneficiado del grano. El INMECAFÉ fomentó el cambio en el uso de la variedad Typica, la cual tiene un hábito de crecimiento alto, a las nuevas variedades mutantes semi enanas (Caturra y Catuai) (Consejo Mexicano del Café, 2001). Durante el periodo 1981-1990, el valor promedio de las exportaciones de café fue de 455 millones de dólares. En ese entonces, el mercado mundial del café funcionaba con base en un sistema de cuotas de exportación. Sin embargo, se rompieron los acuerdos internacionales debido a tendencias mundiales de liberalización comercial y se generó una exportación indiscriminada que provocó una sobreoferta y una drástica caída del precio. En consecuencia, México abandonó su intervención en el fomento y desapareció el INMECAFÉ. Esto provocó la suspensión de apoyos que recibían los cafeticultores y el sector dejó de contar con una política definida y una institución rectora (Nava-Tablada, 2012). A pesar de esto, la caficultura en México ha representado una importante actividad económica. El promedio en exportaciones para el periodo 90-00 superó los 564 millones de dólares al año, cifra que sólo era superada por el petróleo (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios, 2002). Para el 2016 apenas alcanzó los 334 millones de dólares, y un 0.089% en el valor de las exportaciones (OEC, 2016). Además de los factores antes mencionados que han provocado la disminución en la producción, un factor limitante de importancia es la roya del café *Hemileia vastatrix* Berkeley and Broome, la cual es un fitopatógeno de los más importantes del *Coffea arabica* en el

mundo. Infecciones fuertes de *H. vastatrix* causan el decremento de la fotosíntesis e incrementan la defoliación (Kushalappa y Eskes, 1989), con pérdidas de rendimiento de 20% a 40% (Hein y Gatzweiler, 2006). En 1869 la enfermedad se manifestó en Sri Lanka, donde tuvo consecuencias sociales y económicas fuertes (Morris, 1880). La enfermedad se extendió después a todos los demás países cafetaleros y estableciéndose como la enfermedad del café más importante de América. Actualmente, la roya del café se controla principalmente mediante la aplicación de fungicidas a base de cobre, el uso de cultivares resistentes y métodos culturales, como la reducción de la cobertura de sombra. Sin embargo, hay importantes inconvenientes de cada uno de estos enfoques. Se ha demostrado que los fungicidas de cobre aumentan la presencia de plagas (Eskes *et al.*, 1991), y existen preocupaciones importantes sobre sus efectos en la salud humana (Kanoun-Boulé *et al.*, 2008; Loland y Singh, 2004).

Los estudios de herencia de resistencia a la roya realizados en el Centro de Investigaçã das Ferrugens do Cafeeiro (CIFC) demostraron que la teoría gen por gen es aplicable a las interacciones café-roya (Noronha- Wagner y Bettencourt 1967) donde la resistencia de los cafetales es condicionada por al menos nueve genes dominantes principales (SH1-SH9), individualmente o asociados. Por la misma teoría, fue posible inferir nueve genes de virulencia (v1-v9) en *H. vastarix*. De estos nueve genes, SH1, SH2, SH4 y SH5 se encontraron en *C. arabica* de origen etíope; SH3 deriva de *C. liberica* y SH6 SH7 SH8 y SH9 en el Híbrido de Timor (HDT) (*C. arabica* x *C. canephora*), por lo tanto, procedentes de *C. canephora*, (Rodrigues Jr. *et al.*, 1975). Además de estos genes SH, es probable que otros genes mayores y menores condicionen las interacciones de la roya con el café (Bettencourt y Rodrigues Jr. 1988). La resistencia no específica, cuantitativa u horizontal a las enfermedades está controlada por múltiples genes, cada uno de los cuales contribuye en forma aditiva a la resistencia. Este tipo de resistencia es considerada más estable que la monogénica (Muller, 1984). El mejoramiento genético es una herramienta poderosa para aumentar la productividad de los cultivos y la calidad de los productos que generan estos cultivos. Se han desarrollado algunas variedades con resistencia a algunas razas de roya de la hoja

en América Central, Brasil y Colombia, por ejemplo: Costa Rica 95, Obata, IAPAR59 y Colombia (Bertrand *et al.*, 2003). En México los esfuerzos realizados por INMECAFÉ e INIFAP, lograron liberar las variedades Garnica y Oro Azteca, respectivamente. Pero en comparación con otros países, han sido pocos esfuerzos para incrementar la diversidad y desarrollar recursos genéticos que tengan adaptabilidad a las necesidades de los productores mexicanos.

Desde 1980, se ha propuesto desarrollar variedades mediante el uso de híbridos de materiales de Sudán y Etiopía e introducciones adaptadas a las condiciones de América, para incrementar la diversidad genética y explotar heterosis, como lo han hecho Bertrand *et al.* (2011), quienes probaron híbridos entre un Catimor y una accesión de Etiopía, bajo sistemas agroforestales. También se desarrolló la variedad Centroamericano, un híbrido entre Sarchimor T5296 y Rume Sudán (PROCAFÉ, 2009). Para generar materiales con características sobresalientes de calidad en campo y agroindustriales, es necesario ampliar la estrecha base genética mediante las introducciones del centro de origen; o mediante la selección de materiales en los bancos de germoplasma. México cuenta con un Banco de Germoplasma de café (BAGEM) en el Centro Regional Universitario de Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma Chapingo, el cual tiene el potencial para generar materiales dado que cuenta con más de 300 accesiones. Bajo esta premisa, escoger materiales de origen diverso, permitiría desarrollar un programa de mejoramiento, para lo cual sería deseable realizar un análisis de los parámetros genéticos de dichas variedades como la Aptitud Combinatoria General y Aptitud Combinatoria Específica, ya que es parte importante e integral para detectar fuentes de germoplasma útiles en un programa de mejoramiento genético (Baker, 1978).

Los cruzamientos dialélicos son herramientas en el estudio de poblaciones, ya que permite conocer la acción génica en caracteres cuantitativos, con ello, para establecer esquemas de mejoramiento en la selección de genotipos con características de interés agrícola (Gardner and Eberhart, 1966). Este método de cruza dialélica permite estimar la ACG y la ACE. La ACG determina el desempeño promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, mientras que la ACE separa las combinaciones híbridas específicas que resulten mejor o peor de lo que se

esperaría en relación con la media de la ACG de las dos líneas progenitoras (Sprague y Tatum, 1942). El objetivo de este trabajo es el análisis de los parámetros genéticos, (ACG, ACE, heterosis y heterobeltiosis) de caracteres de vigor híbrido en plántula y resistencia a roya de un dialélico de seis variedades: Java, Geisha, Oro Azteca, Maracatú, Catucaí Rojo y Garnica, materiales que se encuentran en el BAGEM.

Objetivos

- Estimar parámetros genéticos de la cruce de seis variedades de café (*Coffea arabica* L.) en variables de vigor en plántula y de resistencia a roya del cafeto (*Hemileia vastratix* Berk. & Br.)

Objetivos específicos.

- Determinar Aptitud Combinatoria General y Específica, heterosis y heterobeltiosis del cruzamiento dialélico en variables morfológicas de plántula.
- Estimar ACG y ACE en progenitores y sus cruces de la resistencia a la roya del cafeto.

Hipótesis

Ho. No existen diferencias significativas en parámetros genéticos (ACG, ACE, heterosis y heterobeltiosis) para las variables de respuesta en vigor híbrido y resistencia a roya de las seis variedades usadas como progenitores y sus cruces.

Ha. Existen diferencias estadísticamente significativas en parámetros genéticos (ACG, ACE, heterosis y heterobeltiosis) para las variables de respuesta en vigor híbrido y resistencia a roya, de las seis variedades usadas como progenitores y sus cruces.

REVISIÓN DE LITERATURA

Origen y distribución

El café tiene su centro de origen en Etiopía, en el África Oriental, donde existen cerca de 120 especies silvestres, de las cuales sólo 10 son utilizadas para la producción (Canet y Soto, 2016).

El café pertenece a la familia Rubiaceae, género *Coffea*. El género se organiza en tres secciones, *Mascarocoffea*, *Eucoffea* y *Paracoffea* (ésta última correctamente conocida como *Coffea*). La mayoría de las especies de café conocidas se encuentran dentro de las secciones *Paracoffea* y *Mascarocoffea*. Con base en características morfológicas: altura de los árboles, grosor de las hojas, color de los frutos y la distribución geográfica, la sección *Paracoffea* se subdividió en cinco subsecciones: *Nanocoffea*, *Pachycoffea*, *Erythrocoffea*, *Melanocoffea* y *Mozambicoffea*. Las especies cultivadas de *Coffea canephora* y *Coffea arabica* pertenecen a la subsección *Erythrocoffea*, mientras que *Coffea liberica* pertenece a la subsección *Pachycoffea* (Lashermes *et al.*, 1999). La mayoría de las especies de café se originaron en África, con los centros de diversidad genética situados en la región que abarca el suroeste de Etiopía y el sureste de Sudán en el caso de *Coffea arabica*, mientras que para *Coffea canephora* y *Coffea liberica* en los bosques húmedos de África Central y Occidental, incluyendo Uganda y Madagascar. Análisis moleculares y citogenéticos han permitido dilucidar el origen de *C. arabica*, ya que sugieren que resultó de la hibridación natural entre dos ecotipos relacionados con *C. eugenioides* y *C. canephora* (Lashermes *et al.*, 1999). La baja divergencia genética encontrada entre los dos genomas constitutivos de *C. arabica* y los de sus especies progenitoras apoyan la hipótesis que ésta resultó de un evento muy reciente ocurrido hace aproximadamente 10,000 a 50,000 años a. C. (Cenci *et al.*, 2012).

Importancia económica

La cafecultura a nivel mundial

Según datos del International Coffee Organization (ICO), 56 países en el mundo cultivan café, en los cuales, más de 25 millones de personas dependen del café como medio de subsistencia. Este cultivo es el soporte económico de muchos

países y es el segundo *commodity* más comercializado en el mercado mundial después del petróleo. Del total de la producción mundial, el 68% se centra en cuatro países: Brasil (32%), Vietnam (19%), Colombia (9%) e Indonesia (8%) (ICO, 2019).

La cafecultura en México

Se tienen registros de que el café llegó a México desde las Antillas alrededor de 1790, entró directamente por Veracruz, donde se comenzó a cultivar y a exportar. En el caso de Chiapas, el café fue introducido desde Guatemala y actualmente es cultivado en 14 Estados de la República (Martínez, 2016).

El café en México tuvo un periodo de auge a partir de la Revolución Verde con la incorporación de paquetes tecnológicos que fomentaron una producción orientada al mercado internacional. El mercado mundial del café funcionaba con base en un sistema de cuotas de exportación, con lo cual los gobiernos aseguraban un equilibrio entre la oferta y la demanda mundiales, llamado Acuerdo Internacional del Café (AIC). En 1958, para cumplir con los compromisos internacionales e imponer controles de oferta, se creó el Instituto Mexicano del Café (INMECAFÉ) dedicado a la transferencia tecnológica, asistencia técnica para el incremento de rendimientos, el beneficiado del grano y la regulación de la comercialización (SAGARPA, 2005). El INMECAFÉ fomentó el uso intensivo de agroquímicos, impulsó el cambio en el uso de variedades de aquellas con un hábito de crecimiento alto (Bourbón, Typica), a las nuevas variedades mutantes semi enanas (Caturra y Catuaí), y promovió la remoción completa de los árboles de sombra para cambiar de densidades de plantación de 2000 plantas, a 3500 plantas por hectárea (Moguel y Toledo, 2004).

En 1989, debido a tendencias en políticas de liberalización comercial, se rompió el acuerdo internacional y se generó una exportación indiscriminada que provocó una sobreoferta y una drástica caída del precio (Universidad Nacional Agraria, 2006). Así, el gobierno de México desapareció al INMECAFÉ que funcionaba como el órgano regulador estatal de la cadena productiva del café. Esto provocó la suspensión de apoyos que recibían los cafecultores y el sector deja de contar con una política definida y una institución rectora (Nava-Tablada, 2012).

A pesar de todo eso, la cafecultura en México ha representado una importante actividad económica. En promedio para el periodo 90-00 en exportaciones superó los 564 millones de dólares al año, cifra que sólo era superada por el petróleo (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios, 2002). Para el 2016 apenas y alcanzó los 334 millones de dólares, y un 0.089% en el valor total de las exportaciones (OEC, 2016).

Actualmente, México ocupa el noveno lugar en producción del aromático con 4.5 millones de sacos de 60 kg (ICO, 2019). El café es un cultivo de importancia social y económica para el país, ya que de acuerdo a datos del SIAP (2019), se cultiva en 14 estados de la república, en una superficie total de 700 mil hectáreas sembradas. El aromático es cultivado por alrededor 483,000 productores, de los cuales el 66% habla al menos una lengua indígena y vive en regiones de difícil acceso con profundos rezagos en infraestructura básica y fuerte presencia de población en pobreza extrema. Por otro lado, de las 700,000 hectáreas cultivadas de café, alrededor del 90% se realiza bajo sombra diversificada. Estas condiciones le confieren al cultivo de café una gran importancia ambiental, ya que conservan la biodiversidad y proveen servicios ambientales al planeta: captura de carbono, conservación y recarga de mantos freáticos, conservación de biodiversidad y del paisaje natural, entre otros (SAGARPA, 2006).

México produce cafés de excelentes calidades, ya que su topografía, altura, climas y suelos le permiten cultivar y producir variedades clasificadas dentro de las mejores del mundo (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2001).

Aspectos botánicos

El café es un arbusto que pertenece a la familia de las rubiáceas y al género *Coffea*, alcanza entre 1 y 12 metros de altura y puede llegar a vivir 50 años.

Citogenética de Coffea

Ploidía

El número de cromosomas base para el género *Coffea* es considerado $n=11$, el cual es típico por la mayoría del género de la familia Rubiaceae. Prácticamente todas las

especies son diploides ($2n=2x=22$) y auto incompatibles, y *Coffea arabica* es la única especie alotetraploide con una constitución cromosómica de $2n=4x=44$ y auto compatible (Lashermes *et al.*, 1999).

Cariotipos

Para *C. arabica*, Bouharmont (1959) registró que los cromosomas somáticos son relativamente pequeños (longitud 2.3 μm y un rango de entre 1.5 – 3 μm) y morfológicamente similares entre sí. Evaluaciones realizadas en *C. libérica* mostraron cromosomas más pequeños (1.5 μm , rango 1.0-2.0). Por su parte, *C. eugenioides* mostró cromosomas más grandes, con una media de 2.6 μm y un rango entre 1.3 y 44 μm (Clarindo y Carvalho, 2008). Mientras que *C. canephora* muestra cromosomas con longitud media entre 2.38 a 0.85 μm (Pierozzi *et al.*, 1999).

Bancos de germoplasma

Alrededor del 50% de las especies conocidas se han recolectado y ahora se conservan en bancos de germoplasma (Dullo *et al.* 2009). De las 112 especies de *Coffea* reconocidas por Davis *et al.* (2006), 14 están en peligro crítico de extinción, 36 especies en peligro de desaparecer, y 23 especies vulnerables (entre ellas *C. arabica*).

Dada la importancia socioeconómica del cultivo de *C. arabica*, la FAO y el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) organizaron dos grandes colecciones en Etiopía, ya que es el principal centro de diversidad de especies de *C. arabica* (Guillaumet y Halle, 1978). Las accesiones recolectadas se distribuyeron en todo el mundo y ahora se conservan en algunos bancos de germoplasma, principalmente en Etiopía, Kenia, Tanzania, Costa de Marfil, Costa Rica y Brasil (Anthony *et al.* 2007). En Francia, se ha conservado in vitro e invernadero una colección central compuesta por 32 grupos genéticos (19 especies) (Dussert *et al.* 1997). Además, se plantó un duplicado de esta colección en un banco de germoplasma de campo en la Isla de la Reunión.

En África, se recolectaron alrededor de 4,700 accesiones de *Coffea* que representan 15 especies africanas (Anthony *et al.*, 2007). El material recogido se plantó en

bancos de germoplasma de campo en Costa de Marfil y en cada país donde se recolectó material vegetal. Se han establecido dos grandes bancos de germoplasma en Madagascar y Costa de Marfil, y estos conservan casi todos los recursos genéticos diploides que se han recolectado. Algunos especímenes de café silvestre también se mantienen en los grandes bancos de germoplasma creados para especies cultivadas en Costa Rica, Colombia, Brasil, India y Tanzania (Dulloo *et al.* 2009).

El Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), cuenta con un Banco de germoplasma de café, el de mayor importancia a nivel nacional y que concentra más del 90% de los recursos genéticos disponibles en México. Se inició en 1981 con 48 variedades que donó el INMECAFÉ a la UACH. Actualmente cuenta con poco más de 300 accesiones, las cuales incluyen materiales silvestres etíopes, catimores, sarchimores, entre otras introducciones (Escamilla, 2017).

Aspectos fitopatológicos

a) Broca del fruto

La broca (*Hypothenemus hampei*) es considerada la plaga más importante del café a nivel mundial, ya que reduce el rendimiento y merma la calidad del grano. Los daños más característicos son: pudrición de granos, caída de frutos jóvenes y disminución del peso del grano (Barrera, 2002).

b) Minador de la hoja

La larva del minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*) daña las hojas, y se estima que la presencia de cuatro larvas por hoja puede provocar su caída. Ataques severos destruyen tejido foliar considerable y provocan defoliación, disminuyendo la actividad fotosintética y, por lo tanto, disponibilidad de nutrientes en los frutos. (Constantino *et al.*, 2011).

c) Barrenador del tallo y de la raíz

La larva del barrenador (*Hammatoderus maculosus*), provoca daños penetrando al tallo y a la raíz pivotante, retrasando su crecimiento y

eventualmente causando su muerte directamente al dañar la raíz o indirectamente al facilitar la quiebra del tallo (Constantino y Benavides, 2015).

d) Chacuatete

Las ninfas y adultos de Chacuatete (*Idriarthron subquadratum*) se alimentan de los frutos, y de las hojas en los bordes y parte media. El daño puede ser alarmante cuando se observa destrucción de frutos (Barrera-Gaytán *et al.*, 2018).

e) Taladrador de la rama

El insecto *Xylosandrus morigerus* destruye y necrosa los tejidos internos de ramas por la construcción de una galería, provocando la muerte de estos órganos (Barrera-Gaytán *et al.*, 2018).

f) Tortuguilla

El daño es provocado por el adulto de la tortuguilla (*Rhabdopterus jansonii*), el cual, forma en la planta agujeros de forma alargada entre nervaduras en brotes y hojas jóvenes, por lo tanto, se pierde área foliar y perjudica la actividad fotosintética de la planta (Barrera-Gaytán *et al.*, 2018).

Principales enfermedades del cafeto en México

a) Corchosis del café

Causada por *Meloidogyne* spp en asociación con *Fusarium oxysporum*, atacan las raíces jóvenes afectando la absorción de agua y nutrientes, y por lo tanto los cafetos manifiestan clorosis en las hojas, defoliación y bajo desarrollo. Algunos se marchitan y mueren. En Costa Rica se ha reportado la destrucción de plantaciones enteras de café (López y Sánchez, 2017).

b) Mancha de hierro

Causada por el hongo *Cercospora coffeicola* Berk y Cooke. La enfermedad es muy frecuente en viveros mal sombreados y en plantaciones jóvenes a pleno sol. Ataca hojas y cerezas en las cuales aparecen manchas circulares de color café rojizo oscuro y gris claro en el centro, bordes irregulares y

diámetro de hasta 20 mm, rodeadas por un halo amarillento que separa el tejido sano del enfermo (Barrera-Gaytán *et al.*, 2018).

c) Ojo de gallo

El hongo *Mycena citricolor* Berk. y Br. provoca manchas circulares de distribución irregular, de color café oscuro y centro claro. Las manchas aumentan de tamaño hasta alcanzar un diámetro que varía de 6 a 18 mm con bordes bien definidos. El número de manchas varía según la intensidad del ataque, y en ataques severos provoca defoliaciones y fuerte debilitamiento de las plantas lo que representa reducción en la producción (García, 2012).

d) Mal de hilachas

Causada por el hongo *Corticium koleroga* (Cooke), invade las ramas tiernas, hojas y frutos, las hojas se marchitan, oscurecen y quedan colgando secas. Finalmente se desprenden de las ramas (Barrera-Gaytán *et al.*, 2018).

e) Roya del cafeto

La roya del café *Hemileia vastatrix* Berkeley and Broome es un patógeno vegetal de gran importancia histórica y una de las enfermedades más importantes del *Coffea arabica* en el mundo. Infecciones fuertes causan el decremento de la fotosíntesis e incrementan la defoliación (Kushalappa and Eskes, 1989), con pérdidas de rendimiento de 20 a 40% (Canet-Brenes *et al.*, 2016). En 1869, la enfermedad manifestó todo su potencial cuando llegó a Sri Lanka, lo que provocó un colapso casi total de la industria del café en el país. La enfermedad se extendió a todos los demás países cafeteros, llegando a Brasil en 1970 y estableciéndose como la enfermedad del café más importante de América. La enfermedad fue menos desastrosa en estos países en comparación con su impacto en Sri Lanka, gracias a los eficientes programas de fumigación ya desarrollados en países como Kenia. La roya del café se controla actualmente principalmente mediante la aplicación de fungicidas de cobre, el uso de cultivares resistentes y métodos culturales, como la reducción de la cobertura de sombra. Sin embargo, hay importantes

inconvenientes de cada uno de estos enfoques. Se ha demostrado que los fungicidas de cobre aumentan la presencia de plagas (Eskes *et al.*, 1991), y existen preocupaciones importantes sobre sus efectos en la salud humana (Kanoun-Boulé *et al.*, 2008; Loland y Singh, 2004). Los estudios de herencia de resistencia a la roya realizados en CIFC han demostrado que la teoría gen por gen es aplicable a las interacciones café-roya (Noronha- Wagner y Bettencourt 1967) donde la resistencia de los cafetales es condicionada por al menos nueve genes dominantes principales (SH1-SH9), individualmente o asociados. Por la misma teoría, fue posible inferir 9 genes de virulencia (v1-v9) en *H. vastarix*. Se encontraron genes mayores SH1, SH2, SH4 y SH5 en árabicas puras de origen etíope; se considera que el gen SH3 deriva de *C. liberica* y solo se encontraron SH6 SH7 SH8 y SH9 en Híbrido de Timor HDT (*C. arabica* x *C. canephora*), por lo que se considera que son procedentes de *C. canephora*, (Rodrigues Jr. *et al.*, 1975; Bettencourt y Rodrigues Jr. 1988). Además de estos genes SH, es probable que otros genes mayores y menores podían condicionar las interacciones de la roya con el café.

Mejoramiento genético

Existe una baja diversidad genética de *C. arabica* de las variedades cultivadas, principalmente atribuida a la biología reproductiva (autógama) y al proceso de selección en el desarrollo de variedades, ya que estas han sido resultado de la introducción de muy pocas accesiones en el siglo XVIII; las cuales producen café de buena calidad, pero que son susceptibles a la mayoría de plagas y enfermedades que atacan al café. Estas variedades constituyeron la base genética de todos los programas de mejoramiento (van der Vossen, 1985; Maluf *et al.*, 2005).

Las flores de *C. arabica* son hermafroditas y autógamas, para plantas con estas características, lo clásico en mejoramiento genético es la selección genealógica (pedigree method breeding) donde a partir de un cruzamiento, se obtiene una primera generación F1. Se continúa la selección hasta generaciones avanzadas (F5 o F6) para obtener una línea pura y estable (Bertrand *et al.*, 1999).

Hasta hace algunas décadas, la mayoría de los esfuerzos de mejoramiento estaban dirigidos a incrementar rendimiento, calidad y adaptabilidad a condiciones agroecológicas (van der Vossen, 1985).

Algunos materiales fueron desarrollados en países como Brasil, donde a partir de 1930, se introdujeron poblaciones de Bourbon y en 1935, se encontró una planta que tenía un gen dominante que expresaba un rasgo enano: Caturra (Carvalho *et al.* 1991). Mundo Novo, también desarrollada en Brasil, es una cruce entre Typica y Bourbon. La variedad Catucaí es el resultado de la cruce entre Mundo Novo y Caturra. En Colombia se desarrolló la variedad del mismo nombre, resultado de la cruce entre Caturra e Híbrido de Timor; en Costa Rica, a partir de una selección de una población segregante denominada Catimor T se desarrolló la variedad Costa Rica 95 (Velásquez, 2019). En el Salvador se generó la variedad Pacamara, la cual es el resultado de la cruce entre Pacas x Maragogipe. En México se han liberado sólo dos variedades: Oro Azteca y Garnica. La primera, resultado de la selección de materiales segregantes de la cruce de Caturra e Híbrido de Timor, y la segunda de la cruce entre Mundo Novo y Caturra (Rosas, 2017).

Es necesario que, los programas actuales de mejoramiento genético tengan como objetivo desarrollar variedades que maximicen los ingresos netos del productor, es decir, mayor rendimiento, calidad en taza, resistencia a enfermedades y adaptabilidad a condiciones agroecológicas.

Mejoramiento genético para resistencia a enfermedades

Las dos principales enfermedades de *C. arabica* son: CBD, causado por *Collectotricum kahawae* y la roya del café, causada por *Hemileia vastatrix*. La mayoría de los programas de mejoramiento genético actuales de café se concentran en conferir resistencia genética para controlarlas, ya que el uso de cultivares resistentes es la manera más económica y amigable con el ambiente; el control químico, si bien es efectivo cuando se usa adecuadamente, es costoso para los productores (Shigueoka *et al.*, 2013). Además, hay estudios en los que se asocia al oxiclورو de cobre con daños humanos en lípidos, proteínas y ADN, y trastornos

asociados con el metabolismo anormal del cobre y cambios neurodegenerativos (Husak, 2015).

En el caso de *C. arabica*, por ser una especie autógama se ha empleado la metodología de selección por pedigree, con la que se han generado muchas variedades siendo estas líneas puras o mezclas de estas (Bertrand, 1999). Con la selección por pedigrí se han transferido genes de resistencia a la roya de la hoja y los nematodos del nudo de la raíz presentes en el híbrido de Timor, con lo que se han obtenido cultivares con resistencia a varias razas de roya, en América Central, Brasil y Colombia. Sin embargo, la introducción de genes de resistencia a menudo se acompaña de la caída en la calidad de la bebida (Bertrand *et al.*, 2003).

No obstante que la primera diferenciación racial de *H. vastatrix* fue realizada por Mayne (1932) en India, con los estudios sobre la genética de la resistencia a roya realizados por el Coffee Rusts Research Center (CIFC) se demostró la presencia de un tipo de resistencia específica de café a roya (Noronha-Wagner y Bettencourt, 1967). Actualmente, trabajos realizados en el CIFC han permitido la caracterización de más de 50 razas de roya (Talhinhas *et al.*, 2017), siendo la raza II la más ampliamente distribuida (Cabral *et al.* 2009).

Aptitud combinatoria: importancia en el mejoramiento genético

Cuando existe una población con potencial de descendencia con características deseables, es imprescindible conocer el comportamiento genético de las poblaciones, para elegir el mejor esquema de mejoramiento que maximice la varianza genética. Por lo cual, el mejorador necesita ampliar la base genética del germoplasma y evaluarla para tener conocimiento amplio del tipo de acción génica de los materiales en estudio para los caracteres de mayor importancia económica (Vergara *et al.*, 2005; Haochuan, *et al.*, 2014).

Aptitud combinatoria general y específica

El análisis de Aptitud Combinatoria General (ACG) y Específica (ACE) ayudan a identificar la mejor combinación de progenitores ya que proporciona información sobre la importancia relativa de los efectos de genes aditivos y no aditivos

involucrados en la expresión de rasgos cuantitativos, para conocer el tipo de acción génica y elegir métodos de reproducción apropiados (Sprague y Tatum, 1942). La ACG está definida como el comportamiento promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, y la ACE como los casos en los cuales ciertas combinaciones híbridas específicas se expresan favorablemente o no con respecto al comportamiento promedio de sus progenitores.

Los análisis dialélicos constituyen una herramienta útil para caracterizar y estimar los parámetros genéticos de progenitores y sus cruzas, mediante su aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) (Hallauer y Miranda, 1981).

Los diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956) permiten evaluar ACG y ACE mediante las cualidades de un conjunto de progenitores, ya que ayudan a identificar los mejores progenitores y las mejores combinaciones entre ellos. Según Griffing (1956) hay cuatro posibles métodos experimentales:

- 1) los progenitores y sus cruzas F_1 directas y recíprocas;
- 2) los progenitores y sus cruzas directas F_1 ;
- 3) las cruzas F_1 directas y recíprocas;
- 4) la evaluación de las cruzas F_1 directas únicamente.

Aptitud combinatoria general y específica en café

Estudios sobre ACG y ACE en café son escasos. CILAS *et al.* (1998) muestran que las variedades de café de bajo rendimiento pueden presentar un excelente rendimiento en combinaciones con otras variedades. Por otro lado, las variedades excelentes pueden presentar combinaciones deficientes. Por lo tanto, el estudio de ACG y ACE es esencial en la elección de las cruzas a realizarse en un programa de mejoramiento genético.

Bellachew *et al.* (1993) estudiaron la Aptitud Combinatoria en *C. arabica* y observaron que tanto la variación genética aditiva como la no aditiva eran importantes en el efecto del control de los caracteres estudiados. Sin embargo, en

todos los caracteres, predominaba la variación genética no aditiva. Los resultados sugieren que la metodología de mejoramiento puede explotar las ventajas de los efectos genéticos

Fazuoli y Carvalho (1987) realizaron estudios sobre la ACE de los híbridos de *C. canephora*. Se encontró que las mejores combinaciones fueron las de Kouillou x Robusta, BP46 x Kouillou, Uganda x SA158 y la progenie resultado de la polinización libre de Uganda1646-4. Los autores mencionaron la eliminación de varias combinaciones híbridas, que no produjeron nada o produjeron pocas semillas. Esto atribuido a la autoincompatibilidad típica de la especie *C. canephora*.

Heterosis

El término Heterosis se refiere al fenómeno en el que la progenie de dos progenitores de diferente variedad o especie, exhiben características superiores al promedio de ambos progenitores. Por su parte, la heterobeltiosis, representa la superioridad del carácter del híbrido respecto al del mejor progenitor.

Existen dos hipótesis principales que explican el fenómeno de heterosis: la de dominancia y la de sobre-dominancia (Allard, 1960). De acuerdo con Crow (1999) en términos de acción génica, la heterosis se debe principalmente a efectos de interacción entre alelos o dominancia. En forma operativa, la heterosis se calcula como la diferencia entre el valor fenotípico de la F_1 y el valor del progenitor medio o el del progenitor superior y se expresa en porcentaje (Falconer y Mackay, 1996).

Quizás el más popular de los dos es el concepto de dominancia (Charlesworth y Willis, 2009). En la versión extrema de este modelo, uno de los padres contiene copias de genes que faltan en el padre opuesto y, por lo tanto, el híbrido contendría más genes que cualquiera de los padres (Fu y Dooner, 2002). Si bien la complementación de los archivos recesivos y la combinación de copias genéticas ciertamente ocurrirán en los híbridos, existen varios argumentos por los cuales esto por sí solo no parece explicar la respuesta heterótica completa. Primero, la mayoría de los ecotipos o variedades que difieren entre sí producirán cierto nivel de heterosis, pero las cruzas entre especies o géneros, en algunos casos, manifiestan heterosis muy superior. East (1936) sintetizó datos de una gran cantidad de estudios

que involucraron muchas especies y concluyó que, en promedio, la heterosis aumenta a medida que aumenta la disparidad genética de las reservas parentales y los cruces interespecíficos muestran una mayor heterosis que los cruces intraespecíficos.

Padres no distantes genéticamente tienden a compartir muchos genes o alelos. Cuando estos se cruzan, hay poca complementariedad y por lo tanto bajo vigor.

Heterosis en café

El éxito de los híbridos en cultivos de plantas alógamas ha alentado a los mejoradores para explotar el fenómeno de la heterosis en cultivos de plantas autógamas, como en el caso de *C. arábica*. Pero, a diferencia de las plantas alógamas, la biología floral de las plantas autógamas normalmente no permite un alto nivel de polinización cruzada para la producción de semillas híbridas a costos competitivos y eficientes.

Para aumentar la diversidad genética de los cultivares de *C. arabica* y explotar la heterosis entre grupos genéticos (Van der Vossen, 1985), los mejoradores han propuesto la producción y selección de híbridos F1 entre cultivares tradicionales y accesiones silvestres del centro de origen. Las accesiones silvestres proporcionan resistencia a varias especies de nematodos de nudos de raíz (Boisseau *et al.*, 2009), roya de la hoja (Gil *et al.* 1990) enfermedad de la cereza del café (Bellachew, 2001) y alta calidad en taza. Se han creado y evaluado más de 150 híbridos F1 en América Central (Bertrand *et al.*, 2005). En la evaluación sobre los caracteres rendimiento y peso del grano, los híbridos seleccionados produjeron rendimientos 11–47% superiores con respecto al mejor cultivar, e iguales o significativamente superiores en peso del grano e idéntica fertilidad. La heterosis estimada (22–47%) fue similar a lo observado en estudios previos (Fazuoli *et al.* 1993).

LITERATURA CITADA

- Allard R. W. 1960. Principles of Plant Breeding. John Wiley and Sons, Inc. New York. London. 485 p.
- Anthony F, Dussert S, Dulloo E. 2007. The coffee genetic resources. In: Engelmann F, Dulloo E, Astorga C, Dussert S, Anthony F (eds) Complementary strategies for ex situ conservation of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources: a case study in CATIE, Costa Rica. Topical reviews in agricultural biodiversity. Bioversity International, Rome, Italy, pp 12–22
- Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. 2002. 'Café de México: Hacia los mercados de calidad', Claridades Agropecuarias, 103(103), p. 56. Disponible en: <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/103/ca103.pdf>.
- Baker, R. J. 1978. Issues in diallel analysis. Crop Sci. 18:533–536
- Barrera, J. F. 2002. La Broca del café: Una plaga que llegó para quedarse. Tres Plagas del Café en Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur. Disponible en: http://www2.tap-ecosur.edu.mx/mip/Publicaciones/pdf/09_Capitulo04c.pdf
- Barrera-Gaytán, J. F., Pérez-Quintanilla J. N., Pinson-Rincón, E. P., Díaz, V. M. V., Rivas-Platero, G. G. 2018. Plagas y enfermedades del café: Identificación, bioecología y manejo agroecológico. Chapingo, Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo; Huatusco, Veracruz, México; Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café, Tapachula, Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur: Universidad Autónoma de Chiapas.
- Bellachew, B.; Ameha, M; Mekonnen, D. 1993. Heterosis and combining ability on coffee (*Coffea arabica* L.). Colloque scientifique international sur le café, 15°, Montpellier. Paris, Association Scientifique Internationale du café (ASIC).
- Bellachew B. 2001. Arabica coffee breeding for yield and resistance to coffee berry disease (*Colletotrichum kahawae*). PhD thesis, Department of Agricultural Sciences, University of London, London, UK
- Bertrand, B., Aguilar, G., Santacreo, R., Anzueto, F. 1999. El mejoramiento genético en América Central. Desafíos de la caficultura en Centroamérica. IICA, PROMECAFE, CIRAD, IRD, CCCR. San José Costa Rica.
- Bertrand, B., Guyot B., Anthoy F., Lashermes P. 2003. Impact of *Coffea canephora* gene introgression on beverage quality of *C. arabica*. Theor Appl Genet 107:387-394
- Bertrand B, Etienne H, Cilas C, Charrier A, Baradat P. 2005. *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. Euphytica 141:255–262
- Bettencourt A. 1973. Considerações gerais sobre o 'Híbrido de Timor'. Circular no 31, Instituto Agronômico de Campinas, 256 p.

- Bettencourt A. J., Rodrigues Jr. C. J. 1988. Principles and practice of coffee breeding for resistance to rust and other diseases. In: Clarke R. J. Macrae R (eds). Coffee Agronomy Vol. 4, pp. 199-234. Elsevier Applied Science Publishers LTD, London and New York.
- Boisseau M, Aribi J, de Sousa FR, Carneiro RMDG, Anthony F. 2009. Resistance to *Meloidogyne paranaensis* in wild *Coffea arabica* L. Trop Plant Pathol 34:53-56
- Bouharmont, J. Recherches sur les affinités chromosomiques dans le genre Coffea. Bruxelles: INEA, 1959. 94 p. (Série scientifique n° 77).
- Cabral P.G.C., Zambolim E. M., Zambolin L., Lelis T. P, Capucho A. S., Caixeta E. T. 2009. Identification of a new race of *Hemileia* in Brazil. Australas Plant Dis Notes 4:129-130.
- Canet, B. G., Soto, V. C. 2016. La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe. San José. C. R. IICA.
- Carvalho A. 1988. Principles and practice of coffee plant breeding for productivity and quality factors: *Coffea arabica*. In: Clarke RJ, Macrae R (eds) Coffee, vol 4, Agronomy. Elsevier Applied Science, London, UK, pp 129–165.
- Carvalho, A., Medina F. H. P., Fazuoli L. C., Guerreiro F. O, Lima, M. M. A. 1991. Aspectos genéticos do cafeeiro. Rev. Brasil, Genet. 14:135-183.
- Cenci, A., Combes, M. C., Lashermes, P. 2012. Genome evolution in diploid and tetraploid *Coffea* species as revealed by comparative analysis of orthologous genome segments. Plant Molecular Biology 78.
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. 2001. El mercado del café en México. Cámara de Diputados. Palacio Legislativo de San Lázaro. DF.
- Cilas, C.; Bouharmont, P.; Boccara, M.; Eskes, A. B.; Baradat. 1998. Prediction of genetic value for coffee production in *Coffea arabica* from a half-diallel with lines and hybrids. Euphytica. 104 (1):49-59.
- Charlesworth, D., and Willis, J.H. 2009. The genetics of inbreeding depression. Nat. Rev. Genet. 10: 783-796
- Clarindo W.R.; Carvalho C.R. 2008. First *Coffea arabica* karyogram showing that this species is a true allotetraploid. Plant. Syst. Evol. 274:237–241.
- Consejo Mexicano del Café. 2002. Café en México. Claridades agropecuarias.
- Constantino, L. M., Flórez, J. C., Benavides, P., Bacca, T. 2011. Minador de las hojas del cafeto. Una plaga potencial por efectos del cambio climático. Avances Técnicos Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

- Constantino, L. M., Benavides, M. P.. 2015. El Barrenador del tallo y la raíz del café. *Cenicafé*, 66 (1): 17-24
- Crow J. F. (1999) Dominance and overdominance. In: Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops. J. G. Coors and S. Pandey (eds.). American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp: 49-58
- Davis A. P, Govaerts R, Bridson DM, Stoffelen P .2006. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). *Bot J Linn Soc* 152:465–512
- Dulloo M E., Maxted N, Guarino L, Florens D, Newbury HJ, Ford Lloyd B. V. 1999 Ecogeographic survey of the genus *Coffea* in the Mascarene Islands. *Bot J Linn Soc* 131:263–284
- Dulloo M. E, Watts J, Qamar Z, Ebert A, Anthony F, Engelmann F, Dussert S, Astorga C, Vasquez N, Rakotomalala JJ, Rabemiafara A, Eira M, Bellachew B, Omondi C, Snook L 2009. Field coffee collections at risk: is cryopreservation the most economical and optimal conservation strategy to ensure their long term security? *Crop Sci* 49:2123–2138
- Dussert S, Chabrillange N, Anthony F, Engelmann F, Recalt C, Hamon S. 1997. Variability in storage response within a coffee (*Coffea* spp.) core collection under slow growth conditions. *Plant Cell Rep* 16:344–348
- East, E.M. 1936. Heterosis. *Genetics* 21: 375-397
- Escamilla, E. P. 2017. El Banco de Germoplasma de café de la UACH-CRUO en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Claridades Agropecuarias*. 208 (6) pp 9-13
- Eskes, A. B., Mendes, M., Robbs, C. 1991. Laboratory and field studies on parasitism of *Hemileia vastatrix* with *Verticillium lecanii* and *V. leptobactrum*. *Café Cacao Thé* 35, 275-282.
- Falconer D. S. and T. F. C. Mackay. 1996. Introduction to Quantitative Genetics. 4th ed. Longman. Essex, England. 464 p.
- Fazuoli, L. C., Carvalho, A. 1987. Capacidade de combinação de híbridos de *Coffea canephora*. In: Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 14, Campinas, 1987. Resumos..., Campinas, IBC,p.93-5.
- Fazuoli, L. C, Carvalho A, da Costa WM .1993. Híbridos dialélicos no cultivar Mundo Novo de *Coffea arabica*. 19º congresso Brasileiro de Pesquisas cafeeiras, Instituto Agronômico de Campinas, Brazil, pp 14–18
- Fu, H., and Dooner, H.K. 2002. Intraspecific violation of genetic colinearity and its implications in maize. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99: 9573-9578.

- García, T. J. W. 2012. Caracterización biológica del hongo *Mycena citricolor* Berk & Curt con aislamientos obtenidos de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) provenientes de las diferentes zonas cafetaleras de Guatemala, C. A. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Gil SL, Berry D, Bieysse D. 1990. Recherche sur la résistance incomplète à *Hemileia vastatrix* Berk & Br. dans un group de génotypes de *Coffea arabica* L. d'origine éthiopienne. *Café Cacao The* 34:105–133
- Griffing B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian journal of Biological Sciences* 9:463-493
- Guillaumet J-L, Hallé F. 1978. Echantillonnage do materiel recolté en Ethiopie, *Bull IFCC* 14:13-18
- Hallauer A. R. and J. B. Miranda. 1981. *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Iowa State University Press. Ames, Iowa, USA. 468 p
- Haochuan, L., T. Jihua, H. Yanmin, Y. Jiwey, and L. Zonghua. 2014. Analysis on combining ability and estimation of genetic parameters for chlorophyll content in maize. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 6(8):97-104.
- Hein, L., Gatzweiler, F. 2006. The economic value of coffee (*Coffea arabica*) genetic resources *Ecological Economica* 60, 176-185.
- Husak, V. 2015. Copper and copper-containing pesticides: Metabolism, toxicity and oxidative stress. *Journal of Vasyly Stefanyk Precarpathian National University* 1(2):38-50.
- Hussain, M.A., and I.H. Ali. 2014. Combining ability, gene action and heterosis in some inbred lines of maize at two sowing dates using factorial mating design. *International J. Pure Appl. Sci. Tech.* 21(1):17-30
- Kanoun-Boulé, M., De Albuquerque, M. B., Nabais, C., Freitas, H. 2008. Copper as an environmental contaminant: phytotoxicity and human health implications. In: Prasad, M. (Ed.). *Trace Elements as Contaminants and Nutrients*. John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 653-678.
- Kushalappa, A.C., Eskes, A. B. 1989. Advances in coffee rust research. *Annual Review of Phytopathology* 27, 503-531.
- Lashermes, P., Thouslot, P.; Anthony, F.; Combes, M. C.; Charrier, A. 1996. Genetic diversity for RAPD markers between cultivated and wild accessions of *Coffea arabica*. *Euphytica* 87:59-64
- Lashermes Ph., Combes M. C., Robert J, Trouslot P., D'Hont A., Anthony F., Charrier A. 1999. Molecular characterization and origin of the *Coffea arabica* L. genome. *Mol. Genet* 261:266-359

- Lashermes P, Andrzejewski S, Bertrand B, Combes MC, Dussert S, Graziosi G, Trouslot P, Anthony F. 2000. Molecular analysis of introgressive breeding in coffee (*Coffea arabica*L.). *Theor Appl Genet* 100:139–146
- Loland, J., Singh, B., 2004. Copper contamination of soil and vegetation in coffee orchards after long-term use of Cu fungicides. *Nutrient cycling in Agroecosystems* 69, 203-211.
- López, L. J. D., Sánchez, N. P. 2017. Caracterización del complejo parásitico causante de la corchosis de la raíz del cafeto en México. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/80021>
- Maluf, M. P., Silvestrini, M., Machado de Campos, L., Guerreiro O. & Colombo, C. A, 2005. Genetic diversity of cultivated *Coffea arabica* inbred lines assessed by RAPD, AFLP, and SSR marker systems. *Scientia Agricola*. 62(4):366-373.
- Mayne, W. W. 1932. Physiologic specialization of *Hemileia vastatrix* B. et Br. *Nature* 129:510.
- Moguel, P., Toledo, M. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* 55:27
- Morris, D. 1880. Note on the structure and habit of *Hemileia vastatrix*, the coffee leaf disease of Ceylon and Southern India 1880. *J. Linnean Soc., Bot.* 17, 512–517.
- Nava-Tablada, M. E. 2012. 'Migración internacional y cafecultura en Veracruz. México', 6, pp. 139–171.
- Noronha-Wagner H, Bettencourt AJ. 1967. Genetic study of resistance of *Coffea* sp. to leaf rust. I. Identification and behavior of four factors conditioning disease reaction in *Coffea arabica* to twelve physiologic races of *Hemileia vastatrix*. *Can. J. Bot.* 45:2021-2031.
- ICO. 2019. International Coffee Organization. Historical Data on the Global Coffee Trade. Disponible en http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics
- Pierozzi N. L, Cecilia A.F. Pinto-Maglio & Neusa D. Cruz. 1999. Characterization of somatic chromosomes of two diploid species of *Coffea* L. with acetic orcein and C-band techniques, *Caryologia*, 52:1-2, 1-8, DOI: 10.1080/00087114.1998.10589147
- Raina, S. N.; Mukai, Y.; Yamamoto, M. 1998. In situ hybridization identifies the diploid progenitor species of *Coffea arabica* (Rubiaceae) *Theor. Appl. Genet* 97:1204-1209.

- Rodrigues Jr. C. J., Bettencourt A. J., Rijo, L. 1975. Races of the pathogen and resistance to coffee rust. *Annu. Rev. Phytopathol.* 13:49-70.
- Rosas, Z. A. J. 2017. "Desarrollo de Tres Variedades de *Coffea Arabica* L. Injertadas y de Pie Franco Bajo Diferentes Condiciones Ambientales." Universidad Veracruzana.
- SAGARPA. 2005. Análisis Prospectivo de Política Cafetalera. Proyecto Evaluación, Alianza para el Campo. Disponible en: <https://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2019/0/28/1608/01022019-analisis-prospectivo-de-politica-cafetalera.pdf>
- Shigueoka L. H., Hiroshi S. G., Sera T., De Batista Fonseca I. C., Mariucci J. V., Andreazi E., Gimenez C. F., Goncalves G. C., Carducci, F. C. 2014. Selection of arabic coffee progenies with rust resistance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 14:88-93.
- SIAP, Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (2017) Avance mensual de siembras y cosechas. Resumen nacional por cultivo. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinP
- Sprague, G. F. Tatum, L. A. 1942. General vs specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34:923–932.
- Talhinhas, P., Batista D., Diniz, I., Vieira A., Silva, D. N., Loureiro, A., Tavares, S., Pereira, A. P., Azinheira. G. H., Guerra-Guimarães, L., Várzea V., Silva, M. C. 2017. The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. *Molecular Plant Pathology* 18(8). 1039-1051.
- Universidad Nacional Agraria. 2006. El mercado internacional del café. Observatorio de Corporaciones Transnacionales. Boletín no. 14. Disponible en <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REE71156.pdf>
- Van der Vossen, H. A. M. 1985. Coffee selection and breeding. In: Clifford, M. N., Wilson, K. C., eds. *Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage*. London: Croom Helm:48-96
- Velásquez O. R. A. 2016. Guía de variedades de café. Guatemala. Asociación Nacional del Café, Anacafé. 48 pp.
- Vergara, A.N., S. Rodríguez, y H. Córdova. 2005. Aptitud combinatoria general y específica de líneas de maíz (*Zea mays*) tropical y subtropical. *Agron. Mesoam.* 16(2):137-143.
- Walyaro D. J. 1983. Considerations in breeding for improve yield and quality (*Coffea arabica* L.) Doctoral Thesis, Agricultural University Wageningen

CAPÍTULO I. PARÁMETROS GENÉTICOS DEL VIGOR DE LAS CRUZAS DE SEIS VARIEDADES DE CAFÉ.

Dalia Reyes Landa¹, Víctor Heber Aguilar Rincón¹, Tarsicio Corona Torres¹,
Gabino García De Los Santos¹, Esteban Escamilla Prado²

1.1 RESUMEN

La elección de genotipos prometedores para el desarrollo de variedades a partir de hibridación es una de las estrategias para mejorar la productividad en los cultivos. Es por ello, que el objetivo de este trabajo fue evaluar la Aptitud Combinatoria General (ACG) y Específica (ACE), Heterosis y Heterobeltiosis en plantas de café a nivel vivero de cuatro variables: Altura de planta (ADP), diámetro del tallo (DDT), número de pares de hojas (PDH) y número de cruces (NDC) o ramas primarias, en un diseño dialélico completo de seis variedades de café; encontrándose diferencias significativas en los efectos de ACG y ACE, lo que significa el tipo de acción génica tanto aditiva,. Se descubrió que Geisha es el progenitor con valores más altos y significativos de ACE para DDT y NDC y el segundo mejor para ADP. Las cruzas Geisha x Catucaí rojo y Catucaí rojo x Geisha son las únicas que presentan, cada una, al menos tres valores positivos y significativos para efectos de ACE. En la heterosis se encontraron predominantemente valores negativos para las variables de respuesta, lo cual sugiere dominancia y que las características de la descendencia se reducirían, lo cual resulta conveniente para la variable altura, pero no para las demás variables. La craza Geisha x Catucaí rojo presenta valores positivos en el análisis de heterobeltiosis en tres de las cuatro variables, pero solo para DDT y NDC presentan diferencias estadísticamente significativas.

Palabras clave: aptitud combinatoria general, aptitud combinatoria específica heterosis, heterobeltiosis café, cruzas dialélicas, *Coffea arabica*, vivero

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México- Texcoco, Montecillo, Texcoco 56230, Estado de México, México ² Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario de Oriente, Km 6 Carretera Huatusco- Xalapa, Huatusco 94100, Veracruz, México.

1.2 ABSTRACT

The choice of promising genotypes for the development of varieties from hybridization is one of the strategies to improve crop productivity. Thus, the objective of this work was to evaluate the General Combining Ability (GCA) and Specific Combining Ability (SCA), Heterosis and Heterobeltiosis in coffee plants at the nursery level of four variables: Plant height (ADP), stem diameter (DDT), number of pairs of leaves (PDH) and number of crosses (NDC) or primary branches, in a complete diallel design of six coffee varieties. finding significant differences in the effects of ACG and ACE, which means the type of genetic action, both additives,. Geisha was found to be the parent with the highest and most significant ACE values for DDT and NDC and the second highest for ADP. The Geisha x Catucaí rojo and Catucaí rojo x Geisha crosses are the only ones that each present less than three positive and significant values for ACE effects. In heterosis, negative values were found predominantly for the response variables, which would suggest dominance and that the characteristics of the offspring would be reduced, which would be convenient for the height variable, but not for other variables. The Geisha x Catucaí Rojo cross shows values in the heterobeltiosis analysis in three of the four variables, but only for stem diameter and number of crosses do they show statistically significant differences.

Keywords: general combining ability, specific combining ability, heterosis, heterobeltiosis, coffee, diallel crosses, *Coffea arabica*, nursery

1.3 INTRODUCCIÓN

El género *coffea* es originario de la región central africana, y dentro de este son reconocidas hasta 134 especies (Anthony *et al.*, 2011) de las cuales sólo 10 son utilizadas para la producción y dos de estas especies son de importancia económica: *Coffea canephora* y *Coffea arabica*. El 80% de la producción mundial de café corresponde a *C. arabica*, la cual es más apreciada por su aroma y acidez pronunciada en taza, su contenido de cafeína se encuentra entre 0.9% y 1.5% y se produce entre los 900 y 2000 msnm (Farah y Dos Santos, 2014; Tim, 2012), mientras que *C. canephora* se cultiva entre los 100 y 700 msnm, y se caracteriza por contener el 3% de cafeína, sabor áspero y mayor cuerpo en taza. (Canet *et al.*, 2016).

Aunque el café tiene su centro de origen en África, la posición geográfica y orografía que tiene México, favorecen el desarrollo de este cultivo, ya que existen zonas con las características que requiere para su producción con calidad; lo cual ha hecho que los productores lo adopten como principal fuente de ingresos (SAGARPA, 2005). Actualmente se cultiva en 480 municipios de 14 estados, empleando a más de 500,000 productores. Este cultivo destaca por su relevancia social, económica y ambiental (SIAP, 2019). No obstante la importancia del café en México, únicamente se han seleccionado la variedad Garnica en 1970 y Oro Azteca en 1995, todas las demás variedades cultivadas en el país han sido introducidas (Escamilla, 2016).

Por otro lado, las variedades tradicionales Caturra, Catuaí y Mundo Novo, se desarrollaron en Brasil y derivan de dos poblaciones básicas, *typica* y *bourbon*. (Carvalho *et al.* 1991; Velásquez, 2016). Posteriormente se introdujo como fuente de resistencia a enfermedades el Híbrido de Timor, con el cual se derivaron las variedades Sarchimores y Catimores, desarrollados en Costa Rica y Colombia, respectivamente (Cortina *et al.* 2013). El parentesco entre estas variedades explica la estrecha base genética, lo cual, en gran medida ha limitado el éxito de los programas de mejoramiento genético (Anthony *et al.*, 2011). Algunos autores han propuesto el uso de híbridos resultado de la cruce de materiales de Sudán y Etiopía,

con variedades desarrolladas en América (Bertrand *et al.*, 2011; PROCAFÉ, 2009), con el fin de incrementar la diversidad genética y explotar heterosis. Debido a lo anterior, es necesario considerar en el mejoramiento genético de café el empleo de germoplasma lo más diverso posible. Si bien las variedades Oro azteca, Maracatú, Catucaí rojo y Garnica, tienen en su genealogía a la variedad Caturra como progenitor, presentan cierta variación en sus ancestros. Por ejemplo, la variedad Oro azteca tiene a Híbrido de Timor (Zamarripa, 1998); Maracatú a Maragogipe, la cual es una mutación de Typica (Krug y Carvalho., 1942); y Catucaí Rojo a Icatú, ésta última, resultado de la retrocruza con Mundo Novo de la F1 de la cruce entre *C. canephora* y *C. arábica* (Anacafé, 2016). Estas variedades tienen por lo menos una característica deseable: Oro azteca y Garnica, resistencia parcial a roya y porte bajo (Escamilla *et al.*, 2015); Catucaí Rojo presentan resistencia parcial a roya, productividad y porte medio (Anacafé, 2016). Maracatú tiene cerezas de tamaño grande a muy grande (World Coffee Research, 2019) y Garnica calidad en taza (Escamilla *et al.*, 2015). Por otro lado, Java y Geisha, las cuales son introducciones silvestres de Etiopía, también expresan caracteres deseables, como calidad en taza, tamaño de grano grande y resistencia a enfermedades (Puerta-Quintero, 2000; Sotomayor y Duicela, 1993).

Posterior a la selección de progenitores, es imprescindible conocer el comportamiento genético mediante el análisis de sus parámetros genéticos, para considerar en la elección de una metodología de un programa de mejoramiento genético. Una manera de determinarlo, es mediante la evaluación de progenitores y sus cruces derivadas de un sistema de cruces dialélicas, ya que se puede comparar el desempeño de líneas en combinaciones híbridas, determinar el tipo de acción génica en caracteres cuantitativos de los progenitores, e identificar progenitores y cruces superiores, a través de parámetros genéticos como la Aptitud Combinatoria General (ACG) y la Aptitud Combinatoria Específica (ACE) (Sprague y Tatum, 1942). La Aptitud Combinatoria Específica o SCA, por sus siglas en inglés, es la desviación del comportamiento de un cruzamiento con respecto al comportamiento promedio de sus progenitores.

Un aspecto también importante a evaluar en el desempeño de los progenitores es la heterosis (vigor híbrido), definida como la superioridad que los híbridos expresan en los caracteres de interés, con respecto al promedio de los parentales (Shull, 1909). La heterosis ha sido reportada principalmente en maíz (Gaytán y Mayek, 2010), pero en café, este parámetro es poco conocido debido a su biología reproductiva (autógama) y a su naturaleza perene, la cual requiere varios años para obtener resultados consistentes (Bellachew, 2001). La heterobeltiosis por su parte, representa la superioridad del carácter del híbrido respecto al del mejor progenitor (Fonseca y Paterson, 1968). La evaluación de estos parámetros para café han sido poco analizados (Ayano, *et al.* 2015), es por ello que el objetivo de este trabajo es analizar estos parámetros genéticos en un diseño de cruza dialélicas 6 x 6, bajo el primer método de Griffing en café, con las variedades Java, Geisha, Oro Azteca, Maracatú, Catucaí Rojo y Garnica del Banco de Germoplasma del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO), de la Universidad Autónoma Chapingo.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en las instalaciones del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO), de la Universidad Autónoma Chapingo, donde se encuentra el Banco de Germoplasma de Café (BAGEM) del cual se seleccionaron las variedades que se usaron en este trabajo (Cuadro 1.1):

Cuadro 1.1. Principales características de los materiales usados en el dialélico de café.

Variedad	Origen	Porte	Rendimiento	Tamaño del fruto	Roya del cafeto
Java	Etiopía	Alto	Medio	Grande	Tolerante
Geisha	Etiopía	Alto	Medio	Promedio	Tolerante
Oro Azteca	Híbrido de Timor 832/1 x Caturra	Medio	Alto	Promedio	Resistente
Maracatú	Maragogype x Caturra	Alto	Bajo	Grande a Muy Grande	Tolerante
Catucaí Rojo	Icatú x Catuaí	Alto	Alto	Promedio	Resistente
Garnica	Mundo Novo 15 X Caturra Amarillo 13	Medio	Medio	Promedio	Susceptible

Fuente: Word coffee research. Variedades de café arábica. 2019.

Generación del dialélico

Se realizaron las cruza simples entre las seis variedades utilizadas en este trabajo tanto en forma directa como recíproca (Cuadro 1.2), bajo el método lo propuesto por Griffing (1956) para realizar el análisis.

Las cruza se realizaron en 2017 utilizando plantas en floración. Se consideraron plantas con flores previas a antesis las cuales se emascularon utilizando una navaja asegurando la integridad del pistilo. para ello, se emascularon flores de los progenitores y las ramas con pistilos al descubierto, se cubrieron con bolsas de cartón delgado. Tres días después de la emasculación, utilizando un pincel y una caja de Petri, se recolectó por separado polen de cada una de las distintas variedades y se colocó en los pistilos de las ramas anteriormente cubiertas. Nuevamente se cubrieron las ramas y para su identificación, fueron colocados listones de colores por rama, los cuales representaban al progenitor masculino. Un mes después, fueron retiradas las bolsas de cartón y se eliminaron las flores que brotaron en ese periodo en estas ramas. Después de nueve meses, se recolectaron cerezas de los progenitores y las resultantes de dichos cruzamientos, se eliminó el

exocarpo (despulpe) y se colocaron en bolsas de plástico para su fermentación. Al día siguiente se lavaron y dejaron secar. Se guardaron temporalmente en contenedores de plástico. Para la germinación de las semillas híbridas y de los progenitores se utilizaron charolas de germinación con una mezcla de tierra (50%), estiércol de borrego (30%) peat moss (10%) agrolita (5%), potencializador solubilizador dihidro (3%) y cal (2%). Posteriormente cuando las plántulas germinaron y presentaron hojas cotiledonales se trasplantaron a bolsas negras de plástico de 22 cm. x 22 cm. y capacidad 1.89 litros que contenían la misma mezcla de sustrato.

Cuadro 1.2. Dialélico según el método I de Griffing y progenitores de café usados

	Java	Geisha	Oro azteca	Maracatú	Catucaí rojo	Garnica
Java	X11	X21	X31	X41	X51	X61
Geisha	X12	X22	X32	X42	X52	X62
Oro Azteca	X13	X23	X33	X43	X53	X63
Maracatú	X14	X24	X34	X44	X54	X64
Catucaí rojo	X15	X25	X35	X45	X55	X65
Garnica	X16	X26	X36	X46	X56	X66

Las plantas de los diferentes progenitores y sus cruzas se mantuvieron en un Vivero convencional del CRUO durante seis meses, después fueron trasladadas a un invernadero, donde se mantuvieron hasta la toma de datos, cuando las plantas tenían un año de edad.

Las variables evaluadas fueron:

Altura de planta (ADP) (cm): Longitud medida del cuello del tallo, al ápice.

Diámetro del tallo (DDT) (mm). Medición tomada en el cuello del tallo.

Número de pares de hojas (PDH). Número de pares de hojas verdaderas.

Número de cruces (NDC). Número de ramas laterales (crecimiento plagiotrópico) en las plantas.

El experimento se desarrolló bajo un Diseño experimental completamente al azar, con cuatro repeticiones, donde una repetición estuvo compuesta por una planta.

El modelo del Método I de Griffing utilizado es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + m_i - m_j + r_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

μ : Media general

$g_i + g_j$: Aptitud Combinatoria General

s_{ij} : Aptitud Combinatoria Específica

$m_i - m_j$: Efectos maternos generales

r_{ij} : Interacción de efectos maternos

e_{ijk} : Error

El análisis de los efectos de Aptitud Combinatoria General y Específica de las variables del diseño de cruzamientos dialélico, se realizaron con el procedimiento propuesto por Zhang *et al* (2005) en el programa estadístico SAS, mediante los códigos Diallel y DialAll. Para las diferencias significativas, se hizo una prueba de comparación de medias (Tukey $p=0.05$).

Para el análisis de Heterosis (H), se usó la fórmula $H = \frac{F1-VPM}{VPM} \times 100$; donde:

F1: Es el valor promedio de la cruce; y

VPM: Valor promedio de los progenitores

La fórmula $\frac{F1-MP}{MP} \times 100$ se utilizó para calcular la heterobeltiosis

Dónde:

F1 = Híbrido de la primera cruce;

MP= Mejor progenitor

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza (ANOVA) muestra diferencias estadísticas altamente significativas, entre los genotipos (progenitores y sus cruzas) (Cuadro 1.3), debido a la diversidad genética de los progenitores (Cuadro 1.1). Así mismo, los cuadrados medios de los genotipos, ACG, ACE y efectos recíprocos (ER) presentan diferencias significativas. La significancia en ACG y ACE resalta la importancia de efectos aditivos como los no aditivos en estas características. Considerando que los valores de los cuadrados medios de los efectos de ACG son mayores que los de ACE en las variables ADP, DDT, NDC, podemos concluir que los efectos aditivos son más importantes que los de dominancia, y por el contrario para el efecto de la variable PDH donde ACE es mayor. Resultados similares fueron reportados por Bellachew (1991) en su evaluación a nivel vivero de cruzas de café silvestre, destacando la importancia de efectos aditivos y no aditivos en los caracteres, diámetro del tallo, altura de planta, número de nudos, longitud del entrenudo, peso fresco y seco de brotes).

Cuadro 1.3. Cuadrados medios del análisis dialélico de seis variedades de café en las variables de vigor híbrido

F.V.	G. L.	ADP	DDT	PDH	NDC
Genotipos	35	51.30**	0.54 **	1.00**	0.87**
ACG	5	734.02**	5.73**	4.45*	12.0**
ACE	14	521.29**	4.55**	21.46**	5.58*
ER	14	685.69**	10.31**	11.16*	15.14**
Error	105	802.24	13.50	36.47	20.91
Total	173				

ADP: Altura de planta. DDT: Diámetro de tallo. PDH: Número de pares de hojas NDC: Número de cruces. ER: Efectos recíprocos * significancia al 0.05, ** significancia al 0.01

Aptitud Combinatoria General (ACG)

Los valores más altos de los efectos de la ACG para la variable ADP, los presentaron las variedades Geisha y Maracatú, con valores de 1.85 y 2.54, respectivamente (Cuadro 1.4), de igual manera en sus valores promedio con 25.38 y 32.5 (Cuadro 1.5). Las variedades con menor valor fueron Oro Azteca y Catucaí rojo, con -1.55 y -1.4, respectivamente; valores que son altamente significativos (p

< 0.01) (Cuadro 1.4). Para la variable DDT, el mayor efecto de ACG lo obtuvo la variedad Geisha, con 0.29, el cual es altamente significativo. La variedad Catucaí Rojo presentó el mayor valor de ACG para la variable PDH, con 0.09, sin embargo, esto no representa diferencias significativas. De acuerdo con Vencovsky (1987), valores bajos de los efectos de ACG, ya sean positivos o negativos, indican que, el padre no difiere significativamente del promedio general de la población dialélica. Sin embargo, cuando los valores son altos, positivos o negativos, el padre en cuestión es mucho más alto o bajo que otros progenitores del dialélico. Esto indica que los genes tienen efectos predominantemente aditivos.

En cuanto al NDC, las variedades Geisha y Garnica tienen valores positivos que son altamente significativos: 0.31 y 0.20, respectivamente. Las variedades Java y Oro azteca también presentan valores altamente significativos, no obstante, estos son negativos con -0.26 y -0.18 (Cuadro 1.4). Por otra parte, los resultados observados en Java coinciden con los obtenidos por Cilas *et al* (1998), quienes reportan que, aunque la variedad tiene buen desempeño *per se*, como progenitor no lo tiene, ya que la relaciona con reducción de altura, diámetro del tallo y número de hojas.

La variable Geisha obtuvo valores altos y significativos en tres de las cuatro variables evaluadas (Cuadro 1.4). Considerando que la ACG es un parámetro que expresa la acción génica aditiva del carácter de interés, este parámetro muestra el potencial de Geisha como progenitor para transmitir características de altura, diámetro del tallo y número de cruces a sus descendientes.

Cuadro 1.4. Efectos de aptitud combinatoria (ACG) de los progenitores para las variables de respuesta registradas

Variedades	ADP	DDT	PDH	NDC
Java	-0.80 *	-0.09	-0.18 *	-0.26 **
Geisha	1.85 **	0.29 **	-0.16 *	0.31 **
Oro Azteca	-1.55 **	-0.01 *	0.1	-0.18 **
Maracatú	2.54 **	0.07	0.07	-0.04
Catucaí rojo	-1.4 **	-0.12 *	0.09	-0.04
Garnica	-0.63	-0.05	0.1	0.2 **

ADP: Altura de planta. DDT: Diámetro de tallo. PDH: Número de pares de hojas NDC: Número de cruces * significancia al 0.05, ** significancia al 0.01

Cuadro 1.5. Valores promedio para variables evaluadas en variedades de café

Variedades	ADP (cm)	DDT (mm)	PDH	NDC
Java	24.50	3.50	6.00	0
Geisha	25.38	3.75	6.75	1
Oro Azteca	22.62	3.60	7.50	0.50
Maracatú	32.50	3.98	7.75	0.50
Catucaí rojo	21.88	3.69	7.50	0.5
Garnica	25.12	3.74	7.75	1.5

ADP: Altura de planta. DDT: Diámetro de tallo. PDH: Número de pares de hojas NDC: Número de cruces

Aptitud Combinatoria Específica (ACE)

Los efectos de ACE mostraron valores altamente significativos en todas las variables (Cuadro 1.6), lo cual sugiere la importancia de las desviaciones de la varianza aditiva debido a efectos de dominancia, sobredominancia, o epistasis; y refiere un efecto complementario de los progenitores involucrados en cruces particulares sobresalientes.

Según la magnitud de los efectos de ACE, las cruzas con valores positivos y significativos para la variable ADP son Oro Azteca x Java, Oro Azteca x Geisha, Catucaí Rojo x Geisha, Catucaí Rojo x Maracatú (Cuadro 1.6), sin embargo, para un mejoramiento en café, se podría considerar una ACE con valores bajos para esta variable, ya que nos permitiría generar progenie con menor altura para facilitar labores en campo y una mayor densidad de población. En este sentido la crusa Geisha x Java, dio el menor valor (-3.5) altamente significativo.

Para DDT las cruzas Geisha x Catucaí Rojo, Catucaí Rojo x Geisha, Catucaí x Maracatú mostraron valores positivos y altamente significativos (Cuadro 1.6).

Para la variable PDH, las cruzas Garnica x Catucaí Rojo, Java x Catucaí rojo y Java x Garnica mostraron valores positivos de 0.63, 0.38 y 0.58 respectivamente (Cuadro 1.6); donde el primero es altamente significativo y los otros dos significativos.

Para NDC, los valores 1.00 y 0.51 altamente significativos para el efecto de la ACE corresponden a las cruzas Catucaí Rojo x Geisha y Geisha x Catucaí Rojo (Cuadro 1.6). La importancia de esta variable radica en que representa un incremento en el promedio de la producción de cerezas y reducción de altura, debido a que el crecimiento plagiotrópico, o de ramas, que tienen conexión vascular y al tener madurez fisiológica tendrán la posibilidad de diferenciarse para producir más ramas o frutos de café (Cilas *et al.*, 1998).

De acuerdo a lo anterior, la crusa que sobresalió fue Geisha x Catucaí rojo, debido a que destaca en estas variables de respuesta, es decir, cuando Geisha actúa como hembra, sobresale en las variables de respuesta DDT, PDH y NDC (Cuadro 1.6), esto reflejado también en sus valores promedio (Cuadro 1.5). Su crusa recíproca, es superior para las variables ADP, DDT, y NDC. Geisha figura en sus valores de ACG, en contraste Catucaí rojo muestra valores bajos, e incluso negativos, sin embargo, en forma específica estos progenitores combinan bien, lo cual puede ser explicado por la divergencia genética de éstos. Ya que Geisha es un material etíope (Labouisse, 2008) y Catucaí rojo proviene de variedades desarrolladas en América (Anacafé, 2019). Tal como se ha mostrado con los híbridos resultado de la crusa entre variedades americanas (Caturra, Pacas, Catuaí, etc.) y accesiones etíopes,

que ha formado Bertrand *et al* (2011) donde han encontrado una ACE o heterosis en un rango de 22 a 47%.

Cuadro 1.6. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas de café para las variables evaluadas

Cruzas	ADP	DDT	PDH	NDC
Cruzas directas				
Jav x Gei	-1.24	0.15	-0.49 *	-0.13
Jav x Oro	-0.55	-1.15	0.06	0.02
Jav x Mar	-2.20 **	-0.06	0.05	0.05
Jav x Cat	0.26	0.04	0.38 *	0.22
Jav x Gar	-0.16	-0.03	0.58 *	0
Gei x Oro	0.06	-0.08	0.1	-0.06
Gei x Mar	1.22	0.15	-0.25	0.14
Gei x Cat	1.29	0.30 **	0.36 *	0.51 **
Gei x Gar	-0.82	-0.08	0.15	-0.13
Oro x Mar	-0.23	0.002	-0.02	0.05
Oro x Cat	-0.8	-0.11	0.05	-0.21
Oro x Gar	-2.01 *	0.18	-0.53 **	0.02
Mar x Cat	-3.04 **	-0.27 *	-0.38 *	-0.12
Mar x Gar	-0.98	-0.024	-0.03	0
Cat x Gar	-0.2	-0.26 *	-0.77 **	-0.27 *
Cruzas recíprocas				
Gei x Jav	-3.50 **	-0.41 **	-0.12	-0.62 **
Oro x Jav	2.46 *	0.24	-0.06	0.84
Oro x Gei	2.25 *	0.18	0.12	0.23
Mar x Jav	0.86	-0.07	0.4	-0.04
Mar x Gei	0.18	-0.09	-0.37	0.12
Mar x Oro	-1.57	-0.12	-0.1	-0.03
Cat x Jav	-0.5	-0.26 *	-0.75 **	-0.37 *
Cat x Gei	5.19 **	0.71 **	0	1.00 **
Cat x Oro	-2.42 *	-0.14	-0.2	-0.26
Cat x Mar	4.54 **	0.35 **	0	0
Gar x Jav	0.23	-0.11	-0.04	-0.09
Gar x Gei	1.28	0.09	-0.13	0.15
Gar x Oro	0.88	-0.05	-0.12	0.25
Gar x Mar	0.49	-0.01	-0.08	-0.05

Cruzas	ADP	DDT	PDH	NDC
Gar x Cat	-1.63	-0.48 **	0.63 **	-0.34 *

* significancia al 0.05, ** significancia al 0.01

Cuadro 1.7. Valores promedio de variables de respuesta de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas de café

Cruzas	ADP (cm)	DDT (mm)	PDH	NDC
Cruzas directas				
Jav x Gei	18.50	3.57	6.00	0
Jav x Oro	21.76	3.54	6.87	0.31
Jav x Mar	22.60	3.48	7.31	0.40
Jav x Cat	19.75	3.21	6.50	0.25
Jav x Gar	20.84	3.35	7.41	0.56
Gei x Oro	24.80	3.92	7.12	1.00
Gei x Mar	28	4.05	6.25	1.25
Gei x Cat	29.13	4.82	7.25	2.50
Gei x Gar	23.90	3.89	6.91	1.25
Oro x Mar	21.38	3.48	7.00	0.50
Oro x Cat	16.00	3.17	7.00	0
Oro x Gar	18.88	3.62	6.50	1.00
Mar x Cat	24.83	3.67	6.75	0.50
Mar x Gar	23.61	3.62	7.01	0.81
Cat x Gar	18.33	2.72	7.00	0.25
Cruzas recíprocas				
Gei x Jav	25.50	4.40	6.25	1.25
Oro x Jav	16.83	3.05	7.00	0.25
Oro x Gei	20.30	3.56	6.87	0.53
Mar x Jav	20.88	3.63	6.50	0.50
Mar x Gei	27.62	4.23	7.00	1.00
Mar x Oro	24.53	3.73	7.21	0.56
Cat x Jav	20.75	3.74	8.00	1.00

Cruzas	ADP (cm)	DDT (mm)	PDH	NDC
Cat x Gei	18.75	3.39	7.25	0.50
Cat x Oro	20.85	3.45	7.40	0.52
Cat x Mar	15.75	2.96	6.75	0.50
Gar x Jav	20.38	3.59	7.50	0.75
Gar x Gei	21.30	3.70	7.18	0.93
Gar x Oro	17.13	3.73	6.75	0.50
Gar x Mar	22.64	3.65	7.17	0.91
Gar x Cat	21.60	3.69	5.73	0.94

ADP: Altura de planta. DDT: Diámetro de tallo. PDH: Número de pares de hojas NDC: Número de cruces

Heterosis

En los resultados de heterosis se encontraron predominantemente valores negativos para las cuatro variables de respuesta (Cuadro 1.8).

Sin bien encontramos cruces que pudieran aportar característica de porte bajo, se encontró que esto está relacionado en la disminución en el vigor de las variables DDT, PDH, y NDC. Ejemplo de esto es Oro azteca x Catucaí rojo y Maracatú x Garnica (Cuadro 1.8).

De todas las cruces, la que sobresale es Geisha x Catucaí rojo, dado que tiene el valor más alto en heterosis en DDT, y un valor alto y significativo en ADP (Cuadro 1.8) Además esta progenie presenta heterobeltiosis en tres de las cuatro variables, pero solo para DDT (28.53) y NDC (150) presentan diferencias estadísticamente significativas. Los valores de ACG de Geisha (Cuadro 1.4) para las variables, fueron significativos y positivos, lo cual se ve reflejado en heterosis en ADP y DDT, además esto se puede explicar debido a la divergencia genética de estos dos progenitores, ya que Geisha proviene de introducciones, mientras que Catucaí rojo, ha sido desarrollado con variedades americanas (Labouisse, 2008; Anacafé, 2019). Por el contrario, cuando se utilizan materiales muy cercanos, como en el trabajo realizado por Krug y Carvalho (1952), donde cruzaron plantas de café de la misma variedad (bourbón x bourbón), las cuales no mostraron heterosis, incluso un efecto

desfavorable en el amarre del fruto. Sin embargo, para un cruzamiento entre plantas de variedades diferentes: maragogipe x bourbón, presentaron existencia de heterosis, manifestada en una mayor producción de frutos.

Bellachew *et al.* (1993), evaluaron seis materiales de *C. arabica* en un dialélico parcial, para obtener estimaciones de heterosis, heterobeltiosis, ACG y ACE. Los híbridos presentaron heterosis positiva en relación al mejor progenitor, las mayores heterobeltiosis fueron observadas en cruza cuyos progenitores tenían orígenes y caracteres morfológicos distintos.

Cuadro 1.8. Heterosis del dialélico de variables altura, diámetro del tallo, pares de hojas, y cruces.

Cruza	ADP	DDT	PDH	NDC
Jav x Gei	-25.81*	-1.38	-5.88	-100
Jav x Oro	-7.64	0	1.78	28.4
Jav x Mar	-20.70*	-6.83	6.33	60
Jav x Cat	-14.82	-10.58	-3.7	0
Jav x Gar	-16.01	-7.33	7.93	-25.33
Gei x Jav	2.26	24.29 *	-1.96	150
Gei x Oro	3.36	6.81	-0.07	33.33
Gei x Mar	-3.24	4.79	-13.79	66.67
Gei x Cat	23.28 *	29.57 *	1.75	233.33
Gei x Gar	-5.4	3.87	-4.69	0
Oro x Jav	-28.57 *	-13.84	3.7	-92.94
Oro x Gei	-15.4	-3	-3.58	-29.33
Oro x Mar	-22.44 *	-8.06	-8.2	0
Oro x Cat	-28.08 *	-12.91	-6.67	-100
Oro x Gar	-20.93	-1.23	-14.75	0
Mar x Jav	-26.75 *	-2.81	-5.45	100
Mar x Gei	-4.54	9.44	-3.45	33.33
Mar x Oro	-10.99	-1.72	-5.44	12
Mar x Cat	-8.67	-4.3	-11.48	0
Mar x Gar	-18.05	-6.22	-9.55	-19
Cat x Jav	-10.51	4.18	18.52	300
Cat x Gei	-20.63	-8.87	1.75	-33.33
Cat x Oro	-6.26	-5.22	-1.33	4
Cat x Mar	-42.07 *	-22.82 *	-11.48	0
Cat x Gar	-22.00 *	-26.78 *	-8.2	-75
Gar x Jav	-17.88	-0.69	9.09	0
Gar x Gei	-16.15	-1.2	-0.97	-25.6
Gar x Oro	-28.26 *	1.77	-11.48	-50
Gar x Mar	-21.43 *	-5.44	-7.48	-9
Gar x Cat	-8.11	-0.67	-24.85	-6

* significancia $p > 0.05$, ** significancia $p > 0.01$

1.6 CONCLUSIONES

La variedad Geisha es el progenitor que recombina mejor, ya que presentó significancia en ACG para la mayoría de las variables. La variedad Maracatú presentó significancia en la variable ADP y Garnica para NDC.

De las diferentes cruzas, la que destacó fue la crusa Geisha x Catucaí rojo dado que presenta significancia en las variables DDT, PDH y NDC y una heterosis significativa en ADP, DDT y NDC. De aquí que Geisha podría ser utilizada para mejoramiento genético a través de selección en la segregación de sus cruzas. En tanto que como híbridos, el que podría ser utilizado es Geisha x Catucaí rojo.

1.7 LITERATURA CITADA

- Anacafé, Asociación Nacional del Café. 2016. Guía de variedades de café. Guatemala.
- Anthony F., Bertrand B., Etienne H., Lashermes P. 2011. Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources. Plantation and Ornamental Crops. Springer. Páginas 41-63.
- Ayano, A., Sentayehu A., and Abush T.. 2015. "Heterosis and Combining Ability of Fruit and Bean Characters in Ethiopian Origin Coffee (*Coffea Arabica* L .) Hybrids." 5(11):
- Bellachew, B. 1991. Nursery evaluation of heterosis and combining ability in reference to origing and morphology of parents in coffee (*Coffea arábica* L.) M. Sc. Thesis, Alemaya University of agriculture, Alemaya, Ethiopia.
- Bellachew, B.; Ameha, M; Mekonnen, D. 1993. Heterosis and combining ability on coffee (*Coffea arabica* L.). Colloque scientifique international sur le café, 15 °, Montpellier. Paris, Association Scientifique Internationale du café (ASIC).
- Bellachew, B. 2001. Arabica coffee breeding for yield and resistance to coffee berry disease (*Colletotrichum kahawae* sp nov.) University of London.
- Carvalho, A., Medina F. H. P., Fazuoli L. C., Guerreiro F. O, Lima, M. M. A. 1991. Aspectos genéticos do cafeeiro. Rev. Brasil, Genet. 14:135-183.
- Cilas, C.; Bouharmont, P.; Boccara, M.; Eskes, A. B.; Baradat. 1998. Prediction of genetic value for coffee production in *Coffea arabica* from a half-diallel with lines and hybrids. Euphytica. 104 (1):49-59.
- Cortina, G. H. A., Acuña, Z. J. R. Moncada, B. M. P., Herrera, P. J. C., Molina, V. D. M. 2013. Manual del cafetero colombiano. Tomo I. Capítulo El Cafeto. Variedades de café. Desarrollo de variedades.

- Escamilla, E. P. 2016. Las variedades de café en México ante el desafío de la roya. Una REDD para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas. Boletín Informativo. Programa Mexicano del Carbono. (4)
- Escamilla, E. P., Ruíz, O. R., Zamarripa, A. C., González, V. A. H. 2015. Calidad en variedades de café orgánico en tres regiones de México. Revista de Geografía Agrícola, no. 55, pp 45-55
- Falconer, D.S. 1989. Introduction to Quantitative Genetics. 3rd Edition, Longman Scientific and Technical, New York.
- Farah, A., Ferreira D. S. T. 2014. Coffee in Health and Disease Prevention *The Coffee Plant and Beans: An Introduction*. Elsevier Inc. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00001-2>.
- Fonseca, S., F. L. Patterson. 1968. Hybrid vigor in a sevenparent diallel crosses in common winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Crop Sci. 8: 85-88.
- Gaytán B. R., & Mayek P N. 2010. Heterosis en híbridos de maíz producidos de cruzamientos entre progenitores de Valles Altos x Tropicales. Investigación y Ciencia, 18(48),4-8. ISSN: 1665 4412. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=674/67413203002>
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Austr. J. Biol. Sci., 9:463-493.
- Krug, C. A., Carvalho, A. 1942. Genética de Coffea: Hereditariade dos caracteres de Coffea arábica L. Maragogipe Hort ex Froehner, Bragantia 2(6):231-247
- Krug, C. A., Mendes, J. E. T., Carvalho, A. 1939. Taxonomia de *Coffea arabica* L. Bolétim Técnico nº 62, Instituto Agrônômico do Estado, Campinas, Brazil, 57 pp.
- Krug, C. A., Carvalho A.1952. Melhoramento do cafeeiro. Instituto agrônômico de Campinas.
- Labouisse, J. P. 2008. Preserving diversity for speciality coffees. A focus on production systems and genetic resources of arabica coffee in Ethiopia. Annual conference, Minneapolis.
- Puerta-Quintero, G. I. 2000. Calidad en taza de algunas mezclas de variedades de café de la especie *Coffea arábica* L. Cenicafé 51(1):5-19
- Rosas, Z. A. J. 2017. “Desarrollo de Tres Variedades de *Coffea Arabica* L . Injertadas y de Pie Franco Bajo Diferentes Condiciones Ambientales.” Universidad Veracruzana.
- SAGARPA. 2005. “Plan Rector Del Sistema Producto Café En Mexico Versión Final Para Validación.”
- Sánchez-Hernández, S, E Escamilla-Prado, M A Mendoza-Briseño, and N Nazario ezama. 2018. “CALIDAD DEL CAFÉ (*Coffea Arabica* L.) EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL CENTRO DE VERACRUZ, MÉXICO.” *COFFEE*

QUALITY (*Coffea arabica* L.) IN TWO AGROFORESTRY SYSTEMS IN CENTRAL VERACRUZ, MEXICO. 11(4): 80–86.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=13020718&lang=es&site=ehost-live>.

SAS (Statistical Analysis System). 1999-2000. SAS® Proprietary Software Release 8.1 (TS1M0). SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA.

Shull, G. H. 1909. A pure line method of corn breeding. En: American Breeders' Association Report. Vol. 5; p. 51-59.

Sprague G. F.; Tatum L. A. 1942. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *Journal of the American Society of Agronomy* 34:923-932.

Tim, T. K. 2012. 5 Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants: Volume 4, Fruits Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants: Volume 4, Fruits.

SIAP, Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (2019) Avance mensual de siembras y cosechas. Resumen nacional por cultivo. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinP

Sotomayor, I., Duicela, L. 1993. Manual del cultivo de café. INIAP. Quito, Ecuador.

Vencovsky, R. 1987. Heranca quantitativa. Melhoramento e producao do milho. Paterniani. Fundacao Cargill. pp 135-214

Velásquez O. R. A. 2016. Guía de variedades de café. Guatemala. Asociación Nacional del Café, Anacafé. 48 pp.

World Coffee Research. 2019. Las variedades de café arábica. Disponible en línea : varieties.worldcoffeeresearch.org. Fecha de consulta: 23 de agosto de 2018.

Wynne J. C., D. A. Emery, P. H. Rice. 1970. Combining ability estimation in *Arachis hypogaea* L. II. Field performance of F₁ hybrids. *Crop Science* 10:713-715.

Zamarripa, C. A. 1998. Oro Azteca nueva variedad de café con resistencia a la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix* Berk and Br.) Cafés de México. pp 9-19

Zhang, Y., Kang, M.S., Lamkey, K.R. 2005. Diallel SAS05. A comprehensive program for Griffing's and Gardener-Eberhart. Analysis. *Agronomy Journal* 97: 1097-1106.

CAPÍTULO II. PARÁMETROS GENÉTICOS EN LA RESISTENCIA A ROYA (*Hemileia vastatrix* Berk. and Br.) DE LA CRUZA DE SEIS VARIEDADES DE CAFÉ

Dalia Reyes Landa¹, Víctor Heber Aguilar Rincón¹, Tarsicio Corona Torres¹, Gabino García De Los Santos¹, Fernando Castillo González¹, Esteban Escamilla Prado²

2.1 RESUMEN

La búsqueda de materiales de café resistentes a la roya anaranjada del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) ha sido una lucha constante en el mejoramiento genético. Por ello, y buscando diversificar y desarrollar germoplasma adaptado a las condiciones de México con resistencia a este patógeno, se realizó un dialélico bajo el método 1 de Griffing, el cual incluyó las variedades: Java, Geisha, Oro Azteca, Maracatú, Catucaí Rojo y Garnica, con el objetivo de determinar la Aptitud Combinatoria General y Aptitud Combinatoria Específica de estas variedades y sus cruzas. Los 30 híbridos y sus progenitores, fueron evaluados bajo condiciones laboratorio por su resistencia a *Hemileia vastatrix*, para lo cual se registraron las variables: Periodo de incubación (PDI), Periodo de latencia (PDL), Lesiones visibles por disco (LVD), Porcentaje de discos esporulantes (PDE), Tipo de reacción (TR), Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE). Se encontraron diferencias significativas en todas las variables, tanto entre materiales como en cuanto a la ACG y ACE. Sobresalieron las variedades Catucaí Rojo con respecto a su ACG, y las cruzas Catucaí Rojo x Java y Java x Maracatú en su ACE.

2.2 ABSTRACT

The search for coffee materials resistant to the coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) has been a constant fight in the genetic improvement. For this reason, and seeking to diversify and develop germplasm adapted to the conditions of Mexico with resistance to this pathogen, a diallelic was performed under Griffing method 1, which included the varieties: Java, Geisha, Oro Azteca, Maracatú, Catucaí Rojo and Garnica, with the aim of determining the General Combining Ability (GCA) and Specific Combining Ability (SCA) of these varieties and their crosses. The 30 hybrids and their parents were evaluated under laboratory conditions for their resistance to *Hemileia vastatrix* for which the variables were recorded: Incubation period (IP), latency period (LP), visible lesions per disc (VLD), percentage of sporulating discs (PSD), reaction type (RT), area under the curve of disease progress (AUCDP). Significant differences were found in all variables, between materials, and in terms of GCA and SCA. The variety Catucaí Rojo stood out respect to their ACG, and the Catucaí Rojo x Java and Java x Maracatú crosses in their SCA.

2.3 INTRODUCCIÓN

Según datos del SIAP (2018) el café se cultiva en México en 711,526 hectáreas de 14 estados, con un rendimiento promedio de 1.353 ton/ha. Las zonas donde se cultiva el aromático, coinciden con regiones muy diversas, ricas en flora y fauna (Moguel y Toledo, 1996). Cerca del 90% se cultiva bajo sistemas de sombra, que puede ser sombra densa y diversificada, lo cual genera ecosistemas y servicios ambientales (Moguel y Toledo, 1999). Este cultivo incluye a más de 280 mil productores que son, en su mayoría, minifundistas e indígenas que viven en zonas marginadas (Canet y Soto, 2016). En la década de los 80's, el café generó el 36% de las exportaciones agrícolas de México, y se estima que en 1993 y 1994 generó entre 285 y 700 millones de dólares anuales (Moguel y Toledo, 1996); sin embargo, las recurrentes crisis por los precios bajos debido a las oscilaciones en los precios internacionales, ha propiciado procesos migratorios de cafecultores y abandono de plantaciones (Ortega y Ramírez, 2013). Como resultado del descuido de las plantaciones, se incrementó la incidencia de plagas y enfermedades de manera relevante (Rivadeneira y Ramírez, 2006).

Uno de los principales factores limitantes en la producción de café es la roya de la hoja causada por el hongo *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome (Rodrigues, 1990), la cual provoca caída prematura de las hojas, pérdida del rendimiento y la muerte de la planta en ataques severos (Fernández *et al.*, 2004). Esta enfermedad se registró por primera vez en 1861 en Ceilán (hoy Sri Lanka) donde causó el primer gran impacto económico en la producción de café en 1868, ya que este país era el principal productor mundial en ese entonces (Morris, 1880) En América Latina, se detectó por primera vez en Brasil en enero de 1970 (Muller, 1971). La roya de la hoja se extendió por todos los países cafetaleros causando pérdidas de 20% a 40% (Canet y Soto, 2016).

El uso de cultivares resistentes es la manera más económica y amigable con el ambiente de controlar esta enfermedad, ya que el control químico, aunque es efectivo cuando se usa adecuadamente, es costoso para los productores

(Shigueoka *et al.*, 2013). Además, hay estudios en los que se asocia al oxiclورو de cobre (fungicida utilizado en el control de la roya) con daños humanos en lípidos, proteínas y ADN, y trastornos asociados con el metabolismo anormal del cobre y cambios neurodegenerativos (Husak, 2015).

Para la obtención de las variedades resistentes de *C. arabica*, por ser una especie autógena, se ha empleado la metodología de selección por pedigríe, con la que se han generado muchas variedades, siendo estas líneas puras o mezclas de estas (Bertrand *et al.*, 1999). A través de esta metodología de selección se han transferido genes de resistencia a la roya de la hoja y a nematodos presentes en fuentes de resistencia como es el caso del Híbrido de Timor (HDT), con lo que se han obtenido cultivares con resistencia a estos patógenos en América Central, Brasil y Colombia. Sin embargo, la introducción de genes a menudo se acompaña de características no deseables como el de la caída en la calidad de la bebida (Bertrand *et al.*, 2003).

No obstante que la primera diferenciación racial de *H. vastatrix* fue realizada por Mayne (1932) en India, con los estudios sobre la genética de la resistencia a roya realizados por el Coffee Rusts Research Center (CIFC), se demostró la presencia de resistencia específica de café a roya (Noronha-Wagner y Bettencourt, 1967). Actualmente, trabajos realizados en el CIFC han permitido la caracterización de más de 50 razas de roya (Talhinhas *et al.*, 2017), siendo la raza II la más ampliamente distribuida (Cabral *et al.* 2009).

La resistencia específica a roya de café está condicionada por al menos nueve genes dominantes principales (S_{H1} - S_{H9}), al mismo tiempo se ha inferido la presencia de nueve genes de virulencia (v_1 - v_9) en *H. vastatrix*, (Rodrigues *et al.*, 1975). Los genes S_{H1} , S_{H2} , S_{H4} y S_{H5} se encontraron en *C. arabica* de origen etíope, se considera que el gen S_{H3} deriva de *C. liberica*, en tanto que, S_{H6} , S_{H7} , S_{H8} y S_{H9} provinieron del HDT (*C. arabica* x *C. canephora*), por lo que tienen su origen en *C. canephora* (Rodrigues, *et al.*, 1975). En los últimos años, algunas variedades comerciales mejoradas a partir del HDT y otros híbridos tetraploides interespecíficos, como Icatú, están perdiendo gradualmente su resistencia a la roya

de café en algunos países, debido a la gran capacidad de la roya de generar por mutaciones nuevas razas virulentas (Alvarado, 2005). Además de los genes S_H antes mencionados, es probable que otros genes mayores y menores condicionen las interacciones entre el patógeno y el hospedante (Bettencourt y Rodrigues, 1988). La resistencia no específica, cuantitativa u horizontal a las enfermedades está controlada por múltiples genes, cada uno de los cuales contribuye en forma aditiva a la resistencia. Este tipo de resistencia es considerada más estable que la monogénica (Muller, 1984). Para generar materiales con buenas características en cuanto a resistencia a roya, calidad de taza y productividad deben ser seleccionados aquellos progenitores que presenten algunas de estas características y puedan complementarse. Sin embargo, debido a que en café existe una escasa diversidad entre variedades mejoradas, por la estrecha base genética que se ha empleado en el mejoramiento, es importante considerar fuentes de germoplasma de otro origen (Lashermes *et al.*, 1999). Así, variedades como Oro Azteca, Maracatú, Catucaí Rojo, Garnica, además de Java y Geisha, que son introducciones de diferente origen que presentan en diferente medida algunas de estas características (Cuadro 1.1) (León, 2012; Escamilla, 2016; Anacafé, 2019; World Coffee Research, 2019) pueden formar parte como progenitores de un programa de mejoramiento. Por otro lado, el conocimiento del tipo de acción génica de las variedades y sus cruzas, es de suma importancia a considerar en la elección del método en un programa de mejoramiento genético.

Como parte del desarrollo de nuevos materiales, el objetivo del presente trabajo fue la determinación de los parámetros genéticos (Aptitud Combinatoria General y Aptitud Combinatoria Específica) en la resistencia a roya del café de seis variedades de café y las cruzas directas y recíprocas de las mismas.

Cuadro 2.1. Origen y características agronómicas de variedades de café utilizadas en el diseño I de cruza dialélicas de Griffing

Variedad	Origen	Porte	Calidad en taza	Rendimiento	Tamaño del fruto	Resistencia a <i>H. vastatrix</i>
Java	Etiopía	Alto	Muy bueno	Medio	Grande	Tolerante
Geisha	Etiopía	Alto	Excepcional	Medio	Promedio	Tolerante
Oro Azteca	Híbrido de Timor 832/1 x Caturra	Medio	Bueno	Alto	Promedio	Resistente
Maracatú	Maragogype x Caturra	Alto	Bueno	Bajo	Grande a Muy grande	Tolerante
Catuaí Rojo	Icatú x Catuaí Mundo	Alto	Bueno	Alto	Promedio	Resistente
Garnica	Novo 15 x Caturra Amarillo 13	Medio	Bueno	Medio	Promedio	Susceptible

Fuente: World Coffee Research, 2019.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

La presente evaluación se realizó en el Laboratorio de Fitopatología del CENACAFÉ, en el Centro Regional Universitario de Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma Chapingo. El material vegetal utilizado se conformó por las variedades de café Java, Geisha, Catuaí Rojo, Oro Azteca, Maracatú y Garnica, y las 30 cruza simples directas y reciprocas entre ellas.

La evaluación de la resistencia de los diferentes progenitores y cruza se realizó siguiendo el procedimiento de Eskes (1982). Se tomaron hojas del estrato medio de las plantas de cada progenitor y cada cruza, se colocaron en sobres de papel por separado y se llevaron a laboratorio donde fueron lavadas con agua de la llave para eliminar todo material externo como tierra, insectos, o material orgánico seco de hojarasca. Posteriormente, se cortaron con un cutter, 24 círculos de hojas de 1.5 - 1.8 cm de diámetro. Los discos de cada material se colocaron en contenedores de

plástico de 18 cm x 10 cm, con una esponja en su interior de 17 cm x 9 cm y 2 cm de espesor, y una gasa quirúrgica en su superficie. La esponja y gasa fueron saturadas con agua destilada esterilizada. Los 24 discos de cada material por separado, se colocaron sobre la gasa de un contenedor con el envés hacia arriba.

Se utilizó un Diseño Experimental Completamente al Azar con tres repeticiones y cada una de estas, estuvo compuesta por ocho discos de hoja.

El inóculo utilizado en la prueba, se obtuvo colectando hojas de plantas infectadas por el hongo de las variedades susceptibles Bourbon Amarillo y Marago, que se encuentran dentro de la parcela de Policultivo de café del CRUO y fueron llevadas al Laboratorio en bolsas de plástico, por separado. Posteriormente, con un pincel sencillo, se removieron las esporas del envés de las hojas y se colectaron y pesaron 110 mg de esporas del hongo en una Caja Petri, el inóculo se colocó en un Vaso de Precipitados que contenía 200 ml de agua destilada esterilizada y 5 ml de jabón líquido y se agitó por 5 minutos. La concentración por ml de esporas se cuantificó en la suspensión preparada usando una cámara de Neubauer (Hematocitómetro). Se determinó que la concentración final fue de 835,000 esporas por ml.

La inoculación se realizó depositando una gota de la suspensión en cada disco de hoja (aproximadamente 41 mil esporas) de cada variedad y cruza. Inmediatamente después se colocaron los contenedores en una Cámara Bioclimática Marca Ecoshel Modelo C800D, para su incubación por 24 horas a una temperatura de 22 °C, oscuridad total y una humedad relativa de 80%.

Los contenedores de plástico se mantuvieron cerrados y se mantuvo la humedad de la esponja al aplicar cada semana el agua necesaria para evitar la muerte de los discos.

Para el registro de las variables consideradas en este trabajo, por un periodo de siete semanas se realizaron observaciones semanales donde se cuantificó el número de discos con lesiones, y en la última semana, se registró, además, el tipo

de reacción, el número total de lesiones visibles por disco y el número de discos con lesiones esporulantes.

Con esta información se determinó:

- a) Periodo de incubación (PDI): Tiempo en días desde la inoculación al día en que una variedad o cruza mostraba el primer disco de hoja con lesión visible.
- b) Periodo de latencia (PDL): Tiempo en días desde la inoculación hasta alcanzar el 50% de discos con lesión esporulantes con respecto al total de los discos que presentaron lesiones.
- c) Número total de lesiones visibles por disco (LVD)
- d) Porcentaje de discos con lesiones esporulantes (PDE) con respecto al total de discos
- e) Incidencia: Porcentaje de discos con lesiones
- f) Tipo de reacción (TR) según Eskes y Toma-Braghi (1982):
 - ✓ 0: ausencia de síntomas visibles
 - ✓ 1 a 3: variación en lesiones sin esporulación
 - ✓ 4 a 7: reacción heterogénea con una intensidad de esporulación creciente
 - ✓ 8 a 9: indican susceptibilidad, lesiones grandes con esporulación moderada

La variable Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE) fue calculada utilizando la Incidencia semanal registrada, para lo cual se utilizó la fórmula propuesta por Campbell y Madden (1990).

$$ABCPE = \sum_i^{n-1} \left(\frac{y_i + (y_{i+1})}{2} \right) * (t_{i+1} - t_i)$$

Donde:

y_i = Intensidad de la enfermedad (%) obtenida con base en la incidencia observada.

t_i = Periodo de evaluación en días, por lo que las unidades días.

n= Número de evaluaciones

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para las variables mencionadas y se establecieron grupos homogéneos entre ellas mediante la separación de medias (Tukey $p=0.05$) utilizando el Modelo I de Griffing, el cual considera progenitores, cruza directa y recíprocas, mediante el programa estadístico SAS, versión 9.0. Se determinaron los efectos de Aptitud Combinatoria General y Específica de la resistencia a roya, de las variables PDI, PDL, LVD, PDE, TR y ABCPE, mediante el procedimiento propuesto por Zhang *et al.* (2005) para el programa estadístico SAS, con los códigos Diallel y DialAll, los cuales, a su vez calcularon su significancia ($p=0.05$).

El modelo lineal general es:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + m_i - m_j + r_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

μ : Media general

$g_i + g_j$: Aptitud Combinatoria General

s_{ij} : Aptitud Combinatoria Específica

$m_i - m_j$: Efectos maternos generales

r_{ij} : Interacción de efectos maternos

e_{ijk} : Error

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2.2 se presentan los resultados del análisis de varianza, donde se aprecia que hubo diferencias estadísticas significativas ($p<0.01$) entre los materiales (progenitores y cruza), lo que se puede deber a la diversidad genética de los progenitores dado que tienen muy diverso origen (Cuadro 1.1). De la misma forma, los cuadrados medios de ambos efectos, ACG y ACE, presentaron diferencias altamente significativas, lo que indica que tanto los efectos aditivos como los no aditivos están determinando la resistencia de las cruza, sin embargo, si

consideramos la magnitud de los cuadrados medios de los efectos (El-Badawy, 2013), podemos decir que los efectos aditivos y aditivos x aditivos son más importantes que los de dominancia en todas las variables, dado que los cuadrados medios de ACG de las diferentes variables son mayores a los de la ACE (Cuadro 2.2), En otros trabajos realizados en café resultados similares se han obtenido, Cilas *et al.* 2003, mencionan que la ACG para rasgos relacionados con rendimiento en *Coffea canephora* fue la que explicó la principal fuente de variación.

Cuadro 2.2. Cuadrados medios del análisis dialéctico de seis variedades de café en las variables de resistencia a *H. vastatrix*

F. V.	G. L.	PDI (días)	PDL (días)	LVD (n)	PDE (%)	TR (n)	ABCPE
Genotipos	35	1221.8**	1420.02 **	1.3**	0.12**	17.2**	2022202.4**
ACG	4	3222.6**	2510.22**	2.2**	0.18**	40.9**	3739422.1**
ACE	29	324.0**	1535.59**	1.4**	0.14**	18.3**	1940514.6**
Error	108						
Total	176						

*, ** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente. F. V.= Fuente de variación, G. L. Grados de libertad. PDI: Periodo de incubación, PDL: Periodo de latencia, LVD: Lesiones visibles por disco, PDE: Porcentaje de discos esporulantes, TR: Tipo de reacción, ABCPE: Área bajo la curva del progreso de la enfermedad

De acuerdo con los estimadores de los efectos de ACG para todas las variables (Cuadro 2.3), las variedades progenitoras presentaron diferencias estadísticas significativas de diferente magnitud y signo. Los valores de interés desde el punto de vista del mejorador que busca una mayor resistencia son, valores altos y negativos para las variables TR, LVD, PDE y ABCPE, en tanto que para PDI y PDL son los valores positivos los relacionados con la resistencia. De esta forma se puede apreciar que, la variedad Catucaí Rojo destaca al presentar valores negativos y significativos de su ACG en las variables PDE, TR y ABCPE, y positivos en PDI y PDL. Así mismo, en la Cuadro 2.4, los valores promedios de las distintas variables que tuvo esta variedad tienen el mismo sentido, es decir, presenta valores bajos de ABCPE, TR, PDE y altos para PDI y PDL. Las variedades Maracatú y Java, según

la Cuadro 2.4, fueron las más susceptibles al presentar los valores más altos en ABCPE, TR, PDE y Maracatú el más bajo en PDI y Java en PDL. En cuanto a la ACG de estas dos variedades también tuvieron el mismo sentido, es decir, Java presentó valores de ACG en las seis variables que contribuyeron hacia una mayor susceptibilidad, y Maracatú a excepción de PDL y LVD, en las demás variables también tuvieron valores en igual sentido (Tabla, 3).

No obstante que algunas de las diferentes variables empleadas en este trabajo han sido utilizadas en investigaciones relacionados con la resistencia parcial o cuantitativa (Bustamante *et al.*, 2001), hay variedades como Geisha que presentan, según Bettencourt (1983), los factores genéticos SH1 – SH5 que son genes de resistencia específica, de aquí que los resultados en los promedios de los valores de las variables evaluadas fueron igual a 0 (Cuadro 2.4). Sin embargo, en la combinación con las otras variedades los resultados variaron, y solo en algunas cruzas los valores fueron igual a 0, de aquí que, la tendencia en las cruzas fue la de incrementar la susceptibilidad, debido a que presentó los valores de ACG más altos y de signo negativo en las variables PDI y PDL (Cuadro 2.3). Finalmente, Garnica y Oro Azteca presentaron algunas diferencias en los valores de ACG en las variables PDI y PDL, sus valores fueron positivos y significativos, sin embargo, Garnica presentó mayor valor en PDL, en las otras variables, la que destaca es PDE, en la cual Garnica tuvo un valor negativo y Oro Azteca positivo, por lo que se puede decir que Garnica en general contribuye a una mayor resistencia en sus cruzas. En cuanto a la resistencia de estas dos variedades según las distintas variables (Cuadro 2.4), Garnica se destaca por haber presentado menor número de discos esporulando (PDE) y menor ABCPE, en tanto que Oro Azteca presentó un mayor valor en PDL. Esta ligera diferencia entre Garnica y Oro Azteca resultaron contrarios a los resultados de Couttolenc-Brenis, *et al.*, 2020, quienes mencionan que Oro Azteca fue más resistente que Garnica, no obstante, en este caso la evaluación se realizó en la etapa prehaustorial, y no realizaron evaluaciones de los diversos componentes de la resistencia, que según Parlevliet (1985) estos están determinados por distintos genes.

Cuadro 2.3. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de los progenitores para las variables de respuesta registradas.

Variedades	PDI (días)	PDL (días)	LVD (n)	PDE (%)	TR (n)	ABCPE
Java	-1.25**	-3.61**	0.10**	0.06**	0.58**	176.9**
Geisha	-3.91**	- 12.77**	-0.34**	-0.10**	-1.75**	-514.3**
Oro Azteca	0.58**	4.05**	0.01**	0.01**	0.16**	60.1**
Maracatú	-3.00**	2.05**	-0.03**	0.05**	0.33**	256.7**
Catucá rojo	5.91**	2.72**	0.31**	-0.01**	-0.16**	-99.2**
Garnica	1.66**	7.55**	-0.04**	-0.01**	0.83**	119.6**

*, ** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente. PDI: Periodo de incubación, PDL: Periodo de latencia, LVD: Lesiones visibles por disco, PDE: Porcentaje de discos esporulantes, TR: Tipo de reacción, ABCPE: Área bajo la curva del progreso de la enfermedad

Cuadro 2.4. Valores promedio para variables evaluadas en variedades de café

Variedades	PDI (días)	PDL (días)	LVD (n)	PDE (%)	TR (n)	ABCPE
Java	20 c	36 c	2.7 f	58 f	6 f	1998 f
Geisha	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Oro Azteca	17 d	42 b	1.2 c	21 d	3 d	1277 d
Maracatú	13 f	46 a	1.7 d	54 e	4 e	1764 e
Catucá rojo	30 b	42 b	2.3 e	13 c	1 b	267 c
Garnica	17 d	36 c	1 b	4 b	2 c	196 b

*, ** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente. PDI: Periodo de incubación, PDL: Periodo de latencia, LVD: Lesiones visibles por disco, PDE: Porcentaje de discos esporulantes, TR: Tipo de reacción, ABCPE: Área bajo la curva del progreso de la enfermedad. NP: No presentó lesiones

De acuerdo con los estimadores de ACE de las cruzas (Cuadro 2.5), hubo efectos tanto positivos como negativos para las variables evaluadas. Así mismo, no obstante que, la variedad Java resultó ser la más susceptible y Catucá Rojo la más resistente (Cuadro 2.5), su cruce Catucá rojo x Java sobresalió por su ACE al presentar valores altos y negativos en las variables ABCPE, TR, LVD y PDE, al mismo tiempo que presentó un valor alto y positivo en PDI, valores relacionados con

una mayor resistencia. Una cruce que llama la atención es Java x Maracatú, dado que son las dos variedades más susceptibles (Cuadro 2.4), sin embargo presentan valores sobresalientes en ABCPE, TR, PDE y LVD, todos ellos negativos. De la misma forma, las cruces Catucaí rojo x Oro Azteca, y Catucaí rojo x Garnica también sobresalieron al presentar valores de ABCPE, TR y LVD negativos, además, la primera con valores altos y positivos de PDL y la segunda en PDI. Como se ha observado en otros estudios sobre parámetros genéticos en maíz, cruces con una buena ACE pueden surgir de líneas que pueden o no presentar buena ACG (Cervantes-Ortiz *et al.*, 2015), en este caso, las variedades Java y Maracatú que resultaron susceptibles y con una baja ACG (Cuadros 2.3 y 2.4), presentaron al cruzarse entre ellas valores sobresalientes de ACE, tales como Java x Geisha, Java x Oro azteca y Java x Maracatú (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas de café para las variables evaluadas

Cruzas	PDI (días)	PDL (días)	LVD (n)	PDE (%)	TR (n)	ABCPE
Cruzas directas						
Jav x Gei	4**	3.61**	0.10**	-0.04**	-1.16**	-338.7**
Jav x Oro	-7**	-10.22**	0.56**	-0.12**	-1.58**	-547.2**
Jav x Mar	-5.41**	-8.22**	0.52**	-0.14**	-2.25**	-751.8**
Jav x Cat	1.66**	14.11**	0.14**	0.15**	2.25**	234.1**
Jav x Gar	0.41**	-11.72**	0.10**	-0.13**	0.75**	551.7**
Gei x Oro	-4.33**	21.94**	0.49**	0.04**	0.25**	205**
Gei x Mar	-0.75*	-20.05**	0.32**	-0.10**	-0.41**	-206.5**
Gei x Cat	-1.66**	-20.72**	0.18**	-0.03**	-0.41**	-95.6**
Gei x Gar	11.08**	20.44**	0.16**	0.06**	1.08**	199.4**
Oro x Mar	6.25**	5.11**	0.15**	-0.05**	0.16**	-265**
Oro x Cat	7.83**	-14.55**	0.31**	-0.13**	-0.83**	-262.3**
Oro x Gar	-2.41**	-5.38**	0.09**	0.23**	2.16**	505**
Mar x Cat	-3.08**	10.44**	0.07**	0.05**	2**	818**
Mar x Gar	0.16**	1.61**	0.03**	-0.01**	0**	-53**
Cat x Gar	-6.75**	4.94**	0.23**	-0.04**	-1.50**	-367.6**
Cruzas recíprocas						
Gei x Jav	-15**	-18**	0.75**	-0.06**	-0.50**	-116**
Oro x Jav	8.50**	21**	0.64**	0.10**	2**	482**
Oro x Gei	8.50**	-2**	0.25**	0.02**	0.50**	311**
Mar x Jav	6.5**	21**	0.63**	0.12**	1.50**	474**
Mar x Gei	-8.50**	0	0.38**	0.01**	-1**	-328**
Mar x Oro	5**	0	0.14**	-0.04**	-0.50**	-346**
Cat x Jav	10.50**	-2**	0.04**	-0.22**	-0.50**	-921**
Cat x Gei	-16.50**	0	0.25**	0	-0.50**	-83**

Cruzas	PDI (días)	PDL (días)	LVD (n)	PDE (%)	TR (n)	ABCPE
Cat x Oro	5**	23**	- 0.10**	0.02**	-1**	-406.7**
Cat x Mar	-1**	0	- 0.30**	-0.21**	0	231.2**
Gar x Jav	0	-23**	0.08**	-0.06**	-2**	-863.5**
Gar x Gei	0	0	0	-0.02**	0	-197**
Gar x Oro	-1**	5**	- 0.15**	-0.10**	1**	-281**
Gar x Mar	0	0	- 0.09**	-0.06**	0	-92.5**
Gar x Cat	0	0	- 0.13**	-0.04**	-1**	-362**

*, ** significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente. PDI: Periodo de incubación, PDL: Periodo de latencia, LVD: Lesiones visibles por disco, PDE: Porcentaje de discos esporulantes, TR: Tipo de reacción, ABCPE: Área bajo la curva del progreso de la enfermedad. Jav: Java, Gei: Geisha, Oro: Oro Azteca, Mar: Maracatú, Cat: Catucaí rojo, Gar: Garnica.

En cuanto a los posibles efectos maternos, en varias de las cruzas se presentaron resultados opuestos en los valores de ACE en las cruzas directas con respecto a las recíprocas, por ejemplo, las cruzas Java x Maracatú vs Maracatú x Java y Java x Oro azteca vs Oro azteca x Java presentaron valores opuestos y significativos en todas las variables, en tanto que las cruzas directas y recíprocas de Java con Catucaí rojo y Java con Garnica, presentaron resultados opuestos de ACE en la mayoría de las variables. Estos resultados se deben considerar en un programa de mejoramiento donde se incluyan estas variedades, para determinar si van a participar en alguna craza como hembras o como machos.

El mejoramiento genético para resistencia a roya del café se ha basado principalmente en el uso de la resistencia específica con los llamados genes S_H , (Alvarado y Moreno, 2005; Cavalho, 2011), genes que por sí solos no proporcionan una resistencia estable (Alvarado *et al.*, 2005). Por otro lado, la resistencia general ha sido abordada en el estudio y caracterización de materiales (Leguizamón-Caicedo *et al.*, 1998, Ocaña, 2017), pero en menor grado en el mejoramiento de dicha resistencia, por ello, en la búsqueda de alternativas al problema de la roya del café, sería importante implementar programas de mejoramiento al respecto, para lo cual, habrá que caracterizar los materiales potenciales con respecto a sus

parámetros genéticos para hacer una buena elección de los progenitores en dicho programa.

Según los resultados del presente trabajo, se puede decir que las variedades Geisha y Catucaí rojo fueron los más resistentes, la primera por presentar genes SH, y el otro por sus características de resistencia general. En cuanto a su ACG es Catucaí rojo la variedad que presentó en la mayoría de las variables mejor comportamiento para resistencia a roya, seguida de Oro Azteca y Garnica. En cuanto a la ACE, las cruzas Catucaí rojo x Java y Java x Maracatú fueron las cruzas que sobresalieron.

2.6 CONCLUSIONES

Las variedades Geisha y Catucaí rojo, fueron las variedades con mayor resistencia a la roya del café, y Garnica y Oro Azteca presentaron menor resistencia. La variedad Catucaí rojo presentó el mejor comportamiento con respecto a su ACG, y las cruzas Catucaí rojo x Java y Java x Maracatú fueron las que sobresalieron por su ACE.

2.7 LITERATURA CITADA

- Alvarado, G. A., Moreno, L. G. R. 2005. Cambio de la virulencia de *Hemileia vastatrix* en progenies de Caturra x Híbrido de Timor. *Cenicafé* 56(2):110-126
- Alvarado, G. A., Posada, H. E. S., Cortina, G. H. A. 2005 Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. *Cenicafé. Avances técnicos* 337.
- Alvarado, A. G. 2007 Evolución de razas *Hemileia vastatrix* en Colombia. *Cenicafé* 58(4): 340-359. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc058%2804%29340-359.pdf>
- Anacafé. Asociación Nacional del Café. 2019. Guía de variedades de Café. Asociación Nacional del Café. Guatemala. 48 pp.
- Bertrand, B., Guyot, B., Anthony, F., Lashermes, P. 2003. Impact of the *Coffea canephora* gene introgression on beverage quality of *C. Arabica*. *Theor. Appl. Genet.* 107, 387-394.
- Bertrand B., Aguilar G., Santacreo, R., Anzueto F. 1999. El mejoramiento genético en América Central. Desafíos de la caficultura en Centroamérica (Capítulo 12). IICA. PROMECAFE. CIRAD. IRD. CCCR. Francia. 407-453.

- Bettencourt, A. 1983. Variedades de café arábica resistentes a la roya: Perspectivas para su utilización en la caficultura del futuro. IICA. V Simposio Latinoamericano sobre Caficultura. Serie Publicaciones misceláneas. San Salvador, El Salvador.
- Bettencourt A. J., Rodrigues Jr. C. J. 1988. Principles and practice of coffee breeding for resistance to rust and other diseases. *Coffee Agronomy* 4:199-234.
- Bustamante, J., Sarmiento, A., Casanova, A., Contreras, E., Yáñez, C., Romero, C., Peña, I., Verenzuela, A., Morales, N., Garnica, J., Colmenares, N. 2001. Caracterización de resistencia incompleta a *Hemileia vastatrix* en genotipos de café (*Coffea arabica* L.) Variedad Bramón I. *Bioagro* 13(2). 65-70.
- Cabral P.G.C., Zambolim E. M., Zambolin L., Lelis T. P, Capucho A. S., Caixeta E. T. 2009. Identification of a new race of *Hemileia* in Brazil. *Australas Plant Dis Notes* 4:129-130.
- Campbell, C. L., Madden, L.V. 1990. Introduction to Plant Disease Epidemiology. John Wiley and Sons, New York, USA. 532 p.
- Canet, B. G., Soto V. C. 2016. La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe. IICA. San José Costa Rica.
- Carvalho, E. D. 2011. Melhoramiento genético do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) visando resistência durável á ferrugem e estabilidade fenotípica por meio de selecao recorrente. Universidad Federal de Lavras. Minas Gerais. 36 pp.
- Cervantes-Ortíz, F., Cárdenas-Tepoxteco, J. L., Raya-Pérez, J. C., Andrio-Enríquez, E., Rangel-Lucio, J. A., Guevara-Acevedo, L. P., Rodríguez-Herrera, S., Mendoza-Elos, M. 2015. Respuesta del *Silk Balling* a humedad edáfica y densidad de población en líneas de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(1). 231-241.
- Cilas, C., P. Bouharmont, Bar-He, A. 2003. Yield stability on *Coffea canephora* from diallel mating designs monitored for 14 years. *Heredity* 91:528-532.
- El-Badawy, M.E.M. 2013. Heterosis and combining ability in maize using diallel crossed among seven new inbred lines. *Asian J. Crop Sci*. 5:1-13.
- Escamilla, E. P. 2016. Las variedades de café en México ante el desafío de la roya. Una REDD para salvar la sombra de la Sierra Madre de Chiapas. Boletín Informativo. Programa Mexicano del Carbono. (4)
- Eskes, A. B. 1982 The use of leaf disk inoculations in assessing resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). *Neth. J. Pl. Path.* 88:127-141.

- Eskes, A. B., Toma-Braghini, M. 1982. Assessment methods for resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. and Br.) Plant Prot Bull 29:56-66
- Fernández D., Santos P., Agostini C., Bon M-C., Petitot A-S., Silva M. C., Guerra Guimaraes L., Ribeiro A., Argout X., Nicole M. 2004. Coffee (*Coffea arabica* L.) genes early expressed during infection by the rust fungus (*Hemileia vastatrix*). Molecular plant pathology 5(6):527-536.
- Griffing, B. 1956 Concepts of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Aust. J. Biol. Sci. 9:463-493.
- Husak, V. 2015 Copper and copper-containing pesticides: Metabolism, toxicity and oxidative stress. Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University 1(2):38-50.
- Lashermes Ph., Combes M. C., Robert J, Trouslot P., D'Hont A., Anthony F., Charrier A. 1999 Molecular characterization and origin of the *Coffea arabica* L. genome. Mol. Genet 261:266-359.
- Leguizamón, C. J. E., Orozco, G. L., Gómez, G. L. 1998. Periodos de incubación (PI) y de latencia (PL) de la roya del cafeto en la zona cafetera central de Colombia. Cenicafé, 49(4):325-339
- León, J. 1962. Especies y Cultivares (Variedades) de Café. (Con Especial Referencia a los Representados en la Colección del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A. en Turrialba, Costa Rica). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Zona Andina. Lima, Perú. 69 p.
- Mayne, W. W. 1932. Physiologic specialization of *Hemileia vastatrix* B. et Br. Nature 129:510.
- Moguel P., Toledo V. M. 1996 El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. Ciencias 43:40-51.
- Moguel P., Toledo V. M. 1999 Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. Conserv Biol 13(1):1-21
- Morris, D. 1880 Note on the structure and habit of *Hemileia vastatrix*, the coffee-leaf disease of Ceylon and Southern India. J. Linnean Soc. Bot. 17, 512-517.
- Muller, R. A. 1971. La rouille orangée du caféier (*Hemileia vastatrix*) sur le continent américain. Café Cacao Thé 28(1):17-42.
- Muller, R. A. 1984. Quelques réflexions à propos de la sélection de variétés de caféiers résistantes à la rouille orangée (*Hemileia vastatrix* B. et Br) Café Cacao Thé 28 (1):174-42.

- Noronha-Wagner H., Bettencourt A. J. 1967. Genetic study of resistance of *Coffea* sp. to leaf rust. I. Identification and behavior of four factors conditioning disease reaction in *Coffea arabica* to twelve physiologic races of *Hemileia vastatrix*. Can. J. Bot. 45:2021-2031.
- Ocaña, F. D. L. C. 2017. Estudio de la diversidad genética de la roya (*Hemileia vastatrix* Berk. y Br.) del café (*Coffea arabica*) en la Concordia, Chiapas. Universidad Autónoma de Chiapas. Villaflores, Chiapas, México. 69 pp.
- Ortega H. A., Ramírez V. B. 2013. Crisis de la cafecultura y migración en el contexto de pobreza y marginación. El caso de los productores indígenas de Huehuetla, Puebla. Ra Ximhai. 1(9):173-186.
- Parlevliet, J. E. 1985. Resistance of the nonrace-specific type. In: Roelfs A. P., and W. R. Bushnell (eds.) The Cereal Rusts Vol. II; Diseases, Distribution, Epidemiology and Control, Academic Press, Orlando, Florida, pp: 501-525.
- Rivadeneira P. J. I., Ramírez V. B. 2006. El comercio local del café a raíz de sus crisis en la Sierra Norte de Puebla. Revista Mexicana de Agronegocios 18(10).
- Rodrigues Jr. C. J., Bettencourt A. J., Rijo L. 1975. Races of the pathogen and resistance to coffee rust. Annu. Rev. Phytopathol. 13:49-70-
- Rodrigues, Jr. C. J. 1990. Coffee rusts: history, taxonomy, morphology, distribution and host resistance. Fitopatol. Bras. 15:5-9.
- Shigueoka L. H., Hiroshi S. G., Sera T., De Batista Fonseca I. C., Mariucci J. V., Andreazi E., Gimenez C. F., Goncalves G. C., Carducci, F. C. 2013. Selection of arabic coffee progenies with rust resistance. Crop Breeding and Applied Biotechnology 14:88-93.
- SIAP, Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera. 2017. Avance mensual de siembras y cosechas. Resumen nacional por cultivo. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSino_grama.do
- Talhinhas, P., Batista D., Diniz, I., Vieira A., Silva, D. N., Loureiro, A., Tavares, S., Pereira, A. P., Azinheira. G. H., Guerra-Guimarães, L., Várzea V., Silva, M. C. 2017. *The coffee leaf rust pathogen Hemileia vastatrix: one and a half centuries around the tropics*. Molecular Plant Pathology 18(8). 1039-1051.
- World Coffee Research. 2019. Las variedades del café arábica. Disponible en <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es>.

Zhang, Y., Kang, M.S., Lamkey, K.R. 2005. Diallel SAS05. A comprehensive program for Griffing's and Gardener-Eberhart. Analysis. Agronomy Journal 97: 1097-1106.

CONCLUSIONES GENERALES

La variedad Geisha es el progenitor que recombina mejor, ya que presentó significancia en ACG para la mayoría de las variables. La variedad Maracatú presentó significancia en la variable ADP y Garnica para NDC.

De las diferentes cruzas, la que destacó fue la crusa Geisha x Catucaí rojo dado que presenta significancia en las variables DDT, PDH y NDC y una heterosis significativa en ADP, DDT y NDC. De aquí que Geisha podría ser utilizada para mejoramiento genético a través de selección en la segregación de sus cruzas. En tanto que como híbridos, el que podría ser utilizado es Geisha x Catucaí rojo.

Mientras que, en el análisis de la resistencia a roya, las variedades Geisha y Catucaí rojo, fueron las variedades que mostraron mayor resistencia a la roya del café, y en contraste, Garnica y Oro Azteca presentaron menor resistencia. La variedad Catucaí rojo presentó el mejor comportamiento con respecto a su ACG, y las cruzas Catucaí rojo x Java y Java x Maracatú fueron las que sobresalieron por su ACE.