



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
INSTITUTO DE HORTICULTURA

**HERENCIA DE CARACTERÍSTICAS DE LA PROGENIE DE AGUACATE 'HASS'
X 'PIONERO'**

TESIS

Que como requisito parcial que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

NANCY ELENA GONZALEZ FLOREZ

Bajo la supervisión de:

Dr. Alejandro Facundo Barrientos Priego



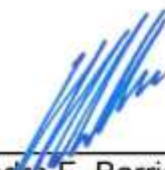
Chapingo, Estado de México, 01 de diciembre de 2020

HERENCIA DE CARACTERÍSTICAS DE LA PROGENIE DE AGUACATE 'HASS' X 'PIONERO'

Tesis realizada por Nancy Elena Gonzalez Florez, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



Dr. Alejandro F. Barrientos Priego

CO-DIRECTOR:



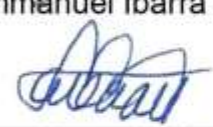
Dr. Eduardo Campos Rojas

ASESOR:



Dr. Emmanuel Ibarra Estrada

ASESOR:



Dr. Jaime Sahagún Castellanos

CONTENIDO

Resumen	xi
Abstract	xii
1 Introducción general	133
2 Revisión de literatura	155
2.1 Origen y distribución del aguacate.....	155
2.2 Diversidad genética	166
2.3 Mejoramiento genético en aguacate	177
2.4 Literatura citada	20
3 Caracterización morfológica de la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'.....	23
3.1 Resumen	23
3.2 Abstract.....	244
3.3 Introducción	255
3.4 Materiales y métodos.....	27
3.5 Resultados.....	30
3.5.1 Variables cualitativas.....	30
3.5.2 Variables cuantitativas	35
3.5.3 Análisis cladograma	39
3.6 Discusión	433
3.7 Conclusiones	444
3.8 Literatura citada	455
4 Tipos de herencia en la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'	477

4.1	Resumen	47
4.2	Abstract.....	488
4.3	Introducción	49
4.4	Materiales y métodos.....	51
4.5	Resultados.....	54
4.5.1	Variables cualitativas.....	54
4.5.2	Variables cuantitativas	56
4.6	Discusión	59
4.7	Conclusiones	61
4.8	Literatura citada	62
	Anexos.....	64

LISTA DE CUADROS

Caracterización morfológica de la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'

Cuadro 1. Variables cualitativas evaluadas según descriptor morfológico de aguacate	28
Cuadro 2. Variables cuantitativas evaluadas según descriptor morfológico de aguacate	29
Cuadro 3. Valores de componentes principales de características cualitativas de una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'	30
Cuadro 4. Componentes principales de características cualitativas de una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'	32
Cuadro 5. Grupos formados de acuerdo con el análisis de conglomerado con 105 plantas derivadas de la cruce de aguacate 'Hass' x 'Pionero' y sus progenitores de sus características cualitativas.....	33
Cuadro 6. Valores de componentes principales de características cuantitativas de una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'	355
Cuadro 7. Componentes principales de características cuantitativas de una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'	366
Cuadro 8. Grupos formados de acuerdo con el análisis de conglomerados con 105 plantas derivadas de la cruce de aguacate 'Hass' x 'Pionero' y sus progenitores	307

Tipos de herencia en la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'

Cuadro 1. Variables cuantitativas evaluadas según descriptor morfológico de aguacate	53
Cuadro 2. Variables cualitativas evaluadas según el descriptor morfológico de aguacate	52

Cuadro 3. Pruebas de ji-cuadrada para tipos de herencia de variables cualitativas de una progenie de aguacate	55
--	----

LISTA DE FIGURAS

Caracterización morfológica de la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'

- Figura 1.** Agrupación de aguacate 'Hass', 'Pionero' y su progenie con base a las características cualitativas. La línea negra punteada representa el corte del dendrograma en un coeficiente de 0.63 aproximadamente.....344
- Figura 2.** Agrupación de aguacate 'Hass', 'Pionero' y su progenie con base a las características cuantitativas. La línea negra punteada representa el corte del dendrograma en un coeficiente de 1.41.....388
- Figura 3.** Cladograma de *Persea nubigena*, 'Hass', 'Pionero' y la progenie de de 'Hass' x 'Pionero', las características están representadas por números (Cuadros 1 y 2).....38

Tipos de herencia en la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'

- Figura 1.** Distribución de progenie de aguacate conforme características cuantitativas donde los progenitores 'Hass' (H) y 'Pionero' (P) se encuentran en el mismo intervalo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.** Distribución de características de progenie de aguacate de acuerdo a cuantitativas donde el progenitor 'Pionero' (P) presenta valores más altos al progenitor 'Hass' (H) **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 3.** Distribución de progenie de aguacate conforme a características cuantitativas donde el progenitor 'Hass' (H) presenta valores más altos al progenitor 'Pionero' (P).59

DEDICATORIA

Quiero dedicarles este trabajo a mis padres quienes han estado presentes en cada uno de mis triunfos y fracasos apoyándome, a mis hermanos por su apoyo fraterno e incondicional en especial en memoria de mi hermano Jhon Jairo; a mis sobrinos y a quienes me acompañaron en este proceso con todo su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y al Instituto de Horticultura por abrir sus puertas y brindarme herramientas académicas fundamentales para mi formación para enfrentar los desafíos que se avecinan.

A mi director Dr. Alejandro F. Barrientos Priego por su apoyo y gratas enseñanzas, por contribuir a mi proceso formativo.

A mi Co-director Dr. Eduardo Campos Rojas quien me acogió y me brindo todo su apoyo en este proceso.

A mi asesor Dr. Emmanuel Ibarra por la paciencia y enseñanzas que me brindo para llevar a cabo la investigación.

A mi asesor Dr. Jaime Sahagún Castellanos por su acompañamiento y enseñanzas.

A la Fundación Salvador Sánchez-Colín, S.C. especialmente a la Dra. María de la Cruz Espíndola Barquera por proporcionarme el material vegetal para la investigación.

A mis compañeros de la Maestría por apoyarme en todo momento

DATOS BIOGRÁFICOS

La autora de la presente tesis, Nancy Elena Gonzalez Florez, nació el 03 de mayo de 1992 en el municipio de Pensilvania, Departamento de Caldas, Colombia. Realizó sus estudios profesionales en la Universidad de Caldas, durante los años 2010-2017 obteniendo los títulos de Ingeniera Agrónoma y Administradora de Empresas Agropecuarias, con el trabajo de tesis titulado “Evaluación y validación de herramientas para valorar el porcentaje de cobertura y apertura del dosel en el componente arbóreo en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.)”.

En lo referente a su vida profesional se ha desempeñado como Ingeniera Agrónoma en la hacienda Moravo del 01 de agosto de 2017 al 01 de marzo de 2018 y en la Federación Nacional de Comerciantes, FENALCO Caldas del 01 de marzo del 2018 al 30 de junio del mismo año, también se ha desempeñado como Administradora en la hacienda Taparcal S.A.S del 03 de mayo al 14 de septiembre de 2018. Inició estudios de Maestría en ciencias en Horticultura en enero de 2019 en la Universidad Autónoma Chapingo hasta la fecha.

RESUMEN GENERAL

Herencia de características de la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'
Gonzalez-Florez Nancy Elena¹, Barrientos-Priego Alejandro Facundo²

En aguacate existen pocos estudios relacionados con caracterización morfológica y tipos de herencia los cuales son útiles para definir las estrategias para el mejoramiento genético de dicha especie. La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero' en cuanto a características morfológicas y sus tipos de herencia simple. Para esto se utilizaron métodos de análisis multivariados y ji-cuadrada (χ^2). Se caracterizó árbol, brote, hoja, inflorescencias, flor, fruto y sus partes, mediante 51 características cualitativas y 16 cuantitativas. Los resultados mostraron que se requieren 23 componentes principales (CP's) en las características cualitativas para explicar alrededor del 80% de la variación total y en características cuantitativas se requieren de 8 CP's. En las pruebas de ji-cuadrada para herencia mendeliana en características cualitativas se encontró que 12 características no se ajustan a herencia mendeliana y el tipo de herencia que predominó fue epistasis dominante doble. Para las características cuantitativas se realizaron gráficos de frecuencia y se encontró la existencia de herencia transgresiva.

Palabras claves: *Persea americana* Mill., características cualitativas, características cuantitativas, tipos de herencia, herencia transgresiva.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo

¹ Autor

² Director de tesis

ABSTRACT

Inheritance of characteristics of the 'Hass' x 'Pionero' avocado progenie

Gonzalez-Florez Nancy Elena¹, Barrientos-Priego Alejandro Facundo²

There are few studies related to morphological characterization and types of inheritance in avocado, which are useful to define the strategies for the genetic improvement of the species. The aim of the present investigation was to characterize a 'Hass' x 'Pionero' avocado progeny in terms of morphological characteristics and their types of simple inheritance. For this, multivariate analysis and chi-square (χ^2) methods were used. Tree, bud, leaf, inflorescences, flower, fruit and their parts were characterized by 51 qualitative and 16 quantitative characteristics. The results showed that 23 principal components (PC's) in the qualitative characteristics are required to explain about 80 % of the total variation and in the quantitative characteristics 8 PC's are required. In the chi-square tests for Mendelian inheritance in qualitative characteristics, it was found that 12 characteristics do not conform Mendelian inheritance and the predominant type of inheritance was double dominant epistasis. For the quantitative characteristics, frequency graphs were made and the existence of transgressive inheritance was found.

Keywords: *Persea americana* Mill., qualitative characteristics, quantitative characteristics, types of inheritance, transgressive inheritance.

Thesis. Universidad Autónoma Chapingo

¹ Author

² Advisor

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El aguacate (*Persea americana* Mill.) tiene como centro de origen a América (Avilán, Leal, & Bautista, 1992). Múltiples hibridaciones ocurridas en diferentes ambientes ecológicos de México y Centroamérica dieron origen al aguacate que actualmente se cultiva desde tiempos precolombinos (Cañas, Galindo, Arango, & Saldamando, 2015). Además, estos procesos han generado una gran diversidad genética (Sánchez-Pérez, 1999).

Las colecciones de *Persea* así como su diversidad son valiosas para romper la barrera de incompatibilidad entre especies, también pueden resultar importantes para controlar problemas patológicos u hortícolas en el aguacate. Estos recursos ya han sido empleados para varios estudios de genética molecular, taxonomía, orígenes y filogenia de miembros del género *Persea* (Zentmyer & Schleber, 1992), o simplemente para satisfacer los gustos del ser humano.

Dentro de los programas de mejoramiento genético se tienen ideas acerca de las características deseables a conjuntar mediante la genotecnia (Campos, Terrazas, & López-Mata, 2007). La Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S. C., ha tenido como objetivo el generar cultivares de porte bajo, precoces, altamente productivos y de frutos con características comerciales que puedan emplearse como alternativa a 'Hass' (Campos & Muñoz, 1997).

La obtención de estos nuevos materiales puede darse mediante la hibridación controlada o polinización manual, con lo que se pretende una mayor eficiencia en la recombinación de características deseables, estas polinizaciones controladas se han realizado empleando como progenitores femeninos a los

cultivares 'Hass', 'Pinkerton', 'Whitsell' y como progenitores masculinos a 'Rincoatl', 'Pionero', 'Encinos', y 'Fundación II' (Rogel-Castellanos, 1999).

En los programas de mejoramiento genético es de gran ayuda identificar los tipos de herencia presente en la progenie. Los estudios de la herencia en aguacate han sido pocos y limitados a unas cuantas características, de los primeros fue el realizado en México por (Barrientos-Perez & Sánchez-Colín, 1982), posteriormente en Israel por (Lavi, Lahav, Degani, Gazit, & Hillel, 1993). Otras características heredadas de los progenitores es la fenología y producción, con relación a lo anterior el objetivo del presente estudio fue caracterizar la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero' en cuanto a características morfológicas y sus tipos de herencia simple.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen y distribución del aguacate

El origen de casi todos los miembros reconocidos del subgénero *Persea* acaecen primariamente en la misma región geográfica desde la parte central de México, a través de Guatemala hasta gran parte de Centroamérica, como evidencia están los hallazgos de aguacates primitivos en la Sierra Madre Oriental en el estado de Nuevo León, México, hasta Costa Rica en Centroamérica (Sánchez-Pérez, 1999). La evidencia más antigua del consumo de esta fruta data de 10,000 años aC. y fue encontrada en una cueva localizada en Coxcatlán, Puebla (Sánchez, Mijares, López-López, & Barrientos-Priego, 1998).

Investigaciones han indicado que México y el norte de América Central (Mesoamérica) han sido los focos de domesticación de diversas plantas cultivadas, convirtiéndose en el origen de la diversidad genética más importante de América (Vavilov, 1931; Hernández & León, 1992; Avalos, Quijada, & Beltrán, 2006). Para el aguacate no se sabe cuándo se inició una selección consciente en busca de mejor calidad de fruto para su propagación (Sánchez-Pérez, 1999).

En la actualidad la producción proviene de fuentes distintas de árboles nativos o criollos y cultivares selectos reproducidos sexual o asexualmente, en los cuales el sabor y los valores nutraceuticos varían según el tipo ecológico (Cañas, Galindo, Arango, & Saldamando, 2015). Su distribución natural va desde México hasta Perú, pasando por Centro América, Colombia, Venezuela y Ecuador (Barrientos-Priego & López-López, 2000) desde el nivel del mar, hasta los 2200 metros sobre el nivel del mar (Montes-Hernández, de la Torre-Vizcanio, Heredia-García, Hernández-Martínez, & Camarena-Hernández, 2017).

Actualmente el aguacate se produce en los países subtropicales y tropicales de los cinco continentes (FAO, 2012), más de la mitad de toda la producción de aguacates procede de América Central y el Caribe, en gran parte debido a la sólida posición de México y de República Dominicana (FAO, 2020).

2.2 Diversidad genética

El aguacate, como la mayoría de los miembros de la familia Lauraceae, es una especie muy variable y hay variaciones locales que han dado lugar a diferentes razas o variedades ecológicas (Galindo-Tovar, Ogata-Aguilar, & Arzate-Fernández, 2008). El aguacate pertenece al género *Persea* descrito por Miller (1754), el cual a su vez se divide en dos subgéneros: *Eriodaphne* y *Persea* (Kopp, 1966; Barrientos-Priego & López-López, 2000). El primero con numerosas especies de frutos pequeños y sin importancia comercial; en el segundo se encuentran: *Persea americana*, *Persea nubigena* (aguacate de monte), *Persea steyermarkii* (aguacate de montaña), *Persea schiedeana* (chinini, chinene, chenene, yas, hib), *Persea floccosa* (aguacate cimarrón) y *Persea parvifolia* (aguacatillo de Veracruz, México) (Barrientos-Priego & López-López, 2000).

La especie *Persea americana* posee ocho subespecies de las cuales tres (var. *drymifolia*, var. *Guatemalensis* y var. *americana*) corresponden al aguacate cultivado y comúnmente se conocen como razas mexicana, guatemalteca y antillana, respectivamente (Robayo & Cuca, 2016), el término raza es utilizado porque presentan características específicas que se propagan y fijan espontáneamente por semilla (Ariza et al., 2011).

Decenas de miles de árboles silvestres provenientes de semillas existen actualmente bajo condiciones ecológicas muy variadas; la selección natural principalmente y la acción (selección) del hombre durante miles de años, ha producido tipos adaptados a diversas regiones, en el área de origen del aguacate

con sus tres razas, se ha dado a través de miles de años un proceso que ha generado una gran diversidad genética (Avalos, Quijada, & Beltrán, 2006).

Las tres razas poseen requerimientos climáticos y zonas de origen bien definidos, pero se hibridan con facilidad, por lo que tras su cruzamiento se obtienen árboles con mayor capacidad de adaptación a diferentes climas y mejores características agronómicas (Robayo & Cuca, 2016). Se considera que los genotipos mexicanos están adaptados a zonas subtropicales, mientras que los antillanos crecen en zonas tropicales (Robayo & Cuca, 2016). La combinación raza guatemalteca – raza mexicana lo constituyen variedades con buena adaptación a clima templado a subtropical, mientras que la combinación raza antillana – raza guatemalteca da variedades con adaptación principalmente tropical (Barrientos-Priego, 2017).

Una amplia diversidad de germoplasma permite el avance del conocimiento botánico y agronómico, así como el desarrollo de nuevos cultivares (Avalos, Quijada & Beltrán, 2006). Por otro lado, las colecciones de germoplasma de aguacate en todo el mundo mantienen la diversidad genética viva de esta especie y desarrollan recursos para la investigación genética y reproductiva. Estas colecciones representan la diversidad de aguacate tanto entre los cultivos comerciales como en todo el género *Persea* (Kuhn et al., 2019).

2.3 Mejoramiento genético en aguacate

El mejoramiento genético en aguacate presenta una problemática muy peculiar, por una parte, las características propias de la especie como son la condición altamente heterocigota y un periodo de juvenilidad amplio, las cuales limitan obtener resultados satisfactorios en pocos años (Rogel-Castellanos, 1999). Dado que el aguacate es altamente heterocigótico el comportamiento de las progenies de un solo árbol resulta impredecible y extremadamente variables (Pérez, Ávila & Coto, 2015). Por consiguiente, los métodos de hibridación convencionales son difíciles, por lo que han sido limitados los estudios genéticos documentados.

Adicionalmente, las grandes extensiones necesarias para el crecimiento de los árboles encarecen los programas de mejoramiento (Pérez, Ávila & Coto, 2015).

En los recursos genéticos de *Persea* quizás se pudiera encontrar soluciones a varios problemas prácticos y restricciones en la producción de aguacate, tales como enfermedades, salinidad, producción, calidad, precocidad a madurez, entre otros (Avalos, Quijada & Beltrán, 2006). La polinización abierta y la hibridación seguida de la selección de materiales promisorios en la progenie ha sido el único método disponible para los mejoradores de aguacate, Adicionalmente este cultivo presenta como ventaja la habilidad de propagar a los genotipos deseables mediante injerto (Pérez, Ávila & Coto, 2015).

La multiplicación utilizando métodos vegetativos garantiza para las nuevas plantas la expresión de características deseables de la planta madre, seleccionada por el aspecto nutricional, la tolerancia a enfermedades, menor porte, adaptación a condiciones edafoclimáticas específicas y por presentar buenas características de producción y calidad de fruto, además de permitir la producción de plántulas en larga escala a partir de la selección de determinado material genético (Freire, do Amaral, Rodrigues, Cantuarias-Avilés & Fassio, 2018).

Swingle & Robinson (1924), dieron a conocer las primeras técnicas desarrolladas para la propagación vegetativa de plantas de aguacate, con la implementación de la propagación por estacas buscando la multiplicación de porta injertos con características superiores. Posteriormente, Eggers & Halma (1936) realizaron ensayos con esquejes de tallos.

En México, solamente dos instituciones están realizando mejoramiento genético: el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y la Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C., en colaboración con la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) (Barrientos-Priego, 2010). La Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C., mediante mejoramiento genético ha tenido como objetivo el generar cultivares de porte

bajo, precoces, altamente productivos y de frutos con características comerciales que puedan emplearse como alternativa a 'Hass' (Campos & Muñoz, 1997). Los programas de mejoramiento genético orientados a este frutal pretenden generar nuevas variedades cultivadas de menor tamaño, con características sobresalientes en cuanto a rendimiento preservando las características organolépticas del fruto.

Literatura citada

- Ariza Ortega, J. A., López Valdez, F., Coyotl Huerta, J., Ramos Cassellis, M. E., Díaz Reyes, J., & Martínez Zavala, A. (2011). Efecto de diferentes métodos de extracción sobre el perfil de ácidos grasos en el aceite de aguacate (*Persea americana* Mill. var. Hass). *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos* 2(2), 263-276.
- Avalos Erroa, C. O., Quijada Rodríguez, J. L., & Beltrán Aranzamendi, M. (2006). "Caracterización de los aguacates criollos (*Persea americana* Miller) del campus de la Universidad de el Salvador y la Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agronómicas". Tesis Doctoral, Universidad de el Salvador, San Salvador.
- Avilán, L., Leal, F., & Bautista, D. (1992). Lauraceae. Manual de Fruticultura, Principios y Manejo de la Producción (2ª ed., pp 666-776.). Chacaito (Venezuela). Ed. América.,
- Barrientos Priego, A. F. (2010). El aguacate. *Biodiversitas*, 88, 1-17.
- Barrientos-Perez, F., & Sánchez-Colin, S. (1982). Height variability obtained from a new dwarf avocado tree population. *California Avocado Society Yearbook*, 66, 155-160.
- Barrientos-Priego, A. F. (2017). Presente y futuro de los portainjertos y variedades de Aguacate en el mundo y México. In: S. Salazar-García y A. F. Barrientos-Priego (eds.). *Memorias del V Congreso Latinoamericano del Aguacate* (pp. 2-15). Ciudad Guzmán: Asociación de Productores y Exportadores de Jalisco, A.C. (APEAJAL).
- Barrientos-Priego, A. F., & López-López, L. (2000). Historia y genética del aguacate. T. D, & A. Mora (Ed.). *El aguacate y su manejo integrado* (pp. 19-31). Distrito Federal: Ediciones Mundi Prensa.
- Campos Rojas, E., & Muñoz Pérez, R. B. (1997). Mejoramiento genético del aguacate por selección e hibridación. *Memoria de la Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX*, S.C. (pp., 148-149). Coatepec Harinas: Fundación Salvador Sánchez-Colín-CICTAMEX.
- Campos Rojas, E., Terrazas, T., & López-Mata, L. (2007). *Persea* (avocados) phylogenetic analysis based on morphological characters: hypothesis of species relationships. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54 , 249-258.
- Cañas, G. P., Galindo, L. F., Arango, R., & Saldamando, C. I. (2015). Diversidad genética de cultivares de aguacate (*Persea americana*) en Antioquia, Colombia. *Agronomía Mesoamericana* 26(1), 129-143.
- Eggers, E. R. & Halma, F. F. (1936) Propagating the Avocado by Means of Stem Cuttings. *Yearbook* 21, 63-66. University of California, Los Angeles.

- FAO. (2012). *Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT*. Obtenido de <http://faostat.fao.org/c>
- FAO. (2020). Las principales frutas tropicales Análisis del mercado 2018. Roma.
- Freire Alberti, M., do Amaral Brogio, B., Rodrigues da Silva, S., Cantuarias-Avilés, T., & Fassio, C. (2018). Avances en la propagación del aguacate. *Revista Brasileira de Fruticultura* 40(6), 1-18.
- Galindo-Tovar, M. E., Ogata-Aguilar, N., & Arzate-Fernández, A. M. (2008). Some aspects of avocado (*Persea americana* Mill.) diversity and domestication in Mesoamerica. *Genetic Resources and Crop Evolution* 55, 441-450.
- Kuhn, D. N., Groh, A., Rahaman, J., Freeman, B., Arpaia, M. L., Van den Berg, N., Chambers, A. H. (2019). Creation of an avocado unambiguous genotype SNP database for germplasm curation and as an aid to breeders. *Tree Genetics & Genomes* 15(5), 71.
- Lavi, U., Lahav, E., Degani, C., Gazit, S., & Hillel, J. (1993). Genetic variance components and heritabilities of several avocado traits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(3), 400-404.
- Montes-Hernández, S., de la Torre-Vizcanio, J. D., Heredia-García, E., Hernández-Martínez, M., & Camarena-Hernández, M. G. (2017). Caracterización morfológica de germoplasma de aguacate Mexicano (*Persea americana* var: *drymifolia*, Lauraceae). *Interciencia* 42(3), 175-180.
- Pérez Álvarez, S., Ávila Quezada, G., & Coto Arbelo, O. (2015). El aguacatero (*Persea americana* Mill). *Cultivos Tropicales* 36(2), 111-123.
- Robayo Medina, A. T., & Cuca Suárez, L. E. (2016). Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de aguacate, *Persea americana* Mill. (Lauraceae) e implementación de un método de extracción del aceite de aguacate como alternativa de industrialización. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Rogel-Castellanos, I. (1999). Mejoramiento genético del aguacate en la Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX S.C. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 5, 43-48.
- Swingle, W.; Robinson, T. (1924). The solar propagating frame for rooting citrus and other subtropical plants. Washington: United State Departament of Agriculture, (Circular, 310) p.1-13.
- Sánchez Colín, S., Mijares Oviedo, P., López-López, L., & Barrientos-Priego, A. F. (1998). Historia del Aguacate en Mexico. Memoria Fundación Salvador. Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C. (pp.171-187). Coatepec Harinas: Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C.

Sánchez-Pérez, J. d. (1999). Recursos genéticos de aguacate (*Persea americana* Mill.) y especies afines en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 5, 7-18.

Zentmyer, G. A., & Schieber, E. (1992). *Persea* and *Phytophthora* in Latin America. *Proceedings of Second World Avocado Congress I*, 61-66.

3 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA PROGENIE DE AGUACATE 'HASS' X 'PIONERO'

3.1 Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero' con base en 51 características cualitativas y 16 cuantitativas. Los análisis de componentes principales permitieron establecer diez grupos principales para características cualitativas y ocho para características cuantitativas. En los dendrogramas de similitud se formaron 10 grupos tanto para características cualitativas como cuantitativas con distancias euclidianas de 0.63 y 1.41 respectivamente. El primer grupo se conformó por 'Hass', 'Pionero' y 81 individuos de la progenie para variables cualitativas. Para variables cuantitativas en el primer grupo se formó por 'Hass' y 19 individuos de la progenie y en el segundo 'Pionero' y 37 descendientes. Para el cladograma se tuvieron en cuenta las 67 características y se empleó *Persea nubigena* como taxón externo para enraizarlo encontrándose 25 grupos, los progenitores y HxP 74 conforman un grupo compartiendo las características de número de venas secundarias y el tipo de floración.

Palabras claves: Análisis de agrupamiento, caracterización varietal, componentes principales.

3.2 Abstract

The present study aimed to characterize the avocado 'Hass' x 'Pionero' progeny through 51 qualitative and 16 quantitative characteristics. The principal component analysis made it possible to establish 10 main groups for qualitative characteristics and 8 for quantitative characteristics, in the dendrogram, 10 groups were formed for qualitative and quantitative characteristics, with Euclidean distances of 0.63 and 1.41 respectively. The first group was formed by 'Hass', 'Pionero' and 81 individuals of the progeny for qualitative variables. For the quantitative variables the first group was formed by 'Hass' and 19 individuals of the progeny; and the second, 'Pionero' and 37 descendants. For the cladogram the 67 characteristics were taken into account, and *Persea nubigena* was used as an external taxon to root it, finding 25 groups, the progenitors and HxP74 made a group sharing the characteristics of number of external veins and the type of flowering.

Keywords: Cluster analysis, varietal characterization, principal components.

3.3 Introducción

El aguacate es uno de los árboles frutales de mayor importancia económica para México y Centroamérica. Es una especie subtropical que se ha adaptado a diferentes condiciones climáticas (Guzmán et al., 2017). La mayor producción de aguacate se concentra en algunos países del continente americano, México es el principal productor y consumidor a nivel mundial, y como parte del centro de origen y dispersión del aguacate, cuenta con gran diversidad de tipos “criollos”, la cual se ha diversificado a través del tiempo (Campos, Hernández, Espíndola, Reyes & Barrientos, 2011). Además, cada una de las razas mantiene características específicas en su morfología, fenología, ecología y adaptación, y forma parte de la diversidad del género (Barrientos, 2010).

Debido a que el aguacate presenta una biología floral que propicia su polinización cruzada, esta diversidad se manifiesta en diversas características, tales como forma, color, tamaño y sabor de las hojas y frutos, y en su fenología (Rhodes et al., 1971; Acosta et al., 2013; Montes-Hernández, de la Torre-Vizcanio, Heredia-García, Hernández-Martínez & Camarena-Hernández, 2017). Los frutos muestran diferentes características fenotípicas representadas por la forma, tamaño, color del epicarpio, así como distintos sabores y texturas del mesocarpio (Robayo & Cuca, 2016). La caracterización morfológica es el primer paso en el mejoramiento de los cultivos y programas de conservación; las características morfológicas se han venido utilizando para estudiar la diversidad genética, identificar plantas cultivadas y conservar los recursos genéticos (Onamu, Legaria, Sahagún, Rodríguez & Péres, 2012).

La caracterización y evaluación de los recursos fitogenéticos permiten determinar su utilidad potencial (Campos, Hernández, Espíndola, Reyes & Barrientos, 2011). Siendo de gran importancia en programas de mejoramiento genético debido a que la progenie presenta gran diversidad genética. Por ese motivo es necesario caracterizar esos recursos genéticos para estimar la variabilidad existente entre individuos que conforman una población (López et al., 2012).

Peñaloza, Valls, Rosso & Condón, (2010) destacaron que las actividades de caracterización han avanzado en algunas líneas y para algunas colecciones más que en otras. La caracterización es la descripción de una variación que existe en una colección de germoplasma, en términos de características morfológicas y fenológicas de alta heredabilidad, es decir características cuya expresión es poco influenciada por el ambiente (Avalos, Quijada & Beltrán, 2006). Los descriptores morfológicos permiten una discriminación fácil y rápida, que generalmente corresponden a características altamente heredables, pueden observarse a simple vista; además, pueden incluir un número limitado de estas características deseables para el investigador según la accesión (López-Santiago et al., 2008).

Existen distintas categorías de datos según la expresión del descriptor; estas pueden ser características cualitativas o cuantitativas (Hernández, 2013), que permiten determinar el grado de similitud o variabilidad entre las variedades de una misma especie, por medio de su apariencia morfológica y su genética (Hernández, Navarrete, & Luna, 2014). Entre las características cualitativas se mencionaron color de frutos, flor, corteza, sabor de la pulpa y características cuantitativas como: peso, altura, diámetro, entre otros (Avalos, Quijada & Beltrán, 2006).

Al realizar la caracterización se deben utilizar variables morfológicas confiables que discriminen, permitiendo así la diferenciación entre grupos. Estas variables están ya establecidas en las llamadas “guías técnicas para la descripción varietal” expedidas por la International Union for the Protection of New Varieties of Plants (UPOV) (Hernández, 2013). Los descriptores para la caracterización deben reunir las siguientes características: 1) ser fácilmente observables, 2) tener una alta acción discriminante y 3) baja influencia ambiental (lo que permite en algunos casos registrar la información en los sitios de colecta) (Peñaloza, Valls, Rosso, & Condón, 2010). Por lo anterior el objetivo de esta investigación fue caracterizar morfológicamente la progenie de aguacate ‘Hass’ x ‘Pionero’ con el fin de determinar la amplitud de su variabilidad y su similitud.

3.4 Materiales y métodos

Esta investigación se realizó en el campo experimental “La Labor” de la Fundación Salvador Sánchez-Colín, S.C., ubicada en Temascaltepec, Estado de México, México y en el laboratorio de Fisiología de Frutales del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Se caracterizaron 105 árboles derivados de la cruce de aguacates ‘Hass’ x ‘Pionero’ de 18 años de edad y sus progenitores. En el año de 2000 se realizaron diferentes cruces controladas de ‘Hass’ x ‘Pionero’ (efectuadas por Rubén Damián Elías Román en la Fundación Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C.), las cuales fueron cosechadas y sembradas (las semillas). En 2002 se establecieron las plantas en un huerto vivero (1 m entre plantas y 2 m entre hileras), en San Andrés de los Gama, Temascaltepec, México, se realizaron podas y conducción a un solo eje para acelerar su salida del periodo juvenil (Barrientos, Barrientos, Sánchez, & Aguilar 1991). Algunos de los árboles iniciaron a fructificar a partir de 2010 y continuaron otros árboles su fructificación en años posteriores (Espíndola-Barquera, 2019).

A los materiales se les realizó la caracterización morfológica de acuerdo al manual gráfico para la descripción varietal de aguacate (Barrientos, Reyes, & Aguilar, 2010), que consiste en: 19 características de árbol, brote y hoja; 9 de inflorescencias, flor y floración; y 39 de fruto y sus partes, que a su vez se dividen en 51 características cualitativas y 16 cuantitativas. Algunas características fueron tomadas directamente en campo mediante observaciones como el porte del árbol, color de las lenticelas en brote joven entre otras (Cuadro 1), para algunas variables cuantitativas de fruto se cosecharon 10 frutos por árbol (repeticiones) se registraron variables como longitud, diámetro, grosor de la pulpa entre otras en el laboratorio (Cuadro 2).

Cuadro 1. Variables cualitativas evaluadas según el descriptor morfológico de aguacate.

Característica		Abreviatura	#
Árbol	Porte	AP	1
Brote joven	Color	BJC	2
	Color de las lenticelas	BCL	3
Hoja	Color de pubescencia del peciolo	HPP	4
	Porte en relación con el borde	HRB	6
Limbo	Forma	LF	10
	Forma del ápice	LFA	11
	Torción en toda la longitud	LTL	12
	Torción del ápice	LTA	13
	Ondulación del borde	LOB	14
	Relieve de las venas en la parte superior	LRNS	15
	Densidad de la pubescencia en la parte inferior	LDP	17
	Aroma de anís	LAA	18
Inflorescencia	Color de las lenticelas	ICL	21
	Tipo de floración	ITF	22
Flor	Nectario	FN	23
	Estilo	FE	24
	Polen	FP	25
Sépalo	Pubescencia de la parte interna	SPI	26
	Densidad de la pubescencia de la parte interna	SDP	27
Fruto maduro	Forma del extremo peduncular	FFEP	31
	Presencia de cuello	FPC	32
	Depresión en el extremo peduncular	FDEP	33
	Posición del pedicelo	FPP	35
	Forma en la parte estilar	FFPE	36
	Conspicuidad de lenticelas	FCLE	37
	Color de las lenticelas	FCL	39
	Brillantez	FMB	40
	Superficie	FMS	41
Fruto	Persistencia del perianto	FMPP	42
Pedicelo	Grosor en comparación con el pedúnculo	PGP	43
	Forma	PF	45
	Cabeza de clavo	PCC	46
	Color	PC	47
	Superficie	PS	48
	Color	FMC	49
Fruto madurado	Consistencia de la cáscara	FCC	51
	Adherencia de la cáscara a la pulpa	FACP	52
	Color principal de la pulpa	FCPP	53
	Color de la capa junto a la cáscara	FCJC	54
	Conspicuidad de fibras en la pulpa	FCFP	56
	Consistencia de la pulpa	FCPU	57
	Aroma a anís de la pulpa	FAAP	58
Semilla	Forma en sección longitudinal (vista lateral)	SFL	60
	Forma en sección transversal	SFT	61
Cubierta seminal	Adherencia a pulpa	CSAP	62
	Adherencia al cotiledón	CSAC	63
	Superficie	CSS	64
Cotiledón	Superficie	CS	65
Época	Inicio de floración	EIF	66
	Madurez del fruto para cosecha	EMFC	67

Cuadro 2. Variables cuantitativas evaluadas según descriptor morfológico de aguacate.

	Variables	Abreviaturas	Unidad	#
Brote	Longitud de entrenudos	BL	cm	5
	Longitud	LL	cm	7
Limbo	Anchura	LA	cm	8
	Relación longitud anchura	LRA	cm	9
	Numero de venas secundarias	LNVS	#	16
Pecíolo	Longitud	PL	cm	19
Inflorescencia	Longitud del eje	ILE	cm	20
	Longitud	FL	cm	28
	Diámetro	FD	cm	29
Fruto maduro	Relación longitud/ diámetro	FRLD	cm	30
	Diámetro de la inserción del pedicelo	FDIP	cm	34
	Tamaño de las lenticelas	FTL	mm	38
Pedicelo	Longitud	PDL	cm	44
	Grosor de la cáscara	FGC	mm	50
Fruto madurado	Anchura de la capa junto a la cáscara	FAJC	mm	55
	Relación longitud del fruto/longitud de semilla	FRFS	cm	59

Los datos resultantes de las evaluaciones se analizaron mediante el programa NTSYS para análisis de componentes principales y de agrupamiento utilizando UPGMA, donde para cada tipo de variable (cuantitativa y cualitativa) fue analizada por separado. Mediante un análisis cladístico comparando las 107 accesiones caracterizadas, con la especie *Persea nubigena* como taxón externo de analizaron todas las variables. En dicho análisis se empleó el algoritmo de parsimonia del programa de Nona (Goloboff, 1993) en conjunto con el programa WinClada (Nixon, 2002). El resultado final presentado aquí se obtuvo con las siguientes características: La búsqueda heurística se dirigió con 1000 repeticiones “stepwise” y TBR ramas combinando con MULTIPARS activado. Todas las características fueron valoradas igualmente. Se calcularon 1000 repeticiones de la búsqueda (mult*1000), con TBR combinado y 10000 como número máximo de juego de árboles.

3.5 Resultados

3.5.1 Variables cualitativas

3.5.1.1 Análisis de componentes principales

El primer componente principal (CP1) explicó el 8 % de la variación total de los 107 cultivares y las 47 características, mientras que el CP2 explicó 5.8 %. Los CP3, CP4, CP5, CP6, CP7, CP8, CP9 y CP10 explicaron 5.4, 5, 4.6, 4.4, 4, 3.7, 3.7 y 3.6 %, respectivamente (Cuadro 3). Cada uno de estos diez CP's explicaron el 48.9 % de la variación total. Se requiere de 23 componentes principales (CP's) para explicar en forma conjunta el 81.6% de la variación total.

Cuadro 3. Valores de componentes principales de características cualitativas de una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'.

Componente	Valor propio	Porcentaje	Porcentaje acumulado
1	3.901	8.2999	8.2999
2	2.749	5.8504	14.1502
3	2.548	5.4231	19.5733
4	2.384	5.0724	24.6456
5	2.179	4.6365	29.2822
6	2.089	4.4446	33.7268
7	1.890	4.0221	37.7489
8	1.783	3.7930	41.5420
9	1.742	3.7062	45.2482
10	1.723	3.6655	48.9137

El CP1 estuvo determinado por forma del pedicelo, color de la capa junto a la cáscara, cubierta seminal adherencia a la pulpa y adherencia al cotiledón. El CP2 estuvo determinado por la persistencia del perianto, la forma en sección transversal de la semilla y superficie del cotiledón. El CP3 estuvo determinado por la ondulación del brote, el color de las lenticelas en fruto maduro.

La estructura del CP4 estuvo determinada por el color de las lenticelas de la inflorescencia, forma en la parte estilar del fruto maduro y aroma a anís de la pulpa en fruto madurado. El CP5 fue definido principalmente por la forma en

sección longitudinal de la semilla. El CP6 estuvo determinado por la superficie de la cubierta seminal y el relieve de las venas en la parte superior del limbo.

El CP7 estuvo determinado por la depresión en el extremo peduncular del fruto maduro. El CP8 estuvo definido por el aroma a anís de la pulpa. El CP9 estuvo determinado por el relieve de las venas en la parte superior del limbo y el CP10 estuvo determinado por el tipo de floración y la densidad de la pubescencia de la parte interna del sépalo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Componentes principales de características cualitativas de una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
AP ^z	0.0085	0.1261	0.1286	0.3016	0.0976	0.0346	0.0449	0.3361	0.0199	0.2091
BJC	-0.0920	-0.0427	0.1044	-0.0231	0.2115	0.3591	0.0859	-0.2441	0.2188	0.0023
BCL	-0.2501	0.1462	0.2844	-0.0762	-0.2969	-0.0667	-0.1974	-0.0615	0.0912	-0.0303
HPP	-0.0047	0.0536	0.1914	0.0173	0.0318	0.2603	-0.1188	-0.2202	-0.2056	0.1573
HRB	-0.1536	-0.0010	0.1635	0.0793	0.1281	-0.1478	-0.0725	-0.2890	0.0427	0.3132
LF	0.0504	0.4053	-0.3248	-0.1473	0.1235	-0.1522	0.1214	-0.0319	0.0936	-0.1427
LFA	-0.2298	0.2174	0.2504	0.0165	0.1940	0.0081	-0.1953	0.1396	-0.3464	-0.0745
LTL	-0.2552	0.1824	0.3059	-0.2408	0.2295	0.0094	0.3195	-0.2572	-0.2831	0.0906
LTA	-0.1185	0.0094	-0.0132	-0.1931	0.1181	-0.0192	0.3440	-0.2517	-0.1526	-0.0522
LOB	-0.0845	0.2471	0.4970	0.0617	0.3304	0.0578	0.1746	-0.0962	-0.1708	-0.2230
LRNS	0.0665	-0.1672	0.0981	-0.0508	0.1063	-0.5607	0.0923	-0.2314	0.5477	-0.1437
ICL	-0.2255	-0.0863	-0.2573	0.5479	0.1520	-0.0897	0.1587	-0.0464	0.0616	-0.0463
ITF	0.0875	-0.3452	0.1452	-0.2235	0.1284	0.0975	0.2600	-0.0746	0.1614	0.4843
FN	0.1906	0.3579	-0.2775	-0.0281	0.2043	0.2552	0.0353	-0.0203	0.2874	-0.0012
FE	0.0310	0.3064	0.3017	-0.1304	-0.0735	-0.1934	0.0560	-0.1384	-0.1894	-0.2634
EP	-0.2469	-0.3786	0.3668	0.0842	-0.1176	0.1357	-0.2156	0.1161	-0.1400	0.0690
SDP	0.0617	-0.1529	-0.2345	-0.1198	-0.3372	-0.2597	-0.1453	0.0374	-0.2595	-0.4590
FFEP	-0.0701	-0.3692	-0.0774	-0.1262	0.2846	0.2716	-0.2738	-0.2374	-0.0160	-0.2767
FPC	-0.2059	0.4216	-0.2538	0.2782	-0.2194	-0.1917	0.1260	-0.0133	0.0398	0.2251
FDEP	-0.2087	-0.1211	-0.4424	0.0488	-0.1160	0.1117	-0.4048	-0.1663	0.0942	-0.1536
FPP	-0.2442	0.2310	0.1942	0.0712	0.4237	0.0160	0.3982	-0.0976	0.1922	-0.2821
FFPE	0.3165	0.0147	-0.0298	0.6231	0.1128	0.0400	-0.2075	0.1665	-0.1478	-0.0005
FCLE	0.0617	-0.3208	0.2159	0.2181	0.1226	-0.0690	0.1168	-0.1533	0.0655	-0.4350
FCL	0.1907	0.1413	0.7052	-0.0104	-0.2187	0.1495	-0.1556	-0.0053	0.2478	-0.0892
FMB	0.1003	-0.3831	-0.0654	-0.0890	-0.4130	0.3175	0.1439	-0.1876	-0.0377	0.0086
FMS	-0.0247	0.1036	0.1091	0.3272	0.2221	0.0135	0.3229	0.2695	-0.0609	-0.3397
FMPP	0.0923	0.4779	-0.1124	0.0290	0.1000	0.0117	-0.2434	-0.3414	0.0989	-0.2037
PGP	-0.1378	0.0548	0.0672	0.0535	0.2340	0.1099	0.3830	0.3764	-0.1676	0.1209
PF	-0.7460	-0.0393	0.0203	-0.1268	-0.0264	-0.1697	0.0480	0.1837	0.0965	-0.1329
PCC	-0.2760	-0.1684	0.0955	0.4243	-0.1967	0.2443	0.1408	0.1382	0.2802	-0.1375
PC	0.3680	0.3568	0.0079	-0.1339	-0.2487	-0.3010	-0.1771	-0.0631	-0.0047	0.1050
PS	-0.4342	0.0766	0.1042	-0.1614	-0.1125	-0.1507	-0.0404	0.1395	-0.1983	0.1756
FMC	-0.1544	0.1471	0.2986	-0.1445	-0.4075	0.1691	-0.3399	0.1634	0.1386	-0.2351
FCC	-0.1281	-0.0659	0.0170	0.0391	-0.0752	0.2758	-0.1609	-0.0202	0.2563	0.1358
FACP	-0.4261	0.0963	0.1455	-0.3057	0.1129	-0.2857	-0.2688	-0.0718	0.1418	0.2399
FCPP	-0.1823	0.1706	0.3409	0.2999	0.1420	0.2031	-0.1725	-0.0039	0.3063	0.1047
FCJC	-0.5131	0.2144	-0.1087	0.0281	0.3530	0.1903	-0.0669	-0.0877	0.1460	-0.0316
FCPU	-0.4057	0.1089	0.2000	0.2897	0.0549	-0.3127	-0.2547	0.0564	0.0473	0.0700
FAAP	-0.3205	0.1122	-0.0760	0.5318	-0.1237	-0.0049	0.0537	-0.5248	-0.1941	0.0032
SFL	0.1374	0.0294	0.0765	-0.0597	0.5240	-0.0654	-0.2854	0.2149	-0.2528	-0.1341
SFT	-0.1767	0.5030	-0.1905	-0.2543	-0.1108	0.4046	0.0403	0.1284	-0.0621	-0.0259
CSAP	-0.7566	-0.1309	-0.2221	-0.1281	-0.0048	0.0081	0.0091	0.1112	0.0441	-0.0908
CSAC	-0.7891	-0.0872	-0.2495	-0.1416	0.1577	-0.0789	0.0280	0.1951	0.0798	-0.0196
CSS	-0.0350	0.4124	-0.2477	-0.0015	-0.0427	0.4808	-0.1138	-0.0044	-0.0714	-0.0023
CS	0.2144	0.4625	-0.0146	0.0984	-0.0948	-0.1442	0.0880	0.0252	0.1844	0.1143
EIF	-0.3626	-0.0150	0.0197	0.0936	-0.2639	0.0944	0.0424	-0.4325	-0.3467	0.0796
EMFC	-0.0663	-0.0604	-0.1054	0.4185	-0.1713	-0.2321	-0.2079	-0.1130	-0.2094	0.2328

^zAbreviaciones de variables referidas en el Cuadro 1.

3.5.1.2 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados permitió evidenciar diez grupos (Cuadro %), tres grupos estuvieron conformados por un cultivar cada uno, dos por dos cultivares, dos grupos por tres, un grupo por cinco, otro por siete, y uno por 83 individuos incluyendo a 'Hass' y 'Pionero' (Figura 1).

Cuadro 5. Grupos formados de acuerdo con el análisis de conglomerado con 105 plantas derivadas de la cruce de 'Hass' x 'Pionero' y sus progenitores de sus características cualitativas.

Individuos que lo conforman	
Grupo 1	'Hass', 'Pionero', 31, 105, 106, 81, 74, 36, 35, 32, 48, 40, 110, 33, 39, 73, 112, 20, 34, 24, 89, 51, 55, 2, 7, 66, 69, 72, 4, 90, 15, 46, 21, 26, 28, 84, 94, 27, 68, 101, 50, 57, 70, 86, 1, 63, 103, 52, 67, 64, 10, 99, 29, 85, 53, 76, 44, 91, 62, 78, 42, 49, 41, 82, 58, 71, 61, 77, 43, 54, 45, 92, 5, 16, 18, 56, 75, 97, 93, 79, 100, 88, 104
Grupo 2	8, 11, 60, 107, 19, 96, 109
Grupo 3	98
Grupo 4	9, 14
Grupo 5	23, 30, 65, 95
Grupo 6	37
Grupo 7	3, 13, 108
Grupo 8	12, 47, 38,
Grupo 9	59, 83
Grupo 10	22

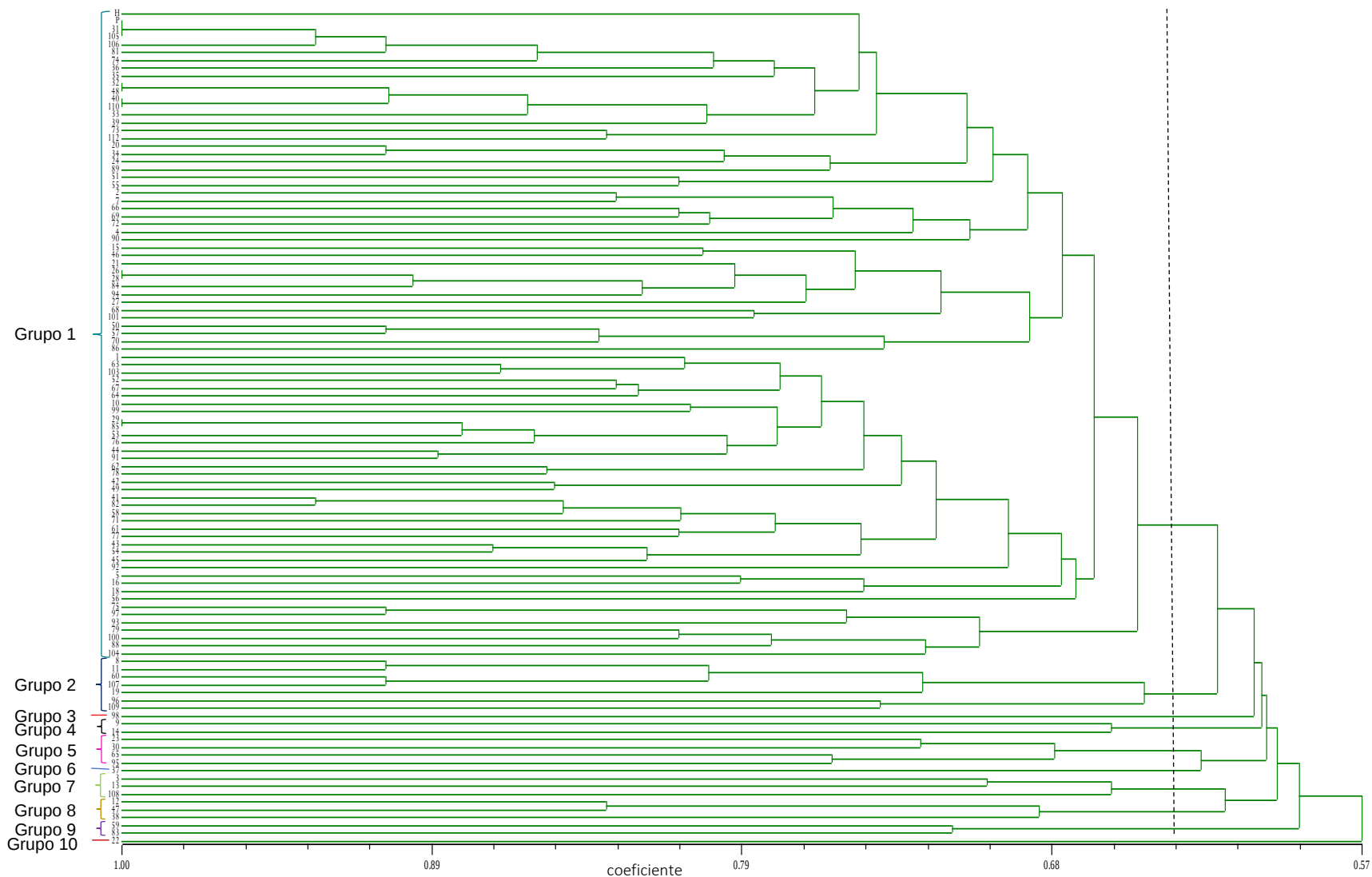


Figura 1. Agrupación de aguacate ‘Hass’, ‘Pionero’ y su progenie con base a las características cualitativas. La línea negra punteada representa el corte del dendrograma en un coeficiente de 0.63 aproximadamente.

3.5.2 Variables cuantitativas

3.5.2.1 Análisis de componentes principales

El primer componente principal (CP1) explicó el 18 % de la variación total de los 107 cultivares y las 16 características, mientras que el CP2 explicó 14 %. Los CP3, CP4, CP5, CP6, CP7 y CP8 explicaron 13, 9, 8, 6, 5 y 5 %, respectivamente (Cuadro 6). Cada uno de estos ocho CP's explicaron más de la variación asociada a una variable, en forma conjunta explicaron el 80.98% de la variación total.

Cuadro 6. Valores de componentes principales de características cuantitativas de una progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'.

Componente	Valor propio	Porcentaje	Porcentaje acumulado
1	2.882	18.0133	18.0133
2	2.308	14.4235	32.4368
3	2.178	13.6172	46.0539
4	1.584	9.9027	55.9566
5	1.259	7.8738	63.8304
6	0.975	6.0940	69.9244
7	0.937	5.8572	75.7816
8	0.833	5.2065	80.9881

El CP1 estuvo determinado por longitud de entrenudos del brote, longitud y relación longitud/diámetro del fruto maduro y relación longitud del fruto/longitud de la semilla fruto madurado. La estructura del CP2 fue definida por longitud y anchura del limbo, longitud del pedicelo y longitud del eje de la inflorescencia. El CP3 se determinó por diámetro y diámetro de la inserción del pedicelo en fruto maduro, grosor de la cáscara y anchura de la capa junto a la cáscara en fruto madurado.

El CP4 fue definido principalmente por la relación longitud/anchura del limbo, número de venas secundarias, tamaño de las lenticelas y grosor de la cáscara en fruto madurado. El CP5 estuvo definido por relación longitud/anchura del limbo. El CP6 estuvo determinado por el tamaño de las lenticelas en fruto madurado.

La estructura CP7 estuvo determinada por el diámetro del fruto maduro y anchura de la capa junto a la cáscara del fruto madurado. Por su parte, la estructura del CP8 fue definida por longitud del pedicelo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Componentes principales de características cuantitativas de una progenie de aguacate ‘Hass’ x ‘Pionero’.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
BL ^z	0.5804	0.1579	0.2147	0.3247	0.3254	0.1000	0.0232	0.1936
LL	0.2460	-0.8581	0.2641	0.0280	-0.0584	0.1839	0.0046	0.0008
LA	0.3463	-0.7252	0.3463	-0.2725	0.2686	-0.0520	0.0269	-0.0268
LRA	-0.1965	-0.2436	-0.1582	0.5146	-0.6256	0.3349	-0.0882	-0.0020
LNVS	0.3298	0.0727	0.2745	0.5343	0.1879	0.4226	0.1551	-0.0599
PL	0.2896	-0.6763	0.0744	0.1282	0.0510	-0.2624	0.0221	0.2223
ILE	0.3369	0.4939	0.1735	-0.0305	0.1789	0.2958	0.1571	0.2798
FL	0.7890	0.0030	-0.4210	0.0850	-0.2418	-0.0919	-0.2696	0.1110
FD	-0.0058	-0.2378	-0.7029	0.0260	0.2979	0.1495	-0.4828	-0.0466
FRLD	0.7985	0.1587	0.0582	0.0568	-0.4450	-0.1989	0.0574	0.1354
FDIP	0.2469	0.0337	-0.6877	0.0198	0.4298	-0.0260	0.1485	0.1155
FTL	0.2643	0.1801	0.1086	0.4902	0.0918	-0.5434	0.0922	-0.4442
PDL	0.4379	-0.0175	0.0864	0.4966	-0.0768	0.2952	0.1674	-0.4895
FGC	0.1409	-0.2077	-0.6002	0.2865	0.0591	0.1333	0.3088	-0.3362
FAJC	0.0728	0.1696	0.5143	0.2298	0.2122	0.0692	-0.6169	-0.2351
FRFS	0.6419	0.2592	-0.1230	-0.4506	-0.1561	0.0726	-0.1878	-0.1103

^zAbreviaciones de variables referidas en el Cuadro 2.

3.5.2.2 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados permitió evidenciar diez grupos (Cuadro 8), Cuatro grupos estuvieron conformados por un individuo cada uno, otro por dos, dos grupos por cinco, un grupo por 20 individuos incluido ‘Hass’, otro por 38 individuos incluido ‘Pionero’, y uno por 33 individuos (Figura 2).

Cuadro 8. Grupos formados de acuerdo con el análisis de conglomerado con 105 plantas derivadas de la cruce de aguacate ‘Hass’ x ‘Pionero’ y sus progenitores.

Plantas que lo conforman	
Grupo 1	‘Hass’, 21, 7, 54, 55, 56, 106, 46, 57, 73, 67, 72, 52, 64, 76, 89, 103, 8, 43, 59
Grupo 2	‘Pionero’, 23, 34, 90, 14, 20, 48, 15, 2, 24, 3, 9, 12, 30, 19, 5, 11, 74, 38, 16, 112, 18, 51, 26, 85, 29, 42, 105, 40, 69, 98, 31, 35, 53, 66, 77, 81, 96
Grupo 3	1
Grupo 4	4, 36, 39, 93, 107
Grupo 5	13, 101, 32, 60, 62, 79, 71, 78, 61, 22, 58, 86, 65, 109, 33, 83, 45, 99, 50, 68, 47, 94, 91, 27, 88, 110, 37, 28, 84, 95, 41, 44, 100
Grupo 6	75, 92, 97, 108, 104
Grupo 7	82
Grupo 8	49
Grupo 9	10, 70
Grupo 10	63

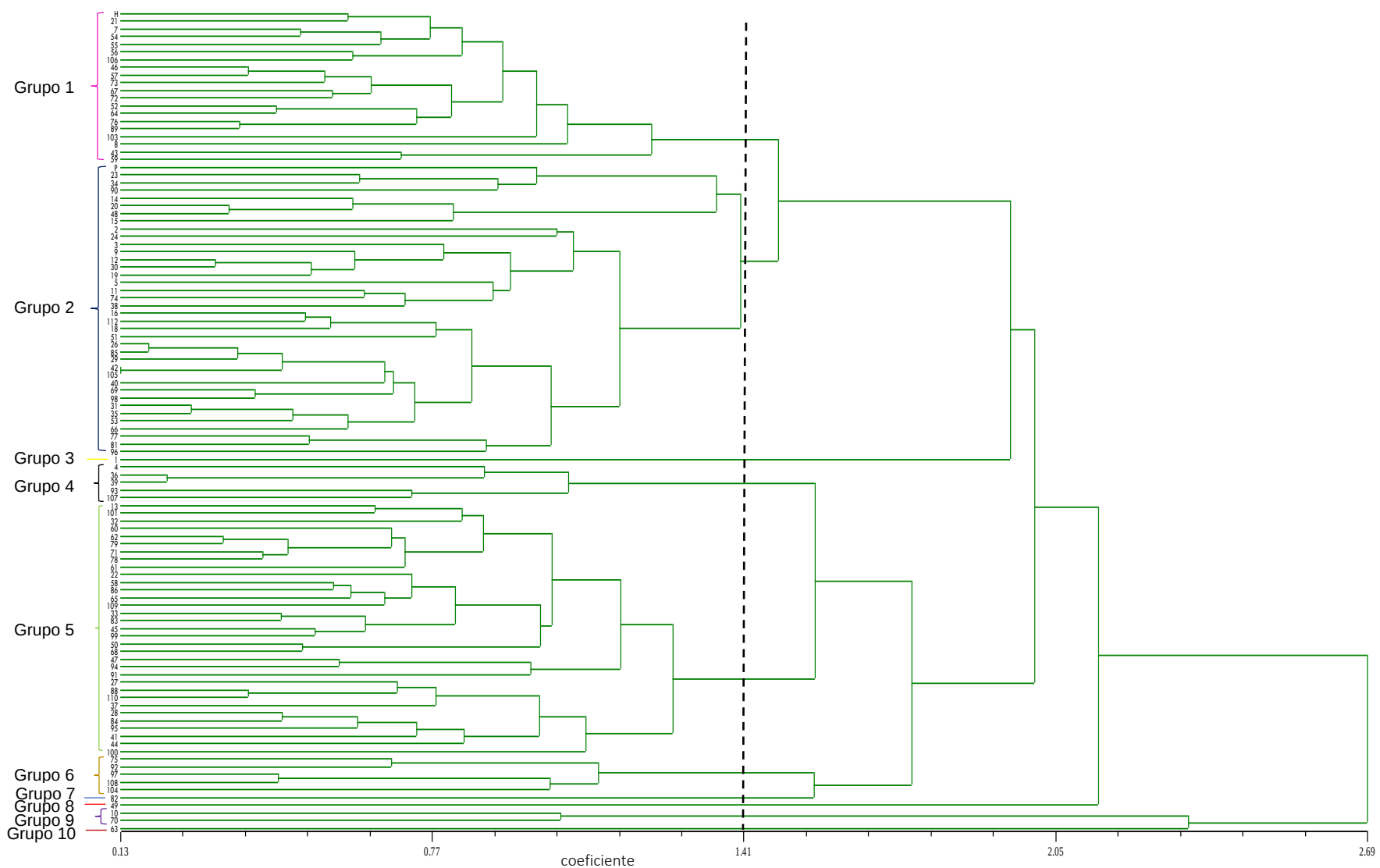


Figura 2. Agrupación de aguacate ‘Hass’, ‘Pionero’ y su progenie con base a las características cuantitativas. La línea negra punteada representa el corte del dendrograma en un coeficiente de 1.41.

3.5.3 Análisis cladograma

Se presentó un análisis de consenso donde se tuvieron en cuenta las 67 características morfológicas, de este análisis resultó un cladograma con longitud de 1806, índice de retención de 49 e Índice de consistencia igual a 12, se identificaron 25 grandes grupos conformados por dos o más individuos encerrados en rectángulos, los demás individuos no se agrupan porque son los más separados y pueden tener mayores cambios, de color verde se señala las características novedosas que no comparten con ninguno de los dos progenitores (Figura 3).

En el grupo 1 los individuos 97 y 104 comparten la forma del nectario, por otro lado, el color de las lenticelas en brote joven y la ondulación del borde del limbo son propias del individuo 97 mientras que la longitud de entrenudo del brote, anchura del limbo, número de venas secundarias y la densidad de la pubescencia de la parte interna del sépalo definen al individuo 104 (Figura 3).

El grupo 2 se conformó por los individuos 23, 19 y 48 que comparten color de pubescencia del peciolo, forma del ápice y el número de venas secundarias. El grupo 3 estuvo conformado por los individuos 76 y 89 comparten las características de longitud de entrenudo del brote, anchura del limbo, forma del estilo, color de las lenticelas del fruto maduro y color del fruto madurado.

Los individuos 100, 93, 75 y 88 conformaron el grupo 4 comparten anchura del limbo, longitud del pedicelo, forma del extremo peduncular, conspicuidad de las lenticelas y color del pedicelo. El grupo 5 estuvo conformado por los individuos 64, 67, 56, 62 y 78 comparten tamaño de las lenticelas del fruto maduro, forma del pedicelo, adherencia a la pulpa y adherencia al cotiledón de la cubierta seminal.

En el grupo 6 los individuos 55, 33, 59, 83, 71, 82 y 92 comparten la longitud del limbo y color del fruto maduro. Los individuos 51 y 66 del grupo 7 comparten la relación longitud / diámetro, forma en la parte estilar y la forma en sesión

longitudinal de la semilla. El grupo 8 conformado por los individuos 26, 21 y 94 que comparten el tamaño y color de las lenticelas, depresión en el extremo peduncular y superficie del pedicelo. Los individuos 106, 77, 105, 73 y 112 comparten las características de ondulación del borde del limbo y consistencia de la pulpa del fruto maduro grupo 9.

El grupo 10 estuvo conformado por los individuos 58, 91, 44, 60, 65, 107, y 108 que comparten las características de longitud de entrenudos del brote, longitud del limbo, presencia de cuello en fruto y persistencia del perianto. Los individuos 52 y 53 comparten las características torsión del ápice del limbo, brillantez del fruto maduro, forma del pedicelo y color de la capa junto a la cáscara grupo 11.

El grupo 12 lo conforman los individuos 99, 81, 36 y 38 estos comparten tipo de floración, forma del extremo peduncular, diámetro de la inserción del pedicelo y forma en la sesión longitudinal de la semilla. Los individuos 37, 47, 4, 2 y 45 conforman el grupo 13 compartiendo la torsión en toda la longitud del limbo.

Los progenitores 'Hass' y 'Pionero' se encuentran en el grupo 14 comparten las características de longitud de entrenudos del brote, anchura del limbo, color de las lenticelas en fruto maduro y color del pedicelo, a su vez comparten con HxP 74 número de venas secundarias y tipo de floración. El grupo 15 estuvo conformado por los individuos 40, 30, 8 y 11 que comparten el color del fruto madurado. Los individuos 32, 41, 31, 95, 12 y 90 comparten la longitud del limbo grupo 16.

El grupo 17 comparten longitud del limbo y color del fruto madurado los individuos de este grupo son 68, 101, 96, 50 y 109. La relación longitud/diámetro del fruto maduro la comparten los individuos 98, 27, 84, 14, 24 y 70 pertenecientes al grupo 18. Los individuos 103, 1 y 3 comparten la ondulación del borde del limbo grupo 19. El grupo 20 estuvo conformado por los individuos 28 y 63 con las características relación longitud anchura del limbo y forma del limbo. Los individuos 42 y 49 forman el grupo 21 y comparten color de las lenticelas del brote joven y color del fruto madurado.

Los individuos 13 y 86 comparten longitud del limbo y ondulación del borde del limbo en el grupo 22. El grupo 23 estuvo conformado por los individuos 9, 15 y 20 las características que los define son número de venas secundarias, forma del extremo peduncular, color de las lenticelas del fruto maduro y superficie del pedicelo.

El grupo 24 estuvo conformado por los individuos 22 y 35 que comparten las características de longitud del limbo, longitud del fruto maduro, relación longitud/diámetro fruto maduro, forma del extremo peduncular y depresión en el extremo peduncular. La forma del limbo, el tamaño de las lenticelas del fruto maduro y la época de madurez del fruto para cosecha las comparten los individuos 18, 46, 10 y 57 que conforman el grupo 25 (Figura 3).

Además, se realizó otra agrupación por medio de corchetes identificando 7 grandes grupos. El grupo I lo conforman los grupos 2, 3 y 4 de la agrupación anterior donde comparten las características de tipo de floración y posición del pedicelo, el grupo II lo conforman el grupo 5 de la agrupación anterior y los individuos 43 y 54 compartiendo la anchura del limbo.

El grupo III lo conforma desde el grupo 6 hasta el grupo 10 de la agrupación anterior compartiendo color de las lenticelas del fruto maduro y color del fruto madurado. El grupo IV lo integran los grupos 11, 12 y 14 de la agrupación anterior compartiendo la longitud del pedicelo y adherencia a la pulpa de la cubierta seminal. El grupo V lo conforman los grupos 14,15 y 16 de la agrupación anterior compartiendo forma del ápice, longitud y color de las lenticelas del fruto maduro.

El grupo VI está conformado por los grupos 17 y 18 de la agrupación anterior y el individuo 34 compartiendo la época de madurez del fruto para cosecha. El grupo VII está conformado por el grupo 19 hasta el grupo 25 de la agrupación anterior y el individuo 61 compartiendo color de las lenticelas del fruto maduro, longitud del pedicelo, color de la pulpa junto a la cascara en fruto madurado y adherencia a la pulpa de la cubierta seminal (Figura 3).

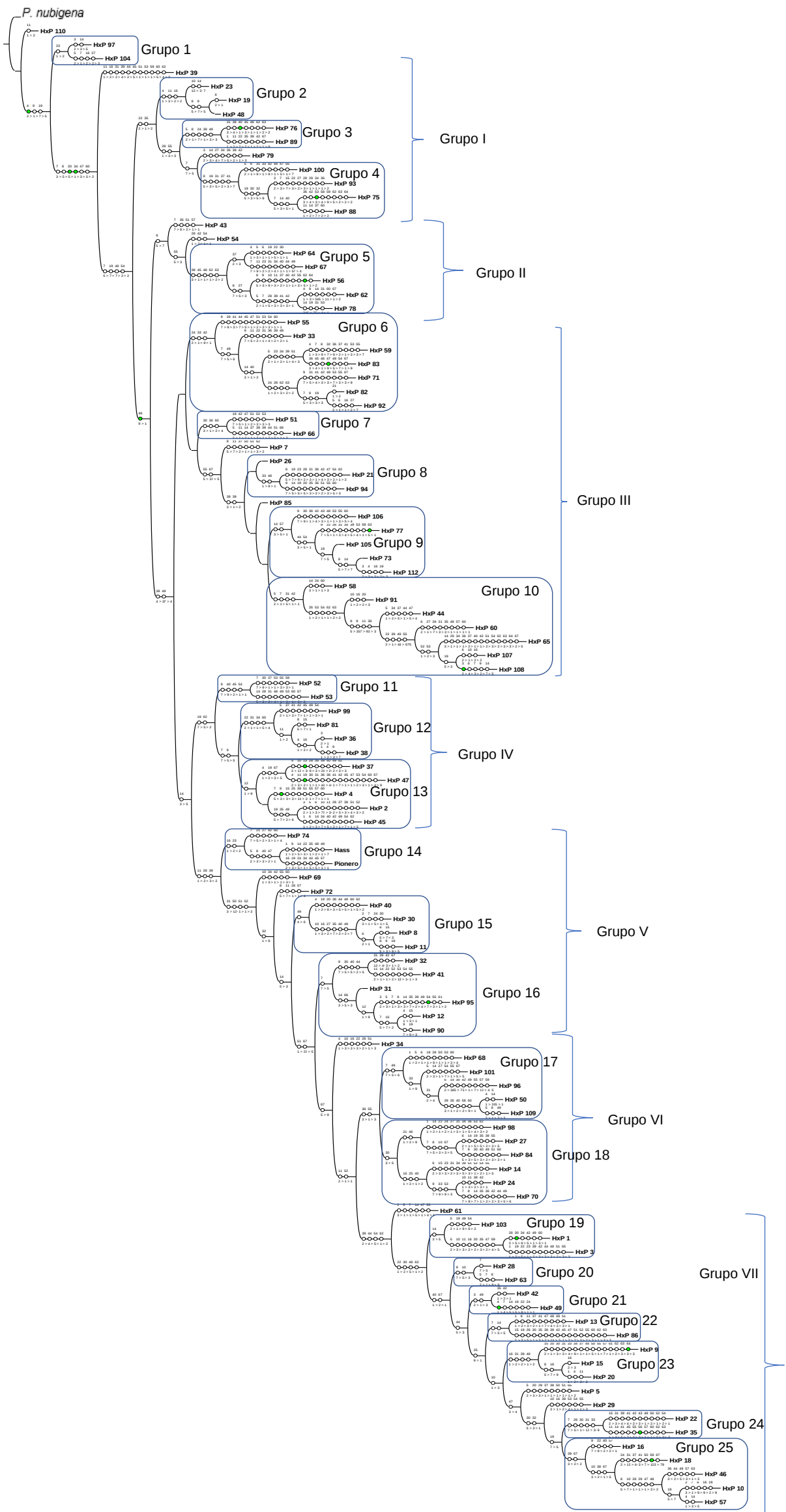


Figura 3. Cladograma de *Persea nubigena*, 'Hass', 'Pionero' y la progenie de 'Hass' x 'Pionero', las características están representadas por números (Cuadros 1 y 2).

3.6 Discusión

El análisis de componentes principales no alcanzó arriba de 80 % de variabilidad en los primeros componentes, esto indicó que existe probablemente características correlacionadas y distorsionan el análisis, por lo que se recomienda la depuración de variables para que el análisis tenga más certeza, tal como lo indicaron López-Santiago et al. (2008). Por lo que se recomienda en el futuro realizar un análisis para depurar variables conforme a los métodos disponibles.

El color de las lenticelas del fruto maduro, el color de la capa junto a la cáscara del fruto madurado, el aroma a anís de la pulpa y el color del fruto madurado fueron características representativas en el análisis de componentes principales, por otro lado, en un estudio encontraron que los frutos de aguacate presentan diferentes características morfológicas que pueden apreciarse con facilidad y son atribuidas, principalmente, a su diversidad genética (Bernal & Díaz, 2014; Robayo & Cuca, 2016). También se considera que la forma de fruto es un indicador morfológico de importancia debido a que es una de las características que hacen atractivo al aguacate en el mercado de los consumidores (Rodríguez-Medina et al., 2003).

Para las características cuantitativas longitud de entrenudos del brote, longitud del fruto maduro, la relación longitud/diámetro del fruto maduro y la relación longitud del fruto/longitud de la semilla del fruto madurado hacen parte del CP1 explicando alrededor del 20 % de la variación. En un experimento en Venezuela Ferrer-Pereira, (2012) observó en campo variaciones en la longitud y forma de las inflorescencias y otras características de sus frutos de especies de *Persea* que llegan a ser propiamente específicas.

Las diferencias existentes en la progenie son propias de la variabilidad genética debido que se encontraban en las mismas condiciones ambientales, caso contrario a lo ocurrido al evaluar 42 genotipos de aguacate nativo de Nuevo León, México reportaron que la mayor longitud de fruto fue de 12.76 cm mientras el

menor fue de 2.88 cm. Además de las características genéticas, estas diferencias tal vez se deben a los diferentes tipos de clima y altitudes donde se produjeron estos aguacates nativos (Gutiérrez-Díaz et al., 2009).

3.7 Conclusiones

En los análisis de componentes principales para las variables cualitativas se describieron los primeros diez CP's que explicaron el 48.9 % de la variación total, sin embargo, para explicar en forma conjunta 81.6% de la variación total se requiere de 23 CP's.

En el dendrograma de características cuantitativas se evidencian 10 grupos donde los progenitores 'Hass' y 'Pionero' se identificaron en grupos separados, mientras que en el dendrograma de características cualitativas se encuentran en el mismo grupo.

Los progenitores 'Hass' y 'Pionero' y el individuo 74 comparten las características de número de venas secundarias y el tipo de floración en el grupo 14 del cladograma, a su vez los grupos 17 hasta el 25 son los que comparten más características con los progenitores.

Literatura citada

- Avalos Erroa, C. O., Quijada Rodríguez, J. L., & Beltrán Aranzamendi, M. (2006). "Caracterización de los aguacates criollos (*Persea americana* Miller) del campus de la Universidad de el Salvador y la Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agronómicas". Tesis Doctoral, Universidad de el Salvador, San Salvador.
- Barrientos Priego, A. F. (2010). El aguacate. *Biodiversitas*, 88, 1-7.
- Barrientos Priego, A. F., Barrientos Pérez, F., Sánchez Colín, S. & Aguilar Melchor, J. J. (1991). Utilización del huerto vivero para reducir la fase juvenil de plántulas de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture*, 35, 18-22.
- Barrientos Priego, A. F., Reyes-Alemán, J., & Aguilar, J. (2010). *Manual Grafico para la descripción varietal de aguacate*. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SNICS-SAGARPA) y la Universidad Autónoma Chapingo. Tlalnepantla, Estado de Mexico, Mexico.
- Campos Rojas, E., Hernández Vasquez, F. L., Espíndola Barquera, M. C., Reyes Alemán, J. C., & Barrientos Priego, A. F. (2011). Caracterización de aguacates criollos Mexicanos (*Persea drymifolia*) como donadores de semillas. *Proceedings VII World Avocado Congress (Actas VII Congreso Mundial del Aguacate)*, 11.
- Espíndola-Barquera, M. d. (2019). Perspectivas de nuevas selecciones de aguacate en Mexico. *Memoria IX Congreso Mundial del Aguacate*. Medellín, Colombia.
- Ferrer-Pereira, H. (2012). Aportes al conocimiento taxonómico del género *Persea* (Lauraceae) en Venezuela. *Hoehnea*, 39(3), 435-478.
- Gutiérrez-Díaz, A., Martínez-de la Cerda, J., García-Zambrano, E. A., Iracheta-Donjuan, L., Ocampo-Morales, J. D., & Cerda-Hurtado, I. M. (2009). Estudio de diversidad genética del aguacate nativo en Nuevo León, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(1), 9-18.
- Goloboff P.A., (1993). Nona (for Windows). Cladistics@.com www.cladistics.com
- Guzmán, L. F., Machida Hirano, R., Barroyo, E., Cortés Cruz, M., Espíndola Barquera, M. D., & Heredia García, E. (2017). Genetic structure and selection of a core collection for term conservation of Avocado in Mexico. *Frontiers in Plant Science*, 8 (243), 10.

- Hernández Villarreal, A. E. (2013). Caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. *Revista Bio Ciencias*, 2(3), 113-118.
- Hernández Villarreal, A. E.; Navarrete Valencia, A.L.; Luna Esquivel, G. (2014). *Caracterización morfológica de materiales de Jamaica (Hibiscus sabdariffa L.) de cinco regiones de Mexico*. (Tesis de maestría) Universidad Autónoma de Nayarit, Xalisco, México.
- Montes-Hernández, S., de la Torre-Vizcanio, J. D., Heredia-García, E., Hernández-Martínez, M., & Camarena-Hernández, M. G. (2017). Caracterización morfológica de germoplasma de aguacate Mexicano (*Persea americana* var: *drymifolia*, Lauraceae). *Interciencia*, 42(3), 175-180.
- Nixon K.C., (2002). Winclada. Cladistics@.com www.cladistics.com
- López Guzmán, G., Medina T, R., Guillén A, H., Ramírez G, L., Aguilar C, J. A., & Valdivia R, M. G. (2012). Características fenotípicas de hoja y fruto en selecciones de aguacate criollo de clima subtropical en el estado de Nayarit. *Revista Fuente Año*, 4(10), 56-62.
- López-Santiago, J., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A., Rodríguez-Pérez, E., Colinas-Leon, M., Borys, M., & González-Andrés, F. (2008). Selección de variables morfológicas para la caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2), 97-111.
- Onamu, R., Legaria Solano, J. P., Sahagún Castellanos, J., Rodríguez de la O, J. L., & Péres Nieto, J. (2012). Análisis de marcadores morfológicos y moleculares en Papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 267-277.
- Peñaloza, A., Valls, J. F., Rosso, B., & Condón, F. (2010). Caracterización y evaluación de recursos fitogenéticos. En PROCISUR & IICA, *Estrategia en los recursos fitogenéticos para los países del cono sur*. (pp 85-96). Montevideo, Uruguay.
- Robayo Medina, A. T., & Cuca Suárez, L. E. (2016). *Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de aguacate, Persea americana* Mill. (Lauraceae) e implementación de un método de extracción del aceite de aguacate como alternativa de industrialización. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Rodríguez-Medina, N. N., Rohde, W., González-Arencibia, C., Ramírez-Pérez, I., Fuentes-Lorenzo, J. L., Román-Gutiérrez, M. A., Velázquez-Palenzuela, J. B. (2003). Caracterización morfológica, bioquímica molecular de cultivares de aguacatero (*Persea americana* Mill) en Cuba. *Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate)*, 47-53.

4 TIPOS DE HERENCIA EN LA PROGENIE DE AGUACATE 'HASS' X 'PIONERO'

4.1 Resumen

El aguacate es considerado como uno de los frutales tropicales y subtropicales más valiosos. A nivel mundial se han realizado muy pocos estudios relacionados con la herencia de las características cuantitativas y cualitativas en esta especie. En la Fundación Salvador Sánchez-Colín, S.C., se realizó un cruzamiento entre 'Hass' x 'Pionero' obteniéndose un total de 105 descendientes, a los cuales se les evaluaron 63 características morfológicas 16 cuantitativas y 47 cualitativas durante los años 2010 al 2019. Con los datos obtenidos en las variables cualitativas se realizaron pruebas de hipótesis mendelianas y se encontró que 12 características no se ajustan a herencia mendeliana, y el tipo de herencia que predominó fue epistasis dominante doble (11 características) seguido por epistasis recesiva doble (10 características). En las variables cuantitativas se realizó gráficos de agrupación que muestran la presencia de herencia transgresiva debido a que los individuos de la progenie superan a sus progenitores en ambos sentidos.

Palabras claves: *Persea americana* Mill., epistasis, herencia transgresiva, caracterización morfológica

4.2 Abstract

The avocado is considered one of the most valuable tropical and subtropical fruit trees, very few studies have been carried worldwide on the inheritance of quantitative and qualitative qualities in this species. In the Salvador Sánchez-Colín S.C. Foundation, a cross was made between 'Hass' x 'Pionero', obtaining a total of 105 descendants, to which 63 morphological characteristics were evaluated, 16 quantitative and 47 qualitative during the years 2010 and 2019. With the data obtained in the qualitative variables, Mendelian hypothesis test were performed, and it was found that 12 characteristics don't conform to Mendelian inheritance, and that the type of inheritance that predominated was double dominant epistasis (11 characteristics), followed by double recessive epistasis (10 characteristics). In the quantitative variables, grouping graphs were made, finding that there is presence of transgressive inheritance, because the individuals of the progeny surpass their parents in both cases.

Key words: *Persea americana* Mill., epistasis, transgressive inheritance, morphological characterization

4.3 Introducción

La herencia es el proceso por el cual la información genética se transmite de padres a hijos, por esto los miembros de la misma familia tienden a tener características similares. Los genes que posee un individuo en su genoma definen su genotipo, la expresión del genotipo es afectada en gran medida por el medio ambiente, determinando así la apariencia o rendimiento de un individuo (fenotipo) (Lewin, 1995; Rocha, 2002).

La variación genética se relaciona, no sólo con los atributos de valor requeridos por los diversos actores de la cadena, sino también con características ecofisiológicas y funcionales que corresponden a tasas de crecimiento y productividad, y al funcionamiento de los ecosistemas. La variación genética también se apoya en la 'plasticidad fenotípica', la que se asume como la capacidad de un organismo para producir fenotipos diferentes como respuesta a cambios ambientales, interacción genotipo x ambiente (Lobo, 2006).

El concepto de la unidad hereditaria, como partícula indivisible de la transmisión y recombinación de la herencia y su demostración fue descrita por Mendel, (1866), denominado herencia mendeliana o de la variación cualitativa. Los estudios de Mendel partían de la evaluación de la apariencia externa (fenotipo) para inferir la composición genética (genotipo) del individuo (Cornide, 2001).

La herencia monogénica es causada por mutaciones en un locus específico y presenta un patrón de herencia mendeliano clásico, en el que la expresión del fenotipo obedece a la presencia de un genotipo particular. De acuerdo con su localización cromosómica, estas mutaciones se clasifican como autosómicas (en cualquier cromosoma no sexual) o ligadas al sexo. Con base en su mecanismo de acción, se pueden clasificar como dominantes si el alelo se expresa en estado heterocigoto, o recesivas si se requieren dos copias del alelo para que se exprese el fenotipo (estado homocigoto) (Rodríguez-Porras & Raventós-Vorst, 2009).

El fitomejoramiento tradicional ha dado las herramientas conceptuales para analizar la herencia de características fenotípicas evidentes, tales como tamaño, color, productividad, forma del fruto (Griffiths et al., 1993; Rocha 2002). Algunas características pueden ser altamente heredables, fácilmente observables y expresables en la misma forma en cualquier ambiente (Hernández, 2013).

La caracterización morfológica es el medio y no el fin que permite medir y conocer la variabilidad genética del genoma en una población (Hernández, Navarrete & Luna, 2014). Al caracterizar una especie, se puede estimar la variabilidad existente en la población de los individuos que la conforman, constituyendo el primer paso de un programa de mejoramiento genético (Franco & Hidalgo, 2003). Posteriormente, la estimación de parámetros genéticos (componentes de varianza, heredabilidad, correlación entre fenotipos y correlación entre genotipos) son importantes para optimizar la selección de genotipos superiores y evaluar estrategias de mejoramiento alternativas (Hardner, Winks, Stephenson, & Gallagher, 2001).

En el mundo se han realizado pocos estudios relacionados con la estimación de componentes de varianza genética y heredabilidad en sentido ancho y estrecho, para aguacate. En México encontraron que en esta especie el número de ramas tuvo una heredabilidad de 0.74 (Barrientos-Perez & Sánchez-Colín, 1982). Por otra parte, en Israel encontraron que la varianza no aditiva fue significativa para olor a anís, densidad de fruta, intensidad de floración, peso de fruto, duración de la cosecha, longitud de inflorescencia, tamaño de semilla, tiempo a ablandamiento y tamaño de árbol, donde también hay una fuerte influencia del ambiente (Lavi, Lahav, Degani, Gazit, & Hillel, 1993).

En otro estudio realizado en México en aguacate, encontraron que el área transversal de la corteza, diámetro del follaje/altura, tamaño de fruto, porcentaje de pulpa y grosor de cáscara presentaron alta heredabilidad con alta significancia estadística, mientras que, para número de entrenudos, diámetro de tallo y peso de semilla fueron bajos y no significativos (De la Cruz & Sahagún, 1997). Por otra parte, en EE. UU. En un estudio de la Universidad de California Riverside en

aguacate encontraron baja heredabilidad (0-35 a 0.23) en el sentido amplio en altura de árbol, diámetro de copa, diámetro de tronco, abundancia de flores y amarre de frutos (Chen, Ashworth, Xu, & Clegg, 2007).

Sin embargo, se conoce muy poco de la genética del aguacate y se cuenta con insuficiente información relacionada con la transmisión de las características, la relaciones alélicas y no alélicas que se pueden establecer entre los alelos y los genes que codifican para las características de mayor importancia agrícola (Pérez, Sigarroat, Rodríguez, Bandera & Valdés-Infante, 2013). Partiendo de estos antecedentes, el objetivo de este estudio fue estimar los tipos de herencia, en características cualitativas y determinar tendencias de las características cuantitativas en la progenie resultante del cruzamiento entre 'Hass' x 'Pionero'.

4.4 Materiales y métodos

Esta investigación se realizó en el campo experimental "La Labor" de la Fundación Salvador Sánchez-Colín, S.C., ubicada en Temascaltepec, Estado de México, México y en el laboratorio de Fisiología de Frutales del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

En la Fundación Salvador Sánchez-Colín CICTAMEX, S.C., se realizó un cruzamiento, mediante polinización controlada entre el cultivar 'Hass' como hembra y el cultivar 'Pionero' como macho en el año 2000, con el objetivo de incorporar determinadas características (forma, sabor, coloración externa del fruto entre otros). De este cruzamiento se obtuvieron 105 descendientes, en el año 2002 se establecieron las plantas en un huerto vivero (1 m entre plantas y 2 m entre hileras), en San Andrés de los Gama, Temascaltepec, México, se realizaron podas para acelerar su salida del periodo juvenil (Barrientos, Barrientos, Sánchez, & Aguilar, 1991). Algunos de los árboles fructificaron a partir de 2010 y otros árboles continuaron su fructificación en años posteriores (Espíndola-Barquera, 2019).

A la población resultante del cruzamiento (progenie) y los parentales se les realizó una caracterización morfológica de acuerdo con el manual gráfico para la descripción varietal de aguacate (Barrientos, Reyes, & Aguilar, 2010), que consistió: en 19 características de árbol, brote y hoja; 9 de inflorescencias, flor y floración; y 39 de fruto y sus partes, que a su vez se dividen en 51 características cualitativas y 16 cuantitativas (Cuadros 1 y 2).

Las plantas se comenzaron a evaluar a los ocho años y las evaluaciones se efectuaron en el periodo de (2010 a 2019). Para algunas características se juntaron niveles como es el caso de color de fruto donde solo se tuvo en cuenta verde y oscuro, en color de lenticelas del brote joven se consideró amarillo, verde y rojizo.

Con los datos resultantes de las evaluaciones se realizaron en las variables cualitativas pruebas de ji-cuadrada para herencia mendeliana y en las variables cuantitativas gráficos de agrupamiento para determinar herencia transgresiva.

Cuadro 1. Variables cuantitativas evaluadas según descriptor morfológico de aguacate.

	Variables	Abreviaturas	Unidad
Brote	Longitud de entrenudos	BL	cm
	Longitud	LL	cm
	Anchura	LA	cm
Limbo	Relación longitud anchura	LRA	cm
	Número de venas secundarias	LNVS	#
Pecíolo	Longitud	PL	cm
Inflorescencia	Longitud del eje	ILE	cm
	Longitud	FL	cm
	Diámetro	FD	cm
Fruto maduro	Relación longitud/ diámetro	FRLD	
	Diámetro de la inserción del pedicelo	FDIP	cm
	Tamaño de las lenticelas	FTL	mm
Pedicelo	Longitud	PDL	cm
	Grosor de la cáscara	FGC	mm
Fruto madurado	Anchura de la capa junto a la cáscara	FAJC	mm
	Relación longitud del fruto/longitud de semilla	FRFS	

Cuadro 2. Variables cualitativas evaluadas según el descriptor morfológico de aguacate.

Característica		Abreviatura
Árbol	Porte	AP
Brote joven	Color	BJC
	Color de las lenticelas	BCL
Hoja	Color de pubescencia del peciolo	HPP
	Porte en relación con el borde	HRB
Limbo	Forma	LF
	Forma del ápice	LFA
	Torción en toda la longitud	LTL
	Torción del ápice	LTA
	Ondulación del borde	LOB
	Relieve de las venas en la parte superior	LRNS
	Densidad de la pubescencia en la parte inferior	LDP
	Aroma de anís	LAA
Inflorescencia	Color de las lenticelas	ICL
	Tipo de floración	ITF
Flor	Nectario	FN
	Estilo	FE
	Polen	FP
Sépalo	Pubescencia de la parte interna	SPI
	Densidad de la pubescencia de la parte interna	SDP
Fruto maduro	Forma del extremo peduncular	FFEP
	Presencia de cuello	FPC
	Depresión en el extremo peduncular	FDEP
	Posición del pedicelo	FPP
	Forma en la parte estilar	FFPE
	Conspicuidad de lenticelas	FCLE
	Color de las lenticelas	FCL
	Brillantez	FMB
	Superficie	FMS
Fruto	Persistencia del perianto	FMPP
Pedicelo	Grosor en comparación con el pedúnculo	PGP
	Forma	PF
	Cabeza de clavo	PCC
	Color	PC
	Superficie	PS
Fruto madurado	Color	FMC
	Consistencia de la cáscara	FCC
	Adherencia de la cáscara a la pulpa	FACP
	Color principal de la pulpa	FCPP
	Color de la capa junto a la cáscara	FCJC
	Conspicuidad de fibras en la pulpa	FCFP
	Consistencia de la pulpa	FCPU
	Aroma a anís de la pulpa	FAAP
Semilla	Forma en sección longitudinal (vista lateral)	SFL
	Forma en sección transversal	SFT
Cubierta seminal	Adherencia a pulpa	CSAP
	Adherencia al cotiledón	CSAC
	Superficie	CSS
Cotiledón	Superficie	CS
Época	Inicio de floración	EIF
	Madurez del fruto para cosecha	EMFC

4.5 Resultados

4.5.1 Variables cualitativas

El 100 % de la progenie respecto a densidad de la pubescencia en la parte inferior del limbo presentaron la misma característica que los progenitores ausente o laxa. El aroma a anís en el limbo fue ausente o débil, la pubescencia de la parte interna del sépalo estuvo presente y la conspicuidad de fibras en la pulpa del fruto madurado fue conspicua igual que sus progenitores. Por lo anterior estas características no se consideraron en las pruebas de ji-cuadrada para herencia mendeliana.

El color de las lenticelas en brote joven, el porte de la hoja con relación al brote, la forma del limbo, torción del ápice, el relieve de las venas en la parte superior del limbo, el color de las lenticelas del fruto maduro, la consistencia de la cáscara, el color principal de la pulpa, el color de la capa junto a la cáscara, la consistencia de la pulpa, la forma de la semilla en la sección longitudinal y adherencia de la pulpa a la cubierta seminal no se ajustan a la herencia mendeliana (Cuadro 3).

El nectario y la depresión en el extremo peduncular del fruto maduro presentó herencia monohíbrida. El color de pubescencia del peciolo en hoja joven, superficie del fruto maduro, color del pedicelo y adherencia de la cáscara a la pulpa presentaron herencia de tipo epistasis dominante simple.

El porte del árbol, el color del brote joven, la torción en toda la longitud del limbo, el color de las lenticelas en la inflorescencia, la densidad de la pubescencia de la parte interna del sépalo, el aroma a anís de la pulpa, la forma en la sección transversal de la semilla, la adherencia al cotiledón y superficie de la cubierta seminal, el grosor del pedicelo en comparación del pedúnculo en su unión y la superficie del cotiledón presentaron herencia de tipo epistasis dominante doble (Cuadro 3).

Cuadro 3. Pruebas de ji-cuadrada para tipos de herencia de variables cualitativas de una progenie de aguacate.

Característica	Individuos	Hipótesis	Tipo de herencia resultante
AP ^z	97:8	15:1	Epistasis dominante doble
BJC	101:3	15:1	Epistasis dominante doble
BCL	93:6:4	12:3:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
HPP	86:13:5	12:3:1	Epistasis dominante simple
HRB	91:9:5	12:3:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
LF	72:28:4	12:3:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
LFA	59:45	9:7	Epistasis recesiva doble
LTL	97:8	15:1	Epistasis dominante doble
LTA	104:1	15:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
LOB	90:15	13:3	Epistasis dominante recesiva
LRNS	96:6:3	12:3:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
ICL	76:6	15:1	Epistasis dominante doble
ITF	43:37	9:7	Epistasis recesiva doble
FN	59:22	3:1	Mono híbrida
FE	69:12	13:3	Epistasis dominante recesiva
FP	66:14	13:3	Epistasis dominante recesiva
SDP	75:7	15:1	Epistasis dominante doble
FFEP	56:30	9:7	Epistasis recesiva doble
FPC	52:36	9:7	Epistasis recesiva doble
FDEP	69:18	3:1	Mono híbrida
FPP	57:31	9:7	Epistasis recesiva doble
FFPE	56:21:11	9:3:4	Epistasis recesiva simple
FCLE	74:14	13:3	Epistasis dominante recesiva
FCL	39:33:15	9:3:4	No se ajusta a herencia Mendeliana
FMB	45:43	9:7	Epistasis recesiva doble
FMS	72:10:6	12:3:1	Epistasis dominante simple
FMPP	53:32	9:7	Epistasis recesiva doble
PGP	83:2	15:1	Epistasis dominante doble
PF	50:36	9:7	Epistasis recesiva doble
PCC	73:13	13:3	Epistasis dominante recesiva
PC	73:12:1	12:3:1	Epistasis dominante simple
PS	55:31	9:7	Epistasis recesiva doble
FMC	49:38	9:7	Epistasis recesiva doble
FCC	62:13:12	9:3:4	No se ajusta a herencia Mendeliana
FACP	66:19:2	12:3:1	Epistasis dominante simple
FCPP	75:11:1	12:3:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
FCJC	53:32:1	9:3:4	No se ajusta a herencia Mendeliana
FCPU	70:13:2:2	9:3:3:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
FAAP	83:4	15:1	Epistasis dominante doble
SFL	51:21:9:3:2	6:4:4:1:1	No se ajusta a herencia Mendeliana
SFT	83:3	15:1	Epistasis dominante doble
CSAP	46:40:1	9:3:4	No se ajusta a herencia Mendeliana
CSAC	86:1	15:1	Epistasis dominante doble
CSS	83:4	15:1	Epistasis dominante doble
CS	83:2	15:1	Epistasis dominante doble

^zAbreviaciones de variables referidas en el Cuadro 2.

La ondulación del borde del limbo, el estilo, el polen, la cabeza de clavo en el pedicelo y la conspicuidad de las lenticelas en fruto maduro presentaron herencia de tipo epistasis dominante recesiva. La forma en la parte estilar del fruto maduro presentó herencia de tipo epistasis recesiva simple, mientras que la forma del ápice del limbo, el tipo de floración, la forma del extremo peduncular, la presencia de cuello, la posición de pedicelo, la persistencia del perianto, la forma y superficie del pedicelo y color del fruto madurado presentaron herencia de tipo epistasis recesiva doble (Cuadro 3).

4.5.2 Variables cuantitativas

En las variables cuantitativas se encontró herencia transgresiva. Esta se identifica cuando los individuos de la progenie superan en uno o en ambos sentidos de la escala a sus progenitores, para estas variables se observó que en todos los casos algunos individuos de la progenie superan o igualan a sus progenitores.

Para la longitud de entrenudos del brote, longitud del eje de la inflorescencia, longitud del fruto maduro y relación longitud del fruto/longitud de la semilla y tamaño de las lenticelas del fruto los progenitores se encuentran en el mismo intervalo y algunos individuos de la progenie superan a sus progenitores y otros presentaron valores menores a estos (Figura 1).

Se encontró que 'Pionero' presentó valores más altos que 'Hass' y que algunos individuos de la progenie superan a sus progenitores para las variables longitud del limbo, relación longitud/anchura del limbo, número de venas secundarias diámetro del fruto maduro, diámetro de la inserción del pedicelo, longitud del pedicelo y anchura de la capa junto a la cáscara (Figura 2).

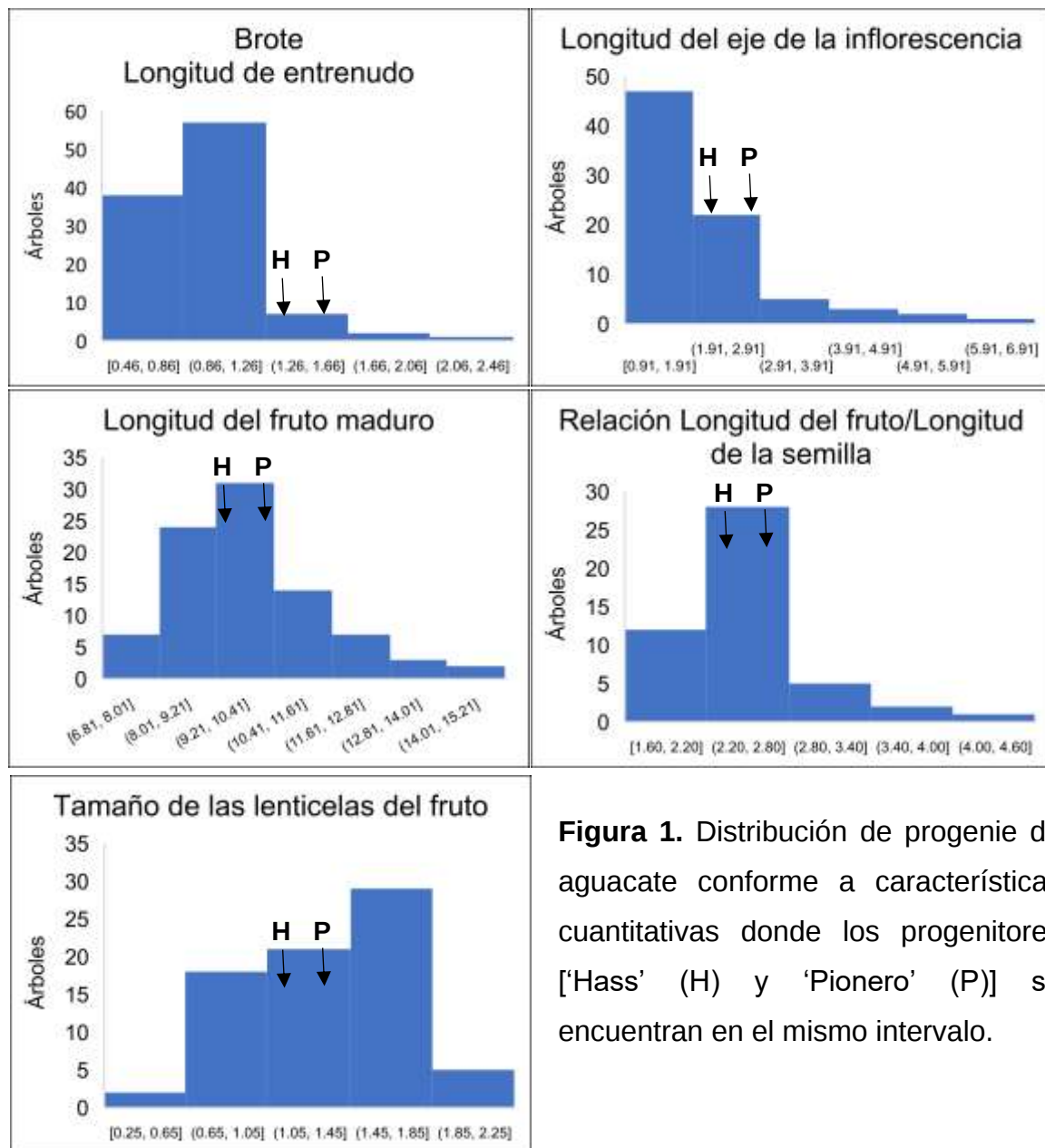


Figura 1. Distribución de progenie de aguacate conforme a características cuantitativas donde los progenitores ['Hass' (H) y 'Pionero' (P)] se encuentran en el mismo intervalo.

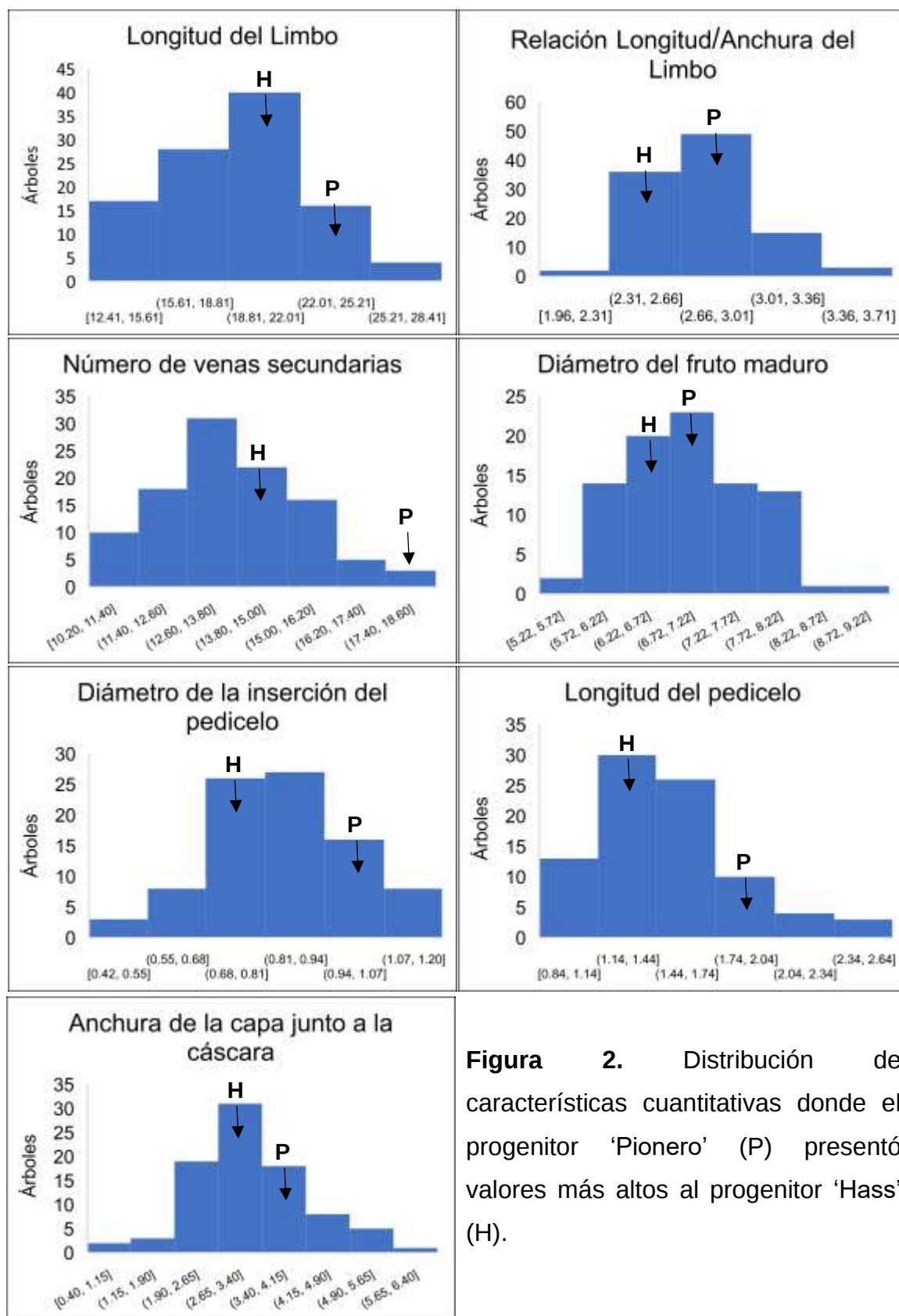


Figura 2. Distribución de características cuantitativas donde el progenitor 'Pionero' (P) presentó valores más altos al progenitor 'Hass' (H).

Para las variables anchura del limbo, longitud del pedicelo, relación longitud/diámetro del fruto y grosor de la cáscara el progenitor ‘Hass’ presentó valores más altos que el progenitor ‘Pionero’ pero a su vez algunos individuos de la progenie superaron a sus progenitores y que fueron menores a ellos (Figura 3).

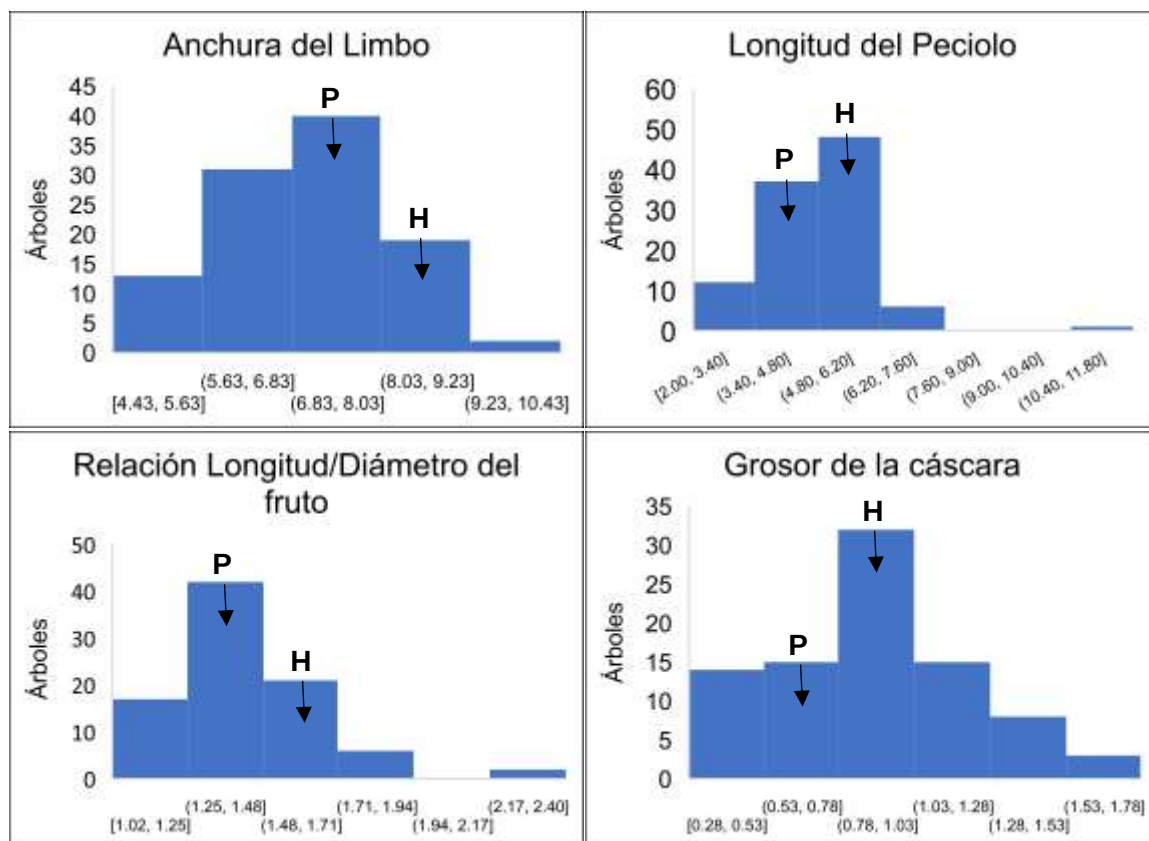


Figura 3. Distribución de progenie de aguacate conforme a características cuantitativas donde el progenitor ‘Hass’ (H) presenta valores más altos al progenitor ‘Pionero’ (P).

4.6 Discusión

En los cultivos perennes, se dificulta obtener información precisa, debido a que son altamente heterocigóticos, la propagación por semillas presenta una alta variabilidad genética y se requieren evaluar poblaciones grandes para realizar

este tipo de estudio, del cual se puede derivar poca información relacionada con la herencia del cultivo (Bandera & Pérez, 2015). En la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero' se encontró alta variabilidad y algunas características evaluadas no se ajustaron a herencia mendeliana como lo mencionó Cornide, (2001) en experimentos realizados en maíz y trigo con el fin de confirmar la herencia mendeliana arrojaron que la variación de muchas características no se ajustaba al patrón discontinuo descrito por Mendel.

Las características fenotípicas y algunas formas de comportamiento que no siguen patrones de herencia clásicos o mendelianos, pertenecen a los modos de herencia atípicos, donde los rasgos fenotípicos están determinados por factores genéticos en los que intervienen varios genes y que además están influenciados por factores ambientales modificando dichos rasgos, haciendo que la gama de características fenotípicas sea más amplia (López & Figueroa, 2014).

Existe muy poca información relacionada con la herencia de los caracteres cuantitativos (Bandera & Pérez, 2015). Sin embargo, las gráficas de agrupamiento son una herramienta para determinar presencia o no de herencia transgresiva, para esta investigación se encontró que para todas las características cuantitativas hay presencia de esta. Muy pocas características cuantitativas tienen estimados de heredabilidad en sentido estrecho muy altos o bajos, lo cual sugiere que tanto los genes, como el ambiente, juegan un papel en la expresión de muchos fenotipos al azar, varianza aditiva es la componente de la varianza genética que se debe a la acción aditiva de los alelos de los loci del carácter cuantitativo. Este efecto de aditividad es el más importante, porque es el efecto que se transmite de progenitores a descendientes, o sea, el efecto que se hereda (Pérez, Sigarroa, Rodríguez, Bandera & Valdés-Infante, 2013).

Al estudiar las características cualitativas se encontró que tienen un comportamiento muy parecido al esperado, las características densidad de la pubescencia en la parte inferior, aroma a anís del limbo, pubescencia de la parte interna del sépalo y la conspicuidad de fibras en la pulpa del fruto madurado fueron iguales que es sus progenitores, lo que sugiere que estas pueden ser

dominantes para ambos progenitores. Por otro lado, la mayoría de las características se ajustan a herencia mendeliana lo que atestigua que se ha estudiado un poco más la herencia de las características cualitativas (Bandera & Pérez, 2015).

En investigaciones enfocadas a la evaluación de la variabilidad genética presente en poblaciones de varios cultivos, se han detectado diferencias significativas entre los genotipos, así como una interacción genotipo x ambiente altamente significativa para la mayoría de las variables evaluadas (Pérez, Sigarroa, Rodríguez, Bandera & Valdés-Infante, 2013). En saramuyo (*Annona squamosa* L.), encontraron una gran variabilidad genética entre las progenies en las características asociados con el rendimiento, y algunos de los relacionados con la calidad de los frutos (Lima et al., 2007). Esto explica la variabilidad existente en la progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'.

4.7 Conclusiones

En las variables cualitativas se observaron tres grupos, el primer grupo está determinado por las características que comparten el mismo valor tanto progenitores como progenie, el segundo está determinado por las características que no se ajustan a herencia mendeliana y el tercer grupo por las que presentan herencia mendeliana principalmente por tipos de epistasis.

En las variables cuantitativas se presentó una alta variabilidad en los datos obtenidos de la progenie mostrando que para las características evaluadas hay presencia de herencia transgresiva.

Literatura citada

- Bandera Fernández, E. & Pérez Pelea, L. (2015). Revisión bibliográfica mejoramiento genético de guayabo (*Psidium guajava* L.). *Cultivos Tropicales*, 36, 96-110
- Barrientos-Perez, F., & Sánchez-Colin, S. (1982). Height variability obtained from a new dwarf avocado tree population. *California Avocado Society Yearbook*, 66, 155-160.
- Barrientos Priego, A. F., Barrientos Pérez, F., Sánchez Colín, S. & Aguilar Melchor, J. J. (1991). Utilización del huerto vivero para reducir la fase juvenil de plántulas de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture*, 35, 18-22.
- Barrientos, A. F., Reyes, J., & Aguilar, J. (2010). *Manual Grafico para la descripción varietal de aguacate*. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SNICS-SAGARPA) y la Universidad Autónoma Chapingo. Tlalnepantla, Estado de Mexico, Mexico
- Cornide, M. T. (2001). La genética vegetal, el mejoramiento y la sociedad. *Cultivos Tropicales*, 22(3), 73-82.
- Chen, H., Ashworth, V. E., Xu, S., & Clegg, M. T. (2007). Quantitative genetic analysis of growth rate in avocado. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132(5), 691-696.
- De la Cruz Torres, E., & Sahagún Castellanos, J. (1997). Estimación de componentes de varianza genética y heredabilidad en caracteres de interés agronómico en aguacate (*Persea americana* Mill.). *Memoria de la Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX*, S.C. (pp. 95-105). Coatepec Harinas: Fundación Salvador Sánchez-Colín-CICTAMEX.
- Espíndola-Barquera, M. de la C. (2019). Perspectivas de nuevas selecciones de aguacate en Mexico. *Memoria IX Congreso Mundial del Aguacate*. Medellín, Colombia.
- Franco, T. L., & Hidalgo, R. (2003). Análisis estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI).
- Hardner, C., Winks, C., Stephenson, R., & Gallagher, E. (2001). Genetic parameters for nut and kernel traits in macadamia. *Euphytica*, 117, 151-161.
- Hernández Villarreal, A. E. (2013). Caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. *Revista Bio Ciencias*, 2(3), 113-118.
- Hernández Villarreal, A. E.; Navarrete Valencia, A.L.; Luna Esquivel, G. (2014). *Caracterización morfológica de materiales de Jamaica (Hibiscus sabdariffa)*

- L.) *de cinco regiones de Mexico*. (Tesis de maestria) Universidad Autónoma de Nayarit, Xalisco, México.
- Lavi, U., Lahav, E., Degani, C., Gazit, S., & Hillel, J. (1993). Genetic variance components and heritabilities of several avocado traits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(3), 400-404.
- Lima e Silva, P. S., Priscila Antonio, R., Henrique Mariguele, K., Barbosa e Silva, K. M., de Lima, L. K., & do Vale Silva, J. C. (2007). Estimates of genetic parameters for fruit yield and quality in custard apple progenies. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 29(3), 550- 558.
- Lobo Arias, M. (2006). Recursos genéticos y mejoramiento de frutales andinos: una visión conceptual. *Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 7(2), 40-54.
- López Santillán, I.C. Figueroa Gutiérrez, A.H. (2014). Estudio de la herencia poligénica. Pachuca: Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Mendel, G. (1866). Versuche über pflanzenhybriden. *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn, Bd. IV für das Jahr 1865, Abhandlungen*, 3-47.
- Pérez Pelea, L., Sigarroa González, A., Rodríguez Medina, N. N., Bandera Fernández, E., & Valdés-Infante Herrero, J. (2013). Eestinación de la heredabilidad en sentido ancho a caracteres de importancia agricola evaluados en una población de guayabo (*Psidium guajava* L.). *Cultivos Tropicales*, 34(1), 66-73.
- Rocha Salvarrieta, P. J. (2002). Teoría y práctica para la extracción y purificación del ADN de palma de aceite. *Palmas*, 23 (3), 9-16.
- Rodríguez-Porras, L., & Raventós-Vorst, H. (2009). Identificación de genes causales y de susceptibilidad para enfermedades de herencia Mendeliana y compleja. *Acta Médica Costarricense*, 51(1), 10-15

ANEXOS

Anexo 1. Progenie de aguacate 'Hass' x 'Pionero'.



Anexo 2. Toma de datos



