



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Estimación de parámetros genéticos en
progenies tipo *dura* de palma de aceite (*Elaeis
guineensis* Jacq) para la selección de
progenitores elite con características de lento
crecimiento del estípite y alta productividad**

Andrés Alejandro Tupaz Vera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Agronomía Escuela de Posgrados
Medellín, Colombia
2022

**Estimación de parámetros genéticos en
progenies tipo *dura* de palma de aceite (*Elaeis
guineensis* Jacq) para la selección de
progenitores elite con características de lento
crecimiento del estípite y alta productividad**

Andrés Alejandro Tupaz Vera

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Iván Mauricio Ayala Díaz Ph.D.

Codirector:

Carlos Felipe Barrera Sánchez Ph.D.

Línea de Investigación:

Genética y Fitomejoramiento

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Agronomía Escuela de Posgrados
Medellín, Colombia

2022

(Dedicatoria o lema)

Mi más grande agradecimiento a Dios Todopoderoso y a su hijo Jesucristo por su incondicional e infinito Amor para levantarme siempre y renovarme las fuerzas, a mi esposa Franci por su fe y sus oraciones, a mis hijos Juliana Maribel y José Alejandro por su inspiración y quisiera dedicar esta etapa de mi vida a dos personas que ya no están conmigo, pero que todos los días están dentro de mi memoria y de mi corazón; a mi madre Mary Elcy y a mi mentor el Doctor Guillermo Vallejo, a los dos infinitas gracias por su amor, por su ejemplo y por creer en mí y en mi esencia de observador.

Muchas gracias.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Andrés Alejandro Tupaz Vera

Nombre

Fecha 26/04/2022

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a las siguientes personas que, con su conocimiento, orientación, apoyo y dedicación a mi tesis de maestría, hicieron posible el desarrollo y culminación de este trabajo de investigación:

- Iván Mauricio Ayala Díaz – Líder del programa de Mejoramiento Genético en Cenipalma, como director de la tesis y orientador durante el proceso de planeación y desarrollo de mi tesis de maestría.
- Carlos Felipe Barrera – Profesor asociado Universidad Nacional de Colombia, como codirector en mi tesis de maestría y orientador durante el proceso de planeación y desarrollo de mi tesis de maestría.
- Hernán Mauricio Romero Angulo – Director de Investigación en Cenipalma, como direccionador del trabajo de investigación en palma de aceite en Colombia y en especial liderar el Programa de Biología y Mejoramiento de Cenipalma.
- Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), como apoyo técnico y logístico en el desarrollo de la investigación y permitir usar resultados de investigación para mi proyecto de grado.
- Fondo de Fomento Palmero (FFP), por la financiación del proyecto de investigación del cual se generó la tesis de maestría.
- Personal técnico del laboratorio de Semillas – Cenipalma, por la ayuda en la recolección de los datos de investigación.

Resumen

Estimación de parámetros genéticos en progenies tipo *dura* de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq) para la selección de progenitores elite con características de lento crecimiento del estípite y alta productividad

En palma de aceite, el mejoramiento genético desempeña un papel fundamental en la sostenibilidad del cultivo. La selección de progenitores con características deseables como alta producción de racimos de fruta fresca (FFB), alto contenido de aceite, resistencia a enfermedades, adaptabilidad y palmas compactas de lento crecimiento, entre otras, son el insumo para la obtención de cultivares que satisfagan las necesidades de grasas y aceites en los mercados globales. Por esta razón, los programas de mejoramiento deben ser dinámicos y continuos en la evaluación y selección de cultivares promisorios.

En la década de 1960 se sembraron en Colombia palmas tipo *dura* (Ciclo 0), las cuales provienen en su mayoría de germoplasma del sudeste asiático y en algunos casos de África. A fines de la década de los 90s, Cenipalma desarrolló progenies con el propósito de fijar rasgos morfo-agronómicos de interés, especialmente con énfasis en palmas enanas, que se sembraron en un ciclo de mejoramiento (Ciclo 1) de selección recurrente (RRS), ubicado en el Campo Experimental Palmar de la Vizcaína (CEPV).

El objetivo principal de este trabajo fue seleccionar familias y plantas individuales sobresalientes a partir de progenies *dura* x *dura* enanas para los principales rasgos de interés en palma de aceite. Mediante parámetros genéticos y la ganancia genética en las dos poblaciones RRS. Como resultado, para los parámetros de rendimiento los valores más altos alcanzados para racimos de fruta fresca (FFB), número de racimos (BNO) y aceite por racimo (OB) fueron de 220 kg palma⁻¹, 16 racimos por palma y 22% de aceite respectivamente. El incremento anual en altura mostró progenies enanas con 0.28 m año⁻¹ y palmas individuales con valores de 0.24 m año⁻¹ como el incremento anual en altura (HT) con 72% de alta

heredabilidad en sentido amplio (H^2_B) y 15 de coeficiente de variación genética (CVg). Se obtuvieron altas ganancias genéticas para las características de rendimiento y componentes del racimo, tales como FFB, BNO y OB con valores de 19% de FFB, 18.7% de BNO y 6% de OB para todo el ciclo de cultivo debido principalmente a la alta presión de selección realizada en los genotipos utilizados como parentales del ciclo 1 de SRR, y altas heredabilidades H^2_B y CVg de los rasgos evaluados. Esta investigación son el insumo para mejorar las selecciones de parentales de tipo *dura* sobresalientes para un nuevo ciclo de RRS y para desarrollar progenies enanas *dura* x *pisifera* (DxP) en palma de aceite para aumentar la vida útil, económica y productiva del cultivo.

Palabras clave: heredabilidad, introgresión, rasgos genéticos, mejoramiento y selección y ganancia genética.

Abstract

Estimation of genetic parameters in hard-type progenies of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) for the selection of elite parents with characteristics of slow stem growth and high productivity

Genetic improvement in oil palm plays a fundamental role in its sustainability. The selection of parents with desirable characteristics such as high production of fresh fruit bunches (FFB), high oil content, disease resistance, adaptability, slow-growing compact palms, among others. For this reason, breeding programs must be dynamic and continuous in the evaluation and selection of promising cultivars to satisfy market demands.

In the 1960s, *dura* type palms (Cycle 0) were planted in Colombia, which come mostly from Southeast Asian germplasm and in some cases from Africa. At the end of the 90's, Cenipalma developed progenies with the purpose of fixing morpho-agronomic traits of interest, especially with emphasis on dwarf palms.

Subsequently, they were sown in a recurrent selection (SRR) breeding cycle (Cycle 1), located in the Campo Experimental Palmar de la Vizcaína (CEPV).

The main objective of this work was to select outstanding families and individual plants from the behavior of genetic parameters in *dura* x *dura* dwarf progenies calculated for the main traits of interest in oil palm. Genetic parameters and genetic gain were calculated in the two RRS populations for the most important traits, families and individual palms within families were identified. In the yield parameters, the highest values achieved for fresh fruit bunches (FFB), number of bunches (BNO), oil per bunch (OB) were 220 kg palm⁻¹, 16 bunches per palm and 22% respectively. Additionally, the annual increase in height showed dwarf progenies with 0.28 m year⁻¹ annual increase and individual palms with values of 0.24 m year⁻¹. Genetic traits of interest with high broad sense heritability (H^2_B) and coefficient of genetic variation (CVg) were identified, such as the annual increase in height (HT) with 72% H^2_B and 15 CVg. On the other hand, high genetic gains were obtained for yield traits and bunch components, such as FFB, BNO and OB with values of 19%, 18.7% and 6% for the entire crop cycle mainly due the high selection pressure, and high H^2_B and CVg of the traits. The results of this research are the input to improve the selections for outstanding *dura* parentals for a new RRS cycle and to develop dwarfs DxP progenies in oil palm to increase the economical and productive lifespan of the crop.

Keywords: heritability, introgression, genetic traits, breeding and selection and genetic gain.

Contenido

| | |
|--|------------|
| 1. Capítulo 1..... | 33 |
| 1.1 Resumen..... | 33 |
| 1.1.1 Palabras claves | 34 |
| 1.2 Introducción..... | 34 |
| 1.3 Materiales y Métodos. | 37 |
| 1.3.1 Material vegetal | 37 |
| 1.3.2 Recolección de datos..... | 37 |
| 1.3.3 Análisis estadístico. | 39 |
| 1.4 Resultados y discusión..... | 41 |
| 1.4.1 Componentes de rendimiento. | 41 |
| 1.4.2 Componentes vegetativos. | 44 |
| 1.4.3 Componentes del racimo y la producción de aceite. | 55 |
| 1.4.4 Heredabilidad y parámetros genéticos..... | 63 |
| 1.4.5 Análisis de correlación de parámetros agronómicos. | 66 |
| 1.5 Conclusiones..... | 69 |
| 1.6 Bibliografía. | 70 |
| 2. Capítulo 2..... | 77 |
| 2.1 Resumen..... | 77 |
| 2.1.1 Palabras claves | 78 |
| 2.2 Introducción..... | 78 |
| 2.3 Materiales y métodos. | 81 |
| 2.3.1 Sitio de estudio y genealogía de las poblaciones..... | 81 |
| 2.3.2 Material vegetal | 81 |
| 2.3.3 Recolección de datos | 83 |
| 2.3.4 Análisis de estadístico | 84 |
| 2.4 Resultados. | 86 |
| 2.4.1 Estimación de parámetros genéticos | 86 |
| 2.5 Discusión. | 98 |
| 2.6 Conclusiones..... | 102 |
| 2.7 Bibliografía. | 103 |
| 3. Capítulo 3..... | 110 |
| 3.1 Introducción..... | 110 |
| 3.2 Selección de las mejores progenies y de los mejores individuos. | 111 |
| 3.2.1 Por características de rendimiento..... | 111 |
| 3.2.2 Por componentes de aceite. | 113 |
| 3.2.3 Por características vegetativas. | 114 |
| 3.3 Esquema de cruzamientos para la obtención de cultivares <i>dura x pisifera</i> | 116 |
| 3.4 Conclusiones..... | 116 |
| 4. Conclusiones y recomendaciones finales..... | 117 |
| 4.1 Conclusiones..... | 117 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 118 |
| 5. Bibliografía general..... | 120 |

Lista de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1-1. Esquema del ANOVA y los cuadrados medios esperados, para el análisis de progenies de hermanos completos en palma de aceite..... | 40 |
| Tabla 1-2. Cuadrados medios y componentes de varianza para rasgos de rendimiento en progenies <i>dura x dura</i> | 42 |
| Tabla 1-3. Promedios generales de los rasgos de rendimiento en cada progenie evaluada..... | 44 |
| Tabla 1-4. Cuadrados medios y componentes de varianza para rasgos vegetativos en progenies <i>dura x dura</i> | 47 |
| Tabla 1-5. Promedios generales de los rasgos vegetativos en cada progenie y años evaluados..... | 51 |
| Tabla 1-6. Cuadrados medios y componentes de varianza para los rasgos de aceite en progenies <i>dura x dura</i> | 57 |
| Tabla 1-7. Promedios generales de los rasgos de componentes de aceite en cada progenie evaluada..... | 61 |
| Tabla 1-8. Componentes de varianza y parámetros genéticos para los rasgos cuantitativos evaluados..... | 65 |
| Tabla 2-1. Características de las plantas seleccionadas..... | 82 |
| Tabla 2-2. Estimación de parámetros genéticos para 13 características, de rendimiento, medidas vegetativas y componentes de aceite, para la población C1 mejorada en palma de aceite..... | 89 |
| Tabla 2-3. Ganancia genética para diferentes rasgos genéticos, en dos ciclos de mejoramiento genético en palma de aceite..... | 93 |
| Tabla 2-4. Reporte de varios autores para la estimación de la heredabilidad en sentido amplio, en diferentes caracteres genéticos de interés en palma de aceite..... | 101 |

Lista de figuras

- Figura 1-1.** Incremento anual de altura en siete progenies *dura x dura* y tres cultivares comerciales. El punto rojo corresponde a la media general de las progenies o cultivares y la línea horizontal a la mediana. DxA: Deli x AVROS, DxL: Dele x La Mé y DxY: Deli x Yangambi..... 55
- Figura 1-2.** Correlacion de Pearson para los rasgos de rendimiento en progenies *dura x dura*. (A) etapa joven. (B) etapa adulta y (C) todo el ciclo del cultivo. FFB: racimos de fruta fresca, BNO: número de racimos, ABW: peso medio del racimo. *** correlaciones altamente significativas ($p \leq 0.01$). 67
- Figura 1-3.** Correlacion de Pearson para los rasgos vegetatiivos en progenies *dura x dura*. HT: incremento de altura, LA: área foliar, LAI: índice de área foliar. *** correlaciones altamente significativas ($p \leq 0.01$). 68
- Figura 1-4.** Correlacion de Pearson para los rasgos de componentes de racimo en progenies: ODM: aceite a mesocarpio seco, OB: aceite a racimo, NFB: frutos normales a racimo, MF: mesocarpio a fruto SF: cuesco a fruto. *** correlaciones altamente significativas ($p \leq 0.01$), * correlaciones significativas ($p \leq 0.05$)..... 68
- Figura 2-1.** Box-plot para los principales rasgos morfo-agronómicos comparando la población original evaluada, C0-Monterrey (color rojo) y las palmas seleccionadas de la C0 para generar el ciclo 1 de SRR en la población C1-Vizcaina (color azul). a) RFF: Racimos de fruta fresca (kg palma^{-1}), b) NR: Número de racimos ($\text{racimos palma}^{-1}$), c) PMR: Peso medio de racimo (kg), d) HT: Incremento de altura (m año^{-1}), y e) AF: Almendra a fruto (%). En los gráficos de cajas, el rombo de color rojo representa el promedio general y la línea horizontal la mediana de los datos..... 87
- Figura 2-2.** Histogramas de frecuencias para la respuesta de selección para los rasgos de rendimiento RFF y NR en dos ciclos de mejoramiento en palma de aceite. C0: población original de Monterrey, C1: población de progenies mejoradas en la Vizcaína y Δg : ganancia genética. La línea punteada amarilla representa la media de la población C0 y la línea punteada azul representa el promedio de la población C1..... 96
- Figura 2-3.** Histogramas de frecuencias para la respuesta de selección para los rasgos de componentes de racimo MF y ACR en dos ciclos de mejoramiento en palma de aceite. C0: población original de Monterrey, C1: población de progenies mejoradas en la Vizcaína y Δg : ganancia genética. La línea punteada amarilla representa la media de la población C0 y la línea punteada azul representa el promedio de la población C1..... 97

- Figura 2-4.** Histogramas de frecuencias para la respuesta de selección para los rasgos de componentes de racimo AF y PMF en dos ciclos de mejoramiento en palma de aceite. C0: población original de Monterrey, C1: población de progenies mejoradas en la Vizcaína y Δg : ganancia genética. La línea punteada amarilla representa la media de la población C0 y la línea punteada azul representa el promedio de la población C1. 98
- Figura 3-1.** Comportamiento de la producción de racimos de fruta fresca (RFF) en las diferentes progenies y palmas evaluadas. La línea de color negro indica el valor de selección para la característica evaluada..... 111
- Figura 3-2.** Comportamiento del número de racimos producido por palma al año (NR) en las diferentes progenies y palmas evaluadas. La línea de color negro indica el valor de selección para la característica evaluada..... 112
- Figura 3-3.** Comportamiento de la cantidad de aceite a racimo por palma (ACR) en las diferentes progenies y palmas evaluadas. La línea de color negro indica el valor de selección para la característica evaluada..... 113
- Figura 3-4.** Comportamiento del rasgo de incremento de altura (HT) en las diferentes progenies y palmas evaluadas. En los gráficos de cajas, el triángulo de color rojo representa el promedio general y la línea horizontal la mediana de los datos..... 115
- Figura 3-5.** Esquema de cruzamientos en diseño Carolina del Norte II. 116

Lista de Símbolos y abreviaturas

| Abreviatura | Término | Unidad |
|--------------------|---------------------------------|-------------------|
| RFF | Racimos de fruta fresca | kg/palma/año |
| NR | Número de racimos | racimos/palma/año |
| PMR | Peso promedio racimo | kg/racimo |
| HTL | Hojas totales por planta | Hojas/palma/año |
| STP | Sección transversal del peciolo | cm ² |
| LR | Longitud del raquis | cm |
| LP | Longitud del peciolo | cm |
| AP | Ancho del peciolo | cm |
| NF | Número de foliolos | unidad |
| HT | Incremento de altura | m/palma/año |
| AF | Área foliar | cm ² |
| IAF | Índice de área foliar | Índice |
| DI | Diámetro de estípite | m |
| PMF | Peso medio del fruto | gr |
| ESR | Espigas a racimo | % |
| ACMS | Aceite a mesocarpio seco | % |
| ACMF | Aceite a mesocarpio fresco | % |
| ACR | Aceite a racimo | % |
| FNR | Frutos normales a racimo | % |
| FR | Formación de racimo | % |
| MF | Mesocarpio a fruto | % |
| AF | Almendra a fruto | % |
| CF | Cuesco a fruto | % |

Introducción

El cultivo de la palma de aceite – Generalidades.

El género *Elaeis* tiene dos especies en su conformación, *Elaeis guineensis* Jacq en forma silvestre, semi-silvestre o en forma cultivable, esta última sembrada principalmente en áreas de los trópicos ecuatoriales; África, Sudeste de Asia y en el Sur y Centro de América. Por otro lado, la especie *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés se encuentra en Sur y Centro de América, que ha sido llevada a varios países para su reproducción e investigación, tiene su principal importancia dentro de procesos de hibridación entre las dos especies, para la obtención de híbridos interespecíficos (Corley y Tinker, 2016).

El aceite de palma se extrae del mesocarpio del fruto de la semilla a través de procedimientos mecánicos industrializados y de la nuez del fruto se extrae el aceite de palmiste que contiene ácidos grasos como caproico, caprílico, cáprico, laúrico, componentes que son poco frecuentes en el aceite del mesocarpio. En general, el aceite rojo (mesocarpio) está constituido por una mezcla de ésteres de glicerol (triglicéridos) y es fuente natural de carotenos y vitamina E. Con base en el aumento significativo de su producción a nivel mundial, se han diversificado sus usos en otros campos como el de combustibles, detergentes, cosméticos, plásticos, farmacéuticos entre otros, ya que cumple con las especificaciones y las características deseables de los productos requeridos en estos sectores. Lo anterior hace del aceite de palma una materia prima de gran interés para el desarrollo industrial (Fontalvo Gómez, 2014).

El cultivo de palma de aceite se ha expandido rápidamente en los últimos años y actualmente ocupa el segundo lugar, después del cultivo de la Soya, como la principal fuente mundial de suministro de aceites y grasas. A nivel mundial

Indonesia, Malasia, Tailandia y Nigeria son los países líderes en el área sembrada y en la producción del cultivo, siendo Indonesia y Malasia los países de mayor exportación mundial y como los principales países importadores del aceite de palma se encuentran la India, China, Holanda y Pakistán. Teniendo en cuenta este importante crecimiento de área en diferentes ambientes, la generación y obtención de cultivares con alto rendimiento, compactos, de lento crecimiento, alta tasa de extracción y resistentes a problemas sanitarios es una prioridad para el presente y el futuro del cultivo (Kumar et al, 2018).

Palma de aceite en Colombia

Colombia ocupa el cuarto lugar a nivel mundial detrás de Indonesia, Malasia y Tailandia y el primero en América Latina en producción de aceite de palma (Fedepalma, 2020). Durante el 2020 el área sembrada fue de 590.189 hectáreas, 21.801 hectáreas adicionales a las 568.387 reportadas en 2019, registrando un incremento del 4%. Del total, 112.144 hectáreas se encontraban en fase de desarrollo y 478.045 hectáreas en producción, lo que arroja una composición del 19% en edad improductiva y del 81% en etapa de producción (Fedepalma, 2021). La siembra en el país se encuentra bien distribuida en cuatro principales zonas productoras de palma: 1) Zona Suroccidental (municipio de Tumaco del departamento de Nariño), ubicada en el extremo sur oriental de Colombia sobre la costa pacífica, límites con Ecuador ; 2) Zona Norte (departamentos de Magdalena, Cesar, Córdoba, Antioquia y Bolívar); 3) Zona Central (Norte de Santander, Santander, Sur del departamento de Bolívar, Antioquia y el Sur del Cesar) y 4) Zona Oriental (departamentos del Caquetá, Casanare, Cundinamarca y Meta), ubicada en su mayor parte en una amplia llanura al oriente del país, presentando en su totalidad un cubrimiento de 21 departamentos y 160 municipios (Fedepalma, 2020). Del total de hectáreas del cultivo de Palma de Aceite en Colombia, el 46% corresponde a la Zona Oriental, 31% a la Central, 19% a la Norte y 4% a la zona Suroccidental (Fedepalma, 2021).

El sector palmero colombiano ha enfocado sus esfuerzos en la consolidación de una agroindustria sostenible, reconociendo a la sostenibilidad como una prioridad para garantizar su competitividad y viabilidad en el tiempo. Es así como ha llevado a cabo actividades para la implementación de buenas prácticas ambientales, que permitan el desarrollo de una palmicultura en convivencia armónica con su entorno natural, sin causar deforestación, haciendo uso eficiente de los recursos naturales, y previniendo y mitigando los impactos ambientales.

Y este plan de sostenibilidad se ha venido llevando a cabo bajo unos enfoques específicos que incluyen indicadores relevantes como:

- A. Área sembrada y producción de aceite de palma certificado bajo estándares internacionales de sostenibilidad.
- B. Participación de las empresas palmeras en el Acuerdo de Cero Deforestación.
- C. Presencia de cultivos de palma de aceite y plantas de beneficio en jurisdicción de las Corporaciones Autónomas Regionales.
- D. Adopción de estrategias para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, y generación de energía renovable a partir de subproductos del proceso de extracción del aceite de palma.
- E. Aprovechamiento de biomasa sólida mediante sistemas de compostaje.
- F. Presencia de cultivos de palma de aceite en las áreas, zonas y subzonas hidrográficas del país, y participación del sector en el ordenamiento y manejo del recurso hídrico (Fedepalma, 2021).

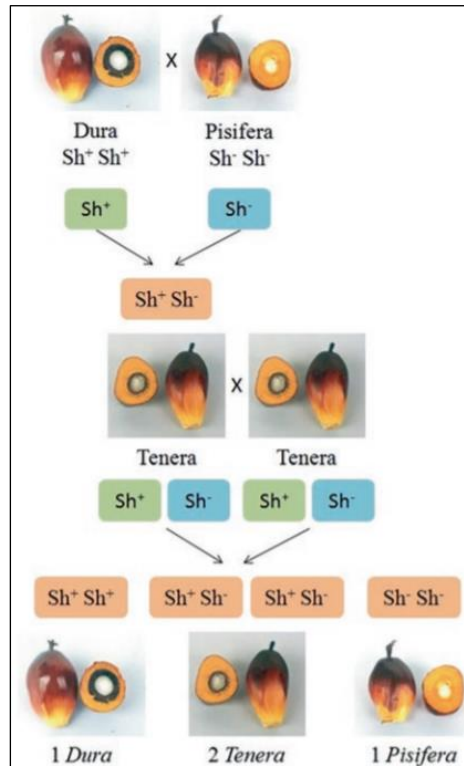
Mejoramiento genético en palma de aceite

La palma de aceite tiene una base genética estrecha, su origen proviene de un número pequeño de palmas ancestrales, el origen del progenitor femenino *Deli dura* proviene de cuatro (4) palmas del jardín botánico de Bogor y la fuente de polen como progenitor masculino *pisifera* descende de un número limitado de plantas (Al-Khayri et al., 2019). En la palma de aceite existen tres tipos de fruto; *dura*,

pisifera y *tenera*, el último siendo un híbrido intraespecífico entre palmas con frutos tipo *dura* x tipo *pisifera* (Beirnaert & Vanderweyen, 1941). Donde los tipos de frutos que definen el grosor o la ausencia del endocarpio o shell, están codificados por el gen Sh (Reyes et al., 2015; Singh et al., 2013). Los cultivares comerciales de palma de aceite con tipo de fruto *tenera* por tener mayores contenidos de mesocarpio en el fruto, por lo tanto mayores contenidos de aceite por hectárea (Kalyana Babu et al., 2017), para la producción de semillas comerciales el parental femenino siempre es de tipo *dura* (Rajanaidu, 2016).

Tipo de frutos en palma de aceite

Fruto tipo dura: su fruto tiene un endocarpio (cuesco) con un grosor de 2 a 8 mm de espesor. El contenido de mesocarpio o pulpa en el fruto está entre 35 a 55%, el contenido de almendra entre 7 a 20%. *Fruto tipo pisifera*: generalmente no tiene endocarpio o cuesco. La almendra es desnuda. El contenido de mesocarpio a fruto está alrededor de un 95%. *Fruto tipo tenera*: El grosor del endocarpio está entre 0,5 a 4 mm, el contenido de mesocarpio a fruto entre 60 a 96% y la almendra a fruto oscila entre 3 a 15% (Al-Khayri et al., 2019).

Figura 1. Tipos y características de los diferentes frutos de la palma de aceite.

Fuente: (Al-Khayri et al., 2019).

En general, la producción de semillas comerciales en palma de aceite son de tipo *tenera* de *Elaeis guineensis*, resultante del cruzamiento intraespecífico *dura* x *pisifera* (DxP) y depende del mejoramiento de las poblaciones, por lo cual los esquemas de mejoramiento están diseñados para el desarrollo y mejoramiento de estas dos poblaciones de manera independiente, dentro de los esquemas de mejoramiento genético, uno de los métodos más utilizados en el cultivo es la selección recíproca recurrente (Al-Khayri et al., 2019). Programas de mejoramiento genético en palma de aceite como el MPOB (Malaysian Palm Oil Board) en Malasia, CIRAD (La Recherche Agronomique pour de Developement) de Francia, ASD (Oil palm seeds and clones) en Costa Rica y otros ubicados en Ecuador, Brasil, Indonesia, Tailandia y Colombia, entre otros, han efectuado colectas o intercambios de germoplasma de palma de aceite, como un recurso importante para el desarrollo de nuevos cultivares (Rajanaidu, 2016). En este sentido, el desarrollo de progenies juega un papel importante dentro de la identificación de genotipos de altos

rendimientos, con una alta variabilidad genética y una oportunidad de introgresar características deseables en un programa de mejoramiento (Noh et al., 2014).

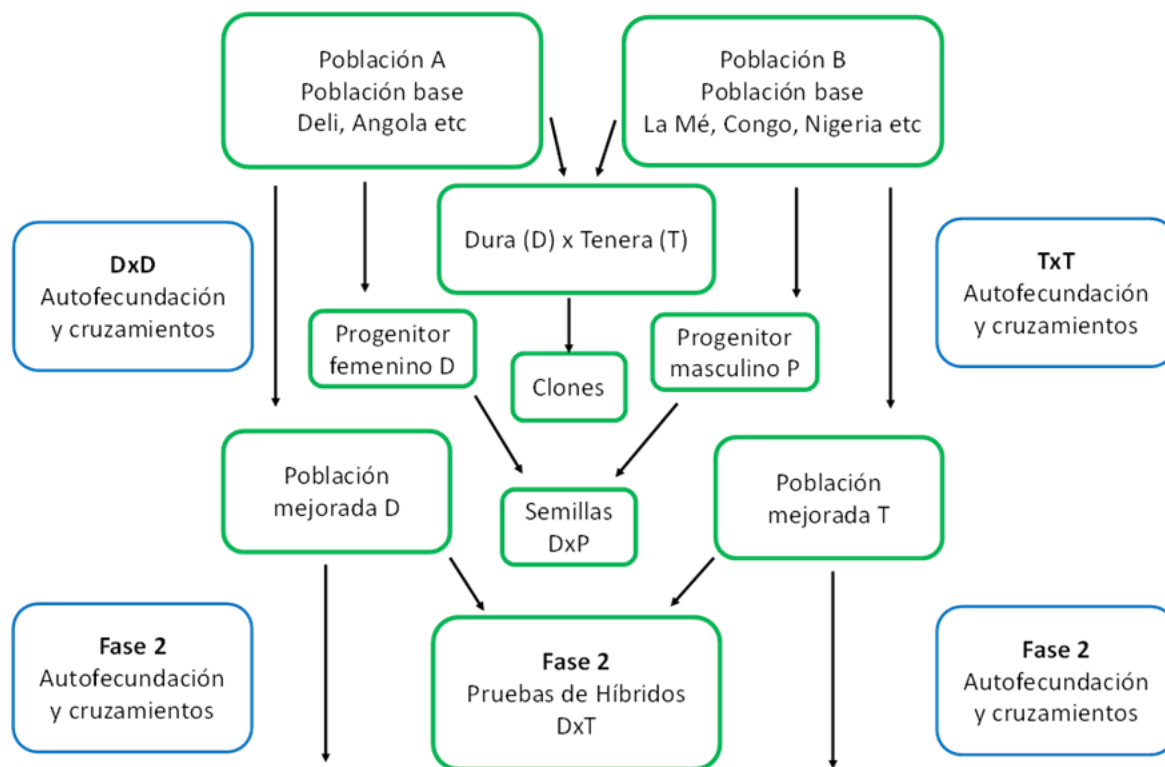
En palma de aceite, la selección recíproca recurrente (RRS) permite el mejoramiento de dos poblaciones de manera independiente y en cada una los caracteres de interés, para posteriormente ser combinadas, continuando con su evaluación y selección en un nuevo ciclo de mejoramiento, de tal manera que se mantenga un alto grado de variación genética en las poblaciones (Ishak et al., 2020). Por otra parte, la estrategia de hacer selección familiar e individual mediante el método *family and individual palm selection* (FIPS) en palma de aceite, permite identificar las mejores familias genéticas, y dentro de estas las mejores palmas tipo *dura* como parentales femeninos y palmas tipo *tenera* o *pisífera* para el mejoramiento de parentales masculinos encaminados a una producción de cultivares comerciales *tenera* (*dura* x *pisífera*), en donde la selección de los parentales candidatos se puede basar en las progenies o a nivel de palmas individuales. La selección individual tiene como énfasis la selección de caracteres con alta heredabilidad, mientras que aquellos con menor heredabilidad se evalúan por medio de las familias o pruebas de progenies (Ngando-Ebongue et al., 2012).

Dumortier (2007), describe la utilidad de la RRS con miras a mejorar las habilidades combinatorias a través de los diferentes ciclos de mejoramiento del cultivo, siguiendo de forma continua tres pasos fundamentales: 1) selección fenotípica intensiva, seleccionando palmas de tipo *Dura* para la producción de semilla o para la realización de pruebas de progenie, 2) revisión de la selección de acuerdo con los resultados de las pruebas de progenie. La selección de los progenitores se basa en las habilidades combinatorias generales calculadas para los componentes de rendimiento, componentes de racimo y las características vegetativas, y finalmente 3) la reproducción de semillas en nuevos jardines productores de progenitores femeninos.

El éxito de los programas de mejoramiento depende de la variabilidad genética, en el campo práctico utilizar la genética encontrada por cada ciclo de mejoramiento, ayuda considerablemente a establecer criterios de selección de individuos

genéticamente superiores (Gomes et al., 2021). En las estrategias de evaluación, selección y desarrollo de individuos que muestren superioridad genética en las características agronómicas, la estimación de ganancias genéticas se vuelve primordial para el éxito de la industria de los diferentes cultivos (Pavlotzky & Murillo, 2014; Rocha et al., 2021). En una especie perenne como la palma de aceite, la estimación de ganancia genética por unidad de tiempo (ciclo de mejoramiento) puede identificar la eficiencia de los métodos utilizados en un programa de mejoramiento genético (Lustri et al., 2021).

En este orden de ideas el objetivo principal de un programa de mejoramiento genético en palma de aceite es producir semilla con un elevado potencial genético, para obtener la máxima productividad en racimos de fruta fresca (RFF) y aceite (Vallejo Rosero, 1980), además con características deseables como por ejemplo lento crecimiento vertical del estípite, composición del perfil de aceites, resistencia a los problemas bióticos y abióticos que generalmente se presentan en un cultivo perenne de ciclo productivo largo.

Figura 2. Esquema simplificado del método de selección recíproca recurrente

Fuente: (Nor Azwani et al., 2020).

Genética cuantitativa

La genética cuantitativa (GC) se ocupa de la herencia de las diferencias entre los individuos, al nivel cuantitativo en lugar del cualitativo. La herencia de las diferencias cuantitativas es por medio de genes, y estos genes están sujetos a las leyes mendelianas de transmisión. La GC es una extensión de la genética mendeliana, que se basa directamente en los principios mendelianos como base. Los métodos de estudio en GC difieren de los empleados en genética mendeliana en dos aspectos, en primer lugar, no se pueden observar las proporciones, las progenies individuales no son informativas, la unidad de estudio debe extenderse a nivel poblacional, es decir grupos más grandes de individuos que comprendan

muchas progenies y, en segundo lugar, la naturaleza de las diferencias cuantitativas a estudiar requiere la medición y no solo la clasificación de los individuos. La base teórica de la GC se estableció alrededor del año 1920 por los trabajos realizados por Fisher (1918), Wright (1921) y Haldane (resumen de 1932), el desarrollo del tema en los años siguientes por genetistas y estadísticos ha sido principalmente la elaboración, aclaración y llenado de detalles, para hoy en día tener una teoría validada aceptada (Falconer & Mackay, 1996).

Parámetros genéticos

Las estimaciones de parámetros genéticos en las poblaciones de mejoramiento son de gran importancia para el fitomejorador, ya que permiten conocer la estructura genética de las poblaciones, el control genético de las características de interés, su variabilidad genética y orientar la selección del método adecuado de mejoramiento para maximizar las ganancias genéticas por selección (Domiciano et al., 2015; Hefena et al., 2016; Machado et al., 2016; Shafique et al., 2016).

Varianza

En el estudio de la genética y de las características cuantitativas, la variación de los rasgos de interés es el eje central para el mejoramiento de poblaciones. La variación es la división en componentes atribuibles a diferentes causas. La magnitud en la que se encuentren estos componentes de variación, determina las propiedades genéticas, en particular el grado de semejanza entre parientes de una población estudiada (Falconer & Mackay, 1996).

Componentes de varianza

La cantidad de variación se mide y se expresa como la varianza, cuando los valores se expresan como desviaciones de la media de la población. Los componentes en los que se divide la varianza son los mismos que los componentes del valor; de modo que, por ejemplo, la varianza genotípica es la varianza de los valores genotípicos y la varianza ambiental es la varianza de las desviaciones ambientales. La varianza total son los valores fenotípicos y es la suma de los componentes

separados. Los componentes de la varianza y los valores cuya varianza miden se enumeran en la tabla 1,

Tabla 1. Componentes de varianza, en genética cuantitativa.

| Componentes de varianza | Símbolo | Valor cuya varianza se mide |
|--------------------------------|----------------|------------------------------------|
| Fenotípico | V_P | Valor fenotípico |
| Genotípico | V_G | Valor genotípico |
| Aditivo | V_A | Valor de progenie |
| Dominancia | V_D | Desviación de dominancia |
| Interacción | V_I | Desviación de interacción |
| Ambiental | V_E | Desviación ambiental |

La descomposición de los componentes de varianza permite estimar la importancia relativa de las diferentes fuentes del fenotipo, explica la relación que existe entre la herencia de los caracteres y el ambiente, y su relevancia radica en la expresión que es atribuible a las diferencias fuentes de variación que la componen. La importancia relativa de una fuente de variación es la variación de un componente dado, como proporción de la varianza fenotípica total (Falconer & Mackay, 1996).

La importancia relativa de la herencia en la determinación de los valores fenotípicos se denomina heredabilidad de un carácter. Hay dos significados claramente distintos de heredabilidad, según se refieran a valores genotípicos o valores genéticos. La relación V_G/V_P expresa el extremo con el que los fenotipos individuales están determinados por los genotipos, a esto se le llama heredabilidad en sentido amplio, o grado de determinación genética. La relación V_A/V_P expresa el grado en que los fenotipos son determinados por los genes transmitidos por los padres, a esto se le llama heredabilidad en sentido estricto o simplemente heredabilidad; determina el grado de semejanza entre parientes y por lo tanto es de suma importancia en los programas de mejoramiento. El grado de determinación genética es de mayor interés teórico que práctico. El efecto de aditividad es el más importante, porque es la causa principal del parecido entre individuos, determinante de las propiedades genéticas observables en la población y la respuesta positiva a la selección (Falconer & Mackay, 1996).

Varianza fenotípica

La varianza fenotípica se descompone en varianza genotípica y ambiental (Ekaso et al., 2003).

$$VP = VG + VE$$

Varianza genotípica

La varianza genotípica se descompone en varianza aditiva, de dominancia y epistática (Ekaso et al., 2003).

$$VG = VA + VD + VI + VE$$

Varianza ambiental

De acuerdo con Falconer & Mackay (1996) el objetivo del fitomejorador es minimizar la varianza ambiental a través de los parámetros controlables como son los diseños experimentales apropiados y el manejo agronómico de los mismos. Por definición, la varianza ambiental es la variación de origen no genético y una fuente de error que afecta la precisión de los estudios, sus causas dependen del organismo o cultivo estudiado.

Heredabilidad

La heredabilidad de un carácter cuantitativo es una de las propiedades más importantes que se expresan en los individuos, representa del valor total de la varianza, lo que se puede atribuir a diferencias de los valores genéticos y esto es lo que determina el grado de semejanza entre individuos. La función más importante de la heredabilidad en el estudio genético de características cuantitativas es su papel predictivo, expresando la confiabilidad del valor fenotípico, como guía del valor genético. Solo los valores fenotípicos de los individuos pueden medirse directamente, pero es el valor genético lo que determina su influencia en la próxima generación. Por lo tanto, si el fitomejorador elige a los individuos como padres de acuerdo con sus valores fenotípicos, su éxito en cambiar las características de la población, solo pueden predecirse a partir del conocimiento

del grado de correspondencia entre los valores fenotípicos y los valores genéticos, y en este orden de ideas el grado de correspondencia se mide por la heredabilidad (Falconer & Mackay, 1996).

Selección de caracteres

Para obtener materiales genéticamente superiores, es necesario que el material seleccionado reúna, simultáneamente, una serie de atributos favorables que confíen rendimientos más elevados que satisfagan, tanto las exigencias del consumidor, como las del productor. Se ha demostrado que la selección basada en una o pocas características es inadecuada, ya que conduce a un producto final superior en relación con pocas características seleccionadas, pero con un desempeño menos favorable a otras características no consideradas en la selección. Por lo tanto, una manera de aumentar las posibilidades de éxito de un programa de mejoramiento es mediante la selección simultánea de un conjunto de caracteres de importancia económica.

Para ello, el uso de la teoría del índice de selección (IS) es una alternativa eficiente, ya que permite combinar la información múltiple contenida en una unidad experimental, de modo que la selección sea posible a partir de un complejo de variables que contengan atributos de interés económico. Así el IS constituye un carácter adicional, establecido por la combinación lineal óptima de varios caracteres, que permite que la selección simultánea se realice de manera eficiente (Cruz y Carneiro, 2003).

Índice de selección

De acuerdo con Cardellino, (1987), el índice de selección es un método de puntaje total en el cual se desarrolla una ecuación de regresión múltiple que da valores óptimos a la importancia de cada característica, la heredabilidad de cada característica y a las correlaciones genéticas y fenotípicas entre las características,

de manera que permite separar genotipos con base en la evaluación simultánea de varios caracteres.

Diferencial de selección

Para medir la selección aplicada se utiliza el diferencial de selección, que se simboliza con la letra S. Es una medida de la superioridad de los progenitores seleccionados. Se define como la desviación con respecto a la media de la población del valor fenotípico medio de los individuos seleccionados como progenitores. Esto es, una desviación del valor fenotípico medio de todos los individuos de la generación parental antes de efectuar la selección (Ekaso et al., 2003). Se puede desplazar en sentido positivo o en sentido negativo dependiendo de los caracteres en estudio (Wong & Bernardo, 2008).

Es expresada de la siguiente manera:

$$S = X_s - X_0$$

donde, X_s promedio de los individuos seleccionados y X_0 promedio de la población general.

Respuesta a la selección

El cambio es producido por la selección que le interesa al fitomejorador, principalmente es el que afecta a la media de la población en estudio. Esto es la respuesta a la selección, la cual generalmente se simboliza con la letra R, y que significa la diferencia del valor fenotípico medio entre la descendencia de los progenitores seleccionados y la generación parental antes de la selección (Ekaso et al., 2003). Respuesta a la selección también representa la ganancia genética entre ciclos de mejoramiento de un carácter de interés.

Es expresada de la siguiente manera:

$$R \text{ o GS calculada} = h^2 \times S,$$

donde, h^2 es la heredabilidad en sentido amplio y S es el diferencial de selección.

La RS real es la diferencia entre el promedio de ciclo de mejoramiento C_1 y el ciclo de mejoramiento del cual fue generada la población de estudio (C_0).

Selección y ganancia genética

La selección está basada en el principio, que el valor genético promedio de los individuos seleccionados será mejor que el valor promedio de los individuos de la población original. Para el caso de los caracteres cuantitativos, la ganancia genética obtenida mediante selección se mide como un cambio en la media de la población. El mejoramiento genético que potencialmente puede lograrse por selección de una característica está en función de la heredabilidad de esa característica, así como de la variación de la población original (Zobel et al., 1988).

El ciclo del cultivo de la palma de aceite se encuentra entre 20 a 25 años de vida productiva, la cual puede ser superada si se generan cultivares de siembra con alto rendimiento y otras características de interés, como el reducido crecimiento del estípote, para satisfacer no solo la demanda de grasas y aceites vegetales, sino también generar una mayor sostenibilidad en el tiempo del cultivo que beneficie al agricultor (Ishak et al., 2020). Para lograr altos rendimientos en palma de aceite (entre 11 a 18 toneladas de aceite por hectárea) es fundamental la evaluación y la selección de los potenciales a nivel de progenie y a nivel individual de los diferentes materiales existentes (Shi et al., 2019).

En este orden de ideas, el objetivo de este trabajo de investigación fue seleccionar parentales femeninos elites para producir progenies enanas en palma de aceite, utilizando parámetros genéticos (capítulo 1) y ganancias de selección a través de diferentes ciclos de mejoramiento (capítulo 2), para finalmente obtener cultivares con alta producción de racimos de fruta fresca, altos contenidos de aceite y un reducido incremento de altura de la planta, que garantice una mayor vida productiva y económica del cultivo.

1. Capítulo 1

Selección de parentales elite tipo *dura* para la producción de progenies enanas de *Elaeis guineensis* usando parámetros genéticos

Publicado en: Tupaz-Vera, A.; Ayala-Diaz, I.; Barrera, C.F.; Romero, H.M. Selection of Elite *dura*-Type Parents to Produce Dwarf Progenies of *Elaeis guineensis* Using Genetic Parameters. *Agronomy* 2021, 11, 2581. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122581>

1.1 Resumen

La baja tasa de crecimiento anual del estípite en progenies de palma de aceite es una característica deseable para aumentar la vida productiva y económica de los cultivos. La selección recíproca recurrente (RRS) ha permitido el desarrollo de poblaciones de palma de aceite a través de varios ciclos de mejoramiento para incrementar la frecuencia de alelos favorables asociados a los rasgos de interés. En el presente trabajo se evaluaron familias derivadas de cruzamientos Deli *dura* x *Dura* africana. Durante 12 años se evaluó el rendimiento, las características vegetativas y la cantidad de aceite de siete progenies *dura*, con el objetivo de estimar a partir de la información recolectada los parámetros genéticos, heredabilidades y correlaciones fenotípicas en rasgos genéticos cuantitativos de progenies enanas de alto rendimiento. El análisis se llevó a cabo utilizando el análisis de varianza, seguido de la comparación de medias para todos los rasgos estimados. El efecto de las progenies fue altamente significativo ($P \leq 0,01$) en la mayoría de los rasgos. Los valores de rendimiento expresados en racimos de fruta fresca (RFF) en las progenies oscilaron entre 165 y 208 kg palma año⁻¹. La

producción de aceite a racimo (ACR) oscilo entre 17% y 19%, con un promedio general de 18%. Una de las características de mayor importancia en este estudio fue el crecimiento vertical del estípote, las progenies P6 y P7 se identificaron como las de menor incremento anual de altura, con valores de 0.29 y 0.33 m año⁻¹ que las posicionan dentro de la selección para obtener cultivares de lento crecimiento con un alto rendimiento de RFF y ACR.

Las heredabilidades más altas se encontraron en los rasgos vegetativos de altura con 71.62% y el número de foliolos con 46.64%. El desarrollo de parentales dura con características de lento crecimiento en combinación con alta producción de racimos y aceite le dan un valor agregado a la obtención de cultivares diferenciados de palma de aceite, que permitan extender la vida útil y productiva del cultivo en más de 35 años.

1.1.1 Palabras claves

Introgresión, heredabilidad, rasgos genéticos, crecimiento reducido, palma de aceite.

1.2 Introducción

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es un cultivo oleaginoso perenne cultivado en regiones tropicales húmedas. La importancia agronómica de la palma de aceite es el resultado de su alta capacidad para producir aceite, llegando a producir entre 3 a 10 t ha⁻¹ en condiciones óptimas (Fedepalma, 2020), es la segunda mayor fuente mundial de aceite vegetal después de la soya y con más de 23 millones de hectáreas cultivadas en el mundo (Annual World, 2021). Latinoamérica es uno de los continentes llamados a satisfacer la demanda mundial de aceites, ya que cuenta con suficientes hectáreas adicionales tanto de soya, maíz y palma de aceite (Fedepalma, 2018).

Se estima alcanzar una producción para el cultivo, de 240 millones de toneladas para el 2050 (Tabi et al., 2017). Una de las razones para aumentar la producción del aceite de palma es su aumento en la demanda de aceites vegetales y

biocombustibles. Colombia ocupa el cuarto lugar a nivel mundial, por detrás de Indonesia, Malasia y Nigeria y el primero en América Latina en producción de aceite (Fedepalma, 2020).

En la palma de aceite existen tres tipos de fruto; *dura*, *pisifera* y *tenera*, el último siendo un híbrido intraespecífico entre palmas con frutos tipo *dura* x tipo *pisifera* (Beirnaert & Vanderweyen, 1941). Donde los tipos de frutos que definen el grosor o la ausencia del endocarpio o shell, están codificados por el gen Sh (Reyes et al., 2015; Singh et al., 2013). Los cultivares comerciales son de tipo *tenera* por tener mayores contenidos de mesocarpio en el fruto que los de tipo *dura*, por lo tanto mayores contenidos de aceite por hectárea (Kalyana Babu et al., 2017; Mondragon-Serna et al., 2021).

Para la producción de semillas comerciales el parental femenino siempre es de tipo *dura* (Rajanaidu, 2016). Programas de mejoramiento genético en palma de aceite como el MPOB (Malaysian Palm Oil Board) en Malasia, CIRAD (La Recherche Agronomique pour le Développement) de Francia, ASD (Oil palm seeds and clones) en Costa Rica y otros ubicados en Ecuador (INIAP, Palmeras de los Andes) y Colombia, entre otros, han efectuado colectas o intercambios de germoplasma de palma de aceite, como un recurso importante para el desarrollo de nuevos cultivares (Rajanaidu, 2016). En este sentido, el desarrollo de progenies juega un papel importante dentro de la identificación de genotipos de altos rendimientos, con una alta variabilidad genética y una oportunidad de introgresar características deseables en un programa de mejoramiento (Noh et al., 2014).

El centro de investigación en palma de aceite - Cenipalma, cuenta con una prueba tipo *dura* que proviene de genotipos asiáticos y africanos. En sus orígenes, genotipos de palma Deli *dura* fueron introducidos a la estación agrícola de Lancetilla en Honduras en Centroamérica desde el Sudeste Asiático alrededor de los años 40's (Bastidas et al., 2003). Posteriormente, progenies seleccionadas fueron llevadas a Colombia por el Instituto de Fomento Algodonero (IFA) a las plantaciones de Patuca y Pepilla en el Caribe colombiano, donde las mejores familias fueron cruzadas con genotipos africanos dando origen a las primeras

plantaciones comerciales de palma de aceite de Colombia en los años 60's con cultivares Dura-IFA, las cuales a diferencia de las actuales plantaciones sembradas alrededor del mundo que son tipo *tenera*, eran cultivares con frutos tipo *dura*, lo que permitió realizar nuevos procesos de mejoramiento genético con evaluaciones y selecciones de los mejores individuos por sus componentes de rendimiento y características vegetativas como el lento crecimiento del estípite. A partir de las mejores selecciones se generaron progenies élite tipo *dura* adaptadas a las condiciones ambientales de Colombia, introgresando características de lento crecimiento del estípite con altas producciones de racimo y potencial de aceite, las cuales fueron establecidas en campo a partir del año 2005, esta prueba es conocida como la población *dura* de lento crecimiento o progenies *dura* enanas de Cenipalma.

En palma de aceite, la selección recíproca recurrente (RRS) permite el mejoramiento de dos poblaciones diferentes y de forma independiente de caracteres de interés, para posteriormente ser combinadas para su evaluación y seleccionar las mejores para un nuevo ciclo de mejoramiento y mantener un alto grado de variación genética en las poblaciones. El ciclo del cultivo de la palma de aceite se encuentra entre 25 a 30 años de vida productiva, la cual puede ser superada si se generan cultivares de siembra con alto rendimiento y otras características de interés, como el reducido crecimiento del estípite, para satisfacer no solo la demanda de grasas y aceites vegetales, sino también generar una mayor sostenibilidad en el tiempo del cultivo que beneficie al agricultor (Ishak et al., 2020).

Las estimaciones de parámetros genéticos de las poblaciones en mejoramiento son de gran importancia para el fitomejorador, ya que permiten conocer la estructura genética de las poblaciones, el control genético de las características de interés, su variabilidad genética y orientar la selección del método adecuado de mejoramiento para maximizar las ganancias genéticas por selección (Domiciano et al., 2015; Hefena et al., 2016; Machado et al., 2016; Shafique et al., 2016). Debido a su importancia para el mejoramiento de los cultivos, se planteó como el objetivo de esta investigación el de estimar los parámetros genéticos de los principales rasgos de interés en palma de aceite, en la población *dura* enanas de Cenipalma,

para optimizar los procesos de selección y mejoramiento de cultivares altamente productivos y de mayor vida económica del cultivo.

1.3 Materiales y Métodos.

1.3.1 Material vegetal

La población enana *dura* o de lento crecimiento de Cenipalma está conformada por siete progenies de hermanos completos (HC) procedentes de procesos de selección recurrente de poblaciones Dura-IFA, caracterizadas por tener alta producción de aceite y racimos, y cruzadas con parentales de lento crecimiento vertical, identificadas en el presente estudio como P1 a P7, estas plantas estuvieron por un periodo de 12 meses en etapa de vivero y posteriormente fueron trasplantadas a sitio definitivo en 2005, el diseño experimental que se utilizó fue un diseño de bloques al azar (DBA), con tres bloques y 12 plantas por cada unidad experimental. Las mediciones se realizaron entre los años 2008 a 2020. En la zona de estudio las condiciones climáticas registraron precipitaciones anuales entre 2194 y 4005 mm año⁻¹, con un promedio de 3115 milímetros. Los manejos y practicas agronómicas se realizaron bajo los estándares de manejo del Campo Experimental el Palmar de la Vizcaína (CEPV), que incluían una fertilización balanceada en kilogramos por planta⁻¹ de N (1,23), P (0,50), K (2,51), Mg (0,34), S (0,21) y B (0,05) de acuerdo al análisis foliar y de suelos (Ayala et al., 2017).

1.3.2 Recolección de datos.

La recolección de la información se empezó tres años después de la siembra en el campo y continuó durante 12 años para los componentes de rendimiento, registrando racimos de fruta fresca (RFF), numero de racimos (NR) y peso medio del racimo (PMR), para cada palma en todas las unidades experimentales del ensayo con registros que se realizaron con una periodicidad entre dos y tres ciclos por mes:

Los valores de estos componentes de rendimiento se obtuvieron de la siguiente manera:

1. RFF ($\text{kg palm}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) = $\sum_{i=1}^n BWTi$
2. NR ($\text{bunches palm}^{-1} \text{ year}^{-1}$) = $\sum_{i=1}^n BNOi$
3. PMR (kg) = $\frac{FFB}{BNO}$

Nota. n representa el número de rondas de registros de producción expresada en (kg).

Para los rasgos vegetativos se realizaron cinco rondas de medidas vegetativas en la duración de la investigación, entre los periodos de 2009 y 2020. Mediante la metodología propuesta por (Corley y Breure, 1981), se calcularon las características de hojas totales (HTL), sección transversal del peciolo (STP), longitud de raquis (LR), longitud de foliolo (LF), ancho de foliolo (AF), número de foliolos (NF), área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), diámetro de estipite (DI). La altura de la palma (HT) se midió desde el nivel del suelo hasta la base de la hoja 41 de acuerdo con la filotaxia de la palma. La HT se calculó usando la fórmula:

HT por año (Incremento de altura/año) = (altura en el año t) / ($t - 2$), donde t es la edad de la palma expresada en años, desde la fecha de la siembra hasta el momento de una medición dada (Breure & Powell, 1987). El área foliar (AF) se calculó por medio de la ecuación propuesta por (Hardon et al., 1969), en donde es necesario tomar el número de foliolos y las medidas de ancho y largo de una muestra de estos, la cual se calculó de la siguiente manera:

$$AF = b * (n * lw)$$

Donde:

AF: Área foliar (m^2)

n: número de foliolos

lw: ancho del foliolo x largo del foliolo

b: factor de corrección (0,55)

El índice de área foliar (IAF) se define como la proporción de área foliar por unidad de área de suelo, también se considera un factor esencial en la capacidad del cultivo para captar energía solar (Corley y Tinker, 2016). El LAI se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$IAF = AF * HTL * densidad\ de\ plantas / 10.000$$

Donde:

AF: Área foliar (m²)

HTL: Número de hojas totales

Para calcular el contenido de aceite y los componentes de racimo se utilizaron las metodologías propuestas por (Corley y Tinker, 2016; Sparnaaij et al., 1963) y modificado por (Prada, y Romero, 2012). Se muestrearon de dos a tres racimos de cada palma entre los periodos 2008 a 2020. Para evitar la variación estacional en el tiempo, los racimos maduros (al menos 5 frutos sueltos en el suelo) se muestrearon con al menos tres meses de corte con referencia al muestreo anterior de la misma palma. Los rasgos de aceite que se calcularon fueron, peso medio del fruto (PMR), raquillas a racimo (ESR), porcentaje de aceite a mesocarpio seco (ACMS), porcentaje de aceite a mesocarpio fresco (ACMF), porcentaje de aceite a racimo (ACR), porcentaje de frutos normales a racimo (FNR), formación de frutos (FR), porcentaje de mesocarpio a fruto (MF), porcentaje de almendra a fruto (AF) y porcentaje de cuesco a fruto (CF).

1.3.3 Análisis estadístico.

Los datos colectados de las progenies, bloques y años de evaluación se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) bajo un modelo lineal generalizado, el cual se detalla en la Tabla 1-1, utilizando el software GENES y RStudio versión 4.1.1. con los paquetes ggplot2, Agricolae, Performance y Corrplot.

Para el modelo lineal por la característica perenne de cultivo, los años fueron considerados como ambientes. El modelo lineal se presenta a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + B_k + A_j + GE_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} : es el fenotipo de la k^{th} palma en la progenie y en la j^{th} repetición.

μ : es el promedio general.

G_i : es el efecto de la i^{th} progenie.

B_k : es el efecto del k^{th} bloque.

A_j : es el efecto del j^{th} año.

GE_{ij} : es el efecto de la interacción entre la progenie y el año.

ϵ_{ijk} : es el efecto del error experimental.

La comparación de promedios se realizó mediante la prueba HSD (Honestly Significant Difference) o prueba de Tukey. Para la estimación de la heredabilidad en todos los rasgos evaluados, se utilizó el coeficiente de correlación de clase o heredabilidad en sentido amplio (H^2) descrito por Falconer, D. Mackay (1996).

$$H^2 = \frac{\sigma^2 g}{(\sigma^2 g + \sigma^2 ga + \sigma^2 e)}$$

Donde:

$\sigma^2 g$ = varianza genotípica, $\sigma^2 ga$ = interacción entre varianza genotípica y anual y $\sigma^2 e$ = error experimental.

Para las correlaciones múltiples se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para medir el grado de asociación de los rasgos genéticos cuantitativos de las progenies de estudio.

Tabla 1-1. Esquema del ANOVA y los cuadrados medios esperados, para el análisis de progenies de hermanos completos en palma de aceite.

| Fuentes de variación | GL | MS | EMS |
|----------------------|-------------|-----|---|
| Repetición (R) | (r-1) | MS1 | $\sigma^2 e + \sigma^2 ga + \sigma^2 r$ |
| Progenies (G) | (g-1) | MS2 | $\sigma^2 e + \sigma^2 ga + \sigma^2 g$ |
| Año (E) | (a-1) | MS3 | $\sigma^2 e + \sigma^2 ga + \sigma^2 a$ |
| G x E | (g-1) (a-1) | MS4 | $\sigma^2 e + \sigma^2 ga$ |
| Error | | | $\sigma^2 e$ |

Nota: $\sigma^2 g$ = varianza genotípica, $\sigma^2 a$ = varianza anual, $\sigma^2 ga$ = interacción entre varianza genotípica y anual, $\sigma^2 e$ = error experimental y GL = grados de libertad.

1.4 Resultados y discusión.

1.4.1 Componentes de rendimiento.

Los cuadrados medios del análisis de varianza para las características de rendimiento RFF, NR y PMR se presentan en la Tabla 1-2. En la fuente de variación, el efecto de la progenie y del año fueron significativos para todos los componentes del rendimiento, de igual manera se encontró significancia para la interacción GxE en los componentes de NR y PMR, reflejando un comportamiento de consistencia de RFF en los años de evaluación. La alta significancia encontrada en esta investigación ($P \leq 0.01$) en RFF, NR, PMR en las progenies evaluadas y los años de evaluación, evidencia una alta variación genética que ofrece un margen de selección amplio para explorar y avanzar en la obtención de progenies altamente productivas. Con relación a los componentes de varianza para el rasgo de RFF, el efecto del genotipo fue del 22%, para la característica de NR del 18% y para el rasgo de PMR fue del 41%. En este mismo sentido el efecto ambiental para estos rasgos de rendimiento fue del 79% para RFF, del 53% para NR y para el rasgo de PMR el efecto ambiental fue del 52%.

Estudios realizados en progenies procedentes de cruzamientos Nigeria *dura* x Deli *dura* mostraron alta significancia en la fuente de variación, en el efecto de las progenies en los rasgos de rendimiento RFF, NR y PMR (Noh et al., 2014). Arolu et al. (2017), reporta resultados similares en cultivares de procedencia Deli *dura* x Nigeria *pisifera*, en donde encontraron alta significancia para el efecto de las progenies en los componentes de rendimiento (RFF, NR, PMR) del cultivo de la palma de aceite. Así mismo, trabajos realizados en Indonesia para 23 progenies *dura* x *pisifera* mostraron diferencias significativas entre los años de evaluación (Sapey et al., 2015).

Tabla 1-2. Cuadrados medios y componentes de varianza para rasgos de rendimiento en progenies *dura x dura*.

| Fuentes de variación | gl | RFF | NR | PMR |
|-------------------------|-----|------------------|----------------|----------------|
| Repetición (R) | 2 | 5329,40 | 15,29 | 4,72 |
| Progenies (G) | 6 | 7739,85 ** | 47,99 ** | 50,45 ** |
| Año (E) | 9 | 29154,64 ** | 782,39 ** | 533,39 ** |
| G x E | 54 | 808,50 ns | 10,54 ** | 3,00 ** |
| Error | 138 | 854,14 | 3,66 | 2,02 |
| Componentes de varianza | | | | |
| σ^2 G | | 231,05 (21,5) | 1,25 (18,2) | 1,58 (40,7) |
| σ^2 GE | | -13,04 (-1,2) | 1,96 (28,6) | 0,28 (7,2) |
| σ^2 e | | 854,14 (79,7) | 3,66 (53,3) | 2,02 (52,0) |

Nota: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; no significativo (ns) $p > 0,05$. FFB: racimos de fruta fresca (kg palma año⁻¹), BNO: número de racimos (racimos palma año⁻¹), ABW: peso medio del racimo (kg/racimo), σ^2 G: varianza de la progenie, σ^2 GE: varianza entre la interacción progenie y año, σ^2 e: varianza del error, en parentésis se reportan los componentes de varianza expresados en porcentaje.

La comparación de medias mediante la prueba de Tukey mostró que el rasgo de RFF osciló entre 165 y 208,4 kg palm⁻¹, sobresaliendo las progenies P3 (208,4) y P1 (192,6), que fueron estadísticamente diferentes a las demás. Para NR estuvo entre los rangos de 11,04 y 14,25 racimos por palma⁻¹, las progenies P5 y P3 estadísticamente diferente a las demás fueron las que presentaron valores más altos con 14,25 y 13,99 racimos por palma⁻¹. Los valores para el PMR estuvieron entre 15,30 a 18,75 kg palma⁻¹, con progenies sobresalientes como P1 (18,75) y P6 (18,15) que presentaron los promedios generales más altos para esta característica (Tabla 1-3). Investigaciones realizadas por Noh et al. (2014), reportan valores entre 5,9 y 11 de NR, valores entre 18 y 28,1 de PMR en progenies Nigeria *dura x Deli dura*, que claramente comparando los valores de NR están por debajo y en PMR se encuentran por encima de los registrados en esta investigación.

Para los años de evaluación la prueba de Tukey mostro diferencias significativas (Tabla 1-3). En los primeros años productivos las progenies evaluadas muestran un alto NR (entre 15 a 20 racimos palma⁻¹) y un bajo PMR (9 a 13 kg), en contraste con los años siguientes en donde la planta es más adulta, los valores de NR son menores (entre 7 a 13 racimos palma⁻¹) y los valores aumentan en el PMR (14 a 23 kg), este comportamiento es normal para el cultivo y los valores concuerdan con los valores reportados en cultivares comerciales *tenera* (Ayala et al., 2017). A pesar de que el año A10 presentó valores bajos en RFF y NR debido a los bajos rendimientos a nivel general del país (principalmente efectos climáticos), el buen PMR registrado por año y los altos periodos de producción de RFF en la mayoría de los años evaluados hacen que estas progenies demuestren buen comportamiento de rendimiento para generar futuras progenies comerciales (*dura x pisifera*) superiores a los cruzamientos *dura x dura* evaluados en este estudio.

Tabla 1-3. Promedios generales de los rasgos de rendimiento en cada progenie evaluada.

| Progenie | RFF | NR | PMR |
|------------------|------------|-----------|------------|
| P1 | 192,62b | 11,52bc | 18,75a |
| P2 | 173,07cd | 11,75bc | 16,71b |
| P3 | 208,44a | 13,99a | 17,40b |
| P4 | 165,02d | 12,17b | 15,30c |
| P5 | 182,50bc | 14,25a | 15,86c |
| P6 | 169,34cd | 11,04c | 18,15a |
| P7 | 166,27cd | 11,64bc | 15,81c |
| Promedio general | 179,61 | 12,34 | 16,85 |
| CV (%) | 8,94 | 10,25 | 7,69 |
| Año | | | |
| A1 | 185,07c | 20,80b | 9,15g |
| A2 | 221,70a | 23,28a | 9,55g |
| A3 | 206,65ab | 15,87c | 13,02f |
| A4 | 193,49bc | 13,13d | 14,72e |
| A5 | 175,87c | 9,05f | 19,51c |
| A6 | 207,77ab | 11,76e | 17,71d |
| A7 | 176,01c | 8,95f | 19,76c |
| A8 | 186,44c | 9,67f | 19,37c |
| A9 | 154,39d | 7,07g | 21,96b |
| A10 | 88,69e | 3,78h | 23,78a |
| Promedio general | 179,61 | 12,34 | 16,85 |
| CV (%) | 20,75 | 49,48 | 29,9 |

Nota: RFF: racimos de fruta fresca (kg palma año⁻¹), NR: número de racimos (racimos palma año⁻¹), PMR: peso medio del racimo (kg/racimo), CV: coeficiente de variación. Los promedios con la misma letra dentro de la misma columna no son estadísticamente significativos a $p < 0.05$, mediante la prueba de Tukey ($n=252$).

1.4.2 Componentes vegetativos.

Los cuadrados medios para las características vegetativas se pueden observar en la Tabla 1-4, la fuente de variación en base a las progenies fue altamente significativa ($p \leq 0,01$) en casi todos los rasgos, excepto en el DI, de igual manera la influencia del año mostro alta significancia en los rasgos vegetativos, excepto para el HT, información importante en la estabilidad del crecimiento de estas

progenies, ya que esta característica presenta más del 71% de varianza genética que hace que tenga poca influencia ambiental, que para este caso fue del 27%. Los componentes de varianza mostraron valores altos para el efecto del genotipo en los rasgos de NF y LR con 47% y 42% respectivamente y el efecto ambiental fue del 53% y 55% para cada carácter.

Estudios realizados en progenies de palma de aceite *dura x pisifera* el componente de varianza genético para estos rasgos vegetativos varió entre 35,2 y 82,5%, siendo la característica de altura la de mayor influencia genética (Swaray, Amiruddin, et al., 2020), información que se puede contrastar con los resultados reportados en esta investigación en donde el mayor efecto genético se reporta para el rasgo de HT y los valores de la influencia genética oscilaron entre 12 a 71%.

El efecto del genotipo y el efecto del año mostraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) para la característica RL. Las investigaciones de Arolu et al. (2017) mostraron significancia en el genotipo, repetición y en la interacción genotipo x repetición para esta característica (RL) en progenies *dura x pisifera*. Por otro lado, Myint et al. (2019), reportaron diferencias altamente significativas para el efecto de las familias, poblaciones y la interacción de familia x población para RL en germoplasma de *Elaeis guineensis* provenientes de Senegal. En general, el efecto ambiental presenta un aporte significativo para las características vegetativas menos estables, y que cambian con los años de desarrollo de la planta.

Tabla 1-4. Cuadrados medios y componentes de varianza para rasgos vegetativos en progenies *dura x dura*.

| Fuentes de variación | gl | HTL | STP | LR | LP | AP | NF | HT | AF | IAF | DI |
|-------------------------|----|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Repetición (R) | 2 | 50,280 | 0,100 | 0,020 | 119,870 | 0,410 | 35,200 | 0,019 | 0,656 | 0,495 | 0,000 |
| Progenie (G) | 6 | 91,480 ** | 0,200 * | 0,640 ** | 520,360 ** | 3,080 * | 410,760 ** | 0,061 ** | 2,200 ** | 1,213 ** | 0,005 ns |
| Año (E) | 4 | 3269,880 ** | 102,300 ** | 7,610 ** | 27410,430 ** | 154,850 ** | 3276,130 ** | 0,003 ns | 58,512 ** | 13,218 ** | 0,347 ** |
| G x E | 24 | 22,720 ns | 0,060 ns | 0,060 ns | 75,260 * | 0,840 ** | 29,610 ns | 0,002 ns | 0,454 ns | 0,300 ns | 0,003 ** |
| Error | 68 | 23,880 | 0,070 | 0,050 | 44,380 | 0,180 | 28,860 | 0,002 | 0,284 | 0,252 | 0,000 |
| Componentes de varianza | | | | | | | | | | | |
| σ^2 G | | 4,584 (16,3) | 0,009 (12,2) | 0,039 (42,2) | 29,673 (35,8) | 0,149 (28,8) | 25,410 (46,6) | 0,004 (71,6) | 0,116 (25,9) | 0,061 (18,7) | 0,000 (12,6) |
| σ^2 GE | | -0,331 (-1,2) | -0,003 (-3,7) | 0,003 (3,1) | 8,823 (10,6) | 0,189 (36,4) | 0,214 (0,4) | 0,000 (0,7) | 0,049 (10,8) | 0,014 (4,3) | 0,001 (55,0) |
| σ^2 e | | 23,880 (84,9) | 0,070 (91,5) | 0,050 (54,6) | 44,380 (53,5) | 0,180 (34,8) | 28,860 (53,0) | 0,002 (27,7) | 0,284 (63,3) | 0,252 (77,1) | 0,000 (32,4) |

Nota: HTL: Total de hojas (número de hojas palma año⁻¹), STP: Sección transversal del peciolo (cm²), LR: Longitud del raquis (cm), LF: Longitud de foliolo (cm), AF: Ancho del foliolo (cm), NF: Número de foliolos, HT: Altura de planta (m), AF: Área foliar (m²), IAF: Índice de área foliar, DI: Diámetro de estípite (m), σ^2 G: varianza de la progenie, σ^2 GE: varianza entre la interacción progenie y año, σ^2 e: varianza del error, en parentésis de reportan los componentes de varianza expresados en porcentaje, * p < 0,05; ** p < 0,01; no significativo (ns) p > 0,05.

Alvarado & Henry, (2015) reportan el número de ciclos de mejoramiento que son necesarios para fijar un rasgo genético, que para el caso en particular se refieren al fenotipo compacto de las plantas, en donde fueron necesarios más de 60 años de pruebas de campo, que corresponderían de 4 a 5 ciclos para el cultivo y que además cumplan con valores aceptables de rendimiento. En la presente investigación se registra valores para los diferentes rasgos genéticos de dos ciclos de mejoramiento con resultados de progenies muy promisorias en la característica de planta compacta y con altos rendimientos. Las diferencias encontradas en este estudio muestran una amplia variabilidad presente entre las progenies de estudio, que permitirá avanzar en la obtención de cultivares de lento crecimiento, característica importante para incrementar la vida útil y económica de las plantaciones de palma de aceite, cambiando la etapa de renovación de cultivos que están cerca a los 25 años, pronosticando un aumento en un 35% más de vida productiva para la palmicultura.

En la tabla 1-5 se presenta la comparación de los rasgos vegetativos de las progenies evaluadas y la comparación entre cada año de evaluación. Los promedios generales de HTL oscilaron entre 40,74 a 46,67, solamente las progenies P1 y P7 fueron estadísticamente diferentes ($p \leq 0,01$) para este rasgo, para la característica de STP las progenies P3 y P4 fueron estadísticamente diferente a los demás con valores de 26,32 y 22,68 respectivamente, las demás progenies fueron similares, para la característica de LR se formaron dos grupos estadísticamente diferentes; las progenies P1, P3, P5 y P6 con valores que oscila entre 4,68 y 4,76 y las progenies P2, P4 y P7 con valores inferiores que están entre 4,28 a 4,34.

Tabla 1-5. Promedios generales de los rasgos vegetativos en cada progenie y años evaluados.

| Progenie | HTL | STP | LR | LF | AF | NF | HT | AF | IAF | DI |
|------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| P1 | 46,67a | 24,16ab | 4,68a | 93,78a | 8,71a | 157,71a | 0,47a | 7,35a | 5,49a | 0,33a |
| P2 | 45,9ab | 23,87ab | 4,34b | 75,09c | 7,62c | 150,49b | 0,43ab | 6,59cd | 5,09ab | 0,33a |
| P3 | 41,33ab | 26,32a | 4,76a | 85,46b | 8,57a | 156,98a | 0,42b | 7,19ab | 5,17ab | 0,30bc |
| P4 | 46,21a | 22,68b | 4,28b | 78,68bc | 7,56c | 144,08c | 0,43ab | 6,40d | 5,12b | 0,32ab |
| P5 | 43,06ab | 24,01ab | 4,68a | 82,54b | 7,86bc | 157,38a | 0,39b | 6,54d | 4,72b | 0,29c |
| P6 | 42,33ab | 24,81ab | 4,69a | 84,57b | 8,28ab | 158,42a | 0,29d | 7,17abc | 5,43ab | 0,29c |
| P7 | 40,74b | 23,50ab | 4,34b | 81,55bc | 7,92bc | 154,01ab | 0,33c | 6,63bcd | 5,09b | 0,30c |
| Promedio general | 43,75 | 24,19 | 4,54 | 83,09 | 8,07 | 154,15 | 0,39 | 6,84 | 5,16 | 0,31 |
| CV (%) | 5,64 | 4,72 | 4,56 | 7,09 | 5,61 | 3,39 | 16,14 | 5,6 | 4,93 | 5,65 |
| Año | | | | | | | | | | |
| A1 | na | 9,96b | 4,28c | 103,60b | 5,62d | 135,00d | 0,38a | 4,76e | 4,30b | 0,25b |
| A2 | 48,04a | 11,84a | 4,77b | 114,74a | 6,12c | 150,28c | 0,40a | 5,91d | 4,02b | 0,26b |
| A3 | 30,43c | NA | 3,60d | na | 11,10a | 157,23b | 0,41a | 6,76c | 2,94c | 0,25b |
| A4 | 37,68b | 12,39a | 4,96ab | 109,41a | 6,58b | 160,03b | 0,40a | 7,61b | 4,06b | 0,25b |
| A5 | 39,53b | na | 5,06a | na | 10,96a | 168,23a | 0,39a | 9,16a | 5,16a | NA |
| Promedio general | 43,75 | 28,08 | 4,54 | 83,09 | 8,08 | 154,15 | 0,4 | 6,84 | 4,1 | 0,25 |
| CV (%) | 28,53 | 87,34 | 13,27 | 43,48 | 33,66 | 8,1 | 2,88 | 24,43 | 19,37 | 1,98 |

Nota: HTL: Hojas totales, STP: Sección transversal del peciolo (cm²), LR: Longitud de raquis (m), LF: Longitud de foliolo (cm), AF: Ancho del foliolo (cm), NF: Número de foliolos, HT: Altura de planta (m year⁻¹), AF: Área foliar (cm²), IAF: Índice de área foliar, DI: Diámetro de estípites (m), CV: Coeficiente de variación. Los promedios con la misma letra dentro de la misma columna no son estadísticamente significativos a p<0.05, mediante la prueba de Tukey (n=252), na: no aplica.

Para los rasgos LF and AF la progenie P1 con valores de 93,78 y 8,71 respectivamente fue estadísticamente diferente a las demás progenies y sobresalió por presentar los valores más altos para estas características de desarrollo vegetativo. En diferentes progenies *Deli dura* x *AVROS pisifera* los promedios generales para LF y AF reportados fueron de 94,89 y 5,57 respectivamente (Noh et al., 2012), valores comparables con este estudio. El NF fue un rasgo vegetativo que no presentó una amplia variación estadística entre las progenies; donde, P1, P3, P5 y P6 se agruparon en el mismo grupo dentro de las comparaciones, P2 y P7 dentro del mismo grupo y la progenie P4 fue estadísticamente diferente a las demás con el valor más bajo (144,08). El rasgo de AF presentó una variación entre 6,40 m² en la progenie P4 y 7,35 m² para la progenie P1, con un promedio general para toda la población de 6,84 m².

Para el IAF se presentaron diferencias significativas en las progenies evaluadas, con el valor más alto para la progenie P1 con 5,49 y el valor más bajo para la progenie P5 con 4,72. Para el cultivo de la palma de aceite se ha considerado un rango entre 5 a 5,5 como un valor óptimo y este se puede alcanzar por medio de una densidad óptima que se puede derivar del IAF, valor óptimo que se podría obtener después de diez años de siembra (Corley y Tinker, 2016; Saldaña-Villota & Cotes-Torres, 2020).

Para cultivares comerciales de palma de aceite un rendimiento máximo por hectárea, se podría alcanzar con un IAF entre 5,5 y 6 (Breure, 2010). Los valores de IAF que se presentan en esta investigación hacen referencia al año 14 después de la siembra (última medición de esta característica) con un promedio general para la toda la población de 5,16, las progenies P1 y P6 con valores cercanos al 5,5 óptimo para alcanzar máximos rendimientos. En los rasgos vegetativos el DI oscilo entre 0,33 a 0,29, con las progenies P1, P2 y P4 en un mismo grupo y las progenies P3, P5, P6 y P7 conforman el mismo grupo de significancia. Las comparaciones en los diferentes años de evaluación muestran un desarrollo normal descrito para el cultivo, donde a medida que crece la planta, algunos de los rasgos vegetativos

también lo hacen, como, por ejemplo; LF, AF, NF, AF y IAF. Estos rasgos vegetativos definen la arquitectura de la planta, la cual es muy importante para los procesos agronómicos y arreglos de siembra que puede presentar modificaciones para disminuir los costos de mano de obra y mejorar la mecanización de los ciclos de cosecha (Barcelos et al., 2015).

Finalmente, el incremento anual de altura varió entre 0,29 m año⁻¹ en la progenie P6 y 0,47 m año⁻¹ en la progenie P1, con un promedio general de 0,39 m año⁻¹ para toda la población evaluada. Por otra parte, se comparó esta tasa de crecimiento con cultivares comerciales sembrados en la misma estación experimental, bajo características del suelo y manejos agronómicos similares, donde las progenies enanas de Cenipalma mostraron valores más bajos que los cultivares más comunes cultivados en todo el mundo, como Deli x AVROS, Deli x La Mé y Deli x Yangambi (Figura 1-1). El estudio de Arolu et al. (2017), reporta características de cultivares compactos Deli *dura* x Nigeria *pisifera*, con incrementos de altura entre 0,22 m año⁻¹ y 0,34 m año⁻¹ en diferentes progenies *tenera*.

Trabajos realizados en cultivares comerciales de palma de aceite de procedencia Deli x AVROS y Deli x Ghana, registran crecimientos anuales en altura del tallo de 0,90 a 1,20 m (Alvarado et al, 2007), valores muy superiores a los registrados en estas progenies *dura* de Cenipalma. En contraste, trabajos realizados en híbridos interespecíficos de palma de aceite (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*) muestran valores en incremento anual de altura en la planta en promedio de 0,41 m año⁻¹, con rangos entre 0,23 m año⁻¹ a 0,65 m año⁻¹ (Sunilkumar et al., 2015), información comparable con los resultados obtenidos para este estudio a pesar de ser progenies de origen *E. guineensis*.

A partir de los resultados obtenidos en las progenies *dura* x *dura* evaluadas, es posible seleccionar las mejores familias y las mejores palmas por familia mediante la metodología *family and individual palm selection*-FIPS (Donough, 2005), y a partir de los mejores individuos desarrollar nuevas progenies enanas para un nuevo

ciclo RRS. Para este fin se han identificado individuos con crecimientos por debajo de los $0,20 \text{ m año}^{-1}$ de crecimiento en altura, que prometen el desarrollo de variedades o cultivares de lento crecimiento, que permiten un incremento de la vida económica y productiva del cultivo, por ende, incrementando su rentabilidad.

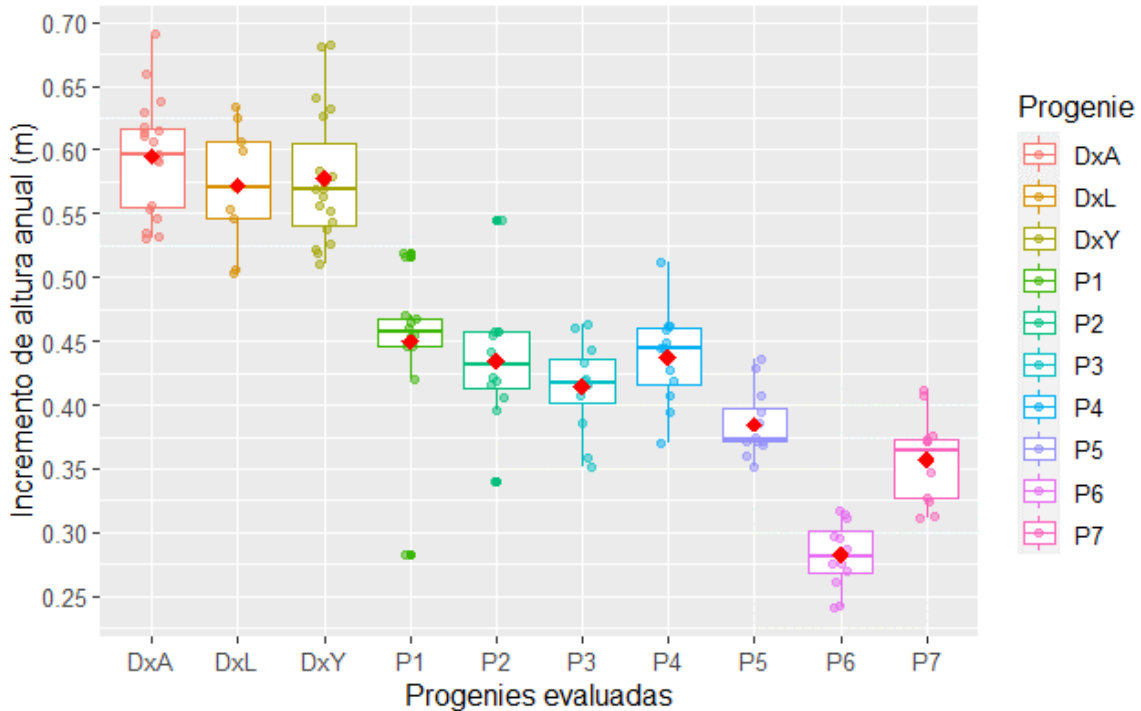


Figura 1-1. Incremento anual de altura en siete progenies *dura x dura* y tres cultivares comerciales. El punto rojo corresponde a la media general de las progenies o cultivares y la línea horizontal a la mediana. DxA: Deli x AVROS, DxL: Dele x La Mé y DxY: Deli x Yangambi.

1.4.3 Componentes del racimo y la producción de aceite.

Los cuadrados medios de los rasgos de conformación de racimo se presentan en la Tabla 1-6. El efecto de las progenies evaluadas fue altamente significativo ($p \leq 0,01$) para la mayoría de las características de aceite, excepto para, ACMS, FNR y FR estas diferencias encontradas indican una gran diversidad genética en estos componentes de aceite, ampliando la oportunidad de selección de progenitores con buenas características de aceite y por lo tanto avanzar en el programa de mejoramiento para palma de aceite. En germoplasma procedente de Nigeria, Zaire y Camerún los estudios de (Azwani et al., 2020) reportan diferencias altamente

significativas para estas características de aceite en las progenies evaluadas. La influencia de los años evaluados presentó diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$) para todos los rasgos evaluados.

La influencia de la interacción entre el GxA no presentó diferencias significativas en el ANOVA, excepto para la característica de ESR con un ($p \leq 0.05$). Los componentes de variación mostraron que el efecto del genotipo fue alto para las características de ESR con 46%, para la característica AF fue de 44,5% y para el rasgo de MF fue de 32,5%, de la misma manera la influencia ambiental para estos caracteres fue de 44% (ESR), de 55% (FA) y de 68% (MF). El efecto del genotipo para las progenies evaluadas varió entre el 6% al 46%. La variación genética encontrada en las progenies de este estudio para componentes del racimo y cantidad de aceite permitirá la introgresión de nuevos rasgos, lo que ampliaría el alcance de la selección de progenitores femeninos tipo *dura*.

El ACR es una de las características más importantes en los programas de mejoramiento del cultivo, con los resultados obtenidos en esta investigación, se puede avanzar en la creación de nuevas progenies que mantengan valores altos de extracción de aceite, de igual manera rasgos como los componentes del fruto como la relación entre MF, CF y AF. Los resultados encontrados para estos rasgos son altamente promisorios para la generación de progenies que introgresen más de un carácter de alto valor agronómico para el cultivo de la palma de aceite y que complementen tanto el ACR como los RFF.

Tabla 1-6. Cuadrados medios y componentes de varianza para los rasgos de aceite en progenies *dura x dura*.

| Fuentes de variación | gl | PMF | ESR | ACMS | ACMF | ACR | FNR | FR | MF | AF | CF |
|-------------------------|----|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Repetición (R) | 2 | 5,51 | 3,6 | 15,52 | 60,32 | 18,69 | 88,1 | 45,63 | 18,56 | 2,53 | 9,05 |
| Progenie (G) | 6 | 11,62 ** | 21,21 ** | 5,86 ns | 68,96 ** | 20,14 * | 158,12 ns | 83,51 ns | 114,52 ** | 47,48 ** | 32,74 ** |
| Año (E) | 5 | 42,24 ** | 9,00 ** | 76,46 ** | 94,4 ** | 61,26 ** | 1037,93 ** | 1782,49 ** | 98,99 ** | 51,7 ** | 50,32 ** |
| G x E | 30 | 1,47 ns | 1,90 * | 7,54 ns | 11,78 ns | 6,01 ns | 85,18 ns | 44,93 ns | 11,83 ns | 3,1 ns | 5,67 ns |
| Error | 82 | 1,99 | 1,04 | 4,84 | 11,44 | 5,79 | 58,35 | 52,44 | 11,88 | 3,07 | 5,22 |
| Componentes de varianza | | | | | | | | | | | |
| $\sigma^2 G$ | | 0,56 (23,44) | 1,07 (45,49) | 0,09 (-1,69) | 3,18 (21,59) | 0,79 (11,83) | 4,05 (5,78) | 2,14 (4,09) | 5,71 (32,47) | 2,47 (44,47) | 1,50 (21,95) |
| $\sigma^2 GE$ | | -0,15 (-6,18) | 0,25 (10,42) | 0,77 (13,98) | 0,10 (0,66) | 0,06 (0,95) | 7,67 (10,94) | -2,15 (-4,09) | -0,01 (-0,08) | 0,01 (0,15) | 0,13 (1,88) |
| $\sigma^2 e$ | | 1,99 (82,73) | 1,04 (44,10) | 4,84 (87,71) | 11,44 (77,75) | 5,79 (87,23) | 58,35 (83,28) | 52,44 (100) | 11,88 (67,61) | 3,07 (55,37) | 5,22 (76,18) |

Nota: PMF: Peso medio de fruto (gr), ESR: Raquilas a racimo (%), ACMS: Aceite a mesocarpio seco (%), ACMF: Aceite a mesocarpio fresco (%), ACR: Aceite a racimo (%), FNR: Frutos normales a racimos (%), FR: Formación de racimos (%), MF: Mesocarpio a fruto (%), AF: Almendra a fruto (%), CF: Cuesco a fruto (%), $\sigma^2 G$: varianza de la progenie, $\sigma^2 GE$: varianza entre la interacción progenie y año, $\sigma^2 e$: varianza del error, en parentésis de reportan los componentes de varianza expresados en porcentaje, * p < 0,05; ** p < 0,01; no significativo (ns) p > 0,05.

Los resultados de los trabajos de Nor Azwani et al. (2020), resaltan la importancia de encontrar una amplia variabilidad y diversidad genética de estas características para la buena selección de progenitores en el cultivo de la palma de aceite. El conocimiento sobre los parámetros genéticos en materiales de palma de aceite, es estratégico para mejorar la selección, para el rasgo de ACR existe una amplia variación, investigaciones realizadas en germoplasma africano de palma de aceite, presenta valores que oscilan entre 19,51% a 5,61%, lo cual favorece la selección para esta característica (Murugesan et al., 2015).

En la Tabla 1-7 se muestran la comparación mediante la prueba de Tukey para los rasgos de componentes de racimos, en las progenies y los años en evaluación. Para el rasgo PMF, las progenies P5 y P2 se clasificaron con los valores más bajos y altos con 8,53 gr y 10,94 gr respectivamente, las progenies en general presentaron un promedio de 9,88 gr para este rasgo, la característica ESR oscilo entre 88,97% y 91,81% con un promedio general de las progenies en estudio de 90,48%. Para el rasgo de ACMS los valores se presentaron entre 78% a 79,62% y la característica de ACMF oscilo entre 50,68% a 55,12 %, la P5 obtuvo los valores más altos de toda la población para estos dos rasgos genéticos.

El rasgo de ACR mostró a la progenie P4 con el valor más alto con 19,02%, seguida de las progenies P5 y P2 con valores de 18,98% y 18,96% respectivamente, la población general presentó un valor promedio de 18,25%. La población de palmas Deli *dura* del programa de mejoramiento genético de ASD en Costa Rica reporta contenidos de ACR en promedio de 20% (Alvarado et al, 2010), valores comparables con este estudio.

Por otra parte investigaciones realizadas en diferentes progenies *tenera* de palma de aceite, mostraron valores entre 21% a 23% de ACR (Nor Azwani et al., 2020). Sin embargo, la buena combinación de palmas tipo *dura* con palmas tipo *pisifera* puede llegar a aumentar de forma considerable el contenido de ACR, como lo

reportan los registros de diferentes progenies *dura* x *pisifera* evaluadas en Malasia con contenidos de ACR que oscilaron entre 25% y 29% (Arolu et al., 2016).

La prueba de Tukey no mostró diferencias significativas para los rasgos FNR y FR y sus valores se encontraron en 65,13% para FNR y en 73,01% para FS, estas características definen la eficiencia de la polinización entomófila, donde, el insecto *Elaeidobius kamerunicus* es el polinizador más eficiente en el cultivo de palma de aceite.

Trabajos realizados por (Swaray, Rafii, et al., 2021) en diferentes progenies *dura* x *pisifera* muestran la dinámica poblacional de estos insectos entre diferentes cultivares de siembra, con buenos porcentajes de FR que oscilaron entre 70% y 75%. El rasgo de MF mostró los mayores valores en la progenie P7 con 59,04%, seguido de las progenies P1 y P2 con valores de 57,30% y 56,04%, la progenie P6 con 51,87% presentó el valor más bajo para esta característica.

Tabla 1-7. Promedios generales de los rasgos de componentes de aceite en cada progenie evaluada.

| Progenie | PMF | ESR | ACMS | ACMF | ACR | FNR | FR | MF | AF | CF |
|------------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| P1 | 10,42ab | 90,54bc | 78,77a | 51,19b | 18,51a | 67,46a | 74,09a | 57,30ab | 13,81bc | 28,89b |
| P2 | 10,94a | 91,81a | 78,42a | 53,32ab | 18,96a | 65,86a | 76,35a | 56,04abc | 14,82b | 29,13b |
| P3 | 10,08ab | 89,78cd | 78,38a | 52,03ab | 16,84a | 61,03a | 69,98a | 52,89cd | 14,68b | 32,42a |
| P4 | 9,67abc | 91,49ab | 78,00a | 55,07a | 19,02a | 66,39a | 74,71a | 53,97bcd | 15,27b | 30,75ab |
| P5 | 8,53c | 88,97d | 79,62a | 55,12a | 18,98a | 68,67a | 72,44a | 54,55bcd | 15,18b | 30,27ab |
| P6 | 10,29ab | 89,50d | 78,29a | 50,68b | 16,61a | 65,34a | 71,92a | 51,87d | 17,82a | 30,31ab |
| P7 | 9,25bc | 91,23ab | 79,21a | 55,21a | 18,84a | 61,17a | 71,60a | 59,04a | 12,48c | 28,48b |
| Promedio general | 9,88 | 90,48 | 78,67 | 53,23 | 18,25 | 65,13 | 73,01 | 55,1 | 14,87 | 30,04 |
| CV (%) | 8,13 | 1,2 | 0,73 | 3,68 | 5,8 | 4,55 | 2,95 | 4,58 | 10,92 | 4,49 |
| Año | | | | | | | | | | |
| A1 | 8,70d | 91,49a | 79,55a | 51,34c | 17,93b | 74,88a | 87,13a | 53,28c | 16,6a | 30,12a |
| A2 | 9,18cd | 90,85ab | 74,94b | 51,47bc | 15,61c | 68,51ab | 79,72b | 52,95c | 15,54ab | 31,51a |
| A3 | 11,85a | 89,95bc | 79,48a | 54,48ab | 17,82b | 54,93d | 62,77e | 54,10c | 14,93b | 30,98a |
| A4 | 11,12ab | 89,80c | 80,25a | 56,88a | 20,86a | 63,62bc | 70,38cd | 58,16a | 11,96c | 29,87a |
| A5 | 10,21bc | 90,71abc | 79,23a | 52,89bc | 18,96ab | 68,51ab | 73,32bc | 54,71bc | 14,66b | 30,63a |
| A6 | 8,25d | 90,05bc | 78,57a | 52,32bc | 18,31b | 60,33cd | 64,75de | 57,37ab | 15,52ab | 27,11b |
| Promedio general | 9,89 | 90,48 | 78,67 | 53,23 | 18,25 | 65,13 | 73,01 | 55,1 | 14,87 | 30,04 |
| CV (%) | 14,35 | 0,72 | 2,43 | 3,98 | 9,36 | 10,79 | 12,62 | 3,94 | 10,55 | 5,15 |

Nota; PMF: Peso medio de fruto (gr), ESR: Espigas a racimo (%), ACMS: Aceite a mesocarpio seco (%), ACMF: Aceite a mesocarpio fresco (%), ACR: Aceite a racimo (%), FNR: Frutos normales a racimos (%), FR: Formación de racimo (%), MF: Mesocarpio a fruto (%), AF: Almendra a fruto (%), CF: Cuesco a fruto (%), CV: Coeficiente de variación. Los promedios con la misma letra dentro de la misma columna no son estadísticamente significativos a $p < 0.05$, mediante la prueba de Tukey (n=252).

MF es uno de los rasgos más deseables para ser introgresados en progenies mejoradas de palma de aceite, ya que el aceite se encuentra almacenado en el mesocarpio del fruto, la variabilidad genética encontrada en este estudio permitirá mejorar y avanzar en la selección de buenos progenitores femeninos que presenten esta característica. En progenies *dura* de origen nigeriano se han reportado valores de MF entre 52,5% y 61,2% (Noh et al., 2014) que coinciden con los valores encontrados en esta investigación. Adicional al MF, el AF y CF definen la composición de los frutos, la progenie P7 presentó los valores más bajos de AF y CF con valores de 12,48% y 28,48% respectivamente, por otro lado, la progenie P6 presento el valor más alto de KF con 17,82% y la progenie P3 presentó el valor más alto de CF con un valor de 32,42%.

Con respecto a los rasgos de AF y CF las investigaciones de (Arolu et al., 2017) en progenies *dura x pisifera* reportan valores medios de 6,22 para AF y de 11,94 para CF, que son claramente menores a los reportados en este estudio, explicación que se debe a la progenie evaluada que es de tipo *tenera* donde el CF se reduce a expensas del MF cuando se generan las progenies entre *dura* y *pisifera*, por lo que la adecuada selección de parentales y la evaluación de progenies por su habilidad combinatoria es determinante en la selección de las mejores progenies.

1.4.4 Heredabilidad y parámetros genéticos.

En general, estimar y encontrar variabilidad genética y heredabilidad en progenies de palma de aceite, asegura la maximización en la ganancia en futuras generaciones y por ende el continuo avance en los programas de mejoramiento (Ortega et al., 2018). La estimación de las heredabilidades y los parámetros genéticos de las 23 características analizadas en este estudio se presenta en la Tabla 1-8. La H^2_B más alta se registró en HT con 71,62%, seguido de NF con un valor de 46,64%, el rasgo de ESR con 45,49%, para la característica de AF la H^2_B fue de 44,47%, para LR un valor de 42,25% y para la característica de PMR con un valor de 40,73% fueron los rasgos más heredables encontrados en este estudio.

De acuerdo con Swaray et al. (2020), la heredabilidad para la característica de altura fue de 82,56% para progenies *dura x pisifera*, mostrando la alta heredabilidad de este rasgo genético. Por otro lado, investigaciones realizadas por Myint et al, (2019) en germoplasma del MPOB-Senegal sembrados *in situ*, reportan hallazgos para el rasgo genético de HT valores de 22,41% de H^2_B , registro que se contrasta con los valores altos reportados en progenies *dura x pisifera* y *dura x dura* como lo es en el caso de esta investigación.

El valor de H^2_B obtenido para el rasgo de HT, confirma la buena selección de los parentales que forman parte de su pedigree, además esta característica visualiza los buenos resultados en los ciclos de mejoramiento futuros. Por otro lado, las H^2_B más bajas se presentaron en ACMS con 1,69%, seguida de FR con un valor de 4,09% y la característica de FNR con 5,78% estos dos últimos rasgos muy influenciados por factores externos al genotipo como la labor de la polinización entomófila (Corley y Tinker, 2016). En estudios realizados en híbridos interespecíficos de palma de aceite (OxG) se reportan heredabilidades muy bajas para rasgos de aceite como (FR) con un valor de 4,9%, que es comparable con lo reportado en este estudio (Sunilkumar et al., 2015).

Tabla 1-8. Componentes de varianza y parámetros genéticos para los rasgos cuantitativos evaluados.

| Rasgo | σ^2g | σ^2ge | σ^2e | σ^2p | H^2_B (%) |
|-------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| RFF | 2,310,452 | -130,404 | 854,139 | 1072,14 | 21,55 |
| NR | 12,485 | 19,637 | 36,625 | 6,87 | 18,16 |
| PMR | 15,816 | 0,2805 | 20,212 | 3,88 | 40,73 |
| HTL | 4,584 | -0,3314 | 23,88 | 28,13 | 16,29 |
| STP | 0,0093 | -0,0029 | 0,07 | 0,08 | 12,2 |
| LR | 0,0387 | 0,0029 | 0,05 | 0,09 | 42,25 |
| LF | 296,733 | 88,229 | 44,38 | 82,88 | 35,8 |
| AF | 0,1493 | 0,1886 | 0,18 | 0,52 | 28,83 |
| NF | 25,41 | 0,2143 | 28,86 | 54,48 | 46,64 |
| HT | 0,0039 | 0,0000 | 0,0015 | 0,01 | 71,62 |
| AF | 0,1164 | 0,0486 | 0,284 | 0,45 | 25,93 |
| IAF | 0,0609 | 0,0139 | 0,2516 | 0,33 | 18,65 |
| DI | 0,0001 | 0,0006 | 0,0004 | 0,00 | 12,6 |
| PMF | 0,5639 | -0,1486 | 1,99 | 2,41 | 23,44 |
| ESR | 10,728 | 0,2457 | 1,04 | 2,36 | 45,49 |
| ACMS | 0,0933 | 0,7714 | 4,84 | 5,52 | 1,69 |
| ACMF | 31,767 | 0,0971 | 11,44 | 14,71 | 21,59 |
| ACR | 0,785 | 0,0629 | 5,79 | 6,64 | 11,83 |
| FNR | 40,522 | 76,657 | 58,35 | 70,07 | 5,78 |
| FR | 21,433 | -21,457 | 52,44 | 52,44 | 4,09 |
| MF | 5,705 | -0,0143 | 11,88 | 17,57 | 32,47 |
| AF | 24,656 | 0,0086 | 3,07 | 5,54 | 44,47 |
| CF | 15,039 | 0,1286 | 5,22 | 6,85 | 21,95 |

Nota: σ^2g = Varianza genética, σ^2ge = Interacción entre varianza genética y ambiental, $\sigma^2 e$ = Varianza ambiental, $\sigma^2 p$ = Varianza fenotípica, H^2_B = Heredabilidad en sentido amplio (%), RFF: Racimos de fruta fresca (kg palma⁻¹), NR: Número de racimos (racimos palma⁻¹), PMR: Peso medio de racimo (kg), HTL: Hojas totales (Número de hojas palma⁻¹), STP: Sección transversal del peciolo (cm²), LR: Longitud de raquis (cm), LF: Longitud de foliolo (cm), AF: Ancho de foliolo (cm), NF: Número de foliolos, HT: Altura de planta (m año⁻¹), AF: Área foliar (cm²), IAF: Índice de área foliar, DI: diámetro de estípite (m), PMF: Peso medio de fruto (gr), ESR: Espigas a racimo (%), ACMS: Aceite a mesocarpio seco (%), ACMF: Aceite a mesocarpio fresco (%), ACR: Aceite a racimo (%), FNR: Frutos normales a racimo (%), FR: Formación de frutos (%), MF: Mesocarpio a fruto (%), AF: Almendra a fruto (%), CF: Cuesco a fruto (%).

1.4.5 Análisis de correlación de parámetros agronómicos.

Las asociaciones entre los rasgos de rendimiento se separaron por etapa de desarrollo del cultivo, etapa joven y etapa adulta. Se observaron comportamientos similares en el análisis para todo el ciclo del cultivo entre los rasgos de rendimiento, con alta correlación entre RFF y NR ($r = 0,70$, $p \leq 0,01$), RFF y PMR ($-0,41$) y una alta correlación entre NR y PMR con un valor de ($r = -0,86$, $p \leq 0,01$). Estos valores sugieren que el aumento positivo en NR y PMR mejorará significativamente el rendimiento de RFF (Figura 1-2).

En sus investigaciones Nor Azwani et al. (2020), de diferentes potenciales genéticos en materiales derivados de Nigeria, Zaire y Camerún, reportan correlaciones similares encontradas en este estudio, para RFF y NR ($r=0,58$) y para RFF y PMR ($r=0,21$). En accesiones tipo *dura* del banco de germoplasma de *Elaeis guineensis* de Embrapa (Brasil) los análisis de correlaciones fenotípicas presentan valores altos y positivos para los rasgos de RFF y NR con un $r = 0,78$ al $p \leq 0,01$ (De Almeida Rios et al., 2018).

Para los principales rasgos vegetativos de interés, los coeficientes de correlación de Pearson mostraron valores de correlación de ($r = 0,10$, $p \leq 0,01$) entre HT y AF, y una baja asociación entre HT y IAF con un valor de $0,13$, $p \leq 0,01$. En contraste se logró una correlación significativa entre AF y IAF con un $r = 0,54$, $p \leq 0,01$ (Figura 1-3). El conocimiento de la asociación de los diferentes rasgos genéticos en palma de aceite, es fundamental para la selección de progenies con ganancias genéticas directas (Cedillo et al., 2008).

Para las características de aceite los coeficientes de correlación fuertes y positivos se presentaron en ACMS y ACR con $r = 0,61$, ($p \leq 0,01$), seguido de la correlación entre MF y ACR con un coeficiente de $0,51$ ($p \leq 0,01$), entre ACR y FR se presentó una correlación inversa con un coeficiente de $r = -0,41$, ($p \leq 0,01$) y entre ACR y FNR se presentó una baja correlación ($r = 0,18$, $p \leq 0,01$). Finalmente, entre MF y CF se presentó un coeficiente de correlación inverso alto de $r = -0,84$ ($P \leq 0,01$) el

cual fue el más alto encontrado entre las diferentes comparaciones analizadas (Figura 1-4). Las correlaciones altas y positivas encontradas para ACR con otros rasgos genéticos de interés, aumentan la posibilidad de seguir aumentando los contenidos de aceite en las próximas progenies mejoradas. Las investigaciones realizadas en diferentes materiales derivados de Nigeria, Zaire y Camerún mostraron las ventajas y perspectiva de tener estas altas correlaciones en rasgos genéticos que afiancen la selección y progreso genético en palma de aceite (Nor Azwani et al., 2020).

Figura 1-2. Correlación de Pearson para los rasgos de rendimiento en progenies *dura x dura*. (A) etapa joven. (B) etapa adulta y (C) todo el ciclo del cultivo. FFB: racimos de fruta fresca, BNO: número de racimos, ABW: peso medio del racimo. *** correlaciones altamente significativas ($p \leq 0.01$).

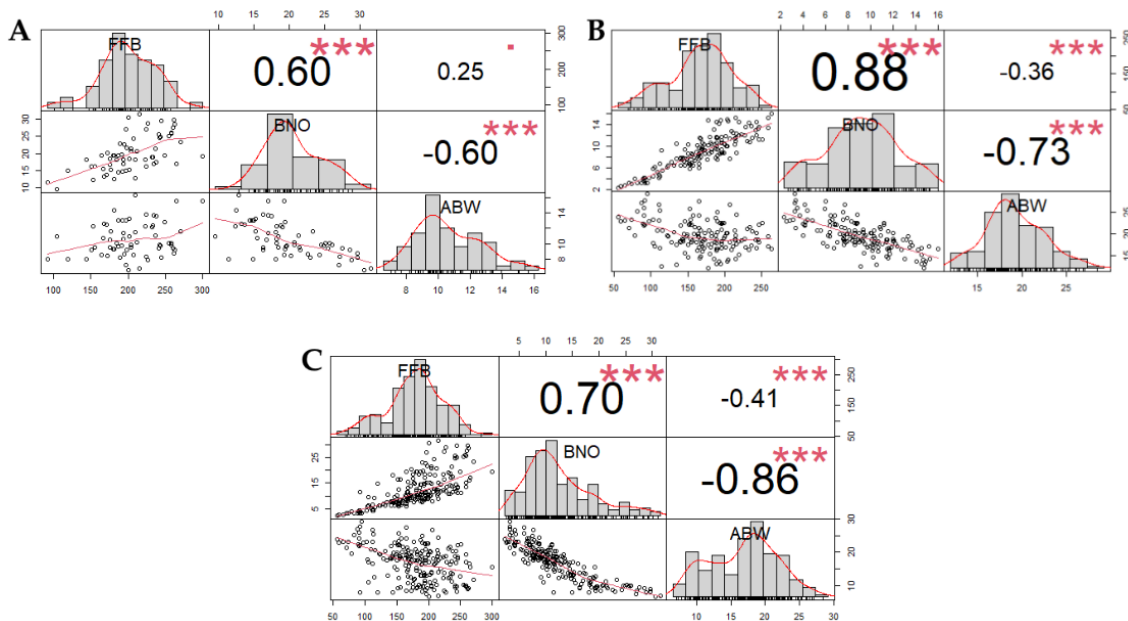


Figura 1-3. Correlacion de Pearson para los rasgos vegetatiivos en progenies *dura x dura*. HT: incremento de altura, LA: área foliar, LAI: índice de área foliar. *** correlaciones altamente significativas ($p \leq 0.01$).

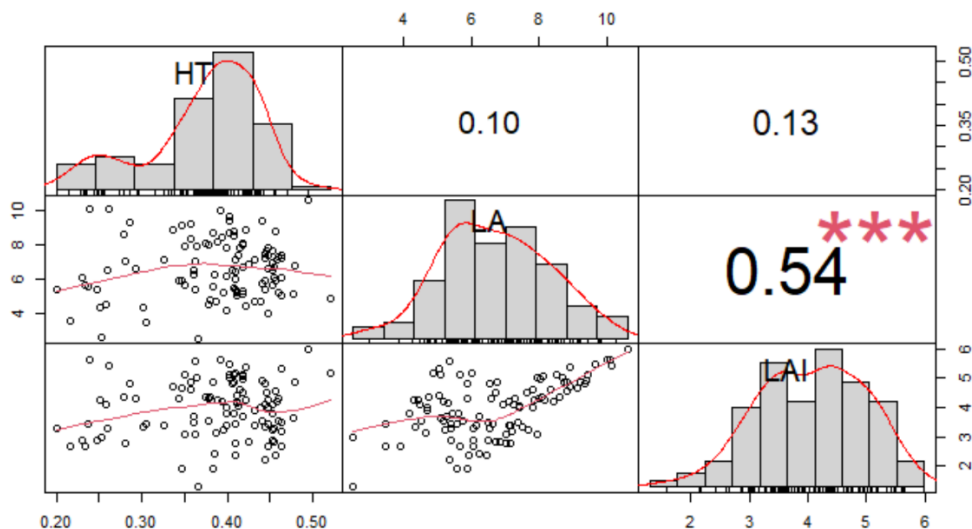
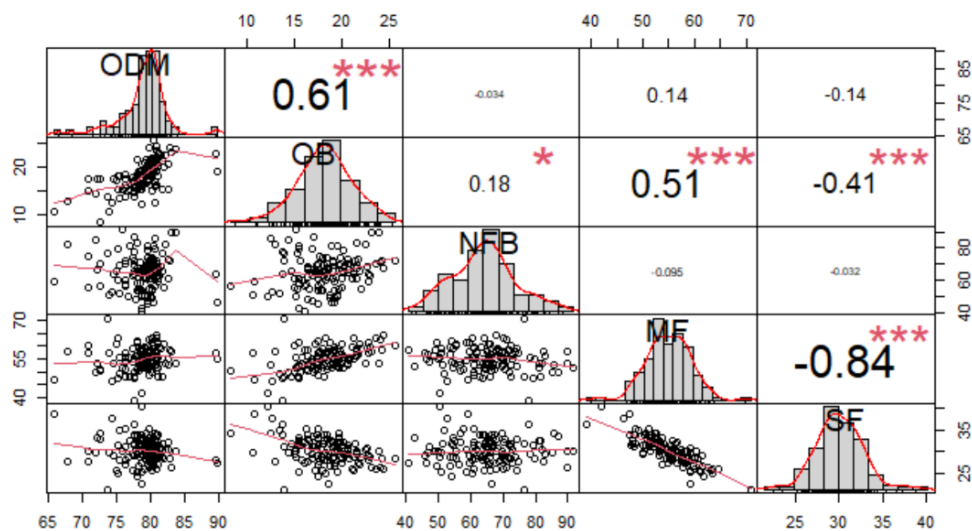


Figura 1-4. Correlacion de Pearson para los rasgos de componentes de racimo en progenies: ODM: aceite a mesocarpio seco, OB: aceite a racimo, NFB: frutos normales a racimo, MF: mesocarpio a fruto SF: cuesco a fruto. *** correlaciones altamente significativas ($p \leq 0.01$), * correlaciones significativas ($p \leq 0.05$).



1.5 Conclusiones.

El desarrollo de cultivares comerciales de palma de aceite *Elaeis guineensis* con una vida productiva y económica de más de 35 años es posible, mediante la identificación de progenies enanas tipo *dura* con altos rendimientos, lo que permite una mayor rentabilidad y sostenibilidad de los cultivos de palma de aceite.

De acuerdo con los resultados obtenidos para los rasgos genéticos de rendimiento, parámetros vegetativos y componentes de racimo, existe una amplia variación genética en la población estudiada de las progenies de lento crecimiento de Cenipalma, lo que permitirá una selección adecuada de los parentales femeninos en palma de aceite. Por el rasgo de incremento anual de altura, la progenie P6 se destaca con la tasa de crecimiento anual más baja de 0,29 cm al año, posicionándola como una de las candidatas seleccionadas para la producción de cultivares comerciales. Por otro lado, la heredabilidad en sentido amplio para esta característica fue la más alta, siendo 72% un rasgo con baja influencia ambiental, permitiendo el desarrollo futuro de progenies enanas en diferentes ambientes.

Por otro lado, el IAF encontrado en la progenie P1 con 5,49 y en la progenie P6 con 5,43 resaltan otros rasgos genéticos de interés en el cultivo de la palma de aceite, para futuras progenies mejoradas. El rendimiento de RFF en las progenies evaluadas osciló entre 165 y 208 kg por palma al año. Este último valor identificado en la P3 la convierten en una candidata para aumentar la selección de plantas con altos rendimientos que pueden combinarse con otros rasgos genéticos. En general, el rendimiento de estas progenies fue similar a los cultivares mejorados Deli *dura* con valores para el RFF y NR que oscilaron entre 180 y 210 kg por palma por año y de 6 a 11 racimos por palma por año (Noh et al., 2014).

Las nuevas poblaciones de parentales femeninos desarrollados a partir de la selección recíproca recurrente (RRS) permitirán la introducción de rasgos genéticos de interés para darle valor agregado a los nuevos cultivares. Este es el caso de la población dura enana de Cenipalma, que se utilizará para avanzar en los nuevos ciclos de mejoramiento, maximizando las ganancias genéticas. Además de las progenies enanas y altamente productivas, rasgos como la resistencia a enfermedades, tolerancia a factores abióticos y mejoramiento en la calidad del aceite, podrían introducirse para generar cultivares diferenciados en los ciclos de mejoramiento de los cultivos posteriores.

1.6 Bibliografía.

- Agaba, R., Rubaihayo, P., Tukamuhabwa, P., Mwangi, R. O. M., Tumwegamire, S., Ndirigwe, J., Heider, B., & Grüneberg, W. (2021). Genetic variation and response to selection for storage root dry matter and associated traits in a population of yam bean (*Pachyrhizus* spp.) interspecies crosses. *Euphytica*, 217(4). <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02776-1>
- Al-Khayri, J. M., Jain, S. M., & Johnson, D. V. (2019). Advances in plant breeding strategies: Industrial and food crops. In *Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23265-8>
- Alvarado, A. Chinchilla, C. Rodríguez, J. (2007). Desempeño de dos variedades de palma aceitera (Deli x Avros y Deli x Ghana) plantadas a diferentes densidades en dos sitios, en ASD PAPER: 35–41.
- Alvarado, A, & Henry, J. (2015). *Evolution Blue : a new oil palm variety with reduced growth and high oil content*. 1–8.
- Alvarado, Amancio. (2010). Avances en el mejoramiento genético de la palma de aceite en Centroamérica. *Palmas*, 31(1), 126–143.
- Annual, W. (2021). *Index & General Notes OIL WORLD ANNUAL 2017 – Table of Contents*. 1, 2016–2018.
- Arolu, I. W., Rafii, M. Y., Marjuni, M., Hanafi, M. M., Sulaiman, Z., Rahim, H. A., Abidin, M. I. Z., Amiruddin, M. D., Din, A. K., & Nookiah, R. (2017). Breeding of high yielding and dwarf oil palm planting materials using Deli dura x Nigerian pisifera population. *Euphytica*, 213(7). <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1943-z>
- Arolu, I. W., Rafii, M. Y., Marjuni, M., Hanafi, M. M., Sulaiman, Z., Rahim, H. A., Kolapo, O. K., Abidin, M. I. Z., Amiruddin, M. D., Kushairi Din, A., & Nookiah,

- R. (2016). Genetic variability analysis and selection of pisifera palms for commercial production of high yielding and dwarf oil palm planting materials. *Industrial Crops and Products*, 90, 135–141.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.006>
- Ayala, I., Romero, H., Tupaz, A., Daza, E., Rincón, A., Caicedo, A., Fontanilla, C., & Mosquera, M. (2017). Comportamiento agronómico de cultivares comerciales de palma de aceite en el Campo Experimental Palmar de La Vizcaína. In *Variedades de palma de aceite sembradas en el Campo Experimental Palmar de la Vizcaína*.
- Barcelos, E., De Almeida Rios, S., Cunha, R. N. V., Lopes, R., Motoike, S. Y., Babiychuk, E., Skiryicz, A., & Kushnir, S. (2015). Oil palm natural diversity and the potential for yield improvement. *Frontiers in Plant Science*, 6(MAR), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00190>
- Bastidas, S., Peña R., E. A., & Reyes C., R. (2003). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) del proyecto de mejoramiento genético de Corpoica. *Revista Palmas*, 24(1), 21–29.
<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950%0Ahttp://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950/950>
- Beirnaert, A., & Vanderweyen, R. (1941). Contribution à l'étude génétique et biométrique des varités d' *Elaeis guineensis* Jacq. In *Publications de l' institut national pour l'étude agronomique du Congo Belgique: Vol. Serie Cien* (Serie scie, Issue 27). Bruxelles: Institut national pour l'étude agronomique du Congo belge (INEAC).
- Breure, C. J. (2010). Rate of leaf expansion: A criterion for identifying oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) types suitable for planting at high densities. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 141–147.
<https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.03.001>
- Breure, C. J., & Powell, M. S. (1987). *The One Shot Method of Establishing Growth Parameters on Oil Palm*.
<https://books.google.com.co/books?id=PbJdAQAACAAJ>
- Cedillo, D. S. O., Barros, W. S., Ferreira, F. M., Dias, L. A. dos S., Rocha, R. B., & Cruz, C. D. (2008). Correlation and repeatability in progenies of African oil palm. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 30(2), 197–201.
<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i2.1728>
- Corley, R. H. V, & Breure, C. J. (1981). *Measurements in Oil Palm Experiments*. s.ed. <https://books.google.com.co/books?id=Lcq8GwAACAAJ>
- Corley, R. H. V, & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (Fifth edit). Wiley-Blackwell.
- Cruz, Cosme Damião; Carneiro, P. S. (2003). *Aplicados ao Melhoramento Genético* (UFV (ed.); Volumen 2).
- de Almeida Rios, S., Vieira da Cunha, R. N., Lopes, R., Barcelos, E., Raimundo Nonato Carvalho da Rocha, & Alves de Lima, W. A. (2018). Correlation and Path analysis for yield components in Dura oil palm germplasm. *Industrial Crops and Products*, 112(December 2017), 724–733.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.054>
- Domiciano, G. P., Alves, A. A., Laviola, B. G., & da Conceição, L. D. H. C. S. (2015). Parâmetros genéticos e diversidade em progênies de macaúba com

- base em características morfológicas e fisiológicas. *Ciencia Rural*, 45(9), 1599–1605. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140909>
- Donough, C. R. (2005). *Breeding oil palms for high oil yield in IOI Group : 1 . First cycle development of OPGL-derived materials. March 2005.*
- Dumortier, F. (2007). *and Quality of Dami Seeds.* 28, 213–226.
- Ekaso, D. D., Allan, M. M., Pattison, D. R. M., Trouw, R. A. J., Muluneh, A. A., Kidane, T., Rowland, J., Bachtadse, V., Zealand, N., Evans, D., Ebinger, C. J., Yemane, T., Harding, D. J., Tesfaye, S., Kelley, S., Rex, D. C., Mogessie, A., Krenn, K., Schaflechner, J., Gessesse, B. Y. A. (2003). GUÍA DE CONCEPTOS DE GENETICA CUANTITATIVA. *Precambrian Research*, 123(1), 1689–1699.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.047>[http://www.geohaz.org/news/images/publications/gesi-report with prologue.pdf](http://www.geohaz.org/news/images/publications/gesi-report%0Ahttp://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/earthquakes_en.pdf)http://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/earthquakes_en.pdf<http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2011.06.005>
- Falconer, D. Mackay, T. (1996). *Introduction to quantitative genetics* (p. 448). Pearson Education Ltd, Essex.
- Fedepalma. (2018). *Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.* 552.
- Fedepalma. (2020). *Anuario estadístico 2020. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo.* 238.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/13235/13024>
- Fedepalma. (2021). *Anuario Anuario Estadístico. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo.*
- Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., & Bouzerzour, H. (2020). Expected genetic gains from mono trait and indexbased selection in advanced bread wheat (*Triticum aestivum* L.) populations. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(2), 9131–9141. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n2.77806>
- Fontalvo Gómez, M. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospectiva*, 12(1), 90.
<https://doi.org/10.15665/rp.v12i1.155>
- G.F. Ngando-Ebongue, W.N. Ajambang, P. Koon, B. Lalu Firman, and V. A. (2012). Technological innovations in major world oil crops, volume 1. In *Technological Innovations in Major World Oil Crops, Volume 1: Breeding* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2>
- Gomes, D. A., Alves, I. M., Maciel, G. M., Siquieroli, A. C. S., Peixoto, J. V. M., Pires, P. D. S., & De Medeiros, I. A. (2021). Genetic dissimilarity, selection index and correlation estimation in a melon germplasm. *Horticultura Brasileira*, 39(1), 46–51. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210107>
- Guillermo Vallejo Rosero. (1980). *EL MATERIAL PLANTABLE DE PALMA AFRICANA DE ACEITE.*
- Hardon, J. J., Williams, C. N., & Watson, I. (1969). Leaf area and yield in the oil palm in malaya. *Experimental Agriculture*, 5(1), 25–32.

- <https://doi.org/10.1017/S0014479700009935>
- Hefena, A., Sultan, M., Abdel-Moneam, M., Hammoud, S., Barutçular, C., & EL-Sabagh, A. (2016). Assessment of Genetic Variability and Correlation Coefficient to Improve Some Agronomic Traits in Rice. *Journal of Experimental Agriculture International*, 14(5), 1–8.
<https://doi.org/10.9734/jeai/2016/29743>
- Ishak, Z., Hashim, A. T., Rosli, S. K., Abu Bakar, D., Ooi, S. E., Mohd, N., & Ong-Abdullah, M. (2020). *Oil Palm Tissue Culture: Fast Tracking Elite Commercial Lines*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22549-0_5
- Kalyana Babu, B., Mathur, R. K., Naveen Kumar, P., Ramajayam, D., Ravichandran, G., Venu, M. V. B., & SparjanBabu, S. (2017). Development, identification & validation of CAPS marker for SHELL trait which governs dura, pisifera & tenera fruit forms in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *PLoS ONE*, 12(2), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171933>
- Lustri, E. A., Siqueira, W. J., Filho, J. A. de A., Vianna, S. A., & Colombo, C. A. (2021). Estimates of genetic parameters for juvenile traits in macaw palm. *Bragantia*, 80. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200463>
- Machado, E. L., Silva, S. A., Fernandes, L. dos S., & Brasileiro, H. S. (2016). Genetic variability and homozygosity in a F4 castor bean population by microsatellite markers. *Bragantia*, 75(3), 307–313.
<https://doi.org/10.1590/1678-4499.536>
- Murugesan, P., Rani, K. L. M., Ramajayam, D., Kumar, K. S., Mathur, R. K., Ravichandran, G., Kumar, P. N., & Arunachalam, V. (2015). Genetic diversity of vegetative and bunch traits of African oil palm (*Elaeis guineensis*) germplasm in India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 85(7), 892–895.
- Myint, K. A., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Samad, M. Y. A., Ramlee, S. I., Yaakub, Z., & Oladosu, Y. (2019). Genetic diversity and selection criteria of MPOB-Senegal oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) germplasm by quantitative traits. *Industrial Crops and Products*, 139(July).
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111558>
- Myint, K. A., Ramlee, S. I., Oladosu, Y., Amiruddin, M. D., Yaakub, Z., Samad, M. Y. A., Rafii, M. Y., & Ramlee, S. I. (2021). Character interrelationships and path analysis for yield components in mpob-senegal oil palm germplasm. *Sains Malaysiana*, 50(3), 699–709. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5003-12>
- Noh, A., Rafii, M. Y., Mohd Din, A., Kushairi, A., Norziha, A., Rajanaidu, N., Latif, M. A., & Malek, M. A. (2014). Variability and performance evaluation of introgressed Nigerian dura x Deli dura oil palm progenies. *Genetics and Molecular Research*, 13(2), 2426–2437.
<https://doi.org/10.4238/2014.April.3.15>
- Noh, A., Rafii, M. Y., Saleh, G., Kushairi, A., & Latif, M. A. (2012). Genetic performance and general combining ability of oil palm Deli dura x AVROS pisifera tested on inland soils. *The Scientific World Journal*, 2012.
<https://doi.org/10.1100/2012/792601>
- Nor Azwani, A. B., Fadila, A. M., Mohd Din, A., Rajanaidu, N., Norziha, A., Suzana, M., Marhalil, M., Zulkifli, Y., & Kushairi, A. (2020). Potential oil palm

- genetic materials derived from introgression of germplasm (MPOB-Nigeria, MPOB-Zaire and MPOB-cameroon accessions) to advanced (AVROS) breeding population. *Journal of Oil Palm Research*, 32(4), 569–581.
<https://doi.org/10.21894/jopr.2020.0072>
- Nyouma, A., Bell, J. M., Jacob, F., Riou, V., Manez, A., Pomiès, V., Nodichao, L., Syahputra, I., Affandi, D., Cochard, B., Durand-Gasselin, T., & Cros, D. (2020). Genomic predictions improve clonal selection in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) hybrids. *Plant Science*, 299(January), 110547.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110547>
- Ortega Cedillo, D., Barrera, C. F., Ortega Cedillo, J., Orellana Carrera, J., Vilela De Resende, M. D., & Cruz, C. D. (2018). Estimates of parameters, prediction and selection of an oil palm population in Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 71(2), 8477–8487.
<https://doi.org/10.15446/rfna.v71n2.71928>
- Pavlotzky, B., & Murillo, O. (2014). Expected genetic gain and genotype-environment interaction in *Acacia mangium* in the northern region of Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 0(0), 7–17.
- Prada, F.; Romero, H. M. (2012). *Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de la palma de aceite, Guía de Facilitadores*. (Cenipalma (ed).
- Prathapani Naveen Kumar, B. Kalyana Babu, Ravi K. Mathur, D. R. (2018). Genetic Engineering of Oil Palm. *Public Health*, 121, 572–575.
- Rajanaidu, N. (2016). aceite en los últimos cincuenta años : una aventura personal * A Review of Oil Palm Breeding for the Past 50 Years : *Revista Palmas*, 37, 190–202.
- Reyes, P. a., Ochoa, J. C., Montoya, C., Daza, E., Ayala, I. M., & Romero, H. M. (2015). Development and validation of a bi-directional allele-specific PCR tool for differentiation in nurseries of dura, tenera and pisifera oil palms. *Agronomía Colombiana*, 33(1), 5–10.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n1.47988>
- Rocha, R. B., Teixeira, A. L., Ramalho, A. R., Espindula, M. C., Pereira Lunz, A. M., & Souza, F. D. F. (2021). *Coffea canephora* breeding: Estimated and achieved gains from selection in the western amazon, Brazil. *Ciencia Rural*, 51(5), 1–11. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200713>
- Saldaña-Villota, T. M., & Cotes-Torres, J. M. (2020). Radiation interception and leaf area index from foliage cover in diploid potato. *Agronomy Journal*, 112(4), 2805–2811. <https://doi.org/10.1002/agj2.20241>
- Sapey, E., Peprah, B., Adusei-Fosu, K., & Agyei-Dwarko, D. (2015). Genetic Variability of Fresh Fruit Bunch Yield (FFB) Yield in Some Dura X Pisifera Breeding Populations of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 15(8), 1637–1640.
<https://doi.org/10.5829/idosi.aej.2015.15.8.12738>
- Shafique, M., Ahsan, M., & Mehmood, Z. (2016). Genetic variability and interrelationship of various agronomic traits using correlation and path analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Academia Journal Of, March*.
<https://doi.org/10.15413/ajar.2015.0184>
- Shi, P., Wang, Y., Zhang, D., Htwe, Y. M., & Osayande Ihase, L. (2019). Analysis

- on fruit oil content and evaluation on germplasm in oil palm. *HortScience*, *54*(8), 1279–1275. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14044-19>
- Singh, R., Low, E. T. L., Ooi, L. C. L., Ong-Abdullah, M., Ting, N. C., Nagappan, J., Nookiah, R., Amiruddin, M. D., Rosli, R., Manaf, M. A. A., Chan, K. L., Halim, M. A., Azizi, N., Lakey, N., Smith, S. W., Budiman, M. A., Hogan, M., Bacher, B., Van Brunt, A., ... Martienssen, R. A. (2013). The oil palm SHELL gene controls oil yield and encodes a homologue of SEEDSTICK. *Nature*, *500*(7462), 340–344. <https://doi.org/10.1038/nature12356>
- Sparnaaij, L. D., Menendez, T., & Blaak, G. (1963). *Breeding and Inheritance in the Oil Palm*. <https://books.google.com.co/books?id=5uVptwAACAAJ>
- Sunilkumar, K., Mathur, R. K., Sparjanbabu, D. S., & Pillai, R. S. N. (2015). Evaluation of interspecific oil palm hybrids for dwarfness. *Journal of Plantation Crops*, *43*(1), 29–34.
- Swaray, S., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Jamian, S., Ismail, M. F., Jalloh, M., Eswa, M., Marjuni, M., Akos, I. S., & Yusuff, O. (2021). Oil palm inflorescence sex ratio and fruit set assessment in dura × pisifera biparental progenies on fibric peat soil. *Agronomy*, *11*(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy11071380>
- Swaray, S., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Jamian, S., Ismail, M. F., Jalloh, M., Marjuni, M., Mohamad, M. M., & Yusuff, O. (2020). Influence of parental dura and pisifera genetic origins on oil palm fruit set ratio and yield components in their D × P Progenies. *Agronomy*, *10*(11), 1–30. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111793>
- Swaray, S., Rafii, M. Y., Amiruddin, M. D., Ismail, M. F., Jamian, S., Jalloh, M., Oladosu, Y., Mohamad, M. M., Marjuni, M., Kolapo, O. K., & Chukwu, S. C. (2021). Article assessment of oil palm pollinating weevil (*Elaeidobius kamerunicus*) population density in biparental dura × pisifera hybrids on deep peat-soil in Perak State, Malaysia. *Insects*, *12*(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/insects12030221>
- Swaray, S., Rafii, M. Y., Amiruddin, M. D., Ismail, M. F., Jamian, S., Marjuni, M., Jalloh, M., Yusuff, O., & Mohamad, M. M. (2020). Study on Yield Variability in Oil Palm Progenies and Their Genetic Origins. *Biology and Life Sciences Forum*, *4*(1), 68. <https://doi.org/10.3390/iecps2020-08760>
- Tiemann, T. T., Donough, C. R., Lim, Y. L., Härdter, R., Norton, R., Tao, H. H., Jaramillo, R., Satyanarayana, T., Zingore, S., & Oberthür, T. (2018). Feeding the Palm: A Review of Oil Palm Nutrition. *Advances in Agronomy*, *152*, 149–243. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.07.001>
- USDA. (2020). *United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service*. <https://apps.fas.usda.gov/esrquery/>

2. Capítulo 2

Ganancia genética en progenies de tipo *dura x dura* de *Elaeis guineensis* Jacq en diferentes ciclos de mejoramiento genético

2.1 Resumen

El éxito de los programas de mejoramiento genético depende de la variabilidad genética disponible, desde la introducción de los materiales, colecta de nuevas accesiones. El uso de los índices de selección y la determinación de la ganancia genética son herramientas determinantes para avanzar en la selección de progenitores sobresalientes que posteriormente sean utilizados para la obtención de cultivares mejorados para características de interés. Con el objetivo principal de calcular la ganancia genética en diferentes ciclos y en dos poblaciones de palma de aceite, en esta investigación se evaluó el rendimiento, parámetros vegetativos y componentes de aceite en dos poblaciones de palma de aceite identificadas como C0-Monterrey y C1-Vizcaina. El análisis se llevó a cabo utilizando el análisis de varianza, para calcular los componentes de variación fenotípica, genotípica y ambiental, también se calculó el coeficiente de variación genético y la heredabilidad para todos los caracteres evaluados del cultivo. La ganancia genética (GS) más representativas se dieron en los rasgos de rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF) con 19%, para el número de racimos por planta (NR) con una GS de 18.7% y para la característica de aceite a racimo (ACR) con una GS del 6%. Se reportaron bajas influencias ambientales en la variación fenotípica para las diferentes características evaluadas y finalmente altos valores de heredabilidad para rasgos genéticos como altura de planta (HT) con 93% y peso medio del racimo (PMR) con un 85%. El desarrollo de nuevas progenies, utilizando parentales femeninos elites

tipo *dura con* excelentes rendimientos de fruta fresca, componentes de racimo y de lento crecimiento, con resistencia a problemas sanitarios serán el futuro de la palmicultura mundial.

2.1.1 Palabras claves

Rasgos genéticos, palma de aceite, heredabilidad, varianza genética, respuesta a la selección.

2.2 Introducción

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es el cultivo de mayor producción de aceite entre todos los cultivos de semillas oleaginosas, representa más del 40% de la producción total de los aceites comestibles (USDA, 2020). Es la especie de mayor extracción de aceite por unidad de área, llegando a producir hasta 10 ton. ha⁻¹ en condiciones óptimas de manejo agronómico y el uso de cultivares mejorados altamente productivos. La palma de aceite es la segunda mayor fuente mundial de aceite vegetal después de la soya y con más de 23 millones de hectáreas cultivadas en el mundo (Annual World, 2021).

Colombia ocupa el cuarto lugar a nivel mundial, por detrás de Indonesia, Malasia y Nigeria y el primero en América Latina en producción de aceite de palma. Para el 2020, Colombia contaba con más de 550.000 hectáreas sembradas en cuatro principales zonas productoras del país (Fedepalma, 2020).

La palma de aceite tiene una base genética estrecha, su origen proviene de un número pequeño de palmas, el origen del progenitor femenino Deli *dura* proviene de cuatro palmas del jardín botánico de Bogor y la fuente de polen como progenitor masculino *pisifera* descende de un número limitado de plantas (Al-Khayri et al., 2019). En la palma de aceite existen tres tipos de fruto; *dura*, *pisifera* y *tenera*, el último siendo un híbrido intraespecífico entre palmas con frutos tipo *dura* x tipo *pisifera* (Beirnaert & Vanderweyen, 1941). Donde los tipos de frutos que definen el grosor o la ausencia del endocarpio o shell, están codificados por el gen Sh (Reyes et al., 2015; Singh et al., 2013). Los cultivares comerciales son de tipo *tenera* por

tener mayores contenidos de mesocarpio en el fruto, por lo tanto mayores contenidos de aceite por hectárea (Kalyana Babu et al., 2017). Para la producción de semillas comerciales el parental femenino siempre es de tipo *dura* (Rajanaidu, 2016). La producción de semillas comerciales en palma de aceite es el resultante del cruzamiento intraespecífico *dura x pisifera* (DxP) y depende del mejoramiento de las dos poblaciones, por lo cual los esquemas de mejoramiento están diseñados para el desarrollo y mejoramiento de estas dos poblaciones de manera independiente, dentro de estos esquemas de mejoramiento genético, uno de los métodos más utilizados en el cultivo es el de selección recíproca recurrente (Al-Khayri et al., 2019).

En palma de aceite, la selección recíproca recurrente (RRS) permite el mejoramiento de dos poblaciones de manera independiente y en cada una los caracteres de interés, para posteriormente ser combinadas, continuando con su evaluación y selección en un nuevo ciclo de mejoramiento, de tal manera que se mantenga un alto grado de variación genética en las poblaciones (Ishak et al., 2020). Por otra parte, la estrategia de hacer selección familiar e individual mediante el método *family and individual palm selection* (FIPS) en palma de aceite, permite identificar palmas tipo *dura* como parentales femeninos para la producción de cultivares comerciales *tenera* (*dura x pisifera*), en donde la selección de los parentales promisorios se puede basar en el comportamiento de las progenies o a nivel de palmas individuales. La selección individual tiene como énfasis la selección de caracteres con alta heredabilidad, mientras que aquellos rasgos con menor heredabilidad se evalúan por medio del comportamiento de las familias o pruebas de progenies (Ngando-Ebongue et al., 2012).

El centro de investigación en palma de aceite - Cenipalma, cuenta con una progenie tipo *dura* enana de genotipos asiáticos y africanos. En sus orígenes, genotipos de palma Deli *dura* fueron introducidos a la estación agrícola de Lancetilla en Honduras en Centroamérica desde el Sudeste Asiático alrededor de los años 40's (Bastidas et al., 2003). Posteriormente, progenies seleccionadas fueron llevadas a

Colombia por el Instituto de Fomento Algodonero (IFA) a las plantaciones de Patuca y Pepilla en el caribe colombiano, donde las mejores familias fueron cruzadas con genotipos africanos dando origen a las primeras plantaciones comerciales de palma de aceite de Colombia en los años 60's con cultivares Dura-IFA, las cuales a diferencia de las actuales plantaciones alrededor del mundo que son tipo *tenera*, eran cultivares con frutos tipo *dura*, lo que permitió realizar nuevos procesos de mejoramiento genético con evaluaciones y selecciones de los mejores individuos por sus componentes de rendimiento y características vegetativas como el lento crecimiento del estípote. A partir de las mejores selecciones se generaron progenies élite tipo *dura* adaptadas a las condiciones ambientales de Colombia, introgressando características de lento crecimiento con altas producciones de racimo y potencial de aceite, las cuales fueron establecidas en campo a partir del año 2005, esta prueba es conocida como la población *dura* de lento crecimiento o progenies *dura* enanas de Cenipalma. El éxito de los programas de mejoramiento depende de la variabilidad genética, en la practica la utilidad de la ganancia genética por selección mejora de manera considerable la elaboración de criterios para el mejoramiento y la selección de individuos genéticamente superiores (Gomes et al., 2021). En las estrategias de evaluación, selección y desarrollo de individuos que muestren superioridad genética en las características agronómicas, la estimación de ganancias genéticas se vuelve primordial para el éxito de la industria de los diferentes cultivos (Pavlotzky & Murillo, 2014; Rocha et al., 2021). En una especie perenne como la palma de aceite, la estimación de ganancia genética por unidad de tiempo (ciclo de vida productiva) puede identificar la eficiencia de los métodos utilizados en un programa de mejoramiento genético (Lustri et al., 2021).

Teniendo en cuenta la importancia que tiene para la agroindustria de la palma de aceite, la descripción del avance genético dentro de sus poblaciones mejoradas, esta investigación tuvo como objetivo principal calcular las ganancias genéticas, respuesta y diferencial de selección para poblaciones de palma de aceite tipo *dura* de Cenipalma en dos ciclos de mejoramiento genético.

2.3 Materiales y métodos.

2.3.1 Sitio de estudio y genealogía de las poblaciones.

La presente investigación se realizó en dos poblaciones de palma de aceite. A pesar que las poblaciones evaluadas corresponden a ciclos sucesivos de selección que iniciaron en el Sudeste Asiático, pasando por Centro América y Colombia tal como se mostró previamente en la introducción, donde no se contó con información fenotípica de ciclos previos de selección recurrente, por tal razón, la población inicial de este estudio corresponde a C0-Monterrey, que estuvo ubicada en el municipio de Puerto Wilches (Santander-Colombia), en la plantación Monterrey situada a 65 msnm, con una temperatura media de 28 °C y una precipitación media anual acumulada de 2.869 mm, sembrada en los años 60's con materiales de palma de aceite tipo Dura-IFA. La segunda población, C1-Vizcaina, es una prueba de progenie tipo *dura* enana sembrada en 2005 en el Campo Experimental Palmar de La Vizcaína (CEPV), del Centro Nacional de Investigación en Palma (CENIPALMA), municipio de Barrancabermeja (Santander-Colombia), localizada a una elevación de 102 msnm, una temperatura media de 29.3 °C, humedad relativa entre el 72 y 77 %, brillo solar de 2020 horas año⁻¹ y una precipitación media anual acumulada de 3.472 mm. Para C0-Monterrey, las mediciones se realizaron entre los años 1990 a 2000 y para C1-Vizcaina las mediciones se tomaron entre 2008 a 2020. Para la población C1-Vizcaina, los manejos y practicas agronómicas se realizaron bajo los estándares de manejo del CEPV, que incluían una fertilización balanceada en kilogramos por planta⁻¹ de N (1.23), P (0.50), K (2.51), Mg (0.34), S (0.21) y B (0.05) de acuerdo con el análisis foliar y de suelos (Ayala et al., 2017).

2.3.2 Material vegetal

Para la población C0-Monterrey se evaluaron 127 plantas, seleccionadas por su fenotipo promisorio en tres lotes comerciales de cultivares *dura*-IFA de una extensión total de 63 ha (alrededor de 9000 palmas), de este número de plantas

evaluadas por un periodo de siete años se seleccionaron 13 palmas por diferentes rasgos genéticos, de esta selección se realizaron 7 cruzamientos que dieron origen a la segunda población mejorada de palmas tipo *dura* C1-Vizcaína, que se desarrolló con el objetivo de introgresar rasgos de producción y contenidos de aceite con características de palmas compactas por su lento crecimiento del estípite. Esta población se evaluó durante 12 años en el CEPV, bajo un diseño de bloques completos al azar (DBA), con tres bloques y 12 plantas por cada unidad experimental, en la tabla 2-1 se indican las características de las plantas seleccionadas de la población C0 que dio origen a las progenies obtenidas mediante cruzamientos dirigidos *dura x dura*. (C1).

Tabla 2-1. Características de las plantas seleccionadas.

| Planta seleccionada | Característica a introgresar | Progenie a la que dio origen en C1 |
|----------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | Peso Medio de Racimo | 1 |
| 2 | Peso Medio de Racimo | 1 |
| 3 | Producción de Racimo de Fruta Fresca | 2 |
| 4 | Contenido de Aceite a Racimo | 2 |
| 5 | Producción de Racimo de Fruta Fresca | 3 |
| 6 | Contenido de Aceite a Racimo | 3 |
| 7 | Contenido de Aceite a Racimo | 4 |
| 8 | Peso Medio de Racimo | 4 |
| 9 | Crecimiento reducido de altura | 5 |
| 10 | Crecimiento reducido de altura | 5 |
| 9 | Crecimiento reducido de altura | 6 |
| 11 | Crecimiento reducido de altura | 6 |
| 12 | Contenido de Aceite | 7 |
| 13 | Peso Medio de Racimo | 7 |

2.3.3 Recolección de datos

Para las dos poblaciones (C0-Monterrey y C1-Vizcaina) se midieron componentes de rendimiento, RFF: racimos de fruta fresca (kg palma^{-1}), NR: número de racimos ($\text{racimos palma}^{-1}$), PMR: Peso medio de racimo (kg), en la prueba de progenies del CEPV, los registros se realizaron para cada palma en todas las unidades experimentales del ensayo con registros con una periodicidad entre dos y tres ciclos por mes:

Los valores de estos componentes de rendimiento se obtuvieron de la siguiente manera: (Corley y Tinker, 2016).

$$\text{RFF (kg palm}^{-1} \text{ yr}^{-1}) = \sum_{i=1}^n \text{BWT}i \quad (2.1)$$

$$\text{NR (bunches palm}^{-1} \text{ year}^{-1}) = \sum_{i=1}^n \text{BNO}i \quad (2.2)$$

$$\text{PMR (kg)} = \frac{\text{FFB}}{\text{BNO}} \quad (2.3)$$

Donde, n representa el número de rondas de registros de producción expresada en kg.

Para el caso de la prueba de progenies sembrada en el CEPV, en los rasgos vegetativos se realizaron cinco etapas del crecimiento del cultivo durante la duración de la investigación, comprendida entre los periodos de 2009 y 2020. Mediante la metodología propuesta por Corley y Breure (1981), se calcularon las características de longitud de raquis (LR), ancho del foliolo (AF), número de foliolos (NF). La altura de la palma (HT) se midió desde el nivel del suelo hasta la base de la hoja 41 de acuerdo con la filotaxia de la palma. La HT se calculó usando la fórmula:

HT por año (Incremento de altura/año) = (altura en el año t) / ($t - 2$), donde t es la edad de la palma expresada en años, desde la fecha de la siembra hasta el momento de una medición dada (Breure & Powell, 1987).

Para calcular el contenido de aceite y los componentes de racimos se utilizaron las metodologías propuestas (Corley y Tinker, 2016) y modificado por (Prada & Romero, 2012). Se muestrearon de dos a tres racimos de cada palma entre los periodos 2008 a 2020, con un promedio general de 24 racimos por progenie para cada periodo de evaluación.

Para evitar la variación estacional en el tiempo, los racimos maduros se muestrearon con al menos tres meses de diferencia entre el corte de un racimo y otro racimo en la misma palma. Los rasgos de aceite que se calcularon fueron peso medio del fruto (PMF), aceite a racimo (ACR), frutos normales a racimo (FNR), mesocarpio a fruto (MF), almendra a fruto (AF) y cuesco a fruto (CF).

2.3.4 Análisis de estadístico

Para el cálculo de los parámetros genéticos en la población C1-Vizcaina, los datos colectados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) bajo un modelo lineal generalizado, el cual se presenta a continuación:

$$Y_{ik} = \mu + G_i + B_k + \varepsilon_{ik}$$

Donde:

Y_{ik} : es el fenotipo de la k^{th} palma en la progenie y en la j^{th} repetición.

μ : es el promedio general.

G_i : es el efecto de la i^{th} progenie.

B_k : es el efecto del k^{th} bloque.

ε_{ik} : es el efecto del error experimental.

Se calculó la heredabilidad en sentido amplio y el coeficiente de variación genético para cada carácter, descrito por (Falconer, D. Mackay, 1996a), ver ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6).

Heredabilidad en sentido amplio:

$$H^2_B = \frac{\sigma^2_g}{(\sigma^2_f)} \quad (2.4)$$

Donde:

σ^2_g : varianza genotípica.

σ^2_f : varianza fenotípica.

Coefficiente de variación genético:

$$CV_g = \frac{\sqrt{\sigma^2_g}}{\mu} \times 100 \quad (2.5)$$

Donde:

σ^2_g : raíz cuadrada de la varianza genotípica.

μ : media general de la población.

Las ganancias genéticas esperadas se calcularon según la fórmula de Cruz & Carneiro (2003), para los rasgos genéticos de rendimiento (tres rasgos), medidas vegetativas (cuatro rasgos) y componentes de aceite (seis rasgos).

$$GS (\Delta g) = H^2_B DS = H^2_B (X_s - X_0) \quad (2.6)$$

Donde:

DS: diferencial de selección entre X_s y X_0

X_s : promedio de las palmas seleccionadas.

X_0 : promedio de las palmas de la población original.

H^2_B : heredabilidad en sentido amplio.

Para el caso de esta investigación el porcentaje de palmas seleccionadas (X_s) correspondió al 10% que corresponde a una intensidad de selección igual a $i = 1.755$ (Cruz & Carneiro 2003).

Para realizar los análisis de varianza (ANOVA), cálculo de los parámetros y ganancias genéticas se utilizó el software GENES y el software estadístico R Studio versión 4.1.0., con los paquetes ggplot2, Agrícola y Performance.

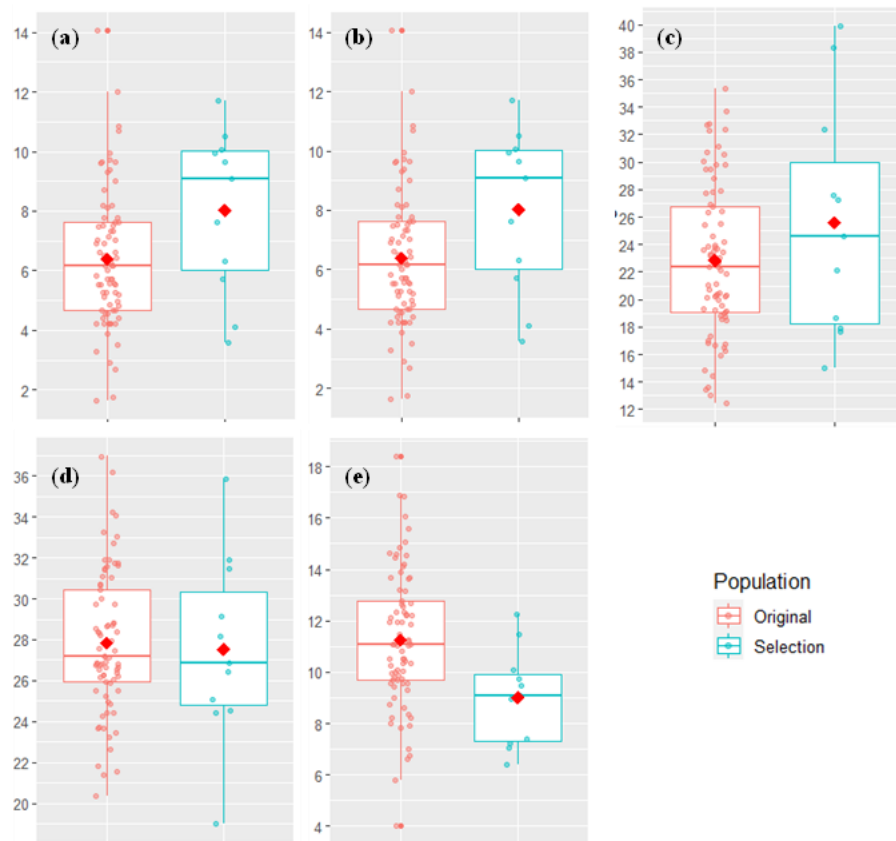
2.4 Resultados.

2.4.1 Estimación de parámetros genéticos

La población *dura* de crecimiento lento o progenie enana de Cenipalma se generó a partir de una drástica selección enfocada en palmas que tuvieran una baja tasa de crecimiento del estípote, la población inicial se generó a partir de 9009 palmas *dura* IFA, donde se seleccionó el 1,41% de las palmas con este carácter, para un total de 127 que además de ser palmas enanas presentaban una buena sanidad en su follaje y al momento de la selección una buena cantidad de racimos. Esta población de palmas fue considerada como la población C0 de Monterrey y partir de la evaluación de diferentes rasgos morfo-agronómicos de gran importancia en el mejoramiento de la palma de aceite evaluados en C0, se seleccionaron las 13 palmas más sobresalientes que dieron origen a la población C1-Vizcaina.

En la figura 2-1 se comparan los rasgos de interés que presentaron el coeficiente de variación genética (CVg) más altos, comparando la población original (X_0) y el promedio de las palmas seleccionadas (X_s), donde en la mayoría de los rasgos por los que fueron seleccionadas X_s presentaron valores más altos a la población original; por ejemplo, para el rasgo FFB los individuos seleccionados (X_s) presentaban una media de 177 kg palma⁻¹ frente a la media de la población X_0 con un valor de 135 kg palma⁻¹ (Figura 2-1). Caso contrario, para HT no presento variación significativa entre las poblaciones X_0 y X_s , sin embargo, los valores para el incremento de altura en el estípote fueron muy reducidos en las dos poblaciones, facilitando la selección y la respuesta de selección esperada, donde la presión de selección en este rasgo fue realizada previamente para crear la población original X_0 .

Figura 2-1. Box-plot para los principales rasgos morfo-agronómicos comparando la población original evaluada, C0-Monterrey (color rojo) y las palmas seleccionadas de la C0 para generar el ciclo 1 de SRR en la población C1-Vizcaina (color azul). a) RFF: Racimos de fruta fresca (kg palma⁻¹), b) NR: Número de racimos (racimos palma⁻¹), c) PMR: Peso medio de racimo (kg), d) HT: Incremento de altura (m año⁻¹), y e) AF: Almendra a fruto (%). En los gráficos de cajas, el rombo de color rojo representa el promedio general y la línea horizontal la mediana de los datos.



Fuente: esta investigación.

A partir de los datos fenotípicos recolectados entre 2009 y 2020 se estimaron los parámetros genéticos de 13 características morfo agronómicas de interés en un programa de mejoramiento de palma de aceite (Tabla 2-2).

La descomposición de la varianza fenotípica para la población C1, en todos los casos mostró alta influencia del componente genotípico y baja influencia del componente ambiente en la expresión de los caracteres fenotípicos.

El rasgo de HT fue el menos influenciado por el ambiente con una σ^2g del 94 %, seguida de los rasgos de aceite AF con una σ^2g de 87,1% y el ACR presentó una σ^2g del 80%, para los componentes de rendimiento la expresión de estos caracteres tuvo un alto componente genético con 85,5% para PMR, 76,4% para NR y 62,3% para RFF.

Las heredabilidades en sentido amplio oscilaron entre 0,53 a 0,93 este último valor para el rasgo genético de HT. El coeficiente de variación genético con los valores más altos se presentó en la característica HT con un valor porcentual de 15,61, seguido del rasgo AF con un valor de 10,19 y para las características de rendimiento de NR, PMR y RFF con valores porcentuales de 8,94, 7,10 y 7,05 respectivamente.

Tabla 2-2. Estimación de parámetros genéticos para 13 características, de rendimiento, medidas vegetativas y componentes de aceite, para la población C1 mejorada en palma de aceite.

| Símbolo | RFF | NR | PMR | LR | AF | NF | HT | PMF | ACR | FNR | MF | AF | CF |
|--------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| σ^2_f | 257,96 | 1,59 | 1,67 | 0,04 | 0,20 | 27,38 | 0,0040 | 0,64 | 1,11 | 8,78 | 6,36 | 2,63 | 1,81 |
| σ^2_g | 160,69 (62,3) | 1,21 (76,4) | 1,43 (85,5) | 0,03 (82,6) | 0,17 (86,8) | 21,81 (79,7) | 0,0030 (94,0) | 0,34 (53,8) | 0,89 (80,0) | 6,96 (79,3) | 4,75 (74,8) | 2,29 (87,1) | 1,06 (58,8) |
| σ^2_a | 97,26 (37,7) | 0,37 (23,6) | 0,24 (14,5) | 0,01 (17,4) | 0,02 (13,2) | 5,56 (20,3) | 0,0002 (6,0) | 0,29 (46,2) | 0,22 (20,0) | 1,81 (20,7) | 1,60 (25,2) | 0,34 (12,9) | 0,74 (41,2) |
| H^2_B | 0,62 | 0,76 | 0,85 | 0,82 | 0,86 | 0,79 | 0,93 | 0,53 | 0,79 | 0,79 | 0,74 | 0,87 | 0,58 |
| CVg(%) | 7,05 | 8,94 | 7,10 | 4,13 | 5,22 | 3,03 | 15,61 | 5,95 | 5,18 | 4,05 | 3,95 | 10,19 | 3,44 |
| CVg/CVe | 0,74 | 0,87 | 0,92 | 1,25 | 1,47 | 1,14 | 2,26 | 0,62 | 1,15 | 1,12 | 0,99 | 1,50 | 0,68 |
| MS | 773,89ns | 4,78* | 5,02** | 0,12** | 0,61** | 82,14** | 0,01** | 1,93ns | 3,35** | 26,34** | 19,08* | 7,91** | 5,45ns |

Nota: σ^2_f : varianza fenotípica, σ^2_g : varianza genotípica, σ^2_a : varianza ambiental, H^2_B : heredabilidad en sentido amplio, CVg(%): coeficiente de variación genético, CVg/CVe: relación entre coeficiente de variación genético y coeficiente de variación de error experimental, MS: cuadrados medios, RFF: Racimos de fruta fresca (kg palma⁻¹), NR: Número de racimos (racimos palma⁻¹), PMR: Peso medio de racimo (kg), LR: Longitud de raquis (cm), AF: Ancho de foliolo (cm), NF: Número de foliolos, HT: Incremento de altura (m año⁻¹), PMF: Peso medio de fruto (gr), ACR: Aceite a racimo (%), FNR: Frutos normales a racimo (%), MF: Mesocarpio a fruto (%), AF: Almendra a fruto (%) y CF: Cuesco a fruto (%). * p<0,05; ** p< 0,01; no significativo (ns) p> 0,05, entre paréntesis se presenta el porcentaje de la varianza genotípica y ambiental.

La ganancia genética, el diferencial de selección y la respuesta a la selección se presentan en la tabla 2-3 para los rasgos morfoagronómicos de mayor relevancia en la palma de aceite. Entre las dos poblaciones evaluadas X_0 (C0-Monterrey) y X_1 (C1-Vizcaina) la ganancia genética (GS %) expresada en porcentaje para todo el ciclo de mejoramiento fue de 18,87% para RFF, que equivale a un 1,26% anual, para el rasgo de NR se obtuvo una GS de 18,69% y finalmente para la PMR se obtuvo un 5,94%.

La ganancia genética expresada en porcentaje para las características vegetativas, sobresalieron los valores encontrados en el rasgo de HT con un porcentaje total de -3,44% que para esta característica es deseable, ya que el incremento de altura de planta entre más reducido, más duración del ciclo de vida productivo y económico se podrá obtener.

La GS (%) para los componentes de aceite permitieron diferenciar a los rasgos de ACR y AF con unas GS totales de 5,61% y -15,03% respectivamente, esta última con GS negativa que para el caso del cultivo de la palma de aceite es deseable ya que el tamaño de la almendra reducida proporciona mayor cantidad de MF en el fruto y por consiguiente más aceite total a racimo.

Tabla 2-3. Ganancia genética para diferentes rasgos genéticos, en dos ciclos de mejoramiento genético en palma de aceite.

| Símbolo | RFF | NR | PMR | LR | AF | NF | HT | PMF | ACR | FNR | MF | AF | CF |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| X ₀ | 135,70 | 6,10 | 22,90 | 4,90 | 8,30 | 170,00 | 0,27 | 8,60 | 18,30 | 68,50 | 53,20 | 11,00 | 31,70 |
| X _s | 177,00 | 7,60 | 24,50 | 4,70 | 8,40 | 167,50 | 0,26 | 8,50 | 19,60 | 69,00 | 54,00 | 9,10 | 33,80 |
| X ₁ | 181,10 | 13,80 | 15,30 | 4,46 | 8,28 | 153,12 | 0,38 | 9,50 | 19,25 | 65,13 | 55,63 | 14,87 | 29,50 |
| DS | 41,30 | 1,50 | 1,60 | -0,20 | 0,10 | -2,50 | -0,01 | -0,10 | 1,30 | 0,50 | 0,80 | -1,90 | 2,10 |
| RS | 45,40 | 7,70 | -7,60 | -0,44 | -0,02 | -16,88 | 0,11 | 0,90 | 0,95 | -3,37 | 2,43 | 3,87 | -2,20 |
| GS | 25,61 | 1,14 | 1,36 | -0,16 | 0,09 | -1,98 | -0,01 | -0,05 | 1,03 | 0,40 | 0,59 | -1,65 | 1,22 |
| GS (%) | 18,87 | 18,69 | 5,94 | -3,35 | 1,04 | -1,16 | -3,44 | -0,62 | 5,61 | 0,58 | 1,11 | -15,03 | 3,84 |
| GS año ⁻¹ | 1,26 | 1,25 | 0,40 | -0,22 | 0,07 | -0,08 | -0,23 | -0,04 | 0,37 | 0,04 | 0,07 | -1,00 | 0,26 |
| GS año ⁻¹ (%) | 1,71 | 0,08 | 0,09 | -0,01 | 0,01 | -0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,03 | 0,04 | -0,11 | 0,08 |

Nota: X₀: promedio población inicial, X_s: promedio de las plantas seleccionadas, X₁: promedio población mejorada, DS: diferencial de selección, RS: respuesta de selección, GS: ganancia genética, GS (%): ganancia genética porcentual, GS año⁻¹: progreso genético esperado, GS año⁻¹ (%): progreso genético porcentual esperado, RFF: Racimos de fruta fresca (kg palma⁻¹), NR: Número de racimos (racimos palma⁻¹), PMR: Peso medio de racimo (kg), LR: Longitud de raquis (cm), AF: Ancho de foliolo (cm), NF: Número de foliolos, HT: Incremento de altura (m año⁻¹), PMF: Peso medio de fruto (gr), ACR: Aceite a racimo (%), FNR: Frutos normales a racimo (%), MF: Mesocarpio a fruto (%), AF: Almendra a fruto (%) y CF: Cuesco a fruto (%).

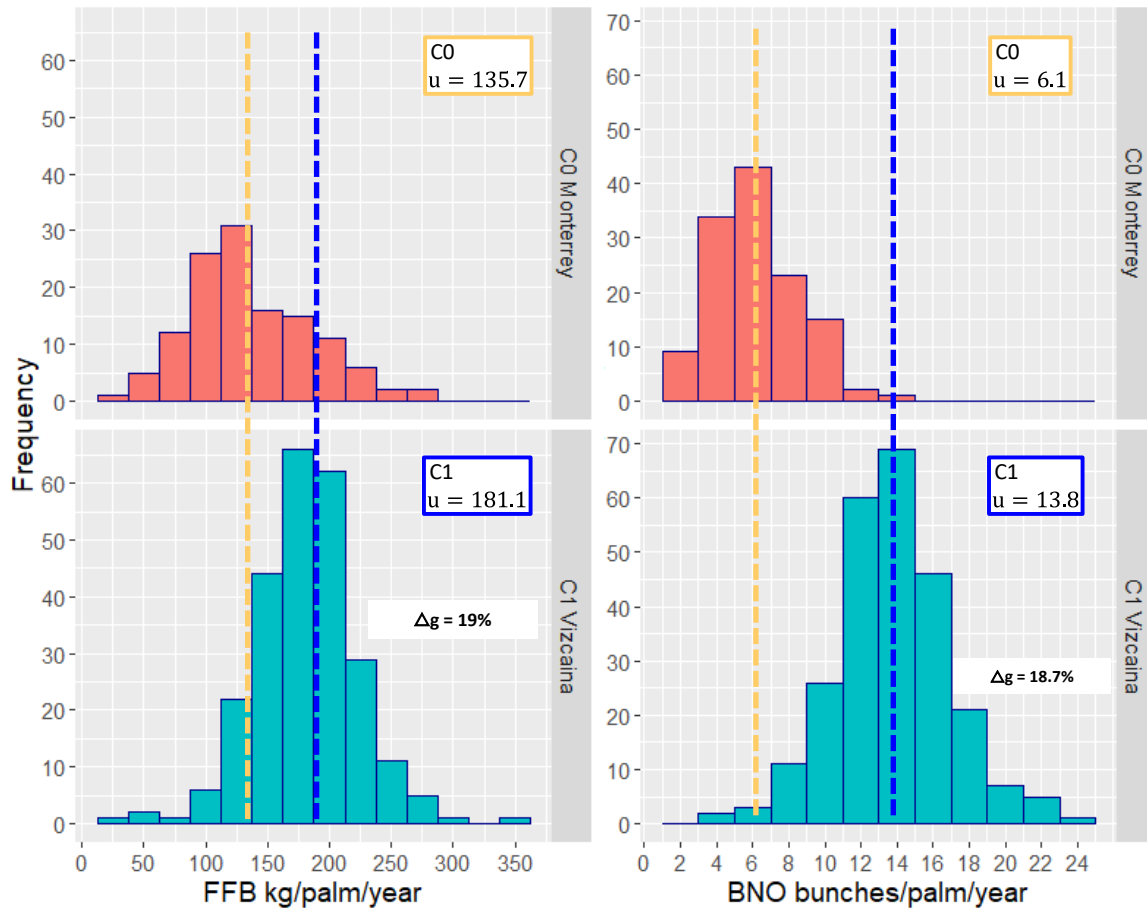
El diferencial de selección (DS) para la característica de rendimiento RFF fue de 41,30 kg palma año⁻¹ entre las plantas seleccionadas y la población inicial, para la característica de NR el DS fue de 1,50 racimos por palma año⁻¹ y para el rasgo de PMR fue de 1,60 kg racimo⁻¹. Para los rasgos vegetativos de HT y AF el DS fue negativo con valores de -0,01% y -1,90% respectivamente (Tabla 2-2), para estas características específicas en palma de aceite y en este tipo de cruzamientos genéticos (*dura x dura*) este comportamiento es muy deseable.

La respuesta a la selección (RS) real encontrada para la característica de RFF, que fue calculada como la diferencia entre las medias del ciclo 1 y el ciclo 0 fue de 45,40 kg palma año⁻¹, de igual manera para el rasgo NR se obtuvo una RS de 7,70 racimos palma año⁻¹ más en el C1-Vizcaina en comparación con el C0-Monterrey.

Es importante aclarar que la RS presentada en este estudio como la diferencia entre la media del ciclo 1 y el ciclo 0 tiene en cuenta la varianza del fenotipo, que tiene en cuenta tanto la varianza genotípica ($V_g = V_a + V_d + V_{ad} + V_e$) como la varianza del ambiente ($V_f = V_g + V_a$), por esta razón en la mayoría de los parámetros analizados la RS es mayor que la ganancia genética (GS) ya que se obtiene heredabilidad en sentido amplio (H^2_B) de cada rasgo evaluado, y es la más adecuada para expresar la GS en el mejoramiento de cultivos, tal como se presenta en las figuras 2-2, 2-3 y 2-4.

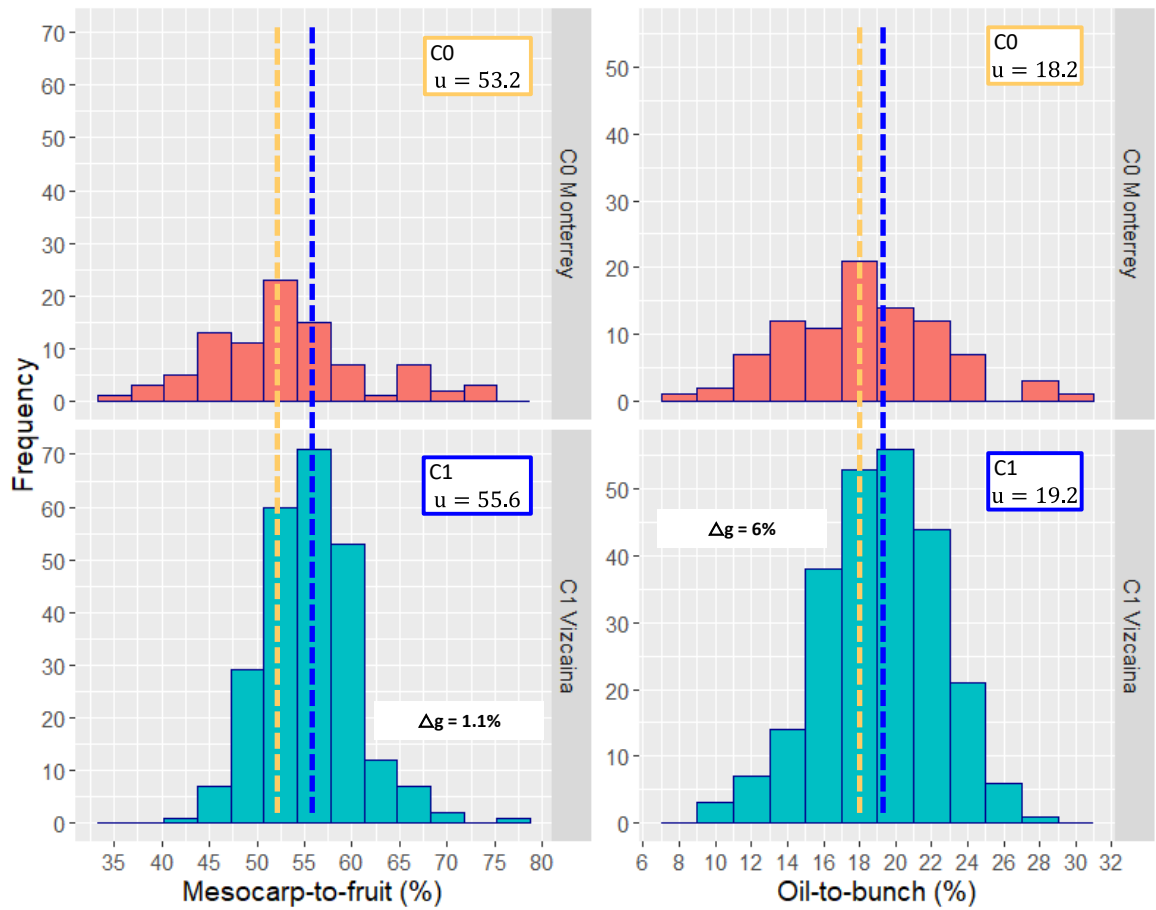
En la figura 2-3 se presenta la RS para las características de MF y ACR, en donde se obtuvo un 2,43 % más de MF en la progenie mejorada (C1-Vizcaina) en comparación con la población C0-Monterrey, para ACR se aumentó el contenido de aceite un 1 %, para PMF un incremento del 1% y para SF se obtuvo GS negativa de -2,20%, comportamiento deseable para este rasgo genético dentro del cultivo de palma de aceite, al ser contrario al contenido de MF (figura 2-4).

Figura 2-2. Histogramas de frecuencias para la respuesta de selección para los rasgos de rendimiento RFF y NR en dos ciclos de mejoramiento en palma de aceite. C0: población original de Monterrey, C1: población de progenies mejoradas en la Vizcaína y Δg : ganancia genética. La línea punteada amarilla representa la media de la población C0 y la línea punteada azul representa el promedio de la población C1.



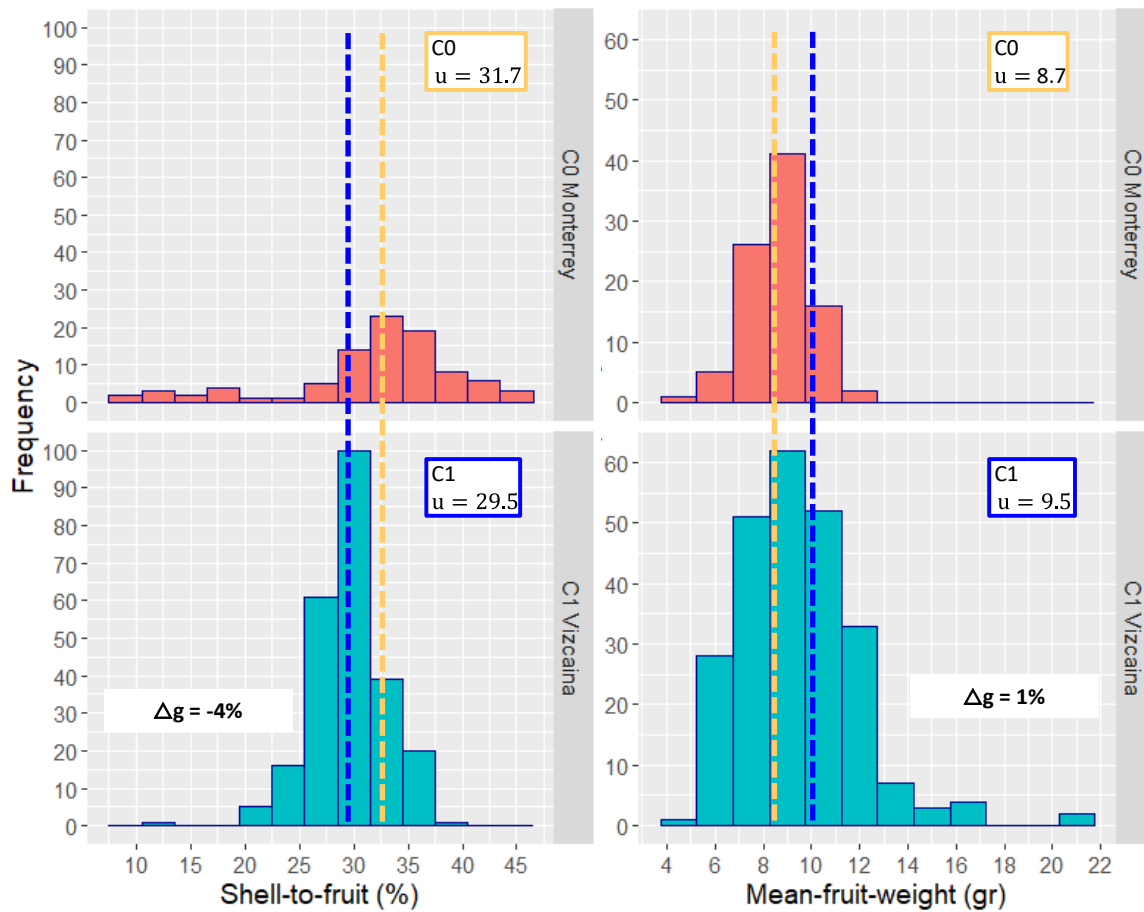
Fuente: esta investigación.

Figura 2-3. Histogramas de frecuencias para la respuesta de selección para los rasgos de componentes de racimo MF y ACR en dos ciclos de mejoramiento en palma de aceite. C0: población original de Monterrey, C1: población de progenies mejoradas en la Vizcaína y Δg : ganancia genética. La línea punteada amarilla representa la media de la población C0 y la línea punteada azul representa el promedio de la población C1.



Fuente: esta investigación.

Figura 2-4. Histogramas de frecuencias para la respuesta de selección para los rasgos de componentes de racimo AF y PMF en dos ciclos de mejoramiento en palma de aceite. C0: población original de Monterrey, C1: población de progenies mejoradas en la Vizcaína y Δg : ganancia genética. La línea punteada amarilla representa la media de la población C0 y la línea punteada azul representa el promedio de la población C1.



Fuente: esta investigación.

2.5 Discusión.

La selección inicial que se realizó en la población C0-Monterrey, para posteriormente darle origen a las progenies enanas tipo *dura x dura* C1-Vizcaina arrojó resultados satisfactorios, se logró intrograsar características de rendimiento, vegetativas y de aceite de gran interés en el cultivo. Según Myint et al. (2021), los

programas de mejoramiento genético en palma de aceite, deben hacer énfasis en componentes de RFF, NR, PMR y ACR, que a su vez son usados para selección de progenies de alto de rendimiento de racimos y contenido de aceite.

Los buenos resultados de la progenie C1-Vizcaina con familias sobresalientes, para la obtención de cultivares superiores en palma de aceite, depende de la selección de progenitores femeninos con buenas características, estables en el tiempo y con baja influencia del ambiente. Swaray, et al. (2020), identificaron progenies sobresalientes con alto potencial genético a partir de estudio de variabilidad genética de diferentes orígenes de palma de aceite.

El diferencial de selección (DS) reportado en este estudio, mostró una adecuada selección de las plantas individuales que dieron origen a la segunda población mejorada del cultivo (C1-Vizcaina), La estrategia de hacer selección familiar e individual por el método de *family and individual palm selection-FIPS* (Ngando-Ebongue et al., 2012), permitió la identificación de las mejores progenies y de palmas individuales, que dieron como resultados híbridos intraespecíficos con excelente características de rendimiento, rasgos vegetativos y componentes de aceite, componentes de principal importancia para la generación de cultivares de palma de aceite sobresalientes.

Según Vencovsky (1987), hay mayor ganancia por selección cuando la relación CV_g / CV_e tiende a uno porque la variación genética es alta. A sí mismo, cuando se tienen los mayores valores de CV_g y de heredabilidad direccional el potencial para efectuar una posible selección en los genotipos analizados (Salaya-Domínguez et al, 2012).

El mayor coeficiente de variación genética (CV_g) se presentó en el rasgo de HT con 15,9 %, sobre la cual existe la posibilidad de practicar la selección con mayor precisión, ya que existe una mayor confiabilidad del valor fenotípico.

Los programas de mejoramiento genético en el cultivo de la palma de aceite tiene como principal objetivo la selección y el mejoramiento de caracteres de rendimiento de fruta fresca y aceite (Swaray, Amiruddin, et al., 2021). La respuesta de selección (RS) para los componentes de racimos MF y ACR obtenidos en este estudio fueron aceptables, la selección de progenitores femeninos llegara a aumentar el potencial de aceite en las futuras progenies *dura x pisifera*.

En el cultivo de palma de aceite el porcentaje de cuesco a fruto (CF) para una planta con tipo de fruto *dura* los valores se encuentran entre 25 a 65% (Kumar et al., 2018), en mejoramiento genético de la especie los valores deseables deben estar en un valor menor a un 25%, en este estudio se obtuvo una GS del 4% con una población inicial que tenía un promedio general del 32% y que a través de la selección se pudo mover ese valor a un 29,5% de promedio general en un ciclo de mejoramiento.

Los valores de heredabilidad reportados en este estudio fueron más altos que los reportados por varios autores en Malasia, Nigeria, Zaire y Camerún (Arolu et al., 2017; Noh et al., 2014; Nor Azwani et al., 2020; Swaray, Amiruddin, et al., 2020), comparando los rasgos genéticos que presentaron los valores más altos de H^2_B en este estudio. Los autores anteriormente mencionados, reportan que para el rasgo de HT los valores oscilan entre 0,37 a 0,90, para AF los rasgos oscilan entre 0,33 a 0,65 y para el rasgo de PMR los valores registrados están entre 0,32 a 0,78. Demostrando así una alta influencia ambiental que determina el aporte genético de las características de interés. La estimación de la heredabilidad puede llegar a ser suficiente para predecir los valores de los caracteres de interés en una próxima generación, cuando los genotipos seleccionados se encuentran en un ambiente y en condiciones de manejo homogéneas (Fellahi et al., 2020).

Tabla 2-4. Reporte de varios autores para la estimación de la heredabilidad en sentido amplio, en diferentes caracteres genéticos de interés en palma de aceite.

| Símbolo | RFF | NR | PMR | LR | AF | NF | HT | PMF | ACR | FNR | MF | AF | CF |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H^2_{B-}^a$ | 0,62 | 0,76 | 0,85 | 0,82 | 0,86 | 0,79 | 0,93 | 0,53 | 0,79 | 0,79 | 0,74 | 0,87 | 0,58 |
| $H^2_{B-}^b$ | 0,67 | 0,74 | 0,78 | 0,74 | 0,35 | 0,63 | 0,82 | 0,42 | 0,51 | 0,43 | 0,55 | 0,50 | 0,53 |
| $H^2_{B-}^c$ | 0,20 | 0,23 | 0,32 | 0,81 | 0,54 | 0,57 | 0,37 | na | 0,48 | 0,24 | 0,97 | 0,65 | 1,0 |
| $H^2_{B-}^d$ | 0,17 | 0,37 | 0,47 | 0,72 | 0,64 | 0,52 | 0,90 | 0,56 | 0,36 | 0,19 | 0,56 | 0,55 | na |
| $H^2_{B-}^e$ | 0,60 | 0,68 | 0,66 | 0,81 | 0,20 | 0,44 | 0,52 | na | 0,25 | 0,06 | 0,55 | 0,33 | 0,49 |

Nota: H^2_B : heredabilidad en sentido amplio, na: no aplica, RFF: Racimos de fruta fresca (kg palma⁻¹), NR: Número de racimos (racimos palma⁻¹), PMR: Peso medio de racimo (kg), LR: Longitud de raquis (cm), AF: Ancho de foliolo (cm), NF: Número de foliolos, HT: Incremento de altura (m año⁻¹), PMF: Peso medio de fruto (gr), ACR: Aceite a racimo (%), FNR: Frutos normales a racimo (%), MF: Mesocarpio a fruto (%), AF: Almendra a fruto (%) y CF: Cuesco a fruto (%), ^a este estudio 2020, ^b Swaray 2020, ^c Azwani 2020, ^d Arolu 2017 y ^e Noh 2014.

Para el caso de esta investigación, el crecimiento vertical del estípite (HT) fue el rasgo con mayor coeficiente de variación genético, la heredabilidad más alta y la influencia ambiental más baja de todas las características evaluadas, varios trabajos reportan la alta influencia genética de este carácter, como los realizados por (Swaray, Amiruddin, et al., 2020) que reportan un porcentaje de 82,5% de influencia genética para esta característica.

La baja tasa de crecimiento anual del estípite en progenies de palma de aceite es una característica deseable para aumentar la vida productiva y económica de los cultivos, las investigación en el mundo se están enfocando en el mejoramiento de esta característica, trabajos de Arolu et al. (2017) resaltan la alta heredabilidad de este rasgo, aprovechada para ser utilizada en la obtención de progenies compactas y de alto rendimiento.

La ganancia genética (GS) reportada en varias investigaciones es comparable con los resultados obtenidos en esta investigación, como es el caso de lo reportado en el estudio de (Swaray et al., 2020), donde la GS expresada en porcentaje para los rasgos de rendimiento fue de 27% para el rasgo RFF, para la característica de NR reportan un 29% y para el rasgo genético PMR una GS del 24%. El resultado de

obtener altas GS en la selección de un rasgo genético de interés sugiere la posibilidad de identificar genotipos portadores de genes interesantes de buena transmisión (Fellahi et al., 2020).

En general los programas de mejoramiento genético de plantas tienen su éxito marcado en la variabilidad genética que posean y en la selección de progenitores que ofrezcan buena combinación genética para los diferentes rasgos de interés agronómico principalmente (Agaba et al., 2021), en este sentido, esta investigación, demostró la buena selección de parentales femeninos en palma de aceite, con buenas combinaciones genéticas en sus progenies y con altos valores de ganancia genética en diferentes caracteres de interés para la palmicultura mundial, que llevarán a la creación de progenies que utilicen progenitores femeninos elite tipo *dura* en los próximos ciclos de mejoramientos, que reúnan varias características de interés para la agroindustria del cultivo.

2.6 Conclusiones.

Mediante el método de selección recíproca recurrente (SRR) y la estrategia de selección familiar e individual (FIPS) para el cultivo de palma de aceite, durante esta investigación se logró buenas ganancias genéticas y altos contenidos de variación genética para características de rendimiento como RFF y NR, cantidad de aceite e incremento de altura (HT), todos estos rasgos de principal interés para el cultivo.

En este estudio en las progenies provenientes de cruzamientos *dura x dura* de *Elaeis guineensis*, se identificaron rasgos de rendimiento, parámetros vegetativos y componentes de aceite con menor influencia ambiental y con valores altos de heredabilidad, indicando buenas proyecciones para los nuevos ciclos futuros de mejoramiento en el cultivo.

2.7 Bibliografía.

- Agaba, R., Rubaihayo, P., Tukamuhabwa, P., Mwanga, R. O. M., Tumwegamire, S., Ndirigwe, J., Heider, B., & Grüneberg, W. (2021). Genetic variation and response to selection for storage root dry matter and associated traits in a population of yam bean (*Pachyrhizus* spp.) interspecies crosses. *Euphytica*, 217(4). <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02776-1>
- Al-Khayri, J. M., Jain, S. M., & Johnson, D. V. (2019). Advances in plant breeding strategies: Industrial and food crops. In *Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23265-8>
- Alvarado, A. Chinchilla, C. Rodriguez, J. (2007). *Desempeño de dos variedades de palma aceitera (Deli x Avros y Deli x Ghana) plantadas a diferentes densidades en dos sitios en Resumen Introducción Materiales y métodos Resultados y discusión Rendimiento.* 35–41.
- Alvarado, A, & Henry, J. (2015). *Evolution Blue : a new oil palm variety with reduced growth and high oil content.* 1–8.
- Alvarado, Amancio. (2010). Avances en el mejoramiento genético de la palma de aceite en Centroamérica. *Palmas*, 31(1), 126–143.
- Annual, W. (2021). *Index & General Notes OIL WORLD ANNUAL 2017 – Table of Contents.* 1, 2016–2018.
- Arolu, I. W., Rafii, M. Y., Marjuni, M., Hanafi, M. M., Sulaiman, Z., Rahim, H. A., Abidin, M. I. Z., Amiruddin, M. D., Din, A. K., & Nookiah, R. (2017). Breeding of high yielding and dwarf oil palm planting materials using Deli dura x Nigerian pisifera population. *Euphytica*, 213(7). <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1943-z>
- Arolu, I. W., Rafii, M. Y., Marjuni, M., Hanafi, M. M., Sulaiman, Z., Rahim, H. A., Kolapo, O. K., Abidin, M. I. Z., Amiruddin, M. D., Kushairi Din, A., & Nookiah, R. (2016). Genetic variability analysis and selection of pisifera palms for commercial production of high yielding and dwarf oil palm planting materials. *Industrial Crops and Products*, 90, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.006>
- Ayala, I., Romero, H., Tupaz, A., Daza, E., Rincón, A., Caicedo, A., Fontanilla, C., & Mosquera, M. (2017). Comportamiento agronómico de cultivares comerciales de palma de aceite en el Campo Experimental Palmar de La Vizcaína. In *Varietades de palma de aceite sembradas en el Campo Experimental Palmar de la Vizcaína.*
- Barcelos, E., De Almeida Rios, S., Cunha, R. N. V., Lopes, R., Motoike, S. Y., Babiychuk, E., Skiryicz, A., & Kushnir, S. (2015). Oil palm natural diversity and

- the potential for yield improvement. *Frontiers in Plant Science*, 6(MAR), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00190>
- Bastidas, S., Peña R., E. A., & Reyes C., R. (2003). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) del proyecto de mejoramiento genético de Corpoica. *Revista Palmas*, 24(1), 21–29. <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950%0Ahttp://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950/950>
- Beirnaert, A., & Vanderweyen, R. (1941). Contribution à l'étude génétique et biométrique des varités d' *Elaeis guineensis* Jacq. In *Publications de l' institut nacional pour l'étude agronomique du Congo Belgue: Vol. Serie Cien* (Serie scie, Issue 27). Bruxelles: Institut national pour l'étude agronomique du Congo belge (INEAC).
- Breure, C. J. (2010). Rate of leaf expansion: A criterion for identifying oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) types suitable for planting at high densities. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.03.001>
- Breure, C. J., & Powell, M. S. (1987). *The One Shot Method of Establishing Growth Parameters on Oil Palm*. <https://books.google.com.co/books?id=PbJdAQAACAAJ>
- Cedillo, D. S. O., Barros, W. S., Ferreira, F. M., Dias, L. A. dos S., Rocha, R. B., & Cruz, C. D. (2008). Correlation and repeatability in progenies of African oil palm. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 30(2), 197–201. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i2.1728>
- Corley and Tinker. (2016). *The Oil Palm* (Fifth). Wiley-Blackwell.
- Corley, R. H. V., & Breure, C. J. (1981). *Measurements in Oil Palm Experiments*. s.ed. <https://books.google.com.co/books?id=Lcq8GwAACAAJ>
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (Fifth edit). Wiley-Blackwell.
- Cruz, Cosme Damião; Carneiro, P. S. (2003). *Aplicados ao Melhoramento Genético* (UFV (ed.); Volumen 2).
- de Almeida Rios, S., Vieira da Cunha, R. N., Lopes, R., Barcelos, E., Raimundo Nonato Carvalho da Rocha, & Alves de Lima, W. A. (2018). Correlation and Path analysis for yield components in Dura oil palm germplasm. *Industrial Crops and Products*, 112(December 2017), 724–733. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.054>
- Domiciano, G. P., Alves, A. A., Laviola, B. G., & da Conceição, L. D. H. C. S. (2015). Parâmetros genéticos e diversidade em progênies de macaúba com base em características morfológicas e fisiológicas. *Ciencia Rural*, 45(9), 1599–1605. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140909>

- Donough, C. R. (2005). *Breeding oil palms for high oil yield in IOI Group : 1 . First cycle development of OPGL-derived materials. March 2005.*
- Dumortier, F. (2007). *and Quality of Dami Seeds. 28, 213–226.*
- Ekaso, D. D., Allan, M. M., Pattison, D. R. M., Trouw, R. A. J., Muluneh, A. A., Kidane, T., Rowland, J., Bachtadse, V., Zealand, N., Evans, D., Ebinger, C. J., Yemane, T., Harding, D. J., Tesfaye, S., Kelley, S., Rex, D. C., Mogessie, A., Krenn, K., Schaflechner, J., Gessesse, B. Y. A. (2003). GUÍA DE CONCEPTOS DE GENETICA CUANTITATIVA. *Precambrian Research, 123(1), 1689–1699.*
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.047>[http://www.geohaz.org/news/images/publications/gesi-report with prologue.pdf](http://www.geohaz.org/news/images/publications/gesi-report%0Ahttp://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/earthquakes_en.pdf)http://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/earthquakes_en.pdf<http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2011.06.005>
- Falconer, D. Mackay, T. (1996a). *Introduction to quantitative genetics* (p. 448). Pearson Education Ltd, Essex.
- Falconer, D. Mackay, T. (1996b). *Introduction to quantitative genetics* (p. 448). Pearson Education Ltd, Essex.
- Fedepalma. (2018). *Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. 552.*
- Fedepalma. (2020). *Anuario estadístico 2020. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo. 238.*
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/13235/13024>
- Fedepalma. (2021). *Anuario Estadístico.*
- Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., & Bouzerzour, H. (2020). Expected genetic gains from mono trait and indexbased selection in advanced bread wheat (*Triticum aestivum* L.) populations. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 73(2), 9131–9141.* <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n2.77806>
- Fontalvo Gómez, M. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospectiva, 12(1), 90.*
<https://doi.org/10.15665/rp.v12i1.155>
- G.F. Ngando-Ebongue, W.N. Ajambang, P. Koon, B. Lalu Firman, and V. A. (2012). Technological innovations in major world oil crops, volume 1. In *Technological Innovations in Major World Oil Crops, Volume 1: Breeding* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2>

- Gomes, D. A., Alves, I. M., Maciel, G. M., Siquieroli, A. C. S., Peixoto, J. V. M., Pires, P. D. S., & De Medeiros, I. A. (2021). Genetic dissimilarity, selection index and correlation estimation in a melon germplasm. *Horticultura Brasileira*, 39(1), 46–51. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210107>
- Guillermo Vallejo Rosero. (1980). *EL MATERIAL PLANTABLE DE PALMA AFRICANA DE ACEITE*.
- Hardon, J. J., Williams, C. N., & Watson, I. (1969). Leaf area and yield in the oil palm in malaya. *Experimental Agriculture*, 5(1), 25–32. <https://doi.org/10.1017/S0014479700009935>
- Hefena, A., Sultan, M., Abdel-Moneam, M., Hammoud, S., Barutçular, C., & EL-Sabagh, A. (2016). Assessment of Genetic Variability and Correlation Coefficient to Improve Some Agronomic Traits in Rice. *Journal of Experimental Agriculture International*, 14(5), 1–8. <https://doi.org/10.9734/jeai/2016/29743>
- Ishak, Z., Hashim, A. T., Rosli, S. K., Abu Bakar, D., Ooi, S. E., Mohd, N., & Ong-Abdullah, M. (2020). *Oil Palm Tissue Culture: Fast Tracking Elite Commercial Lines*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22549-0_5
- Kalyana Babu, B., Mathur, R. K., Naveen Kumar, P., Ramajayam, D., Ravichandran, G., Venu, M. V. B., & SparjanBabu, S. (2017). Development, identification & validation of CAPS marker for SHELL trait which governs dura, pisifera & tenera fruit forms in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *PLoS ONE*, 12(2), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171933>
- Lustri, E. A., Siqueira, W. J., Filho, J. A. de A., Vianna, S. A., & Colombo, C. A. (2021). Estimates of genetic parameters for juvenile traits in macaw palm. *Bragantia*, 80. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200463>
- Machado, E. L., Silva, S. A., Fernandes, L. dos S., & Brasileiro, H. S. (2016). Genetic variability and homozygosity in a F4 castor bean population by microsatellite markers. *Bragantia*, 75(3), 307–313. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.536>
- Murugesan, P., Rani, K. L. M., Ramajayam, D., Kumar, K. S., Mathur, R. K., Ravichandran, G., Kumar, P. N., & Arunachalam, V. (2015). Genetic diversity of vegetative and bunch traits of African oil palm (*Elaeis guineensis*) germplasm in India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 85(7), 892–895.
- Myint, K. A., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Samad, M. Y. A., Ramlee, S. I., Yaakub, Z., & Oladosu, Y. (2019). Genetic diversity and selection criteria of MPOB-Senegal oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) germplasm by quantitative traits. *Industrial Crops and Products*, 139(July). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111558>
- Myint, K. A., Ramlee, S. I., Oladosu, Y., Amiruddin, M. D., Yaakub, Z., Samad, M.

- Y. A., Rafii, M. Y., & Ramlee, S. I. (2021). Character interrelationships and path analysis for yield components in mpob-senegal oil palm germplasm. *Sains Malaysiana*, 50(3), 699–709. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5003-12>
- Noh, A., Rafii, M. Y., Mohd Din, A., Kushairi, A., Norziha, A., Rajanaidu, N., Latif, M. A., & Malek, M. A. (2014). Variability and performance evaluation of introgressed Nigerian dura x Deli dura oil palm progenies. *Genetics and Molecular Research*, 13(2), 2426–2437. <https://doi.org/10.4238/2014.April.3.15>
- Noh, A., Rafii, M. Y., Saleh, G., Kushairi, A., & Latif, M. A. (2012). Genetic performance and general combining ability of oil palm Deli dura x AVROS pisifera tested on inland soils. *The Scientific World Journal*, 2012. <https://doi.org/10.1100/2012/792601>
- Nor Azwani, A. B., Fadila, A. M., Mohd Din, A., Rajanaidu, N., Norziha, A., Suzana, M., Marhalil, M., Zulkifli, Y., & Kushairi, A. (2020). Potential oil palm genetic materials derived from introgression of germplasm (MPOB-Nigeria, MPOB-Zaire and MPOB-cameroon accessions) to advanced (AVROS) breeding population. *Journal of Oil Palm Research*, 32(4), 569–581. <https://doi.org/10.21894/jopr.2020.0072>
- Nyouma, A., Bell, J. M., Jacob, F., Riou, V., Manez, A., Pomiès, V., Nodichao, L., Syahputra, I., Affandi, D., Cochard, B., Durand-Gasselin, T., & Cros, D. (2020). Genomic predictions improve clonal selection in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) hybrids. *Plant Science*, 299(January), 110547. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110547>
- Ortega Cedillo, D., Barrera, C. F., Ortega Cedillo, J., Orellana Carrera, J., Vilela De Resende, M. D., & Cruz, C. D. (2018). Estimates of parameters, prediction and selection of an oil palm population in Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 71(2), 8477–8487. <https://doi.org/10.15446/rfna.v71n2.71928>
- Pavlotzky, B., & Murillo, O. (2014). Expected genetic gain and genotype-environment interaction in *Acacia mangium* in the northern region of Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 0(0), 7–17.
- Prada, F.; Romero, H. M. (2012a). *Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de la palma de aceite, Guia de Facilitadores*. (Cenipalma (ed).
- Prathapani Naveen Kumar, B. Kalyana Babu, Ravi K. Mathur, D. R. (2018). Genetic Engineering of Oil Palm. *Public Health*, 121, 572–575.
- Rajanaidu, N. (2016). aceite en los últimos cincuenta años : una aventura personal * A Review of Oil Palm Breeding for the Past 50 Years : *Revista*

Palmas, 37, 190–202.

- Reyes, P. a., Ochoa, J. C., Montoya, C., Daza, E., Ayala, I. M., & Romero, H. M. (2015). Development and validation of a bi-directional allele-specific PCR tool for differentiation in nurseries of dura, tenera and pisifera oil palms. *Agronomía Colombiana*, 33(1), 5–10. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n1.47988>
- Rocha, R. B., Teixeira, A. L., Ramalho, A. R., Espindula, M. C., Pereira Lunz, A. M., & Souza, F. D. F. (2021). Coffea canephora breeding: Estimated and achieved gains from selection in the western amazon, Brazil. *Ciencia Rural*, 51(5), 1–11. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200713>
- Saldaña-Villota, T. M., & Cotes-Torres, J. M. (2020). Radiation interception and leaf area index from foliage cover in diploid potato. *Agronomy Journal*, 112(4), 2805–2811. <https://doi.org/10.1002/agj2.20241>
- Sapey, E., Peprah, B., Adusei-Fosu, K., & Agyei-Dwarko, D. (2015). Genetic Variability of Fresh Fruit Bunch Yield (FFB) Yield in Some Dura X Pisifera Breeding Populations of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 15(8), 1637–1640. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2015.15.8.12738>
- Shafique, M., Ahsan, M., & Mehmood, Z. (2016). Genetic variability and interrelationship of various agronomic traits using correlation and path analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Academia Journal Of, March*. <https://doi.org/10.15413/ajar.2015.0184>
- Shi, P., Wang, Y., Zhang, D., Htwe, Y. M., & Osayande Ihase, L. (2019). Analysis on fruit oil content and evaluation on germplasm in oil palm. *HortScience*, 54(8), 1279–1275. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14044-19>
- Singh, R., Low, E. T. L., Ooi, L. C. L., Ong-Abdullah, M., Ting, N. C., Nagappan, J., Nookiah, R., Amiruddin, M. D., Rosli, R., Manaf, M. A. A., Chan, K. L., Halim, M. A., Azizi, N., Lakey, N., Smith, S. W., Budiman, M. A., Hogan, M., Bacher, B., Van Brunt, A., ... Martienssen, R. A. (2013). The oil palm SHELL gene controls oil yield and encodes a homologue of SEEDSTICK. *Nature*, 500(7462), 340–344. <https://doi.org/10.1038/nature12356>
- Sparnaaij, L. D., Menendez, T., & Blaak, G. (1963). *Breeding and Inheritance in the Oil Palm*. <https://books.google.com.co/books?id=5uVptwAACAAJ>
- Sunilkumar, K., Mathur, R. K., Sparjanbabu, D. S., & Pillai, R. S. N. (2015). Evaluation of interspecific oil palm hybrids for dwarfness. *Journal of Plantation Crops*, 43(1), 29–34.
- Swaray, S., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Jamian, S., Ismail, M. F., Jalloh, M., Eswa, M., Marjuni, M., Akos, I. S., & Yusuff, O. (2021). Oil palm inflorescence sex ratio and fruit set assessment in dura x pisifera biparental progenies on

- fibric peat soil. *Agronomy*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy11071380>
- Swaray, S., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Jamian, S., Ismail, M. F., Jalloh, M., Marjuni, M., Mohamad, M. M., & Yusuff, O. (2020). Influence of parental dura and pisifera genetic origins on oil palm fruit set ratio and yield components in their D × P Progenies. *Agronomy*, 10(11), 1–30. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111793>
- Swaray, S., Rafii, M. Y., Amiruddin, M. D., Ismail, M. F., Jamian, S., Jalloh, M., Oladosu, Y., Mohamad, M. M., Marjuni, M., Kolapo, O. K., & Chukwu, S. C. (2021). Article assessment of oil palm pollinating weevil (*Elaeidobius kamerunicus*) population density in biparental dura × pisifera hybrids on deep peat-soil in Perak State, Malaysia. *Insects*, 12(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/insects12030221>
- Swaray, S., Rafii, M. Y., Amiruddin, M. D., Ismail, M. F., Jamian, S., Marjuni, M., Jalloh, M., Yusuff, O., & Mohamad, M. M. (2020). Study on Yield Variability in Oil Palm Progenies and Their Genetic Origins. *Biology and Life Sciences Forum*, 4(1), 68. <https://doi.org/10.3390/iecps2020-08760>
- Tiemann, T. T., Donough, C. R., Lim, Y. L., Härdter, R., Norton, R., Tao, H. H., Jaramillo, R., Satyanarayana, T., Zingore, S., & Oberthür, T. (2018). Feeding the Palm: A Review of Oil Palm Nutrition. *Advances in Agronomy*, 152, 149–243. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.07.001>
- USDA. (2020). *United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service*. <https://apps.fas.usda.gov/esrquery/>

3. Capítulo 3

Selección de los mejores individuos dentro de las progenies elite tipo *dura* de *Elaeis guineensis* Jacq.

3.1 Introducción.

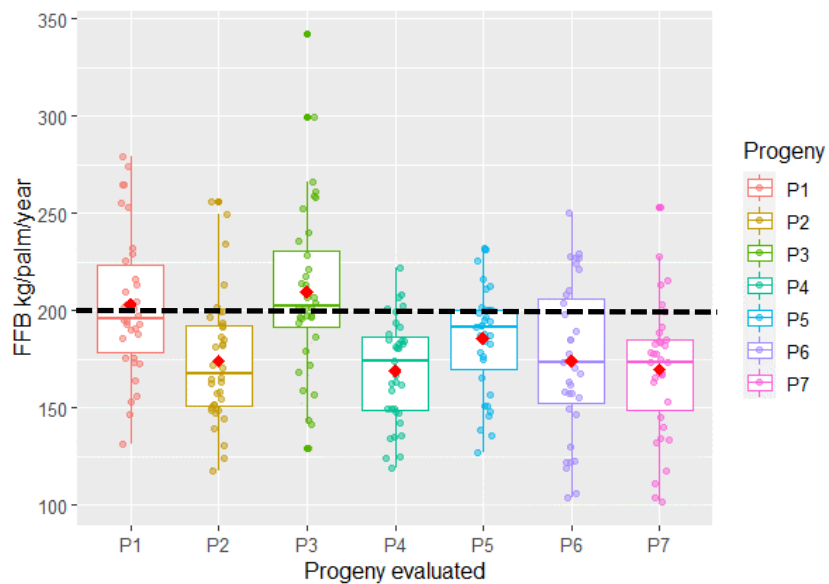
En este capítulo se abordó la selección familiar e individual de las palmas de aceite que serán parte de los futuros esquemas y ciclos de mejoramiento genético para la obtención de cultivares comerciales de lento crecimiento de alta producción de fruta y contenido de aceite. Mediante las estimaciones de los parámetros genéticos y la heredabilidad en sentido amplio en la prueba de progenie *dura* x *dura* y el cálculo del avance genético entre las dos poblaciones de palma de aceite estudiadas en los capítulos anteriores, conocidas como C0-Monterrey y C1-Vizcaina, a partir del conocimiento de los rasgos con mayor heredabilidad en sentido amplio (H^2_B), como son el incremento anual de altura (HT) con un 72%, peso medio de racimo (PMR) con un 40% y racimos de fruta fresca (RFF) con un 21% y otras características de interés, tales como el aceite a racimo (ACR) y almendra a fruto (AF) se evaluó el comportamiento de las progenies y palmas individuales identificando las más promisorias en ciclos futuros de mejoramiento de poblaciones *dura* y para el desarrollo de progenies *tenera* (DxP) enanas. Además, se prestó especial atención a los caracteres que presentaron los coeficientes de variación genética (CVg) más altos dentro del estudio, que permiten predecir una cierta estabilidad del carácter a mejorar debido a su baja variación ambiental.

3.2 Selección de las mejores progenies y de los mejores individuos.

3.2.1 Por características de rendimiento

Los diagramas de cajas que se presentan a continuación muestran el comportamiento de las características de rendimiento evaluadas en las siete progenies *dura x dura* durante los años de investigación, para graficar los valores individuales de las plantas por cada progenie se tuvo en cuenta los registros de evaluación de los años 2 al 10. El programa de mejoramiento genético de Cenipalma tiene como valor de selección para madres tipo *dura* de RFF 200 kg por palma⁻¹. En la figura 3-1 se pueden observar las progenies y las palmas individuales dentro de estas progenies más sobresalientes para este rasgo.

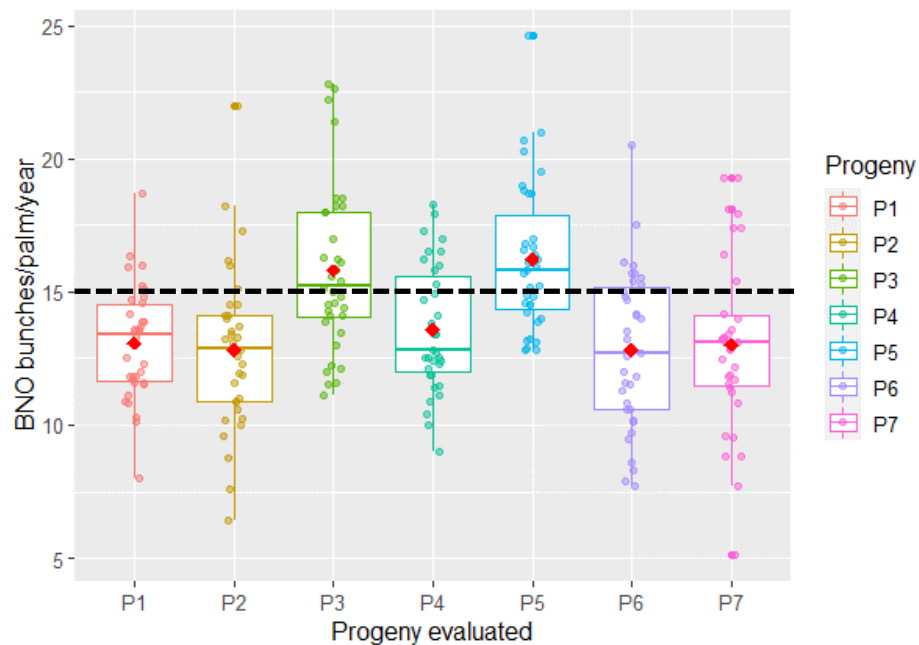
Figura 3-1. Comportamiento de la producción de racimos de fruta fresca (RFF) en las diferentes progenies y palmas evaluadas. La línea de color negro indica el valor de selección para la característica evaluada.



Fuente: esta investigación.

La progenie 1 con un promedio general de 202 kg palma⁻¹ de RFF, en ella sobresalen palmas que tienen valores superiores (250 a 264 kg palma⁻¹) al valor medio de la población para la selección en esta característica. Por otro lado, la progenie tres que tiene en promedio general más alto a nivel familiar con un valor de 209 kg palma⁻¹ de RFF, y presenta palmas con valores superiores al valor de selección, con rangos entre 258 kg palma⁻¹ a 341 kg palma⁻¹ (Figura 3-1). El valor de selección para el rasgo de número de racimos producido por palma es de 15 racimos palma⁻¹. Las progenes P5 y P3 sobresalieron por sus promedios generales de 16,2 y 15,7 racimos palma⁻¹ respectivamente. Para las dos progenes se destacan palmas individuales con promedios superiores al valor de selección, con rangos entre 18 racimos palma⁻¹ a 24 racimos palma⁻¹ (Figura 3-2).

Figura 3-2. Comportamiento del número de racimos producido por palma al año (NR) en las diferentes progenes y palmas evaluadas. La línea de color negro indica el valor de selección para la característica evaluada.



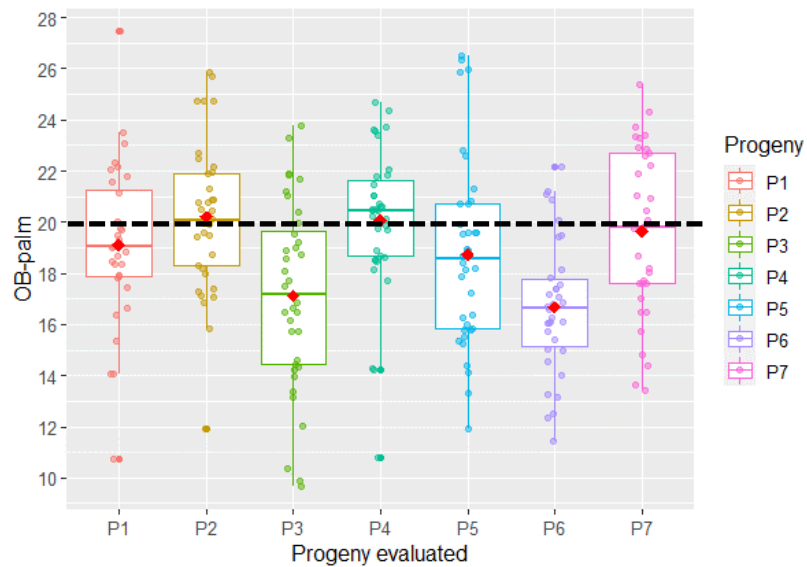
Fuente: esta investigación.

3.2.2 Por componentes de aceite.

Los componentes de racimo y fruto son muy importantes dentro de los programas de mejoramiento en palma, para lograr obtener cultivares con excelentes rendimientos de FFB y altos contenido de aceite a racimo. El Box-plot siguiente presenta el comportamiento del rasgo de aceite a racimo (ACR) característica determinante en la selección familiar e individual en palma de aceite.

Para la característica de ACR las progenies más sobresalientes que presentaron los promedios generales más altos fueron P2 con un valor de 20,2 %, a nivel individual en esta progenie tiene palmas con promedios por encima del valor de selección (20% de ACR), los valores de las mejores palmas oscilaron entre 22% a 26% de OB. Por otro lado, la progenie P4 con un promedio general de 20,1% de OB, tiene plantas individuales con valores por encima del rango de selección, estos valores individuales oscilaron entre 22% a 25% de ACR (Figura 3-3).

Figura 3-3. Comportamiento de la cantidad de aceite a racimo por palma (ACR) en las diferentes progenies y palmas evaluadas. La línea de color negro indica el valor de selección para la característica evaluada.

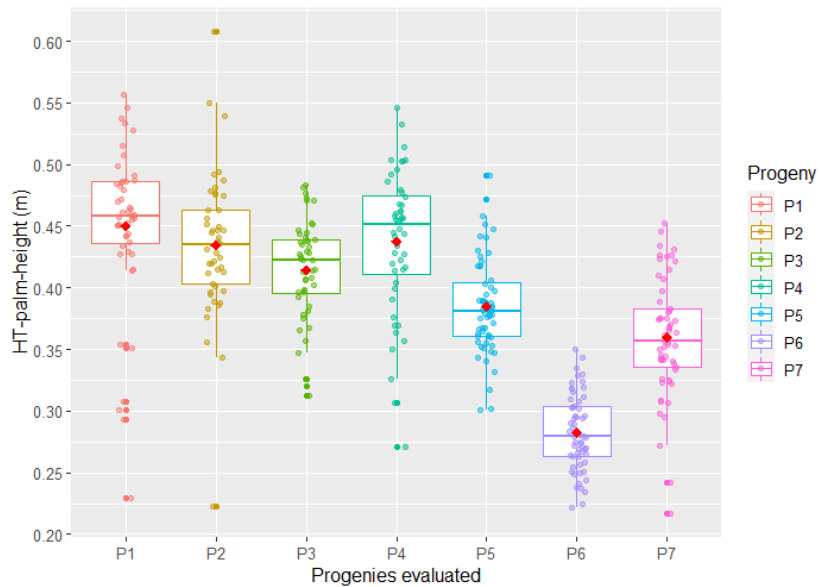


Fuente: esta investigación.

3.2.3 Por características vegetativas.

Dentro de los resultados más relevantes y mayor importancia en esta investigación, es el comportamiento del rasgo altura de planta (HT). La estimación de los parámetros genéticos y el cálculo de la ganancia genética demostraron que esta característica es la de mayor heredabilidad en sentido amplio, con baja influencia ambiental y con el coeficiente de variación genética más alto se obtuvo para este rasgo HT evaluado. En el Box-plot de la figura 3-4, se puede observar el comportamiento del incremento anual de altura para las progenies *dura x dura* evaluadas en esta investigación. Los promedios de las progenies evaluadas oscilaron entre 0,28 a 0,45 m para el carácter de incremento anual vertical de la planta. Las mejores progenies por su reducido incremento anual de altura fueron P6 con un valor promedio de 0,28 m y con plantas 10 plantas individuales que presentaron los menores valores de incremento anual de altura con 0,21 m, dentro de esta progenie también se destacó la buena producción de RFF (220 kg RFF/planta) y la progenie P7 con un promedio general de 0,36 m, con cuatro plantas individuales que presentaron los menores valores de incremento de altura de 0,22 m, para esta progenie P7 y en estas plantas individuales se destacó de la misma manera los altos contenidos de ACR en donde los valores oscilaron entre 22% a 25%.

Figura 3-4. Comportamiento del rasgo de incremento de altura (HT) en las diferentes progenies y palmas evaluadas. En los gráficos de cajas, el triángulo de color rojo representa el promedio general y la línea horizontal la mediana de los datos.



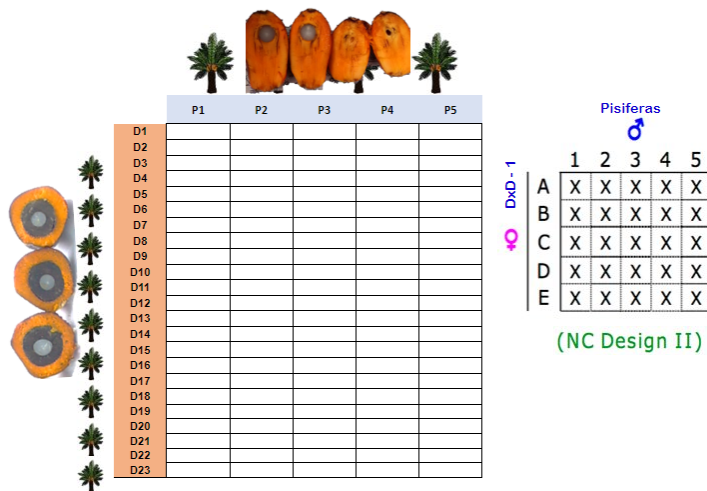
Fuente: esta investigación.

Teniendo en cuenta esta descripción y análisis a nivel familiar e individual de progenies derivadas de cruzamientos *dura x dura*, se plantea el siguiente esquema de cruzamientos con el fin de determinar la Heterosis y la habilidad combinatoria general y específica para los presentes y futuros ciclos de mejoramiento en el cultivo de la palma de aceite, que direcciona la obtención de cultivares enanos o de lento crecimiento que sean altamente productivos, con buenos contenidos de aceite a racimo, que presenten buen comportamiento sanitario y que visualicen a nivel mundial una palmicultura altamente productiva y sostenible.

3.3 Esquema de cruzamientos para la obtención de cultivares *dura x pisifera*

Se propone el siguiente esquema de cruzamientos (Figura 3-5) que representa un diseño genético Carolina del Norte II (Comstock y Robinson, 1948), donde se evaluará la habilidad combinatoria de los diferentes parentales seleccionados, frente a las diferentes combinaciones híbridas propuestas. A continuación, se indica el esquema a seguir, donde se emplearán 23 progenitores femeninos, todos híbridos con cinco (5) progenitores masculinos.

Figura 3-5. Esquema de cruzamientos en diseño Carolina del Norte II.



Fuente: esta investigación.

3.4 Conclusiones

Mediante los análisis e interpretaciones de la información realizados, se pudo determinar y seleccionar familias de hermanos completos de cruzamientos *dura x dura* y de estos hermanos se seleccionaron individuos con valores promedios superiores a los valores de selección genética para el cultivo, en los rasgos de rendimiento, vegetativos y de componentes de racimos más importantes en la mejora genética del cultivo.

4. Conclusiones y recomendaciones finales

4.1 Conclusiones

1. Para el cultivo de la palma de aceite existen restricciones en la variabilidad genética, la mayoría de los cultivares comerciales que se usan actualmente provienen de una base genética estrecha, principalmente para los progenitores femeninos. Este estudio presenta resultados relevantes y de gran aporte por la amplia variabilidad que se encontró en la población estudiada, la oportunidad de avanzar en el mejoramiento genético de la palma con una base genética diferente a los cultivares que actualmente se comercializan, si se efectúa una adecuada selección de familias y plantas individuales se pueden generar progenies *dura* con incrementos de altura menores a 30 cm año⁻¹. Donde se espera evaluar los efectos aditivos y/o dominantes de esta característica al ser introgresar con parentales masculinos *pisifera*. Y poder generar cultivares con crecimientos inferiores a los repostados en los cultivares comerciales de *tenera* que están entre 60 a 70 cm año⁻¹, acompañado de otros rasgos de interés comercial como RFF y ACR, con el desarrollo de estas progenies se podría esperar un aumento cercano al 30% de la vida productiva y económica del cultivo.

Usando el método de selección recíproca recurrente (SRR) y la estrategia de selección familiar e individual (FIPS) en el mejoramiento de parentales femeninos en palma de aceite, y en el caso particular de la población *dura*

enana de Cenipalma, se obtuvieron altas ganancias genéticas y heredabilidades en los caracteres de interés agronómico y económico para el cultivo (RFF, NR, ACR y HT), dando un alto valor agregado a los cultivares de nuevas siembras.

2. En esta investigación se obtuvieron valores altos de heredabilidad en sentido amplio, para algunos caracteres de interés fueron superiores en comparación con lo reportado en la bibliografía. Por ejemplo, rasgos a introgresar en nuevas progenies como el crecimiento vertical del estípite se destacaron por presentar valores superiores al 70%. Teniendo en cuenta que en futuras poblaciones mejoradas nos permitirán conocer la heredabilidad en sentido estricto que es la que pasa de una generación a otra.
3. Del manejo adecuado esperado para alcanzar altos rendimientos en el cultivo de la palma de aceite, más del 51% es atribuido al mejoramiento genético, y el otro porcentaje restante a varios otros factores del manejo agronómico integral. Con las nuevas poblaciones generadas en Cenipalma se podrá seguir avanzando en el cierre de las brechas de productividad, mediante la obtención de cultivares enanos, altamente productivos y en el futuro con características de resistencia y tolerancia a factores bióticos y abióticos.

4.2 Recomendaciones

1. Las técnicas de mejoramiento genético tradicional, basado principalmente en la selección fenotípica es muy eficaz, sin embargo, las limitaciones para rasgos completos han sido un reto actual. El mejoramiento genético clásico en el cultivo de palma de aceite debe complementarse con las técnicas moleculares actuales, tales como la selección asistida por marcadores

(MAS), la selección genómica (GS), la transformación y edición genética, entre otras, para el caso específico de la GS en combinación con el mejoramiento clásico, permitirá identificar individuos genéticamente superiores antes de la recopilación completa de los datos fenotípicos, de tal manera que se aumente la precisión de la selección, acelerando y potencializando los procesos de mejoramiento (Nyouma et al., 2020; Kumar et al., 2018) y de esta forma aumentar las ganancias genéticas del cultivo.

2. Evaluar la calidad del aceite de las progenies más promisorias, a nivel familiar e individual, componentes como el perfil de ácidos grasos, acidez, índice de Yodo y vitaminas, serían muy importantes para complementar el fenotipado de los futuros cultivares mejorados, con características que permitan volverlos más atractivos a la agroindustria mundial.
3. Evaluar el comportamiento de estas progenies promisorias, bajo las pruebas de evaluación agronómica (PEAS), donde se identifiquen las mejores combinaciones de parentales y los máximos rendimientos en diferentes ambientes de evaluación, con el objetivo de presentar cultivares *dura* x *pisifera* adaptados a los diferentes ambientes del país en zonas agroclimáticas que exploten su máximo potencial genético.

5. Bibliografía general

- Agaba, R., Rubaihayo, P., Tukamuhabwa, P., Mwanga, R. O. M., Tumwegamire, S., Ndirigwe, J., Heider, B., & Grüneberg, W. (2021). Genetic variation and response to selection for storage root dry matter and associated traits in a population of yam bean (*Pachyrhizus* spp.) interspecies crosses. *Euphytica*, 217(4). <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02776-1>
- Al-Khayri, J. M., Jain, S. M., & Johnson, D. V. (2019). Advances in plant breeding strategies: Industrial and food crops. In *Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23265-8>
- Alvarado, A. Chinchilla, C. Rodriguez, J. (2007). *Desempeño de dos variedades de palma aceitera (Deli x Avros y Deli x Ghana) plantadas a diferentes densidades en dos sitios en Resumen Introducción Materiales y métodos Resultados y discusión Rendimiento*. 35–41.
- Alvarado, A. & Henry, J. (2015). *Evolution Blue : a new oil palm variety with reduced growth and high oil content*. 1–8.
- Alvarado, Amancio. (2010). Avances en el mejoramiento genético de la palma de aceite en Centroamérica. *Palmas*, 31(1), 126–143.
- Annual, W. (2021). *Index & General Notes OIL WORLD ANNUAL 2017 – Table of Contents*. 1, 2016–2018.
- Arolu, I. W., Rafii, M. Y., Marjuni, M., Hanafi, M. M., Sulaiman, Z., Rahim, H. A., Abidin, M. I. Z., Amiruddin, M. D., Din, A. K., & Nookiah, R. (2017). Breeding of high yielding and dwarf oil palm planting materials using Deli dura x Nigerian pisifera population. *Euphytica*, 213(7). <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1943-z>
- Arolu, I. W., Rafii, M. Y., Marjuni, M., Hanafi, M. M., Sulaiman, Z., Rahim, H. A., Kolapo, O. K., Abidin, M. I. Z., Amiruddin, M. D., Kushairi Din, A., & Nookiah, R. (2016). Genetic variability analysis and selection of pisifera palms for commercial production of high yielding and dwarf oil palm planting materials.

- Industrial Crops and Products*, 90, 135–141.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.006>
- Ayala, I., Romero, H., Tupaz, A., Daza, E., Rincón, A., Caicedo, A., Fontanilla, C., & Mosquera, M. (2017). Comportamiento agronómico de cultivares comerciales de palma de aceite en el Campo Experimental Palmar de La Vizcaína. In *Variedades de palma de aceite sembradas en el Campo Experimental Palmar de la Vizcaína*.
- Barcelos, E., De Almeida Rios, S., Cunha, R. N. V., Lopes, R., Motoike, S. Y., Babiychuk, E., Skiryicz, A., & Kushnir, S. (2015). Oil palm natural diversity and the potential for yield improvement. *Frontiers in Plant Science*, 6(MAR), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00190>
- Bastidas, S., Peña R., E. A., & Reyes C., R. (2003). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) del proyecto de mejoramiento genético de Corpoica. *Revista Palmas*, 24(1), 21–29.
<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950%0Ahttp://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950/950>
- Beirnaert, A., & Vanderweyen, R. (1941). Contribution à l'étude génétique et biométrique des varités d' *Elaeis guineensis* Jacq. In *Publications de l' institut nacional pour l'étude agronomique du Congo Belgue: Vol. Serie Cien* (Serie scie, Issue 27). Bruxelles: Institut national pour l'étude agronomique du Congo belge (INEAC).
- Breure, C. J. (2010). Rate of leaf expansion: A criterion for identifying oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) types suitable for planting at high densities. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 141–147.
<https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.03.001>
- Breure, C. J., & Powell, M. S. (1987). *The One Shot Method of Establishing Growth Parameters on Oil Palm*.
<https://books.google.com.co/books?id=PbJdAQAACAAJ>
- Cedillo, D. S. O., Barros, W. S., Ferreira, F. M., Dias, L. A. dos S., Rocha, R. B., & Cruz, C. D. (2008). Correlation and repeatability in progenies of African oil palm. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 30(2), 197–201.
<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i2.1728>
- Corley, R. H. V., & Breure, C. J. (1981). *Measurements in Oil Palm Experiments*. s.ed. <https://books.google.com.co/books?id=Lcq8GwAACAAJ>
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (Fifth edit). Wiley-Blackwell.
- Cruz, Cosme Damião; Carneiro, P. S. (2003). *Aplicados ao Melhoramento Genetico* (UFV (ed.); Volumen 2).

- de Almeida Rios, S., Vieira da Cunha, R. N., Lopes, R., Barcelos, E., Raimundo Nonato Carvalho da Rocha, & Alves de Lima, W. A. (2018). Correlation and Path analysis for yield components in Dura oil palm germplasm. *Industrial Crops and Products*, 112(December 2017), 724–733. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.054>
- Domiciano, G. P., Alves, A. A., Laviola, B. G., & da Conceição, L. D. H. C. S. (2015). Parâmetros genéticos e diversidade em progênies de macaúba com base em características morfológicas e fisiológicas. *Ciencia Rural*, 45(9), 1599–1605. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140909>
- Donough, C. R. (2005). *Breeding oil palms for high oil yield in IOI Group : 1 . First cycle development of OPGL-derived materials. March 2005.*
- Dumortier, F. (2007). *and Quality of Dami Seeds. 28*, 213–226.
- Ekaso, D. D., Allan, M. M., Pattison, D. R. M., Trouw, R. A. J., Muluneh, A. A., Kidane, T., Rowland, J., Bachtadse, V., Zealand, N., Evans, D., Ebinger, C. J., Yemane, T., Harding, D. J., Tesfaye, S., Kelley, S., Rex, D. C., Mogessie, A., Krenn, K., Schaflechner, J., ... Gessesse, B. Y. A. (2003). GUÍA DE CONCEPTOS DE GENETICA CUANTITATIVA. *Precambrian Research*, 123(1), 1689–1699. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.047>[http://www.geohaz.org/news/images/publications/gesi-report with prologue.pdf](http://www.geohaz.org/news/images/publications/gesi-report%0Ahttp://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/earthquakes_en.pdf)http://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/earthquakes_en.pdf<http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2011.06.005>
- Falconer, D. Mackay, T. (1996). *Introduction to quantitative genetics* (p. 448). Pearson Education Ltd, Essex.
- Fedepalma. (2018). *Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. 552.*
- Fedepalma. (2020). *Anuario estadístico 2020. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo. 238.* <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/13235/13024>
- Fedepalma. (2021). *Anuario Anuario Estadístico. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo.*
- Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., & Bouzerzour, H. (2020). Expected genetic gains from mono trait and indexbased selection in advanced bread wheat (*Triticum aestivum* L.) populations. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(2), 9131–9141. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n2.77806>
- Fontalvo Gómez, M. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospectiva*, 12(1), 90.

- <https://doi.org/10.15665/rp.v12i1.155>
- G.F. Ngando-Ebongue, W.N. Ajambang, P. Koon, B. Lalu Firman, and V. A. (2012). Technological innovations in major world oil crops, volume 1. In *Technological Innovations in Major World Oil Crops, Volume 1: Breeding* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2>
- Gomes, D. A., Alves, I. M., Maciel, G. M., Siquieroli, A. C. S., Peixoto, J. V. M., Pires, P. D. S., & De Medeiros, I. A. (2021). Genetic dissimilarity, selection index and correlation estimation in a melon germplasm. *Horticultura Brasileira*, 39(1), 46–51. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210107>
- Guillermo Vallejo Rosero. (1980). *EL MATERIAL PLANTABLE DE PALMA AFRICANA DE ACEITE*.
- Hardon, J. J., Williams, C. N., & Watson, I. (1969). Leaf area and yield in the oil palm in malaya. *Experimental Agriculture*, 5(1), 25–32. <https://doi.org/10.1017/S0014479700009935>
- Hefena, A., Sultan, M., Abdel-Moneam, M., Hammoud, S., Barutçular, C., & EL-Sabagh, A. (2016). Assessment of Genetic Variability and Correlation Coefficient to Improve Some Agronomic Traits in Rice. *Journal of Experimental Agriculture International*, 14(5), 1–8. <https://doi.org/10.9734/jeai/2016/29743>
- Ishak, Z., Hashim, A. T., Rosli, S. K., Abu Bakar, D., Ooi, S. E., Mohd, N., & Ong-Abdullah, M. (2020). *Oil Palm Tissue Culture: Fast Tracking Elite Commercial Lines*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22549-0_5
- Kalyana Babu, B., Mathur, R. K., Naveen Kumar, P., Ramajayam, D., Ravichandran, G., Venu, M. V. B., & SparjanBabu, S. (2017). Development, identification & validation of CAPS marker for SHELL trait which governs dura, pisifera & tenera fruit forms in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *PLoS ONE*, 12(2), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171933>
- Lustri, E. A., Siqueira, W. J., Filho, J. A. de A., Vianna, S. A., & Colombo, C. A. (2021). Estimates of genetic parameters for juvenile traits in macaw palm. *Bragantia*, 80. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200463>
- Machado, E. L., Silva, S. A., Fernandes, L. dos S., & Brasileiro, H. S. (2016). Genetic variability and homozygosity in a F4 castor bean population by microsatellite markers. *Bragantia*, 75(3), 307–313. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.536>
- Murugesan, P., Rani, K. L. M., Ramajayam, D., Kumar, K. S., Mathur, R. K., Ravichandran, G., Kumar, P. N., & Arunachalam, V. (2015). Genetic diversity of vegetative and bunch traits of African oil palm (*Elaeis guineensis*)

- germplasm in India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 85(7), 892–895.
- Myint, K. A., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Samad, M. Y. A., Ramlee, S. I., Yaakub, Z., & Oladosu, Y. (2019). Genetic diversity and selection criteria of MPOB-Senegal oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) germplasm by quantitative traits. *Industrial Crops and Products*, 139(July).
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111558>
- Myint, K. A., Ramlee, S. I., Oladosu, Y., Amiruddin, M. D., Yaakub, Z., Samad, M. Y. A., Rafii, M. Y., & Ramlee, S. I. (2021). Character interrelationships and path analysis for yield components in mpob-senegal oil palm germplasm. *Sains Malaysiana*, 50(3), 699–709. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5003-12>
- Noh, A., Rafii, M. Y., Mohd Din, A., Kushairi, A., Norziha, A., Rajanaidu, N., Latif, M. A., & Malek, M. A. (2014). Variability and performance evaluation of introgressed Nigerian dura x Deli dura oil palm progenies. *Genetics and Molecular Research*, 13(2), 2426–2437.
<https://doi.org/10.4238/2014.April.3.15>
- Noh, A., Rafii, M. Y., Saleh, G., Kushairi, A., & Latif, M. A. (2012). Genetic performance and general combining ability of oil palm Deli dura x AVROS pisifera tested on inland soils. *The Scientific World Journal*, 2012.
<https://doi.org/10.1100/2012/792601>
- Nor Azwani, A. B., Fadila, A. M., Mohd Din, A., Rajanaidu, N., Norziha, A., Suzana, M., Marhalil, M., Zulkifli, Y., & Kushairi, A. (2020). Potential oil palm genetic materials derived from introgression of germplasm (MPOB-Nigeria, MPOB-Zaire and MPOB-cameroon accessions) to advanced (AVROS) breeding population. *Journal of Oil Palm Research*, 32(4), 569–581.
<https://doi.org/10.21894/jopr.2020.0072>
- Nyouma, A., Bell, J. M., Jacob, F., Riou, V., Manez, A., Pomiès, V., Nodichao, L., Syahputra, I., Affandi, D., Cochard, B., Durand-Gasselín, T., & Cros, D. (2020). Genomic predictions improve clonal selection in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) hybrids. *Plant Science*, 299(January), 110547.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110547>
- Ortega Cedillo, D., Barrera, C. F., Ortega Cedillo, J., Orellana Carrera, J., Vilela De Resende, M. D., & Cruz, C. D. (2018). Estimates of parameters, prediction and selection of an oil palm population in Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 71(2), 8477–8487.
<https://doi.org/10.15446/rfna.v71n2.71928>
- Pavlotzky, B., & Murillo, O. (2014). Expected genetic gain and genotype-environment interaction in *Acacia mangium* in the northern region of Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 0(0), 7–17.
- Prada, F.; Romero, H. M. (2012a). *Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de*

- la palma de aceite, Guía de Facilitadores.* (Cenipalma (ed).
- Prathapani Naveen Kumar, B. Kalyana Babu, Ravi K. Mathur, D. R. (2018). Genetic Engineering of Oil Palm. *Public Health*, 121, 572–575.
- Rajanaidu, N. (2016). aceite en los últimos cincuenta años : una aventura personal * A Review of Oil Palm Breeding for the Past 50 Years : *Revista Palmas*, 37, 190–202.
- Reyes, P. a., Ochoa, J. C., Montoya, C., Daza, E., Ayala, I. M., & Romero, H. M. (2015). Development and validation of a bi-directional allele-specific PCR tool for differentiation in nurseries of dura, tenera and pisifera oil palms. *Agronomía Colombiana*, 33(1), 5–10.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n1.47988>
- Rocha, R. B., Teixeira, A. L., Ramalho, A. R., Espindula, M. C., Pereira Lunz, A. M., & Souza, F. D. F. (2021). Coffea canephora breeding: Estimated and achieved gains from selection in the western amazon, Brazil. *Ciencia Rural*, 51(5), 1–11. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200713>
- Saldaña-Villota, T. M., & Cotes-Torres, J. M. (2020). Radiation interception and leaf area index from foliage cover in diploid potato. *Agronomy Journal*, 112(4), 2805–2811. <https://doi.org/10.1002/agj2.20241>
- Sapey, E., Peprah, B., Adusei-Fosu, K., & Agyei-Dwarko, D. (2015). Genetic Variability of Fresh Fruit Bunch Yield (FFB) Yield in Some Dura X Pisifera Breeding Populations of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 15(8), 1637–1640.
<https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2015.15.8.12738>
- Shafique, M., Ahsan, M., & Mehmood, Z. (2016). Genetic variability and interrelationship of various agronomic traits using correlation and path analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Academia Journal Of, March*.
<https://doi.org/10.15413/ajar.2015.0184>
- Shi, P., Wang, Y., Zhang, D., Htwe, Y. M., & Osayande Ihase, L. (2019). Analysis on fruit oil content and evaluation on germplasm in oil palm. *HortScience*, 54(8), 1279–1275. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14044-19>
- Singh, R., Low, E. T. L., Ooi, L. C. L., Ong-Abdullah, M., Ting, N. C., Nagappan, J., Nookiah, R., Amiruddin, M. D., Rosli, R., Manaf, M. A. A., Chan, K. L., Halim, M. A., Azizi, N., Lakey, N., Smith, S. W., Budiman, M. A., Hogan, M., Bacher, B., Van Brunt, A., ... Martienssen, R. A. (2013). The oil palm SHELL gene controls oil yield and encodes a homologue of SEEDSTICK. *Nature*, 500(7462), 340–344. <https://doi.org/10.1038/nature12356>
- Sparnaaij, L. D., Menendez, T., & Blaak, G. (1963). *Breeding and Inheritance in*

the Oil Palm. <https://books.google.com.co/books?id=5uVptwAACAAJ>

- Sunilkumar, K., Mathur, R. K., Sparjanbabu, D. S., & Pillai, R. S. N. (2015). Evaluation of interspecific oil palm hybrids for dwarfness. *Journal of Plantation Crops*, 43(1), 29–34.
- Swaray, S., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Jamian, S., Ismail, M. F., Jalloh, M., Eswa, M., Marjuni, M., Akos, I. S., & Yusuff, O. (2021). Oil palm inflorescence sex ratio and fruit set assessment in dura × pisifera biparental progenies on fibric peat soil. *Agronomy*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy11071380>
- Swaray, S., Amiruddin, M. D., Rafii, M. Y., Jamian, S., Ismail, M. F., Jalloh, M., Marjuni, M., Mohamad, M. M., & Yusuff, O. (2020). Influence of parental dura and pisifera genetic origins on oil palm fruit set ratio and yield components in their D × P Progenies. *Agronomy*, 10(11), 1–30. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111793>
- Swaray, S., Rafii, M. Y., Amiruddin, M. D., Ismail, M. F., Jamian, S., Jalloh, M., Oladosu, Y., Mohamad, M. M., Marjuni, M., Kolapo, O. K., & Chukwu, S. C. (2021). Article assessment of oil palm pollinating weevil (*Elaeidobius kamerunicus*) population density in biparental dura × pisifera hybrids on deep peat-soil in Perak State, Malaysia. *Insects*, 12(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/insects12030221>
- Swaray, S., Rafii, M. Y., Amiruddin, M. D., Ismail, M. F., Jamian, S., Marjuni, M., Jalloh, M., Yusuff, O., & Mohamad, M. M. (2020). Study on Yield Variability in Oil Palm Progenies and Their Genetic Origins. *Biology and Life Sciences Forum*, 4(1), 68. <https://doi.org/10.3390/iecps2020-08760>
- Tiemann, T. T., Donough, C. R., Lim, Y. L., Härdter, R., Norton, R., Tao, H. H., Jaramillo, R., Satyanarayana, T., Zingore, S., & Oberthür, T. (2018). Feeding the Palm: A Review of Oil Palm Nutrition. *Advances in Agronomy*, 152, 149–243. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.07.001>
- USDA. (2020). *United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service*. <https://apps.fas.usda.gov/esrquery/>

Anexo A: Artículo de investigación: Selección de Parentales elite tipo *dura*.

Publicado en la revista Agronomy, volumen 11, diciembre 2021.

https://mdpi-res.com/d_attachment/agronomy/agronomy-11-02581/article_deploy/agronomy-11-02581.pdf



Article

Selection of Elite *dura*-Type Parents to Produce Dwarf Progenies of *Elaeis guineensis* Using Genetic Parameters

Andrés Tupaz-Vera ¹, Iván Ayala-Díaz ¹, Carlos Felipe Barrera ² and Hernán Mauricio Romero ^{1,3,*}

¹ Oil Palm Biology and Breeding Research Program, Colombian Oil Palm Research Center-Cenipalma, Bogota 11121, Colombia; atupaz@cenipalma.org (A.T.-V.); iayala@cenipalma.org (I.A.-D.)

² Department of Agronomy, Universidad Nacional de Colombia, Medellín 050034, Colombia; fbarrera@edu.co

³ Department of Biology, Universidad Nacional de Colombia, Bogota 11121, Colombia

* Correspondence: hmromero@unal.edu.co

Abstract: The low annual growth rate of the stipe in oil palm progenies is desirable to increase these crops' productive and economic life. Recurrent reciprocal selection (R.R.S.) has allowed the development of oil palm populations through several breeding cycles with an increased frequency of favorable alleles associated with traits of interest. The present study evaluated families derived from Deli *dura* × African *dura* crosses. For 12 years, the yield, vegetative characteristics, and the amount of oil in seven *dura* progenies were assessed to estimate, from the information collected, the genetic parameters, heritability, and phenotypic correlations among quantitative genetic traits of high-yielding dwarf progenies. The analysis was carried out using analysis of variance, followed by a comparison of means for all estimated traits. The effect of the progenies was highly significant ($p \leq 0.01$) for most traits. The yield values, expressed in fresh fruit bunches (FFB) for the progenies, ranged from 165 to 208 kg per palm per year. The oil-to-bunch ratio (O/B) ranged from 17% to 19%, with an overall average of 18%. One of the essential characteristics in this study was the vertical growth of the stipe. Progenies P6 and P7 were identified as those with the lowest annual increase in height, with values of 0.29 and 0.33 m year⁻¹. The values indicate that these are slow-growing cultivars with a high FFB yield and O/B. The highest heritabilities were found for the vegetative trait height (71.62%) and the number of leaflets (46.64%). The development of *dura* parents with slow growth characteristics in combination with a high bunch and oil production allows extending the productive life of the crop to more than 35 years, providing added value to obtaining differentiated cultivars of oil palm.



Citation: Tupaz-Vera, A.; Ayala-Díaz, I.; Barrera, C.F.; Romero, H.M. Selection of Elite *dura*-Type Parents to Produce Dwarf Progenies of *Elaeis guineensis* Using Genetic Parameters. *Agronomy* **2021**, *11*, 2581. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122581>

Academic Editor: J. Stephen C. Smith

Received: 3 November 2021

Accepted: 16 December 2021

Published: 18 December 2021

Keywords: introgression; heritability; genetic traits; reduced growth; oil palm