

Una mirada al mejoramiento genético de la palma de aceite en los últimos cincuenta años: una aventura personal*

A Review of Oil Palm Breeding for the Past 50 Years:
A Personal Journey

CITACIÓN: Rajanaidu, N. (2016). Una mirada al mejoramiento genético de la palma de aceite en los últimos cincuenta años: una aventura personal. *Palmas* 37(Especial Tomo I), pp. 190-202.

PALABRAS CLAVE: mejoramiento genético, palma de aceite.

KEYWORDS: Breeding, oil palm.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Strong Tower Consulting.



NOOKIAH RAJANAIDU

Investigador Senior,
Malaysian Palm Oil Board, MPOB
(Junta de Palma de Aceite de Malasia)
Senior Research Fellow,
Malaysian Palm Oil Board (MPOB)
rajanaidu45@gmail.com

Resumen

Este estudio cubre el mejoramiento genético de palma de aceite en Malasia entre 1965 y 2015. El descubrimiento de Beirnaert de la herencia del cuesco en El Congo en 1941 y el cultivo de DxP como el principal material de siembra, han creado las condiciones para el desarrollo de la industria de aceite de palma a nivel mundial. Existe la capacidad de producir casi 400 millones de semillas DxP en Indonesia, Malasia, Papúa Nueva Guinea, Costa Rica, Tailandia, Colombia y Benín. En las etapas más tempranas hubo un intercambio significativo de materiales genéticos entre países. AVROS derivado de la palma Djongo del Congo, Yangambí (Congo), Calabar (Nigeria), Ekona (Camerún), La Mé (Costa de

Marfil) URT (Guthrie) y SP540 (Indonesia) son las principales *pisíferas* involucradas en la producción de semillas. En el lado femenino, la Deli dura derivada de las cuatro palmas de Bogor desempeñó un rol fundamental. Hubo una sana competencia entre IRHO/CIRAD y el equipo de Malasia liderado por el Oil Palm Genetics Laboratory (Laboratorio Genético de Palma de Aceite) (Dr. Hardon, Dr. Corley) respecto de la ciencia de la selección para la palma de aceite. Programas de mejoramiento como la MPOB, IRHO/CIRAD, ASD Costa Rica, Indonesia, Ecuador y Colombia efectuaron colectas de germoplasma de palma africana y palma americana. Dichas colectas serán un recurso importante tanto para la selección de nuevas variedades como para la investigación genómica.

El programa de cultivo de tejidos en palma de aceite inició a comienzos de la década de los años ochenta. La producción comercial en Malasia es en la actualidad de aproximadamente 7 millones de ramets anuales. Sin embargo, las anormalidades en las inflorescencias representaron un cierto nivel de riesgo en la plantación sembrada con clones. El MPOB y los miembros de la industria han hecho grandes inversiones para descubrir los marcadores de ADN que puedan emplearse para identificar y descartar en el vivero, las plántulas anormales antes de ser sembradas en el campo.

Existe una aplicación potencial de la técnica de cultivo de tejidos para multiplicar las palmas parentales (las cuales han estado sometidas a pruebas de progenie) para que produzcan semillas semiclónicas y biclónicas. La selección para la resistencia a enfermedades ha tenido un progreso notable en África para el *Fusarium* por parte de IRHO/CIRAD y Unilever, y para la Pudrición del cogollo por parte de Colombia, Ecuador y ASD Costa Rica. Con el descubrimiento de genes *virescens* a nivel molecular y después de la publicación de la secuencia del genoma de la palma de aceite, el mejoramiento asistido por marcadores (Markers Assisted Breeding, MAS) y una mayor integración entre las técnicas de selección convencionales y moleculares. Anticipamos que en los siguientes 50 años la tecnología de haploides, la conversión de palma de aceite de C3 a C4, la transformación de la palma de aceite, la edición de genes, el desarrollo de material de cultivo con plantas enanas y materiales más eficientes en el uso de recursos tendrán un impacto sobre la industria de la palma de aceite.

Abstract

The development of oil palm breeding from 1965 to 2015 is covered in this paper. Discovery of the inheritance of shell by Beirnaert in Congo in 1941 and the subsequent cultivation of DXP as the major planting material have provided the impetus for the development of oil palm industry throughout the world. There is a capacity to produce nearly 400 m DXP seeds in Indonesia, Malaysia, Papua New Guinea, ASD Costa Rica, Thailand, Colombia and Benin. In early stages, there was significant exchange of breeding material between countries. The AVROS derived from the Djongo palm in Congo, the Yangambi (Congo), Calabar (Nigeria), Ekona (Cameroon), La Mé (Ivory Coast), URT (Guthrie), SP540 (Indonesia) are the major *pisíferas* involved in the seed production. On the female side, the Deli duras derived from the 4 Bogor palms played the major role. There was a healthy competition between IRHO/CIRAD and the Malaysian team spear-headed by Oil Palm Genetics Laboratory (Dr Hardon, Dr Corley) on the science of oil palm breeding. Breeding methods such a germplasm collections of both *Elaeis* germoplasm and *oleíferas* were carried out by MPOB, IRHO/CIRAD, ASD Costa Rica, Indonesia, Ecuador and Colombia. These collections will be an important resource for both breeding new varieties and genomic research.

Oil palm tissue culture programme was started in early eighties. Current commercial production is about 7 m ramets per year in Malaysia. Meanwhile, tissue culture floral abnormalities had cast a certain level of risk in planting oil palm clones. MPOB and members of the industry have invested heavily to discover the DNA markers which can be used to identify and discard abnormal plantlets in the nursery and before field planting.

There is a potential application of tissue culture technique to multiply parental palms (which have been progeny-tested) to produce semi- and bi-clonal seeds. Companies such as AAR, United Plantations and FELDA Agricultural Services have been marketing semi-clonal seeds at a premium price. Breeding for disease resistance has made notable progress in Africa for Fusarium by IRHO/CIRAD and Unilever, bud-rot in by Colombia, Ecuador and ASD Costa Rica. With the discovery of shell virescens genes at the molecular level and following publishing the oil palm genome sequence data, we expect markers assisted breeding (MAS) and further integration of conventional and molecular breeding techniques. We speculate in the next 50 years, the haploid technology, conversion of oil palm from C3 to C4, oil palm transformation, gene editing, development of dwarf and resource efficient planting material will make impact on the oil palm industry.

□

Introducción

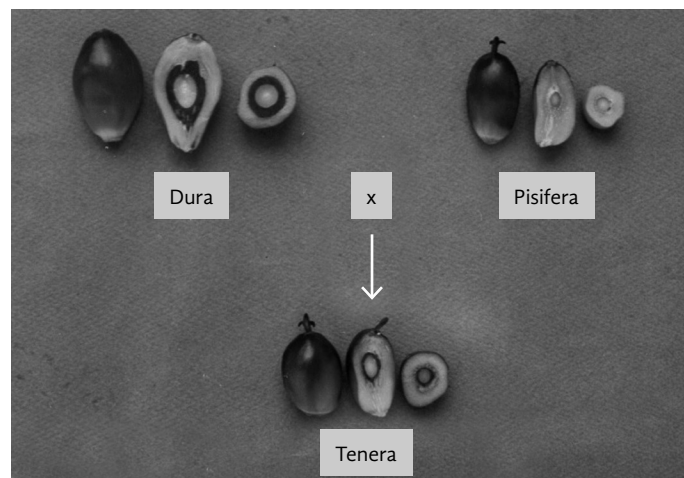
Este artículo trata principalmente del desarrollo de las tecnologías de mejoramiento de la palma de aceite en el período comprendido entre 1965 y 2015. También se menciona descubrimientos fundamentales como la herencia del cuesco, la siembra de semillas DXP en la década de 1960, el intercambio de materiales de siembra, la ciencia del mejoramiento de la palma de aceite, el cultivo de tejidos, la aplicación de tecnologías moleculares en el mejoramiento de la palma de aceite, el mejoramiento asistido por marcadores, la selección genómica, la secuencia del genoma de la palma de aceite, el descubrimiento de los genes del espesor del cuesco y *virescens*, y la anomalía en el cultivo de tejidos que genera los genes «Karma», y su futuro desarrollo.

El descubrimiento del gen del espesor del cuesco (*dura*, *tenera*, *pisifera*) en la palma de aceite, por par-

te de Beirnaert y Vanderweyen (1941) en el Congo, constituye la base para la producción del material de siembra *dura x pisifera* (DXP) (Figura 1). Se ha utilizado plenamente el conocimiento de la herencia de un solo gen, y ello ha generado un enorme crecimiento de la producción de aceite.

Las primeras investigaciones de Yangambi en el Congo, IRHO en África, NIFOR en Nigeria, AVROS (RISPA) en Indonesia, el Departamento de Agricultura de Malasia, Guthrie en Malasia, ICA en Colombia e INIAP en Ecuador, significaron un aporte importante al mejoramiento de la palma de aceite. Los trabajos combinados de belgas, franceses, ingleses, holandeses, malayos, indonesios, colombianos, ecuatorianos y tailandeses, han sido el origen del desarrollo actual del mejoramiento en la palma de aceite.

Figura 1. Descubrimiento del gen del espesor del cuesco por Beirnaert, 1941.



Intercambio de materiales mejorados

Al comienzo hubo un considerable intercambio de materiales mejorados entre países. Los materiales AVROS, provenientes de la palma Djongo en el Congo, Yangambi (Congo), Calabar (Nigeria), Ekona (Camerún), La Mé (Costa de Marfil), URT (Guthrie Malasia) y SP540 (Indonesia), son las principales palmas *pisíferas* implicadas en la producción de semillas. Por el lado de los parentales femeninos, la Deli *dura*, derivada de las 4 palmas de Bogor, cumple una función importante como progenitor femenino en los programas de mejoramiento de la palma de aceite.

Además de los programas de mejoramiento, el intercambio de materiales de siembra entre instituciones ha representado un beneficio para la industria. Un ejemplo fue Socfin de Malasia, que participó en la “Experience Internationale”, contienen institutos del África occidental, en particular el IRHO. Algunos

programas de colaboración destacados fueron el Esquema de Mejoramiento Cooperativo (CBS), el Laboratorio de Genética de la Palma de Aceite (OPGL), el Programa de Mejoramiento Sabah (SBP) y el Programa de Mejoramiento Combinado (CPB) iniciado por Unilever.

El OPGL se fundó en 1963 como un consorcio de cuatro empresas de cultivo: Kumpulan Guthrie Sdn. Bhd. (KGSB), Harrisons Malaysian Plantations Sdn. Bhd. (HMPB), Dunlop Estates Bhd. y Pamol Plantations Sdn. Bhd. (PAMOL). Este consorcio tuvo a cargo la primera adquisición, evaluación, utilización y enriquecimiento, a gran escala, de germoplasma de la palma de aceite, con material genético diverso de *E. guineensis* y *E. oleifera*, para utilizarlo en las siembras de sus plantaciones (Tabla 1).

El SBP fue una iniciativa que el gobierno estatal emprendió en la década de 1960 para producir semillas probadas en el país, y contribuir al desarrollo

Tabla 1. Introducción de material genético del OPGL.

	Año del cultivo	N.º de experimento	
		HMPB	Guthrie
<i>E. guineensis</i>			
Programa <i>dura</i>			
Recolección histórica de material antiguo de <i>dura</i> en Bogor, Sumatra y Malasia	1970	PT49	
Programa <i>tenera</i> y <i>pisífera</i>			
DxP comercial élite de NIFOR	1967	PT29	GB31
Introducción de TxT de NIFOR	1967	PT30	
Cruzamientos obtenidos de NIFOR, Camerún e IRHO	1968	PT33	
<i>Teneras</i> de polinización abierta de Bamenda (Camerún)	1969	PT40	GB57
Cruzamientos del material exYangambi con BM119 y <i>teneras</i> de Socfin	1969	PT42	
Material ExNIFOR de Ghana para DxT	1972	PT53	
TxT de Binga (Zaire)	1973	PT54	GB67
Resistencia a las enfermedades			
Material de Camerún resistente al marchitamiento	1968		GB46
<i>E. oleifera</i>			
Colección de Panamá, Costa Rica y Colombia			
<i>E. oleifera</i> , F1 (GxO), F2 (GxO) y retrocruzamiento (GxF1)	1969	PT50	GB62
<i>E. oleifera</i> (polinización abierta)	1971		GB64a GB64b

de la industria en Sabah. La estación de investigación Ulu Dusun en Sandakan se creó en 1962 con este fin. Los materiales mejorados se obtuvieron mediante un esquema de intercambio organizado por c.w.s. Hartley, quien sostenía relaciones con el gobierno estatal. En el esquema participaron cuatro instituciones malasias y tres africanas. El programa contenía selecciones de *tenera* africana, dado que los progenitores masculinos se cruzaron con materiales *Deli dura* de Malasia. Los participantes malasios fueron Chemara (Guthrie), HMPB (Golden Hope), Socfin y DOA. Las tres empresas africanas que participaron en este proyecto fueron el Instituto Nigeriano para la Investigación de la Palma de Aceite (NIFOR), Unilever Nigeria y Unilever Camerún (Rajanaidu *et al.*, 1986).

El programa de mejoramiento combinado (CBP), iniciado por Unilever, realizó el intercambio de materiales mejorados entre el Congo, Camerún, Londres, Sumatra-Indonesia, Univanich-Tailandia, Dami-Papúa Nueva Guinea, y Unilever-Colombia. Por esta razón los materiales de mejoramiento relacionados

con Ekona, Djongo, Mongana y Yangambi están relacionados con el CBP.

Las colecciones genéticas recientes

El programa actual de mejoramiento de la palma de aceite se fundamenta en una base genética reducida. Para ampliar la base genética, el MPOB recolectó germoplasma de *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera* en los centros de origen de palma de aceite africana y sudamericana (Rajanaidu, 1994, Kushairi *et al.*, 2011).

El MPOB ha reunido la colección más grande de germoplasma de *E. guineensis* en el mundo. La primera fue en 1973, con la colaboración de MARDI y NIFOR. Las últimas colecciones se hicieron en Nigeria, Camerún, Zaire, Tanzania, Madagascar, Senegal, Gambia, Sierra Leona, Guinea, Ghana y Angola.

Desde 1982 el MPOB ha colectado varias poblaciones de *E. oleifera* en Colombia, Panamá, Costa Rica, Honduras, Nicaragua, Surinam, Perú y Ecuador, como se muestra en la Tabla 2 (Rajanaidu y Ainul,

Tabla 2. Colecciones de germoplasma de *E. guineensis* y *Elaeis oleifera* disponibles en el MPOB.

Especies	País de origen	Años de recolección
<i>Elaeis guineensis</i>	Nigeria	1973
	Camerún	1984
	Zaire	1984
	Tanzania	1986
	Madagascar	1986
	Senegal	1993
	Gambia	1993
	Sierra Leona	1994
	Guinea	1994
	Ghana	1996
	Angola	1991, 2010
<i>Elaeis oleifera</i>	Nicaragua	1982
	Honduras	1982
	Costa Rica	1982
	Colombia	1982, 2004
	Surinam	1982
	Brasil	1982, 2004
	Panamá	1982
	Perú	2004
Ecuador	2004	

2013). En 1967 United Brands Company inició un programa en Centroamérica para recolectar *E. oleifera*, con el fin de evaluarla y utilizarla en bosques naturales de Costa Rica, Panamá y Colombia. Los mejoradores de Socfin, OPGL y United Plantations realizaron colecciones en Colombia, Panamá y Costa Rica y, posteriormente, las introdujeron en Malasia en 1967, 1969 y 1980, respectivamente. La baja producción de *E. oleifera* es un gran obstáculo para la utilización de la especie como material de siembra comercial.

En Alvarado *et al.* (2010) se resumen las colecciones de ASD. ASD ha sembrado las siguientes *E. guineensis* en Coto, Costa Rica (Tabla 3).

Rey *et al.* (2004) enumeraron las exploraciones de *E. oleifera* en el área amazónica y de *E. guineensis* en Angola. *E. oleifera* está compuesta por 137 accesiones, obtenidas de 13 poblaciones y 92 familias.

El material silvestre de *Elaeis guineensis* se colectó en Angola en Caixito, Sumbe, Benguela, Cabinda y Uige. Se tomaron muestras de 44 accesiones en total (38 dura y 6 tenera).

En Camerún, Arias (2001) relacionó los detalles de la colecta de *E. guineensis*. Cenipalma prospectó y recolectó 74 accesiones de seis regiones geográficas de Camerún.

Barba (2015) ha listado las colectas de *E. oleifera* en Palmar del Río (PDR), Ecuador. PDR tiene 76 accesiones de *E. oleifera* en Pastaza (Taisha), Morona, Neavo Rocafuerte, Colombia (Cereté) y Brasil (Coari).

Se han publicado varios artículos sobre la caracterización molecular y morfoagronómica de la palma

de aceite en Angola y Camerún (Arias *et al.*, 2012), Barcelos *et al.* (2002) sobre la diversidad genética en poblaciones de *E. guineensis* y *E. oleifera*, y la relación entre ellas. Se destacaron las poblaciones de oleifera de Brasil, Centroamérica, Guyana Francesa y Surinam, Perú y Brasil, y separaron claramente las de *E. guineensis* en otro grupo.

El rendimiento de los híbridos interespecíficos

El descubrimiento de los híbridos (*Elaeis guineensis* x *Elaeis oleifera*) resistentes al amarillamiento letal en Colombia condujo al establecimiento de la primera plantación comercial (Turner, 1981). También se encontró que el híbrido OxG era tolerante a la enfermedad de la Pudrición del cogollo en Latinoamérica, y al marchitamiento vascular en África (Amblard *et al.*, 1999). Así mismo, se ha considerado una fuente prometedora de una nueva variación genética de la palma de aceite (Meunier y Hardon, 1976). No obstante, los híbridos interespecíficos de *E. oleifera* tienen una baja producción de aceite, en comparación con los materiales comerciales de DxP.

MPOB, UP y FELDA efectuaron amplias investigaciones sobre los híbridos interespecíficos. UP ha cultivado casi 500 hectáreas para producir aceite de híbridos con fines comerciales. En el caso de *E. oleifera*, las progenies introgresadas del grupo Panamá x Colombia tienen el mayor rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF), con 139,98 kg/palma/año, debido principalmente a la gran cantidad de racimos (NR) de

Tabla 3. Germoplasma de *E. oleifera* sembrado en Coto, Costa Rica (1970-2004).

Origen	Número de accesiones
Honduras	43
Nicaragua	43
Costa Rica	107
Panamá	88
Colombia	41
Surinam	13
Brasil	31
Ecuador	4

12,67 Racimos/palma/año, y peso medio de racimo (PMR) de 10,23 kg/palma/año. El grupo Panamá x Colombia también mostró el mejor peso medio del fruto (PMF), y la mejor relación aceite en mesocarpio seco (AC/MS), frutos a racimo (F/R) y aceite a racimo (AC/R) (Noh *et al.*, 2012).

La baja producción de aceite de *E. oleifera* y su híbrido interespecífico, en comparación con el material de siembra comercial DxP, ha mejorado mediante retrocruzamientos. Los de primera generación (BC 1) se crearon con híbridos interespecíficos (OxP), como progenitor femenino y *E. guineensis* var. *pisifera*, como progenitor masculino. Sin embargo, los retrocruzamientos no tuvieron un efecto significativo en el peso promedio de racimo. MPOB, UP y FELDA tienen un programa de retrocruzamiento activo. En la MPOB, la proge que tuvo el mejor rendimiento de RFF en el programa de retrocruzamiento fue la PK1298, con 94 kg/palma/año, y un AC/R fue de 16,27 % (Noh *et al.*, 2012).

Los híbridos interespecíficos (*E. oleifera* x *E. guineensis*) se siembran, en gran medida, en América del Sur. Según informes recientes, Coari x La Mé, Coari x Pobe y Taisha x Avros son más tolerantes a la Pudrición del cogollo (Navia *et al.*, 2014, Amblard, 2010, Barba, 2015).

Cultivo de tejidos

En Malasia, la producción actual de ramets ha ascendido a cinco millones, pero los 11 laboratorios del país todavía tienen dificultades para llegar al objetivo de 40 millones de plántulas en 2017 (Kushairi *et al.*, 2011). El tiempo total de crecimiento que necesita una plántula de un cultivo de tejidos desde el explante

hasta la etapa de previvero es de 2 a 3 años. Además, el proceso de cultivo de tejidos ha sufrido una gran pérdida debido a la baja tasa de conversión de explantes a callos (19 % aproximadamente), y de callos a la etapa embrioide (4 % aproximadamente) (Corley y Tinker, 2003).

Para aprovechar exitosamente la técnica de propagación clonal de cultivo de tejidos y las subsecuentes iniciativas ampliadas en esta área se requiere resolver o superar varios problemas cruciales. Estos problemas incluyen la variación somaclonal, la eficiencia de la clonación, la eficiencia de selección de ortets y la reclonación y el sistema de cultivos de suspensión (Soh *et al.*, 2010).

Recientemente Meilina *et al.* (2015) identificaron el marcador molecular “Karma” para descartar las plántulas de un cultivo de tejidos que son susceptibles a sufrir anomalías. Este avance puede incentivar el cultivo de clones de palma de aceite.

La técnica del cultivo de tejidos tiene un excelente potencial para multiplicar los progenitores *dura* y *pisifera*, con el fin de producir semillas semiclonaes y biclonaes (Figura 2).

La ciencia del mejoramiento de la palma de aceite

Métodos de mejoramiento

Los principales programas de mejoramiento de la palma de aceite han adoptado el método de selección recurrente modificada, o el de selección recurrente recíproca. El primero se emplea principalmente en

Tabla 4. Severidad acumulada según tipo de cruzamiento.

Cruzamiento	% final de severidad acumulada
Coari x La Mé	52,2
Coari x Pobe	44,0
Patuca (E.g.)	98,0
Pepilla (E.g.)	96,0

Fuente: Navia, *et al.* (2014).

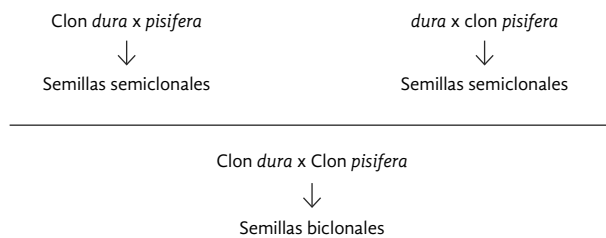


Figura 2. Semillas clonales.

los programas del Lejano Oriente, mientras que el segundo es adoptado en países del África occidental e Indonesia, asesorados por CIRAD (Soh *et al.*, 2010).

• La selección recurrente modificada (SRM)

La gran mayoría de los mejoradores de Malasia utilizan la SRM debido a que las *pisiferas* individuales se cruzan con varias *Deli duras* (Figura 3). Con el diseño del mejoramiento NC 1 (North Caroline), se puede calcular la aptitud combinatoria, específica y general, de las *pisiferas*. Al observar el rendimiento promedio de una *pisifera* con varias *Deli dura* se puede determinar la aptitud combinatoria general (ACG). Si la media es alta, la ACG de la *pisifera* se considera buena y viceversa. Sin embargo, en la aptitud combinatoria específica (ACE) solo ciertos cruzamientos tienen un alto rendimiento. Después de registrar el rendimiento durante al menos cuatro años, se seleccionan las palmas para la producción de semillas (Rajanaidu *et al.*, 2000).

• La selección recurrente recíproca (SRR)

A diferencia de la SRM, en la SRR los cruzamientos de prueba de parentales y las palmas autofecundadas de los parentales se siembran en campo al mismo tiempo. En un período hasta de 12 años es posible producir una cantidad limitada de semillas DxP de buena calidad. El Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo Belge (INEAC) desarrolló en Yangambi el primer programa de mejoramiento que abordó la SRR (Corley y Tinker, 2003). Al comparar SRR con SRM, la primera toma más tiempo porque implica dos etapas (Figura 4). El primer paso consiste en evaluar las *Deli duras* y *pisiferas* progenitoras, a manera de cruzamientos TxT o TxP. Después se debe probar la progenie de *Deli duras* con las *pisiferas* élite. Es posible producir una gran cantidad de semillas DxP, pero esto tardaría unos 20 años. Además, la SRR requiere una gran zona de experimentación para probar las progenies de los cruzamientos DxT y las palmas autofecundadas (Rajanaidu *et al.*, 2000).

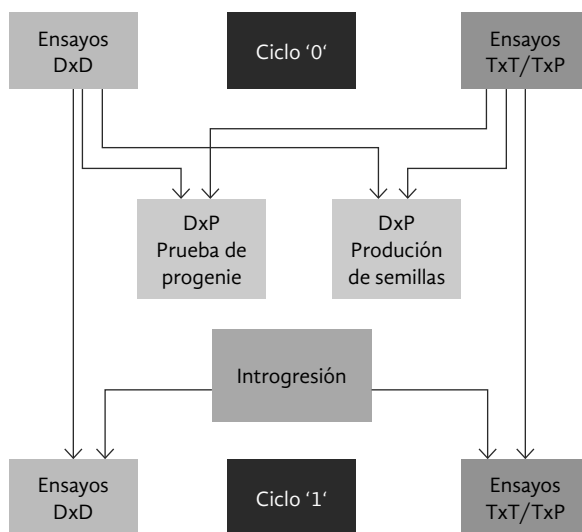
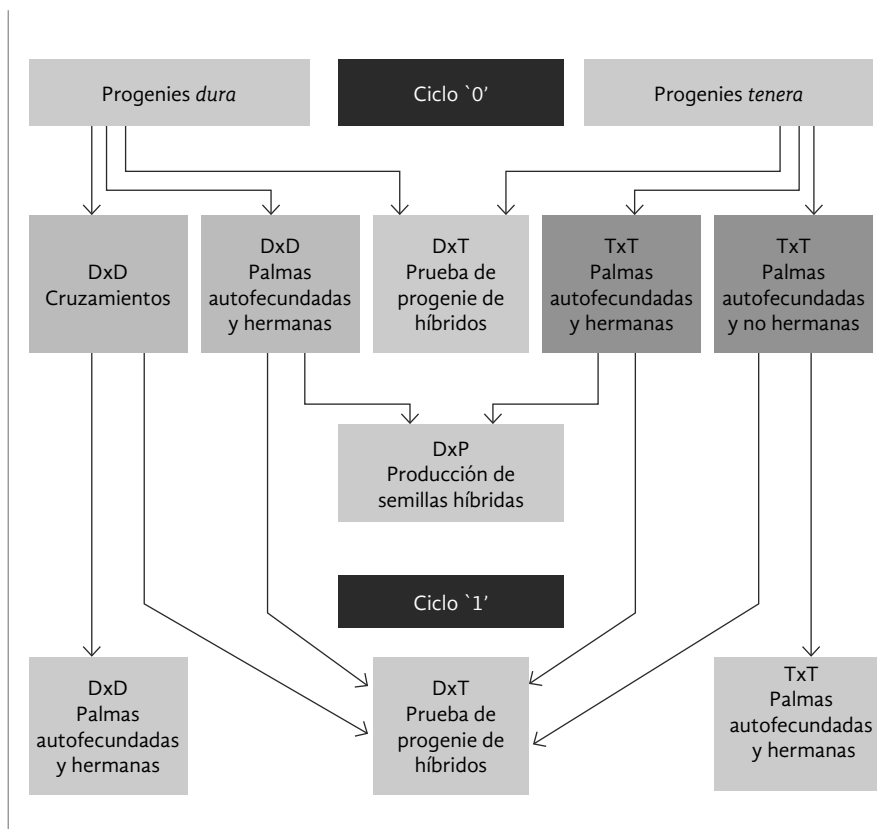


Figura 3. Método de mejoramiento de SRM.

Figura 4. Esquema de selección recurrente recíproca en la palma de aceite.



• La mejor predicción lineal no sesgada (BLUP)

Los métodos comunes de SRM o SRR son difíciles de aplicar con éxito sobre los híbridos. Los mejoradores que quieren seleccionar clones o progenitores de semillas de poblaciones híbridas deben poder predecir el rendimiento de la progenie o de los clones. La confiabilidad de la identificación de genotipos superiores es importante para el éxito de la selección y, por tanto, las ganancias genéticas se puedan lograr a través del mejoramiento. Sin embargo, en los híbridos hay muchos factores que pueden afectar negativamente la capacidad de predecir el rendimiento. La correlación suficientemente alta entre el rendimiento previsto y el observado de los híbridos, en cuanto a la mayoría de caracteres importantes, se obtuvo mediante conjuntos de datos altamente asimétricos. El coeficiente BLUP debería ser suficiente para realizar la selección, con base en el carácter de la producción de aceite, que es el principal objetivo de los programas de mejoramiento de la palma de aceite (Purba *et al.*, 2001).

La técnica de BLUP incluye los mejores cálculos lineales no sesgados de los efectos fijos, a través de

cuadrados mínimos, generalizados con la mejor predicción lineal no sesgada de los efectos genéticos aleatorios (valor de mejoramiento). El procedimiento BLUP también tiene la ventaja de poder incluir información de los parientes para mejorar la predicción de las tendencias genéticas, tales como los grupos genéticos diferentes y el sesgo de la selección, y tratarlas como efectos fijos. En efecto, con el procedimiento BLUP los efectos de interés secundario se tratan como efectos “problemáticos” que deben eliminarse a manera de efectos fijos y, en consecuencia, se obtiene una predicción genética no sesgada o valor de mejoramiento de los progenitores (Soh, 1994).

Los diseños experimentales

A fin de seleccionar las palmas individuales para el mejoramiento, es necesario medir la producción de los racimos y, para analizar el contenido de aceite y palmiste, en ocasiones también se utilizan medidas vegetativas. Para realizar el mejoramiento a partir de las palmas seleccionadas se debe hacer una poli-

nización controlada, y las progenies generadas deben sembrarse en diseños experimentales con validez estadística (Corley y Tinker, 2003).

- El diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA)

El germoplasma y los materiales de mejoramiento recolectados en África y Sudamérica se sembraron en la Estación de Investigación de MPOB en Kluang, Johor. Se utilizó un diseño experimental de DBCA para estudiar el rendimiento de los materiales. Las diversas etapas y el tiempo para la recolección, establecimiento, evaluación y liberación de los materiales de siembra élite tardan aproximadamente veinte años.

- El diseño completamente aleatorizado (DCA)

El DCA es un diseño flexible que puede incorporar progenies de tamaño diferente. En particular, es útil para probar en campo las progenies resistentes a las enfermedades. En el MPOB se probaron las progenies DxP utilizando tanto el diseño DBCA como el DCA.

- La interacción del genotipo x el ambiente (GxA)

Los estudios demuestran que los genotipos tienen una respuesta diferente a los cambios ambientales, como las precipitaciones, el suelo y las prácticas agronómicas. El nivel de interacción GxE en los materiales de siembra DxP, es más bien limitado. Sin embargo, los clones de palma de aceite muestran un nivel importante de GxE. La interacción GxE es relevante para el mejoramiento de la resistencia a las enfermedades en diversas localidades. Por ejemplo, las pruebas con *Ganoderma* en el Sudeste Asiático, *Fusarium* en África, y la Pudrición del cogollo y de flecha en Sudamérica.

Selecciones genómicas

Del mejoramiento de fenotipo a genotipo se ha pasado al de genotipo a fenotipo. Esto se conoce como selección genómica. Wong y Bernardo (2008), David Cros *et al.* (2014) han aplicado el método de selección genómica al mejoramiento de la palma de aceite. Se prevé que en los cultivos perennes se reduce el tiempo del ciclo de mejoramiento y aumenta la intensidad de la selección, utilizando pequeñas poblaciones de entrenamiento.

- Mejoramiento en cuanto a resistencia a las enfermedades

En Malasia, la palma de aceite afronta brotes crónicos de Pudrición basal del estípite (PBE) por el hongo *Ganoderma*, lo cual puede ocasionar grandes pérdidas económicas. La resistencia de la planta es la forma de control menos costosa. Cuatro especies de *Ganoderma* se han asociado a la palma de aceite. Según los reportes, tres de estas especies son patógenas para la palma de aceite y *Ganoderma boninense* es la más destructiva (Idris *et al.*, 2000, Nurniwalis, 2009). Con base en el estudio del MPOB (Norziha *et al.*, 2012), las progenies entrecruzadas de origen Elmina fueron más resistentes a *Ganoderma* en comparación con las progenies autofecundadas. Entre las progenies de origen Elmina, la MS3358 tuvo la mayor resistencia a la enfermedad de PBE, y es una progenie que tiene potencial para desarrollarse como material tolerante a *Ganoderma*.

Recientemente SOCFINDO lanzó al mercado un material de siembra resistente a *Ganoderma*. Varias organizaciones de Malasia e Indonesia han mejorado el tamizaje de las progenies con diferentes cepas de *Ganoderma*.

Las tecnologías moleculares

En las investigaciones de la palma de aceite se han utilizado métodos moleculares en la evaluación y mejoramiento del germoplasma. Primero se usaron isoenzimas para estudiar la diversidad genética en *Elaeis* spp. (Ghesquiere, 1985, Moretzohn, 1995). También se ha estudiado el polimorfismo en la longitud de los fragmentos de restricción (RFLP, por sus siglas en inglés) en la palma de aceite (Mayes *et al.*, 1997, Maizura *et al.*, 2006). Barcelos *et al.* utilizaron los marcadores de polimorfismo de longitud en los fragmentos amplificados (AFLP, por sus siglas en inglés) y de RFLP para evaluar la relación genética entre las diferentes accesiones de la palma de aceite americana. Los marcadores microsatélite (*simple sequence repeats*, SSR) son ahora una opción popular para estudiar la diversidad genética de la palma de aceite (Billotte *et al.*, 2001; Zulkifli *et al.*, 2009; Ngoot Chin *et al.*, 2010; Seng *et al.*, 2011; Noorhariza *et al.*, 2012).

Singh *et al.*, (2013) y Singh *et al.*, (2014) han publicado en la revista *Nature* los resultados de sus

investigaciones sobre la secuencia del genoma de la palma de aceite, los genes del cuesco y el color del fruto (*virescens*). Ahora es posible determinar el tipo y el color de los frutos a nivel de plántula.

Varios grupos han identificado los genes marcadores relacionados con la altura de la palma, el contenido de ácidos grasos y lipasa (Cadena *et al.*, 2012, Montoya *et al.*, 2014, Pootakham *et al.*, 2015).

Conclusiones

En el período comprendido entre 1965 y 2015 se presentó una gran transformación y desarrollo de la industria de la palma de aceite con la siembra de materiales de alto rendimiento. Se reunió gran cantidad de germoplasma de las especies *guineensis* y *oleifera*. Se identificaron los genes de diversos caracteres agro-

nómicos, como el cuesco, el color del fruto, el mantle en cultivo de tejidos, los ácidos grasos, la altura de la palma, etc., a nivel de genes y marcadores. En los próximos 50 años la tecnología molecular se integrará en forma estrecha con el mejoramiento convencional de la palma de aceite. En el futuro la tecnología de haploides tendrá un gran impacto, la palma de aceite C4, el bajo contenido de lipasa, la transformación, la edición de los genes, palmas enanas y materiales de siembra para que se utilicen eficazmente los recursos.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud al Director General del MPOB por su permiso para presentar este artículo. También valoran sobremanera la ayuda de Azleha D., del grupo de mejoramiento.

Referencias bibliográficas

- Amblard, P., Noiret, J.M., Potier, F., Kauame, B., y Adon, B. (1999). Comparative performance of interspecific hybrids and commercial *E. guineensis* material. En: Rajanaidu, N., y Jalani, B.S. (eds.) Actas de Seminar on Worldwide Performance of DxP Oil Palm Planting Materials, Clones and Interspecific Hybrids. MPOB, Bangi, pp. 128-143.
- Alvarado, A., Ricardo Escobar y Francisco Peralta (2010). ASD's oil palm breeding program and its contributions to the oil palm industry. *ASD Oil Palm Papers* (Costa Rica), N.º 34: 1-16.
- Arias, D., Carmenza Montoya y Hernán Romero (2012). Molecular characterization of oil palm *Elaeis guineensis* Jacq of oil palm from Cameroon. *Plant Genetic Resource: Characterization and Utilization*; 1-9.
- Barcelos, E., Amblard, P., Berthaud, J., and Seguin, M. (2002). Genetic diversity and relationship in American and African oil palm as revealed by RFLP and AFLP molecular markers. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 37(8): 1105-1114.
- Beirnaert, A., et Vanderweyen, R. (1941). Contribution à l'étude génétique et biométrique des variétés d'*Elaeis guineensis* Jacq. Publications de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo Belge. Série scientifique N.º 27.
- Billotte, N., Risterucci, A.M., Barcelos, E., Noyer, J.L., Amblard, P., Baurens, F.C. (2001). Development, characterisation and across-taxa utility of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) microsattelite markers. *Genome*, 44(3): 413-435.
- Cadena, T., Faust Pada, Aide Perea y Hernán Mauricio Romero (2012). Lipase activity, mesocarp oil content, and iodine value in oil palm fruits of *Elaeis guineensis*, *Elaeis oleifera*, and the interspecific hybrid OxG (*Elaeis guineensis* x *Elaeis oleifera*). *J Sc Food Gric*. www.soci.org

- Corley, R.H.V., & Tinker, P.B. (2003). *The oil palm*. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing.
- David, Cros, Marie Denis, Leopoldo Sánchez, Benoit Cochard, Albert Flori, Tristan Durand-Gaselin, Bruno Nuay, Alphonse Omere, Virginia Pomies, Virginie Riou, Edyana Suryana & Jean-Marc Bouvet (2014). Genomic selection prediction accuracy in a perennial crop: case study of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) *Theor Appl Genet* (2015). 128: 397-410. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Navia, Edwin A., Rodrigo A. Ávila, Edison E. Daza, Edwin F. Restrepo y Hernán Mauricio Romero (2014). Assessment of tolerance to bud rot in oil palm under field conditions. *Eur J plant Pathol* (2014), 140:711-720.
- Navia, Edwin A. R., Edwin F. Restrepo & Hernán Mauricio Romero (2014). Response of six sources of oil palm planting materials from Malaysia planted in the eastern plains of Colombia to bud rot. *Journal of Oil Palm Research*, Vol. 26(1), marzo: 73-83.
- Engelmann, F. (1991). Current development of cryopreservation for oil palm somatic embryos. En: Vol. IV, Actas del XVIIIth International Refrigeration Congress. Montreal (Canadá), 10-17 agosto, 1991: 1676-1680.
- Ghesquiere, A. (1985). Evolution of *Oryza longistaminata*. En: *Rice genetics*. International Rice Research Institute, Manila, pp. 15-27.
- Hartley, C.W.S. (1988). *The oil palm*. 3rd. ed. London: Longman, p. 761.
- Idris, A.S., Ariffin, D., Swinburne, T.R., & Watt, T.A. (2000). The identity of *Ganoderma* species responsible for Basal Stem Rot Disease of oil palm in Malaysia – Pathogenity Test. *MPOB TT*, N.º 77B, p. 44.
- Kushairi, A., Mohd Din, A., Rajanaidu, N. (2011). Oil palm breeding and seed production. En: Mohd Basri W, Choo YM, Chan KW (eds.) *Further advances in oil palm research (2000–2010)*. MPOB, Bangi, pp. 47-101.
- Maizura, I., Rajanaidu, N., Zakri, A.H., Cheah, S.C. (2006). Assessment of genetic diversity in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq). Using Restriction Fragment Length Polymorphism (RLFP). *Genetic Research of Crop Evolution*, 53: 187-195.
- Mayes, S., Jack, P.L., Marshall, D.F., Corley, R.H.V. (1997). Construction of a RFLP genetic linkage map for oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq). *Genome*, 40(1): 116-122.
- Meilina Ong Abdullah, Jared M. Ordway, Nan Jiang, Siew-Eng Ooi, Sau-Yee Kok, Norashikin Sarpan, Nuazlyan Azimi, Ahmad Tarmizi Hashim, Zamzuri Ishak, Samsul Kamal Rosli, Fadila Ahmad Malike, Nor Azwani Abu Bakar, Marhalil Marjuni, Norziha Abdullah, Zulkifli Yaakub, Mohd. Din Amiruddin, Rajanaidu, Nookiah, Rajinder Singh, Eng-Ti Leslie Low, Kuang-Lim Chan, Norazah Azizi, Steven W. Smith, Blaire Bacher, Muhammad A. Budiman, Andrew Van Brunt, Corey Wischmeyer, Melissa Bell, Michael Hogan, Nathan Lakey, Chin-Ching Lim, Xaviar Arulandoo, Choo-Kien Wong, Chin-Nee Choo, Wei-Chee Wong, Yen-Yen Kwan, Sharifah Shahrul Syed Alwee, Ravigadevi Sambanthamurthi & Robert A. Martienssen (2015). Loss of *Karma* transposon methylation underlies the mantled somaclonal variant of oil palm. *Nature* 2015. .
- Montoya, C., Benoit Cochard, Albert Flori, David Cros, Ricardo Lopes, Teresa Cuellar, Sandra Espeout, Indra Syaputra, Pierre Villeneuve, Michel Pina, Enrique Ritter, Thierry Leroy & Norbert Billotte (2014). Genetic architecture of palm oil fatty acid composition in cultivated oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) compared to its wild relative *E. oleifera* (H.B.K) Cortes. *PLOS ONE*, May 2014, Vol. 9, No. 5, e95412. www.plosone.org.
- Moretzsohn, M.C. (1995). Estudo de padrões electroforéticos e análise da variabilidade genética de dendê (*Elaeis guineensis*), caiaué (*Elaeis oleifera*) e gerações F1 e RC1. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidade de São Paulo, Riberão Preto. San Pablo, Brasil.

- Munier, J. & Hardon, J.J. (1976). Interspecific hybrids between *Elaeis guineensis* and *Elaeis oleifera*. In: Corley, R.H.V., Hardon, J.J. & Woods, B.J. (eds.) *Developments in Crop Science I. Oil palm reaserch*. Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 127-144.
- Ngoot-Chin, T., Noorhariza, M.Z., Rosli, R., Eng-Ti, L.L., Ithnin, M., Cheah, S.-C., Tan, S.G. & Singh, R. (2010). SSR mining in oil palm EST database: application in oil palm germplasm diversity studies. *Journal of Genetics* 89(2): 135-145.
- Noh, A., Mohd Din A., Rajanaidu, N. & Kushairi, A. (2012). Performance of some *Elaeis oleifera*, interspecific hybrids and backcrosses. En: *Actas de la International Society of Oil Palm Breeders (ISOPB)*. Hotel AR Salitre, Bogotá, 21-24 de septiembre, 2012.
- Noorhariza, M.Z., Rajinder, S., Rozana, R., Ismanizan, I. (2012). *Elaies oleifera* genomic-SSR markers: exploitation in oil palm germplasm diversity and cross-amplification in Arecaceae. *International Journal of Molecular Science*. 13: 4069-4088.
- Norziha, A., Noh, A., Fadila, A.M., Zulkifli, Y. & Mohd Din A. (2012). *Ganoderma* infection studies in selfed and inter-crossed Deli *Dura* progenies. En: *Actas de la International Society of Oil Palm Breeders (ISOPB)*. Hotel AR Salitre, Bogotá, 21- 24 septiembre, 2012.
- Nurniwalis, A.W., Arif, M.A. & Idris, A.S. (2009). An amplified internal transcribes spacer region – a potential marker to distinguish *Ganoderma* and oil palm DNA preparations. En: *Actas del MPOB International Palm Oil Congress (PIPOC) 2009*, pp. 1192-1204.
- Purba, A.R., Flori, A., Baudouin, L. & Harnon, S. (2001). Prediction of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) agronomic performances using the best linear unbiased predictor (BLUP). *Theory of Applied Genetics*. 102: 787-792.
- Pootakham, W., Nukoon, Jomchai, Panthia Ruang-areerate, Jeremy R. Sherman, Chutima Sonthirod, Duangjai Sangsrakru, Somvong Tragoonrung y Sithichoke Tangphatsornruang (2015). Genome-wide SNP discovery and identification of QTL associated with agronomic traits in oil palm using genotyping-by-sequencing (GBS). *Genomics*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ygeno.2015.02.02>
- Wong, C. K. & Bernardo, R. (2008). Genomewide selection in oil palm: increasing gain per unit time and coast with small populations. *Theor Appl Genet* (2008). 116:815-824 Springer-Verlag.
- Rajanaidu, N., Mary, N., Ong, E.C. & Lee, H.H. (1986). Sabah Breeding Programme (SBP). En: *Actas de la International Society for Oil Palm Breeders (ISOPB)*. 26 y 27 de marzo, 1985. PORIM, Bangi.
- Rajanaidu, N. (1994). MPOB Oil Palm Genebank: collection, evaluation, utilization and conservation of oil palm genetic resources. MPOB (Bangi), pp. 1-18.
- Rajanaidu, N., Kushairi, A., Rafii, M., Mohd, Din A., Maizura, I. & Jalani, B.S. (2000). Oil palm breeding and genetic resources. *Advances in oil palm research*, pp. 171-237.
- Rey, B., Leonardo, Pedro L., Gómez, C., Iván Ayala D., Wilman Delgado A. & Pedro Rocha S. (2004). Cenipalma oil palm *Elaeis guineensis* (Jacq.) and *Elaeis oleifera* (H.B.K) genetic collection: Characteristics of importance for the oil palm sector. *Palmas*, Vol. 25, N.º Especial, Tomo II, pp. 39-48.
- Seng, T.-Y., Siti Hawa, M.S., Chin, C.-W., Ting, N.-C., Singh, R., Faridah, Q.Z., Tan, S.-G. & Sharifah, S.R.S.A. (2011). Genetic linkage map of a high yielding FELDA Deli x Yangambi oil palm cross. *Plos One*, 6(11):e26593.
- Soh, A.C. (1994). Ranking parents by best linear unbiased prediction (BLUP). *Euphytica*, 76: 13-21.
- Soh, A.C., Choo, K.W., Yuk, W.H. & Chieh, W.C. (2010). Oil Palm. In: Vollman J. & Rajcan I. (eds.) *Oil Crops*. New York: Springer, pp. 333-367.
- Turner, P.D. (1981). *Oil palm diseases and disorders*. Kuala Lumpur: Oxford University Press.
- Zulkifli, Y., Maizura, I. & Rajinder, S. (2009). Genetic Diversity Study of *Elaeis guineensis* germplasm using EST-SSRs. En: *Actas de la International Society for Oil Palm Breeders (ISOPB) Seminar*. KLCC, Kuala Lumpur, 4 y 5 noviembre, 2009.