

Tasa de Expansión Foliar: Un Criterio para Identificar Materiales de Siembra de Palma Aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) que Pueden Sembrarse a Altas Densidades¹

C.J. Breure²

Resumen

El objetivo de este estudio fue identificar materiales de siembra de palma aceitera que pudieran sembrarse a densidades mayores que las tradicionales. Para tal fin se siguió la expansión foliar de varias progenies ténera descendientes de padres pisífera de los orígenes Ekona, Nigeria y Calabar para ajustar curvas de crecimiento logístico del área foliar de la hoja más joven completamente desarrollada, en función de la edad de la palma. Al mismo tiempo se obtuvieron estimados (asintóticos) del área foliar máxima obtenida (L_{\max}) y el tiempo para alcanzar 95% de L_{\max} ($t_{0.95}$). El trabajo se realizó en el sur de Sumatra, en donde existe una alta radiación solar y la precipitación pluvial anual es de aproximadamente 2500 mm. Durante los primeros cinco años después de la siembra cuando el follaje se cierra (fase 1 de la expansión foliar), el área de las hojas individuales de los tres orígenes fue similar, aunque con una ligera ventaja del origen Nigeria. Durante el segundo periodo de cinco años (fase 2), la expansión del follaje varió mucho más entre orígenes: Calabar alcanzó $t_{0.95}$ a los 6.9 años después de la siembra, comparado con 7.4 años para Nigeria y 8.8 años para Ekona. Calabar mostró, durante la fase 3 (área foliar estable), un menor valor de L_{\max} (7.99 m²) con respecto a los otros dos orígenes (9.63 m² y 10.11 m² para Nigeria y Ekona, respectivamente).

Las curvas logísticas de crecimiento se usaron también para calcular el índice de área foliar (IAF: la relación entre el área foliar total y la superficie de suelo cubierta). Se asumió que el IAF óptimo para alcanzar los máximos rendimientos por hectárea se encuentra entre 5.5 y 6.0. Si se utiliza la densidad estándar de 143 palmas por ha (la densidad empleada en este ensayo fue de 135 palmas por ha), el IAF sería de 5.6 para Ekona, 5.4 para Nigeria y 4.5 para Calabar, cuando se alcance el tamaño máximo del follaje (fase 3). Debido a que el IAF de Calabar está bastante por debajo del ámbito óptimo, se concluye que la densidad a que se puede plantar Calabar puede ser incrementada a 160 palmas por ha; lo cual daría un IAF de 5.0 en la fase 3.

La habilidad combinatoria general (HCG: el efecto genotípico aditivo de los padres) para el rendimiento de racimos de fruta y para L_{\max} varió considerablemente entre los padres pisífera individuales. En particular, algunos padres pisífera de origen Nigeria, mostraron altos valores de HCG para el rendimiento con valores bajos para L_{\max} . Esta relación inversa ofrece la posibilidad para la selección de padres pisífera para producir progenies ténera que puedan plantarse a mayores densidades. Se concluye también que el valor de L_{\max} es un criterio más apropiado para estimar la densidad óptima de siembra, con respecto al método convencional que se basa en la medición del área foliar promedio.

Palabras clave: índice de área foliar, orígenes de palma aceitera, pisífera, densidad de siembra.

¹ Trabajo publicado originalmente en idioma inglés: C.J. Breure, Rate of leaf expansion: A criterion for identifying oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) types suitable for planting at high densities, NJAS -Wageningen J. Life Sci. (2010), doi:10.1016/j.njas.2010.03.001

² ASD Costa Rica, cj_breure@yahoo.com; tel: HP: 62-(0)81377553858, Tel./fax: 62-(0)711-354050 (Indonesia)

Introducción

Expansión de la corona de hojas en palma aceitera

El sol provee la energía que utiliza la fotosíntesis para producir materia seca. La competencia por luz aumenta conforme se incrementa la densidad de siembra, así como con la expansión del follaje a medida que las palmas se desarrollan con la edad.

La expansión del follaje puede ser separada en tres fases (Breure 2003): la fase 1 comprende el periodo desde la siembra hasta que el follaje se cierra, y dura unos cinco años cuando se utiliza el espaciamiento de siembra estándar. En la fase 2, el área de las hojas más jóvenes completamente abiertas continúa incrementándose hasta que se obtiene un tamaño máximo que se mantiene estable a partir de ese momento. La fase 3 es el periodo de estabilización. En ambientes favorables, la expansión del follaje toma aproximadamente diez años, pero este periodo se alarga en condiciones subóptimas, como las que ocurren, por ejemplo, en África del oeste (Corley et al. 1973).

Estimación del área foliar

El área foliar promedio se ha utilizado comúnmente para estimar la densidad óptima de siembra para un material de siembra determinado en un ambiente particular (Corley et al. 1973; Smith et al. 1996). Dado que el tamaño final del follaje (fase 3) tiene un efecto sobre la fotosíntesis durante el periodo más largo en la producción de racimos, la estimación del área foliar es particularmente relevante cuando las plantas alcanzan diez o más años de edad. Mediciones frecuentes son necesarias para obtener un estimado confiable del área foliar promedio, ya que el tamaño de las hojas individuales puede cambiar como resultado de variaciones en el ambiente y la carga de racimos (Corley y Breure 1992). Se concluye que el seguimiento del área foliar durante varios años en palmas adultas no es práctico para obtener información para estimar la densidad de siembra de un determinado material.

El crecimiento de las hojas nuevas se detiene una vez que estas se abren por completo. Breure (1985) mostró que distintas progenies de palma aceitera pueden diferir marcadamente en la tasa de expansión del área foliar, i.e. el incremento en área de la hoja más joven en desarrollo en función del tiempo, así como su tamaño final.

El área de hojas individuales obtenida asintóticamente (L_{\max}) y el tiempo para alcanzar 95% de L_{\max} ($t_{0.95}$) fueron estimados a partir de una curva de crecimiento logístico que se ajustó a través del área de la hoja más joven expandida y los años después de la siembra, durante el periodo anterior a la estabilización del área foliar. Si bien es cierto que esta curva fue obtenida con un número reducido de mediciones, se pueden obtener estimados confiables del área foliar de hojas maduras individuales antes que el follaje alcance su tamaño final y L_{\max} es entonces una alternativa más apropiada para estimar la densidad de siembra óptima. Este artículo sigue este enfoque.

Índice óptimo de área foliar

El índice de área foliar (IAF) es usado para describir el grado de competencia por luz entre plantas. En palma aceitera, el IAF es estimado mediante el producto del número de palmas en una hectárea, el número de hojas por palma y su área foliar promedio. El valor óptimo de IAF (i.e. el valor que se asocia con el máximo rendimiento de racimos por hectárea) depende del sitio particular (Von Uexküll et al. 2003). Para las condiciones ambientales (alta radiación solar) del sureste asiático, se acepta que este valor de IAF está entre 5.5 y 6.0.

Considerando lo anterior, se obtendrían rendimientos máximos en forma más temprana cuando el valor óptimo de IAF se alcanza más pronto en la vida de la plantación. Una opción para lograr esto es aumentar la densidad de siembra, pero un menor espaciamiento entre palmas puede originar un IAF que excede el óptimo, lo cual se traduce en menores rendimientos posteriormente (Breure 1988). La producción de los compo-

nentes de la materia seca determinada en este estudio durante el periodo entre los seis y los nueve años después de la siembra se muestra en la figura uno.

La figura 1 muestra que el total de materia seca (parte aérea) producido por hectárea en términos de la cantidad de carbohidratos sintetizados (CH_2O por día) se incrementa en forma asintótica como una función del IAF, y que se estabiliza con valores de IAF mayores que seis aproximadamente. En contraste, la producción de materia seca vegetativa continúa incrementándose en forma lineal aún con valores del IAF superiores a seis. La figura 1 también muestra que la diferencia, i.e. la cantidad de CH_2O que puede ser utilizada para producir racimos, se incrementa inicialmente como una función del IAF hasta que alcanza su máximo. En la figura 1, esto ocurre cuando el IAF es

igual a 5.6, lo cual se indica con la flecha vertical. La producción de materia seca de los racimos decrece por encima de este valor, ya que la competencia por luz entre las palmas se convierte en un factor limitante para la producción total de materia seca.

Para minimizar los efectos negativos de un espaciamiento muy cercano entre palmas, se pueden desarrollar materiales de siembra con una expansión rápida del follaje (bajo valor de $t_{0.95}$) y que alcancen una menor área máxima de las hojas individuales (L_{max}), lo cual permite que se establezcan con valores menores de IAF (Breure 1985). Cuando estos materiales se siembren a mayores densidades, la producción de materia seca en los racimos estará menos afectada por la competencia en palmares adultos.

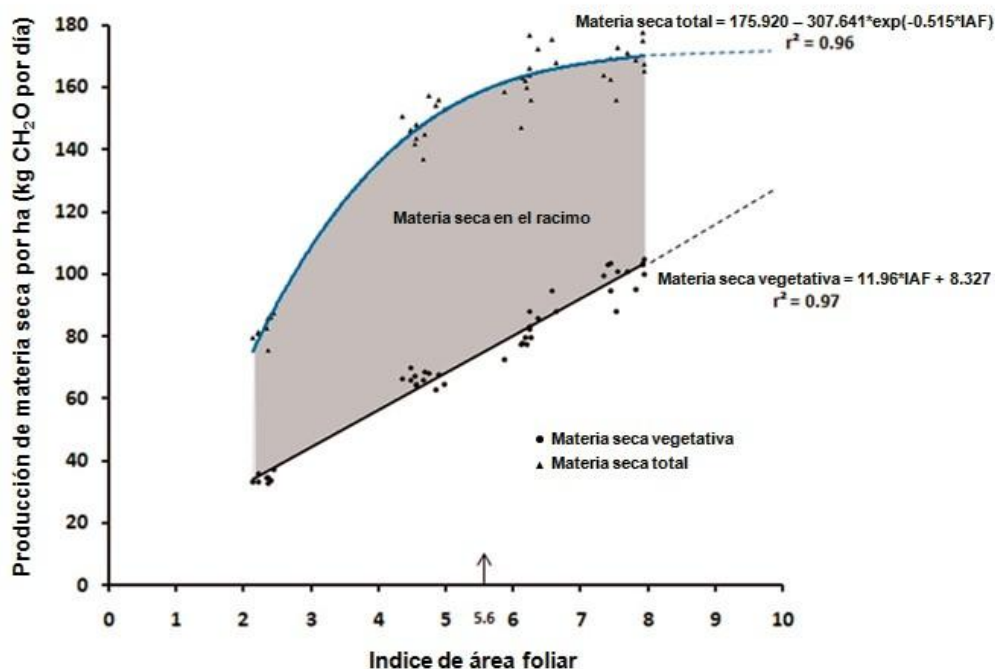


Fig 1. Relación entre la materia seca total (total DM), materia seca vegetativa (vegetative DM) y materia seca de los racimos (bunch DM) e índice de área foliar (IAF). Las curvas para producción de materia seca total y producción de materia seca vegetativa fueron ajustadas a través de los valores de las subparcelas plantadas a 56, 110, 148 y 186 palmas por ha en un experimento sobre densidades de siembra plantado en Papua Nueva Guinea (Breure 1988). Los datos corresponden a un periodo entre los seis y nueve años de edad de las plantas después de la siembra en el campo. El valor máximo de materia seca en los racimos por hectárea, como se indica en el eje, "y" fue obtenido con un valor de IAF = 5.6

Objetivos y Enfoque

Se investigó sobre la posibilidad de que el tipo de material con las características favorables descritas anteriormente, pudiera estar presente dentro de lo que está disponible comercialmente. Para esto se utilizó un experimento sembrado con progenies ténera descendientes de padres pisífera obtenidos de distintos orígenes. Mientras que la mayoría de los suplidores de semilla de palma aceitera utilizan únicamente madres Deli dura, los padres pisífera son usualmente de un grupo menos limitado de orígenes. En particular, ASD (Costa Rica), un suplidor bien conocido de semillas de palma aceitera, utiliza un grupo más amplio de padres pisífera de varios orígenes.

Se determinó la producción de racimos de fruta, el área foliar y el IAF de tres orígenes de pisífera (Ekona, Nigeria y Calabar) de ASD. Los valores de IAF fueron derivados de las curvas logísticas y utilizados para estimar la densi-

dad óptima de siembra, y en particular para verificar el comportamiento observado en Guatemala, de que el origen Calabar podía ser sembrado a 160 palmas por ha (F. Peralta, comunicación personal). Para complementar el uso del IAF para definir la densidad óptima de siembra, los valores de IAF se usaron también para estimar la interceptación de luz en el follaje una vez que este había cerrado (fases 2 y 3). Finalmente, el trabajo también contempló el estudio de los valores de la habilidad combinatoria general (HCG), i.e. el efecto genético aditivo de los padres sobre el desempeño de la descendencia ténera. Para cada padre pisífera individual se estimaron los valores de HCG correspondientes a rendimiento y L_{max} . El objetivo fue explorar las posibilidades de seleccionar padres individuales pisífera que combinaran un alto valor de HCG para rendimiento y un bajo valor para L_{max} en la fase 3 de desarrollo de las palmas.

Materiales y Métodos

Material de siembra

Este trabajo se basa en los datos sobre rendimiento y crecimiento vegetativo de un grupo de 425 progenies ténera generadas por ASD en Costa Rica a partir de cruces dura x pisífera. Se utilizaron 200 madres dura, todas del tipo Deli obtenidas de varios programas de mejoramiento en el sureste asiático, y 50 padres pisífera de seis orígenes distintos (Breure 2006). Los resultados se enfocan en tres de estos orígenes pisífera (Ekona, Nigeria y Calabar), representados por 10, 6, y 8 palmas respectivamente. Las progenies tenera descendientes de estos tres orígenes de pisífera se consideran lo mejor del material de siembra de estos orígenes en ASD.

El esquema de cruces para generar las progenies se hizo según un diseño alfa (Patterson et al. 1978) con bloques incompletos. Cada palma madre dura fue polinizada por dos padres pisífera y cada palma pisífera polinizó nueve palmas dura individuales. No obstante,

algunos cruces no generaron semilla viable y al final se obtuvieron 84, 51 y 64 progenies para Ekona, Nigeria y Calabar, respectivamente, las cuales fueron plantadas en el sur de Sumatra en enero de 1997 en tres repeticiones con 16 palmas por parcela (48 palmas por progenie) a una densidad de 135 palmas por ha. La radiación solar en el sitio se considera alta y la precipitación es de alrededor de 2500 mm por año.

Procesamiento de la información

Se determinó el rendimiento de racimos de fruta fresca por palma durante seis años a partir del momento que se inició la producción en junio de 1999. El área foliar de la primera hoja joven completamente expandida se estimó anualmente durante los primeros ocho años, para lo cual se utilizó el método de Hardon et al. (1969). Para cada origen, se fijó una curva logística de crecimiento a través de los valores promedio de área foliar de cada grupo de progenies descendientes de cada padre pisífera individual. Los valores de área foliar de esta

curva se estimaron como $A/[1 + B \times \exp(-C \times T)]$, donde T = años después de la siembra y A , B y C son constantes. Las curvas logísticas de crecimiento también fueron ajustadas a través de los valores de área foliar de las progenies individuales. El máximo de área foliar L_{\max} obtenido (asintótico) y el tiempo para alcanzar 95% de L_{\max} ($t_{0.95}$) se estimaron de acuerdo con el método descrito por Breure y Verdooren (1995).

Para cada año, el área foliar total por palma se calculó como el producto del número de hojas y su área promedio. El número de hojas fue obtenido del informe de Gerritsma y Soebagyo (1999) en donde se sigue el procedimiento usualmente utilizado en Indonesia para la poda de hojas. Como resultado de la poda de hojas (para lograr acceso hacia los racimos durante la cosecha), ocurre una disminución aproximadamente lineal del número de hojas por palma en función de su edad, desde unas 60 hojas a los dos años de edad hasta un número más o menos estable de 38 para palmas de 12 o más años. Este informe, al igual que Corley et al. (1973), muestran que no hubo efecto de la densidad de siembra sobre el número de hojas verdes por palma en el ámbito de densidades que se usó en el presente estudio.

La producción anual de hojas por palma decrece con la edad, desde aproximadamente 42 hojas en el segundo año después de la siembra hasta unas 22 en palmas de 10 o más años de edad. De esta manera, el área foliar total en cierto momento fue calculada como el promedio de las hojas producidas durante los últimos 18 meses (estos valores se obtuvieron de las curvas de crecimiento logístico). El área promedio del follaje en un año particular se estimó a partir de los datos de área foliar al principio y final del año. Dado que la tasa de emisión foliar fue similar en los tres orígenes durante el periodo entre los dos y los ocho años de edad de las plantas (26.4, 26.3 y 26.0 hojas por año para Ekona, Nigeria y Calabar, respectivamente), se utilizó el mismo método para estimar el área foliar total por palma en todos ellos.

El área foliar total por palma a la densidad de 135 palmas por ha se usó para estimar el IAF

correspondiente a la densidad de siembra usual de 143 palmas por ha. Para el caso del origen Calabar, también se estimó el IAF para un espaciamiento de 160 palmas por ha.

La extrapolación de 135 a 143 y de 143 a 160 palmas por ha se justifica hasta cierto punto, i.e. hasta que el área de las hojas individuales se aproxima a su tamaño final en la fase 2, lo cual sucedió en las condiciones de este trabajo a aproximadamente los diez años de edad de las plantas. Durante este periodo, el área foliar es solo significativamente más pequeña a los diez años, si la densidad de siembra se incrementa a 160 palmas por ha (Breure 1982). Sin embargo, existe una tendencia negativa en L_{\max} con el incremento desde 110 hasta 186 palmas por ha (Breure 1985), de manera que si se incrementa la densidad de siembra desde 135 a 143 y luego a 160 palmas por ha, se puede inferir que el área foliar total por palma no decrece sensiblemente durante las fases 1 y 2, mientras que L_{\max} se reduciría proporcionalmente. Dicho de otra forma, los valores de IAF basados en el valor de L_{\max} a la densidad utilizada en el experimento de 135 palmas por ha son sobreestimadas a las densidades supuestas de 143 y 160 palmas por ha.

Finalmente, la interceptación parcial de luz (f) en las fases 2 y 3 (luego del cierre del follaje) fue calculada a partir de los valores de IAF, donde f es el inverso de la cantidad de luz que penetra el follaje. Los cálculos se hicieron según la ecuación sugerida por Squire, G.R. (1984), utilizando un coeficiente medio de extinción (k) de 0.37 para los años 6-8, 0.44 para los años 9-11 y 0.35 para los años 12-15, tal como fue encontrado por Breure (1988) en siembras comerciales en Papúa Nueva Guinea e Indonesia:

$$f = 1 - \exp[-k(\text{IAF} - 0.3)]$$

Se utilizó un modelo lineal (Breure y Verdooren 1995) para estimar la habilidad combinatoria general (HCG), i.e. el efecto genotípico aditivo de los padres sobre el desempeño (en términos de rendimiento de fruta y L_{\max}) de la descendencia ténera, para cada una de las palmas pisífera individuales (10 para Ekona, 6 para Nigeria y 8 para Calabar).

La media general, calculada a través de todas las familias ténera derivadas de los cruces dura x pisífera, se añadió a los valores de HCG para obtener valores que representaran el desempeño real de la descendencia ténera. A

partir de estos rendimientos por palma, se hizo una inferencia sobre la ganancia en rendimiento en caso de que el material fuera sembrado a una densidad mayor de 160 palmas por ha, como en el caso del Calabar.

Resultados

Área foliar

La curva de crecimiento logístico para el área foliar en función de la edad de la planta, se ajustó bastante bien para todos los orígenes genéticos durante los ocho años de colección de datos (r^2 varió entre 0.89 y 0.92; Fig. 2). Durante la fase 1, la tendencia en la expansión del follaje fue similar en los tres orígenes, aunque con una ligera ventaja para Nigeria.

Durante la fase 2, los tres orígenes alcanzaron 95% del máximo del área foliar, pero en diferentes periodos después de la siembra:

Calabar (6.9 años), Nigeria (7.4 años) y Ekona (8.8 años). Calabar alcanzó un valor de L_{max} de solamente 7.99 m², comparado con 9.63 m² en Nigeria y 10.11 m² en Ekona. Las diferencias entre orígenes en cuanto a área foliar y L_{max} fueron altamente significativas (Cuadros 1 y 2).

L_{max} (Cuadro 1) y el área foliar promedio (Cuadro 2) fueron menores en Calabar, mientras que L_{max} en Ekona fue el mayor (10.11 m²) y el área foliar promedio de Nigeria fue la mayor (6.24 m²).

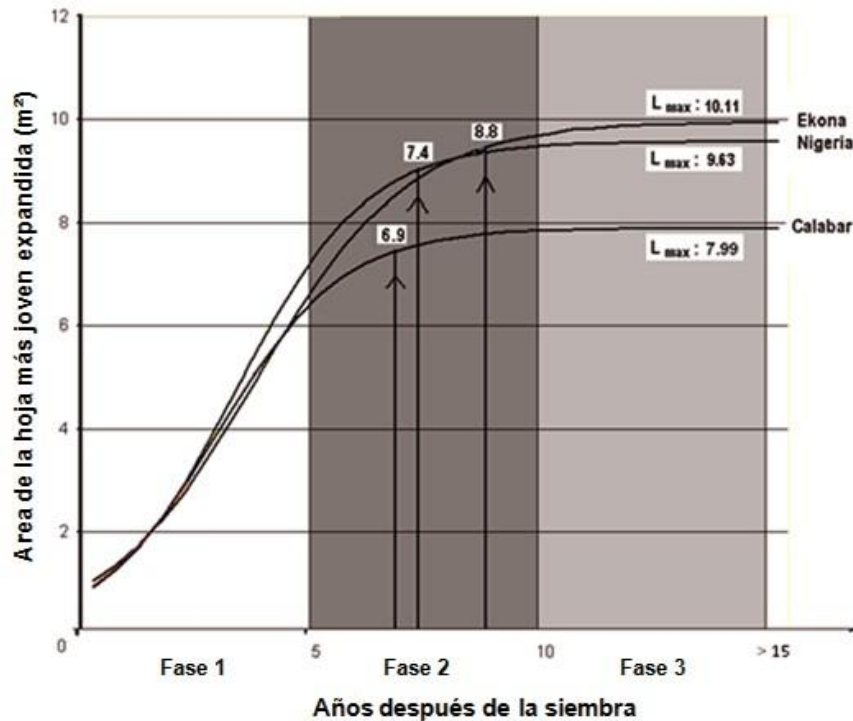


Fig.2. Área de la hoja más joven completamente expandida en función de la edad de la palma en años, para los orígenes Ekona, Nigeria y Calabar. El periodo comprende las tres fases de expansión de la corona de hojas. La flecha vertical indica los valores de $t_{0.95}$ (tiempo para alcanzar 95% de L_{max})

Cuadro 1. Área media máxima (L_{max}) para los orígenes Ekona, Nigeria y Calabar plantados a 135 palmas por ha

Orígenes	$L_{max}(m^2)$ promedio	95% intervalo de confianza	Diferencias entre orígenes		Probabilidad
Ekona	10.11	9.90 - 10.32	Ekona vs Nigeria	0.48	0.007
Nigeria	9.63	9.36 - 9.91	Ekona vs Calabar	2.12	0.000
Calabar	7.99	7.74 - 8.32	Nigeria vs Calabar	1.64	0.000

Cuadro 2. Área foliar promedio (m^2) durante los primeros ocho años después de la siembra en los orígenes Ekona, Nigeria y Calabar sembrados a 135 palmas por ha

Orígenes	Área foliar (m^2)	Diferencias entre orígenes		Probabilidad
Ekona	5.97	Ekona vs Nigeria	-0.27	0.001
Nigeria	6.24	Ekona vs Calabar	0.46	0.000
Calabar	5.51	Nigeria vs Calabar	.73	0.000

Índice de área foliar

La figura 3 muestra los valores promedio de IAF para una densidad estimada de 143 palmas por ha, que es la normalmente usada en plantaciones comerciales. Los datos se extrapolaron a partir de la densidad de 135 palmas por ha utilizada en este experimento. El valor óptimo de IAF de 5.5-6.0 utilizado como referencia, se indica con una barra horizontal. Los intervalos de confianza al 95% se muestran en el cuadro 3.

Como podría ser inferido a partir de la curva logística en la figura 2, los tres orígenes presentaron valores de IAF similares durante la fase inicial de desarrollo. No obstante, el valor para Nigeria (2.37) fue significativamente mayor que para Calabar (2.28) y Ekona (2.27) (Cuadros 3 y 4).

Durante la fase 2, Nigeria y Ekona alcanzaron valores cercanos al óptimo en el valor del IAF relacionados con los rendimientos máxi-

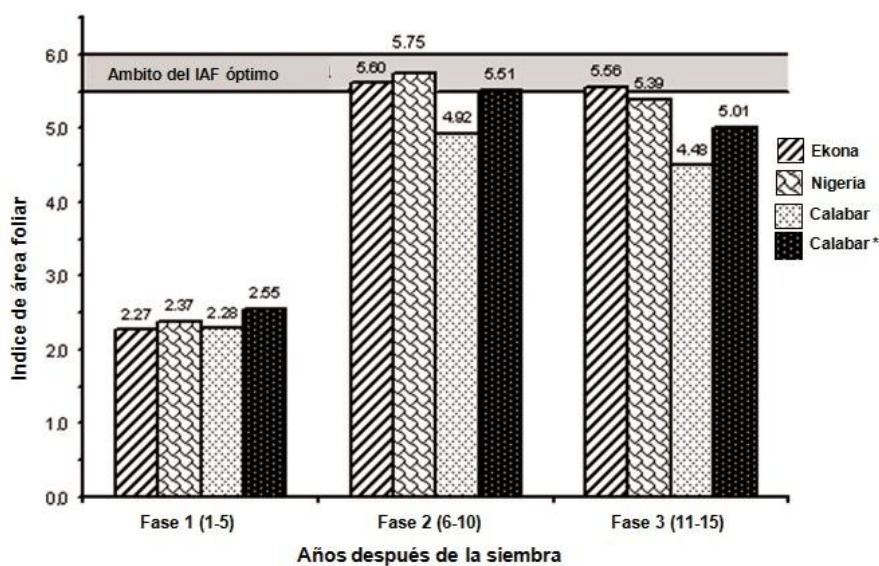


Fig. 3. Índice de área foliar de Ekona, Nigeria y Calabar estimadas para una densidad de 143 palmas por ha, y Calabar* estimada para una densidad de 160 palmas por ha durante las tres fases de expansión del follaje. La barra horizontal indica el ámbito de IAF óptimo.

mos de racimos. Sin embargo, el origen Calabar no alcanzó en esta etapa ni siquiera el límite inferior de 5.5 (dentro de un intervalo de confianza del 95 % de 4.79-5.05; Cuadro 3).

Cuando el tamaño del área foliar de la hoja alcanzó un máximo estable durante la fase 3, el IAF influyó el principal periodo de producción de racimos (aproximadamente 15 años comparado con cinco durante la fase 2). Por esta razón, el IAF durante la fase 3 puede ser visto como una medida confiable para establecer la densidad óptima de siembra de un material particular en un ambiente dado.

Los valores del IAF durante la fase 3 fueron inferiores a los de la fase 2 (Fig. 3). Esta reducción es producto de dos factores: un menor número de hojas debido a la poda asociada a la cosecha de los racimos en palmas muy altas y una menor tasa de producción de hojas en palmas adultas (fase 3) con respecto a las jóvenes (Gerritsma y Soebagyo 1999). No obstante, el límite superior del IAF para el intervalo de confianza del 95% para Nigeria y Ekona (5.56 y 5.69, respectivamente) se encuentra dentro del ámbito óptimo. En contraste, el IAF para Cala-

bar se estabiliza por debajo el valor requerido para obtener los rendimientos de racimos máximos, de manera que para explotar plenamente el potencial productivo de este material, sería necesario plantarlo a una densidad superior a 143 palmas por ha.

Si asumimos que Calabar se planta a 160 palmas por ha, con respecto a la densidad estándar de 143 palmas por ha, este incremento de 12% resulta en un aumento del IAF de 4.48 a 5.01 en la fase 3 (Fig. 3). Es interesante que durante el cierre del follaje (fase 1), el IAF de Calabar de 2.55 (a 160 palmas por ha) es significativamente mayor que el de los otros dos orígenes sembrados a 143 palmas por ha (2.37 y 2.27: Nigeria y Ekona, respectivamente; Cuadro 4).

Intercepción de luz

En la figura 4 se muestra que el porcentaje de intercepción de luz en cada origen durante la fase 2 de expansión del follaje es superior que durante la fase 3. Breure (2003) anota que existen al menos dos factores responsables para este comportamiento: 1) la

Cuadro 3. Índice de área foliar promedio (IAF) y los intervalos de confianza al 95% de las medias estimadas durante las tres fases de expansión del follaje para los orígenes Ekona, Nigeria y Calabar plantados a una densidad de 143 palmas por ha y para Calabar* plantado a 160 palmas por ha

	Media del IAF			Or	Intervalo de confianza (95%)		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3		Fase 1	Fase 2	Fase 3
Ekona	2.27	5.60	5.56		2.23 - 2.30	5.48 - 5.71	5.43 - 5.69
Nigeria	2.37	5.75	5.39		2.32 - 2.42	5.61 - 5.90	5.23 - 5.56
Calabar	2.28	4.92	4.48		2.24 - 2.32	4.79 - 5.05	4.33 - 4.63
Calabar*	2.55	5.50	5.01		2.51 - 2.59	5.38 - 5.64	4.86 - 5.16

Cuadro 4. Diferencias en el valor del IAF entre orígenes (Ekona y Nigeria vs. Calabar) estimadas para una densidad de 143 palmas por ha, y vs Calabar* estimada para una densidad de 160 palmas por ha, durante las tres fases de expansión del follaje

Orígenes	Fase 1 (1-5)		Fase 2 (6-10)		Fase 3 (11-15)	
	Diferencia	Probabilidad	Diferencia	Probabilidad	Diferencia	Probabilidad
Ekona vs Nigeria	-0.10	0.000	-0.15	0.101	0.17	0.111
Ekona vs Calabar	-0.01	0.734	0.68	0.000	1.08	0.000
Ekona vs Calabar*	-0.28	0.000	0.09	0.299	0.55	0.000
Nigeria vs Calabar	0.09	0.002	0.83	0.000	0.91	0.000
Nigeria vs Calabar*	-0.18	0.000	0.24	0.014	0.38	0.001

producción de hojas durante la fase 3 es menor y también se pierden más hojas durante la poda realizada para cosechar los racimos en palmas cada vez más altas, todo lo cual resulta en un IAF menor (sección anterior), y 2) para un valor dado de IAF, la fracción de luz interceptada decrece (menor valor de k), lo cual puede ser atribuido a un cambio en el ángulo de la hoja en combinación con una mayor variación en la altura de las plantas conforme estas crecen. Estos fenómenos en palmas más viejas ocasionan que haya menor soporte entre hojas de palmas contiguas durante la fase 3. Durante la fase 2, las diferencias en interceptación de luz entre los tres orígenes no fueron significativas, pero durante la fase 3, Calabar sembrado a 160 palmas por ha interceptó significativamente menos luz que los otros dos orígenes (Cuadro 5).

Habilidad combinatoria general (HCG)

Los ámbitos de valores de HCG para L_{max} de las palmas pisífera Calabar, Ekona y Nigeria fueron 7.20-8.52, 9.05-11.49 y 8.59-10.32 m^2 respectivamente. Lo interesante es que estos valores no se relacionan con aquellos para rendimiento de racimos. En el caso de las palmas de origen Nigeria, esta relación es aún ligera-

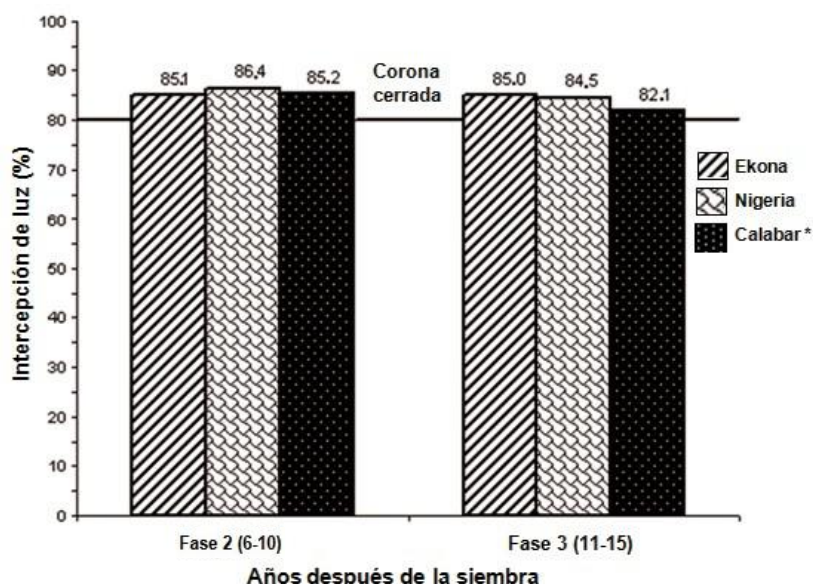


Fig. 4. Porcentaje de interceptación de luz por el follaje calculado para los orígenes Ekona y Nigeria estimados para una densidad de siembra de 143 palmas por ha, y para Calabar* estimado para una densidad de 160 palmas por ha, durante las fases 2 y 3 de expansión del follaje. El cierre del follaje (canopy closure) ocurre con 80% de interceptación de luz (Breure 1988).

mente negativa ($r = -0.36$ y no significativa) (Fig. 5).

La palma N1, con el valor más alto de HCG para rendimiento de racimos mostró el menor valor de L_{max} . Por otro lado, la palma N6 con un valor similar para rendimiento tuvo el máximo valor de L_{max} . Esto implica que la selección para obtener la mejor combinación de alto rendimiento y bajo L_{max} es posible.

Cuadro 5. Diferencias en el porcentaje de interceptación de luz entre los orígenes Nigeria y Ekona estimadas para una densidad de 143 palmas por ha, y diferencias entre Ekona y Nigeria vs. Calabar* estimada para una densidad de 160 palmas por ha durante la fase 2 de expansión del follaje

Pares de orígenes	Fase 2 (6-10 años)		Fase 3 (11-15 años)	
	Diferencia	Probabilidad	Diferencia	Probabilidad
Nigeria vs Ekona	1.3	0.083	-0.5	0.555
Ekona vs Calabar*	0.1	0.971	2.9	0.000
Nigeria vs Calabar*	1.2	0.108	2.4	0.010

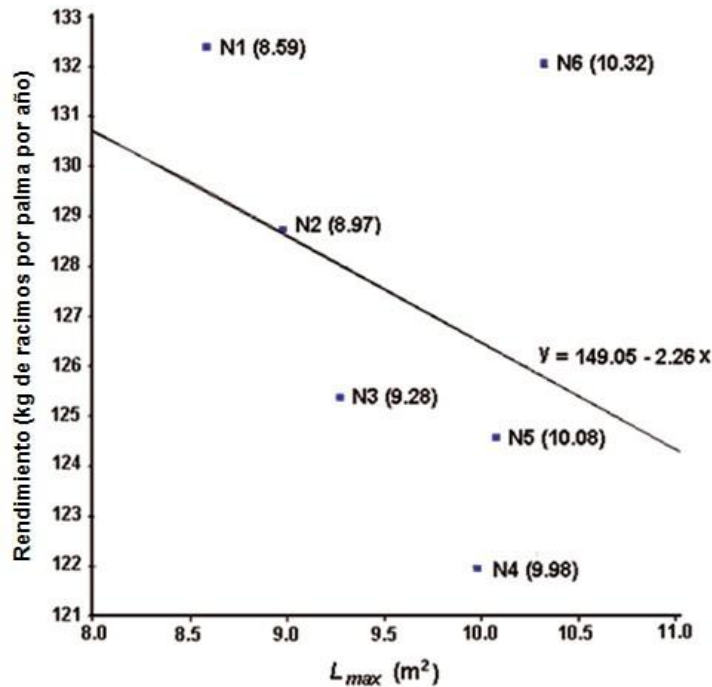


Fig. 5. Habilidad combinatoria general (HCG) para el rendimiento de racimos y para L_{max} (en paréntesis) de seis palmas pisífera Nigeria (N1-N6)

Discusión

Área foliar

Las curvas logísticas de crecimiento son una herramienta útil para estimar el área de hojas individuales durante toda la vida de una plantación de palmas. Este tipo de curvas describe el área foliar durante el periodo de madurez del follaje (L_{max}), así como la tasa de incremento hasta que se alcanza este máximo.

Los valores medios del área foliar en los tres orígenes (Calabar, Nigeria y Ekona) fueron estadísticamente diferentes durante los primeros ocho años después de la siembra. No obstante, los patrones comparativos de los datos de estos orígenes parecen ser un indicador bastante pobre del área foliar de un origen cuando se alcanza la madurez del follaje (L_{max} en el cuadro 1). Se detectan dos discrepancias entre ambas mediciones. En primer lugar, el ordenamiento de los orígenes con respecto a la magnitud de L_{max} y área foliar son diferentes:

Nigeria (1), Ekona (2), Calabar (3) vs Ekona (1), Nigeria (2), Calabar (3), respectivamente. En segundo lugar, los valores promedio del área foliar de Calabar ($5.51 m^2$) y Ekona ($5.97 m^2$) no reflejan el ámbito pronunciado de los valores de L_{max} de ambos orígenes ($7.99 - 10.11 m^2$, respectivamente).

El ajuste de una curva logística de crecimiento confiable requiere de solo cinco puntos (valores promedio de área foliar de las progenies individuales de cada origen), que deben ser colectados aproximadamente a los 6, 12, 42, 66 y 90 meses después de la siembra. Este es el periodo antes de que el follaje alcance su máximo desarrollo (Breure y Verdooren 1995); lo que es una ventaja adicional sobre la forma tradicional de estimar el área foliar promedio.

Breure (en preparación) calculó los intervalos de confianza (95%) de L_{max} para muestras

de varios tamaños y encontró, como era esperable, que un número de 30 progenies de cada origen, que involucraran cinco pisífera, debería de ser suficiente para obtener resultados estadísticamente confiables para respaldar la comparación de los tres orígenes estudiados. Adicionalmente, utilizando el valor de L_{max} estimado para un origen en un ambiente particular, se puede obtener un estimado confiable de IAF y, por lo tanto, de la densidad de siembra óptima, asumiendo que hay 38 hojas en una palma adulta.

Índice de área foliar óptimo

Si se acepta la asunción de que el valor óptimo de IAF para alcanzar los rendimientos máximos de racimos en palma aceitera se encuentra entre 5.5 y 6.0, resulta evidente que la descendencia ténera de las pisíferas Calabar puede ser plantada a 160 palmas por ha. En contraste, los orígenes Ekona y Nigeria no deberían plantarse más allá de 143 palmas por ha.

Corley y Tinker (2003) indican que el rendimiento por palma durante los primeros años es aproximadamente el mismo dentro de un ámbito de densidades. En un estudio más reciente, Nazeeb et al. (2007) encontraron que un incremento en la densidad desde 143 a 160 palmas por ha para el material de siembra estándar de su experimento, no afectó el rendimiento por palma durante los primeros cuatro años de producción. Es probable que para el caso de Calabar, esto sea cierto por un periodo aún mayor, debido a dos factores: 1) las hojas de Calabar detienen su expansión poco después de que se alcanza el punto cuando se cierra el follaje y 2) L_{max} decrece como una función de la densidad de siembra (Breure 1985). Como consecuencia, se espera que el IAF de Calabar, estimado cuando el follaje está maduro, sea menor que el que aparece en la figura 3, y de esta forma se puede concluir que un incremento en la densidad desde 143 a 160 palmas por ha incrementaría el rendimiento anual de racimos en aproximadamente 12%, durante al menos, los primeros 5-6 años de producción.

La superioridad del origen Calabar plantado a una alta densidad puede inferirse en forma indirecta a partir de un estudio de Breure (2006), en el que los valores de HCG de los padres pisífera fueron obtenidos a una densidad de 135 palmas por ha. Durante los primeros cinco años de producción, los valores (ajustados) de HCG para el rendimiento de racimos de los padres pisífera fueron 119 kg por palma para Calabar, comparados con 127 y 121 kg para Nigeria y Ekona. Con el incremento en la densidad de siembra desde 143 a 160 palmas por ha en Calabar, se esperaría un incremento anual de 5% y 10% en rendimiento con respecto a Nigeria y Ekona respectivamente plantados a 143 palmas por ha.

Es posible que la producción de palmas individuales del origen Calabar plantadas a la densidad de 160 palmas por ha decaiga un poco eventualmente en comparación con el estudio de Breure (2006). No obstante, esta caída en producción en palmas individuales será más que compensada por la población adicional de 25 palmas por ha. Esta conclusión recibe soporte debido al valor sub óptimo del IAF (5.01) estimado en el presente estudio para la fase 3, considerando que el valor óptimo para máximo rendimiento de este parámetro se encuentra entre 5.5 y 6.0.

A pesar de la mayor densidad, cuando el follaje cierra en la fase 2, el IAF de Calabar no excede el de los otros dos orígenes, lo cual implica una mejor penetración de luz, y por consiguiente, se favorece el crecimiento de la vegetación del piso y se reduce la erosión.

Habilidad combinatoria general

La relación inversa entre rendimiento de racimos y L_{max} encontrada en las palmas pisífera del origen Nigeria ofrece la posibilidad de seleccionar palmas que combinan un valor bajo de L_{max} con un alto potencial de rendimiento. Los materiales descendientes de tales pisíferas podrían ser plantados a mayores densidades y de esa forma incrementar el rendimiento por unidad de área. La clonación de esas pisíferas, permitiría la reproducción de estas características en gran escala.

La posibilidad de incrementar el rendimiento por unidad de área del tejido que intercepta la luz ha sido demostrada en las palmas compactas (Escobar y Alvarado 2003, Alvarado et al. 2006). Las palmas compactas de ASD y las fuentes de pisífera identificadas en este estudio, tales como Calabar, serán pronto

probadas en el nuevo jardín de PT Bakrie Sumatera Plantations en el norte de Sumatra. Para identificar las palmas pisífera con un alto valor de HCG para rendimiento por ha, los cruces de prueba por familia se plantarán a dos densidades: 135 y 160 palmas por ha.

Conclusiones

La producción comercial de racimos de fruta en plantaciones comerciales de palma aceitera empieza aproximadamente a los dos años y medio de edad de las palmas, que es bastante anterior al momento en que el follaje alcanza su máximo desarrollo; lo cual ocurre hasta que las palmas tienen aproximadamente diez años.

La densidad óptima de siembra para alcanzar el máximo rendimiento anual por unidad de área decrece durante el periodo de expansión del follaje. Dado que la vida económica de una plantación es de aproximadamente 25 años, se necesita un estimador confiable de la densidad óptima de siembra para cuando la plantación llegue al momento de madurez del follaje.

En un estudio anterior (Breure 1985) encontró que los valores de área foliar se ajustaban a una curva logística cuando se graficaban contra la edad de la palma en años. A partir de esta curva se pueden inferir tanto el área foliar máxima (L_{max}), como el tiempo para alcanzar 95% de este máximo ($t_{0.95}$). En este estudio se mostró que las progenies de palma aceitera descendientes de tres orígenes pisífera utilizados como padres (Nigeria, Ekona y Calabar) diferían marcadamente en la tasa de expansión foliar y en L_{max} . Además, se encontró que para cada origen, el área foliar promedio durante los primeros ocho años después de la siembra, parece ser un indicador poco confiable de L_{max} .

El valor de L_{max} es un parámetro más apropiado para estimar la densidad óptima de siembra que el método convencional basado en la medición del área foliar promedio; puesto que un estimador confiable del área foliar promedio durante la fase de madurez del follaje requiere medirla durante un periodo mayor.

Los valores de IAF fueron calculados a partir de los del área foliar obtenidos de la curva de crecimiento logístico de plantas para la densidad estándar de 143 palmas por ha. Considerando la asunción de que el rendimiento óptimo de racimos se obtiene con un IAF entre 5.5 y 6.0, se concluye que 143 palmas por ha es una densidad apropiada para los orígenes Ekona y Nigeria, pero para Calabar, esta densidad debería ser incrementada al menos a 160 palmas por ha.

Los valores de la habilidad combinatoria general (HCG) estimados para L_{max} para las palmas pisífera individuales de los tres orígenes no se relacionaron con los valores de HCG para el rendimiento de racimos de las mismas plantas. Esta relación fue aun negativa para las pisífera del origen Nigeria; lo cual abre la posibilidad para seleccionar palmas padre pisífera que combinen un valor alto de HCG para rendimiento con bajos valores para L_{max} , para obtener materiales de siembra que puedan plantarse a altas densidades.

Agradecimientos

Se agradece el permiso de PT. Selapan Jaya para publicar estos resultados y la asistencia

del personal de Bina Sawit Makmur para coleccionar y procesar la información. Se agradece tam-

bién a I. Bos, I.E. Henson y P.G.J. Keuss por sus acertados comentarios a la versión anterior

de la publicación y a L.R. Verdooren por su asistencia en los análisis estadísticos

Referencias

- C.J. Breure, The search for yield in oil palm: basic principles, in: T.H. Fairhurst, R. Härdter (Eds.), *The Oil Palm, Management for Large and Sustainable Yields*, Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI), 2003, pp. 59-98.
- R.H.V. Corley, C.K. Hew, .K. Tam, K.K. Lo, Optimal spacing for oil palms, in: R.L. Wastie, D.A. Earp(Eds.), *Advances in oil palm cultivation*, Incorp. Soc. Planters, Kuala Lumpur, 1973, pp. 52-71.
- B.G. Smith, C.R. Donough, R.H.V. Corley, Relationship between oil palm clone phenotype and optimal density, in: D. Ariffin et al. (Eds.), *Proceedings of the 1996 PORIM Int. Palm Congr. Competitiveness for the 21st century*, Palm Oil Res. Inst. Malaysia, Kuala Lumpur, 1996, pp. 76-86
- R.H.V. Corley, C.J. Breure, Fruiting activity, growth and yield of oil palm. I. Effects of fruit removal. *Experimental Agriculture* 28 (1992) 99-109.
- C.J. Breure, Relevant factors associated with crown expansion in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.), *Euphytica* 34(1985) 161-175.
- H. Von Uexküll, I.E. Henson, T. Fairhurst, Canopy management to optimize yield, in: T.H. Fairhurst, R. Härdter (Eds.), *The Oil Palm, Management for Large and Sustainable Yields*, Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI), 2003, pp. 163-180.
- C.J. Breure, The effect of palm age and planting density on the partitioning of assimilates in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.), *Experimental Agriculture* 24 (1988) 53-66.
- C.J. Breure, Performance of ASD's oil palm parent material in South Sumatra: the search for elite planting material for Indonesia. *ASD Oil Palm Papers* 29(2006), 19-30.
- H.D. Patterson, E.H. Williams, E.A. Hunter, Block designs for variety trials, *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 90(1978) 395-400.
- J.J. Hardon, C.N. Williams, I. Watson, Leaf area and yield in the oil palm in Malaysia, *Experimental Agriculture* 5 (1969) 25-32.
- C.J. Breure, L.R. Verdooren, Guidelines for testing and selecting parent palms in oil palm. Practical aspects and statistical methods, *ASD Oil Palm Papers* 9(1995) 1-68.
- W. Gerritsma, F.X. Soebagyo, Analysis of the growth of leaf area of oil palm in Indonesia, *Experimental Agriculture* 35(1999) 293 - 308.
- C.J. Breure, Factors affecting yield and growth of oil palm tenera in West New Britain, *Oléagineux* 37(1982) 213-227.
- G.R. Squire, Light interception, Productivity and yield of oil palm. Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur, 1984, pp.73
- R.H.V. Corley, P.B. Tinker, *The Oil Palm*, 4th ed., Blackwell Science Ltd., 2003.
- \M. Nazeeb, M.K. Tang, S.G. Loong, S.B. Syed, Variable density plantings for oil palms (*Elaeis guineensis*) in Peninsular Malaysia, in: *Proceedings of the PIPOC 2007 International Palm Oil Congress - Agriculture*, 2007, pp. 127-167.
- R. Escobar, A. Alvarado, Strategies in production of oil palm compact clones and seeds, in: *Proceedings of Agriculture Conference, PIPOC 2003, MPOB International Palm Oil Congress, 24-28 September 2003*, 2003, pp. 75-91.
- A. Alvarado, R. Escobar, F. Peralta, C. Chinchilla, Compact Seeds and Clones and their Potential for High Density Planting, in: *International Seminar on Yield Potential in the Oil Palm, The International Society for Oil Palm Breeders (ISOPB), Phuket, Thailand, 27-28 November 2006*, 2006, pp. 10.