

■ Capítulo 6

Ecofisiología y mejoramiento genético de la palma de aceite

Rafael Reyes Cuesta, Lizardo Norbey Ibarra Ruales

La función productiva de una especie vegetal, entendida como su producción de biomasa y su distribución para conformar la parte de interés económico para el hombre, está relacionada con los factores que determinan el fenotipo, es decir, depende de factores genéticos y ambientales y su combinación, como se indica a continuación:

Fenotipo = Genotipo + Ambiente + Interacción Genotipo y ambiente.

Dentro del ambiente, además de los aspectos biofísicos (suelo, atmósfera, agua, entre otros), se encuentra el manejo agronómico del sistema de producción. Por ello, una de las alternativas más viables para obtener adecuados niveles de productividad en una especie vegetal es disponer de genotipos de adaptación específica. Esto permite sembrar la especie y explotarla económicamente en condiciones ambientales que favorecen la expresión biológica potencial de las características sobresalientes de interés humano, sin que se presenten disturbios en su crecimiento y desarrollo que conduzcan a la disminución de su productividad y, en algunos casos, a la muerte de la planta:

Por ello, el programa de mejoramiento genético estatal de la palma de aceite en Colombia, ejecutado por el IFA y el ICA, y continuado por AGROSAVIA (Corpoica hasta 2017), desde 1994 ha tenido como objetivo obtener cultivares de adaptación específica a las condiciones agroecológicas tropicales del país (Bastidas et al., 1993; Bastidas et al., 2004), lo que ha involucrado varias disciplinas del conocimiento, dentro de las cuales se encuentra la fisiología vegetal.

Con el recurso genético disponible en el Banco de Germoplasma nacional de las palmas de aceite africana (*Elaeis guineensis*) y americana (*Elaeis oleifera*) (Bastidas & Hurtado, 1992; Bastidas et al., 2003b; Corpoica, 2012) y los recursos dispuestos por las entidades citadas arriba, en Colombia se han desarrollado diferentes estudios fisiológicos y ecofisiológicos sobre materiales parentales y sus progenies, algunos de los cuales se describen más adelante.

Esos estudios han contribuido al desarrollo de cuatro cultivares comerciales nacionales de palma de aceite, uno de *E. guineensis* tipo Ténera (cruce Dura × Pisífera)¹ y tres que son híbridos O × G (F1², Pacífico RC1³ y Tumaco RC1⁴) producto del cruzamiento de *E. oleifera* y *E. guineensis*, y que se encuentran en proceso de desarrollo, gracias a investigaciones que han tenido como base principal el C. I. El Mira. Este centro se ubica en la región sur de la Costa Pacífica de Colombia, municipio de Tumaco, departamento de Nariño (1° 32' 58" latitud norte, 78° 41' 21" longitud oeste y 16 m s. n. m.), región de características agroecológicas de bosque húmedo tropical (bh-T).

Ecofisiología

La ecofisiología vegetal estudia las respuestas fisiológicas de las plantas a las condiciones de oferta ambiental, que incluyen la interacción de los materiales genéticos y el ambiente, y los procesos de adaptación.

La palma africana de aceite *Elaeis guineensis* Jacq.

Es una planta perenne, de la familia Arecaceae, originaria de África occidental, monocotiledónea (su semilla tiene un solo cotiledón) y monoica, es decir, las flores están agrupadas en un espádice donde las femeninas y masculinas se producen en ejes independientes. Es alógama, por lo tanto, su polinización es cruzada, con ciclos de floración alternos masculino-femenino. La polinización natural es favorecida por la acción del viento y los insectos (Cav Dwell et al., 2003; Chinchilla & Richardson, 1991).

¹ Híbrido intraespecífico Ténera Corpoica Elmira.

² Híbrido interespecífico F1 O × G Corpoica Elmira.

³ Híbrido interespecífico Pacífico RC1 ([F1 O × G] × G_{pisífera}).

⁴ Híbrido interespecífico Tumaco RC1 ([F1 O × G] × G_{dura}).

El tallo o estípite es la estructura que comunica el sistema radical con las hojas. La palma de aceite presenta un sistema radical fasciculado distribuido en los primeros 60 cm de profundidad del suelo. Las raíces se originan del bulbo (base del tallo) y se extienden radial y horizontalmente para formar raíces primarias, secundarias, terciarias y cuaternarias (Corley & Tinker, 2003; Reyes et al., 1997; Tomlinson, 1990).

Presenta hojas compuestas, pinnadas, con folíolos dispuestos de forma irregular en dos planos. Una palma adulta posee entre 30 y 40 hojas pinnadas, las cuales miden entre 5 y 7 m de longitud según el cultivar. El pecíolo es compacto en su base y está provisto de espinas en los bordes, las cuales se transforman en folíolos rudimentarios a medida que se alejan del tallo. El pecíolo es asimétrico con dos caras: una inferior, redondeada, y otra superior, lisa. Los estomas están localizados en el envés del folíolo (abaxial) con densidad promedio de 146/mm² y son semixeromórficos, es decir, se adaptan para prevenir la pérdida de agua durante largos periodos de sequía (Chaimsohn et al., 2008; Corley & Tinker, 2003). La palma de aceite posee la capacidad natural de sobrevivir a periodos prolongados de sequía y presenta variabilidad genética para la tolerancia al déficit hídrico (Alvarado & Sterling, 2005; Cornaire et al., 1993; Gutiérrez & Villalobos, 1996).

El racimo por lo general es ovoide, con un peso de 2 a 3 kg en palmas jóvenes y 25 kg en adultas (alcanza 100 kg). El fruto es una drupa que adopta varias formas según su posición en el racimo y su coloración exterior varía durante la madurez. El más común es violeta oscuro y naranja rojizo en la madurez y se denomina *nigrescens*. Otro fruto menos común es el que tiene tonalidades entre verdes y naranjas y se denomina *virescens*. Los frutos tienen una forma de esférica a ovoide, y su longitud alcanza de 2 a 5 cm con un peso de 3 a 30 g (Corley & Tinker, 2003; Kushairi, 2008).

El crecimiento, desarrollo y producción de la palma de aceite es el resultado de la interacción entre el material genético y el ambiente de la zona de producción (temperatura, radiación solar, precipitación, humedad relativa y suelos). Los requerimientos climáticos para el cultivo de la palma de aceite se describen en la tabla 6.1. Se resalta que la precipitación debe ser superior a 100 mm/mes y distribuida a lo largo del año, con brillo solar superior a 5 horas/día. Se requieren suelos planos (pendiente < 8 %), de textura franca a franco-arcillosa, sin grava

en los primeros 1,2 m del perfil, con buena aireación y suficiente humedad para las plantas durante todo el año. No tolera mantos freáticos permanentemente altos en suelos impermeables, y se adapta a pH bajos (4,0 a 5,5). Los suelos que favorecen el desarrollo son los limosos profundos y bien drenados (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Kushairi, 2008; Paramanathan, 2003b).

Tabla 6.1. Variables climáticas requeridas para el cultivo de palma de aceite

Factor climático	Rango
Precipitación	2.000 a 2.500 mm/año
Altitud	Menos de 500 m s. n. m.
Temperatura media máxima	29-33 °C
Temperatura media mínima	22-24 °C
Brillo solar	>1.500 horas/año
Humedad relativa	75-85 %

Fuente: Corley & Tinker (2003), Hartley (1983), Kushairi (2008), Paramanathan (2003b)

El sistema fotosintético de la palma de aceite es C3; la fotosíntesis se lleva a cabo en estratos acumulados y superpuestos de las hojas con sombreado entre ellos. Por ello, la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente es absorbida en los diferentes estratos a medida que atraviesa las capas de hojas, lo que permite el óptimo aprovechamiento, y las hojas de los estratos inferiores presentan una tasa fotosintética menor que las hojas de estratos superiores. El área foliar es uno de los factores determinantes de la capacidad fisiológica de la planta y puede ser utilizada para valorar la eficiencia fotosintética y predecir el desempeño productivo de los cultivos. Con respecto al índice de área foliar (IAF), a los diez años se alcanza el valor máximo (8 a 10), el cual varía con la edad de la palma y la densidad de siembra (un IAF de 6 se considera apropiado para una buena producción de racimos) (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003). El estrato foliar donde se presenta máxima interceptación de luz en palmas de nueve años es en las hojas 15 a 20 (Lamade et al., 2009). Se ha determinado que hojas de hasta 21 meses de edad todavía son fotosintéticamente activas (Corley, 1983; Corley & Tinker, 2003). La fotosíntesis neta (F_n) fluctúa entre 3 y 27 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$, influenciada por las condiciones ambientales de los sitios de siembra (humedad, radiación, temperatura) (Corley, 1982, 1983;

Dufrêne & Saugier, 1989; Lamade et al., 2009; Noor et al., 2005; Rodríguez & Villalobos, 1998; Suresh & Nagamani, 2006; Suresh & Reddy, 2005), con valores máximos entre 27 y 32 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ (Lamade & Setiyo, 1996; Lamade et al., 2009) y puntos de saturación de luz de 400, 800 y 1.150 $\mu\text{mol fotones}/\text{m}^2/\text{s}$ (Corley & Tinker, 2003; Hanif, 2006; Henson, 1993; Rodríguez & Villalobos, 1998). La F_n máxima y el déficit de presión de vapor de agua en el aire (DPV) son inversamente proporcionales bajo condiciones de saturación de luz (Setiyo et al., 1996).

La deficiencia de nitrógeno en plántulas en fase de vivero se asoció con la baja concentración de clorofila foliar. Este elemento es un componente estructural de la molécula de clorofila de los aminoácidos y de las coenzimas que son utilizados en las reacciones fotosintéticas.

Las hojas de la parte baja del dosel (sombreadas) pueden presentar mayor concentración de clorofila, asociada a una aclimatación por la baja radiación incidente (Lamade et al., 2009).

En la respiración total, la palma de aceite consume 75 % de los asimilados (CH_2O). Es la respiración de mantenimiento (R_m) la que ocupa el 50 % del proceso, mientras que 25 % corresponde a respiración de crecimiento (R_c), y el 25 % restante a C de ganancia de materia seca, distribuido en los diferentes órganos (raíces, hojas, tallo y racimos) (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003; Henson, 1992). Factores ambientales pueden afectar ese porcentaje y por tanto influenciar en parámetros de crecimiento o producción.

En India, en palmas de 4 a 5 años bajo condiciones de riego, la transpiración es menor en época seca (2,47-4,93 mm/día), mientras que en época húmeda es de 5,94 mm/día (Kallarackal et al., 2004). Las palmas que crecen en condiciones de estrés presentan potenciales hídricos foliares más negativos al medio día ($\Psi_h = -1,8$ MPa) respecto a las que crecen bajo condiciones de riego ($\Psi_h = -1,0$ MPa), debido a que estas últimas mantienen sus estomas cerrados (Kallarackal et al., 2004; Villalobos, 2001). En Costa de Marfil se encontró que, en lotes con riego, la evapotranspiración del cultivo equivalía a 81 % de la evapotranspiración potencial, y la transpiración diaria media presentó un rango de 1,25-2,31 mm/día (Dufrêne et al., 1992). Se sabe que las palmas con estrés hídrico presentan incremento de la temperatura de la hoja, debido a su

menor transpiración (Harun & Noor, 2006). En palma de aceite, la temperatura de la hoja puede ser 10 °C superior a la temperatura ambiente (Hong & Corley, 1976). La temperatura foliar adecuada para la actividad fotosintética es de 38 °C y por encima de esta se genera cierre estomático (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003). Cuando existen temperaturas foliares superiores a 42 °C, la palma consume la mayor parte del CO₂ asimilado por fotosíntesis (Corley, 1982). El incremento en la resistencia estomática causa disminución en la eficiencia fotoquímica y la tasa fotosintética (Lamade et al., 2009).

La productividad primaria de las plantas (biomasa) es una medida de la fotosíntesis total, menos la respiración que ha ocurrido durante su crecimiento. En palmas de vivero de catorce meses de edad, el total de biomasa, incluido el sistema radical, fluctúa entre 815 y 980 g/planta (Reyes et al., 2008). En palmas adultas (trece años) sembradas en densidades de 143 palmas/ha, la biomasa acumulada puede ser de 78,7 t/ha, incluidas raíces e inflorescencias (Corley & Tinker, 2003). El incremento anual de biomasa neta del ecosistema de palma de aceite puede llegar a 17,4 t/ha, y la biomasa en circulación a 11,9 t/ha (Mutert, 1997). En cuanto al efecto de la temperatura sobre el crecimiento del cultivo, se ha determinado que temperaturas del aire inferiores a 15 °C inhiben el crecimiento de la palma, mientras que a 25 °C el crecimiento es siete veces más rápido que a 20 °C (Hartley, 1983).

Los asimilados producidos en la fotosíntesis se distribuyen entre los diferentes órganos de la palma, de acuerdo con su edad (Breure, 2003; Bulgarelli et al., 2002; Corley & Tinker, 2003; Henson, 1992; Reyes et al., 1997, 2008). En palmas de vivero, el orden de distribución y acumulación de asimilados en la planta es similar entre variedades: foliolos > raíces > bulbo > raquis > tallo > base peciolar > pecíolo > hojas flecha (Reyes et al., 2008). No obstante, se ha encontrado que, para la distribución de fotoasimilados, la producción de materia seca total es más o menos constante, con variaciones en la parte destinada a los racimos, según el exceso de fotoasimilados disponible, una vez se han cubierto las necesidades vegetativas (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003). Lo anterior indica que en la palma de aceite el crecimiento vegetativo es prioritario cuando el aporte de asimilados es limitante, como ocurre en la estación seca (Corley et al., 1971).

Henson (1990, 1991) considera que en palmas jóvenes la tasa de fotosíntesis se estimula por el desarrollo de racimos, que actúan como sumidero para los asimilados. Cuando se inicia la producción de racimos, la tasa de fotosíntesis aumenta para satisfacer la demanda de estos sumideros, pero se mantiene un balance con otros órganos que también requieren energía, de manera que se puede restringir el crecimiento vegetativo (Corley & Breure, 1992). El índice de cosecha (la razón del peso seco entre racimos y el total de la planta) se sitúa entre 0,27 y 0,53 (Corley & Tinker, 2003; Villalobos et al., 2001).

En la palma de aceite, la concentración de nutrientes, así como la producción y distribución de biomasa en las diferentes partes de la planta, es variable según suelo, clima y edad. La absorción de nutrientes se incrementa después del primer año de trasplante del vivero al campo. En general, el orden de la demanda es: $K > N > S > Ca > Mg > P > Fe > Mn > Zn > Cu > B$ (Owen, 1996; Ng, 1972). Para palmas adultas (148 palmas/ha) y con una producción de 25 t de racimos por ha/año, la absorción (kg/ha/año) de algunos elementos es la siguiente: nitrógeno (192,5), fósforo (26,0), potasio (251,4), calcio (99,3), magnesio (61,3).

La demanda por nutrientes es mayor en palmas jóvenes en crecimiento activo (sobre todo por las hojas y raíces) y disminuye en palmas adultas, debido en parte a que los nutrientes son recirculados desde las hojas e inflorescencias senescentes. No obstante, en cultivos comerciales las hojas son podadas y estas, junto con restos de inflorescencias, son recicladas una vez se descomponen en el suelo. Se estima que se producen hasta 10 t de hojas por ha/año, lo cual representa aproximadamente 75 kg de N, 10,6 kg de P, 98,1 kg de K y 27,9 kg de Mg (Basiron et al., 1998).

El tronco o estípote mantiene una demanda sostenida de nutrientes para sostener su crecimiento con la edad, pero es la cosecha de racimos lo que tiene mayor impacto, dado que estos son retirados del sistema, aunque parte de ellos puede retornar al campo en forma de racimos vacíos y efluentes desde la planta extractora de aceite (Kushairi, 2008; Paramanathan, 2003a). La práctica de sembrar una leguminosa de cobertura también representa una fuente importante de nutrientes para el sistema, que ayuda en el largo plazo a reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos (Basiron et al., 1998; Kushairi, 2008; Wood, 2007).

La palma americana de aceite *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés

Es una especie perenne, denominada anteriormente como *Elaeis melanococca*. Se le conoce en Colombia como corozo o nolí y en Brasil como *caiaué*. Es originaria de América y se encuentra en países tropicales de Centro y Suramérica, incluida Colombia.

La principal característica de esta palma, que la distingue de *E. guineensis*, es que en condiciones naturales su tronco presenta crecimiento rastrero (procumbente), que alcanza más de 7 m de largo, y su copa tiene una posición erecta, de 1,5 a 3,0 m de alto (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977). En el C. I. El Mira, las palmas de la colección de la especie plantadas en campo han mantenido el tallo erecto por 36 años y se ha comprobado que crecen mucho más lento en longitud que *E. guineensis*.

La hoja de *E. oleifera* presenta todos los foliolos en inserción simple (un solo plano), sin engrosamiento basal, y las espinas del pecíolo son cortas y gruesas, a diferencia de *E. guineensis*, que presenta los foliolos en inserción doble (dos planos). Los racimos pesan entre 8 y 12 kg, pero a veces llegan a 30 kg. Generalmente son redondos y anchos en su centro, y tienden a ser puntiagudos en el ápice, lo que les permite tener apariencia cónica, a diferencia de los racimos de *E. guineensis*, que son de forma ovoide. La capa de mesocarpio del fruto es delgada y a menudo constituye 29 a 42% del fruto normal, aunque llega a más del 80% en el fruto partenocárpico. El aceite en el mesocarpio varía entre 16 y 38%. La relación fruto normal-racimo es baja, de 28 a 46%, y la relación fruto partenocárpico-racimo puede variar de 9 a 25%.

Comparado con *E. guineensis*, el aceite tiene mayores contenidos de ácidos grasos insaturados y en especial de ácido oleico. No hay evidencias de que la especie presente formas de fruto comparables a Dura, Ténera y Pisífera (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977).

El híbrido *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*

La explotación comercial de la palma *E. oleifera* puede ser de interés por su resistencia a disturbios como la pudrición del cogollo, por su lento crecimiento en altura y la calidad de su aceite, aunque su limitante es la baja producción

de aceite en condiciones de plantación. Como no hay tipos Ténera en la especie, se impone la utilización de híbridos interespecíficos $O \times G$ entre *E. oleifera* y *E. guineensis*, debido a su posible adaptación a climas con fuertes estaciones secas, a su posible resistencia a enfermedades y a su producción de aceite con una mayor proporción de ácidos grasos no saturados que la palma *E. guineensis* (Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977).

Genéticamente, el género *Elaeis* (especies *E. oleifera* y *E. guineensis*) tiene 16 pares de cromosomas (número diploide, $2n = 32$), lo que facilita su cruzamiento. Los híbridos $O \times G$, F1 y RC1 se caracterizan por tener hojas más largas que las de sus progenitores, pero manifiestan las características de *E. oleifera* en lo que se refiere a disposición de foliolos, tasa de crecimiento, forma del racimo, partenocarpia y forma del fruto. Pero en cuanto a producción de aceite en plantación, sus rendimientos son generalmente menores que los de *E. guineensis*. Por otra parte, han presentado resistencia diferencial a la pudrición del cogollo (Bastidas et al., 2003a, 2007, 2011; Corley & Tinker, 2003; Hartley, 1983; Patiño, 1977; Preciado, 2010). En la actualidad, se considera que una de las alternativas que tienen los palmicultores para zonas afectadas por la PC es la siembra de cultivares resistentes a la enfermedad, resultantes de cruzamientos $O \times G$ (*E. oleifera* \times *E. guineensis*). El uso de la polinización asistida o la aplicación del regulador de crecimiento ANA a las inflorescencias de híbridos $O \times G$, y la aplicación de la escala de punto óptimo de cosecha, han permitido elevar su producción de aceite a tasas y rendimientos similares, incluso con ANA superiores a los de las palmas Ténera (*E. guineensis*). Sin embargo, es necesario seguir investigando los efectos sobre las plantas del uso a largo plazo del regulador de crecimiento (Romero, 2018; Romero et al., 2020; Sinisterra et al., 2019).

AGROSAVIA, mediante el Banco de Germoplasma de especies palmáceas del país, ejecuta un programa de introgresión de genes entre las especies *E. oleifera* y *E. guineensis*, que ha incluido su retrocruzamiento, lo que permite disponer de genotipos $O \times G$, F1 y RC1 en fase de evaluación como cultivares comerciales (S. Bastidas et al., 1993, 2003a, 2003b, 2007; L. E. Bastidas et al., 2008a; Preciado et al., 2011). Como resultado, se obtuvo el Registro ICA para tres de ellos: $O \times G$ Corpoica Elmira, Pacífico RC1 y Tumaco RC1. Mediante trabajo conjunto de Cenipalma y AGROSAVIA se determinó el punto óptimo de cosecha para el cultivar $O \times G$ Corpoica Elmira (Sinisterra et al., 2019).

En general, la fisiología de la función productiva de la palma de aceite se describe en el esquema de la figura 6.1. Se observa la importancia del genotipo, de las prácticas agronómicas y del ambiente, para la obtención de una buena producción biológica y económica.

Algunos estudios realizados en Colombia

En esta sección, se describen estudios relacionados con la ecofisiología de la palma de aceite, que forman parte del programa de mejoramiento genético que ejecuta AGROSAVIA.

Crecimiento en vivero

Una de las principales bases para tener una plantación de palma de aceite productiva, competitiva y sostenible es obtener, en la etapa de vivero, plantas de buen crecimiento, que inicien en campo la producción de racimos y alcancen su máximo rendimiento en el menor número de meses (Bulgarelli et al., 1993; Chinchilla et al., 1990; Corley & Tinker, 2003; Umaña et al., 1990). Para ello, es necesario y útil disponer en las regiones palmeras de estudios de crecimiento locales de los diversos materiales de siembra, que puedan ser utilizados como guía o referencia para seguir el crecimiento de las palmas en vivero y seleccionar antes de la siembra en campo (Bulgarelli et al., 1993). En esta selección se descarta alrededor del 15 al 25 % de la población del vivero por no cumplir con los parámetros de crecimiento requeridos para un material plantable de buena calidad (Chee et al., 1998; Vallejo, 1987).

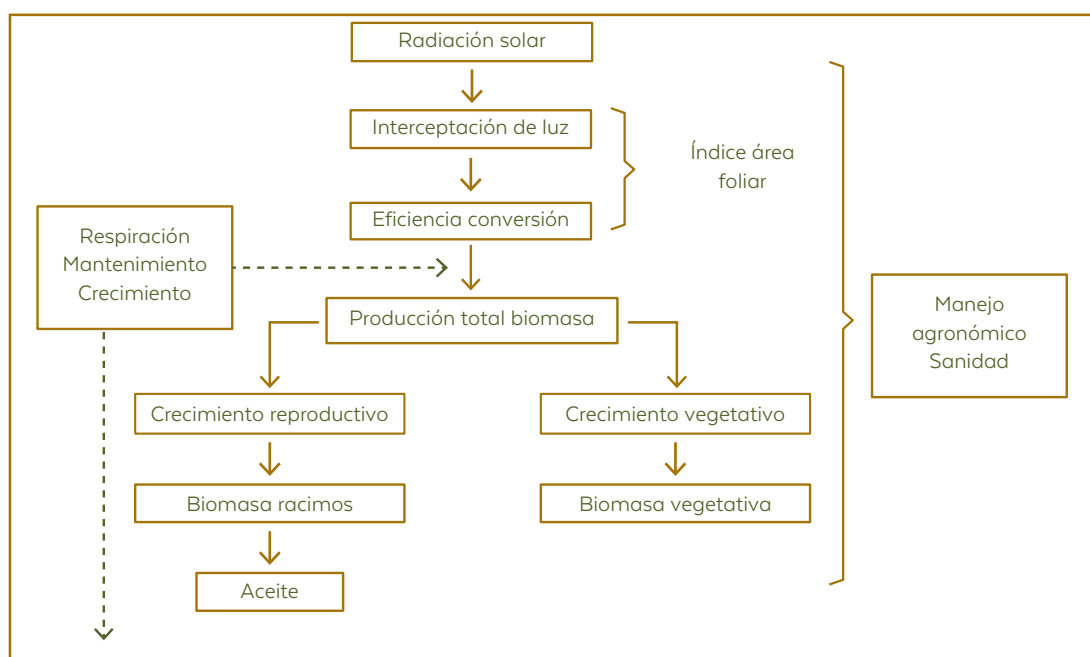


Figura 6.1. Fisiología de la función productiva en palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia

Debido a su importancia, se realizaron en Tumaco, Colombia, estudios de crecimiento en la etapa de vivero de *E. guineensis* y de los híbridos O × G de *E. oleifera* × *E. guineensis*.

Para la palma africana de aceite (*E. guineensis*) tipo Ténera se realizó un estudio en condiciones de vivero tradicional, en bolsas plásticas con suelo arenoso, y con cuatro variedades comerciales: Tanzania × Ekona, Deli × Yangambi (1, Costa Rica), Deli × Avros y Deli × Yangambi (2, Corpoica, Colombia⁵) (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008). El último material fue obtenido por Corpoica y el ICA, a partir de estudios con material genético del Banco Nacional de Germoplasma de la especie de Colombia (Bastidas et al., 2003b, 2004, 2006).

Se observaron para el diámetro del bulbo (DB) y la altura de la planta (AP) diferencias entre cultivares, explicadas por las tasas diferenciales de crecimiento transversal del bulbo y la altura (tabla 6.2; figuras 6.2, 6.3). Por

⁵ Cultivar Ténera Corpoica Elmira de palma de aceite. Híbrido intraespecífico entre los tipos Dura y Pisífera de la especie *E. guineensis*. Registro ICA PLA-04-3 de abril de 2004.

su parte, el número de hojas por planta y la mayoría de componentes de la hoja también presentaron diferencias (tablas 6.2, 6.3). Esto evidenció la probable existencia de un mecanismo propio de la especie, manifestado en cada cultivar, para la organización de su aparato fotosintético, en unas condiciones ambientales específicas (Reyes et al., 2008).

Tabla 6.2. Variables de crecimiento de plantas de vivero en bolsas plásticas, de cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia)

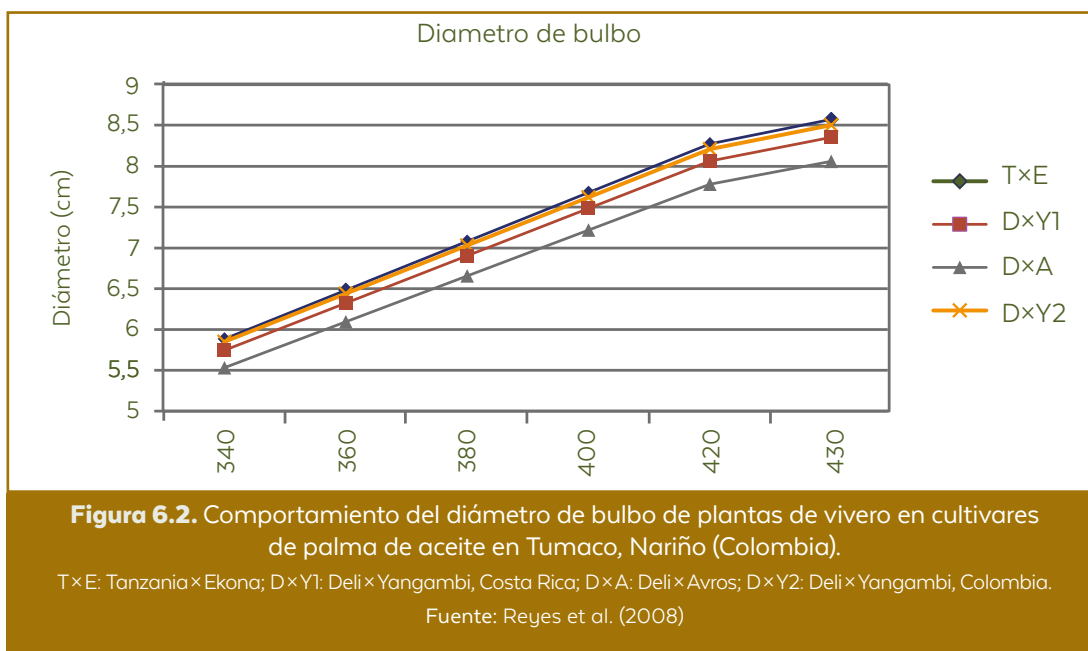
Época	Cultivares	Diámetro del bulbo (DB) (cm)	Altura de planta (AP) (cm)	Hojas por planta (HPL) (n.º)
432 DDS	Tanzania × Ekona	9,72a	34,48b	13,88ab
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	9,49ab	35,56ab	14,04a
	Deli × Avros	9,10b	37,12a	12,84c
	Deli × Yangambi (Colombia)	9,57ab	33,32b	13,4bc
	Coefficiente de variación (cv) (%)	7,9	8,81	6,31
	F (variedades)	*	**	**

DDS: días después de siembra, incluidos 71 días de previvero.

*Significativo al 5% y **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher), respectivamente.

Nota : Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)



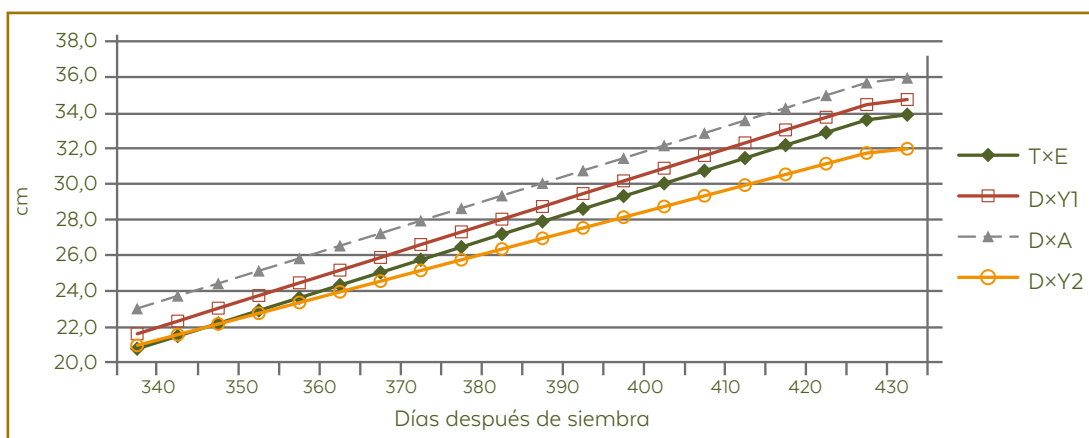


Figura 6.3. Comportamiento de altura de plantas de vivero en cultivares de palma de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia).

T×E: Tanzania×Ekona; D×Y1: Deli×Yangambi, Costa Rica; D×A: Deli×Avros; D×Y2: Deli×Yangambi, Colombia.

Fuente: Reyes et al. (2008)

Tabla 6.3. Características de la hoja 4 de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Foliolos				Longitud			Pecíolo		Área sección pecíolo (P × S) (cm ²)	Foliolos por metro de raquis (FMR) (n.º)
		Número por hoja (FPH)	Longitud (LF) (cm)	Ancho (ADF) (cm)	Área hoja (AH) (m ²)	Pecíolo (LP) (cm)	Raquis (LR) (cm)	Hoja (LH) (cm)	Ancho (s) (cm)	Grosor (p) (cm)		
432 DDS	Tanzania×Ekona	62,8a	33,9a	2,81a	0,2051a	10,28a	78,73a	89,01a	1,68a	0,94a	1,59a	79,8a
	Deli×Yangambi (Costa Rica)	58,6b	40,3b	2,71a	0,1937a	9,34b	90,01b	99,35b	1,73a	0,93a	1,61a	66,1b
	Deli×Avros	59,2ab	39,2b	2,79a	0,2117a	10,85ab	93,12b	103,97b	1,79ab	0,91a	1,65a	63,6b
	Deli×Yangambi (Colombia)	57,9b	36,7c	2,87a	0,2205a	8,72c	88,98b	97,70b	1,88b	1,05b	1,97b	63,7b
	cv (%)	8,17	6,95	7,47	20,35	13,9	9,71	9,11	10,36	12,3	19	10,97
	F (variedades)	**	**	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**

ns: no significativo, *significativo al 5% y **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher), respectivamente.

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

En cuanto al destino de los asimilados producidos, los cuatro cultivares evaluados presentaron el siguiente orden de distribución y acumulación de fotoasimilados: folíolos > raíces > bulbo > raquis > tallo > base peciolar > peciolo > hoja flecha. En la hoja, la disposición fue la siguiente: folíolos > raquis > peciolo. Todo lo anterior está relacionado con las características de sumidero de cada órgano (tablas 6.4, 6.6) (Reyes et al., 2008).

Tabla 6.4. Distribución de la biomasa de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Distribución de materia seca (%)							
		Raíces	Bulbo	Tallo	Base peciolar	Peciolo	Raquis	Foliolos	Flecha
432 DDS	Tanzania × Ekona	22,7a	18,2a	7,9a	5,4a	3,4a	13,2a	26,6a	2,7a
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	17,2a	18,3a	10,9a	5,5a	3,1a	15,6a	27,4a	2,2a
	Deli × Avros	19,3a	17,1a	8,9a	5,5a	3,2a	15,6a	27,7a	2,6a
	Deli × Yangambi (Colombia)	17,0a	18,1a	8,3a	4,8a	3,2a	16,0a	30,2a	2,5a
	cv (%)	28,12	13,94	40,95	20,21	22,85	16,45	14,31	32,15
	F (variedades)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo, por la prueba F (Fisher).

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

En cuanto a la planta, no se presentaron diferencias entre cultivares para la razón de área foliar (RAF) (área foliar de la planta $[AF]$ /materia seca total planta $[PSP]$) y para el área foliar específica (AFE) (área de la hoja $[AH]$ /materia seca de la hoja) (tabla 6.5) (Reyes et al., 2008), lo que indica que la proporción entre el tamaño de la fuente de asimilados (AF) y el tamaño del sumidero de asimilados (PSP) en todos los cultivares no se alteró por factores externos, y se expresó lo correspondiente a factores internos (genéticos) de la especie y cultivares (Benincasa, 1988; Kvet et al., 1971). No se presentaron diferencias significativas entre cultivares para la razón materia seca parte área/sistema radical (PA/SR) (tabla 6.5) (Reyes et al., 2008), lo que indica que las variables están determinadas genéticamente y no fueron influenciadas por el ambiente (Marschner, 1986; Rodríguez & Leihner, 2006).

Tabla 6.5. Razones de área y peso foliar, parte aérea, sistema radical y área foliar específica, de plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Razón de área foliar (RAF) cm ² /g	Razón de peso foliar (RPF) g/g	Área foliar específica (AFE) cm ² /g	Razón parte aérea/sistema radical (PA/SR)
432 DDS	Tanzania × Ekona	33a	0,27a	130a	3,48a
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	34a	0,27a	120a	4,8a
	Deli × Avros	29a	0,27a	110a	4,3a
432 DDS	Deli × Yangambi (Colombia)	32a	0,30a	110a	4,9a
	CV (%)	16,78	14,31	16,74	37,89
	F (variedades)	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo, por la prueba de F (Fisher).

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

Para la biomasa de la hoja, así como para su distribución porcentual entre los diferentes componentes, se presentaron diferencias significativas entre cultivares para los componentes raquis y foliolos, pero no para el pecíolo (tabla 6.6) (Reyes et al., 2008). Se presentó mayor contenido de materia seca en el cultivar Deli × Yangambi (Corpoica) y menos en el cultivar Tanzania × Ekona. Sin embargo, los cultivares mostraron un crecimiento armónico entre las diferentes partes de la planta, con similar distribución y acumulación de asimilados en sus órganos, así como similares AH, AF e IAF (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008, 2009).

Tabla 6.6. Biomasa de la hoja y su distribución en plantas de vivero en bolsas plásticas de cultivares de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Época	Cultivares	Materia seca hoja (g/hoja)					Distribución materia seca hoja (%)	
		Pecíolo (PSPe)	Raquis (PSRA)	Foliolos (PSF)	Hoja (PSH)	Pecíolo	Raquis	Foliolos
432 DDS	Tanzania × Ekona	3,463a	11,176a	29,379a	44,018a	7,9a	25,4a	66,7a
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	2,798a	13,499ab	29,484a	45,780a	6,1b	29,5b	64,4b
	Deli × Avros	3,421a	14,806bc	32,383ab	50,611ab	6,8ab	29,3b	64,0b
	Deli × Yangambi (Colombia)	3,441a	15,902c	35,570b	54,912b	6,3ab	29,0b	64,8ab
	cv (%)	36,57	23,45	22,15	21,61	3,66	7,86	4,4
	F (variedades)	ns	**	**	**	*	**	*

ns: no significativo, *significativo al 5% y **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher), respectivamente.

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2008)

Además, para las palmas que crecieron en vivero en Tumaco, se determinó lo siguiente: 1) el área de la hoja puede ser estimada, para cada cultivar, con ecuaciones ajustadas del tipo $AHE = C \times (n \times l \times a)$ (tabla 6.7) (Reyes et al., 2008); 2) el peso seco de la hoja puede estimarse, para cada cultivar, con modelos ajustados del tipo $PSHE = FC^*(P \times S)$ (tabla 6.7) (Reyes et al., 2008).

También se determinaron las ecuaciones del tipo $Y = a + bX$ para diámetro del bulbo (DB) y altura de planta (AP) en cada cultivar durante periodos específicos, así como las tasas (cm/día) de crecimiento transversal de bulbo y altura de planta (tabla 6.8) (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008). Estas curvas son útiles como guía o referencia para seguir el crecimiento de las palmas de vivero y seleccionarlas antes de la siembra en campo, y no están disponibles en la región palmera de Tumaco. Son útiles también las determinadas para estimar el área y el peso seco de la hoja.

Tabla 6.7. Ecuaciones y modelos para estimar el área de la hoja (A) y su peso seco (w), en plantas de vivero en bolsas plásticas de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia), 432 DDS

Cultivares	Ecuaciones área de la hoja (m ²)	Modelos peso seco de la hoja (kg)
Tanzania × Ekona (T × E)	$A (T \times E) = 0,34 \times (n \times L \times a)^*$	$W (T \times E) = 0,028 \times (P \times S)^{**}$
Deli × Yangambi (Costa Rica) (D × Y1)	$A (D \times Y1) = 0,30 \times (n \times L \times a)$	$W (D \times Y1) = 0,028 \times (P \times S)$
Deli × Avros (D × A)	$A (D \times A) = 0,32 \times (n \times L \times a)$	$W (D \times A) = 0,031 \times (P \times S)$
Deli × Yangambi (Colombia) (D × Y2)	$A (D \times Y2) = 0,37 \times (n \times L \times a)$	$W (D \times Y2) = 0,028 \times (P \times S)$
Promedio especie (PE)	$A (PE) = 0,33 \times (n \times L \times a)$	$W (PE) = 0,029 \times (P \times S)$

* n: número de foliolos por hoja; L × a: promedio de largo por el ancho de foliolos en cm².

** P × S: sección transversal del peciolo en cm².

Fuente: Reyes et al. (2008)

Tabla 6.8. Ecuaciones para estimar diámetro de bulbo (DB) y altura de planta (AP) en plantas de vivero en bolsas plásticas de palma africana de aceite en Tumaco, Nariño (Colombia)

Variable	Cultivares	Ecuación	R ²	Tasa de crecimiento cm/día	Periodo DDS*
Diámetro del bulbo	Tanzania × Ekona	$DB = -4,282 + 0,02999 \text{ DDS}$	0,90	0,0299	123-432
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	$DB = -4,115 + 0,02900 \text{ DDS}$	0,92	0,0290	123-432
	Deli × Avros	$DB = -4,022 + 0,02810 \text{ DDS}$	0,91	0,0281	123-432
	Deli × Yangambi (Colombia)	$DB = -4,180 + 0,02950 \text{ DDS}$	0,93	0,0295	123-432
Altura de planta	Tanzania × Ekona	$AP = -27,77 + 0,1427 \text{ DDS}$	0,80	0,1427	331-432
	Deli × Yangambi (Costa Rica)	$AP = -27,00 + 0,1429 \text{ DDS}$	0,81	0,1429	331-432
	Deli × Avros	$AP = -24,83 + 0,1407 \text{ DDS}$	0,75	0,1407	331-432
	Deli × Yangambi (Colombia)	$AP = -19,79 + 0,1198 \text{ DDS}$	0,70	0,1198	331-432

* Periodo de aplicación de ecuaciones días después de siembra (DDS).

Fuente: Reyes et al. (2008)

Con los mismos cuatro cultivares *E. guineensis* tipo Ténera del estudio anterior, se evaluó el crecimiento en vivero en materos plásticos con dos suelos de diferentes propiedades físicas, uno franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.) y el otro arenoso franco (A. Fr.) (tabla 6.9).

En el suelo arenoso franco, y en relación con el franco-arcillo-limoso, todos los cultivares presentaron mayor valor de diámetro del bulbo (DB), área de la hoja (AH), longitud del foliolo (LF), sección transversal del pecíolo ($P \times S$), área foliar (AF), peso seco de la hoja (PSH) y peso seco de hojas (PSDH). Entre tanto, en el suelo franco-arcillo-limoso, en comparación con el suelo arenoso franco, solo presentaron mayor valor en tasa de emisión foliar (TEF) y foliolos por metro de raquis (FMR) (tablas 6.10, 6.11) (Reyes, 2010; Reyes et al., 2009). Lo anterior mostró que las condiciones de mejor espacio aéreo y aireación que brindó el suelo de menor retención de humedad y mayor drenaje (suelo arenoso franco) (tabla 6.9) favorecieron el crecimiento de los cultivares evaluados, y se determinó que, en las condiciones ambientales de Tumaco, los suelos del tipo arenoso franco son más adecuados para viveros de palma de aceite africana, que los del tipo franco-arcillo-limoso.

Tabla 6.9. Características físicas de los dos tipos de suelo de Tumaco, Nariño (Colombia), empleados en el estudio

Suelo	Profundidad (cm)	Textura*	Profundidad (cm)	Retención de humedad en humedad volumétrica (%)				Espacio aéreo (EA) (%)			
				MPa de determinación							
				0,03	0,15	1,00	1,50				
Franco-arcillo-limoso (PT)	0-20	F. L.	0-5	49,06	46,91	45,61	44,54	19,20	21,35	22,65	23,72
	20-40	F. Ar. L.	5-10	46,94	45,61	44,39	43,46	16,29	17,62	18,84	19,77
Arenoso franco (PR)	0-20	A. Fr.	0-5	43,06	41,66	40,66	39,88	30,32	31,72	32,72	33,5
	20-40	A. Fr.	5-10	45,21	43,59	42,55	41,74	29,97	31,59	32,63	33,44

F. L.: franco limoso; F. Ar. L.: franco-arcillo-limoso; A. Fr.: arenoso franco.

* Bouyoucos.

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2009, 2013a)

En relación con los cultivares, se observó que Deli × Avros y Tanzania × Ekona presentaron los mayores valores en DB y FMR, en tanto que Deli × Yangambi (Colombia) presentó los mayores valores para AH y AF (tablas 6.10, 6.11) (Reyes et al., 2009). Probablemente, debido a los atributos genéticos de tolerancia a baja luminosidad de Tanzania × Ekona y Deli × Yangambi (Colombia), condición del sitio del estudio, el híbrido Deli × Avros es considerado de baja tolerancia. Sobre el particular, Benincasa (1988) indica que los límites de luminosidad soportables por la planta son una característica genética.

Tabla 6.10. Características de crecimiento de plantas de vivero de palma africana de aceite en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia), 499 DDS

Cultivares	Diámetro de bulbo (cm)		Tasa de emisión foliar (hojas/mes)		Altura de planta (cm)		Área foliar por planta (m ²)		Índice de área foliar	
	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)
Tanzania × Ekona	11,55a	11,95a	2,03b	1,98a	33,53c	35,45b	3,60ab	4,347a	3,6ab	4,3a
Deli × Yangambi (Costa Rica)	11,11ab	11,93a	2,23a	2,05a	41,94a	39,53a	2,765ab	3,643a	2,8 b	3,6a
Deli × Avros	10,65b	11,30ab	2,00b	1,85b	40,52a	37,60b	3,677a	3,794a	3,7a	3,8a
Deli × Yangambi (Colombia)	10,72b	11,09b	2,23a	2,05a	37,20b	35,85b	4,416a	4,729a	4,4a	4,7a
cv (%)	7,72	7,83	11,11	11,11	8,72	7,09	14,84	18,37	14,84	18,37
F (genotipos)	**	**	**	*	**	**	**	ns	**	ns

ns: no significativo, **altamente significativo, por la prueba de Fisher, respectivamente.

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

Fuente: Reyes et al. (2009)

Tabla 6.11. Características de la hoja 4 de plantas de vivero de palma africana de aceite en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia), 499 DDS

Cultivares	Área hoja (m ²)		Longitud hoja (cm)		Foliolos por metro de raquis (n.º)		Materia seca hoja (kg/hoja)	
	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)	Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L)	Suelo arenoso franco (A. Fr)
Tanzania × Ekona	0,2725a	0,2860ab	119,5ab	110,7 b	71,8a	69,3a	0,067a	0,068a
Deli × Yangambi (Costa Rica)	0,1890b	0,2312b	110,1b	137,7a	61,4b	54,3b	0,062a	0,071ab
Deli × Avros	0,2553a	0,2631ab	134,4a	130,1ab	61,4b	57,5b	0,067a	0,084b
Deli × Yangambi (Colombia)	0,2869a	0,3191a	113,4b	123,6ab	68,1ab	60,2ab	0,069a	0,074ab
cv (%)	13,23	16,56	8,48	8,93	6,08	9,65	14,06	10,94
F (genotipos)	**	*	**	*	**	**	ns	*

ns: no significativo, *significativo al 5%, **altamente significativo al 1%, por la prueba de F (Fisher),

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.

respectivamente.

Fuente: Reyes et al. (2009)

Por su parte, Deli × Yangambi (Colombia) presentó con respecto a Deli × Yangambi (Costa Rica) menor valor para AP y mayor valor para AH (tablas 6.10, 6.11) (Reyes et al., 2009), comportamiento probablemente asociado a la adaptación de Deli × Yangambi (Colombia) a las condiciones ambientales del sitio de estudio (Tumaco, Colombia), en el cual fueron evaluados y seleccionados sus progenitores (Bastidas et al., 2003b, 2004, 2006).

Además, para diferenciar materiales de palmas en etapa de vivero con el uso de suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.) y arenoso franco (A. Fr.) como sustrato, se observó que las variables de crecimiento vegetativo discriminantes son diámetro del bulbo, emisión foliar, altura de planta, área de la hoja 4 y número de foliolos (Reyes et al., 2009). En los cuatro cultivares y periodos específicos, también se determinaron ecuaciones del tipo $Y = a + bX$, para la estimación de curvas de referencia del comportamiento del DB y AP en palmas que crecen en

vivero dentro de baldes plásticos (tabla 6.12) (Reyes et al., 2009), y en las obtenidas para viveros tradicionales en bolsas plásticas (tabla 6.8). Asimismo, se determinaron las tasas (cm/día) de crecimiento transversal de bulbo y altura (Reyes, 2010; Reyes et al., 2008, 2009).

Tabla 6.12. Ecuaciones que describen el crecimiento de plantas de vivero de palma africana en materos plásticos y con dos tipos de suelo en Tumaco, Nariño (Colombia)

Variable	Cultivares	Suelo	Ecuación	R ²	Tasa de crecimiento (cm/día)	Periodo DDS*
Diámetro de bulbo (cm, DB)	Tanzania × Ekona	Franco-arcillo-limoso	$DB = -6,299 + 0,0351 \text{ DDS}$	0,95	0,0351	220-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		$DB = -6,510 + 0,0358 \text{ DDS}$	0,94	0,0580	220-499
	Deli × Avros		$DB = -5,736 + 0,0334 \text{ DDS}$	0,95	0,0334	220-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		$DB = -5,476 + 0,0322 \text{ DDS}$	0,97	0,0322	220-499
	Tanzania × Ekona	Arenoso franco	$DB = -5,947 + 0,0354 \text{ DDS}$	0,96	0,0354	220-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		$DB = -6,394 + 0,0370 \text{ DDS}$	0,96	0,0370	220-499
	Deli × Avros		$DB = -5,688 + 0,0341 \text{ DDS}$	0,95	0,0341	220-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		$DB = -4,945 + 0,0317 \text{ DDS}$	0,97	0,0317	220-499
Altura de planta (cm, AP)	Tanzania × Ekona	Franco-arcillo-limoso	$AP = -11,94 + 0,0984 \text{ DDS}$	0,74	0,0984	310-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		$AP = -19,36 + 0,1222 \text{ DDS}$	0,87	0,1222	310-499
	Deli × Avros		$AP = -8,807 + 0,1006 \text{ DDS}$	0,80	0,1006	310-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		$AP = -15,19 + 0,1046 \text{ DDS}$	0,87	0,1046	310-499
	Tanzania × Ekona	Arenoso franco	$AP = -7,985 + 0,0898 \text{ DDS}$	0,81	0,0898	310-499
	Deli × Yangambi (Costa Rica)		$AP = -10,07 + 0,1011 \text{ DDS}$	0,90	0,1011	310-499
	Deli × Avros		$AP = -2,767 + 0,0831 \text{ DDS}$	0,81	0,0831	310-499
	Deli × Yangambi (Colombia)		$AP = -7,717 + 0,0872 \text{ DDS}$	0,85	0,0872	310-499

* Días después de siembra

Fuente: Reyes et al. (2009)

Con los mismos dos suelos del estudio anterior, de diferente retención de humedad y espacio aéreo (espacio poroso) (tabla 6.9), se evaluó el crecimiento y desarrollo en etapa de vivero de los cultivares híbrido interespecífico F1 O×G (*E. oleifera*×*E. guineensis*) y palma africana de aceite Ténera D×P (*E. guineensis*×*E. guineensis*) de AGROSAVIA (Ibarra-Ruales & Reyes-Cuesta, 2015). Se encontró que el cultivar F1 O×G presentaba mayor crecimiento que el Ténera D×P en la mayoría de variables biométricas evaluadas y en la acumulación total de biomasa por planta. Además, se identificaron y seleccionaron tres características morfológicas discriminantes para diferenciar el comportamiento del crecimiento en los dos tipos de cultivares con respecto al suelo empleado en el vivero: área sección del pecíolo (P×S), largo del raquis (LR) y emisión foliar (EF).

Asimismo, se determinó la acumulación y distribución de biomasa por órgano de los dos cultivares, y se encontró la siguiente preferencia de distribución para el cultivar F1 O×G: folíolos > bulbo > raíces > base peciolar > tallo > pecíolo > hoja flecha > raquis. El cultivar F1 O×G presentó diferencias con respecto al cultivar Ténera D×P (folíolos > bulbo > raíces > tallo > pecíolo > base peciolar > hoja flecha > raquis). Esto indica que el patrón de distribución de asimilados es diferente, y que con respecto a D×P, se destaca en el cultivar F1 O×G la capacidad de destinar mayor proporción de asimilados a formar sistema radical en la planta (tabla 6.13). Asimismo, los resultados obtenidos permitieron determinar que los suelos del tipo franco-arcillo-limoso favorecen el crecimiento en vivero del cultivar híbrido F1 O×G, mientras que los de tipo arenoso franco favorecen el de Ténera D×P (Ibarra-Ruales & Reyes-Cuesta, 2015).

Tabla 6.13. Biomasa de raíces, parte aérea y razón parte aérea sistema radical (PA/SR) de las palmas de aceite híbrido O×G y Ténera D×P en vivero, en Tumaco, Nariño (Colombia), 330 DDS

Factor		Biomasa (g/planta)		PA/SR
		Raíces	Parte aérea	
Suelos	Franco-arcillo-limoso	160,1a	718,5a	4,4a
	Arenoso franco	240,9b	847,7b	3,5b
Materiales genéticos	Híbrido F1 (O×G)	239,3b	867,6b	3,6b
	Ténera (D×P)	171,7a	688,6a	4,0a

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%.
Fuente: Ibarra-Ruales & Reyes-Cuesta (2015)

Adicionalmente, en el C. I. El Mira (Tumaco, Nariño), se evaluó en campo el crecimiento en vivero dentro de bolsas plásticas de seis genotipos de palma provenientes del programa de mejoramiento genético de AGROSAVIA: G × G (D × P), O × G F1 (P), O × G F1 (D), O × G RC1, O × G RC2 y O × G RC3 (tabla 6.14) (Loaiza et al., s. f.).

Se aplicaron tratamientos correspondientes a dos ambientes de condiciones de manejo agronómico del vivero, a plantas con etapa previa de previvero de 90 días:

Manejo agronómico tradicional: Se implementaron las prácticas agronómicas comunes utilizadas por los cultivadores en la región de Tumaco, Nariño (sustrato suelo, riego, fertilización, manejo de arvenses, manejo de plagas y enfermedades).

Manejo agronómico modificado: Se siguieron las recomendaciones y prácticas agrícolas generadas por AGROSAVIA y otras entidades y empresa privada, con ajustes en lo concerniente a sustrato (suelo + inclusión abono orgánico), elemento bioestimulante del sistema radical, fertilización edáfica y foliar, y aplicación de productos sintéticos y biológicos como preventivos contra ataques de artrópodos y microorganismos.

Tabla 6.14. Materiales genéticos de palma de aceite evaluados

Materiales genéticos			
Genotipo	N.º	Tipo	Cruzamientos
G1	1	G × G Ténera	$Eg \times Eg$
G2	2	O × G F1 (P)	$Eo \times Eg$
G3	3	O × G F1 (D)	$Eo \times Eg$
G4	4	O × G RC1	$(Eo \times Eg) \times Eg$
G5	5	O × G RC2	$([Eo \times Eg] \times Eg) \times Eg$
G6	6	O × G RC3	$([Eo \times Eg] \times Eg) \times Eg$

P: Pisífera; D: Dura; Eg (G): *Elaeis guineenses*; Eo (O): *Elaeis oleifera*.

Fuente: Loaiza et al. (s. f.)

A los 218 días de la siembra en vivero, se observaron diferencias estadísticas significativas en el desarrollo de las palmas entre ambientes de manejo agronómico ($P > 0,05$). Todos los genotipos presentaron mejor desarrollo cuando crecieron en ambiente de manejo agronómico modificado (en comparación con el tradicional). El manejo agronómico modificado permitió obtener plantas de mayor biomasa (250,60 g/planta) en relación con el manejo tradicional (154,92 g/planta) (tabla 6.15), y con mayor altura (23,4 cm), diámetro del tallo (6,96 cm), área de sección del pecíolo de la hoja 4 (1,32 cm²) y área foliar (1,18 m²), que con el tradicional (17,37 cm, 5,50 m, 0,96 cm² y 0,89 m², respectivamente). Lo anterior evidencia que las condiciones de manejo agronómico modificado brindan a las palmas un mejor ambiente para su crecimiento y desarrollo, lo cual constituye un aporte al manejo agronómico de los viveros de palma de aceite (Loaiza et al., s. f.).

Tabla 6.15. Valores de biomasa de seis genotipos de palma de aceite en dos ambientes de manejo agronómico del vivero (modificado, tradicional), 218 DDSV, Tumaco, Nariño (Colombia)

Genotipo	Biomasa (g/planta)					
	Raíces		Foliolos		Peso total planta	
	Modificado	Tradicional	Modificado	Tradicional	Modificado	Tradicional
Ténera	90,12a	33,49ab	104,72a	37,62ab	365,73a	127,91ab
O × G F1 (P)	87,69a	41,74a	97,71ab	64,69a	330,8a	208,26a
O × G F1 (D)	84ab	35,46ab	86,04ab	49,5a	303,13a	151,25ab
O × G RC1	48,07cb	25,47ab	71bc	52,81a	221,54b	159,68ab
O × G RC2	17,93c	18,95b	22,47d	18,73b	75,96c	92,36b
O × G RC3	56,52ab	46,45a	56,62c	52,12a	206,47b	190,08ab
Ambientes	64,6a	33,59b	73,09a	45,91b	250,6a	154,92a

DDSV: días después de siembra en vivero más 90 días de previvero.

Nota: Las medias en las columnas seguidas con letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p < 0,05$).

Fuente: Loaiza et al. (s. f.)

Crecimiento y producción en campo

La palma africana (*E. guineensis*) registró crecimiento, desarrollo, producción de racimos y aceite de los tipos Dura y Pisífera del Banco de Germoplasma, y del tipo Ténera (Dura × Pisífera) durante las pruebas de progenies, y para

el cultivar Ténera Corpoica Elmira se determinaron las características morfológicas y productivas.

Se registró crecimiento, desarrollo, producción de racimos y aceite de las palmas nolí (*E. oleifera*) del Bando de Germoplasma y de los híbridos O × G (F1 y RC1) durante las pruebas de progenies (correspondientes a cruzamientos de palma americana [O] con palma de aceite africana [G: tipo Dura o tipo Pisífera]). Para los materiales híbrido F1 O × G Corpoica Elmira e híbrido RC1 ([F1 O × G] × G) se determinaron características morfológicas y productivas. Los resultados anteriores muestran las características híbridas de las progenies Ténera (D × P), F1 O × G y RC1 O × G con respecto a sus parentales, así como las diferencias en crecimiento, desarrollo y producción de racimos y aceite entre materiales Ténera e híbridos O × G, lo que resulta similar a lo observado en otros programas de mejoramiento del mundo.

Para conocer el crecimiento en campo del sistema radical de la palma *E. guineensis* tipo Ténera, se emplearon palmas de uno a 30 años, cultivadas en suelos aluviales del C. I. El Mira (Reyes et al., 1997, 1998). Se observó que la edad de la palma influye significativamente en la altura y el diámetro del estípite a nivel del suelo y en la cantidad y peso de las raíces que produce. También se evidenció que la altura de la palma y el diámetro del estípite a nivel del suelo están directamente asociados con la cantidad y el peso de las raíces primarias del bulbo radical, y que con el avance de la edad, el sistema radical acumula materia seca, se extiende horizontalmente y concentra la mayor parte de las raíces en los primeros 60 cm del perfil del suelo (Reyes et al., 1997).

Por su parte, las raíces primarias, con la edad, presentan una mayor acumulación de materia seca en las capas superficiales del suelo, y distancias horizontales más cercanas al estípite. Las raíces secundarias (secundarias, terciarias, cuaternarias) también se concentran en las capas superficiales, pero a distancias horizontales más alejadas del estípite, y de esta manera forman círculos concéntricos sucesivos alejados del estípite, según la edad de la palma (de 0,0 a 0,50 m para palmas de un año; de 0,0 a 1,50 m para dos años; de 0,0 a 2,0 m para tres años; de 1,0 a 2,5 m para cuatro y cinco años, y de 2,0 a 4,0 m para palmas de diez a 30 años). Lo anterior indica que la ubicación de los fertilizantes se debe modificar según la edad de la

palma, porque la zona del suelo donde se concentra la mayor masa de raíces absorbentes cambia según la edad (Reyes et al., 1997).

El crecimiento del sistema radical de la palma durante los primeros quince años depende de las raíces primarias. Al final de este periodo, las secundarias disminuyen la acumulación de materia seca para las primarias, y a partir de ese momento se presenta incremento para las raíces secundarias, lo que se traduce en un aumento general de la materia seca total del sistema radical (tabla 6.16) (Reyes et al., 1998).

Adicionalmente, se determinó que la acumulación de materia en función del tiempo en raíces de palmas tipo Ténera durante el periodo vegetativo (uno a 30 años), se puede estimar en kg/palma para raíces primarias (W_{rp}), raíces secundarias (W_{rs}) y total de raíces (W_{tr}), con las siguientes ecuaciones (Reyes et al., 1998):

$$W_{rp} = -14,209658 + 8,567823X - 9,127224X^2 - 0,000666X^3 \quad (r^2: 0,91)$$

$$W_{rs} = -4,966425 + 3,563283X - 0,270290X^2 - 0,0066694X^3 \quad (r^2: 0,95)$$

$$W_{tr} = -19,17605 + 12,131176X - 0,397522X^2 - 0,006028X^3 \quad (r^2: 0,92)$$

Tabla 6.16. Tasas de producción de materia seca y de crecimiento relativo de raíces de palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) de 1 a 30 años de edad, Tumaco, Nariño (Colombia)

Tipo de raíces	Rango de tasa de producción de materia seca (kg/palma/año)*	Tasas de crecimiento relativo (kg/kg/año)	
		2 años	27 años
Primarias	0,024 a 8,050	3,33	0,002
Secundarias	0,05 a 6,08	2,26	0,159
Total	3,39 a 10,61	2,99	0,028

Fuente: Reyes et al. (1998)

La determinación de la distribución y dinámica de crecimiento del sistema radical de la palma africana en campo en Tumaco y su metodología (Reyes et al., 1997, 1998) fue aplicada en estudios para la evaluación y monitoreo del daño, y el desarrollo de prácticas de manejo del insecto *Sagalassa valida* (Lepidoptera: Glyphipterigidae), una de las principales plagas que afecta los cultivos de palma de dicha zona, cuyo estado larval alcanza altos niveles de daño a sus raíces (mediante barrenado), lo que da como resultado reducciones significativas de la producción. De esta manera, se pudo concluir que un nivel superior a 5% de raíces primarias afectadas en la muestra es el criterio para aplicar medidas de manejo (Chávez et al., 2000; Peña et al., 1997).

Para conocer el tipo de plantas asociadas al cultivo de la palma *E. guineensis*, se evaluaron ocho plantaciones de Tumaco, con su respectivo reconocimiento e identificación taxonómica (Cantuca et al., 2001). Se encontraron 255 especies (agrupadas en tres subclases: doce pteridófitas, 163 dicotiledóneas y 80 monocotiledóneas), pertenecientes a 52 familias y 30 órdenes botánicos, y en ellas sobresalen las siguientes familias: Polypodiaceae (ocho especies), Amaranthaceae (cinco especies), Piperaceae (seis especies), Urticaceae (cinco especies), Papilionaceae (once especies), Euphorbiaceae (doce especies), Malvaceae (seis especies), Melastomataceae (ocho especies), Verbenaceae (cinco especies), Labiatae (nueve especies), Solanaceae (siete especies), Compositae (19 especies), Gramineae (37 especies), Cyperaceae (quince especies) y Commelinaceae (cinco especies). El mayor número correspondió a la familia Gramineae con 37 especies.

Por clases taxonómicas, en las zonas de calle y plateo del cultivo, predominaron las dicotiledóneas simpétalas, que se caracterizan por ser las más avanzadas evolutivamente dentro de la subclase de las dicotiledóneas. Por el contrario, en el borde del cultivo predominaron las monocotiledóneas, por ser esta una zona con alta incidencia de luz directa, sin interferencia del dosel del cultivo. Las gramíneas son mencionadas desde tiempo atrás como plantas altamente nocivas para el cultivo de la palma de aceite, y el conocimiento de su taxonomía es de vital importancia para implementar un eficiente manejo de estas plantas arvenses en el cultivo. Sin embargo, cabe señalar que 67% de las plantas arvenses y ruderales encontradas, es decir, 170 especies de los grupos apétalo, polipétalo, simpétalo y del género *Cyperus*, pueden servir como refugio de insectos benéficos, depredadores

de plagas. Esto se da porque en los grupos mencionados existen nectarios extraflorales, y porque el género *Cyperus* tiene una inflorescencia en forma de umbela compuesta, que suministra alimento, todo lo cual puede contribuir al desarrollo de estrategias de manejo biológico de plagas del cultivo.

Complementario a lo anterior, se estudió el comportamiento del desarrollo vegetativo y la producción de la palma *E. guineensis* (Ténera Corpoica-ICA), con tres tipos de cultivo de cobertura, durante los primeros cuatro años de la etapa de cultivo (Peña et al., 2005). Las palmas con cobertura de leguminosa kudzu (*Pueraria phaseoloides*) presentaron los menores valores de emisión foliar (EF), emisión de inflorescencias masculinas (EIM), emisión de inflorescencias femeninas (EIF) y de medida de la circunferencia de la base del pseudoestípite (MCBE). Las palmas con cobertura de gramíneas arrojaron los mayores valores de EIM. A su vez, las palmas con cobertura de arvenses de hoja ancha mostraron los mayores valores de MCBE y de las características de producción variables número (NR) y peso de racimos (PR).

Los resultados obtenidos indicaron la necesidad de desarrollar estudios a largo plazo para determinar asociaciones específicas de cara a la explotación competitiva de la palma de aceite en cada zona productora. También mostraron que en una plantación de palma de aceite, la cobertura vegetal requiere ser manejada como cultivo, sobre todo en los tres primeros años. Por otra parte, el mayor número y peso de racimos que presentaron las palmas con cobertura de arvenses locales de hoja ancha en relación con las otras coberturas (incluida la leguminosa introducida kudzu) ratifica la necesidad de profundizar en este estudio.

Con el propósito de identificar alguna diferencia morfológica entre palmas afectadas y no afectadas por la PC, de forma que esto sirviera para detectar de manera temprana las palmas potencialmente susceptibles a este disturbio, se realizaron, en dos plantaciones de Tumaco, estudios de características morfológicas cualitativas y cuantitativas en palmas *E. guineensis* tipo Ténera de diferente origen genético. No fue posible identificar una característica o descriptor cualitativo o cuantitativo capaz de diferenciar una palma afectada de una no afectada (Bastidas et al., 2008b; Enríquez et al., 2008).

En la palma de aceite, la madurez de los racimos, así como el tiempo que se dedica para su localización durante el proceso de cosecha, son factores que afectan la producción y calidad del aceite. Por lo tanto, se deben establecer mecanismos de control antes de la cosecha o prácticas de polinización, a fin de incrementar la rentabilidad del sistema de producción con base en factores de calidad y cantidad de extracción de aceite, así como cortar los racimos en el punto óptimo de madurez.

Para el caso del material *E. guineensis* en Tumaco, con palmas Ténera (Corpoica-ICA) de nueve años se demostró que tres diferentes prácticas de control previo de la calidad de la cosecha de racimos (sin diferencias entre ellas) permiten extraer más cantidad de aceite de buena calidad en la planta extractora y reducir significativamente el volumen de fruta suelta, lo que facilita la recolección. Por razones económicas, se concluyó que la práctica de revisión semanal para identificar y marcar flores en anthesis y cosechar 180 días después de la marcación fue la mejor. La razón es que así se controlan los ciclos y la calidad de la cosecha. Además, se demostró que al registrar oportunamente la anthesis, es posible hacer una estimación confiable acerca del número de racimos y la producción/cosecha con seis meses de anticipación (Vera et al., 1998).

Para el caso de materiales O×G en Tumaco, con palmas de los híbridos interespecíficos F1 O×G Corpoica Elmira, después de cuatro a cinco años de sembrados en campo, obtenidos por cruzamiento entre *E. oleifera* tipo Cereté y *E. guineensis* (Bastidas et al., 2007), se determinó que con ciclos de polinización asistida de 21 días y frecuencias de cosecha del mismo lapso, se obtienen racimos con 23,9 % de extracción de aceite en laboratorio.

Por otra parte, se observó que si se cosecha 190 días después del primer día de polinización, con ciclos de 21 días de polinización o conteo de flores en anthesis, se evita la cosecha de racimos verdes, que son los que castigan la tasa de extracción de aceite. Las variables aceite en pulpa fresca de frutos partenocárpicos (AcPFFP), aceite en racimo con base en frutos partenocárpicos (AcRFP) y aceite en racimo (AcR) fueron sensibles a los ciclos de cosecha, por lo tanto, su grado de expresión es un indicador de madurez y/o calidad de la cosecha.

Estudios ecofisiológicos básicos

En Tumaco se llevó a cabo un estudio ecofisiológico preliminar de la especie *E. guineensis* (D × P) en vivero y campo (Reyes, 2010). En las condiciones de bosque húmedo tropical de Tumaco, se lograron adaptar y validar metodologías para el uso de sensores sicrométricos de suelo y tejido foliar tipo Wescor, a fin de determinar el potencial hídrico de suelos y del tejido foliar de la palma africana (Reyes, 2010; Wescor, 2006a, 2006b). Asimismo, se determinó el intercambio de gases (fotosíntesis neta y transpiración) y de variables relacionadas, mediante equipo portátil LI-6200 (Licor, Nebraska, EE. UU.) (Reyes, 2010). Además, se obtuvo lo siguiente:

- Curvas de asimilación diaria de CO₂ (Fn), de palmas Ténera en vivero (edad: siete meses; hoja 4), que crecen en suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.) y suelo arenoso franco (A. Fr.), de los materiales Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (figuras 6.4, 6.5).
- Curva de asimilación diaria de CO₂ (Fn) de palmas Ténera (Deli × Yangambi Corpoica-ICA) de 15 meses de edad en campo, que crecen en suelo arenoso franco (A. Fr.) (figura 6.6).
- Curva diaria de potencial hídrico de la hoja (ψ_h) en palmas Ténera (Deli × Yangambi Corpoica-ICA), en vivero (edad: ocho meses; hoja 4) y campo (edad: 18 meses; hoja 9) (figura 6.7).
- Curva diaria de oferta energética de la RFA (figura 6.8) y curva diaria del DPV (figura 6.9), a la altura de la hoja 9 en palmas Ténera (Deli × Yangambi Corpoica-ICA) de 22 a 28 meses de edad.
- Curva diaria de transpiración (T), con crecimiento en suelo franco-arcillo-limoso, de los cultivares Ténera en etapa de vivero (edad: ocho meses; hoja 4), Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (figura 6.10).

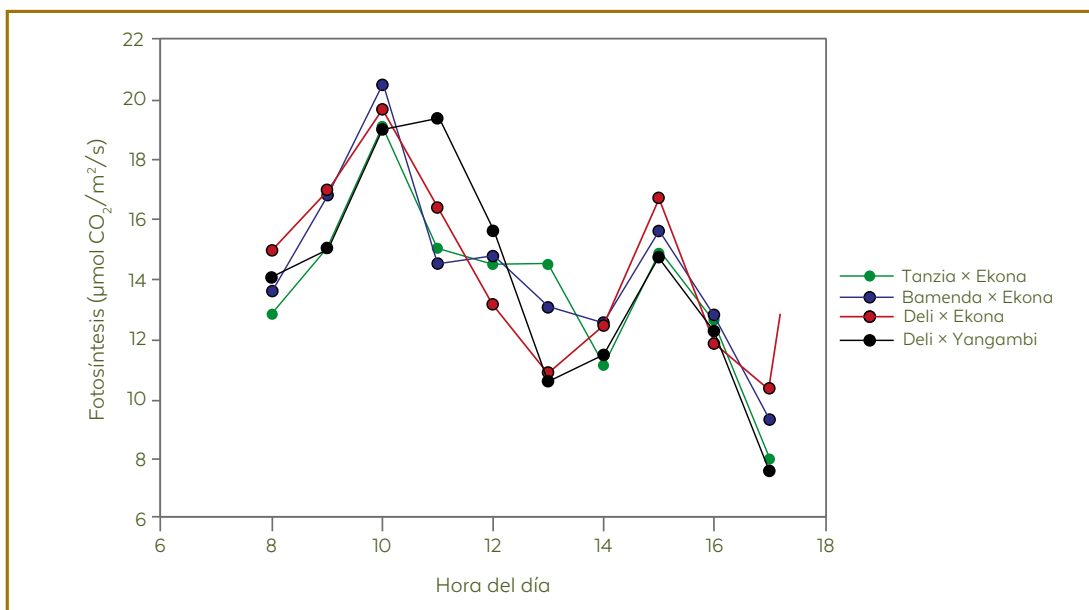


Figura 6.4. Curva diaria de asimilación de CO₂ (Fn) en vivero de cuatro cultivares de palma africana Ténera en suelo franco-arcillo-limoso, Tumaco, Nariño (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

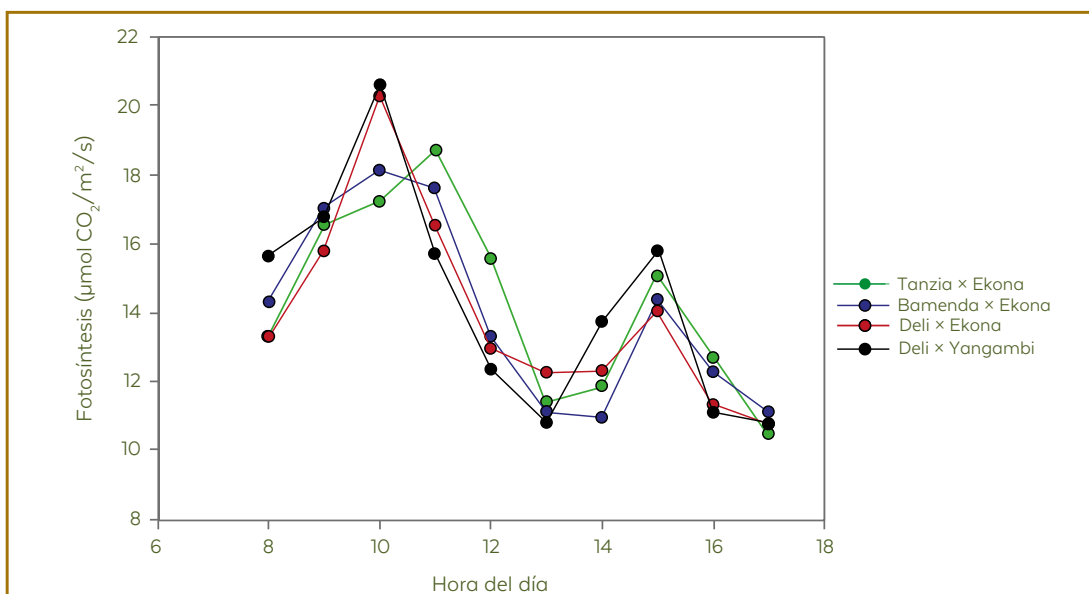


Figura 6.5. Curva diaria de asimilación de CO₂ (Fn) en vivero de cuatro cultivares de palma africana Ténera en suelo arenoso franco, Tumaco, Nariño (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

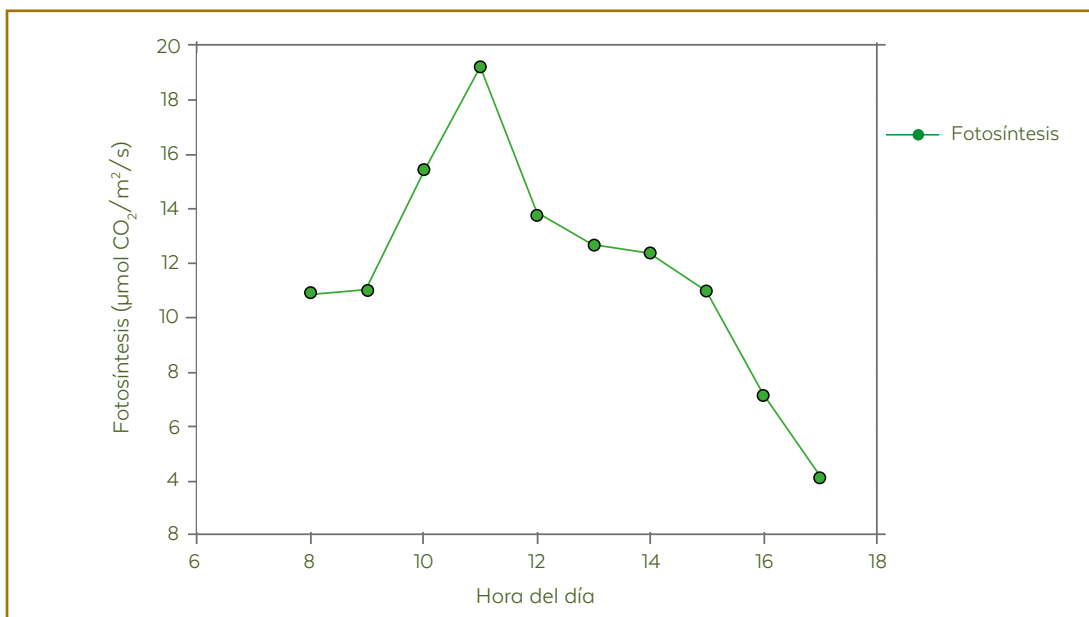


Figura 6.6. Curva diaria de asimilación de CO₂ (F_n) en campo de palma africana Ténera en suelo arenoso franco, Tumaco, Nariño (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

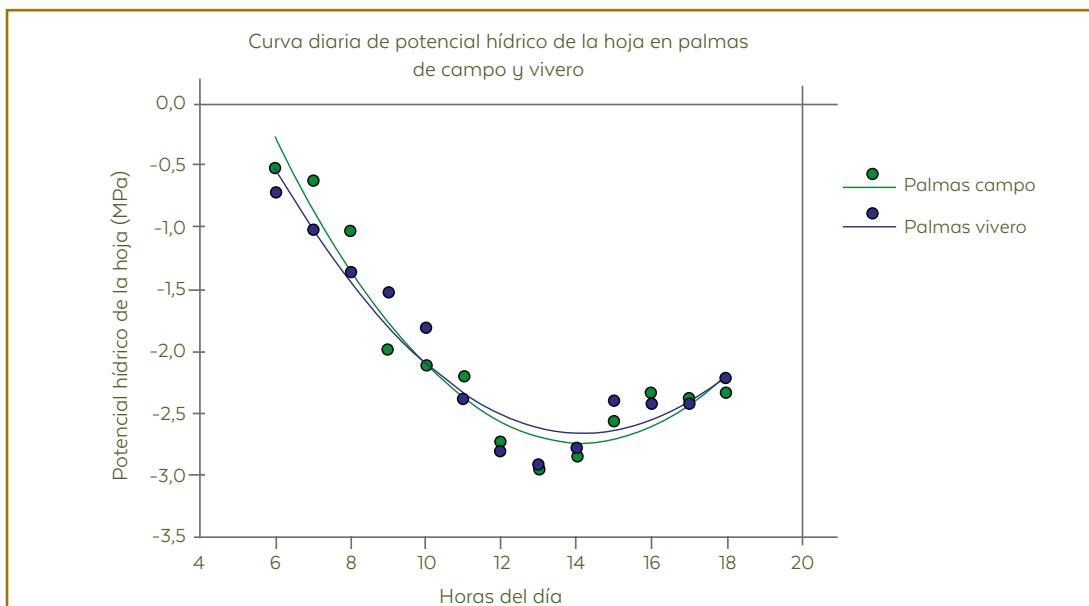


Figura 6.7. Curva diaria de potencial hídrico de la hoja (ψ_h) en palma africana de aceite Ténera, etapas vivero y campo, Tumaco (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

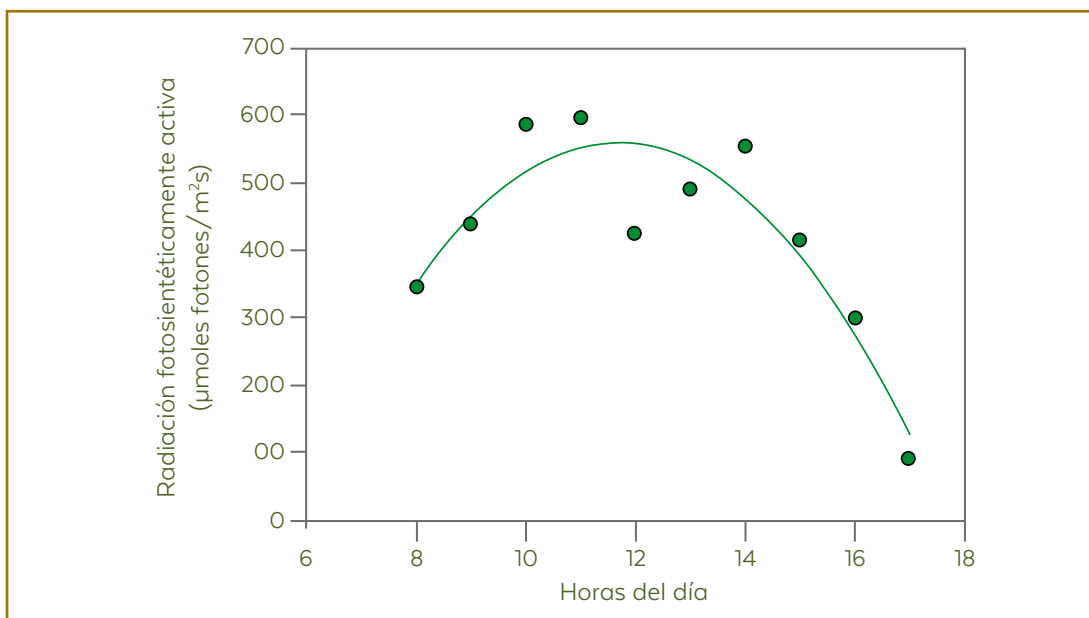


Figura 6.8. Curva diaria de radiación fotosintéticamente activa (RFA) en cultivos de palma africana de aceite Ténera, etapas vivero y campo, Tumaco, Nariño (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)

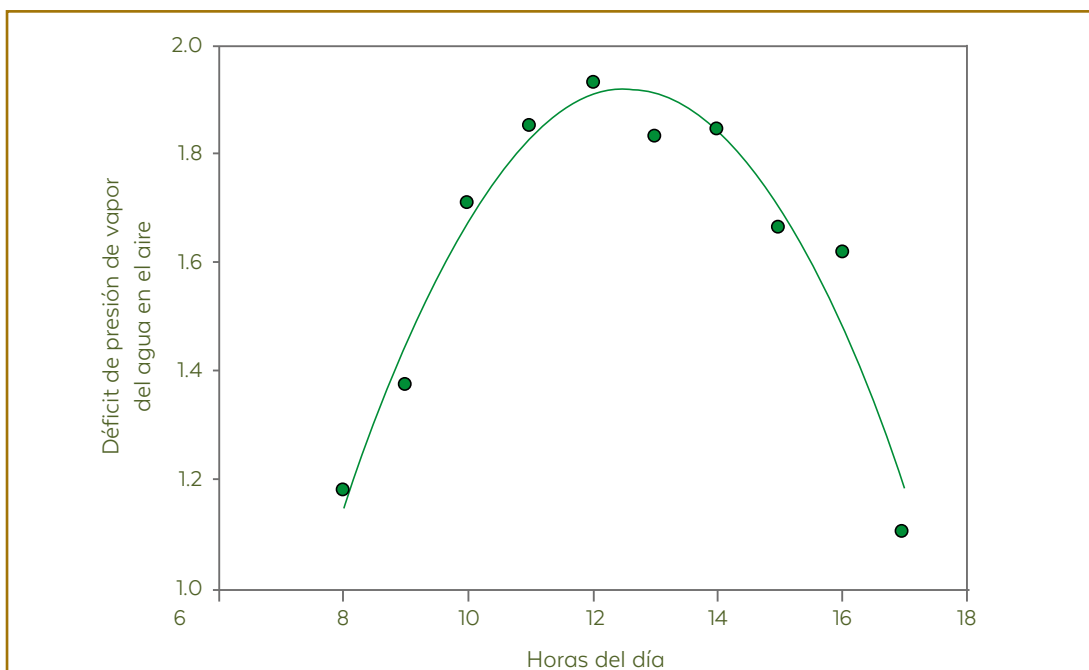
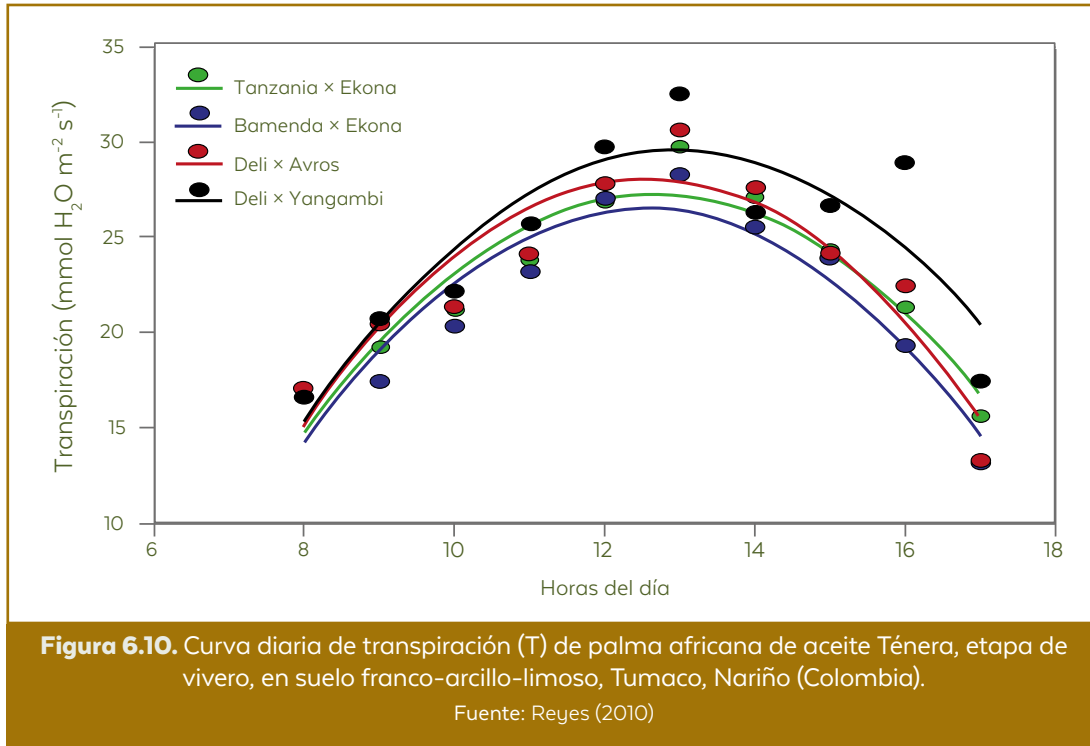


Figura 6.9. Curva diaria de déficit de presión de vapor de agua en el aire (DPV) en cultivos de palma africana de aceite Ténera, etapas de vivero y campo, Tumaco, Nariño (Colombia).

Fuente: Reyes (2010)



La fisiología de la producción biológica de la palma de aceite y la humedad del suelo

Se estudió en casa de malla (Tumaco, Colombia), el secado por evaporación (EVP) de dos suelos utilizados en el cultivo de palma de aceite, que difieren en sus características físicas, uno de textura franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.) y el otro arenoso franco (A. Fr.) (tabla 6.9) (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013a).

Se determinó que el proceso de secado en los dos suelos se ajustó a dos modelos matemáticos: uno potencial decreciente ($\psi_s = a \cdot X^b$), que relaciona el potencial hídrico del suelo (ψ_s) con el tiempo. Esto permitió obtener las curvas de secamiento de los dos suelos por EVP a dos profundidades (10 y 20 cm), útiles para estudios de disponibilidad de agua en el suelo. Las tasas de secamiento de los dos suelos, con respecto al tiempo, fueron mayores para el suelo A. Fr. que para el F. Ar. L. El total de agua utilizable por las plantas ($\psi_s = -0,03$ a $-1,50$ MPa) se agotó en el suelo A. Fr. a los 73 días de secado, mientras que el suelo F. Ar. L., a los 100 días, aún disponía de gran parte del agua utilizable por las plantas, al presentar $\psi_s = -0,55$ MPa (figura 6.11).

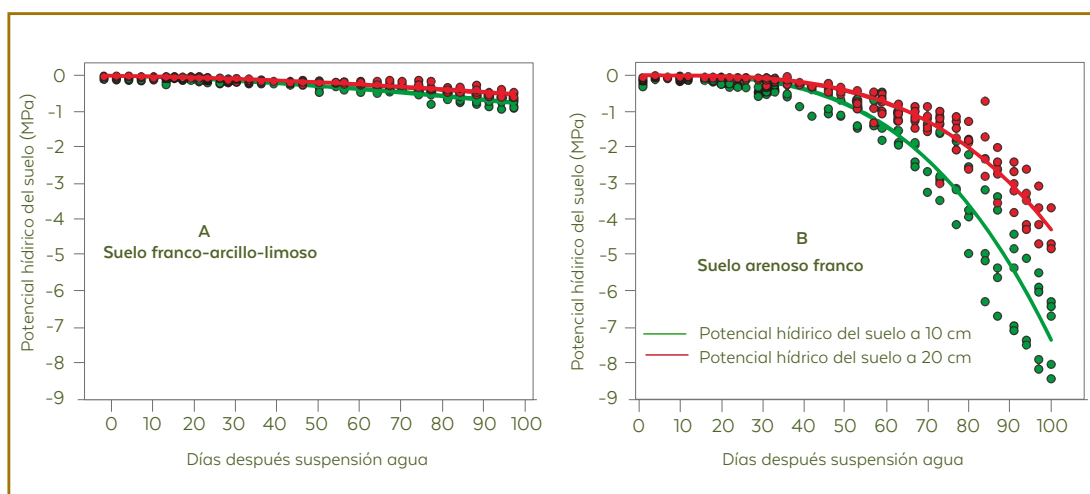


Figura 6.11. Relación entre potencial hídrico del suelo a 10 y 20 cm de profundidad en función del tiempo, Tumaco, Nariño (Colombia). a. Suelo franco-arcillo-limoso (F. Ar. L.); b. Suelo arenoso-franco (A. Fr.).

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013a)

Los resultados muestran que, durante el secado de los dos suelos por evaporación, en condiciones naturales de Tumaco, el franco-arcillo-limoso mantiene más tiempo el agua utilizable por las plantas. Lo anterior favorece en este suelo la disponibilidad de agua para las palmas en épocas prolongadas de poca precipitación, mientras que en el suelo arenoso franco se incrementa el déficit de humedad. Por el contrario, épocas prolongadas de alta precipitación favorecen las condiciones de exceso de humedad en el suelo franco-arcillo-limoso. Los eventos de exceso y déficit de humedad en los suelos pueden afectar la fisiología y producción de racimos de la palma aceite. Esto debe tenerse en cuenta para el manejo agronómico de las plantaciones en Tumaco, donde tales eventos se presentan asociados con los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña. Al respecto, se ha demostrado que en Tumaco esas condiciones de estrés hídrico afectan el crecimiento y la producción de racimos (Cadena et al., 2004).

Con los mismos suelos del trabajo anterior (tabla 6.9), en Tumaco se llevaron a cabo tres estudios sobre el comportamiento fisiológico de la palma africana *E. guineensis* tipo Ténera ante diferentes condiciones de humedad del suelo, que se describen a continuación (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013a, 2013b, 2014):

Estudio 1. Comportamiento fisiológico de la palma *E. guineensis* conforme el suelo perdía humedad por evapotranspiración (EVPT). Se emplearon palmas de vivero de ocho meses de edad de las variedades comerciales Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013a).

El proceso de secado por EVPT de los dos suelos fue similar. Presentaron una mayor pérdida de agua durante los primeros 18 días, lo que contrasta con lo observado cuando se secaron por EVP, cuyo periodo de secado fue diferente según el tipo de suelo.

El proceso de secado por EVPT se ajustó a un modelo exponencial decreciente ($\psi_s = Y_0 + ae^{(-bx)}$) ya que el ψ_s se relacionó con el tiempo de secado y se obtuvieron las curvas y velocidades de secamiento de los dos suelos. Durante el proceso de secado se observó una relación entre el potencial hídrico de la hoja (ψ_h) y el ψ_s a 20 cm de profundidad. También se identificó una relación entre la Fn y el ψ_s a la misma profundidad (figura 6.12), lo que demuestra que el contenido de humedad en el perfil del suelo a 20 cm de profundidad es determinante para la actividad fotosintética de la palma de aceite. Esto indica que valores de humedad del suelo cercanos a la capacidad de campo de este último (-0,03 MPa) favorecen la movilidad del agua en el continuo suelo-planta-atmósfera, lo que mantiene la apertura estomática y por tanto el intercambio gaseoso. Este tipo de respuesta también se observó en otros estudios sobre palma de aceite y palma de cocotero (Cornaire et al., 1993; Gomes & Prado, 2007). Además, se evidenció el comportamiento diferencial de la Fn de todas las variedades ante la disminución del potencial hídrico del suelo a 20 cm de profundidad: Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona > Deli × Yangambi > Deli × Avros (figura 6.12).

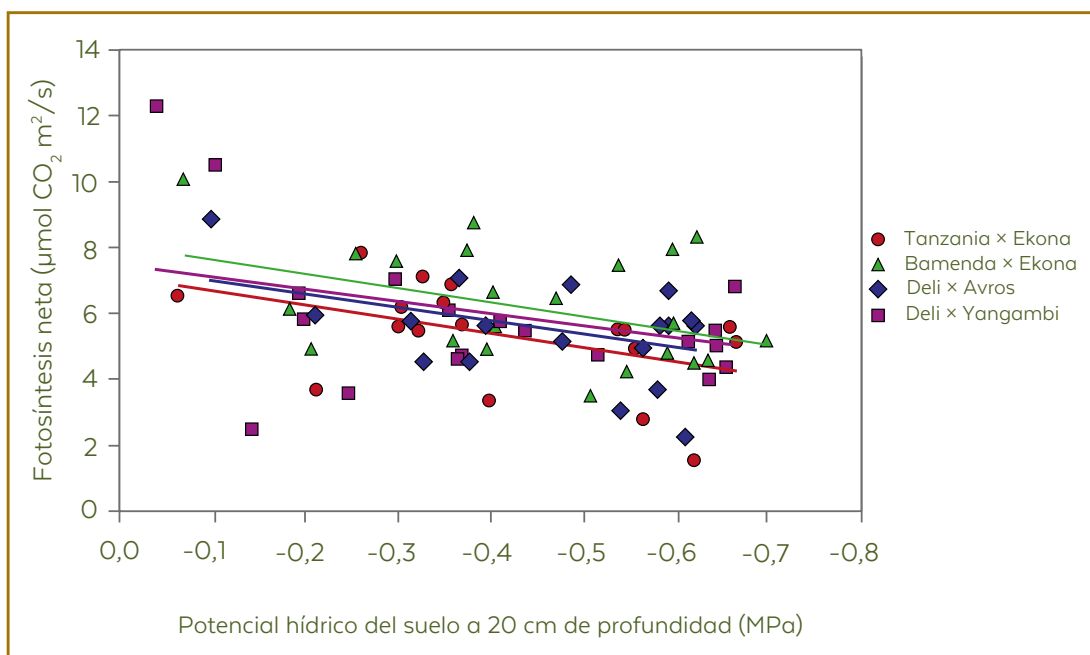


Figura 6.12. Relación entre el potencial hídrico del suelo y la fotosíntesis neta, entre las diez y once horas, durante 70 días de secamiento del suelo, para plantas de cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera (Tanzania × Ekona, Bamenda × Ekona, Deli × Avros y Deli × Yangambi), sembradas en dos tipos de suelo: franco-arcillo-limoso y arenoso franco (Tumaco, Colombia).

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013a)

Se observó que, conforme el suelo se secaba, disminuía la F_n y la transpiración (T) de los cuatro cultivares en ambos suelos. Se evidenciaron diferencias entre suelos y entre cultivares para la F_n . La mayor F_n se presentó en el suelo arenoso franco y en la variedad Bamenda × Ekona (tabla 6.17). La variedad Deli × Yangambi (Corpoica-ICA) mostró los mayores valores de T en los dos suelos. La eficiencia en el uso del agua (EUA) presentó diferencias entre genotipos, con mayor valor para la variedad Bamenda × Ekona.

Tabla 6.17. Valores de fotosíntesis neta (Fn) determinada en la hoja 4 de palma africana Ténera en vivero, por tipo de suelo y genotipo, Tumaco, Nariño (Colombia)

Suelos		Genotipos	
Tipos de suelo	Fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$)	Cultivares	Fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$)
Franco-arcillo-limoso	5,36a	Tanzania × Ekona	5,48ab
		Bamenda × Ekona	5,91a
Arenoso franco	5,70b	Deli × Avros	5,27b
		Deli × Yangambi	5,45ab

Nota: Las medias seguidas de la misma letra en las columnas no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Duncan ($p < 0,05$)

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013a)

Estudio 2. Comportamiento fisiológico de la palma africana Ténera sometida a oferta estable de diferentes contenidos de humedad en el suelo: 45, 40, 35 y 30 % de humedad volumétrica (H_V). Se emplearon palmas de la misma edad y cultivares del estudio anterior (Reyes, 2012; Reyes et al., 2013b).

Solo para la actividad fotosintética se evidenciaron efectos significativos del tipo de suelo, contenido de humedad del suelo y genotipos. En el suelo arenoso franco se registraron los mayores valores de Fn (figura 6.13a). Las variedades Bamenda × Ekona y Tanzania × Ekona exhibieron los mayores valores de Fn en el suelo arenoso franco a lo largo del tiempo (figura 6.13c), mientras que la variedad Tanzania × Ekona presentó el mayor valor de Fn en el suelo franco-arcillo-limoso (figura 6.13b). Los resultados evidenciaron la relación entre actividad fotosintética de las palmas y contenido de humedad del suelo. Los mayores valores de Fn se obtuvieron para las H_V de 45 % ($\psi_s = -0,042$ MPa) y 40 % ($\psi_s = -0,250$ MPa). Por otra parte, se observó que el contenido de humedad del suelo fue el factor determinante para el crecimiento y producción biológica de las palmas, como lo es para su actividad fotosintética (figura 6.14), y los mejores resultados los propició la H_V de 45 % ($\psi_s = -0,042$ MPa).

Esto demuestra la gran sensibilidad de la actividad fotosintética y del crecimiento de la palma de aceite ante disminuciones en la humedad del suelo, aun dentro del ámbito del agua rápidamente aprovechable por las plantas. Esta es una característica con potencial utilizable en la selección temprana de genotipos tolerantes a estrés hídrico.

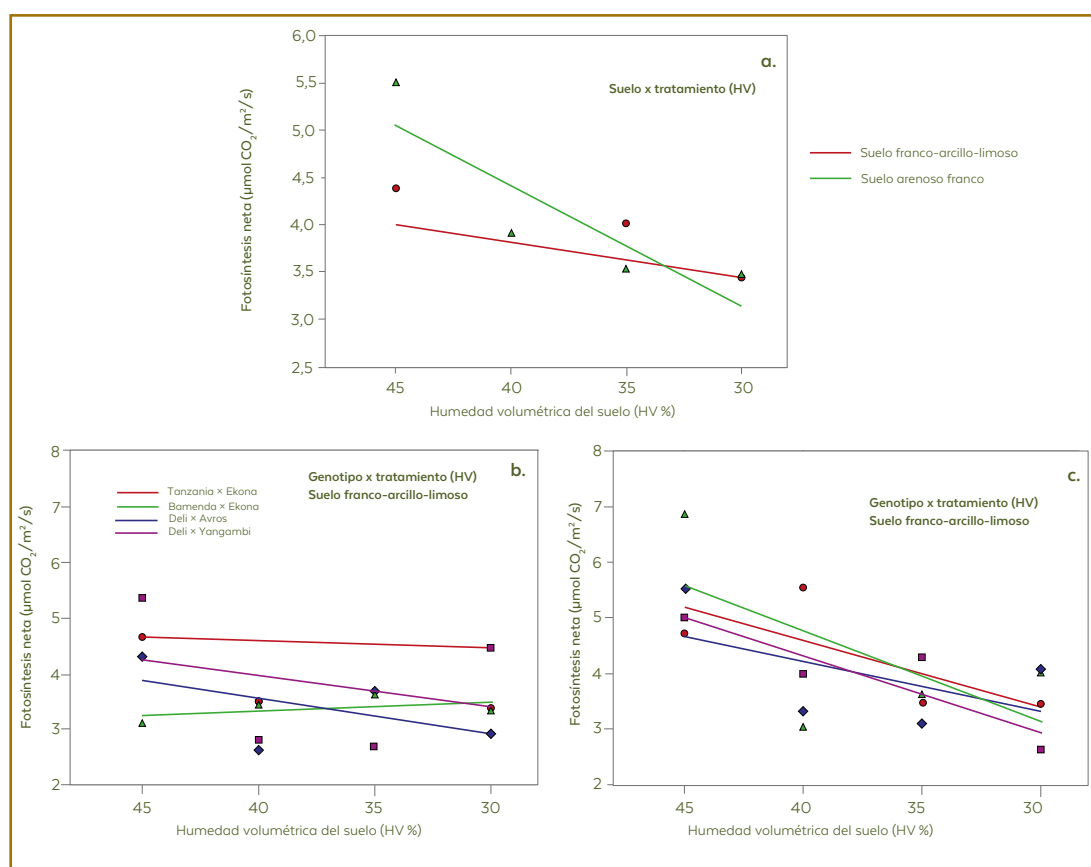


Figura 6.13. Comportamiento de la fotosíntesis neta (diez a once horas) en cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera para distintas interacciones, Tumaco, Nariño (Colombia). a. Suelo x tratamiento; b. y c. Genotipo x tratamiento (variedades: Tanzania x Ekona, Bamenda x Ekona, Deli x Avros y Deli x Yangambi; suelos: franco-arcillo-limoso y arenoso franco).

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013b)

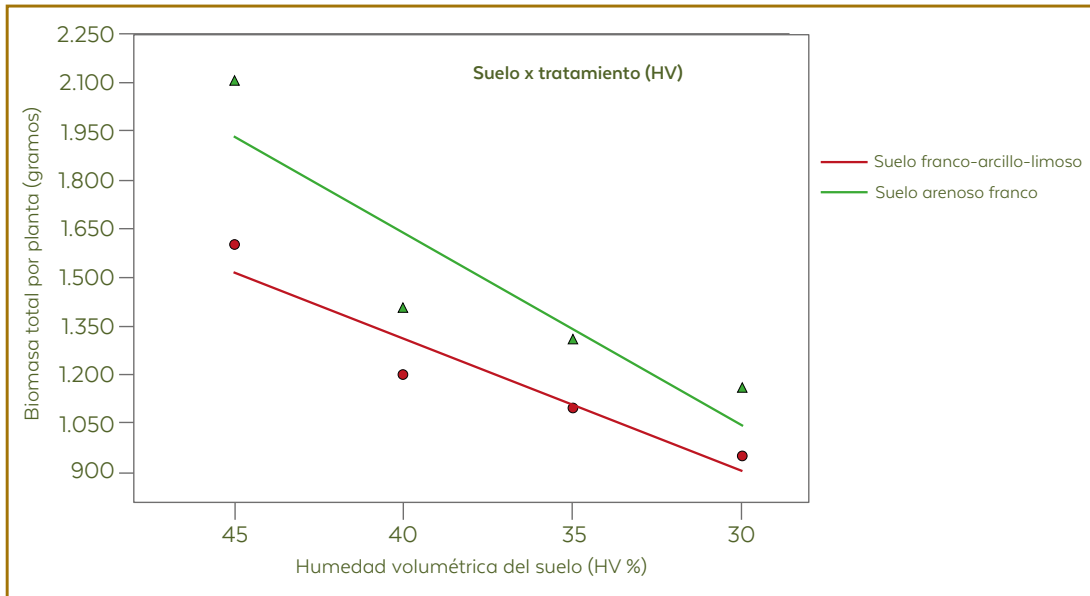


Figura 6.14. Valores de la biomasa total de la palma para la interacción suelo \times tratamiento en plantas de cuatro cultivares de palma africana de aceite Ténera (Tanzania \times Ekona, Bamenda \times Ekona, Deli \times Avros, Deli \times Yangambi) en dos tipos de suelo, Tumaco, Colombia.

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2013b)

Estudio 3. Comportamiento fisiológico de la palma *E. guineensis* sometida a diferentes condiciones de oferta hídrica en campo en Tumaco: déficit hídrico (DH), exceso hídrico (EH), testigo relativo (TR) y testigo absoluto (TA). Se emplearon palmas Ténera de 22 meses de edad en campo, de los cultivares comerciales Tanzania \times Ekona, Deli \times Yangambi (Costa Rica), Deli \times Avros y Deli \times Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia) (Reyes, 2012; Reyes et al., 2014).

Se observaron respuestas diferentes de la Fn en las variedades según la textura del suelo y su contenido de humedad. En el suelo F. Ar. L. cada variedad requiere un contenido de humedad específico para expresar su mayor Fn. Por su parte, en el suelo A. Fr. las variedades expresaron su mayor Fn en presencia de similar contenido de humedad, que correspondió a la condición de déficit hídrico (tabla 6.18).

Tabla 6.18. Fotosíntesis neta (Fn) determinada en la hoja 9 en estudio de campo sobre el efecto de la disponibilidad de agua en la fisiología de la palma africana Ténera en suelo arenoso franco (A. Fr.), Tumaco, Nariño (Colombia)

Contenidos de humedad en el suelo	Fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$)
Déficit hídrico	12,82a
Exceso hídrico	11,52b
Testigo absoluto	10,41c
Testigo relativo	10,86c

Nota: Las medias seguidas de la misma letra no difieren entre sí, de acuerdo con la prueba de Duncan ($p < 0,05$)

Fuente: Reyes (2012), Reyes et al. (2014)

Los resultados anteriores evidencian que en Tumaco la humedad del perfil del suelo es determinante para la actividad fotosintética y la producción biológica de la palma africana, lo cual demuestra que el sistema de producción tradicional aplicado en Tumaco, deficiente en prácticas de manejo de la humedad del suelo, requiere modificaciones para hacer un uso más eficiente de la capacidad fotosintética de la especie y, por consiguiente, mejorar su productividad biológica y tener plantaciones competitivas y sostenibles.

Por otra parte, los anteriores estudios permitieron verificar que es adecuado el uso de la tecnología psicrométrica en condiciones de bosque húmedo tropical de Tumaco, para cuantificar el potencial hídrico del suelo y el potencial hídrico del tejido foliar de la palma de aceite. Además, indicaron que, en Tumaco, la capacidad de campo de la especie con respecto a la humedad del suelo (balance aeración-humedad) puede corresponder al ámbito de ψ_s de $-0,040$ MPa a $-0,250$ MPa.

También se verificó la existencia de cuatro cultivares comerciales de palma africana con respuesta diferencial de tolerancia a disminución de humedad del suelo: Bamenda \times Ekona y Tanzania \times Ekona, mayor tolerancia; Deli \times Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia), tolerancia intermedia, y Deli \times Avros, mayor susceptibilidad. Esto puede facilitar la siembra comercial de la especie en regiones tropicales cultivadas y potenciales que presenten condiciones de estrés hídrico durante alguna época del año, donde la falta de materiales tolerantes constituye una limitante. Además, permitió conocer

el comportamiento fisiológico ante la disminución de la humedad del suelo para el cultivar de palma africana Ténera Deli x Yangambi (Corpoica-ICA, Colombia), obtenido con los recursos genéticos del Banco de Germoplasma de palmáceas de Colombia.

Respecto a variables con capacidad discriminante, para la palma africana joven se determinaron tres fisiológicas y tres morfológicas, sensibles y asociadas a los cambios en la disponibilidad de agua en el suelo. Las fisiológicas corresponden a potencial hídrico de la hoja (ψ_n), fotosíntesis neta (F_n) y transpiración (τ), y las morfológicas a biomasa de la base peciolar, área foliar por planta y biomasa del raquis. Estas variables pueden utilizarse en programas de selección temprana (vivero) de genotipos con tolerancia al estrés hídrico, dado que se pueden evaluar mediante la metodología desarrollada en los estudios descritos.

Lo anterior hace más eficiente el proceso de investigación, porque disminuye el tiempo de estudio y la cantidad de variables para evaluar. Esta observación, y la identificación de cultivares *E. guineensis* con respuesta diferencial a la disminución de la humedad del suelo, facilita la siembra comercial de la especie en regiones tropicales cultivadas y potenciales que presenten condiciones de estrés hídrico durante alguna época del año. En relación con las condiciones ambientales de Tumaco, se estableció que en algunos periodos del día existen limitaciones de RFA y DPV para la actividad fotosintética de la palma. Cuando los valores de RFA y DPV son de alta frecuencia, diferentes a los adecuados para la actividad fotosintética de la especie, como una RFA de 400 a 1.150 $\mu\text{mol fotonos}/\text{m}^2/\text{s}$ y una DPV de 0,5 a 1,7 KPa (Dufrêne & Saugier, 1993; Enríquez et al., 2008; Henson, 1993; Henson et al., 2005; Noor et al., 2005).

En cuanto a la actividad fotosintética de todos los cultivares, se observó mayor predominio de valores bajos de F_n en palmas jóvenes dentro de casa de malla (F_n de 2,5 a 9,2 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) y en campo ($F_n < 15 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$), cuando se compararon con lo informado en Malasia, Indonesia y Nigeria sobre palmas jóvenes (entre 7,9 y 9,50 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) y palmas en campo (ámbito de 3 a 27 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) (Harun & Noor, 2006; Lamade et al., 2009; Noor et al., 2005), lo que se asocia a limitaciones ambientales de RFA y DPV para F_n determinadas en la misma investigación. Sin embargo,

a pesar de estas limitaciones ambientales, para la expresión de la Fn se observaron diferencias e interacciones entre los factores involucrados (suelos, contenidos de humedad del suelo y genotipos). Además, se determinó que la región dispone de abundante oferta ambiental de CO₂ en la atmósfera (concentración > 390 ppm), lo que puede contribuir a incrementar la eficiencia fotosintética de la palma de aceite en Tumaco. En Malasia se ha demostrado que la especie presenta aclimatación y respuesta positiva de su actividad fotosintética al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera (400, 800, 1200 ppm), en términos de aumento significativo de la tasa de fotosíntesis, rendimiento cuántico de la asimilación de carbono, eficiencia en el uso del agua, y aumento de la biomasa total y el área foliar (Ibrahim et al., 2010; Jaafar & Ibrahim, 2012).

Lo anterior indica que en la palma *E. guineensis*, en particular para la región palmera de Tumaco, existe potencial para la fijación de CO₂ y la producción biológica mediante la fotosíntesis de las palmas. El potencial puede ser explotado con el suministro de condiciones ambientales favorables, como adecuada humedad del suelo, para que exista una eficiente actividad fotosintética y producción biológica. Por lo tanto, para que en la zona palmera de Tumaco se puedan compensar en parte las limitaciones derivadas de la oferta ambiental local de RFA y DPV en la actividad fotosintética de la palma, y hacer más eficiente el proceso fotosintético, es indispensable suministrar a la palma contenido de humedad en el suelo (balance aeración-humedad), correspondiente al ámbito determinado de ψ_s (-0,040 MPa a -0,250 Mpa). Al respecto, se conoce una experiencia exitosa en Quevedo (Ecuador), región tropical de baja oferta energética (brillo solar de 2,5 horas/día), donde el adecuado suministro de agua a las palmas compensó en parte la baja oferta energética disponible para su producción biológica y permitió mantener la productividad de los racimos (Breure, 2003; Corley & Tinker, 2003; Mite et al., 1999).-

La investigación descrita por Reyes (2012) aporta nuevo conocimiento científico sobre el comportamiento fisiológico de la palma *E. guineensis* frente a la disponibilidad de agua en el suelo, en las condiciones de bosque húmedo tropical de Tumaco. Este conocimiento no existía y resulta útil para el desarrollo de un nuevo sistema de producción de la especie en dicha región, ante la necesidad urgente de modificarlo, por la pérdida de productividad

y sostenibilidad (30.000 ha) del sistema tradicional, que es deficiente en prácticas de manejo de la humedad del suelo. Se trata, además, de un conocimiento que puede extenderse a otras regiones de bosque húmedo tropical donde se cultiva la palma africana de aceite.

Lo anterior permite indicar que en Tumaco, como requisito para tener plantaciones productivas y sostenibles de la palma *Elaeis guineensis*, se debe modificar o rediseñar el sistema tradicional de producción. Esta modificación debe incluir, entre otras, las siguientes acciones: 1) efectuar una selección adecuada de suelos y sembrar cultivares adaptados a la oferta ambiental de la región; 2) evitar la exposición de las palmas a eventos de estrés hídrico en el suelo; 3) aplicar prácticas de adecuación y manejo de suelos que favorezcan y permitan la disponibilidad de agua para las palmas, dentro del ámbito de potencial hídrico del suelo determinado en esta investigación como favorable para la actividad fotosintética y el desarrollo de la especie; 4) establecer una red de estaciones meteorológicas automáticas que permita registrar y monitorear la oferta ambiental local y disponer de esta información de manera oportuna, lo que es de utilidad para el análisis de factores ambientales relacionados con la productividad biológica y la predisposición a disturbios fisiológicos en la palma de aceite, y 5) llevar a cabo una zonificación agroecológica para el cultivo, mediante acciones como la zonificación climática por balance hídrico y el estudio detallado de suelos, tal como ya se realizó en Brasil (Ramalho et al., 2010).

Todo lo anterior ratifica que el mejoramiento genético de la palma de aceite en Colombia debe buscar cultivares que se adapten de manera específica a las condiciones agroecológicas tropicales de las diferentes regiones donde se cultiva. También debe buscar un manejo agronómico apropiado, que incluya mantener la humedad del suelo que requieren las palmas. Dado que se trata de la función productiva de una especie vegetal (entendida como su producción de biomasa y su distribución), es necesario conformar la parte de interés económico para el ser humano, la cual está relacionada con los factores que determinan el fenotipo, es decir, con factores genéticos y ambientales y con su combinación (interacción genotipo-ambiente).

Al respecto, se sabe que para la palma africana de aceite los factores limitantes de la productividad son los ambientales (suelo, agua y otros)

y los que la disminuyen (plagas y enfermedades) (Breure, 2003). Por otra parte, la conservación y el incremento de recursos genéticos de las palmas africana (*E. guineensis*) y americana (*E. oleifera*), y su premejoramiento (todo lo cual puede llevarse a cabo en el Banco de Germoplasma de la Nación colombiana), contribuirá al desarrollo de los genotipos que requiere un cultivo comercial sostenible en el país y en otras regiones tropicales de condiciones agroecológicas similares.

Referencias

- Alvarado, A., & Sterling, F. (2005). Stress tolerant varieties. *ASD Oil Palm Papers*, 28, 5-20.
- Basiron, D. D. Y., Sukaimi, D. J., & Darus, A. (1998). *Oil palm and the environment*. Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).
- Bastidas, L. E., Castillo, G. E., & Bastidas, S. (2008a). Contrastes cualitativos entre palmas de aceite sin síntomas y con síntomas de pudrición de cogollo en la zona palmera Occidental. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 25(1 y 2).
- Bastidas, L. E., Castillo, G. E., & Bastidas, S. (2008b). Observaciones morfológicas en palmas de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) sanas y afectadas por pudrición de cogollo. *Revista Fitotecnia Colombiana*, 8(2), 9-14.
- Bastidas, S., Figueredo, P., & Reyes, R. (1993). Obtención de materiales de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) adaptados al trópico latinoamericano. *Revista Palmas*, 14(número especial), 49-56.
- Bastidas, S., & Hurtado, L. B. (1992). Palmas prolíficas en la especie *Elaeis oleifera*, una mutación afortunada. *Revista Palmas*, 13(3), 55-60. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/352>
- Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003a). Avances sobre el comportamiento de los híbridos de primera generación de retrocruzamiento entre palma americana (*Elaeis oleifera*) y palma africana (*Elaeis guineensis*). *Revista Regional Novedades Técnicas*, 3(3), 32-36.
- Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2003b). Genealogía del germoplasma de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) del proyecto mejoramiento genético de Corpoica. *Revista Palmas*, 24(1), 21-29. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/950?articlesBySameAuthorPage=2>

- Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2004). *Ténera Corpoica El Mira: material de palma de aceite colombiano*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/20560>
- Bastidas, S., Peña, E., & Reyes, R. (2006). Palma de aceite Ténera Corpoica El Mira: alternativa nacional. *Revista Innovación & Cambio Tecnológico*, 4(2 y 3), 47-50.
- Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Betancourt, C., & Preciado, C. A. (2011). Predicción y control de la cosecha en el híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* en la zona palmera occidental de Colombia. II. Determinación del ciclo de cosecha para obtener racimos con alto contenido de aceite. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(1), 13-20. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:211
- Bastidas, S., Peña, E., Reyes, R., Pérez, J., & Tolosa, W. (2007). Comportamiento agronómico del cultivar híbrido RC1 de palma de aceite (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) × *Elaeis guineensis*. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 5-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:77
- Benincasa, M. M. P. (1988). *Análise de crescimento de plantas (noções básicas)*. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista (FCAV-UNESP).
- Breure, K. (2003). The search for yield in oil palm: Basic principles. In T. Fairhurst & R. Hardter (eds.), *Oil palm: Management for large and sustainable yields* (pp. 59-98). Potash & Phosphate Institute (PPI); Oxford.
- Bulgarelli, J., Chinchilla, C., & Alvarado, A. (2002). Vegetative growth of a Deli × Avros cross. *ASD Oil Palm Papers*, 24, 24-29.
- Bulgarelli, J., Chinchilla, C., Richardson, D. L., & Salas, A. (1993). *Crecimiento en vivero de los materiales Deli × Avros, Deli × Calabar y Deli × Ekona: curvas de referencia*. ASD de Costa Rica.
- Cadena, M. C., Devis, D., Málikov, C., Ortiz, J. R., & Pabón, J. D. (2004). En Tumaco: fenómenos del Niño y la Niña: eventos ENOS y su relación con el clima y la producción de palma de aceite. *Revista Palmas*, 25(4), 46-62. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1013>
- Cantuca, S., Quevedo, E., Peña, E., & Checa, O. (2001). Reconocimiento taxonómico de plantas asociadas con la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en plantaciones de la zona de Tumaco. *Revista Palmas*, 22(1), 27-37. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/862>

- Cav Dwell, R.W., Hunt, D., Reid, A., Mensah, B. A., & Chinchilla, C. (2003). Insect pollination of oil palm - a comparison of the long-term viability and sustainability of *Elaeidobius kamerunicus* in Papua New Guinea, Indonesia, Costa Rica, and Ghana. *ASD Oil Palm Papers*, 25, 1-16.
- Chaimsohn, F. P., Montiel, M., Villalobos, E., & Urpí, J. M. (2008). Anatomía micrográfica del foliolo de la palma neotropical *Bactris gasipaes* (Arecaceae). *Revista de Biología Tropical*, 56(2), 951-959. <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i2.5636>
- Chávez, C., Ortiz, L., Salamanca, J., & Peña, E. (2000). Muestreo de Sagalassa válida en plantaciones de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) de la zona de Tumaco (Nariño), Colombia. *Revista Palmas*, 21(número especial, tomo I), 181-184. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/782>
- Chee, K. H., Chiu, S. B., & Chan, S. M. (1998). Plántulas de vivero cultivadas en bandejas de macetas. *Revista Palmas*, 19(4), 51-54.
- Chinchilla, C., & Richardson, D. (1991). Pollinating insects and the pollination of oil palms in Central America. *ASD Oil Palm Papers*, (2), 1-18.
- Chinchilla, C., Umaña, C. H., & Richardson, D. L. (1990). Material de desarrollo avanzado en viveros de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). I. Espaciamiento y volumen de la bolsa. *Turrialba*, 40(4) 428-439. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10545>
- Corley, R. (1982). Photosynthesis and productivity. In R. H. V. Corley., J. J. Hardon & B. J. Wood (eds.), *Oil palm researches* (pp. 55-86). Elsevier.
- Corley, R. (1983). Photosynthesis and age of oil palm leaves. *Photosynthetica*, 17, 97-100.
- Corley, R., & Breure, C. J. (1992). Fruiting activity, growth and yield of oil palm. I. Effects of fruit removal. *Experimental Agriculture*, 28(1), 99-109. <https://doi.org/10.1017/S0014479700023048>
- Corley, R., Hardon, J. J., & Tan, G. Y. (1971). Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica*, 20, 307-315. <https://doi.org/10.1007/BF00056093>
- Corley, R., & Tinker, P. B. (2003). *The oil palm*. Oxford Blackwell Science. <https://doi.org/10.1002/9780470750971>

- Cornaire, B., Daniel, C., Zuily-Fodil, Y., & Lamade, E. (1993). Oil palm performance under water stress: Background to the problem, first results and research approaches: In J. Sukaimi (ed.), *Proceedings of PORIM International Palm Oil Congress Agriculture* (pp. 159-172). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica]. (2012). *Informe bancos de germoplasma vegetal*.
- Dufrène, E., Dubos, B., Rey, H., Quencez, P., & Saugier, B. (1992). Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficits. *Acta Oecologica*, 13(3), 299-314.
- Dufrène, E., & Saugier, B. (1989). Field studies of leaf gas exchanges in oil palm tree (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Annals of Forest Science*, 46, 439s-442s. <https://doi.org/10.1051/forest:19890598>
- Dufrène, E., & Saugier, B. (1993). Gas exchange of oil palm in relation to light vapour pressure deficit, temperature y leaf age. *Functional Ecology*, 7(1), 97-104. <https://doi.org/10.2307/2389872>
- Enríquez, C G., Bastidas, L. E., & Bastidas, P. S. (2008). Contrastes cualitativos entre palmas de aceite sin síntomas y con síntomas de pudrición de cogollo en la zona palmera occidental. *Revista Ciencias Agrícolas*, 25(1-2), 11-24.
- Gomes, F. P., & Prado, C. H. B. (2007). Ecophysiology of coconut palm under water stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 377-391. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400008>
- Gutiérrez, M. V., & Villalobos, E. (1996). Estado hídrico de siete genotipos contrastantes de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) durante la época seca en Quepos, Puntarenas, Costa Rica. *Boltec*, 29(1), 20-32.
- Hanif, M. H. (2006). Gas exchange of excised oil palm (*Elaeis guineensis*) fronds. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5(1), 9-13. <https://doi.org/10.3923/ajps.2006.9.13>
- Hartley, C. W. S. (1983). *La palma de aceite* (E. Maldonado, Trad.). Compañía Editorial Continental.
- Harun, M. H., & Noor, M. R. (2006). Canopy Temperature Difference (CTD) for detecting stress in oil palm. *MPOB Information Series*, 309, 1.511-7.871.

- Henson, I. E. (1990). Photosynthesis and source sink relationships in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Trans Malaysian Society Plant Physiology*, 1, 165-171.
- Henson, I. E. (1991). Adaptation to light environment by leaves of oil palm (*Elaeis guineensis*). *Bulletin Palm Oil Research Institute of Malaysia*, 22, 1-8.
- Henson, I. E. (1992). Carbon assimilation, respiration and productivity of young palm (*Elaeis guineensis*). *International Journal of Oil Palm Research and Development*, 4(42), 51-59.
- Henson, I. E. (1993). Carbon assimilation, water use and energy balance of oil palm plantation assessed using micrometeorological techniques. In J. Sukaimi (ed.), *Proceedings of PORIM International Palm Oil Congress Agriculture* (pp.137-158). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).
- Henson, I. E., Noor, M. R., Harun, M. H., Yahya, Z., & Mustakim, S. N. A. (2005). Stress development and its detection in young oil palms in north Kedah, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, 17, 11-26.
- Hong, T. K., & Corley, R. H. V. (1976). Leaf temperature and photosynthesis of a tropical C3 plant, *Elaeis guineensis*. *Malaysian Agriculture Research Development Institute Research Bulletin*, 4(1), 16-20.
- Ibarra-Ruales, L. N., & Reyes-Cuesta, R. (2015). Crecimiento en vivero de las palmas aceiteras *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* y *Elaeis guineensis* × *Elaeis guineensis* en Tumaco Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(2), 239-250. https://doi.org/10.21930/rcta.vol16_num2_art:370
- Ibrahim, M. H., Jaafar, H. Z. E., Hann, M. H., & Yusop, M. R. (2010). Changes in growth and photosynthetic patterns of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings exposed to short-term CO₂ enrichment in a closed top chamber. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32, 305-313. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0408-y>
- Jaafar, H. Z. E., & Ibrahim, M. H. (2012). Photosynthesis and quantum yield of oil palm seedlings to elevated carbon dioxide. In M. M Najafpour (ed.), *Advances in photosynthesis* (pp. 321-340). Intech Open. <https://doi.org/10.5772/26167>
- Kallarackal, J., Jeyakumar, P., & George, S. J. (2004). Water use of irrigated oil palm at three different arid locations in peninsular India. *Journal of Oil Palm Research*, 16(1), 45-53.

- Kushairi, A. (2008). Oil palm cultivation and yield production. In *MPOB Selected readings on palm oil and its uses for palm familiarization programme (POFP)* (pp. 22-46).
- Kvet, J., Ondock, J. P., Necas, J., & Jarvis, P. G. (1971). Methods of growth analysis. In Z. Sestak, J. Catsky & P. G. Jarvis (eds.), *Plant photosynthetic production: Manual of methods* (pp. 343-391). The Hague, W. Junk.
- Lamade, E., & Setiyo, I. (1996). Variation in maximum photosynthesis of oil palm in Indonesia: Comparison of three morphologically contrasting clones. *Plantaction, Recherche, Développement*, 3, 429-438.
- Lamade, E., Setiyo, I., Girard, S., & Ghashghaie, J. (2009). Changes in $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of oil palm leaves to understand carbon use during their passage from heterotrophy to autotrophy. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 23(16), 2586-2596. <https://doi.org/10.1002/rcm.4169>
- Loaiza, L. O. A., Moreno, C. L. P., & Reyes, C. R. (s. f.). *Evaluación de seis genotipos de palma de aceite en dos condiciones de manejo agronómico en fase de vivero, en Tumaco, Nariño* [Manuscrito en preparación].
- Marschner, H. (1986). *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press.
- Mite, F., Carrillo, M., & Espinosa, J. (1999). Influencia de la fertilización y el riego sobre el desarrollo, nutrición y rendimiento de la palma africana en Ecuador. *Informaciones agronómicas*, (36). <http://www.buecke.com.br/public/upload/arquivo/buecke/Influencia%20de%20la%20Fertilizacion%20y%20el%20Riego%20sobre%20el%20Desarrollo,%20Nutricion%20y%20Rendimiento%20de%20la%20Palma%20en%20Ecuador-0ed5d.pdf>
- Mutert, E. W. (1997). *La palma aceitera, el cultivo dorado de los trópicos* [Informaciones agronómicas n.º 29]. Instituto de la Potasa y el Fósforo (Inpofos).
- Ng, S. K. (1972). *The oil palm, its culture, manuring and utilisation*. International Potash Institute. https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/the_oil_palm-its_culture-manuring_and_utilisation.pdf
- Noor, M. R., Ismail, M. R., Harun, M. H., & Mahmood, M. (2005). Leaf study and gas exchange of commercial D×P y PS.1 oil palm seedling. In Malasyian Palm Oil Board (ed.), *Proceeding of agriculture, biotechnology and sustainability conference: PIPOC 2005, International Palm Oil Congress* (pp. 833-837).

- Owen, B. E. (1996). Palma africana. En R. Guerrero Riascos (ed.), *Fertilización de cultivos de clima cálido* (pp. 178-219). Monómeros.
- Paramananthan, S. (2003a). Best practices for oil palm cultivation - land selection and management. *The Planter*, 79(926), 311-323.
- Paramananthan, S. (2003b). Land selection for oil palm. In T. Fairhurst & R. Hardter (eds.), *Oil palm: Management for large and sustainable yields* (pp. 27-57). Potash and Phosphate Institute (PPI); Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC); International Potash Institute (IPI).
- Patiño, V. M. (1977). El corozo o noli (*Elaeis oleifera* [HBK] Cortés ex wessels boer), recurso natural oleaginoso de Colombia. *Cespedesia*, 6(21-22), 7-63. <https://www.inciva.gov.co/storage/Clientes/INCIVA/Principal/imagenes/contenidos/13013-CESPEDESIA%20Vol%2006%20No%2021-22%20Ene%20-%20Jun%201977-.pdf>
- Peña, R. E., Reyes, C. R., & Bastidas, P. S. (1997). Evaluación de prácticas agronómicas para la recuperación de palmas de aceite afectadas por el insecto *Sagalassa valida* Walker. *Revista Palmas*, 18(4), 35-38.
- Peña, R. E., Reyes, C. R., & Bastidas, P. S. (2005). Evaluación del comportamiento de la etapa juvenil de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) bajo tres tipos de cultivo de cobertura en Tumaco (Nariño). *Revista Regional Novedades Técnicas*, 6(6), 26-30.
- Preciado, C. A. (2010). *Predicción y control de calidad en la cosecha del híbrido interespecífico entre palma noli *Elaeis oleifera* y palma de aceite *Elaeis guineensis* en la zona palmera occidental* [Tesis de grado]. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
- Preciado, C. A., Bastidas, S., Betancourt, C., Peña, E., & Reyes, R. (2011). Predicción y control de la cosecha en el híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* en la zona palmera occidental de Colombia. I. Determinación del periodo de madurez para obtener racimos con alto contenido de aceite. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(1), 5-12. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:210
- Ramalho, A., Ferreira da Motta, P. E., De Freitas, P. L., & Texeira, W. G. (eds.). (2010). *Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia*. Embrapa Solos.

- Reyes, R. (2010). *Proyecto "Respuesta fisiológica y productiva de diferentes genotipos de material comercial Ténera de palma aceitera a variaciones en la disponibilidad de agua: fase I"* [Informe técnico final]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- Reyes, R. (2012). *Respuesta fisiológica de la palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.) a la disponibilidad de agua en el suelo* [Tesis de doctorado]. Universidad de Costa Rica, San José.
- Reyes, R., Bastidas, S., & Peña, E. (1997). Distribución del sistema radical de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Revista Palmas*, 18(3), 49-57.
- Reyes, R., Bastidas, S., & Peña, E. (1998). Crecimiento del sistema radical de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Revista Palmas*, 19(3), 31-35.
- Reyes, R., Riaño, N., Chinchilla, C., & Ibarra, N. (2013a). Physiological response of young oil palms (*Elaeis guineensis*) to soil drying by evapotranspiration in two soil types under greenhouse conditions and possible implications for spear rot development. *Oil Palm Papers*, 40, 1-15.
- Reyes, R., Rodríguez, N., Peña, E., & Bastidas, S. (2008). Crecimiento en vivero de materiales comerciales de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 9(2), 12-18.
- Reyes, R., Rodríguez, N., Peña, E., Bastidas, S., & Ibarra, N. (2009). *Evaluación del crecimiento de cuatro genotipos de palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.) en dos tipos de suelo de diferentes características físicas. I. Vivero* [Memorias]. Segundo seminario "Experiencias en la inversión en ciencia y tecnología para el sector agropecuario colombiano", Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), Bogotá.
- Reyes, R., Riaño, N., Chinchilla, C., & Ibarra, N. (2013b). Physiological response of young oil palms (*Elaeis guineensis*) to a steady water supply under greenhouse conditions. *Oil Palm Papers*, 41, 1-11.
- Reyes, R., Riaño, N., Chinchilla, C., & Ibarra, N. (2014). Physiological response of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) to soil water availability under field conditions in Tumaco, Colombia. *Oil Palm Papers*, 42, 11-20.
- Rodríguez, W., & Leihner, D. (2006). *Análisis de crecimiento vegetal: fisiología de la producción de cultivos tropicales*. Editorial Universidad de Costa Rica.

- Rodríguez, W., & Villalobos, E. (1998). *Correlación de la fotosíntesis foliar y el coeficiente de extinción de luz con la productividad de siete cruces de palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.) con características contrastantes del dosel, el crecimiento y la productividad*. Editorial Universidad de Costa Rica.
- Romero, H. M. (2018). Polinización artificial de híbridos O×G para la obtención de frutos partenocárpicos y la producción de aceite (*Elaeis oleifera* Cortés×*Elaeis guineensis* Jacq.) [Nota técnica]. *El Palmicultor*, (558), 15-18.
- Romero, H. M., Caicedo, A., & Ayala, I. (2020). Utilización de ácido 1-naftalenacético (ANA) para incrementar la producción de aceite en palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) [Nota técnica]. *El Palmicultor*, (576), 13-15. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/12981>
- Setyio, I. E., Subronto, & Lamade, E. (1996). Photosynthetic rate of the three different D×P clones: The sensitive to vapor pressure deficit in North Sumatra. In D. Ariffin (Ed.), *Proceedings of the 1996 PORIM International Palm Oil Congress: Competitiveness for the 21st Century. Agriculture Conference* (pp. 421-426). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM).
- Sinisterra, K. X., Caicedo, A., Castillo, C., Ceballos, D., Palacio, M., Cortés, Í., Camperos, J., Ayala, I., & Mosquera, M. (2019). Validación del punto óptimo de cosecha en el cultivar híbrido interespecífico O×G Corpoica (Cereté×Deli y Cereté×Yangambi). *Ceniavances*, 189. https://www.researchgate.net/publication/353691896_Validacion_del_punto_optimo_de_cosecha_en_el_cultivar_hibrido_interespecifico_OxG_Corpoica_Cerete_x_Deli_y_Cerete_x_Yangambi
- Suresh, K., & Nagamani, C. (2006). Variation in photosynthetic rate and associated parameters with age of oil palm leaves under irrigation. *Photosynthetica*, 44(2), 309-311. <https://doi.org/10.1007/s11099-006-0023-8>
- Suresh, K., & Reddy, V. M. (2005). Photosynthesis and age of juvenile oil palm leaves under irrigated conditions. *Indian Journal of Oil Palm*, 5(1, 2).
- Tomlinson, P. B. (1990). *The structural biology of palms*. Oxford.
- Umaña, C. H., Chinchilla, C., & Richardson, D. L. (1990). Material de desarrollo avanzado en viveros de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). II. Condiciones del sustrato. *Turrialba*, 40(4), 440-451. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10546>

- Vallejo, G. (1987). El material plantable de palma africana de aceite. *Revista Palmas*, 8(2), 15-29.
- Vera, M., Bastidas, S., Peña, E., & Espinosa, N. (1998). Control previo de la calidad de cosecha en palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) en la región de Tumaco. *Revista Palmas*, 19(1), 9-15.
- Villalobos, E. (2001). Absorción, transporte y balance hídrico en la planta. En R. E. Villalobos (ed.), *Fisiología de la producción de los cultivos tropicales: procesos fisiológicos básicos* (Fascículo I, pp. 120-157). Editorial Universidad de Costa Rica.
- Villalobos, E., Marín, W., & Berninger, F. (2001). Transporte y partición del carbón. En R. E. Villalobos (ed.), *Fisiología de la producción de los cultivos tropicales: procesos fisiológicos básicos* (Fascículo I, pp. 83-117). Editorial Universidad de Costa Rica.
- Wescor. (2006a). *Model number L-51(-SF) and L-51A (-SF) leaf hygrometer/psychrometer. Instructions for use with wescor water potential systems* [Document number: Man/L-51]. Wescor Environmental Products División.
- Wescor. (2006b). *PST-55(-SF) and PCT-55(-SF) soil hygrometer/psychrometer: Instructions for use with wescor water potential systems* [Document number Man/PST-55 and PCT-55]. Wescor Environmental Products División.
- Wood, B. J. (2007). Opportunities for oil palm R & D in further meeting the challenges of the new dynamics. *The Planter*, 83(972), 155-177.