

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN (on line): 1981-0997

v.6, n.4, p.694-702, out.-dez., 2011

Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br

DOI:10.5039/agraria.v6i4a1376

Protocolo 1376 - 21/02/2011 *Aprovado em 08/06/2011

Jesús M. E. Aguilar Luna¹

Pedro Antonio Macario Mendoza¹

Salvador Hernández Daumás¹

Esperanza Huerta Lwanga¹

Ramiro de Alba Becerra²

Crecimiento y productividad en la asociación agroforestal 'cedro-lima-chaya' a diferente densidad de plantación

RESUMEN

En este trabajo se analizó el crecimiento y la productividad en la asociación agroforestal 'cedro-lima-chaya', para conocer su densidad de plantación (DP) óptima inicial. Cedros y limas se establecieron en un círculo 'Nelder' de 3154 m², que consistió en 20 círculos concéntricos alternados con cedros y limas a 1,50 m de distancia y 10 plantas por círculo; la chaya se estableció en un marco rectangular a 1,50 x 3,00 m, superpuesto al círculo 'Nelder'. Se definieron ocho DP, de 2602 a 3772 plantas ha⁻¹ con 10 repeticiones, para evaluar las siguientes variables: longitud de la raíz principal, radio de exploración radical, tasa de crecimiento, índice de vigor de planta, índice de área foliar y producción de biomasa seca. Los resultados arrojaron diferencias en el crecimiento radical, en el aéreo y en la productividad ($\alpha \leq 0,05$); el crecimiento radical en cedros y limas fue mayor a 2602 plantas ha⁻¹, y en chayas a 3772 plantas ha⁻¹; el crecimiento aéreo en cedros y limas fue mayor a 3270 plantas ha⁻¹, y en chayas a 2602 plantas ha⁻¹; y la mayor productividad se obtuvo de 3129 a 3425 plantas ha⁻¹. Por lo que la DP en la cual se logró el mayor crecimiento y productividad fue de 3046 a 3297 plantas ha⁻¹.

Palabras clave: *Cedrela odorata*, *Citrus latifolia*, *Cnidocolus chayamansa*, diseño 'Nelder', optimización en superficies de respuesta.

Growth and productivity in the agroforestry association 'cedar-lime-chaya', a different planting density

ABSTRACT

In this study was analyzed the growth and the productivity in the agroforestry association 'cedar-lime-chaya', to know the optimum initial plantation density (PD). Cedars and limes were placed in a 'Nelder' circle of 3154 m² which consisted of 20 concentric circles alternating cedars and limes to 1.50 m apart and 10 plants per circle; the chayas was established in a rectangular frame to 1.50 x 3.00 m, superimposed on the 'Nelder' circle. Eight PD was defined, from 2602 to 3772 plants ha⁻¹ with 10 repetitions, to evaluate the following variables: length of main root, radical exploration radius, growth rate, index plant vigor, index leaf area and productions dry biomass. Results showed differences in the below growth, above growth and productivity ($\alpha \leq 0.05$), the below growth in cedars and limes was greater to 2602 plants ha⁻¹, and chayas to 3772 plants ha⁻¹; above growth in cedars and limes was greater to 3270 plants ha⁻¹, and chayas to 2602 plants ha⁻¹; and the major productivity was obtained from 3129 to 3425 plants ha⁻¹. The PD for get a greater growth and productivity was from 3046 to 3297 plants ha⁻¹.

Key words: *Cedrela odorata*, *Citrus latifolia*, *Cnidocolus chayamansa*, 'Nelder' design, response surface optimization.

¹ El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR Unidades Chetumal y Villahermosa). CP 77900. Chetumal, Quintana Roo, México. Tel. 019838350440 ext. 4406. E-mail: laquilar@ecosur.mx, pmacario@ecosur.mx, shernand@ecosur.mx, ehuerta@ecosur.mx

² Fumigaciones Integrales de Quintana Roo. CP 77000, Chetumal, Quintana Roo, México. Tel. 019838332947. E-mail: acatic51@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El crecimiento es una aproximación holística, explicativa e integral, que sirve para comprender la forma y función de una planta; se manifiesta como un aumento irreversible de la biomasa (Hunt et al., 2002), particularmente de su longitud. Puede definirse como un aumento en tamaño, sin embargo, esto no es siempre cierto; porque puede haber aumento en tamaño con disminución del peso seco.

La tasa de crecimiento (TC) es un índice que integra el funcionamiento de varios órganos de la planta; es apropiado para comparar el efecto de diferentes prácticas agronómicas, por ser relativo y no depender de suposiciones matemáticas. Se refiere a la acumulación de materia seca por unidad de área de suelo, por unidad de tiempo; y se puede expresar en cm día^{-1} (Hunt et al., 2002).

El crecimiento que se traduce en formación de materia seca o biomasa, puede ser evaluado como productividad en las distintas fases del desarrollo de una planta. La productividad en cultivos asociados depende de las relaciones de complementariedad y competitividad entre los componentes del sistema. La productividad (biomasa y área foliar, principalmente), se refiere al crecimiento que se puede lograr en un periodo determinado; y es dependiente del ambiente (temperatura y energía solar, principalmente), además de factores de estrés y de manejo (agua, nutrientes, plagas, enfermedades y densidad de plantación) (Geyer, 2006; López-Ríos, 2009).

La biomasa es el tejido vegetal expresado en términos del peso seco (sin agua), es un indicador de los procesos bioquímicos y fisiológicos que se dan en el interior de cada planta (Curiel-Rodríguez et al., 2007). La biomasa y su acumulación a lo largo de un periodo, es una medida ampliamente utilizada en la investigación, como expresión del efecto de los factores externos; y puede ser evaluada como productividad en las distintas fases del desarrollo de una planta (Geyer, 2006).

El vigor es la capacidad que tienen las plantas para crecer y la fuerza para desarrollarse. El índice de vigor de planta (ÍVP) es un indicador agronómico de cómo es el desarrollo y el crecimiento de una planta, y qué tan influenciado está por factores genéticos y ambientales (Makhabu et al., 2006). En general, se manifiesta según López-Ríos (2009) en: mayor crecimiento vegetativo, mayor resistencia a plagas y enfermedades, madurez temprana, aumento en tamaño, mayor eficiencia metabólica, mayor eficacia biológica para la reproducción y supervivencia.

El índice de área foliar (ÍÁF) representa bien los factores relacionados con la copa, cuanto más grande es el ÍÁF, más amplia es la copa. El ÍÁF se refiere a la proporción del área de la hoja (en la haz) de la planta con respecto del área superficial de suelo (Koyama & Kikuzawa, 2009). Es fundamental en estudios de nutrición y crecimiento vegetal, con él se puede determinar la intensidad de fotosíntesis, parámetro de gran relevancia para el análisis de crecimiento de un cultivo (Hunt et al., 2002).

Según López-Ríos (2009), la productividad de una planta está relacionada con el desarrollo de su copa y su altura total,

expresada en la relación de copa viva. Lo cual sugiere que al reducirse la copa al menos en un 40% por poda natural o artificial, puede haber una disminución significativa de la productividad del árbol. La situación se puede mejorar a través del aclareo, es decir, eliminando varios individuos de la plantación y permitiendo la entrada de más luz (García-Barrios & Ong, 2004).

Otro factor que influye en el crecimiento y la productividad es la densidad de plantación (DP), la DP es un factor agronómico de manejo que influye en el desarrollo de las especies; se refiere al número de plantas establecidas en un área determinada y tiene un efecto en todas las etapas del desarrollo debido al efecto de competencia por agua, energía solar, nutrientes y espacio físico (Mohamed-Nazeeb et al., 2008). La DP puede modificar el medio ambiente, ocasionando un aumento o disminución del crecimiento y la productividad (Escalante-Estrada et al., 2008). Un buen manejo de este factor, puede optimizar el espacio de crecimiento y aumentar la productividad en especies asociadas.

Considerando los argumentos anteriores, se planteó como objetivo: analizar el crecimiento y la productividad en la asociación agroforestal 'cedro-lima-chaya', para conocer su densidad de plantación óptima inicial, en un suelo calcimórfico de tipo rendzina negra.

MATERIAL Y MÉTODOS

El experimento se realizó de septiembre del 2008 a mayo del 2010 en Noh-Bec, Quintana Roo, México ($19^{\circ}06' \text{ N}$, $88^{\circ}10' \text{ O}$ y 11 msnm); presentó una temperatura media anual de $25,7^{\circ}\text{C}$, 1562,4 mm de precipitación anual y 1404,3 mm de evaporación anual. Se estableció en una parcela con suelo calcimórfico "Eklú'um" (según la clasificación maya) o rendzina negra (según la clasificación de la FAO-UNESCO); sus características principales: color negro, profundo, de buen drenaje y fértil (WRB, 2010).

El sistema agroforestal (SAF) se constituyó por plantas de cedro rojo, lima Persa y chaya. Para evaluar distintas DP se utilizó un diseño de plantación 'Nelder' (Nelder, 1962) para cedros y limas, el cual consistió en 20 círculos concéntricos alternando cedros y limas a 1,50 m de distancia entre ellos y 10 plantas por círculo. Las DP se definieron a partir de lo reportado en la literatura; procurando que la competencia se ubicara dentro del intervalo de las DP óptimas. La altura inicial de cedros fue de 25 cm y de limas fue de 50 cm; el portainjerto utilizado en limas fue naranjo agrio (*Citrus aurantium* L.). Superpuesto al círculo 'Nelder' y en la misma superficie (3154 m^2), se estableció el cultivo con chayas en un diseño en marco rectangular; para lo cual se ocuparon estacas semileñosas de 40 cm, distanciadas a 1,50 m entre plantas y 3,00 m entre líneas (Figura 1).

A los cedros se les hizo poda de formación a los 6 y 12 meses; a las limas se les quitaron los chupones (reiteraciones en torno al tallo), cada dos meses durante el primer año; a las chayas se les realizó poda de formación a los 8 y 16 meses, dejando las plantas a 1 m de altura. Los residuos de las podas fueron picados en trozos de ± 20 cm, los cuales se dejaron

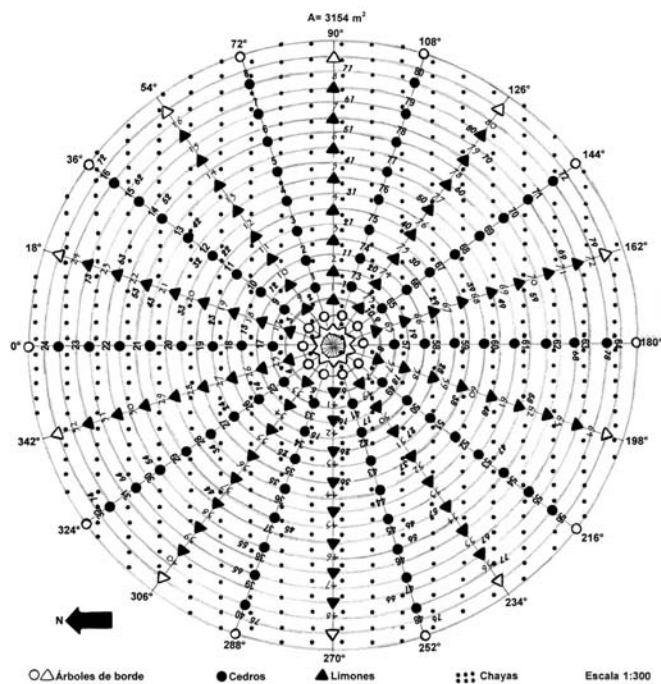


Figura 1. Diseño de plantación en círculo 'Nelder' superpuesto a un diseño de plantación en marco rectangular, para asociar cedros, limas y chayas

Figure 1. Design of plantation in Nelder' circle superposed to a design of plantation in rectangular frame, to associate cedars, limes and chayas

sobre la superficie del suelo para que funcionaran como cobertura. La maleza fue controlada con herbicida (paraquat, 2 L ha⁻¹) además del chapeo (cortar la maleza con machete) cada dos meses. Los tratamientos se definieron en base en la DP obtenida en el área de cada círculo del diseño 'Nelder' al asociar cedros, limas y chayas (Tabla 1).

Se utilizó una muestra al azar de nueve plantas por tratamiento (tres cedros, tres limas y tres chayas), para evaluar, a los 20 meses después de la plantación, las siguientes variables:

Tabla 1. Descripción de tratamientos en la asociación agroforestal 'cedro-lima-chaya'

Table 1. Description of treatments in the agroforestry association 'cedar-lime-chaya'

N	cedro			lima			chaya	Tratamiento (pl ha ⁻¹)
	DC (m)	DA (m)	DP (pl ha ⁻¹)	DC (m)	DA (m)	DP (pl ha ⁻¹)	DP (pl ha ⁻¹)	
1 ^{II}	9,37	2,94	1134	6,37	2,00	1666	2222	
2	15,37	4,82	691	12,37	3,88	859	2222	T ₁ = 3772
3	21,37	6,71	497	18,37	5,77	578	2222	T ₂ = 3297
4	27,37	8,59	388	24,37	7,65	436	2222	T ₃ = 3046
5	33,37	10,48	318	30,37	9,54	349	2222	T ₄ = 2889
6	39,37	12,36	270	36,37	11,42	292	2222	T ₅ = 2784
7	45,37	14,25	234	42,37	13,31	250	2222	T ₆ = 2706
8	51,37	16,13	206	48,37	15,19	219	2222	T ₇ = 2647
9	57,37	18,02	185	54,37	17,08	195	2222	T ₈ = 2602
10 ^{II}	63,37	19,90	167	60,37	18,96	176	2222	

N: Número de círculo; * círculo usado como borde; DC: diámetro del círculo; DA: distancia entre árboles de la misma especie en el mismo círculo; DP: densidad de plantación en el círculo.

1) Crecimientos en la porción subterránea. En esta variable se midieron: a) longitud de la raíz principal (LRP, cm) y b) radio de exploración radical (RER, cm), por el método de excavación (Casper & Jackson, 1997). a) En LRP se midió el crecimiento en profundidad, utilizando una regleta graduada (Acme), la raíz principal en cedros y limas se determinó observando la continuación del eje principal (tallo); para chayas (que fue macropropagada por estacas y que presentó por tal situación un sistema radical fibroso), se eligió la raíz que más profundizó y la más proximal al eje principal. b) En RER se midió el crecimiento radical horizontalmente (en la raíz más extensa y partiendo de la base del tallo); utilizando una cinta métrica (Stanley).

2) Crecimientos en la porción aérea. En esta variable se midieron: a) tasa de crecimiento (TC, cm día⁻¹) y b) índice de vigor de planta (ÍVP). a) La TC se estimó con la ecuación: $TC = [(W_2 W_1) / (t_2 - t_1)] / S$, donde W_2 y W_1 : biomasa final e inicial de la planta completa en un intervalo de tiempo; t_2 y t_1 : momento final e inicial de tal periodo; S: área de terreno ocupado por la planta (Hunt et al., 2002). b) El ÍVP se calculó mediante la fórmula: $\dot{V} = \hat{a}_0 (1 - e^{-\hat{a}_1 t})^{\hat{a}_2}$, donde \hat{a}_0 : altura de planta (medida desde la base del tallo hasta la yema apical, utilizando un estadal Haglof); \hat{a}_1 : tasa de crecimiento; \hat{a}_2 : diámetro de copa (promedio de las mediciones N-S y E-O, hechas con una cinta métrica Stanley); t: tiempo (Zhao-Gang & Feng-Ri, 2003).

3) Productividad biológica. En esta variable se midieron: a) índice de área foliar (ÍÁF, m² m⁻²) y b) producción de biomasa seca (PBS, kg planta⁻¹). a) Para el ÍÁF, primero se midió el área foliar, realizando un muestreo destructivo al final del experimento, utilizando 30 hojas (sin pecíolo) de cada especie por tratamiento, mediante un integrador (Modelo Li-3000A, Li-Cor Lincoln Nebraska, USA); después se estimó el ÍÁF mediante la fórmula: $\dot{A}F = \dot{A}F(DP) / 10000 \text{ cm}^2$, donde $\dot{A}F$: área foliar por planta (m²); DP: densidad de plantación (plantas m⁻²). b) La PBS se calculó con la fórmula: $PBS = W_2 - W_1$, donde W_2 : peso seco final; W_1 : peso seco inicial; se obtuvo mediante un método destructivo extrayendo la planta completa (sistema radical y porción aérea); la biomasa fresca fue secada de 60 a 70°C en una estufa de circulación

de aire forzado (modelo SL305) hasta obtener un peso constante.

La unidad experimental estuvo constituida por un árbol. La distribución de los tratamientos fue sistemática de acuerdo con el diseño ‘Nelder’ (Nelder, 1962); con ocho tratamientos y 10 repeticiones cada uno. Los datos obtenidos en las diferentes variables de respuesta se sometieron a análisis de varianza independientes para cada especie, con pruebas de comparación medias por el método de Tukey a una $\alpha \leq 0,05$, para un Modelo de Optimización Múltiple en Superficies de Respuesta (Montgomery, 2006); usando el software MINITAB 15.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimientos en la porción subterránea

La LRP en cedros, limas y chayas fue estadísticamente diferente ($\alpha \leq 0,05$) al pasar de una DP a otra DP; quiere decir que los crecimientos de la raíz principal de cedros y limas fueron homogéneos a cualquier DP, mientras que para chayas fueron inferiores a los de cedros y limas en condiciones homogéneas de profundidad máxima del suelo (45 cm en promedio) (Figura 2). La profundidad máxima del suelo pudo observarse mientras se hacía la excavación para hallar la raíz principal; a los 45 cm de profundidad se encontró material parental, el cual no permitió una mayor penetración de las raíces, atrofiando la raíz principal de cedros y limas; por lo que la exploración en capas profundas fue limitada, lo cual fue señalado por Osuna-Ceja et al. (2006) como patrón de resistencia física y mecánica del suelo.

Al respecto, Shennan (2008) mencionó que las perennes leñosas no siempre tienen raíces principales profundas, por lo tanto, pueden utilizar más agua y nutrientes disponibles si sus raíces se ubican en la zona radical de otra especie con sistema radical fibroso (como el de las chayas).

A menudo, la LRP puede presentar un patrón de comportamiento diferente, lo cual puede conducir a la superposición de las distribuciones verticales de dos o más especies, como sucedió con cedros, limas y chayas; en respuesta a ello, las plantas desarrollaron cierto grado de plasticidad (capacidad de responder a los cambios), tanto en su LRP como en su RER, fue una forma de evitar la competencia. En este sentido, varios estudios realizados con especies perennes leñosas en suelos poco profundos, han reportado que la LRP y las raíces laterales, se ubican dentro de los primeros 30 cm de profundidad, debido a que se trata del estrato más fértil (Jose et al., 2004).

Los sistemas radicales de cedros y limas fueron los que profundizaron más, de 45 a 48 cm; mientras que en las chayas profundizaron de 36 a 39 cm. Lo anterior es comprensible dado que las dos primeras especies presentaron sistemas radicales pivotantes al provenir de semilla, mientras que las chayas mostraron un sistema radical fibroso porque su macropropagación fue asexual (por estacas caulinares semileñosas); por lo tanto hubo complementariedad. Al respecto, Hauggaard-Nielsen & Jensen (2005) afirmaron que

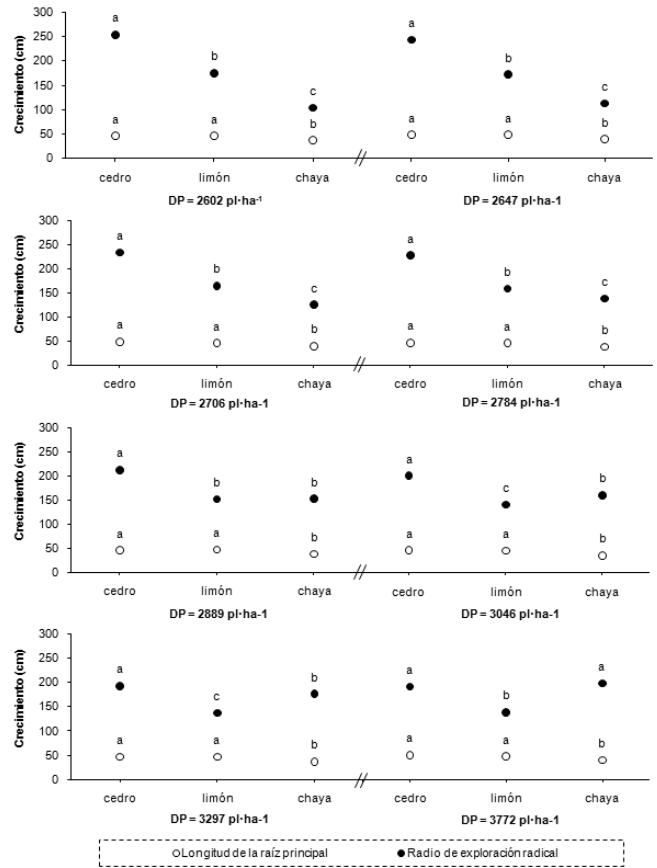


Figura 2. Longitud de la raíz principal y radio de exploración radical de cedros, limas y chayas, a los 20 meses después de la plantación, en un suelo rendzina negra. Círculos con la misma letra, son iguales de acuerdo con el método de Tukey $\alpha \leq 0,05$

Figure 2. Length of main root and radical exploration radius of cedars, limes and chayas, to 20 months after the plantation, in a soil pellic vertisol. Circles with the same letter, are equal in agreement with Tukey's method to a $\alpha \leq 0.05$

cuando se tienen especies con hábito de crecimiento diferente, la extracción nutrimental difiere en una misma condición; por lo tanto, la actividad de los sistemas radicales es complementaria.

El RER en cedros, limas y chayas fue estadísticamente diferente ($\alpha \leq 0,05$) al pasar de una DP a otra DP (Figura 2). Lo cual sugiere que la distribución horizontal de los sistemas radicales, en la asociación ‘cedro-lima-chaya’, presentó complementariedad de 2602 a 3772 plantas ha⁻¹, porque el área de exploración radical fue distinta en cada especie. A nivel de SAF, el RER para la absorción de agua y nutrientes tuvo un patrón de crecimiento más homogéneo en altas DP, mismo que fue disminuyendo en relación directa con la DP; ocasionando que a menor DP también se presentara una menor protección del suelo y mayor pérdida de agua por evaporación, lo cual limitó más los crecimientos radicales que aún la competencia en alta DP.

La complementariedad en los sistemas radicales fue integral, debido a que exhibió patrones de raíces que se modificaron frente a las incertidumbres nutrimentales y

difirieron en su capacidad de explorar los distintos estratos espaciales y temporales del ambiente edáfico; su respuesta local, según Casper & Jackson (1997) dependió de la exploración previa que otras raíces de su misma especie ya habían realizado.

También se presentó competitividad de 2889 a 3772 plantas ha⁻¹, lo cual sugiere que a mayor DP hubo también mayor competencia por recursos. Conforme aumentó la DP el RER disminuyó para cedros hasta 73 cm y en limas hasta 44 cm; pero aumentó para chayas hasta 84 cm (alta plasticidad). Lo que indica que la competencia interespecífica por agua y nutrientes (zonas de agotamiento) fue aumentando conforme aumentó la DP (Porter et al., 1994); y dependiendo del objetivo inmediato, el resultado puede ser benéfico para asociaciones interespecíficas, porque la competencia entre raíces de la misma especie es mayor que la competencia entre raíces de distintas especies (Jose et al., 2004). Los mayores crecimientos radicales en la asociación 'cedro-lima-chaya' se obtuvieron a 2602 plantas ha⁻¹, debido a que las raíces tuvieron menos limitantes biofísicas para el crecimiento y la exploración.

Crecimientos en la porción aérea

En la Figura 3A, a los 20 meses después de la plantación (DDP), los cedros que tuvieron una mayor TC (0,45 cm día⁻¹) se encontraron a 3270 plantas ha⁻¹, en esta DP las limas tuvieron una TC de 0,22 cm día⁻¹, que no fue la máxima, sin embargo no se vieron perjudicadas porque su tendencia de crecimiento fue positiva; y las chayas tuvieron su TC más baja (0,42 cm día⁻¹), por lo que las altas DP no le fueron favorables cuando se encontró en competencia interespecífica. En la Figura 3B, las limas tuvieron una TC máxima de 0,23 cm día⁻¹ a 3772 plantas ha⁻¹, con poca variación al pasar de bajas DP a altas DP, mientras que los cedros y chayas tuvieron un comportamiento estadístico intermedio, que no fue su máximo. En 3C, las chayas tuvieron una TC máxima de 0,51 cm día⁻¹, a 2602 plantas ha⁻¹; en esta DP los cedros y limas tuvieron sus menores TC, lo cual indica que sus TC disminuyeron en bajas DP; y si las chayas se establecieran en DP intermedias a altas con cedros y limas, su crecimiento disminuiría de 0,04 a 0,09 cm día⁻¹.

Frecuentemente los crecimientos en altas DP son mayores que en bajas DP (tal como ocurrió con cedros y limas en esta investigación), este es un efecto efímero que por lo general dura pocos años, y se manifiesta mucho antes de que las plantas sean lo suficientemente altas como para sombrarse unas a otras. Puede ocurrir incluso cuando la competencia con otras plantas este bien controlada y ha sido observado en varias especies (Franco & Harper, 1988).

En todas las DP, los cedros mostraron el siguiente patrón de crecimiento, de 0 a 8 meses tuvieron un crecimiento lineal, de 8 a 12 meses el crecimiento fue acelerado, de 12 a 16 meses el crecimiento fue lento y de los 16 a 20 meses nuevamente fue acelerado (Figura 4A). Las limas, de 0 a 8 meses tuvieron un crecimiento lineal, de 8 a 12 meses el crecimiento fue lento, de 12 a 16 meses el crecimiento fue lineal y de 16 a 20 meses el crecimiento fue nuevamente lento (Figura 4B). Las chayas, de de 0 a 8 meses tuvieron un crecimiento acelerado, de 8 a

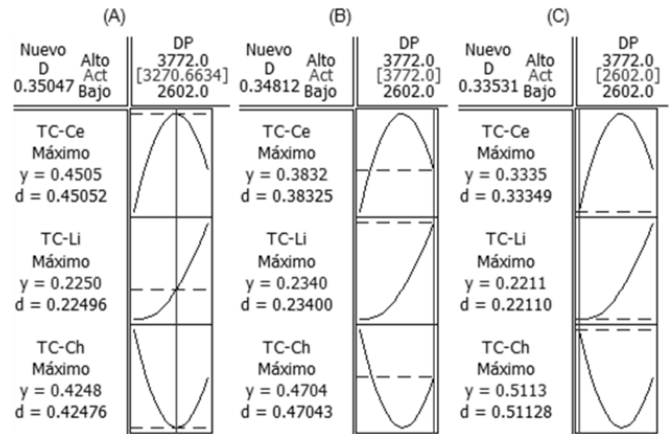


Figura 3. Tasas de crecimiento máximas, en (A) para cedros, en (B) para limas y en (C) para chayas; a los 20 meses después de la plantación

Figure 3. Maximum rates of growth, in (A) for cedars, in (B) for limes and in (C) for chayas; to 20 months after the plantation

12 meses un crecimiento acelerado, de 12 a 16 meses un crecimiento lento y de 16 a 20 meses un crecimiento acelerado (Figura 4C).

En general, la TC en cedros, limas y chayas fue sigmoideal, coincidiendo con lo obtenido en otros cultivos como *Malus domestica* (Costes et al., 2006) y *Citrus sinensis x Citrus reticulata* (Da Cunha & Gravina, 2006); es decir, comienza en un origen, avanza lentamente, aumenta en forma exponencial (en relación proporcional con el tamaño del organismo), se mantiene en reposo y nuevamente aumenta. Esto significa que hay un crecimiento rítmico, en el cual, mientras la porción aérea se encuentra en crecimiento activo, el sistema radical se mantiene en reposo y viceversa.

Otra forma de explicar los patrones de crecimiento, es mediante la dinámica de las DP en base a las fechas, considerando como DP bajas (de 2602 a 2706 plantas ha⁻¹), como DP intermedias (de 2784 a 2889 plantas ha⁻¹) y como DP altas (de 3046 a 3772 plantas ha⁻¹). En la Figura 4A, de los 0-8 meses las plantas de cedros mostraron un crecimiento lineal en todas las DP; de 8-12 meses el crecimiento aumentó en DP altas e intermedias, y no aumentó en DP bajas; de 12-16 meses aumentó en DP bajas, se mantuvo constante en DP intermedias y no aumentó en DP altas; de 16-20 meses aumentó en DP altas e intermedias, y se mantuvo constante en DP bajas. En la Figura 4B, de 0-8 meses las plantas de limón mostraron un crecimiento lineal en todas las DP; de 8-12 meses el crecimiento se mantuvo constante en DP bajas y altas, y en DP intermedias no aumentó; de 12-16 meses aumentó en DP bajas, intermedias y altas; de 16-20 meses aumentó en DP altas, se mantuvo constante en DP bajas, y no aumentó en DP intermedias. En la Figura 4C, de los 0-8 meses las plantas de chaya mostraron un crecimiento lineal en todas las DP; de 8-12 meses el crecimiento aumentó en DP intermedias y altas, y en DP bajas se mantuvo constante; de 12-16 meses aumentó en DP bajas y altas, y se mantuvo constante en DP intermedias; de 16-20 meses aumentó en DP bajas, intermedias y altas.

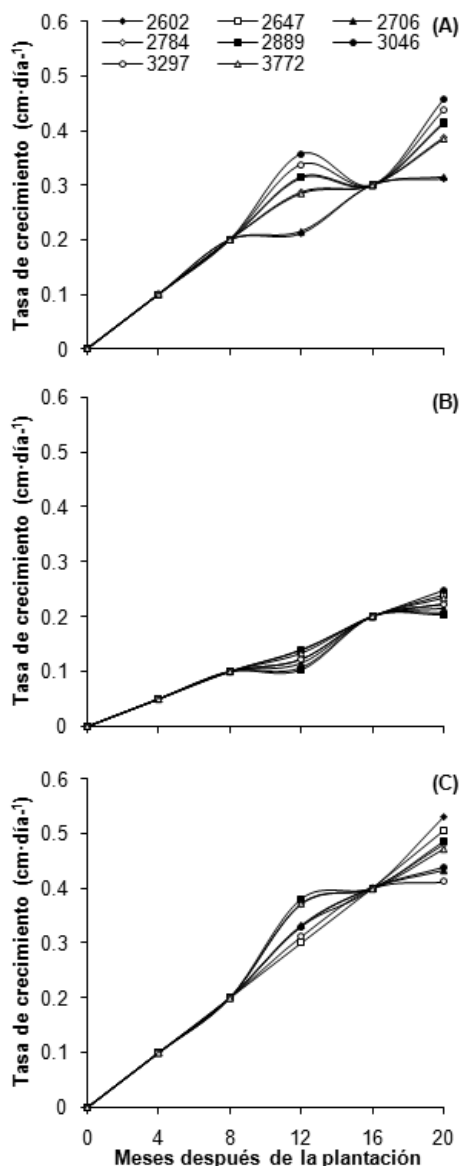


Figura 4. Crecimiento rítmico sigmoide, en (A) para cedros, en (B) para limas y en (C) para chayas; a diferente densidad de plantación

Figure 4. Rhythmic growth sigmoidal, in (A) for cedars, in (B) for limes and in (C) for chayas; to different plantation density

El crecimiento de las plantas no solo dependió de la absorción y transformación de recursos en biomasa, debido a que las plantas y los recursos son relativamente fijos en el espacio (Casper & Jackson, 1997). La TC no se limitó solo por la cantidad de agua o la disponibilidad de nutrientes, sino también por la energía solar que el follaje pudo interceptar (Jose et al., 2004).

Al evaluar la TC se debe considerar el efecto de onda en el círculo 'Nelder' (no observado en cedros, limas, ni chayas hasta los 20 meses DDP); porque en un experimento similar Zeide (1993) observó que alrededor de un árbol dominante por lo general hay un anillo de árboles suprimidos; a su vez, los árboles en el anillo concéntrico siguiente se comportan como dominantes y así sucesivamente. El efecto lo describió

como una 'onda de densidad', que se disipa con la distancia y que se propaga en todas direcciones de los árboles dominantes. Franco & Harper (1988) sugirieron que las 'ondas de densidad' se transmiten a lo largo de los radios y de los arcos del círculo 'Nelder', del centro a los polos; como una interferencia oculta que se propaga en todas direcciones; lo cual tiene un efecto negativo en las plantas cercanas a la especie dominante.

En la Figura 5A, a los 20 meses DDP, los cedros que tuvieron un mayor ÍVP (1,38) se encontraron a 3257 plantas ha^{-1} , en esta DP las limas tuvieron un ÍVP de 0,46, que no fue el máximo, sin embargo no se vieron perjudicadas porque su tendencia de crecimiento fue positiva; y las chayas tuvieron su ÍVP más bajo (0,88), por lo tanto, en altas DP fueron poco vigorosas. En la Figura 5B, las limas tuvieron un ÍVP máximo de 0,46 a 3772 plantas ha^{-1} , con poca variación al pasar de bajas DP a altas DP, con un crecimiento lineal positivo, mientras que cedros y chayas tuvieron un comportamiento estadístico intermedio, que no fue su máximo. En la Figura 5C, las chayas tuvieron un ÍVP máximo de 1,16 a 2602 plantas ha^{-1} , en esta DP cedros y limas tuvieron sus menores ÍVP, por lo que en bajas DP estas especies fueron poco vigorosas. Chayas asociadas con cedros y limas en DP intermedias a altas, reducen su vigor de 0,14 a 0,28; respuesta esperada en relación con lo obtenido en su TC (Figura 3).

El ÍVP corresponde a valores entre 0 y 2,5 para las tres especies en todos los tratamientos; el promedio (error estándar) para la población de cedros fue de 1,10, para limas 0,42 y para chayas 1,03. Mientras más alto fue el ÍVP, representó un mayor crecimiento a un tiempo determinado (en este caso, 20 meses DDP) (Zhao-Gang & Feng-Ri, 2003).

Las chayas tuvieron los más altos ÍVP, lo que indica una proporción adecuada entre la altura de planta y su diámetro de copa; lo que supone una excelente adaptación a las condiciones edáfico-ambientales de la zona. Los cedros no tuvieron un alto ÍVP, debido a que fueron atacados hasta en un 95% por el barrenador de los brotes [*Hypsipyla grandella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae)], esta plaga merma el crecimiento desde el inicio de la plantación; por lo que la asociación 'cedro-lima-chaya' no estuvo exenta de la presencia y daños ocasionados por esta plaga; de 2602 a 3772 plantas ha^{-1} se encontraron daños en cedros, sin ningún efecto disuasivo al respecto. Las limas tuvieron el menor ÍVP y TC de las tres especies, lo cual no necesariamente sugiere que las plantas estuvieran estresadas por algún factor, sino que pudo deberse a un metabolismo fisiológico más lento, como consecuencia de no entrar en periodo de letargo o descanso y porque en suelos calcimórficos esta especie es susceptible a deficiencias por micronutrientes (Avilán et al., 1998).

Una planta vigorosa es aquella que tiene una mayor TC, en comparación con otras cuando se desarrollan en las mismas condiciones. Makhabu et al. (2006) afirmaron que hay una correlación positiva entre la concentración de nutrientes y el vigor, y/o una correlación negativa entre la defensa de las plantas y el vigor; lo cual puede ser predicho por la variación fenotípica y genotípica. Al respecto, las limas tuvieron brotes poco vigorosos, su concentración nutricional fue baja y la

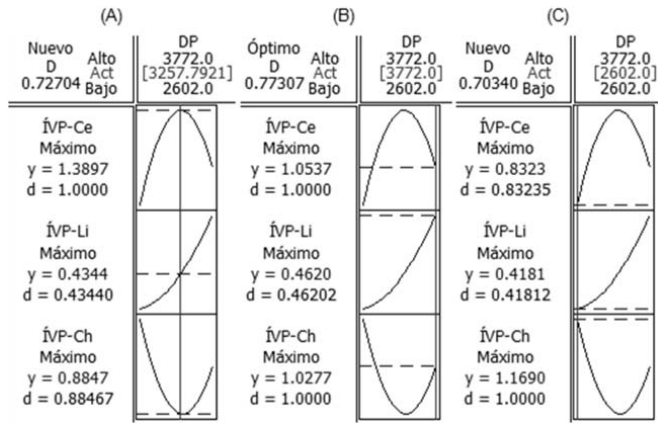


Figura 5. Índice de vigor de planta máximo, en (A) para cedros, en (B) para limas y en (C) para chayas; a los 20 meses después de la plantación

Figure 5. Maximum index plant vigor, in (A) for cedars, in (B) for limes and in (C) for chayas; to 20 months after the plantation

de fibra alta, con poco ataque de plagas; cedros y chayas fueron especies más vigorosas, por lo que tuvieron una mayor concentración de nutrimentos, menor actividad de taninos y menor concentración de fibras en su crecimiento inicial y de ellos solo los cedros fueron los más atacados por plagas.

Productividad biológica

En la Figura 6A, a los 20 meses DDP, los cedros que tuvieron un mayor ÍÁF (0,33) se encontraron a 3669 plantas ha⁻¹, en esta DP las limas y las chayas tuvieron ÍÁF altos (aunque no máximos), con una tendencia lineal a partir de DP intermedias a altas. En las Figuras 6B y 6C, el escenario para limas y chayas, mostró ÍÁF máximos (0,50 y 5,44, respectivamente) a 3772 plantas ha⁻¹, con tendencia lineal positiva a partir de DP intermedias a altas. Los mayores ÍÁF fueron para las chayas, mientras que los promedios en cedros y limas fueron similares; lo cual se debió a que las chayas tuvieron mayor TC que cedros y limas (Figura 4). En altas DP la productividad puede decrecer en función de la dificultad para obtener recursos; debido a ello, el crecimiento puede verse afectado. En bajas DP la productividad por hectárea fue menor, porque no se ocupó toda el área disponible, por tanto, la productividad por unidad de área fue inferior al máximo de productividad posible.

El promedio (error estándar) para la población de cedros fue de 0,24, para limas fue de 0,36 y para chayas fue de 4,19. En las tres especies los mayores ÍÁF se obtuvieron en DP altas, lo cual indica competitividad, aunque no necesariamente menor PBS (Figura 7) (Jose et al., 2004; Koyama & Kikuzawa, 2009). Esta mayor productividad se logra mediante la complementariedad ecológica entre árboles y cultivos, tanto en la porción subterránea como en la porción aérea; prefiriendo aquellas especies que generen mayores ingresos económicos (García-Barrios & Ong, 2004).

El manejo de podas y aclareos en cedros y limas, dependerán del objetivo en cuestión y del nivel de

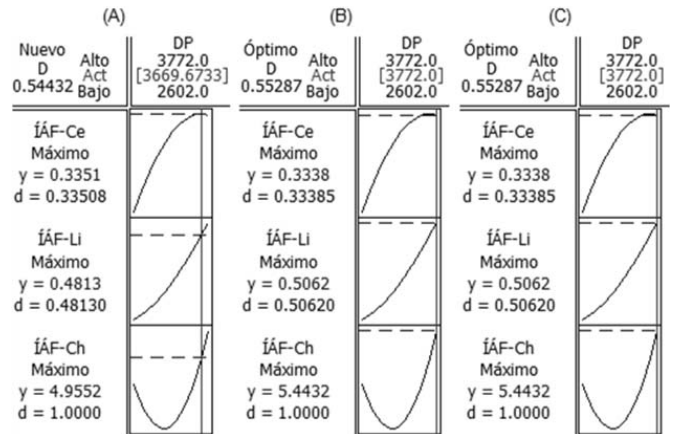


Figura 6. Índice de área foliar máximo, en (A) para cedros, en (B) para limas y en (C) para chayas; a los 20 meses después de la plantación

Figure 6. Maximum index leaf area, in (A) for cedars, in (B) for limes and in (C) for chayas; to 20 months after the plantation

competencia por recursos; debido a que es un SAF dinámico a través del tiempo. En general, los cedros requieren al menos 20 años para tener una copa bien desarrollada y las limas hasta cuatro años. Lo cual es benéfico para las chayas en la etapa inicial del SAF porque podrán aprovechar la energía solar que se filtra a través de las copas de cedros y limas; razón y causa del éxito de muchos SAF (Kellimore, 2010). En el mediano y largo plazo, el sombreado proporcionado por cedros será una limitante para el crecimiento y productividad de limas y chayas, para ello los aclareos y las podas serán fundamentales. En este sentido, la competencia por luz puede ser mucho más importante que la competencia radical, debido al efecto de sombreado (García-Barrios & Ong, 2004; Jose et al., 2004).

En la Figura 7A, a los 20 meses DDP, los cedros que tuvieron una mayor PBS (2,30 kg planta⁻¹) se encontraron a 3129 plantas ha⁻¹, la tendencia mostró que tanto en bajas como en altas DP las plantas acumularon menos materia seca en sus tejidos. En la Figura 7B el escenario para limas tuvo su mayor PBS (5,19 kg planta⁻¹) a 2602 plantas ha⁻¹, mientras más alta fue la DP menor fue su acumulación de materia seca. En la Figura 7C, las chayas que tuvieron una mayor PBS (8,48 kg planta⁻¹) se encontraron a 3425 plantas ha⁻¹, la tendencia indica que en la medida que disminuye la DP, la acumulación de materia seca va siendo menor.

Las chayas acumularon tres veces más, materia seca que los cedros, y las limas dos veces más que los cedros; el promedio (error estándar) para la población de cedros fue de 2,18 kg planta⁻¹, para limas fue de 5,14 kg planta⁻¹ y para chayas fue de 6,20 kg planta⁻¹. Lo cual indicó que los follajes en chayas y limas fueron más eficientes en la producción de fotoasimilados, mostrando una mayor capacidad fotosintética; debido a que la PBS es una función de la fotosíntesis, la respiración y la eficiencia de conversión de carbohidratos a materia seca (Hunt et al., 2002; Koyama & Kikuzawa, 2009).

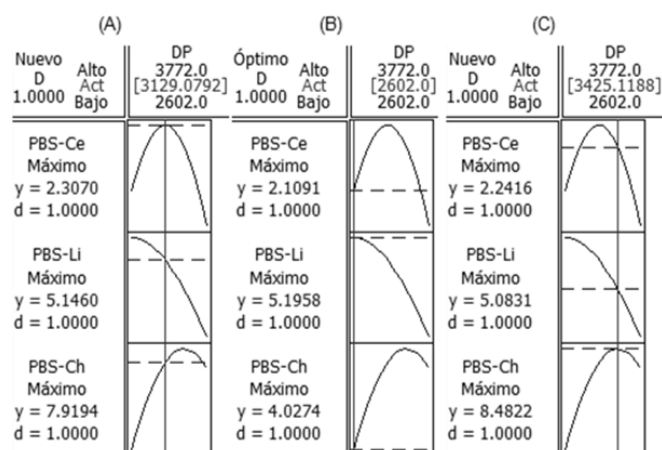


Figura 7. Producción de biomasa seca máxima, en (A) para cedros, en (B) para limas y en (C) para chayas; a los 20 meses después de la plantación

Figure 7. Maximum productions dry biomass, in (A) for cedars, in (B) for limes and in (C) for chayas; to 20 months after the plantation

El hecho de que la PBS en la DP más alta no se haya incrementado en forma significativa, indica que la competencia fue mayor a la disponibilidad de recursos del suelo. En relación a ello, Geyer (2006) encontró que el espacio de crecimiento no afectó la PBS en especies como: *Acer saccharinum*, *Robinia pseudoacacia*, *Populus deltoides*, *Gleditsia triacanthos* y *Ulmus pumila*; en rotaciones de dos años. Por lo que la PBS fue prácticamente la misma a cualquier DP, aunque en altas DP la PBS por unidad de superficie fue mayor durante los primeros años. Sin embargo, después de nueve años las plantas fueron perdiendo vigor, cuestionándose el costo económico asumido para plantaciones en altas DP.

La PBS y el ÍÁF son dos parámetros estructurales fundamentales para describir la copa de un árbol en relación a factores limitantes (principalmente agua, luz y nutrientes) (Geyer, 2006). La PBS debe ser considerada como el producto de la captura del recurso más limitante, y la eficiencia con la que el recurso capturado se convierte en biomasa (García-Barrios & Ong, 2004). La competencia por luz y su impacto en la PBS, pueden ser manejados mediante la DP, y el entendimiento de los procesos de competencia y complementación en las copas (Jose et al., 2004).

Considerar únicamente los resultados de esta variable, para determinar la DP óptima sería complicado; porque al pasar de bajas DP a altas DP la productividad intraespecífica cambia. A los cedros les favorecen más las DP intermedias, a las limas las bajas DP y a las chayas las altas DP. El criterio de decisión sería: iniciar con altas DP, para buscar la rentabilidad con el cultivo de corto plazo (chayas), en la medida que las copas de cedros y limas van limitando el crecimiento de las chayas, se hacen aclareos y se pasa de altas a bajas DP (mediano plazo) lo cual favorecerá a las limas; y seguir realizando aclareos que permitan ir ajustando la DP según los requerimientos del SAF, de esta forma se podría regular una DP que permita el 100% de productividad (Kellimore, 2010).

CONCLUSIONES

Cedros, limas y chayas, presentaron distinto patrón de crecimiento y productividad, mismos que estuvieron influenciados por la densidad de plantación.

El crecimiento radical en cedros y limas fue mayor a 2602 plantas ha⁻¹, y en chayas a 3772 plantas ha⁻¹; la profundidad máxima el suelo (45 cm) fue una limitante en el crecimiento radical. El crecimiento aéreo en cedros y limas fue mayor a 3270 plantas ha⁻¹, y en chayas a 2602 plantas ha⁻¹. La mayor productividad se obtuvo de 3129 a 3425 plantas ha⁻¹.

La asociación 'cedro-lima-chaya' se debe iniciar con una densidad de plantación de 3046 a 3297 plantas ha⁻¹; la cual se irá modulando mediante aclareos, según los requerimientos del sistema, hasta conseguir el mayor crecimiento y productividad.

LITERATURA CITADA

- Avilán, L.; Dorantes, I.; Ruiz, J.; Rodríguez, M. Descripción de las limas y limones de la colección del centro nacional de investigaciones agropecuarias. *Agronomía Tropical*, v.48, n.1, p.41-52, 1998.
- Casper, B.; Jackson, R. Plant competition underground. *Annual Review Ecology Systems*, v.28, n.1, p.545-570, 1997. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.545>
- Costes, E.; García-Villanueva, E.; Jourdan, C.; Regnard, J.L.; Guédon, Y. Co-ordinated growth between aerial and root systems in young apple plants issued from in vitro culture. *Annals of Botany*, v.97, n.1, p.85-96, 2006. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcj003>
- Curiel-Rodríguez, A.; Espinoza-Espinoza, J.R.; Cruz-Hernández, J.P.; Almaguer-Vargas, G. Modelos de regresión para estimar área de la hoja y biomasa de órganos en árboles jóvenes de manzano. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, v.13, n.2, p.171-177, 2007.
- Da Cunha, B.M.; Gravina, A. Influencia del tipo de brote en el cuajado y crecimiento del fruto del tangor ortanique. *Agrociencia*, v.10, n.1, p.37-46, 2006.
- Escalante-Estrada, L.E.; Escalante-Estrada, Y.I.; Linzaga-Elizalde, C. Densidad de siembra del girasol forrajero. *Agronomía Costarricense*, v. 32, n.2, p.177-182, 2008.
- Franco, M.; Harper, J. Competition and the formation of spatial pattern in spacing gradients: an example using *Kochia scoparia*. *Journal of Ecology*, v.76, n.1, p.959-974, 1988. <http://dx.doi.org/10.2307/2260626>
- García-Barrios, L.; Ong, C.K. Ecological interactions, management lessons and design tools in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, v.61, n.1, p.221-236, 2004. <http://dx.doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029001.81701.f0>
- Geyer, W.A. Biomass production in the Central Great Plains USA under various coppice regimes. *Biomass and Bioenergy*, v.30, n.1, p.778-783, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.08.002>
- Haugaard-Nielsen, H.; Jensen, E.S. Facilitative root interactions in intercrops. *Plant and Soil*, v.274, n.1, p.237-250, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-004-1305-1>

- Hunt, R.; Causton, D.R.; Shipley, B.; Askew, A.P. A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany*, v.90, n.1, p.485-488, 2002. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcf214>
- Jose, S.; Gillespie, A.R.; Pallardy, S.G. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, v.61, n.1, p.237-255, 2004. <http://dx.doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b>
- Kellimore L.R. *Handbook on agroforestry: management practices and environmental impact*. Hauppauge, NY: Nova Science Pub Inc., 2010. 507 p.
- Koyama, K.; Kikuzawa, K. Is whole plant photosynthetic rate proportional to leaf area? A test of scalings and a logistic equation by leaf demography census. *The American Naturalist*, v.173, n.1, p.640-649, 2009. <http://dx.doi.org/10.1086/597604>
- López-Ríos, G.F. *Ecofisiología de árboles*. 2da. Edición. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo, 2009. 490p.
- Makhabu, S.W.; Skarpe, C.; Hytteborn, H.; Mporfu, Z.D. The plant vigour hypothesis revisited - how is browsing by ungulates and elephant related to woody species growth rate? *Plant Ecology*, v.184, n.1, p.163-172, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s11258-005-9060-9>
- Mohamed-Nazeeb, A.T.; Tang, M.K.; Loong, S.G.; Syed-Shahar, S.A.B. Variable density plantings for oil palms (*Elaeis guineensis*) in Peninsular Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, special issue, p.61-90, 2008.
- Montgomery, D. *Diseño y análisis de experimentos*. 2.ed. México: Editorial Limusa Wiley, 2006. 686p.
- Nelder, J.A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. *Biometrics*, v.18, n.3, p.283-307, 1962. <http://dx.doi.org/10.2307/2527473>
- Osuna-Ceja, E.; Figueroa-Sandoval, B.; Oleschko, K.; Flores-Delgadillo, M.; Martínez-Menes, M.; González-Cossío, F. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, v.40, n.1, p.27-38, 2006.
- Porter, P.S.; Comerford, N.B.; Escamilla, J.A. Use of thiesen areas in models of nutrient uptake in forested ecosystem. *Soil Science Society American Journal*, v.58, n.1, p.210-215, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010031x>
- Shennan, C. Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture. *Philosophical Transactions the Royal Society Biological Sciences*, v.363, n.1, p.717-739, 2008. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.2180>
- World Reference Base for Soil Resources - WRB. Classification key. FAO AGL. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrbnewkey>. 11 Mar. 2010.
- Zeide, B. Analysis of growth equations. *Forest Science*, v.39, n.3, p.594-616, 1993.
- Zhao-Gang, L.; Feng-Ri, L. The generalized Chapman-Richards function and applications to tree and stand growth. *Journal of Forestry Research*, v.14, n.1, p.19-26, 2003. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02856757>