



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



<https://doi.org/10.14483/2256201X.24763>


ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA


ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X

Efecto del espaciamiento en la productividad de teca clonal en sistema silvopastoril en Costa Rica

Effect of spacing on clonal teak productivity in a silvopastoral system in Costa Rica

Olman Murillo Gamboa ^a, Yorlery Badilla Valverde ^a,
Joshua Jiménez-Jiménez ^a, Róger Moya Roque ^a

^a Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. ^{ROR}

 Autor para correspondencia

Recibido: 4 de febrero de 2026

Aceptado: 9 de junio de 2026

Citación: Murillo Gamboa, O., Badilla Valverde, Y., Jiménez-Jiménez, J., & Moya Roque, R. (2026). Efecto del espaciamiento en la productividad de teca clonal en sistema silvopastoril en Costa Rica. *Colombia Forestal*, 29(2), e24763.

<https://doi.org/10.14483/2256201X.24763>

Highlights

- El análisis de costos por árbol individual simplifica y mejora la precisión.
 - El efecto de borde pudo influir en atenuar el efecto de la densidad de plantación.
 - El espaciamiento 2.5x3m produce más madera y captura de carbono por área.
 - El espaciamiento 2.5x4m registró el mayor valor comercial por árbol (US\$27-31).
 - El SSP incrementa 1.2 veces la producción de madera y captura de carbono.
-

Resumen

La ganadería abarca un 33% del territorio y aporta emisiones importantes de gases efecto invernadero. El estudio tuvo como objetivo determinar el efecto de densidad de plantación en un sistema silvopastoril, para producción de madera y captura de carbono. Se evaluó ocho años el desarrollo de clones de teca en seis espaciamientos en franjas de 6 m de ancho, con tres hileras internas plantadas a 1 m; 2 m; 3 m; 4 m; 5 m y 6 m. La base de análisis fue la franja de 1000 m lineales por 6 m de ancho. El espaciamiento 3m registró la mayor producción comercial con 110 m³ en 6000 m² y capturar 105 toneladas de carbono. El mayor valor comercial por árbol se registró con 4 m, entre US\$27 y \$31. El SSP en franjas optimiza el uso del espacio, aumenta la producción de madera y captura de carbono en 1.2 veces con respecto a la plantación convencional.

Palabras clave: propiedades de madera, rendimiento, sistemas agroforestales, *Tectona grandis*, volumen

Abstract

Livestock farming in Costa Rica covers 33% of the territory and contributes significantly to greenhouse gas emissions. Timber trees expand environmental services and generate economic impact on livestock farming. The study aimed to determine the effect of planting density in a silvopastoral system for timber production and carbon sequestration. Over 8 years the development of teak clones under six spacings was evaluated, based on three internal tree-rows inside 6m wide strips and the trees planted every 1 m; 2 m; 3 m; 4 m; 5 m and 6 m. The basis for analysis was a strip measuring 1000 linear meters by 6 meters wide. The 3 m spacing recorded the highest production with 110 m³ in the 6000 m², capturing 105 tons of carbon at 8 years. Highest commercial value per individual tree was recorded under 4 m spacing with US\$27 and US\$31. SSP optimizes space usage and allows for a 1.2-fold increase in wood production and carbon capture compared to conventional planting.

Keywords: wood properties, yield, agroforestry systems, *Tectona grandis*, volume.

INTRODUCCIÓN

La ganadería es la actividad de mayor uso del suelo en Costa Rica y se estima que está presente en más de 1.5 millones de ha (aproximadamente un 33%) del territorio y más del 60% del territorio agropecuario ([Instituto Nacional de Estadística y Censos \[INEC\], 2015](#)). Un estudio de encadenamiento agropecuario determinó que esta es la actividad económica que genera mayor empleo en el país, superando a industrias como la bananera o la cafetalera, que convierten a la ganadería en uno de los principales motores del desarrollo rural del país ([Arguedas, 2019](#)). Sin embargo, varios factores afectan la actividad que explican la vulnerabilidad, asociada a pobreza y a bajo desarrollo humano. La ganadería enfrenta nuevos desafíos con el cambio climático y en cómo disminuir el impacto del estrés calórico, con una huella de carbono negativa y con la exigencia europea de una nueva norma ambiental para permitir el ingreso de la carne a su mercado ([Casasola et al., 2009](#); [Eggleston et al., 2006](#); [Ibrahim et al., 2006](#); [Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017](#); [Murgueitio & Ibrahim, 2004](#); [Souza de Abreu, 2002](#)).

En materia de abastecimiento de madera, en casi todos los países latinoamericanos encontramos un déficit significativo, que ha propiciado el ingreso de productos y materiales alternativos cada vez mejor posicionados. Sumado al desplazamiento de la madera, en el caso de Costa Rica, el desabastecimiento de madera nacional ha motivado también que más del 40% del consumo provenga de la importación ([Murillo, 2022](#); [Oficina Nacional Forestal \(ONF\), 2023](#)). Por tanto, el país requiere fomentar opciones de producción de madera a partir de modalidades diferentes a la clásica plantación convencional en bloque ([Murillo et al., 2015](#); [Murillo & Badilla, 2023a](#)).

Dentro de este escenario de crisis del sector ganadero y del sector de plantaciones forestales, se dan las condiciones para una alianza natural que podría generar beneficios a ambos sectores ([Arguedas, 2019](#); [Bueno, 2012](#); [Murillo & Badilla, 2023b](#)). Por tanto, el concepto de sistema silvopastoril (SSP) debe orientarse hacia una modalidad agroforestal, donde coexistan la producción ganadera con la producción económica de especies forestales ([Murillo et al., 2015](#); [Murillo & Badilla, 2023a](#)).

Sin embargo, varios factores limitantes y barreras han surgido que impiden la adopción de los SSP en la región (Clavero & Suárez, 2006). Lo que ha motivado al desarrollo de investigaciones que atiendan los vacíos de conocimiento, como en materia de financiamiento y de costos (Arguedas, 2019; Jiménez, 2023; Ospino *et al.*, 2022; Ospino-Araya *et al.*, 2020; Quaresma *et al.*, 2008; Vergara *et al.*, 2013), en temas de crecimiento y rendimiento forestal bajo distintos espaciamientos (Cabrera *et al.*, 2022; Fallas, 2017; González, 2014; Moya *et al.*, 2013; Murillo *et al.*, 2025; Murillo & Badilla, 2023a). A pesar de estos trabajos recientes, persisten vacíos de conocimiento en relación con la densidad de plantación apropiada dentro de SSP. Por tanto, esta investigación tuvo como objetivo principal, determinar el mejor espaciamiento de plantación clonal de teca en SSP en franjas, para alcanzar objetivos de producción de madera y de fijación de carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se inició con ensayos silvopastoriles establecidos en el 2014, en la finca La Vega del Instituto Tecnológico de Costa Rica, distrito Florencia, San Carlos, Zona norte del país. El sitio se localiza a 200 m de altitud en una región con precipitaciones entre 3000 y 3300 mm al año, con menor lluvia en los meses de febrero y abril, aunque no inferior a los 50 mm.mes⁻¹. La temperatura es cálida con un promedio anual superior a los 25-28 °C. El sitio es plano, con pendientes < 5%, los suelos son inceptisoles, pesados, arcillosos, ácidos (pH < 5.5) con baja fertilidad natural (CICE < 10 meq.100g⁻¹) y con problemas de encharcamiento parcial en la época de mayor precipitación.

El ensayo se estableció en un experimento silvopastoril de 10 ha, donde se evaluó también el desarrollo de un hato de engorde con 25 animales de raza Brahman en rotaciones de 3 días por apartado, en un ciclo de rotación de 30 días completos (Paniagua *et al.*, 2017). El hato ganadero mantuvo ciclos de engorde de 2 años, donde se complementó su alimentación de manera balanceada con aporte de sales minerales, destilados de maíz, citropulpa, urea, melaza y pastos conservados (ensilaje) (Paniagua *et al.*, 2017)

El componente forestal del SSP consistió en el establecimiento de franjas (6 m de ancho) a lo largo de las divisorias de los apartos del sistema, separadas cada 50 m aproximadamente. Estas franjas se establecieron en un terreno que se encontraba en plena producción animal, por tanto, no se sembró el pasto, ni tuvieron preparación del suelo. El pasto dentro de las franjas fue quemado con herbicida sistémico (Glifosato) y se mantuvo el control de malezas con aplicaciones cada 2 meses en los primeros 2 años. Posteriormente, el control de malezas se realizó cada 4 a 6 meses. Los animales no ingresaron a la franja en los primeros 7 años.

Dentro de las franjas se estableció un ensayo de espaciamientos con clones de teca (*Tectona grandis* L.), provenientes del programa de mejoramiento genético de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal GENFORES (Badilla & Murillo, 2022b). Los clones utilizados formaron parte de la colección élite obtenida de diversos ensayos genéticos establecidos en el país, con una ganancia genética reportada en crecimiento de aproximadamente un 11%, en relación con la semilla mejorada (Badilla & Murillo, 2022a; Murillo *et al.*, 2019).

En cada franja se plantaron tres hileras a lo largo, separadas por 2.5 m de ancho. A lo largo de cada hilera se plantó a 6 distancias de siembra: cada 6 m, 5 m, 4 m, 3 m, 2 m y cada 1 m respectivamente basado en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Donde cada una de tres franjas independientes fungió como efecto de Bloque o Repetición. La unidad experimental consistió en el conjunto de 18 árboles por espaciamiento por bloque. Cada franja o repetición tuvo en promedio 130 m de largo x 6 m ancho, para un total de 780 m².

El estudio contempló mediciones anuales durante los primeros 5 años (2014-2018), que luego continuaron cada 2 años. En cada árbol se midió el DAP, el número de trozas comerciales (de 2.3 m de largo) y la calidad de las primeras 4 trozas de acuerdo con la metodología para determinar la calidad de plantaciones forestales (Murillo, 2000; Murillo & Badilla, 2023c). Esta es una escala de 1 a 4, donde se califica la calidad de las primeras cuatro trozas comerciales del árbol, (largo 2.3 m), donde una calificación de 1 es para una troza de alta calidad para aserrío, mientras que, en el otro extremo, una calificación de 4 se otorga a una troza sin valor comercial para aserrío. La calidad 2 se asigna a la troza con defectos leves, mientras que la calidad 3 para la troza con defectos severos, pero al menos un 50% es aprovechable comercialmente. Los datos de calidad de cada troza individual son luego promediados para obtener la calidad global del árbol, como se describe en la función (1). El promedio se ajustó con base en el peso económico de cada troza (Murillo, 2000), como se observa en los coeficientes respectivos.

$$\text{Calidad del árbol} = \text{CalTroza1} * 0.4 + \text{CalTroza2} * 0.3 + \text{CalTroza3} * 0.2 + \text{CalTroza4} * 0.1 \quad (1)$$

Dado que el valor de calidad del árbol obtenido es un valor fraccionado entre 1 y 4, para facilidad de análisis fue transformada a una escala de 1 a 100.

$$\text{Calidad100} = (1 + (1 - (\text{Calidad en escala de 1 a 4}))/3) * 100 \quad (2)$$

La altura comercial fue definida hasta el punto donde se observó la pérdida de dominancia apical, normalmente por presencia de alguna bifurcación o un descope por viento. Las mediciones registraron también la ubicación de los árboles según su posición en el borde izquierdo, borde derecho y línea central.

Los datos de campo fueron procesados mediante el programa para la Determinación de la Calidad y Valoración de Plantaciones Forestales (Murillo & Badilla, 2023c), con el fin de obtener, para cada árbol, las variables de volumen comercial, calidad y valor económico. Para estimar el valor económico de cada individuo, el programa convierte el volumen comercial en su valor de mercado utilizando una tabla de precios de compra de la madera (US\$), cuyos valores dependen de la categoría diamétrica correspondiente (González, 2014; Murillo & Badilla, 2023a).

Finalmente, se procedió a crear las variables a) volumen colectivo total de madera por 1000 m de franja por 6 m de ancho (6000 m³) y también, b) el valor económico colectivo total respectivamente para mayor facilidad de análisis. Para esto se relacionó el área efectiva de cada espaciamiento en cada franja. Es decir, para el espaciamiento de 1 m entre árboles se tuvo una superficie de 54 m² (9 x 1 m de largo x 6 m de ancho) mientras que para los espaciamientos de cada 2 m es de 66 m² (6 árboles x 2 m x 6 m), para el de cada 3 m (108 m²), 4 m (144 m²), 5 m (180 m²) y 6 m (216 m²), respectivamente.

El ensayo tuvo un primer raleo a los ocho años de una intensidad aproximada al 50% de los árboles originales, donde se eliminaron los individuos de menor crecimiento (DAP) y de menor calidad. Para la estimación del volumen y el valor comercial colectivo en una franja de 1000 m se tomó en cuenta solamente los árboles en pie posterior al raleo.

Determinación de la fracción de carbono y propiedades de la madera

De manera complementaria se revisó algunas propiedades de la madera de teca producida en este sistema de franjas a los ocho años, con el propósito de determinar si hubo algún efecto en la calidad de la madera. En específico, se determinó la presencia de duramen dado su relevancia en la comercialización de teca. En cada una de las tres repeticiones (franjas) se tumbaron 12 árboles al azar (un total de 36 individuos), se tomó un disco de madera de la base de 3 cm de grosor y se procesaron en los laboratorios de tecnología de la madera de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago. De cada muestra de madera se determinó el porcentaje de duramen, el poder calorífico básico y el contenido de carbono.

Para el estudio del contenido de carbono se tomaron muestras de los 3 espaciamientos de mayor densidad de plantación (1m, 2m y 3m), mediante muestras con barreno de 5mm de diámetro (tarugo) a 1.3 m de altura. Se colectaron muestras de cinco árboles al azar dentro de cada espaciamiento, en cada bloque, para un total de 3 espaciamientos x 5 árboles x 3 Bloques = 45 árboles.

La determinación del diámetro de duramen se obtuvo de discos de madera proveniente de la base y a los 2.3 m de altura del fuste de cada árbol muestreado. Se procedió a realizar dos mediciones perpendiculares sobre el diámetro total de cada disco de madera. Con el valor del diámetro promedio de duramen, se calculó la superficie de duramen para finalmente, determinar su proporción (%) en la superficie total del disco de madera.

El poder calórico (PC) fue determinado a partir de submuestras de varios individuos por cada espaciamiento en cada franja. La muestra compuesta fue subdividida en 5 repeticiones para determinar el poder calórico. El material fue molido y tamizado a través de mallas 40-60 (425 y 250 μm) y fue secado al 0% de contenido de humedad. Luego se seleccionó 5 submuestras para medir el poder calórico (PC) utilizando una bomba calorimétrica Micro-Parr modelo 6725 (Parr Instrument Company, Illinois, USA), de conformidad con la norma ASTM D-5865 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2004). Para el análisis de carbono fue utilizada una muestra compuesta de 3 árboles por cada uno de los 3 espaciamientos evaluados. El porcentaje de carbono se determinó utilizando el analizador elemental, modelo Vario Micro Cube (Germany).

Análisis de datos

Para cada una de las variables se analizó su cumplimiento con los supuestos de la regresión (normalidad y homocedasticidad mediante la prueba de Shapiro-Wilks modificado, a un nivel de significancia del 95%). Dado que la base de datos fue relativamente pequeña (unidad experimental de 18 individuos), no se logró un cumplimiento con los parámetros de la regresión. Por tanto, los datos fueron procesados y analizados de manera no paramétrica, mediante el uso de tablas de contingencia con la prueba de Chi-cuadrado donde $(b-1) \cdot (T-1)$ grados de libertad ($b = 3$ bloques y $T = 6$ tratamientos), para determinar la significancia de las diferencias entre tratamientos (espaciamientos) en la productividad del sistema.

Se utilizó también la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para determinar la significancia entre los espaciamientos evaluados.

RESULTADOS

En la [Tabla 1](#) se presenta el efecto del espaciamiento sobre el desarrollo de clones de teca establecidos en franjas, para las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), calidad del árbol, volumen comercial por árbol, valor comercial por árbol, volumen comercial colectivo en 1000 m lineales de franja (6000 m²) y valor comercial colectivo en 1000 m lineales de franja (6000 m²).

Se observó una clara tendencia al incremento del volumen comercial por árbol conforme disminuyó la densidad de árboles en la franja ([Tabla 1](#)). Sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. En contraste, el valor económico de la madera por árbol sí presentó diferencias significativas, registrándose los mayores valores en los espaciamientos de 4 y 6 m entre árboles. Asimismo, se observó una tendencia de aumento del valor económico individual a medida que disminuyó la densidad de plantación.

De manera general, los resultados muestran que los espaciamientos más amplios (4 y 6 m) favorecieron el mayor crecimiento promedio del DAP, el mayor volumen promedio por árbol y el mayor valor económico por árbol. Por el contrario, en cuanto a la calidad comercial del fuste, evaluada mediante la rectitud del tronco y la ausencia de bifurcaciones tempranas, los mejores resultados se obtuvieron en los espaciamientos más reducidos.

Esta tendencia fue opuesta al analizar el volumen y el valor comercial colectivos por unidad de área ([Tabla 1](#)), donde los mayores valores se registraron en los espaciamientos de mayor densidad de plantación, correspondientes a distancias de siembra entre 1 y 3 m entre árboles.

Las pruebas de chi-cuadrado, realizadas mediante tablas de contingencia, indicaron que únicamente las variables valor económico por árbol y volumen comercial colectivo en franjas de 1000 m de longitud (6000 m²) presentaron diferencias significativas asociadas al efecto de la densidad de plantación ($p > 0.90$).

En la [Figura 1](#) se observa un patrón consistente entre espaciamientos, donde los mayores valores de DAP se registraron en los tratamientos de menor densidad (5 y 6 m entre árboles) durante los ocho años de evaluación del ensayo.

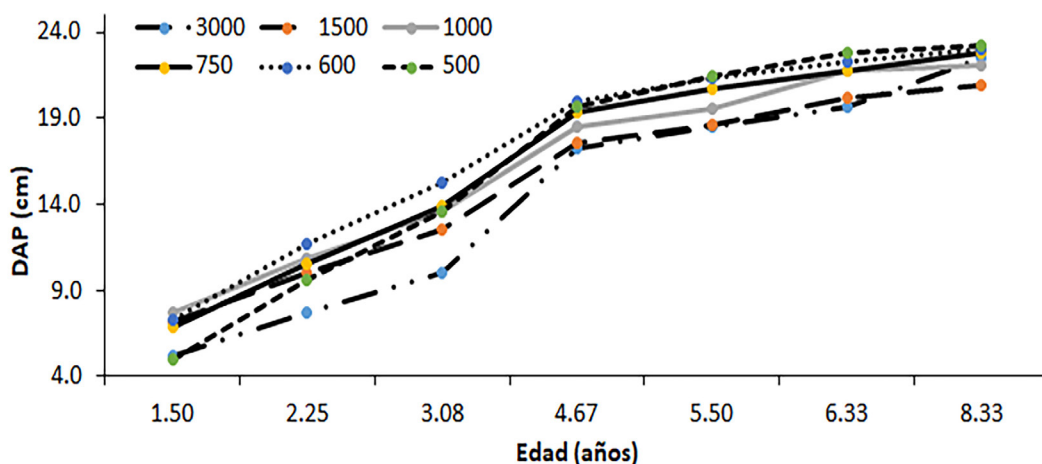
La [Figura 2](#) muestra el efecto contrastante del espaciamiento inicial (densidad de plantación) sobre el desarrollo del volumen comercial individual del árbol y el volumen comercial colectivo en una franja de 1000 m de longitud del SSP.

De manera similar, la [Figura 3](#) ilustra el efecto contrastante del espaciamiento inicial sobre el crecimiento en DAP y la calidad comercial del fuste.

Tabla 1. Efecto del espaciamiento inicial en el desarrollo de clones de teca a los ocho años, plantados en un sistema silvopastoril en franjas de 1000 m de longitud, San Carlos, Zona Norte de Costa Rica.

Espaciamiento (m) y densidad de árboles (N) en 1000 m de franja en dos hileras	DAP (cm) X ² = 0.45 ns	Calidad Fuste X ² = 12.47 < 15.99, ns	VolCom (m ³ .árbol ⁻¹) X ² = 3.23 < 15.99, ns	VolCom (1 000 m de franja, m ³) X ² = 42.73 > 29.59	Valor (US\$. árbol ⁻¹) X ² = 17.64 > 15.99	ValorCom (1000 m de franja, US\$) X ² = 11.59 < 15.99, ns
Cada 1m(N=3000)	19.93 +/- 0.22	76.04 +/- 2.86	0.148 +/- 0.015	138.52 +/- 2.07	15.19 +/- 2.66	14180 +/- 2480
Cada 2m (N =1500)	20.78 +/- 0.46	80.75 +/- 3.72	0.173 +/- 0.020	110.42 +/- 12.76	19.89 +/- 2.80	12710 +/- 1792
Cada 3m (N = 1000)	22.27 +/- 0.26	78.17 +/- 4.77	0.212 +/- 0.015	110.15 +/- 7.78	25.33 +/- 2.14	13134 +/- 918
Cada 4m (N = 750)	23.97 +/- 0.58	62.79 +/- 6.08	0.252 +/- 0.030	76.98 +/- 2.31	31.40 +/- 6.38	9594 +/- 945
Cada 5m (N = 600)	23.38 +/- 0.78	64.79 +/- 3.24	0.223 +/- 0.020	62.03 +/- 5.56	27.44 +/- 3.75	7623 +/- 942
Cada 6m (N = 500)	24.64 +/- 1.26	60.26 +/- 7.38	0.253 +/- 0.05	53.86 +/- 10.65	30.63 +/- 5.53	6523 +/- 678

La prueba Kruskal-Wallis obtuvo valores negativos para las variables VolCom en 1 000 m de franja ($H = -56,00 < \alpha$) y Valor por Árbol ($H = -5,50 < \alpha$)

**Figura 1.** Crecimiento del diámetro (DAP) en clones de teca, según edad (años) y densidad inicial de siembra (N estimado para 1 000 m de franja), en sistema silvopastoril, San Carlos, Zona Norte de Costa Rica.

En la [Tabla 2](#) se observa una tendencia a un menor desarrollo diamétrico de los árboles ubicados en la hilera central de la franja. En contraste, al analizar la calidad del fuste, se identificó una tendencia opuesta, con valores superiores en los árboles localizados en la hilera central. No obstante, en ambos casos las diferencias observadas no fueron estadísticamente significativas según la prueba de chi-cuadrado.

Con respecto a las características de la madera evaluadas a los ocho años de edad, en una muestra de 36 árboles (12 por bloque), se determinó un peso específico básico promedio de 0.54 (± 0.007) y un porcentaje promedio de duramen de 46.3 % (± 3.1 %). Estos valores se obtuvieron a partir del análisis de discos de madera extraídos de la base de los árboles, los cuales presentaron un diámetro promedio de 23.4 cm (± 0.65 cm).

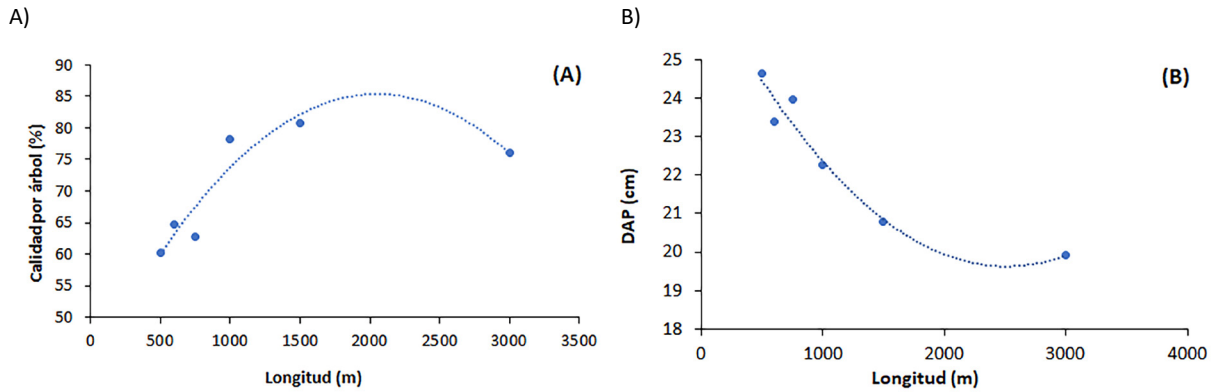


Figura 2. Efecto contrastante del espaciamiento inicial en la producción individual (A) y colectiva de madera (B) de clones de teca, en franjas silvopastoriles de 1000 m de longitud, San Carlos, Zona Norte de Costa Rica.

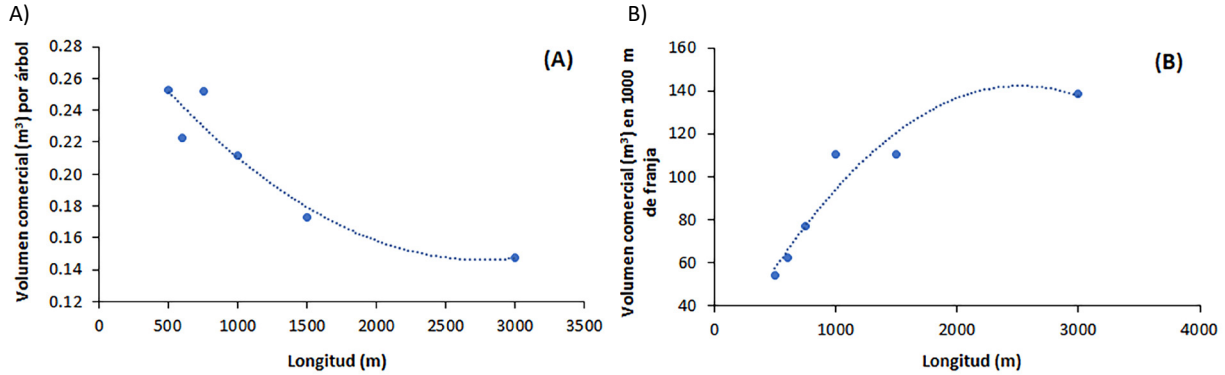


Figura 3. Efecto del espaciamiento inicial en el desarrollo del diámetro promedio (Dap) (A) y de la calidad del fuste (B) en clones de teca, plantados en franjas silvopastoriles de 1 000 m de longitud, San Carlos, Zona Norte de Costa Rica.

La [Tabla 3](#) presenta los resultados del análisis del contenido de carbono y del poder calorífico de la madera a los siete años de edad para los tres espaciamientos de mayor densidad. Los datos no cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, aun después de aplicar diferentes transformaciones. Asimismo, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis no detectó diferencias significativas entre los espaciamientos para ninguna de las dos variables evaluadas.

Los resultados indican que la densidad de plantación no tuvo un efecto significativo sobre la proporción de carbono fijado en la madera. Sin embargo, se observó una ligera tendencia al incremento del poder calorífico conforme aumentó la densidad de plantación.

Con base en estos valores, se estimó que 100 m³ de madera de teca almacenan aproximadamente un 46 % de carbono.

Tabla 2. Efecto en el diámetro (DAP en cm, ocho años) de la posición del árbol dentro de la franja en sistema silvopastoril, San Carlos, Zona Norte de Costa Rica. ($X_2 = 0.165 < 15.99$ ns; $X_2 = 8.702 < 15.99$, ns $p > 0.90$).

Espaciamiento (m)	Línea de Centro	Borde Este	Borde Oeste	Promedio
Cada 1	13.18	15.93	16.67	15.26 +/- 0.49
Cada 2	15.40	19.51	19.99	18.30 +/- 0.73
Cada 3	19.78	21.37	20.41	20.52 +/- 1.20
Cada 4	19.78	21.65	18.82	20.08 +/- 0.86
Cada 5	18.28	22.33	23.58	21.40 +/- 1.10
Cada 6	21.51	22.97	21.62	22.04 +/- 0.87
Promedio DAP	17.99	20.63	20.18	19.60 +/- 0.43
Cada 1	78.14	79.64	84.14	80.64 +/- 2.62
Cada 2	87.40	83.81	87.00	86.07 +/- 3.09
Cada 3	89.27	78.69	87.22	85.06 +/- 3.92
Cada 4	77.84	71.00	67.79	72.21 +/- 4.25
Cada 5	74.18	75.70	69.27	73.05 +/- 4.85
Cada 6	69.82	77.38	57.28	68.16 +/- 06
Promedio Calidad	79.44	77.70	75.45	77.53 +/- 1.72

Tabla 3. Poder calórico y proporción carbono (C%) en muestras de madera de clones de teca a los siete años en sistema silvopastoril en franjas, Zona Norte de Costa Rica.

Espaciamiento (m)	Poder Calórico (MJ/kg)	C (%)
Cada 1	18539 +/- 351.76	45.98 +/- 0.17
Cada 2	18627 +/- 256.41	46.14 +/- 0.25
Cada 3	18212 +/- 238.23	46.11 +/- 0.09
Promedio	18637 +/- 181.2	46.08 +/- 0.10

DISCUSIÓN

El estudio tuvo como mayor limitación el tamaño relativamente pequeño de parcela o unidad experimental, así como un posible efecto de ejecución tardía del raleo. Sin embargo, las mediciones continuas durante más de 8 años mostraron en los resultados la consistencia del patrón de crecimiento como puede apreciarse en la [Figura 1](#), donde no hubo cambios abruptos en la pendiente de cada una de las curvas de crecimiento para los espaciamientos evaluados. El raleo tardío en el año 8 no tuvo impacto directo en este estudio dado que los datos utilizados se tomaron principalmente de las mediciones anteriores. Un raleo tardío se espera que tenga como efecto un menor desarrollo diamétrico, tal y como se documenta en la silvicultura clásica ([Murillo et al., 2025](#)). Sin embargo, la modalidad de plantación de árboles en franjas, con efecto de borde en ambos lados, pudo amortiguar de manera importante la posible pérdida de crecimiento diamétrico.

El efecto relativo de la densidad de plantación en este sistema SSP no registró diferencias significativas, tal y como se muestra de manera consistente en la [Tabla 1](#) y en la [Figura 1](#). Las dos pruebas no paramétricas así lo confirman.

A pesar de esto, se observa un patrón claro de mayor diámetro a menor densidad de plantación (N con 500 y 600 árboles en 1000 m de franja), tal y como se espera debido a la sensibilidad del DAP a la competencia, como se registra frecuentemente en estudios con plantaciones de alta densidad (Moya *et al.*, 2019; Tenorio *et al.*, 2019, 2024). En la Figura 1 se puede observar que, a partir de los 6 años los tres tratamientos de menor densidad (N = 750, 600 y 500) toman el liderazgo en crecimiento del DAP. Estos resultados sugieren la posibilidad de poder plantar a alta densidad en SSP en franjas para obtener mayor volumen, biomasa y mayor fijación de carbono. Los valores en general del diámetro promedio a los ocho años superan el valor esperado para esta misma edad (20.9 cm +/- 0.5 cm) según el mejor modelo de crecimiento ajustado para clones de teca en el país (Fallas, 2017).

Con relación al efecto de la densidad en el desarrollo del volumen por árbol individual y en la variable volumen comercial en 1000 m de franja (Figura 2), los resultados son contrastantes y siguen un patrón similar al reportado en estudios de alta densidad por Tenorio *et al.* (2019). El volumen comercial en 1000 metros muestra el patrón esperado de aumento con la mayor cantidad de árboles según el espaciamiento. Estos resultados son consistentes con lo mostrado en la Tabla 1, donde la prueba de chi-cuadrado determinó diferencias significativas solamente entre tratamientos para la variable volumen comercial en 1000 m de franja.

En la Figura 3 se observa un comportamiento contrastante entre el efecto del espaciamiento en el mayor desarrollo del diámetro promedio y en la menor calidad del fuste. El patrón observado es claro, a mayor densidad de plantación mayor calidad del fuste, pero menor desarrollo diamétrico. La mayor calidad del árbol en plantación densa se explica por un menor daño por efecto de viento, una menor cantidad de árboles descopados, así como una menor tasa de aparición de características como bifurcación temprana, rama gruesa, número de ramas, que son criterios que conforman la metodología de evaluación de la calidad del árbol (Murillo *et al.*, 2025). La teca es una especie conocida como altamente sensible al efecto del viento, lo que repercute en una disminución de su altura comercial y valor económico (Alvarado, 2011; Badilla & Murillo, 2022a). El patrón observado muestra que la calidad del árbol tiende a mejorar a partir de una mayor densidad de árboles en la franja. A partir de la densidad 4 m (750 árboles) los valores de calidad ya alcanzan o superan el valor de 75% (Figura 3), que es una calidad muy alta en la valoración económica del árbol (Murillo, 2000; Ospino *et al.*, 2022).

En cuanto al volumen comercial por árbol individual (Tabla 1), las diferencias entre el mayor y menor valor fue de casi un 60% (de 0,15 m³ a 0,25 m³). El contraste fue aún mayor e inversamente proporcional a la densidad en la variable volumen comercial en 1000 m de franja, con diferencias de más de 150% (de 53 m³ a 138 m³). Este mismo patrón se refleja de manera proporcionalmente similar y consistente, si se analiza el valor en US dólares por árbol promedio vs el valor colectivo de en 1000 m de franja. Por lo general una plantación clonal de teca convencional con un buen paquete tecnológico de producción, se espera que logre producir un volumen comercial acumulado con los raleos de 125 a 140 m³.ha⁻¹ en 18 años (Badilla & Murillo, 2022a; Fallas, 2017; González, 2014; Jiménez, 2023; Murillo *et al.*, 2025; Vergara Cordoba *et al.*, 2013). La explicación de esta gran diferencia radica en que, en el sistema de árboles en franjas angostas de 6 m de ancho, se logra plantar una mayor cantidad de árboles que en una plantación convencional.

De manera interesante se muestra en la Tabla 2 que en general no hubo efecto significativo según la posición del árbol en la hilera de borde o hilera central, en relación con su tasa de crecimiento del diámetro, ni en su calidad de tronco. Sin embargo, a mayor detalle se observa que el árbol del centro muestra una leve tendencia esperada de menor crecimiento del DAP, pero únicamente en los espaciamientos de mayor densidad.

En realidad, los árboles en franja no utilizan solamente los 6 m de ancho de la superficie, sino que buena parte de su sistema radical y parte de la copa se proyecta hacia el área del potrero. Podría decirse en términos forestales, que parte de su área basal se proyecta fuera de la franja, con lo cual el análisis comparativo se vuelve un tanto más complejo. Sin embargo, para efectos prácticos y reales, el sistema en franja muestra claramente un potencial significativamente superior en producción de biomasa y madera, en relación con la forma tradicional de plantar árboles en bloque compacto.

En una investigación de producción ganadera se evaluó durante dos ciclos de dos años cada uno, un sistema de producción de carne bovina, que consistió en un hato de 25 animales en rotación en apartos de 1 ha y con suplemento nutricional en 10 ha de terreno. El estudio determinó que las franjas de árboles de teca no afectaron significativamente la capacidad de carga del sistema (Paniagua *et al.*, 2017).

Estos resultados son relevantes en relación con objetivos de sostenibilidad, mayores ingresos para el ganadero y desde el punto de vista de captura de carbono. El estudio de fijación de carbono registró datos similares a los reportados por la literatura con valores que oscilaron entre 0.44 a 0.56% (Murillo *et al.*, 2015). Mientras que la densidad de la madera y el porcentaje de duramen registrado (0.54 y 46%) se ubican dentro del rango reportado para plantaciones de teca (Molina-Segura, 2017; Moya *et al.*, 2013). Lo cual ratifica que no hubo ningún efecto de la densidad y modalidad de plantación en las propiedades de la madera de esta especie.

Dado que el mercado de teca continúa siendo la exportación de madera de alta calidad y mayor diámetro hacia mercados asiáticos, la elección del mejor espaciamiento debe balancear máxima productividad, máximo valor comercial, con la menor cantidad de árboles posible (Ospino-Araya *et al.*, 2020). Si se observa en la Tabla 1, la mejor densidad de plantación en franjas en cuanto al desarrollo del DAP se localiza entre los espaciamientos 2.5x3 m (N = 1 000) y el 2.5x 4 m (N = 750), donde se obtuvo el mayor volumen comercial y mayor valor comercial por árbol. Debe recordarse que en el modelo de negocios de teca el mercado premia significativamente según la categoría diamétrica (González, 2014). Si el objetivo fuese aumentar la captura de carbono la elección se movería hacia una mayor producción de biomasa (2.5 x 3 m con 1000 árboles), cuya estimación se obtiene para teca en Costa Rica (Murillo & Badilla, 2015):

Carbono (toneladas) = volumen total*1.25 (volumen raíces, (Eggleston *et al.*, 2006)*1.5 (Factor de expansión) *0.52 (densidad de madera) * 0.45 (fracción de carbono).

Para el DAP promedio de 22.27 cm a los 8.3 años (cada 3m) se obtiene a partir del volumen total por árbol $0.47 \text{ m}^3 * 1.25 * 1.5 * 0.52 * 0.45$, que resulta en un estimado de 0.21 toneladas por árbol. Si se tiene una densidad inicial de N = 1000 árboles (cada 3m), en una franja de 1000 metros de longitud con una disminución de un 50%, producto de un primer raleo y mortalidad inicial, resulta en un estimado de 105 toneladas de carbono a los ocho años. Este valor continuará aumentando con la edad en proporción con el crecimiento en volumen de los árboles remanentes.

Finalmente, si se quisiera realizar un análisis comparativo con plantaciones convencionales, se tendría que relacionar la cantidad de árboles en franjas hasta completar el equivalente de 10 000 m² de la superficie de una hectárea. La franja tiene unas dimensiones de 6 m de ancho por el largo deseado en la finca. Por tanto, en cada 1000 m de longitud se tienen 6000 m², entonces para los 10 000 m² se requiere de una longitud de

franja de 1670 m. Si se planta a un espaciamiento dentro de la franja cada 4m, se tendría N = 750 árboles en 1000 m de longitud. En 10 000 m² se lograría plantar 1250 árboles, que crecerían más rápidamente. Mientras que, en una plantación convencional en bloque, para este mismo espaciamiento se tendría 1000 árboles, que corresponde con un 20% menos que en franja. Estos resultados sugieren que los sistemas silvopastoriles (SSP) con franjas de teca constituyen una alternativa con alto potencial ambiental y socioeconómico para los productores ganaderos, al combinar la producción forestal con la actividad pecuaria y contribuir al almacenamiento de carbono y al uso sostenible de la tierra.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el espaciamiento de 3 m entre árboles en SSP en franjas permitió alcanzar el mayor volumen comercial de madera, con más de 110 m³ por cada 1000 m de longitud de franja y 6 m de ancho, así como la mayor captura de carbono, estimada en aproximadamente 105 toneladas a los ocho años de edad. Por su parte, el mayor valor comercial individual se registró en el espaciamiento de 4 m entre árboles, con valores entre US\$ 27 y US\$ 31 por árbol. Los resultados sugieren que el efecto de borde pudo haber atenuado las diferencias asociadas a la densidad de plantación dentro de las franjas. Asimismo, se observó una tendencia de mejora en la calidad comercial del fuste conforme aumentó la densidad de plantación. En conjunto, la modalidad de producción de madera en SSP en franjas optimiza el uso del espacio disponible y permitió alcanzar una producción aproximadamente 1,2 veces superior a la obtenida en plantaciones convencionales de teca. Estos resultados evidencian el potencial de los SSP en franjas como una alternativa ambiental y socioeconómicamente viable para los sistemas ganaderos, al integrar la producción forestal y pecuaria, favorecer el almacenamiento de carbono y contribuir al desarrollo de una ganadería más sostenible en la región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC y a la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES) por el financiamiento brindado para la ejecución del presente proyecto de investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran la inexistencia de ningún tipo de intereses en esta investigación.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

O. M., Y. B. participaron en el establecimiento de los ensayos; O. M., Y. B. y J. J. participaron en la colecta de datos durante varios años; O. M., Y. B., J. J. y M. R. participaron en la colecta final de datos, análisis de datos, discusión y conclusiones.

DECLARACIÓN DE USO DE IA

Los autores declaran que no se utilizó la IA para la elaboración de este artículo.

REFERENCIAS

- Alvarado, L. M.** (2011). *Efecto del espaciamiento y descope en el crecimiento y calidad de plantaciones de Tectona grandis en la zona sur de Costa Rica*. [Trabajo final de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/2972>
- American Society for Testing and Materials.** (2004). *D5865-04: Standard test method for gross calorific value of coal and coke*. ASTM International.
<https://www.astm.org/d5865-04.html>
- Arguedas, S.** (2019). Encadenamientos productivos y multiplicadores de empleo para la actividad económica cría de ganado vacuno a partir de la matriz de insumo productivo Costa Rica 2012. *e-Agronegocios*, 5(1).
<https://doi.org/10.18845/rea.v5i1.4031>
- Badilla, Y., & Murillo, O.** (2022a). Selección clonal de *Tectona grandis* L. f. para el Pacífico seco de Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), 1–15.
<https://doi.org/10.15359/ru.36-1.19>
- Badilla, Y., & Murillo, O.** (2022b). *Tectona grandis* L.f. clonal selection for the dry Pacific zone of Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), 56–83.
<http://dx.doi.org/10.15359/ru.36-1.19>
- Bueno, G. A.** (2012). Sistemas silvopastoriles, arreglos y usos. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 3(2), 56–83.
<https://doi.org/10.22579/22484817.604>
- Cabrera, C., Salvatierra, D., Alcívar, J. L., Morán, J., & Franco, C.** (2022). Evaluación del crecimiento *Tectona grandis* L. f. en un sistema silvopastoril en el recinto Mina Chica, cantón Velasco Ibarra, Provincia del Guayas. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 4(6), 1–13.
<https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/324>
- Casasola, F., Ibrahim, M., Sepúlveda, C., Ríos, N., & Tobar, D.** (2009). Implementación de sistemas silvopastoriles y el pago de servicios ambientales en Esparza, Costa Rica: una herramienta para la adaptación al cambio. En *Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central* (pp. 169–188). CATIE.
<https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas/45.pdf>

Clavero, T., & Suárez, J. (2006). Limitaciones en la adopción de los sistemas silvopastoriles en latinoamérica. *Pastos y Forrajes*, 29(3), 307–312.

Eggleston, H. S., Buendía, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). *006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Fallas, J. L. (2017). *Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (Tectona grandis Lf) en Costa Rica* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9240/funciones-alometricas-volumen-crecimiento-para-clones-teca.pdf?sequence=2>

González, E. (2014). *Determinación del momento óptimo de cosecha final en una plantación de Tectona grandis de la zona norte de Costa Rica*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5798>

Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., & Rojas, J. (2006). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería de las Américas*, 45.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). *Resumen Ejecutivo Resumen Ejecutivo: Resultados Generales IV Censo Nacional Agropecuario*. INEC

Jiménez, J. J. (2023). *Modelo de costos y análisis financiero para cultivo de teca (Tectona grandis Linn f.) en sistema silvopastoril, Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/16439>

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2017). *Manual operativo del piloto nacional del NAMA Ganadería* (Segunda). Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Molina-Segura, F. (2017). *Comportamiento de clones de teca (Tectona grandis Linn) a los 4,5 años en Upala, Zona Norte de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9394>

Moya, R., Marín, J., Murillo, O., & Leandro, L. (2013). Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in *Tectona grandis* clones with evidence of genetic control. *Silvae Genetica*, 62–65.

<https://doi.org/10.1515/sg-2013-0019>

Moya, R., Tenorio, C., & Oporto, G. (2019). Short Rotation Wood Crops in Latin American: A Review on Status and Potential Uses as Biofuel. *Energies* 2019, 12(4), 705, 705.

<https://doi.org/10.3390/EN12040705>

- Murgueitio, E., & Ibrahim, M.** (2004). Ganadería y medio ambiente en América Latina. *XII Congreso Venezolano de Producción e Industria Animal*, 187–202.
https://www.academia.edu/download/51167624/11_conferencia_murgueitio_pag187-202.pdf
- Murillo, O.** (2000). Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 24(2), 41–47.
<https://www.redalyc.org/pdf/436/43624204.pdf>
- Murillo, O.** (2022). Hacia una política forestal con visión de largo plazo. *Revista Ambientico*, 283, 43–49.
<https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/hacia-una-politica-forestal-con-vision-de-largo-plazo/>
- Murillo, O., & Badilla, Y.** (2015). *Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono*. ITTO.
- Murillo, O., & Badilla, Y.** (2023a). *Franjas de Árboles en Ganadería*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
<https://es.scribd.com/document/718072393/Manual-Franjas-de-Arboles-en-la-finca-ganadera-15-set2023>
- Murillo, O., & Badilla, Y.** (2023b). *Optimización del componente forestal del programa nacional de fomento de sistemas silvopastoriles carbono-neutral 2020-2021*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/15223>
- Murillo, O., & Badilla, Y.** (2023c). *Programa para la estimación de la calidad y valor de la plantación forestal*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Murillo, O., De Resende, M. D. V., Badilla, Y., & Gamboa, J. P.** (2019). Genotype by environment interaction and teak (*Tectona grandis* L.) selection in Costa Rica. *Silvae Genetica*, 68(1), 116-121.
<https://doi.org/10.2478/sg-2019-0020>
- Murillo, O., Leitón, M., Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W., & Valverde, A.** (2015). Hacia un nuevo sistema silvopastoril. *Revista Germinar*, 5(17), 16–17.
- Murillo, O., Padilla, M., Jara, H., & Castro, R.** (2025). *Evaluación de la plantación forestal*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Oficina Nacional Forestal.** (2023). *Precios de la madera en Costa Rica para el primer semestre del 2023 y tendencias de las principales especies comercializadas*. ONF.
<https://onfcr.org/wp-content/uploads/Precios-de-la-madera-en-Costa-Rica-y-tendencias-de-las-principales-especies-comercializadas-2023-10-07-2023.pdf>
- Ospino, M., Murillo, O., & Alfaro, M.** (2022). Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19(45), 26–37.
<https://doi.org/10.18845/RFMK.V19I45.6323>

Ospino-Araya, M., Badilla-Valverde, Y., Paniagua-Madrigal, W., Campos-Granados, C., & Murillo-Gamboa, O. (2020). Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 44(2), 155–173.

<https://doi.org/10.15517/RAC.V44I2.43109>

Paniagua, W., Mora, M., Badilla, Y., Murillo, O., Rojas, A., Campos, C., Corea, E., Ospino, M., & Lazo, G. (2017). *Establecimiento de sistemas silvopastoriles con maderables de alto valor económico*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

<https://hdl.handle.net/10669/91599>

Quaresma, R., Cordeiro, A., Bastos, J., & Carvalho, G. (2008). Análisis económico de sistema silvopastoriles con paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber) en el nordeste de Pará, Brasil. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 403–405.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000300055&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Souza de Abreu, M. H. (2002). *Contribution of trees to the control of heat stress in dairy cows and the financial viability of livestock farms in humid tropics* [Tesis doctoral, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza].

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=336541>

Tenorio, C., Moya, R., Murillo, O., & Loría, J. (2024). Energy Production and its Characteristics from Four Tropical Trees Species Planted in Short Rotation Woody Systems in Costa Rica. *BioResources*, 19(1), 695–715.

<https://doi.org/10.15376/BIORES.19.1.695-715>

Tenorio, C., Moya, R., Ortiz-Malavassi, E., & Arias, D. (2019). Production and Regression Models for Biomass and Carbon Captured in *Gmelina arborea* Roxb. Trees in Short Rotation Coppice Plantations in Costa Rica. *Forests*, 10(7), 593.

<https://doi.org/10.3390/F10070593>

Vergara Cordoba, C., Cardona Ayala, C., Murillo Gamboa, O., Jarma Orozco, A. de J., & Araméndiz Tatis, H. (2013). Valor de mercado de plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn.) en el Departamento de Córdoba. *Temas Agrarios*, 18(1), 9–22.

<https://doi.org/10.21897/RTA.V18I1.705>

