

Linderos maderables de *Araucaria hunsteinii* K. Schum. en tres distanciamientos establecidos en Turrialba, Costa Rica

Three distances of timber boundaries of *Araucaria hunsteinii* K. Schum. in Turrialba, Costa Rica

Víctor Martínez-Albán¹ • Adrián Solís-Vargas¹ • Rolando Camacho-Herrera¹

Recibido: 24/6/2020

Aceptado: 22/10/2020

Publicado: 29/7/2021

Abstract

Three sites with timber boundaries with *Araucaria hunsteinii* were sampled, each of which presented a different distance. Dasometric variables such as diameter at breast height, commercial height and total height were measured, to which an analysis of variance and a differentiation of the means using a Tukey test were applied. It was obtained that the diametric growth did not present significant differences with a general average of 57.7 cm, not so in the total height, where the highest total height reached was 28.34 m. The volume data was extrapolated to 1 km line at each planting distance, in order to obtain an approximate volume performance, it got a maximum of 782.07 m³ km⁻¹ in total volume was obtained with 412.37 m³ km⁻¹ of commercial volume for the smallest distance.

Key words: *Araucaria hunsteinii*, yield, AFS, timber boundaries.

1. Reforest The Tropics Inc. Turrialba, Costa Rica. vmartinez@reforestthetropics.org, asolis@reforestthetropics.org, rttcostarica@ice.co.cr

Resumen

Se muestrearon tres sitios de linderos maderables con *Araucaria hunsteinii*, cada uno de estos presentó un distanciamiento diferente. Se midieron variables dasométricas como el diámetro a altura de pecho, la altura comercial y total, a las cuales se aplicó un análisis de la varianza y una diferenciación de las medias mediante una prueba de Tukey. Se obtuvo que el crecimiento diamétrico no presentó diferencias significativas, con un promedio general de 57,7 cm, no así en la altura total, donde la mayor altura alcanzada fue de 28,34 m. Se extrapolaron los datos de volumen a una línea de 1 km en cada distanciamiento para obtener un rendimiento aproximado, en el cual se obtuvo un máximo 782,07 m³ km⁻¹ en volumen total con 412,37 m³ km⁻¹ de volumen comercial para el menor distanciamiento.

Palabras clave: *Araucaria hunsteinii*, rendimiento, SAF, linderos maderables

Introducción

Costa Rica tiene más de 40 años de realizar esfuerzos por promover la reforestación, donde se han desarrollado diferentes sistemas de incentivos para el apoyo al sector primario de la actividad forestal [1]. Esto debido principalmente a la alta deforestación de los bosques naturales registrada durante los inicios de la segunda mitad del siglo 20, conjuntamente con la expansión de la frontera agrícola [2].

En la actualidad en Costa Rica, hay zonas de gran importancia ambiental donde las fuentes de servicios ecosistémicos se están viendo amenazados o disminuidos en cantidad o calidad, tanto por el efecto directo como el indirecto de la agroindustria [3].

A nivel general en los últimos años las plantaciones forestales han disminuido su tasa de establecimiento y las tierras que eran de uso forestal como actividad productiva principal, están siendo convertidas a uso agrícola y pecuario. Esto se debe a diferentes razones, principalmente a las decisiones de las políticas macroeconómicas del país, donde los Tratados de Libre Comercio (TLC) firmados con Colombia y Chile, favorecen el importe de madera contra la producción nacional y por otro lado la baja rentabilidad de la producción de madera en contraposición con materiales sustitutos [4].

Bajo un escenario productivo como el actual, el campo forestal debe adecuarse al panorama establecido, donde en términos de rentabilidad, no se tiene una

competencia real contra otros cultivos en las mejores tierras productivas [5], por lo que una de las mejores opciones que se presentan es el fusionar el componente forestal con el agropecuario mediante la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) [6].

Los SAF promueven prácticas sostenibles de manera que mejoran la rentabilidad de las tierras, al mismo tiempo que aumentan los servicios ecosistémicos de las mismas [7]. Es así como se hace indispensable buscar los sistemas que optimicen el uso de las tierras bajo las condiciones existentes. Por este motivo, esta investigación tiene como objetivo demostrar el crecimiento y rendimiento de la especie *Araucaria hunsteinii* K. Schum. (Pino Klinkii o Klinkii) en linderos de cultivos agrícolas con múltiples distanciamientos.

Materiales y métodos

Sitios de estudio

Se muestrearon tres sitios donde se tienen establecidos linderos maderables con *A. hunsteinii* de 20 años (edad promedio), cada uno presenta un distanciamiento diferente. Los tres sitios se encuentran en la provincia de Cartago, en el Cantón de Turrialba, donde la temperatura promedio es de 21,9 °C y la precipitación promedio anual es de 2696,9 mm [8]. No se realizó una caracterización de los suelos en cada lugar, sin embargo, todos presentaban una pendiente moderada al ser tierras de cultivo agrícola y pecuario. En todos los sitios los árboles fueron plantados con el fin de constituir una cortina rompe vientos paralela a los caminos o límites de las fincas. Las áreas se denominan de la siguiente forma:

A- Alto Varas:

El sitio está ubicado en las coordenadas 9°57'05", 83°39'57", a una altitud de 745 m. Esta zona presenta fallas geológicas que han afectado las fincas vecinas. La finca se dedica a la ganadería y los árboles se encuentran en el límite de la finca con un camino. La distancia media encontrada entre los árboles es de 5 m, se asume que se ha mantenido la distancia original de la siembra, ya que no se encontraron evidencias de aprovechamientos previos a la medición. Los árboles presentaron una edad de 20 años.

B- Recreo:

El sitio se sitúa en las coordenadas 9°53'52", 83°41'46", a una altitud de 900 m. En la zona se cultivan ornamentales, legumbres, hortalizas, café, entre otros. El cultivo predominante en la finca es pasto para ganadería, aunque se determinó que en el momento en que los árboles fueron plantados en la finca el uso de la

tierra era cultivo de café. Los árboles se establecieron en la orilla de los caminos internos y límites de la finca, formando una cortina rompe vientos. La distancia media encontrada entre los árboles es de 10 m, se asume que se ha mantenido la distancia original de la siembra, ya que no se encontraron evidencias de aprovechamientos previos a la medición. Los árboles presentaron una edad de 20 años.

C- Boyeros:

El sitio se localiza en las coordenadas 9°53'34", 83°37'30", a una altitud de 875 m. En la zona se implementa de forma intensiva el cultivo de café y caña de azúcar. El cultivo predominante en la finca es el café, y los árboles se establecieron en la orilla de los caminos internos de la finca, formando una cortina rompe vientos. La distancia media encontrada entre los árboles es de 15 m, pero se asume que se ha modificado la distancia original de la siembra, ya que se encontraron evidencias de aprovechamientos previos a la medición. Por lo que su distanciamiento original posiblemente era menor, sin embargo, se utilizan los datos encontrados en el sitio al momento de la medición, dada la imposibilidad de estimar un volumen aprovechado, al no tener ninguna medición de los árboles cortados previamente. Los árboles presentaron una edad de 21 años.

Sistemas agroforestales y cultivos asociados

En la zona se implementan diferentes arreglos de producción agrícola o silvopastoril con árboles, en los casos donde se encontró *A. hunsteinii* se presenta la particularidad de que las hileras de árboles están en las orillas de los caminos internos o externos de las fincas, formando una única línea de árboles de *A. hunsteinii* paralelo a los caminos.

La evaluación realizada al crecimiento de los árboles en SAF no contempla la productividad del cultivo agrícola o pecuario asociado, debido a lo cambiante del uso del terreno agrícola en la zona, donde se pueden establecer diferentes cultivos con diferentes rendimientos y productividades en un tiempo corto (1 o 2 años), si se toma en comparación con el tiempo del desarrollo en el componente forestal cuando se utiliza *A. hunsteinii*, considerando que las Araucarias tienen un turno que ronda los 40 años y que se determina que pueden ser coníferas de alto valor [14].

Los cultivos asociados a los sitios de estudio se determinaron como: pastos para ganado de carne en Alto Varas, sin embargo, mediante una corta entrevista realizada a los vecinos de la finca se determinó que hubo plantación de palmito y café en el lugar; en Recreo se encontraron pastos para ganado de carne, pero, previamente fue una plantación de café y macadamia; plantación de café en Boyeros, donde en una corta entrevista al administrador de la finca en el momento

de la medición, externó que la gran mayoría de la orilla de caminos internos de la finca presentaba árboles, sin embargo, fueron cortados previo a las mediciones en su gran mayoría.

Debido a los cambios hechos en el componente agrícola o pecuario de los SAF, no se puede tener un panorama claro sobre el porcentaje que representa la productividad del componente forestal con respecto a la producción global de cada sitio durante los últimos 20 años. Por lo que el análisis realizado en este estudio fue sobre el crecimiento y rendimiento alcanzado por los árboles establecidos en los linderos de los SAF y su rendimiento comercial.

Método de muestreo

Dado que se llevó a cabo una evaluación del crecimiento y rendimiento potencial de *A. hunsteinii* en hileras de linderos maderables de SAF, se realizó un censo de los árboles en cada uno de los sitios. Posteriormente se estableció una unidad de producción, extrapolando a una distancia uniforme de 1000 m lineales (1 km), esta unidad productiva permite hacer una comparación de volumen y área basal con 1 hectárea de plantación forestal [10].

El muestreo utilizado es de tipo árboles individuales, es decir: se ve cada árbol como una unidad de muestreo [15]. Así, a pesar de que no se logró determinar la tasa de mortalidad por la falta de registros sobre su mantenimiento en los últimos 20 años; conociendo las distancias promedio entre los árboles, se puede comparar la productividad de los linderos de árboles maderables en cada sistema agroforestal, buscando la obtención de datos relevantes como el volumen total, el volumen comercial y el stock de CO₂ capturado.

VARIABLES DE MUESTREO

Se tomaron variables cuantitativas de importancia para el crecimiento y otras variables cualitativas de los árboles sobrevivientes, ya que al fungir como cortina rompevientos, los mismos son sometidos a tensión por ráfagas de viento constantemente [13].

Las variables medidas fueron el diámetro a altura de pecho (Dap) a 1,3 m de altura con cinta diamétrica, la altura total (HT) y la altura comercial (Hc) con clinómetro y una distancia horizontal conocida, en el caso de la altura comercial se estimó hasta el diámetro mínimo para obtener madera comercial (25 cm), adicionalmente se tomó la incidencia de bifurcaciones y cantidad de árboles torcidos. También se hizo una extrapolación por 1 km de lindero maderable para obtener el área basal, volumen total y volumen comercial, además de la cantidad de CO₂ fijada en la biomasa total viva de los árboles.

Las fórmulas empleada para estimar la cantidad de volumen total y volumen comercial, además de las toneladas métricas de CO₂ capturadas en la biomasa de los árboles medidos en la ecuación 1, 2 y 3.

$$V_T \left(\frac{m^3}{\text{árbol}} \right) = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} * H_T * F_F * F_{EBA} * F_{EBS} \quad (1)$$

$$V_C \left(\frac{m^3}{\text{árbol}} \right) = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} * H_C * F_F \quad (2)$$

$$CO_2 \left(\frac{Mg}{km} \right) = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} * H_T * F_F * N_{km} * PEB * F_{EBA} * F_{EBS} * F_C * F_{CO_2} \quad (3)$$

Dónde:

d es el diámetro a altura de pecho; HT es la altura total; HC es la altura comercial; FF es el factor de forma; Nkm es la cantidad de árboles por kilómetro; PEB es el peso específico base [16]; FEBA es el factor de expansión de la biomasa aérea; FEBS es el factor de expansión de la biomasa subterránea; FC es la fracción de Carbono [17] y FCO₂ el factor de Carbono.

Análisis estadístico

Los datos de crecimiento y rendimiento silvicultural fueron analizados en el Software InfoStat [18], donde primeramente se llevó a cabo el análisis de normalidad en cada variable y cada sitio de las mediciones realizadas, además de uno de forma global con todos los datos obtenidos, mediante el método de Shapiro-Wilks, para verificar si los datos tenían una distribución normal.

Posteriormente se llevaron a cabo análisis de varianza (ANDEVA) para determinar si existían diferencias significativas entre los diferentes distanciamientos por cada variable. Por último se llevó a cabo un análisis mediante una prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95 %, con la cual se determinaron las diferencias significativas para cada variable en las diferentes distancias de siembra.

Resultados y discusión

En el crecimiento y rendimiento del componente forestal de los linderos SAF evaluados, los cuales presentaron una edad promedio de 20 años, donde se obtuvo una supervivencia de los individuos de *A. hunsteinii* suficientes para realizar el análisis de forma adecuada en cada uno de los distanciamientos, ya que, desde su establecimiento hasta la medición de este estudio cada sitio presentó las siguientes cantidades: Alto Varas 32, Recreo y Boyeros 33 árboles cada uno.

En los tres sitios se encontraron cultivos perennes tales como pastos o café, los cuales tienen una capacidad de adaptación mayor frente a cultivos de corto plazo como las hortalizas. Sin embargo, se hace notar la importancia de tener un cultivo asociado de largo plazo en zonas marginales de las unidades productivas. Lo anterior siempre en busca de mejorar la rentabilidad de los recursos, principalmente en fincas pequeñas o medianas, donde la importancia de buscar el mejor rendimiento de todas las áreas es mayor [9]–[11]. El establecer linderos maderables en las fincas con *A. hunsteinii* al ser un árbol de gran tamaño, muy probablemente va a generar cierto grado de sombra sobre las áreas subyacentes a los árboles, un efecto que no fue medido en el presente estudio, sin embargo, se debe tener especial cuidado al seleccionar los cultivos que se van a establecer en estas áreas [11]–[13].

Al llevar a cabo una comparación por cada variable, según los diferentes distanciamientos de siembra encontrados en campo se obtienen los datos del Cuadro 1.

En el diámetro a altura de pecho no se tienen diferencias significativas entre los distanciamientos muestreados según la prueba de Tukey (Cuadro 1), el desarrollo obtenido en esta variable fue homogéneo en las diferentes condiciones de suelo, altitud y cultivos asociados. Además, se da un resultado de sumo interés

Cuadro 1. Valores promedio y diferencias significativas para árboles de *A. hunsteinii* en SAF con tres distanciamientos distintos en Turrialba, Costa Rica.

Table 1. Average values and significant differences for trees of *A. hunsteinii* in AFS with three different distances in Turrialba, Costa Rica.

Variable	5 m		10 m		15 m	
	Promedio	Tukey	Promedio	Tukey	Promedio	Tukey
dap (cm)	58,83	A	57,77	A	56,60	A
hT (m)	28,34	A	24,91	B	21,74	C
hc (m)	14,66	A	14,85	A	12,83	A
VT (m ³ árbol ⁻¹)	3,91	A	3,37	A	2,79	B

Nota: dap es el diámetro a 1,3 m de altura, hT es la altura total, hc es la altura comercial y VT es el volumen total de madera por árbol.

Note: dap is the diameter at 1.3 m height, hT is the total height, hc in the commercial height and VT is the total wood volume per tree.

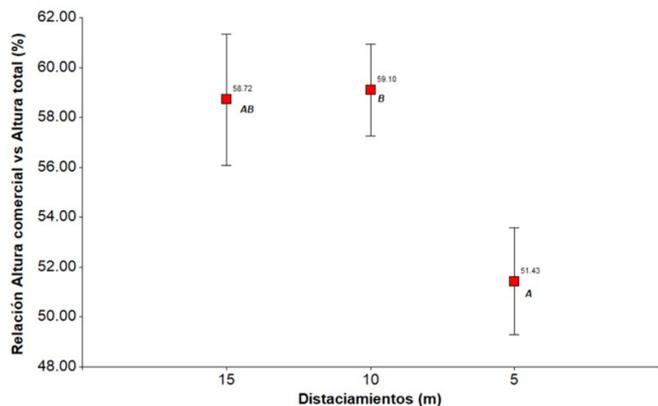


Figura 1. Relación entre la altura comercial y la altura total promedio para árboles de *A. hunsteinii* en SAF con tres distanciamientos distintos en Turrialba, Costa Rica.

Figure 1. Relationship between commercial height and average total height for *A. hunsteinii* trees in SAF with three different distances in Turrialba, Costa Rica.

*Letras diferentes representan las diferencias significativas según Tukey.

* Different letters represent the significant differences according to Tukey.

en cuanto a los diferentes distanciamientos que se tienen muestreados, el cual es que esta variación no afectó el desarrollo del crecimiento diametral. Por lo que, al no tener un efecto definitivo la competencia en las distancias de siembra empleadas sobre el diámetro, una clara opción de obtener el mayor rendimiento del componente forestal es empleando el sistema con la menor distancia.

En la altura total (Cuadro 1), se encontraron diferencias significativas en el crecimiento muestreado, donde la mayor diferencia obtenida fue de 6,5 m, siendo el SAF de mayor distanciamiento entre individuos (15 m), el que presentó menor desarrollo apical y el de menor

distanciamiento con 5 m el de mayor altura total obtenida con 28,34 m. A pesar de estas diferencias, se tiene como resultado general que la especie se desarrolla bien ante la combinación de actividades agropecuarias en sus cercanías, ya que este crecimiento se hace comparable con el desarrollo que se muestreó en las parcelas de prototipo establecidas en Malasia, donde la altura alcanzada a los 41 años de edad para la misma especie fue de 23,1 m según Hashim [19]. Otra comparación posible es con las parcelas de *A. angustifolia* en Argentina, donde según Crechi [20] a los 24 años de edad la altura promedio es cercana a los 20 m en la parcela de menor densidad (625 árboles ha⁻¹).

En la altura comercial, no se tienen diferencias significativas entre los sitios evaluados (Cuadro 1), donde el promedio general es de 14,11 m, por lo que el espaciamento no generó un efecto notable en esta variable. Este dato se vuelve de interés al considerar que los linderos fungen como cortinas rompevientos, lo cual puede llevar a los árboles a tener deformidades en su desarrollo [13]. Sin embargo, en este caso de *A. hunsteinii*, el viento no generó problemas significativos en el desarrollo de la sección comercial de los árboles.

A pesar de que no existen diferencias significativas entre las alturas comerciales de los diferentes distanciamientos, si existen diferencias significativas entre el porcentaje de relación de la altura comercial contra la altura total de los individuos. Se obtiene de los resultados que la mejor relación (59,10 %) y la peor (51,43 %) ambos son sitios de SAF con pastos cuando se realizó la medición, el tercer sitio muestreado no tuvo diferencias significativas con ninguno de los otros dos, lo cual se muestra en la figura 1.

Un resultado general importante es que en todos los sitios muestreados la relación de altura comercial de los árboles con respecto a la altura total sobrepasa el 50 %. Esto muestra que la especie *A. hunsteinii* en SAF tiene un gran potencial de implementación, ya que permite

Cuadro 2. Valores promedio y diferencias significativas para 1 km de árboles de *A. hunsteinii* en SAF con tres distanciamientos distintos en Turrialba, Costa Rica.

Table 2. Average values and significant differences for 1 km of trees of *A. hunsteinii* in AFS with three different distances in Turrialba, Costa Rica.

Variable	5 m		10 m		15 m	
	Promedio	Tukey	Promedio	Tukey	Promedio	Tukey
G (m ² km ⁻¹)	55,27	A	26,71	B	16,97	C
VT (m ³ km ⁻¹)	782,07	A	337,11	B	185,69	C
VC (m ³ km ⁻¹)	412,37	A	203,54	B	112,69	C
CO ₂ (Mg km ⁻¹)	826,61	A	356,32	B	196,26	C

Nota: G es el área basal, VT es el volumen total, VC es el volumen comercial y CO₂ es la cantidad de Dióxido de carbono fijado.

Note: G is the basal area, VT is the total wood volume, VC is the commercial volume and CO₂ the amount of Carbon dioxide sequestered in the biomass.

usar diferentes espaciamientos sin influir en el desarrollo silvícola, a la vez que posibilita diferentes intensidades de sombra bajo el dosel de los árboles para los componentes agrícolas asociados, lo que permite tener una gama amplia de posibles cultivos en el SAF [12].

La manera en que se presentan los datos a continuación fue desarrollada para demostrar la potencialidad de implementar la especie *A. hunsteinii* en linderos maderables de un SAF (Cuadro 2), donde se muestra la productividad en una línea de 1 km con los diferentes distanciamientos, esta distancia permite homogenizar la manera de medir el crecimiento y el rendimiento, ya que es comparable con el de 1 hectárea de plantación forestal según Lujan et al [10].

En el área basal (Cuadro 2), se presentó que en cada distanciamiento la variable depende directamente de la cantidad de Individuos presentes por kilómetro, ya que al no tener diferencias significativas en el diámetro promedio de cada lindero SAF muestreado, el determinante para una mayor área basal es la cantidad de árboles en una unidad lineal proyectada para los rendimientos. Por lo que, al tener un menor distanciamiento entre árboles, se obtiene una mayor área basal acumulada, lo cual va a tener una consecuencia positiva en el rendimiento para el finquero a la hora de llevar a cabo un aprovechamiento del recurso forestal. Lo anterior siempre debe ser considerando que el distanciamiento sea el espacio mínimo para la especie, donde esta se pueda desarrollar de manera plena, ya que según Costa et al [21], el aumento del área basal va ligado con el desarrollo de la copa de los árboles y el espacio que tengan para su crecimiento óptimo.

En el cuadro 2 se muestra el volumen total y el volumen comercial alcanzado en cada distanciamiento. En el caso del volumen total se tienen rendimientos desde los 185,69 hasta los 782,07 m³ km⁻¹, lo cual denota la potencialidad de obtener grandes volúmenes en zonas marginales de las fincas. Principalmente en fincas pequeñas o medianas donde la presión por obtener la mayor utilidad posible del terreno es vital para su flujo de caja [9]. La especie *A. hunsteinii* presenta una oportunidad de mezclar cultivos agrícolas de corto o mediano plazo con forestales de mediano a largo plazo, debido al turno de corta de la especie en general.

Dado que el género *Araucaria* está presente en el hemisferio sur, en Costa Rica la experiencia ha sido relativamente pequeña en comparación a la siembra con otras especies exóticas [22], sin embargo, en el continente americano existe otra especie similar en desarrollo a *A. hunsteinii*, la cual es la *A. angustifolia*. Esta última ha sido documentada en bosques naturales y plantaciones forestales en varios países suramericanos como Argentina y Brasil.

En Argentina se tiene un ensayo sobre el efecto de diferentes densidades sobre el desarrollo de *A. angustifolia*, donde el distanciamiento más amplio es de 625 árboles ha⁻¹, el cual a los 24 años de edad presentó un volumen total de 451,75 m³ ha⁻¹, un dato que es comparable con el alto volumen presentado en el distanciamiento de 5 m del presente estudio el cual obtuvo un volumen total de 782,07 m³ km⁻¹. Donde la diferencia podría estar relacionada con el acceso a la luz lateral de los árboles en linderos a diferencia de la plantación forestal.

En el cuadro 2 se muestra el rendimiento en términos de volumen comercial para una hilera de 1 km lineal con *A. hunsteinii* en SAF de 20 años de edad, donde se presentan las diferencias significativas según los distintos espaciamientos. El mejor rendimiento comercial se dio en el sitio Alto Varas, el cual presenta un distanciamiento de 5 m entre los árboles y tiene un volumen comercial estimado de 412,37 m³, el segundo sitio muestreado (Recreo) con un distanciamiento entre árboles de 10 m, tiene una diferencia de un 50 % menos con respecto al primero mencionado.

Para el sitio Alto Varas (distanciamiento de 5 m), la producción de volumen comercial es de aproximadamente 20 m³ comerciales anuales por cada 1 km lineales de árboles en el SAF. Esto se traduce a un valor aproximado de \$ 900 por km por año, tomando como base el valor de mercado de la especie para venta de madera en pie en la zona de Turrialba en Costa Rica, el cual al tipo de cambio actual de moneda local en Setiembre del año 2020 es de 45 \$ m⁻³ según Camacho [23]. Este valor se agregaría a la productividad anual del predio, incrementando la rentabilidad de los desarrollos agropecuarios con los cuales se asocia.

Sin embargo, al tratarse de un SAF, donde el componente forestal es solo una parte del sistema, no se puede generalizar que utilizar un distanciamiento de 5 m entre árboles es el mejor tratamiento, ya que la productividad proyectada de las líneas de árboles establecidos, va a depender de que tanta sombra pueda soportar el cultivo asociado, así como el fin que el productor deseé establecer como objetivo principal [24].

Sumado al alto volumen comercial encontrado, se obtuvo una baja incidencia de problemas de forma, donde menos del 10 % de los árboles en los tres distanciamientos muestreados se encontraban torcidos o bifurcados. Ambas variables pueden estar directamente relacionadas con el efecto de ser sometidos a las corrientes de viento de forma continua, debido a estar plantados en hileras, a diferencia de los bloques de plantación tradicionales [13]. Esto demuestra que *A. hunsteinii* es una muy buena alternativa para funciones como barrera rompevientos sin perjudicar la producción de madera.

Desde otra óptica, el utilizar *A. hunsteinii* asociado con actividades agropecuarias es una buena manera de beneficiarse del componente forestal como contrapeso a las emisiones CO₂ de la actividad asociada en el SAF, ya que toda actividad productiva tradicional como la agricultura o la ganadería emiten gases de efecto invernadero [25]. Por lo que el uso de una especie con alto potencial de secuestro de CO₂ como *A. hunsteinii* [26], puede balancear o al menos mitigar parte de las emisiones asociadas a las actividades agropecuarias del SAF.

En el cuadro 2 se observan las toneladas de CO₂ totales capturadas en 1 km lineal con *A. hunsteinii* de 20 años de edad, contemplando la biomasa total del componente forestal (aérea y subterránea), la cual estaría siendo capturada en periodos medianos a largos en biomasa viva por el ciclo productivo de la especie el cual puede llegar a los 50 años [27].

En el Cuadro 2 se pueden ver las diferencias significativas encontradas entre los tres distanciamientos. Como es de esperar, el mejor rendimiento en el secuestro de dióxido de carbono se encuentra en el distanciamiento de 5 m (Sitio Alto Varas), con 826,61 toneladas métricas de CO₂ para 1 km lineal, ya que es donde se encuentran mayor cantidad de árboles por distancia extrapolada.

Ahora, si se contempla un ancho de 10 m para las líneas de árboles de *A. hunsteinii*, resulta un área total de 10 000 m² (1 ha) equivalente por cada kilómetro lineal de SAF, donde el incremento medio anual (IMA) de CO_{2e} por kilómetro para cada distanciamiento sería de: 9,81 Mg ha⁻¹ para 15 m entre árboles, 17,82 Mg ha⁻¹ para 10 m y 41,33 Mg ha⁻¹ para 5 m. Los dos últimos valores se encuentran dentro del rango de los IMACO₂ reportados para plantaciones compactas (puras o mixtas) de *A. hunsteinii* [26], [28], lo anterior a pesar de que todos los árboles se encuentran bajo el efecto de borde al no tener competencia lateral, por lo que se puede comparar la hipótesis del árbol tipo o volumen meta de Keller et al. [29] en el género *Araucaria*.

En esta especie se debe considerar la referencia de Hashim [19] sobre la susceptibilidad en la tasa de mortalidad de la especie ante el ataque termitas (*Coptotermes* sp.), debido a que en las parcelas muestreadas en Malasia solamente un 14 % de los árboles llegó a los 41 años de edad, a pesar de no hacer ninguna referencia sobre el tipo de manejo silvícola aplicado a las parcelas, en el caso del presente estudio al ser orillas de caminos de fincas agrícolas, los árboles al menos tuvieron algún mantenimiento inicial en los sitios.

Conclusiones

La especie *Araucaria hunsteinii* presentó un crecimiento volumétrico relevante en linderos de sistemas agroforestales, tanto con cultivos agrícolas como pecuarios. Resultando un volumen promedio por árbol de 3,36 m³, con las siguientes características dasométricas: un diámetro promedio general de 57,7 cm y, una altura total promedio general de 24,99 m, para árboles de 20 años de edad.

No se encontraron diferencias significativas en el crecimiento en diámetro y altura comercial para los tres distanciamientos evaluados (5, 10 y 15 m), sin embargo, aun considerando las limitantes a la hora de llevar a cabo el análisis del presente estudio, dado que los datos fueron obtenidos de fincas agrícolas productivas y no de sitios dedicados a la investigación forestal, sí se encontraron diferencias significativas para la altura total promedio de cada distanciamiento, siendo los árboles más altos los que se encuentran a menores distanciamientos.

En linderos maderables con un distanciamiento de 5 m entre árboles, se podrían esperar valores de hasta 412 m³ de volumen comercial, 782 m³ de volumen total y 826 Mg de CO₂ en 1 km lineal plantado. A distanciamientos mayores estos valores disminuyen sustancialmente, sin embargo, para definir este factor se debe tomar en cuenta el cultivo asociado y objetivos del productor.

Referencias

- [1] B. Louman et al., Efectos del pago por servicios ambientales y la certificación forestal en el desempeño ambiental y socioeconómico del manejo de bosques naturales en Costa Rica. Turrialba, C.R.: CATIE, 2005.
- [2] A. Sanchez-Azofeifa, "Análisis de la cobertura forestal de Costa Rica entre 1960 y 2013", *Ambientico*, vol. 1, núm. 253, pp. 4–11, 2015.
- [3] M. Guariguata y G. Kattan, *Ecología y conservación de bosques neotropicales*, Primera edición. Cartago, Costa Rica: Editorial tecnológica de Costa Rica (EULAC - GTZ), 2002.
- [4] S. Chavarría-Navarro y S. Molina-Murillo, "¿Por qué no incrementa el consumo de madera local? El caso de Costa Rica", *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 15, núm. 37, pp. 02–14, 2018.
- [5] Randy Umaña, "Incentivos y barreras para la inversión en plantaciones forestales en Costa Rica". Tesis de Licenciatura, Ing. Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2010.
- [6] R. Lasco, R. Delfino, y M. L. Espaldon, "Agroforestry systems: helping smallholders adapt to climate risks

- while mitigating climate change”, *Wires Clim. Change*, vol. 5, núm. 6, pp. 825–833, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/wcc.301>.
- [7] F. Casanova-Lugo, J. Petit-Aldana, y J. Solorio-Sánchez, “Agroforestry systems as an alternative for carbon sequestration in the Mexican tropics”, *Rev. Chapingo*, vol. 17, núm. 1, pp. 133–143, Nov. 2011.
- [8] C. CATIE, “Estación Meteorológica EL CATIE”, [Online]. 2020. Available: <https://www.catie.ac.cr/productos-y-servicios/estacion-meteorologica/estacion-meteorologica-catie.html>. [FECHA DE ACCESO: Feb.01.2020]
- [9] C. Pizarro y G. Segnini, “Linderos maderables de alta producción en fincas ganaderas de Guanacaste”, presentado en Taller a finqueros de sistemas agroforestales, Guanacaste, Costa Rica, 2016.
- [10] R. Lujan, J. Beer, y G. Kapp, *Manejo y Crecimiento de linderos de tres especies maderables en el distrito de Changuinola, Panamá*. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1997.
- [11] G. Marin-Serna et al., *Sistemas Agroforestales*, Primera. Colombia: Universidad de Caldas, 2011.
- [12] T. Ilany, M. Ashton, F. Montagnini, y C. Martinez, “Using agroforestry to improve soil fertility: effects of intercropping on *Ilex paraguariensis* (yerba mate) plantations with *Araucaria angustifolia*”, *Agroforest Syst.*, vol. 80, núm. 1, pp. 399–409, Jun. 2010.
- [13] E. Méndez, J. Beer, J. Faustino, y A. Otárola, *Plantación de árboles en línea*, Turrialba, Costa Rica: CATIE, 2000.
- [14] FAO, *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000*. Roma, Italia: FAO: Montes, 2002.
- [15] O. Murillo-Gamboa, Y. Badilla-Valverde, y M. Morales-Salazar, “Método de inventario para plantaciones pequeñas”, presentado en Mesas de trabajo, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2012, p. 16, [En línea]. Disponible en: http://www.cnf.org.pe/secretaria_conflat/memorias/DOCUMENTO%20MESAS/MESA%202/Olman%20Murillo.pdf.
- [16] R. Córdoba-Foglia, “Evaluación de la Madera de *Klinkii* (*Araucaria hunsteinii*)”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, A solicitud de CACTU 1, 2000.
- [17] P. West, *Tree and Forest Measurement*, Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [18] J. Di Renzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C. Robledo, *Infostat. Versión 2017*. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina: Grupo Infostat.
- [19] M. N. Hashim, “Survival and growth of two *Araucaria* species established at Mata Ayer Forest Reserve, Perlis”, *J. Trop. For. Sci.*, vol. 17, núm. 2, pp. 319–321, Apr. 2005.
- [20] E. Crechi, “Efectos de desidad de plantación sobre la producción, crecimiento y sobrevivencia de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. en Misiones, Argentina”, M.S. tese, Universidad Federal de Paraná, Brasil, 1996.
- [21] E. Costa, A. Hess, y C. Gimaraes-Finger, “Estructura y Crecimiento de los bosques de *Araucaria angustifolia* en el sur de Brasil”, *Bosque*, vol. 38, núm. 2, pp. 229–236, 2017.
- [22] F. Rojas-Rodriguez, “Principales especies forestales introducidas en Costa Rica”, *Rev. For. Kurú*, vol. 2, núm. 4, pp. 1–13, 2005.
- [23] W. Camacho, (Comunicación privada) “Precios de la madera en Pie en la zona de Turrialba”, feb. 01, 2020.
- [24] B. Moran-Moreno, A. Herrera, y K. López-Benavides, “Evaluación socioeconómica y ambiental de tres tipos de sistemas agroforestales en el Trópico Seco Nicaragüense”, *Rev. Científica FAREM-Esteli*, vol. 1, núm. 11, pp. 13–26, Nov. 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.5377/farem.v0i11.1601>.
- [25] H. Valin, P. Havlík, A. Mosnier, E. Schmid, M. Obersteiner, y M. Herrero, “Agricultural productivity and greenhouse gas emissions: trade-offs or synergies between mitigation and food security?”, *Environ. Res. Lett.*, vol. 8, núm. 3, pp. 1–9, Jul. 2013.
- [26] R. Russo y B. Briscoe, “Performance of *klinkii* (*Araucaria hunsteinii* k. schuman) in the humid tropics of Costa Rica”, *J. Sustain. For.*, vol. 14, núm. 4, pp. 13–18, Oct. 2002.
- [27] H. Barres y R. Camacho-Herrera, (Comunicación privada) “Datos observados sobre *Araucaria hunsteinii* desde 1968 en los ensayos IICA-CATIE”, jun. 01, 2019.
- [28] Martínez-Albán, “Crecimiento y fijación potencial de carbono en plantaciones forestales mixtas de *Araucaria hunsteinii* en la zona atlántica, Costa Rica.”, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2014.
- [29] A. Keller, E. Crechi, y E. Fernández-Tschieder, “Efecto de la densidad de plantación sobre la producción en volumen de *Araucaria angustifolia* (bert.) o. ktze. en misiones, Argentina, a los 35 años de edad.”, presentado en XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales, UNAM - EEA Montecarlo. Eldorado, Misiones, Argentina, 2008, vol. 1, p. 8.