

Potencial de captura de carbono en plantaciones mixtas con *Araucaria hunsteinii* K. Schum. en la Zona Atlántica, Costa Rica

Carbon capture potential in mixed plantations with *Araucaria hunsteinii* K. Schum. in the Atlantic Zone, Costa Rica

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

Recibido: 4/6/2020

Aceptado: 19/10/2020

Publicado: 17/12/2020

Abstract

Globally, it has become transcendental to seek and innovate the best forest plantation designs to capture carbon (CO₂) and mitigate the current accelerated climate change. Due to this, the development of three mixed 18 years old forest plantation designs with *Araucaria hunsteinii* and other species in order to capture CO₂ was studied, located in the Atlantic Zone of Costa Rica. For this, the data in a network of permanent sampling plots carried out by the organization Reforest The Tropics were analyzed, in which dasometric variables have been measured annually. Through the Tukey test, it was determined that there were significant differences in the total volume and accumulated CO₂ per hectare between the treatments studied, in which the *Vochysia guatemalensis* model was the most outstanding with 611.05 m³*ha⁻¹ of total volume and 582.42 Mg*ha⁻¹ of CO₂ fixed. However, for the remaining two treatments the CO₂ accumulation results were higher than 400 Mg*ha⁻¹. On the other hand, *A. hunsteinii* presented an optimal development in the mixed plantation designs studied, with growth rates comparable to that found in other latitudes. However, it was shown to be sensitive to competition for light and other resources when combined with other higher-growing species. Finally, it was concluded that the models in this study generate sustainability between the accumulation of CO₂ and income generation from the wood sale.

Key words: Reforestation, growth, volume, CO₂ accumulation.

1.Reforest The Tropics Inc.; Cartago, Costa Rica; asolis@reforestthetropics.org, vmartinez89@gmail.com, rttcostarica@ice.co.cr

Resumen

Globalmente se ha vuelto trascendental buscar e innovar los mejores diseños de plantaciones forestales para capturar carbono (CO₂) y mitigar el acelerado cambio climático actual. Es por esto que se estudió el desarrollo de tres diseños de plantaciones forestales mixtas de *Araucaria hunsteinii* con otras especies con el fin de captura de carbono (CO₂), las cuales presentaban una edad de 18 años y se encontraban en la Zona Atlántica de Costa Rica. Para esto se analizaron los datos de una red de parcelas permanentes de muestreo que ha sido llevada a cabo por la organización “Reforest The Tropics”, en las cuales se han medido variables dasométricas anualmente. Por medio de la prueba Tukey se determinó que existían diferencias significativas en el volumen total y el CO₂ acumulado por hectárea entre los tratamientos estudiados, siendo el modelo de *Vochysia guatemalensis* el más sobresaliente con 611,05 m³·ha⁻¹ de volumen total y 582,42 Mg·ha⁻¹ de CO₂ fijado. No obstante, para los dos tratamientos restantes los resultados de acumulación de CO₂ son superiores a 450 Mg·ha⁻¹. Por su parte, *A. hunsteinii* presentó un desarrollo óptimo en los diseños de plantaciones mixtas estudiadas, con tasas de crecimiento comparables a lo encontrado en otras latitudes. Sin embargo, demostró ser sensible a la competencia por luz y otros recursos cuando se combina con otras especies de mayor crecimiento. Finalmente, se concluyó que los modelos de este estudio generan sostenibilidad entre acumulación de CO₂ y la generación de ingresos por venta de madera.

Palabras clave: Reforestación, crecimiento, volumen, acumulación de CO₂.

Introducción

Araucaria hunsteinii K. Schum. (Klinki) es una especie conífera originaria de Papua Nueva Guinea, que se encuentra naturalmente entre los 600 m y 1500 m sobre el nivel del mar (msnm) [1]. Además, en su país de origen se reporta como una especie con alta rentabilidad en plantaciones monoespecíficas [2] y que alcanza un incremento medio anual (IMA) del diámetro entre 1,1 cm y 1,4 cm para plantaciones mayores a 40 años de edad [3], [4]. Según Russo y Briscoe [5] el Klinki fue introducido en Costa Rica en el año 1966 por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicando en ese entonces a esta especie en la zona atlántico de Costa Rica por debajo de los 1000 msnm. Sin embargo, y a pesar de que ha aumentado el área plantada con esta especie en Costa Rica, hasta el momento se encuentra muy poca información publicada sobre su desarrollo.

Por otra parte, las plantaciones forestales mixtas (PFM) han demostrado ser exitosas conforme su desarrollo y producción [6], [7] aunque para algunos autores estas tengan menor capacidad de fijación de biomasa [8]. Por otra parte, alguna literatura atribuye a que debido a la mayor diversidad de especies en las PFM, se tienen múltiples ventajas sobre plantaciones monoespecíficas como lo son: la resiliencia ante plagas y enfermedades, la diversificación de productos, optimización económica según los objetivos del productor y potencialización en el crecimiento y desarrollo [7], [9].

En este contexto, “Reforest The Tropics” (RTT) es una Organización No Gubernamental sin fines de lucro, que ha sido pionera en el desarrollo de plantaciones con Klinki en Costa Rica. Estas plantaciones establecidas por RTT tienen como principal finalidad la captura de CO₂ a largo plazo, en las que Klinki ha tenido un buen anclaje ya que su desarrollo se optimiza en sistemas con rotaciones de largos periodos (mayor a 30 años) [1], [5].

Por esta misma razón, RTT ha implementado y desarrollado PFM de Klinki en asocio con otras especies latifoliadas con turno de rotación más corto [10], buscando salvaguardar los demás beneficios que se obtienen de las PFM. Dentro de estos se encuentra el generar una opción rentable y atractiva para los finqueros productores, asegurando ingresos intermedios al turno de rotación del Klinki por la venta de madera de las otras especies. Además, es de esperar que el desarrollo del Klinki como conífera y especie principal para captura de CO₂ no se vea afectado, esto debido a la diferenciación en el uso del espacio y recursos por las distintas especies [11], [12].

Es así como esta investigación tuvo como objetivo exponer el desarrollo de PFM de Klinki con otras especies latifoliadas establecidas con el fin de captura de carbono.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

La investigación se realizó en la finca forestal llamada Hacienda Las Delicias, ubicada en Guácimo de Limón (10° 12' N, 83° 37' W) a 295 msnm. La localidad presenta una precipitación media anual de 3464 mm y una temperatura media anual de 25,1 °C [13], [14]. Asimismo se pueden encontrar los órdenes de suelos andisoles e inceptisoles [15], y se conoce de una topografía ondulada poco abrupta.

Diseño y recopilación de datos

En esta finca RTT ha desarrollado un proyecto de reforestación de especies mixtas para secuestro de carbono con un área total de 96 ha aproximadamente, de las cuales 25 ha son tomadas para el presente estudio y presentan una edad de 18 años. Los tratamientos analizados son plantaciones de Klinki combinadas con otras especies forestales latifoliadas, establecidas a 4 m de distancia entre líneas, los distanciamientos entre árboles varían entre 2 y 5 m, dependiendo de la mezcla de especies.

Las combinaciones de cada modelo de plantación encontradas en el sitio fueron seleccionadas experimentalmente y basadas en la experiencia de RTT, las mismas se conformaron de la siguiente manera: 30 % con Klinki, 14 % con las especies *Swietenia macrophylla* King (Caoba) y *Eucalyptus* sp. (Eucalipto) en partes iguales, y un 56 % con una especie latifoliada asociada, cada una presenta una tasa de crecimiento diferenciada, las especies son: *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. (Chancho), *Hieronyma alchorneoides* Allemão (Pilón) y *Dipteryx panamensis* (Pittier) Record & Mell (Almendo). Con las últimas especies es que se definió el nombre de cada tratamiento muestreado.

Para recolectar los datos se utilizó el sistema de Parcelas Permanentes de Muestreo (PPM) de RTT. Estas parcelas se diseñaron con una forma rectangular y de manera que se pudieran medir aproximadamente 70 árboles en cada una para generar representatividad, los datos específicos de cada tratamiento son los siguientes:

- Chancho

Dimensiones de parcela: 16 m * 50 m.

Tamaño de parcela: 800 m².

Cantidad de parcelas: 6.

Árboles por hectárea: 870.

- Pilón

Dimensiones de parcela: 16 m * 40 m.

Tamaño de parcela: 640 m².

Cantidad de parcelas: 5.

Árboles por hectárea: 1100.

- Almendo

Dimensiones de parcela: 16 m * 40 m.

Tamaño de parcela: 640 m².

Cantidad de parcelas: 5.

Árboles por hectárea: 1100.

En cada una de estas se midieron las variables diámetro a 1,3 m de altura (dap) con una cinta diamétrica y; altura total con clinómetro y una distancia horizontal conocida.

Cabe mencionar que estas parcelas han sido medidas anualmente desde el año 2 después de establecidas las plantaciones, por lo que se tiene registrada la crono secuencia del desarrollo hasta el año 18. Además, de que estas plantaciones han recibido diferentes tratamientos de raleo, por las distintas composiciones de especies en cada mezcla a través del tiempo

Cálculo de Volumen y CO₂ fijado

Para calcular el volumen total en las plantaciones se utilizó la ecuación 1.

$$V_T = G * H_T * F_F \quad (1)$$

Dónde: VT es el Volumen total (m³*ha⁻¹); G es el Área basal (m²); HT es la Altura total (m) y FF es el Factor de Forma (0,5 generalizado).

Asimismo, para calcular el CO₂ fijado se hizo uso la ecuación 2 recomendada por Fonseca [16].

$$CO_2 = V_T * PEB * F_{EBA} * F_{EBS} * F_C * F_{CO_2} \quad (2)$$

Dónde: CO₂ es el CO₂ fijado (Mg*ha⁻¹); VT es el Volumen total (m³*ha⁻¹); PEB es el Peso específico base de cada especie según [17]–[22]; FEBA es el Factor de expansión de la biomasa aérea (1,2 generalizado); FEBS es el Factor de expansión de la biomasa subterránea (1,2 generalizado); FC es la Fracción de Carbono (0,5 según [23]) y FCO₂ es el Factor de conversión de C a CO₂ (44/12).

Análisis de datos. El diseño de muestreo se clasificó como simple aleatorio con distinto número de repeticiones en cada tratamiento. Una vez calculadas las variables, se utilizó el programa InfoStat [24] para realizar el análisis estadístico. Primeramente se aplicó una prueba de normalidad (Shapiro-Wilks) para poder proseguir con el análisis de varianza (ANOVA), con este se verificó si

existían diferencias significativas entre y dentro de los tratamientos. Finalmente se utilizó el estadístico Tukey para definir las diferencias entre tratamientos y entre las especies dentro de cada modelo de plantación. Estas pruebas estadísticas fueron realizadas utilizando los datos correspondientes a la última medición (año 2020) con un alfa de 0,05.

Por otra parte, se graficaron los incrementos anuales de carbono fijado por medio de la herramienta Microsoft Excel, para así poder comparar el desempeño dentro de cada tratamiento.

Resultados y discusión

El error de muestreo para los tres tratamientos se encontró por debajo de 15 %, calculado para el volumen total (Vt) y la cantidad CO₂ fijado. Los resultados muestran un promedio ponderado general de volumen total de 423,49 m³ha⁻¹ y de CO₂ fijado de 483,98 Mg*ha⁻¹, lo que significa un IMA de 23,53 m³ha⁻¹*año⁻¹ y 26,89 Mg*ha⁻¹*año⁻¹ respectivamente. Estos valores de IMA para ambas variables son superiores al reportado para plantaciones mixtas de especies nativas en Costa Rica [25], monoespecíficas de Pilón y Cancho en Costa Rica [26]–[29], de Klinki en Malasia [1] y de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze en Argentina [30], [31].

Estos resultados superiores a lo expuesto por otros autores para plantaciones monoespecíficas (con especies similares a las de este estudio) podría atribuirse a lo que es mencionado en la literatura sobre la optimización de las PFM. Ya que se ha expuesto que en una mezcla de especies existe una competencia diferenciada por energía lumínica y por recursos del suelo, lo que a su vez resulta en mayores tasas de crecimiento [11], [12]. Sin embargo, es necesario examinar más a fondo el

desarrollo entre y dentro de los tratamientos en estudio.

Al realizar la prueba Tukey se encontraron que existen diferencias significativas entre los tratamientos, como se muestra en el Cuadro 1. Se puede observar (Cuadro 1) como el arreglo de Almendro muestra valores inferiores a los otros tratamientos para todas las variables, sin embargo, entre Almendro y Pilón la diferencia no es estadísticamente significativa. No así, el tratamiento de Chancho es significativamente sobresaliente sobre los otros dos tratamientos para todas las variables mostradas. Este es un resultado cautivador, ya que se debe tener en cuenta que el tratamiento de Chancho cuenta con menor número de árboles por hectárea con respecto a los otros tratamientos. Sin embargo, esta consideración no es limitante para el Chancho, debido a que se reportada como una especie de rápido crecimiento, tanto en diámetro como en altura [26], [32], [33]. De esta manera se entiende cómo puede sobreponerse al crecimiento de las otras especies.

Asimismo, es importante tener en cuenta que la meta de fijación de CO₂ para las plantaciones establecidas por RTT es de al menos 500 Mg*ha⁻¹ y para un periodo mínimo estipulado de 25 años [14]. Los resultados muestran que el tratamiento de Chancho se encuentra por encima de esta meta y los tratamientos de Almendro y Pilón están cercanos a lograrlo, faltando menos de 90 Mg*ha⁻¹ para ambos, lo cual es considerable y alentador a su edad de 18 años actualmente. No obstante, es necesario profundizar este análisis observando el desarrollo de cada especie dentro de los distintos tratamientos, como se puede ver en la Figura 1.

El mejor desarrollo para el Klinki se obtuvo en el tratamiento de Almendro para ambas variables dasométricas, teniendo incluso un crecimiento mayor que el mismo Almendro con IMA de 1,32 cm*año⁻¹ para

Cuadro 1. Valores promedio y diferencias significativas según prueba Tukey para tres tratamientos de plantaciones forestales mixtas asociadas con *Araucaria hunsteinii* en la Zona Atlántica, Costa Rica.

Table 1. Average values and significant differences according to Tukey test for three mixed forest plantations treatments associated with *Araucaria hunsteinii* in the Atlantic Zone, Costa Rica.

Variable	Almendro		Chancho		Pilón	
	Promedio	Tukey	Promedio	Tukey	Promedio	Tukey
dap (cm)	20,45	A	28,7	B	22,83	A
ht (m)	21,44	A	25,37	B	22,12	A
VT (m ³ *ha ⁻¹)	284,72	A	611,05	B	337,20	A
CO ₂ (Mg*ha ⁻¹)	418,52	A	582,42	B	431,30	A

Leyenda: dap es el diámetro a 1,3 m de altura, ht es la altura total y VT es el volumen total de madera.

Legend: dap corresponds to the diameter at 1.3 m height, ht is the total height, V is the total wood volume and CO₂ is the CO₂ equivalent.

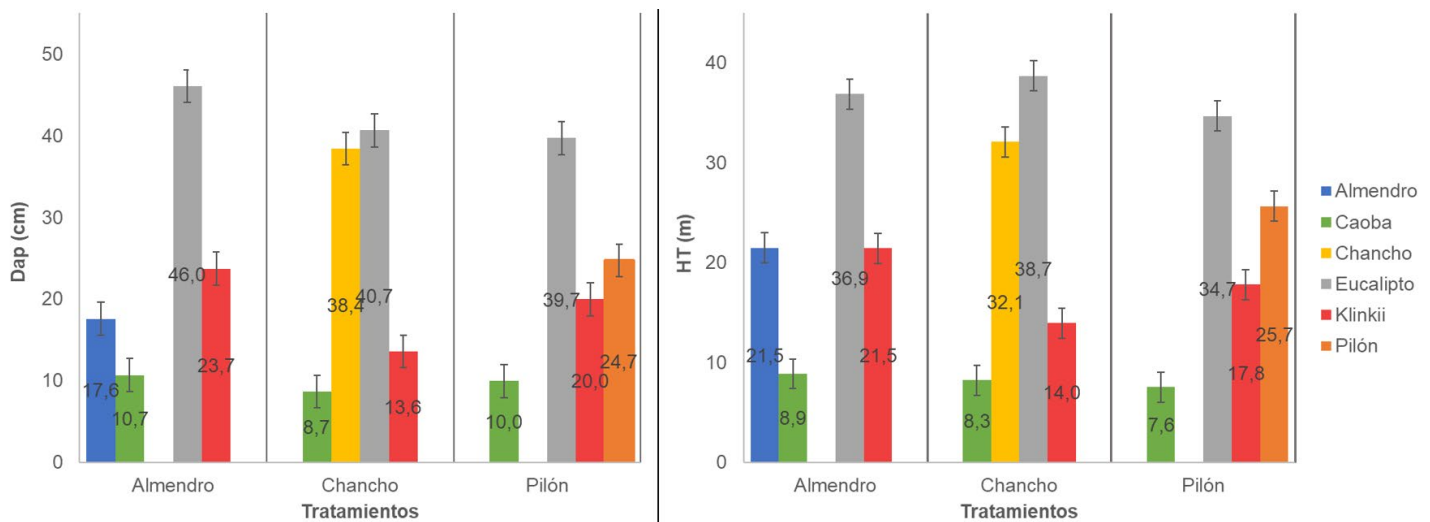


Figura 1. Desarrollo en diámetro (Dap) y altura total (HT) por especie para tres tratamientos de plantaciones forestales mixtas asociadas con *Araucaria hunsteinii* en la Zona Atlántica, Costa Rica.

Figure 1. Diameter (Dap) and total height (HT) development by species for three treatments of mixed forest plantations associated with *Araucaria hunsteinii* in the Atlantic Zone, Costa Rica.

el Dap y de 1,23 m* año^{-1} para la HT. Consecutivamente se obtuvo un IMA del Dap de 1,11 $\text{cm}^3\text{año}^{-1}$ y de 0,99 $\text{m}^3\text{año}^{-1}$ para la HT en el tratamiento de Pilon. Estos valores se encuentran dentro del rango de crecimiento reportado por la literatura para Klinki en plantaciones en Papua Nueva Guinea (país de origen de la especie) para plantaciones mayores a 40 años de edad [3], [4]. Sin embargo, el desarrollo del Klinki en el tratamiento de Chancho se muestra considerablemente suprimido bajo el Chancho que tiene la segunda mayor tasa de crecimiento, después del Eucalipto.

Se encuentra, entonces, una relación directa de menor tasa de crecimiento del Klinki cuando se combina con especies de mayor rendimiento, ya que el orden para las tres especies nativas principales en los tratamientos se podría nombrar como: Chancho de rápido crecimiento [26], [32], [33], Pilon de tasa de crecimiento media [25], [26] y Almendro de lento crecimiento [34], [35].

Es posible que esta relación se deba al efecto de la supresión de acceso a la luz solar [36], con el cual el Klinki aparenta ser afectado en la etapa inicial de crecimiento. En otras palabras, se debe entender que la generación de rodales disetáneos (varios estratos) en una PFM es una posibilidad, sin embargo, el manejo y los resultados que se obtienen no siempre son los esperados [12], dado que se puede desarrollar un rodal superior que limite el crecimiento de las otras especies en doseles inferiores.

Otra especie que se encontró suprimida es la Caoba, mostrando el peor desarrollo en todos los tratamientos.

No obstante, hay que tener en consideración que esta especie cuenta otros factores vulnerables principalmente fitosanitarios, los cuales deben ser tratados para lograr mejores resultados [37].

Por otra parte, es evidente (Figura 1) que las especies de Eucalipto utilizadas en estas PFM (*E. saligna* Sm. y *E. deglupta* Blume) han tenido el mejor desarrollo tanto en Dap como en HT para los tres tratamientos, teniendo en cuenta que ocupan aproximadamente un 7 % del espacio en las plantaciones. Los Eucaliptos son los árboles más plantados a nivel mundial para distintos usos principalmente comerciales, y en Costa Rica han presentado buenos resultados para fines maderables [19], [38]. De estos resultados se enciende el foco de importancia de estas especies en los modelos de PFM, ubicándolas como los primeros raleos económicamente productivos del sistema.

En efecto, el volumen y la calidad de la madera es un aspecto que se debe tener en cuenta cuando se trata de proyectos de reforestación con distintas especies. Ya que, a pesar de que el objetivo principal pueda ser la captura de carbono, la madera que aprovecha el propietario en los turnos de raleo y cosecha deben de tener la capacidad de generar ingresos económicos importantes [39].

Entre estas consideraciones los raleos o aclareos juegan un rol fundamental [39], permitiendo que cuando las especies de rápido crecimiento hayan alcanzado su óptimo de captura de CO_2 y de volumen, puedan ser

requerido para que el donante, dueño de los créditos de carbono, reciba su compensación.

Las mediciones permanentes realizadas por RTT en estos modelos de plantación, muestran cómo interactúan los incrementos anuales de remoción de CO₂ según las distintas especies, como se presenta en la Figura 2.

Con las gráficas de la Figura 2 se evidencia claramente algunos de los resultados descritos anteriormente. Además, es importante ver cómo en todos los tratamientos ocurre una inflexión positiva en la curva de acumulación de CO₂ entre la edad de los 4 y 5 años aproximadamente. Después de este cambio en la curva, el desarrollo se mantiene en una forma lineal hasta la edad presente de 18 años, por lo que será necesario seguir monitoreando anualmente estos diseños de plantaciones mixtas, para encontrar en qué momento se aplanará la curva, como es de esperar [39].

En los tratamientos donde se puede decir que el Klinki no se encuentra suprimido (Almendro y Pilón), y tomando siempre en cuenta que el Klinki solo compone el 30 % del arreglo, se puede observar cómo esta especie aporta aproximadamente entre un 25 % y un 35 % del CO₂ total fijado. Demostrando así, cómo el Klinki tiene un buen desempeño y potencial en plantaciones con fines de captura de CO₂.

Además, en estos tratamientos se esperaría que el Klinki remonte la acumulación de CO₂ para edades mayores a los 25 años alcanzando su óptimo a largo plazo, ya que su periodo de rotación esperado es de al menos 40 años [1], [5]. Que a su vez, se evidencia cómo el desarrollo de Klinki ha respondido positivamente a los raleos en los tratamientos de Almendro y Pilón, elevando su curva de acumulación de CO₂.

Según los resultados de acumulación de CO₂, a grandes rasgos se podría decir que el tratamiento de Chancho y esta especie en sí es la más exitosa. Sin embargo, en el periodo mínimo requerido por los donantes dueños del carbono fijado (25 años), el Chancho se encontraría sobrepuesto a su turno óptimo en términos silviculturales, y esto no es técnica ni económicamente viable [25], [33], [39]. Lo mismo ocurre con el Eucalipto [38], ya que son especies de rápido crecimiento.

Estas especies son esenciales en el contexto de los modelos de plantación de este estudio. Ya que como se ha demostrado, lideran la plantación en la captura de carbono en la etapa inicial, pero además son las que tienen la capacidad de producir madera comerciable incluso desde la edad de 10 años. No obstante, de estas dos especies la que presenta mayores problemas de mercado en Costa Rica, tanto por su precio de venta

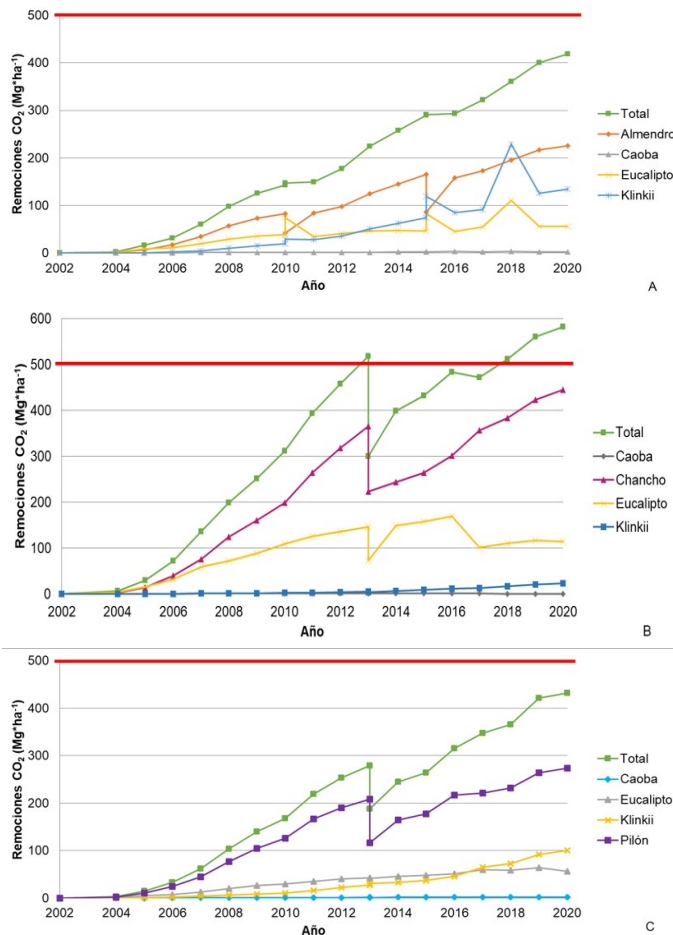


Figura 2. Incrementos corrientes anuales (ICA) para la remoción de CO₂ total y por especie, en tres tratamientos de plantaciones forestales mixtas asociadas con Araucaria hunsteinii en la Zona Atlántica, Costa Rica. A: tratamiento de Almendro, B: tratamiento de Chancho y C: tratamiento de Pilón.

Figure 2. Current annual increment (CAI) for the removal of total CO₂ and by species, in three treatments of mixed forest plantations associated with Araucaria hunsteinii in the Atlantic Zone, Costa Rica. A: Almendro treatment, B: Chancho treatment and C: Pilón treatment.

aprovechadas para liberar espacio a las otras especies de más largo plazo y generen ingresos intermedios al turno de rotación para el finquero.

Es de esta premisa que las PFM desarrolladas por RTT, están diseñadas u orientadas a encontrar el modelo que optimice el equilibrio entre acumulación de CO₂ a largo plazo y la generación de ingresos a los finqueros en el aprovechamiento de la madera distribuidos a lo largo del periodo total definido. De aquí se desprende la sostenibilidad del modelo, ya que para el finquero la PFM debe ser rentable ante el costo de oportunidad de otras actividades y consecuentemente el rodal se logra mantener bajo buenas condiciones en el tiempo

como por la facilidad de colocación, es el Chanco [25], [40]. Se recalca entonces, la importancia de aumentar el uso de Eucalipto en estos modelos de PFM.

En términos de valor de madera, el Pilón y el Almendro se comercializa en Costa Rica hasta por 20 % más que el Chanco. Estos valores para madera en troza con diámetros mayores a 30 cm, pero en madera aserrada la diferencia es significativamente mayor [40]. El valor de la madera de Klinki no es usualmente reportado en los informes nacionales, sin embargo, cuando se trata de madera en troza con diámetros mayores a 30 cm el Klinki se comercializa en Costa Rica como madera de *Pinus* sp. (Pino), el cual llega a valores similares al Pilón. Además, estudios en Papua Nueva Guinea sobre de propiedades de maderas nativas muestran al Klinki como una especie con buen desempeño para distintos usos, desde construcción hasta pulpa para papel [4], [41]. Esto junto con el desarrollo en PFM expuesto anteriormente, conlleva a ver el Klinki como una especie considerablemente viable para plantar y desarrollar en Costa Rica y quizás en otros países también.

Conclusiones

Los diseños de plantaciones mixtas desarrollados por RTT en este estudio presentaron resultados de fijación de CO₂ prometedoros, ya que: alcanzaron la cuota de Mg*ha⁻¹ que se esperaban tener a 25 años con una edad de 18 años actualmente, y fueron mayores a lo reportado para plantaciones mono-específicas con especies similares.

Araucaria hunsteinii presentó un desarrollo óptimo en los diseños de plantaciones mixtas estudiadas, considerándose como una especie que proyecta a turnos de rotación mayores a 30 años. Además, logró incrementos anuales que se encuentran dentro del rango para plantaciones en su región de origen. Y con respecto a fijación de CO₂, esta especie consiguió capturar una suma porcentual proporcional a su ocupación en los modelos mixtos con *Hieronyma alchorneoides* y *Dipteryx panamensis*.

Sin embargo, *A. hunsteinii* demostró ser sensible a la competencia por luz y otros recursos cuando se combina con otras especies de mayor crecimiento. Ya que su desarrollo fue notablemente suprimido cuando se combinó con *Vochysia guatemalensis*, que además el tratamiento con esta especie fue el más sobresaliente de todos.

Los raleos o aclareos juegan un papel fundamental en arreglos de plantaciones mixtas, incidiendo en el desarrollo de las especies que tienen un nivel de crecimiento diferenciado. Además, las especies de crecimiento rápido deben tener la capacidad de generar

ingresos considerables a los propietarios cuando se realizan estos raleos, ya que de esta manera se mantiene un sistema sostenible entre captura de CO₂, como principal objetivo y producción de madera comercial.

Con respecto a especies de crecimiento rápido, los *Eucaliptus* spp. estudiados en este trabajo presentaron ventajas, tanto de crecimiento como económicas, sobre el *V. guatemalensis*. Asimismo, tanto el *A. hunsteinii* como el *H. alchorneoides* y el *D. panamensis*, son especies con alto potencial comercial como un objetivo intrínseco en las plantaciones para captura de CO₂. Finalmente, la especie *Swietenia macrophylla* presentó el peor desempeño en todos los tratamientos de plantaciones mixtas.

Referencias

- [1] Y. A. Zuhaidi y M. N. Hashim, "Araucaria hunsteinii: has research helped us to arrive at a decision?", J. Trop. For. Sci., vol. 19, no. 1, pp. 64-66, 2007.
- [2] S. Saulei, R. Kiapranis, y A. Lata, "Country report on the status of forest genetic resources in Papua New Guinea", PNG Forest Research Institute, Papua New Guinea, 2012.
- [3] M. J. Karmar, S. Yoshida, N. Mizoue, y T. Murakami, "Volume table for *Araucaria hunsteinii* in Bulolo Wau forest plantations of Papua New Guinea", Kyushu J. For. Res. no. 59, pp. 132-136, 2006.
- [4] B. Belleville, K. Lancelot, E. Galore, y B. Ozarska, "Assessment of physical and mechanical properties of Papua New Guinea timber species", Maderas Cienc. Technol., vol. 22, no. 1, pp. 3-12, 2020, doi: 10.4067/S0718-221X2020005000101.
- [5] R. O. Russo y C. B. Briscoe, "Performance of Klinki (*Araucaria hunsteinii* K. Schuman) in the Humid Tropics of Costa Rica", J. Sustain. For., vol. 14, no. 4, pp. 13-18, 2001, doi: 10.1300/J091v14n04_02.
- [6] Y. He, L. Qin, Z. Li, X. Liang, M. Shao, y L. Tan, "Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China", For. Ecol. Manag., vol. 295, pp. 193-198, 2013, doi: 10.1016/j.foreco.2013.01.020.
- [7] K. Verheyen et al., "Contributions of a global network of tree diversity experiments to sustainable forest plantations", Ambio, vol. 45, no. 1, pp. 29-41, 2016, doi: 10.1007/s13280-015-0685-1.
- [8] R. K. Chaturvedi y A. S. Raghubanshi, "Assessment of carbon density and accumulation in mono- and multi-specific stands in Teak and Sal forests of a tropical dry region in India", For. Ecol. Manag., vol. 339, pp. 11-21, 2015, doi: 10.1016/j.foreco.2014.12.002.
- [9] V. Loewe y M. González, "Plantaciones Mixtas, Un modelo productivo con potencial para Chile", INFOR, p. 299, 2006.
- [10] H. Barres y R. Camacho-Herrera, "Datos observados sobre *Araucaria hunsteinii* desde 1968 en los ensayos IICA-

- CATIE”, Comunicación personal (01 junio 2019).
- [11] S. Aiba et al., “Comparative study of additive basal area of conifers in forest ecosystems along elevational gradients”, *Ecol. Res.*, vol. 22, no. 3, pp. 439-450, 2007, doi: 10.1007/s11284-007-0338-3.
- [12] H. Fassola, E. Crechi, A. Henning, A. Keller, y V. Pérez, “Silvicultura de bosques mixtos de especies nativas y exóticas: Antecedentes y potencialidades de los bosques mixtos en el NE Argentino”, INTA EEA Montecarlo-Danzer Forestación S.A., Posadas, Misiones, Argentina, Informe nacional 65, 2010.
- [13] M. Arguedas-Gamboa, M. Rodríguez-Solís, y V. Martínez-Albán, “Mosca barrenadora de la madera (*Pantophthalmus* sp.) en *Hieronyma alchorneoides* Allemão en Costa Rica. Primer registro”, *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 12, no. 29, pp. 69-73, 2015, doi: 10.18845/rfmk.v12i29.2256.
- [14] V. 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.
- [15] R. Mata, y S. Vásquez, “Mapa digital de suelos, órdenes y subórdenes, escala 1:200 000”. Centro de investigaciones Agronómicas (CIA), Facultad de Ciencias Agroalimentarias. UCR, 2010.
- [16] W. Fonseca, “Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales”, *Rev. Cienc. Ambient.*, vol. 51, no. 2, 2017, doi: 10.15359/rca.51-2.5.
- [17] 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.
- [18] M. Navarro, “Determinación de la fracción de Carbono y Peso Específico Básico de 4 especies forestales en diferentes estadios sucesionales del Corredor Biológico OSA, C.R.”, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2011.
- [19] D. Alcántara-Leon, “Estudio Tecnológico de Dos Especies Maderables Exóticas, *Eucalyptus deglupta* blume y *Eucalyptus saligna* smith, Costa Rica”, *Magister Scientiae*, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 1975.
- [20] M. Solís-Corrales y R. Moya, “*Vochysia guatemalensis* en Costa Rica”, p. 107, San José, Costa Rica, 2004.
- [21] FORESCOM, “Caoba: *Switenia macrophylla*”, en especificaciones técnicas de 19 especies maderables tropicales, en peten, guatemala, Proyecto Promoción Comercial de Productos y Maderas Certificadas de Guatemala, Guatemala, p. 30, 2007.
- [22] CATIE, “Proyecto de Semillas Forestales, CATIE”, Turrialba, Costa Rica, 1997.
- [23] P. West, “Tree and Forest Measurement”, 2da ed., Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [24] J. Di Renzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C. Robledo, “Infostat”, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina: Grupo Infostat.
- [25] D. Piotto, D. Craven, F. Montagnini, y F. Alice, “Silvicultural and economic aspects of pure and mixed native tree species plantations on degraded pasturelands in humid Costa Rica”, *New For.*, vol. 39, no. 3, pp. 369-385, 2010, doi: 10.1007/s11056-009-9177-0.
- [26] W. Fonseca, F. Alice, J. Montero, H. Toruño, y H. Leblanc, “Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica”, *Agroforestería en las Américas*, no. 46, pp. 57-64, 2008.
- [27] W. Fonseca, F. E. Alice, y J. M. Rey-Benayas, “Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica”, *New For.*, vol. 43, no. 2, pp. 197-211, 2012, doi: 10.1007/s11056-011-9273-9.
- [28] E. B. Viquez, “Evaluación de la calidad, fijación de carbono y estado del manejo silvicultural en plantaciones forestales en la Universidad Earth, Guácimo, Limón”, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2012.
- [29] A. Herrera, “Remociones de CO₂ en bosques y plantaciones forestales, Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A. División Pindeco, Buenos Aires, Puntarenas, Costa Rica.”, Tesis de Magister, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2013.
- [30] A. Keller, E. Crechi, y E. F. 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.”, XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales, Misiones, Argentina, 2008.
- [31] P. Scordo, “Plantaciones forestales con propósito de secuestrar CO₂ para agroecosistemas sustentables”, Tesis de Licenciatura, Universidad Católica Argentina, Argentina, 2012.
- [32] R. Moya, C. Tenorio, y Í. Meyer, “Influence of wood anatomy on moisture content, shrinkage and during defects in *Vochysia guatemalensis* Donn Sm.”, *Sci For*, vol. 40, no. 94, p. 10, 2012.
- [33] M. E. Camacho, A. Alvarado, y J. Fernández-Moya, “*Vochysia guatemalensis* Donn. Smith, an alternative species for reforestation on acid tropical soils”, *New For.*, vol. 47, no. 4, pp. 497-512, 2016, doi: 10.1007/s11056-016-9527-7.
- [34] D. Rodríguez, “Variación y control genético en propiedades de la madera en *Dipteryx panamensis* Pittier, de 8 y 18 años, San Carlos, Costa Rica”, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2019.
- [35] N. León, O. Murillo, Y. Badilla, C. Ávila, y R. Murillo, “Expected genetic gain and genotype by environment interaction in almond (*Dipteryx panamensis* (Pittier) Rec. and Mell) in Costa Rica”, *Silvae Genet.*, vol. 66, no. 1, pp. 9-13, 2017, doi: 10.1515/sg-2017-0002.
- [36] N. T. Zamin, S. do A. Machado, A. F. Filho, y H. S. Koehler, “Effect of climate variables on mothly growth in modeling biological yield of *Araucaria angustifolia* and *Pinus taeda* in

the juvenile phase”, *Int. J. For. Res.*, vol. 2013, no. 1, pp. 1-8, 2013, doi: 10.1155/2013/646759.

- [37] K. J. da Rocha, S. F. Caldeira, y G. E. Brondani, “Development of *Swietenia macrophylla* King in escape areas”, *Sci. For.*, vol. 44, no. 110, 2016, doi: 10.18671/scifor.v44n110.01.
- [38] H. Martínez, “Eucalipto (*Eucalyptus* spp.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”, FONAFIFO, Moravia, Costa Rica, 2015.
- [39] M. Coronel, “Determinación del turno forestal: bases teóricas y aplicaciones prácticas”, 1.a ed., Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2017.
- [40] A. Barrantes y S. Ugalde, “Precios de la madera en Costa Rica para el primer semestre del 2020 y tendencias de las principales especies comercializadas”, Oficina Nacional Forestal, Costa Rica, 2020.
- [41] B. Belleville, R. Iru, C. Tsirtsis, y B. Ozarska, “Planing characteristics of Papua New Guinea timber species from plantations and regrowth forests”, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 78, no. 2, pp. 343-349, 2020, doi: 10.1007/s00107-020-01495-z.