

Crecimiento inicial de cedro espino (*Pachira quinata*) en el Piedemonte Llanero colombiano

Initial growth of cedro espino (*Pachira quinata*) in Colombian foothills

Ildfonso Narváez¹, PhD; Verónica E Ruiz², PhD; Jordly H Roa³, Ing.

¹ Profesor Programa de Ingeniería Agroforestal Unitrópico, Colombia, <https://orcid.org/0000-0002-4988-8886>; ² Doctora en Ciencias Agrícolas, Querétaro, México, <https://orcid.org/0000-0002-7726-494X>; ³ Ingeniero Agroforestal, Unitrópico, Colombia, <https://orcid.org/0000-0002-0624-7579>

ildenarvaez@unitropico.edu.co

Resumen

Conocer el comportamiento de la fase inicial de crecimiento de *Pachira quinata* es decisiva a la hora de implementar y manejar sistemas agroforestales donde se involucre la ganadería bovina, su incorporación en sistemas de producción ganaderos es escasa principalmente por falta de conocimiento sobre el crecimiento y desarrollo que conlleva a dificultades en el manejo agronómico. Se evaluó el crecimiento en altura y diámetro de en el Municipio de Nunchía Casanare Colombia, donde predomina la ganadería extensiva que reduce la presencia de vegetación natural. Se compararon dos parcelas experimentales que representan el uso anterior del suelo; ganadería (SG) y cultivo de arroz (SA). Las semillas fueron recolectadas en la región, se germinaron en vivero sobre arena de río con sombra del 60%. A un mes de edad se llevaron a campo, y cuando completaron dos meses se hicieron mediciones de la altura total y diámetro a 5 cm del suelo con intervalos de 14 días por un periodo de cinco meses. La prueba Wilcoxon no encontró diferencias estadísticas significativas entre altura ($W=89$, $P=0,0652$) y diámetro ($W=75$, $P=0,3653$) asociadas al uso anterior del suelo, el crecimiento tiene fuerte correlación positiva significativa con la precipitación ($\rho = 0,8796$, $P < 0,001$) y correlación negativa significativa con la temperatura ($\rho = -0,9118$, $P < 0,001$). El crecimiento es no lineal y el mejor ajuste se logra con el modelo logístico, satisface los supuestos estadísticos y por tanto se pueden hacer estimaciones confiables con base en la edad en días.

Palabras clave: Altura apical; Correlación; precipitación y temperatura; Piedemonte llanero; Plántulas, Sequía.

Abstract

Understanding the behavior of the initial growth phase of *Pachira quinata* is crucial when implementing and managing agroforestry systems involving cattle ranching. Its incorporation into livestock production systems is limited mainly due to a lack of knowledge about its growth and

development, which leads to difficulties in agronomic management. Growth in height and diameter was evaluated in the municipality of Nunchía, Casanare, Colombia, where extensive cattle ranching prevails, reducing the presence of natural vegetation. Two experimental plots representing previous land use were compared: cattle ranching (SG) and rice cultivation (SA). Seeds were collected from the region, germinated in a nursery on river sand with 60% shade. At one month of age, they were transplanted to the field, and when they reached two months, measurements of total height and diameter at 5cm above the ground were taken at 14-day intervals over a period of five months. The Wilcoxon test did not find statistically significant differences in height ($W=89$, $P=0.0652$) and diameter ($W=75$, $P=0.3653$) associated with the previous land use. Growth showed a strong positive correlation with precipitation ($\rho = 0.8796$, $P < 0.001$) and a significant negative correlation with temperature ($\rho = -0.9118$, $P < 0.001$). Growth is non-linear, and the best fit is achieved with the logistic model, which satisfies statistical assumptions and thus allows reliable estimations based on age in days.

Keywords: Apical height; Correlation; precipitation and temperature; Plains foothills; Seedlings, Drought.

Introducción

La intensificación de cultivos y ganadería ocasionan deforestación y degradación de suelos (Drewry et al., 2008), de acuerdo con la FAO (2013, 2019) el pastoreo se hace sobre el 26% de la superficie terrestre sin hielo y el 33% de las tierras cultivables se usan en la producción de forraje para alimentar ganado en sistemas intensivos. En Colombia la ganadería ocupa un papel importante a nivel social y económico, de acuerdo con el ICA (2017) la población bovina asciende a 23,5 millones de cabezas localizadas en 514794 predios, donde los principales Departamentos ganaderos son Antioquia (11,76%), Córdoba (8,74%) y Casanare (7,93%). Casanare representa la mayor población bovina en el piedemonte llanero agrupando 1.9 millones de cabezas de ganado, de los cuales el 10,6% se concentra en el Municipio de Yopal (ICA, 2017).

Una alternativa para mantener o recuperar la calidad de los suelos sin ocasionar obstrucción a las actividades agropecuarias es el establecimiento de árboles en diversos arreglos

agroforestales (Celis & Jose, 2011; Roncallo et al., 2012), que generan servicios ambientales y productos forestales como la madera (Montagnini et al., 1997; Wishnie et al., 2007). *Pachira quinata* (Jacq.) W.S.Alverson (Malvaceae) conocida como cedro espino, tolúa o ceiba tolúa, es una especie arbórea en peligro, originaria de la región mesoamericana y norte de Suramérica (Morales & Varón, 2006; Universidad EIA, 2020), es un árbol de múltiples propósitos como madera, sombrío, cercas vivas, entre otros (Cordero & Doshier, 2003) de tal manera que puede introducirse en los sistemas de producción ganadera del piedemonte llanero. El uso del cedro espino en los diversos arreglos agroforestales se ha limitado por la falta de información sobre condiciones edafológicas y de manejo, ya que, los estudios se han concentrado en especies comerciales (Hernández-González et al., 2014; Montero et al., 2011), o bien, estudios de individuos adultos en escenarios naturales (Castellanos & Stevenson, 2011; Pérez Cordero et al., 2003), por otra parte, la alta demanda de su madera ha ocasionado la disminución de su población (Castellanos & Stevenson, 2011; Cordero et al.,

2003) y su variabilidad genética (Rymer et al., 2015). No obstante, es adecuado el uso de especies nativas como *P. quinata* en plantaciones y reforestaciones (Mayoral et al., 2017).

Las etapas iniciales son decisivas para el éxito de la plantación y el conocimiento de la dinámica del crecimiento inicial permite la toma de decisiones acertadas para hacer el manejo agronómico adecuado. Por lo anterior, en este trabajo tiene por objetivo evaluar la tasa de crecimiento inicial y ajustar modelos matemáticos que permitan hacer la estimación de diámetros y alturas con base en la edad.

Materiales y métodos

El área de estudio se ubica en la Vereda Guacharacas del Municipio de Nunchía Casanare Colombia, geográficamente localizada a los 5°30'24.83"N y 72°11'52.28"W, en la sabana no inundable del piedemonte llanero. Los suelos están formados por materiales desplazados de las partes altas de la montaña, la superficie es suave con pendientes entre 0 y 12%, se ubica entre los 300 y 350 m s.n.m, clima cálido húmedo con temperatura media de 25°C, precipitación media anual de 2640mm y los meses más lluviosos son mayo y julio con 338 y 442 mm respectivamente (IGAC, 2011), y un periodo seco de entre dos y cinco meses durante el final e inicio de cada año (Bustamante-Lozano et al., 2013).

Los suelos se clasifican como *Typic Udifluvents*, caracterizados por ser superficiales y con limitación por pedregosidad, texturas gruesas y excesivamente drenados. El horizonte A es de textura franco-arenosa y alcanza hasta 20cm de espesor. Son suelos muy ácidos, alta concentración de aluminio, baja saturación de bases y bases totales, bajo contenido de carbono orgánico, escasa disponibilidad de fosforo y en general la fertilidad natural es baja (IGAC, 2011)

Material vegetal. La recolección de las semillas y preparación del vivero se hizo siguiendo lo planteado por Oliva *et al.* (2014). Las semillas se recolectaron en el mes de marzo de 2015 de árboles con características fenotípicas favorables como altura, fuste recto y cilíndrico, buen follaje y fructificación (CATIE, 1991; Oliva et al., 2014), se sumergieron en agua para descartar las que tuvieran alguna alteración en su maduración o por efecto de plagas o enfermedades. La germinación se hizo bajo 60% de sombra sobre una cama 2mx0,8mx0,2m rellena con arena de río (Cordero & Doshier, 2003) que fue desinfectada aplicando agua hirviendo (Oliva et al., 2014). Cuando la altura promedio de las plántulas en el germinador fue de 10cm se trasplantaron a bolsas de polietileno de 13x17cm llenas de sustrato compuesto del 10% de cascarilla de arroz, 30% de materia orgánica y el 60% restante de tierra negra (Oliva et al., 2014).

Parcelas. Se identificaron áreas utilizadas previamente para el cultivo de arroz (SA) y ganadería (SG). Se establecieron dos parcelas cuadradas de 1000 m², contiguas a fin de disminuir las fuentes de variación. En la primera semana de julio de 2015, con un mes de edad y 25 cm de altura se hizo la siembra de 89 plántulas en campo, distribuidas en cuadro a 3x3 m, en hoyos de 30cm de profundidad y 20cm de ancho, que fueron completados con tierra del mismo. A la parcela SA se asignaron 43 y en SG 46 plántulas. Se hizo control de malezas alternando métodos mecánicos y químicos, y control de la hormiga arriera (*Atta spp*).

Registro de datos. Se hicieron 11 mediciones, la primera el nueve de agosto a dos meses de edad, posteriormente se realizaron 9 con intervalos de dos semanas, y al final transcurrido un mes la onceava medición. La altura fue medida con un flexómetro tomando como referencia la rama más alta hasta tocar el suelo, y la medición del diámetro se hizo con vernier a 5cm de altura a partir del suelo. La evaluación se realizó durante 157 días.

Los registros de precipitación y temperatura fueron obtenidos en el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Los datos faltantes fueron completados mediante las herramientas Worldclim (Harris et al., 2014) y CHIRPS v2.0 (C. Funk et al., 2015; C. C. Funk et al., 2014) para temperatura y precipitación respectivamente.

Análisis de datos. Mediante la función wilcox.test de la base de R, se aplicó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para determinar la presencia de diferencias significativas en el crecimiento en SA y SG. Se ajustaron cuatro modelos no lineales generales (Khamis et al., 2005; Ribeiro et al., 2018) y el modelo lineal. En la tabla 1 se muestra la fórmula matemática de cada modelo.

Tabla 1. Modelos generales

Modelo	Ecuación	Fuente
Lineal	$Y = a + b * X_1 + c * X_2$	(Picard et al., 2012)
Logístico	$Y = a * (1 + b * (exp(-c * X_1 - d * X_2)))^{-1}$	(Draper & Smith, 1998; Silva et al., 2016; Thornley & France, 2006)
Bertalanffy	$Y = a * (1 - b * (exp(-c * X_1 - d * X_2)))^3$	
Brody	$Y = a * (1 - b * (exp(-c * X_1 - d * X_2)))$	
Gompertz	$Y = a * exp(-b * exp(-c * X_1 - d * X_2))$	

La preparación de datos y análisis se hizo mediante rutinas en el paquete estadístico R (R Core Team, 2023). Se ajustaron curvas de crecimiento en altura y diámetro por el método de mínimos cuadrados no lineales generalizados (Pinheiro et al., 2019; Ritz & Streibig, 2009) con la función gnls del paquete nlme (Pinheiro et al., 2019) que permite analizar datos con varianzas diferentes, y la relación diámetro-altura se ajustó por el método de mínimos cuadrados no lineales (Ritz & Streibig, 2009) mediante la función nlsfit del paquete easynls (Arnhold, 2017).

Con base en el coeficiente de determinación (R^2) (Mahanta & Borah, 2017) y Criterio de Información de Akaike (AIC) (Picard et al., 2012) se evaluó el ajuste, mientras que la validez de los modelos se verificó a través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Gallant, 1987) y el estadístico de Durbin-Watson (Durbin & Watson, 1951). Los parámetros de los modelos se consideraron significativos si no incluyen el cero dentro de los intervalos de confianza

estimados al 95% (Lawal, 2014; Mahanta & Borah, 2017),.

Resultados y discusión

Del total de individuos se excluyeron aquellos que presentaron problemas sanitarios que impidieron el crecimiento, finalmente se analizó 26 en SG y 25 en SA.

Comparación entre tipos de suelo. Debido a que los grupos de datos no cumplen con los supuestos de normalidad y homocedasticidad se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre las medianas de altura y diámetro de SG y SA. Se encontró que la altura no presenta diferencias significativas entre los suelos evaluados ($W=89$, $p<0,0652$), igual comportamiento tiene el diámetro ($W=75$, $p<0,3653$), es decir, que las condiciones de fertilidad natural no han sido alteradas por el uso del suelo anterior, debido a que no se efectuó por un periodo prolongado de tiempo, o bien, se dieron periodos de descanso donde la

regeneración natural de especies forrajeras y arbustos ayudo a mantener las condiciones físicas y químicas del suelo. Comportamiento que es congruente con los resultados evaluando dos localidades en Panamá, donde reportan diferencias en el crecimiento asociado a cambios en la fertilidad, de tal manera que para establecer plantaciones se debe considerar las condiciones específicas de sitio y manejo (Hall et al., 2011).

Al no encontrar diferencias estadísticas significativas entre los tipos de suelo evaluados se retiró el clasificador tipo de suelo, y los datos se agruparon en un conjunto, sobre el cual se ajustó modelos para altura y diámetro respecto a la edad en días y la precipitación en mm. En la figura 1 y figura 2 se muestran los valores promedio de altura y diámetro por cada parcela, y la línea promedio general con su desviación estándar resultado de agrupar las parcelas.

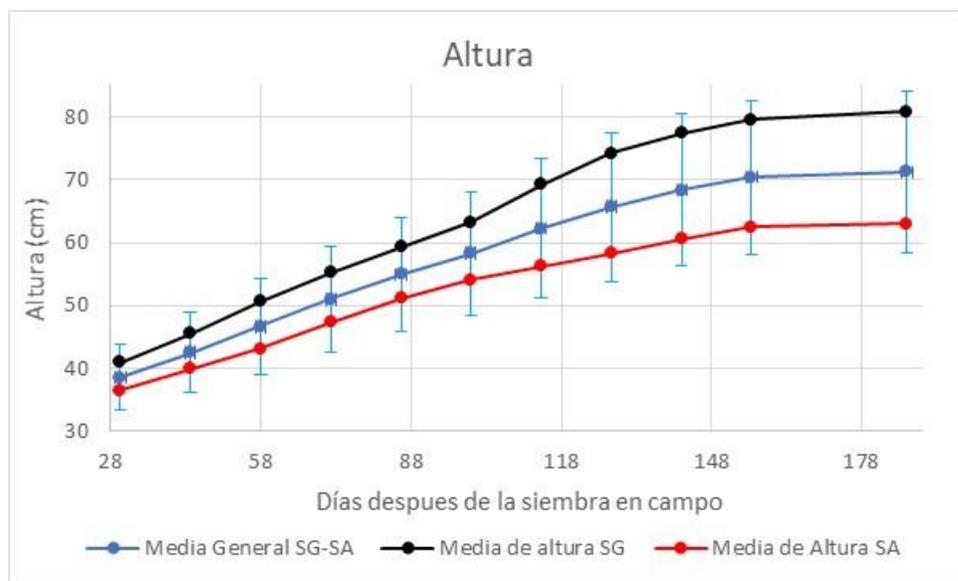


Figura 1. Promedios de crecimiento en altura.

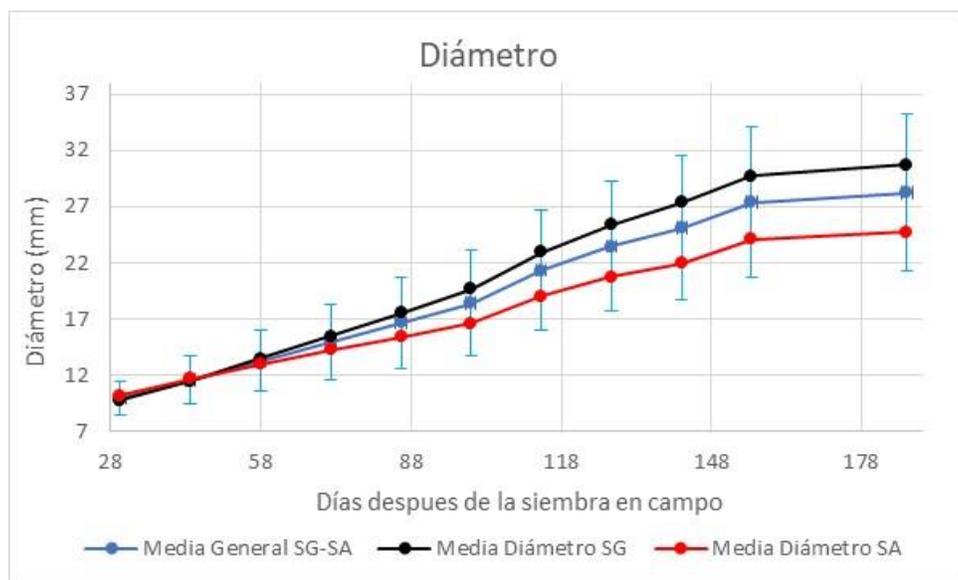


Figura 2. Promedios de crecimiento en diámetro.

El crecimiento en diámetro y altura tiene tendencia no lineal característico del desarrollo de las etapas tempranas de especies nativas en regiones tropicales (Hernández-González et al., 2014). Por esta razón, los modelos no lineales tienen mejor ajuste y se puede utilizar para estimar el crecimiento en altura y diámetro con base en la edad en días (Figura 1 y Figura 2).

La precipitación y temperatura tienen incidencia directa en el crecimiento principalmente en altura. La tasa de crecimiento en altura tiene correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0,001$) de 0,8796 con la precipitación y de -0,9118 con la temperatura. Por otra parte, el crecimiento en diámetro presenta tasas de crecimiento variables sin configurar tendencia clara, por tanto, las correlaciones con precipitación y temperatura no son estadísticamente significativas. En este sentido, a mayor precipitación y menores temperaturas se obtiene valores altos en la tasa de crecimiento, cuando la precipitación llega al mínimo y la temperatura alcanza su máximo, la tasa de crecimiento tiene su mínimo valor. Con base en estas correlaciones, se deduce que, para obtener el máximo desarrollo en las etapas tempranas, se debe hacer la siembra de las plántulas en campo a inicios del mes de abril para que los meses de mayor precipitación entre abril y noviembre permitan obtener la máxima ganancia de altura, y al mismo tiempo, dar soporte para afrontar el periodo seco entre diciembre a marzo.

Los altos volúmenes de precipitación y humedad predominantes en los Llanos Orientales de Colombia, donde, al menos ocho meses del año se dan precipitaciones por encima de 100mm mes^{-1} con picos arriba de 200mm mes^{-1} en mayo y julio (Bustamante-Lozano et al., 2013), le confieren un enorme potencial para la propagación y crecimiento de *P. quintata*. Asimismo, el uso de esta especie nativa es conveniente en iniciativas de reforestación o plantaciones (Mayoral et al., 2017).

La altura promedio al inicio de la evaluación fue de 38,07cm y al transcurrir cinco meses se alcanzó 69,43cm, es decir, una ganancia de altura de 31,36cm. En cuanto al diámetro, el promedio inicial fue de 9,98mm y al final se alcanzó 28,24mm, para tener una ganancia diametral de 18,26mm. El crecimiento en altura se comporta de manera no lineal con tasas de crecimiento que alcanzan 0,3cm/día a 20 de septiembre, que al final disminuye hasta 0,03cm/día a enero de 2016 (Tabla 2). Estos resultados presentaron valores superiores a los reportados por González & López, (2006) en la Unidad de Experimentación y Evaluación El Plantel de la Universidad Nacional Agraria, Nindirí Masaya Nicaragua, donde encontraron ganancia de altura de 31cm y ganancia de diámetro de 0.61cm en ocho meses, partiendo de una plantación de 12 meses de edad, con presencia de malezas. El mayor crecimiento es resultado de la mayor tasa de crecimiento en etapas tempranas, además, mayor disponibilidad de agua en la región Orinoquia colombiana (Bustamante-Lozano et al., 2013). Por otra parte, la reducción de la tasa de crecimiento puede ser debido al inicio de la temporada seca que se acentúa entre diciembre y enero (Bustamante-Lozano et al., 2013).

Ajuste de modelos de crecimiento de altura y diámetro. Se ajustaron modelos no lineales por el método de mínimos cuadrados no lineales generalizados a fin de subsanar la falta de igualdad de varianzas (Ritz & Streibig, 2009), resultado del aumento de la dispersión de los datos en función de la edad. Dicho aumento de la dispersión (desviación estándar) en cada medición, se debe al estrés y condiciones medioambientales más difíciles a las que se daban en vivero, que al final se acentúan con la entrada del periodo seco (Bustamante-Lozano et al., 2013), y que influye para reducir la tasa de crecimiento en diciembre y enero. Por otra parte, el modelo lineal no representa el comportamiento de mayor tasa de crecimiento en los primeros 126 días, lo que causa sobrestimación o subestimación de los valores predichos.

En la tabla 3 se presentan los parámetros de los modelos evaluados y los estadísticos de ajuste para las variables altura y diámetro en función de la edad en días (X_1) y la precipitación mensual en mm (X_2). Un alto valor de R^2 y valores bajos de AIC determinan que el modelo logístico tiene mejor ajuste al crecimiento en altura y diámetro, sin que haya fuertes

diferencias con respecto al modelo Gompertz y Bertalanffy, el modelo Lineal tiene el ajuste más bajo. Los intervalos de confianza al 95% con base al error estándar permite identificar que los parámetros de los modelos evaluados son estadísticamente diferentes de cero.

Tabla 2. Medias y desviaciones estándar de altura y diámetro

		9 ago	23 ago	6 sep	20 sep	4 oct	18 oct	1 nov	15 nov	29 nov	13 dic	13 ene
Altura (cm)	\bar{X}	38.07	41.85	45.85	50.03	53.84	56.96	60.72	64.02	66.56	68.59	69.43
	σ	5.3	6.53	7.76	8.75	9.63	10.54	11.9	12.86	13.26	13.35	13.9
	TC	--	0.27	0.29	0.3	0.27	0.22	0.27	0.24	0.18	0.15	0.03
Diámetro (mm)	\bar{X}	9.98	11.6	13.3	14.98	16.7	18.41	21.34	23.48	25.13	27.38	28.24
	σ	1.52	2.14	2.66	3.34	4.08	4.69	5.33	5.81	6.42	6.7	6.97
	TC	--	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.21	0.15	0.12	0.16	0.03

* \bar{X} : promedios, σ : desviaciones estándar, TC: Tasa de crecimiento medio diario.

Tabla 3. Modelos con los mejores ajustes entre edad y altura y sus respectivos parámetros

ALTURA						
	a	b	c	d	R ²	AIC
Lineal	23.4358 ± 7.23	0.2754 ± 0.03			0.96	54.2
Logístico	78.3228 ± 1.84	2.3499 ± 0.49	0.018 ± 0.002	0.0012 ± 0.0009	0.99	31.3
Bertalanffy	84.4262 ± 3.9	0.4014 ± 0.07	0.0113 ± 0.002	0.001 ± 0.0007	0.95	36.6
Brody	91.4738 ± 6.96	0.8494 ± 0.11	0.0077 ± 0.002	0.0007 ± 0.0005	0.92	38.9
Gompertz	82.5318 ± 3.17	1.4172 ± 0.25	0.0129 ± 0.002	0.001 ± 0.0007	0.95	35.2
DIAMETRO						
	a	b	c	d	R ²	AIC
Lineal	6.0648 ± 0.66	0.1288 ± 0.006			0.98	33.2
Logístico	35.3732 ± 2.52	5.5827 ± 1.26	0.0173 ± 0.0017	0.0012 ± 0.001	0.99	21.8
Bertalanffy	55.0209 ± 14.6	0.581 ± 0.06	0.0059 ± 0.0017	0.0005 ± 0.0005	0.98	27.9
Brody	79.0359 ± 94.07	0.9721 ± 0.05	0.0021 ± 0.003	0.0002 ± 0.0004	0.71	37.5
Gompertz	46.7604 ± 7.2	2.3711 ± 0.27	0.0087 ± 0.0015	0.0008 ± 0.0005	0.99	22.7

* a, b, c y d: parámetros de los modelos; R²: coeficiente de determinación; AIC: Criterio de información de Akaike.

En los modelos ajustados para estimar edad-altura y edad-diámetro se cumplen los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia, es decir, se pueden utilizar para hacer estimaciones confiables bajo las restricciones consideradas en este estudio. Dichos resultados son consistentes con lo reportado por Pérez Cordero & Kanninen (2002) quienes encontraron relación no lineal exponencial entre el diámetro a la altura del pecho y los diferentes componentes de la biomasa aérea. No obstante, se utiliza otro modelo debido a las diferencias en la edad de las plantaciones.

Conclusiones

En la fase inicial la tasa de crecimiento medio diario de *P. quinata* no es afectado de manera significativa por el uso anterior del suelo en ganadería o cultivo de arroz. Se mantienen estadísticamente iguales las tendencias de crecimiento no lineal, con fuerte dependencia de la precipitación y temperatura. El modelo que mejor representa el crecimiento de *P. quinata* es el logístico y permite obtener estimaciones de la ganancia de altura o diámetro en función de la edad en días y la precipitación en mm.

Agradecimientos: los autores expresan agradecimiento al ingeniero Jordly Heiber Roa Ávila y su familia quienes aportaron con el espacio para el vivero y parcelas experimentales, y, además, participaron activamente en el establecimiento y manejo de las plántulas.

Conflictos de intereses: Los autores participaron en el establecimiento del experimento, preparación y revisión del manuscrito; quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Referencias

- Arnhold, E. (2017). *easynls: Easy Nonlinear Model*. <https://cran.r-project.org/package=easynls>
- Bustamante-Lozano, Á. M., Páez-Martínez, A., Espitia-Barrera, J. E., & Cárdenas-Castro, E. (2013). Análisis de datos meteorológicos para identificar y definir el clima en Yopal, Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria*, 25, 85–92. <https://doi.org/10.19052/mv.2301>
- Castellanos, M., & Stevenson, P. (2011). Phenology, seed dispersal and difficulties in natural recruitment of the canopy tree *Pachira quinata* (Malvaceae). *Revista de Biología Tropical*, 59(2), 921–933. <https://doi.org/10.15517/rbt.v0i0.3150>
- CATIE. (1991). *Pochote (Bombacopsis quinatum (Jacq.) Dugand). Especie de árbol de uso múltiple en América central; , Colección Guías silviculturales no. 13. Serie Técnica- Informe Técnico No. 172* (1st ed.). CATIE - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Celis, G., & Jose, S. (2011). Restoring abandoned pasture land with native tree species in Costa Rica: Effects of exotic grass competition and light. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1598–1604. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.005>
- Cordero, J., Boshier, D., Barrance, A., de Investigación y Enseñanza, C. A. T., Institute, O. F., & Programme, G. Britain. F. R. (2003). *Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Cordero, J., & Doshier, D. (2003). *Bombacopsis quinata: un árbol maderable para reforestar*. University of Oxford, Oxford Forestry Institute.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118625590>

- Drewry, J. J., Cameron, K. C., & Buchan, G. D. (2008). Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. *Soil Research*, 46(3), 237. <https://doi.org/10.1071/SR07125>
- Durbin, J., & Watson, G. S. (1951). Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. II. *Biometrika*, 38(1/2), 159. <https://doi.org/10.2307/2332325>
- FAO. (2013). *Livestock and Landscapes* (p. 4). FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. Subdirección de Información Ganadera y de Análisis y política del sector. Dirección de producción y sanidad animal.
- FAO. (2019). *El estado de la biodiversidad para la alimentación y la agricultura en el mundo*. FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura, Comisión de recursos genéticos para la alimentación y la agricultura.
- Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., Romero, B. E., Husak, G. J., Michaelsen, J. C., & Verdin, A. P. (2014). *A quasi-global precipitation time series for drought monitoring*. <https://doi.org/10.3133/ds832>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gallant, A. R. (1987). *Nonlinear Statistical Models*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470316719>
- González, E., & López, A. (2006). *Estudio del crecimiento y sobrevivencia de cinco especies forestales en la finca El Plantel*. Universidad Nacional Agraria, Nicaragua.
- Hall, J. S., Love, B. E., Garen, E. J., Slusser, J. L., Saltonstall, K., Mathias, S., van Breugel, M., Ibarra, D., Bork, E. W., Spaner, D., Wishnie, M. H., & Ashton, M. S. (2011). Tree plantations on farms: Evaluating growth and potential for success. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1675–1683. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.042>
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Hernández-González, O., Vergara-Yoisura, S., & Larqué-Saavedra, A. (2014). Primeras etapas de crecimiento de *Brosimum alicastrum* Sw. en Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(27), 38–48.
- ICA. (2017). *Censo pecuario nacional - 2017*. ICA - Instituto Colombiano Agropecuario.
- IGAC. (2011). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: Departamento de Casanare; escala 1:100 000*. IGAC - Instituto Geografico Agustin Codazzi.
- Khamis, A., Ismail, Z., Haron, K., & Mohammed, A. T. (2005). Nonlinear Growth Models for Modeling Oil Palm Yield Growth. *Journal of Mathematics and Statistics*, 1(3), 225–232. <https://doi.org/10.3844/jmssp.2005.225.232>
- Lawal, B. (2014). *Applied Statistical Methods in Agriculture, Health and Life Sciences* (Issue c). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05555-8>
- Mahanta, D., & Borah, M. (2017). A Comparative Study of Nonlinear Growth Models on Teak (*Tectona grandis* L.) in India. *Plant Science & Research*, 4(1), 11–21.
- Mayoral, C., van Breugel, M., Cerezo, A., & Hall, J. S. (2017). Survival and growth of five Neotropical timber species in monocultures and mixtures. *Forest Ecology and Management*, 403, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.002>
- Montagnini, F., Eibl, B., Grance, L., Maiocco, D., & Nozzi, D. (1997). Enrichment planting in overexploited subtropical forests of the Paranaense region of Misiones, Argentina.

- Forest Ecology and Management*, 99(1–2), 237–246. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00209-0)
- Montero, F., Valdez, J., De los Santos, H., Cetina, V., & Sánchez, L. (2011). Crecimiento inicial de especies arbóreas multipropósito en un terreno ganadero del norte de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(3), 53–68.
- Morales, L., & Varón, T. (2006). *Arboles ornamentales en el Valle de Aburrá* (1st ed.). Area Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Oliva, M., Vacalla, F., Pérez, D., & Tucto, A. (2014). *Manual vivero forestal para la producción de plántones de especies forestales nativas: Experiencia en Molinopampa, Amazonas, Perú*. ITTO - International Timber Tropical Organization.
- Pérez Cordero, L. D., & Kanninen, M. (2002). Wood specific gravity and aboveground biomass of *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 165(1–3), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00627-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00627-2)
- Pérez Cordero, L. D., Kanninen, M., & Ugalde Arias, L. A. (2003). Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 174(1–3), 345–352. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00060-9)
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles* (1st ed.). CIRAD - FAO.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., & R Core Team. (2019). *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*.
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> <https://www.r-project.org/>
- Ribeiro, T. D., Mattos, R. W. P. de, Morais, A. R. de, & Muniz, J. A. (2018). Description of the growth of pequi fruits by nonlinear models. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 40(4). <https://doi.org/10.1590/0100-29452018949>
- Ritz, C., & Streibig, J. C. (2009). Nonlinear Regression with R. In *Media*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09616-2>
- Roncallo, B., Murillo, J., Bonilla, R., & Barros, J. (2012). Evolución de las propiedades del suelo en un arreglo agrosilvopastoril basado en Ceiba rojo (*Pachira quinata* (Jack.)W.S. Alverson). *Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 13(2), 167–178.
- Rymer, P. D., Sandiford, M., Harris, S. A., Billingham, M. R., & Boshier, D. H. (2015). Remnant *Pachira quinata* pasture trees have greater opportunities to self and suffer reduced reproductive success due to inbreeding depression. *Heredity*, 115(2), 115–124. <https://doi.org/10.1038/hdy.2013.73>
- Silva, A., de Brito, J., & Gaspar, P. L. (2016). *Methodologies for Service Life Prediction of Buildings*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33290-1>
- Thornley, J., & France, J. (2006). *Mathematical Models in Agriculture. Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences* (2nd ed.). CABI Publishing Series.
- Universidad EIA. (2020). *Catálogo Virtual de flora del Valle de Aburrá; Pachira quinata*. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/209>
- Wishnie, M. H., Dent, D. H., Mariscal, E., Deago, J., Cedeño, N., Ibarra, D., Condit, R., & Ashton, P. M. S. (2007). Initial performance and reforestation potential of 24 tropical tree species planted across a precipitation gradient in the Republic of Panama. *Forest Ecology and Management*, 243(1), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.001>