

ARTICULO CIENTÍFICO

Análisis dendrocronológico de los patrones de crecimiento de *Tectona grandis* (L. f.) en una plantación forestal en Santa Cruz, Bolivia

Mónica Vicente ¹ y Alex Saca ²

¹Instituto de Investigaciones Forestales, Carrera de Ingeniería Forestal, Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Campus Universitario El Vallecito, Av. C. Redentor Km 8, Santa Cruz, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-1610-984X>. Email: monicavicente@uagrm.edu.bo

²Carrera de Ingeniería Forestal, Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Campus Universitario El Vallecito, Av. C. Redentor Km 8, Santa Cruz, Bolivia. Email: alexhyltonsacachallgua@gmail.com

RESUMEN

Las plantaciones de *Tectona grandis* son una alternativa forestal de alto valor económico por la demanda en el mercado, en consecuencia, es importante identificar el ritmo de crecimiento en las plantaciones en Bolivia. Este estudio tiene como objetivo analizar los patrones de crecimiento de una plantación de Teca de 14 años en el municipio de Porongo, Santa Cruz, Bolivia, mediante técnicas dendrocronológicas. Se recolectaron 20 rodajas de árboles en una plantación de 32 ha. Los anillos de crecimiento fueron fechados, medidos y estandarizados con el uso de Cofecha y Arstan. Se identificaron las características anatómicas según criterios de la asociación de anatomistas de la madera (IAWA) y se evaluaron modelos de crecimiento en función del incremento diamétrico anual. Se observó que los anillos de crecimiento presentaron porosidad semicircular y en algunas muestras porosidad difusa, con presencia de anillos falsos y médula excéntrica. La cronología interseries reportó una correlación de 0,496, sensibilidad media de 0,414 y una Señal Expresada Poblacional (EPS) de 0,91. El incremento medio anual en diámetro fue de 1,25 cm/año, siendo más pronunciado el crecimiento en los primeros años y los modelos Gompertz y Logístico presentaron el mejor ajuste (CME = 7,15). Finalmente, *T. grandis* en el municipio de Porongo, Santa Cruz presenta un crecimiento inicial acelerado seguido de una disminución progresiva, con patrones anatómicos variables y cierta excentricidad de médula. Estos resultados permiten concluir que la dinámica de crecimiento ha sido menor con relación a otros estudios que muestran tasas de crecimiento superiores y asimismo se resalta la necesidad de aplicar prácticas silviculturales (raleos, control de densidad) para mejorar el crecimiento de los árboles.

Palabras clave: Anillos falsos, incremento diamétrico, médula excéntrica, modelos de crecimiento, prácticas silviculturales

Dendrochronological analysis of growth patterns of *Tectona grandis* (L. f.) in a forest plantation in Santa Cruz, Bolivia

ABSTRACT

Tectona grandis plantations are an economic high-value forestry alternative due to market demand; consequently, identifying the growth rate of plantations in Bolivia is important. This study aims to analyze the growth patterns of the twenty-three-year-old teak plantation in the municipality of Porongo, Santa Cruz, Bolivia, using dendrochronological techniques. Twenty-three discs were collected from a 32-ha plantation. The growth rings were dated, measured, and standardized using Cofecha and Arstan. Anatomical characteristics were identified according to the criteria of the International Association of

Wood Anatomists (IAWA), and growth models were evaluated based on annual diametric increment. It was observed that the growth rings exhibited semi-ring porosity and, in some samples, diffuse porosity, with the presence of false rings and eccentric pith. The interseries chronology reported a correlation of 0.496, a mean sensitivity of 0.414, and an Expressed Population Signal (EPS) of 0.91. The mean annual diameter increment was 1.25 cm/year, with growth being more pronounced in the early years. The Gompertz and Logistic models showed the best fit (MSE = 7.15). Finally, *T. grandis* in the municipality of Porongo, Santa Cruz, exhibits accelerated initial growth followed by a progressive decline, with variable anatomical patterns and some pith eccentricity. These results allow us to conclude that the growth dynamics have been slower compared to other studies showing higher growth rates. Furthermore, the need to apply silvicultural practices (thinning, density control) to improve tree growth is highlighted.

Keywords: False rings, diameter increment, eccentric pith, growth models, silvicultural practices

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales han adquirido una importancia creciente a nivel mundial. Mientras que la superficie forestal global se reduce cada año, el establecimiento de plantaciones forestales se ha incrementado en las últimas décadas (Otazua y Paquette, 2018). Una plantación forestal se define como un ecosistema boscoso establecido por medio de la instalación en el terreno de plántulas, semillas o ambos, en el proceso de forestación o reforestación (Carnus *et al.*, 2006) y desempeñan un papel importante en la reducción del calentamiento global, por el potencial para la captura de carbono (Altamirano-Fernández *et al.*, 2022) y se constituyen en importantes emprendimientos industriales por la creciente demanda global de la madera y sus derivados (Pinto *et al.*, 2007).

En promedio desde 1990, se han establecido cerca de 4 millones ha de plantaciones cada año, lo que representan el 3 % de los bosques del mundo y con una superficie aproximada de 131 millones de hectáreas (FAO, 2020) y entre las especies más utilizadas destaca la Teca (*Tectona grandis*), considerada una de las maderas duras tropicales más valiosas de importancia económica para muchos países a nivel mundial, muy conocida en el mercado con alta demanda en el sector de construcción naval y el mobiliario de lujo (Hitsuma *et al.*, 2021; Macias Ortega, 2022).

En Bolivia, un estudio realizado en Santa Cruz por Sandoval (2008), señaló que en términos de abundancia las especies predominantes son: *Schizolobium parhyba* (49%), *Tectona grandis* (36%), *Melia azederach* var. *gigantea*, *Swietenia macrophylla*, *Eucalyptus* spp, *Pinus* spp, *Hevea brasiliensis* y *Cupressus macrocarpa*. Este dato evidencia la importancia que tiene la Teca y que es considerada en el país como especie de plantación de alto valor económico.

El aumento de la demanda mundial de madera de Teca ha provocado un desequilibrio respecto a la oferta disponible (Thulasidas y Baillères, 2017). La disminución del suministro sostenible procedente de bosques naturales junto con el incremento constante de la demanda, ha impulsado la producción y utilización de Teca de plantaciones (Pandey y Brown, 2000). No obstante, la productividad está delimitada por factores ecológicos y geográficos, como el clima, la topografía, los suelos y la vegetación circundante (Kindermann, 2018). En este sentido, comprender los patrones de crecimiento que tiene la especie bajo condiciones locales resulta esencial para garantizar un manejo sostenible.

Una de las herramientas más precisas para cuantificar el crecimiento anual de las especies es la dendrocronología. El análisis de los anillos de crecimiento, brinda información del crecimiento secundario para múltiples aplicaciones (Worbes, 1992), lo que ha generado un creciente interés, a fin de extraer información necesaria para estudios forestales, ecológicos y climáticos (Lisi *et al.*, 2008). A pesar de su potencial, en Bolivia los estudios dendrocronológicos en *Tectona grandis* son escasos, lo que limita el conocimiento de su dinámica de crecimiento.

En este contexto el presente estudio tiene como objetivo analizar los patrones de crecimiento de *Tectona grandis* proveniente de plantaciones forestales del municipio de Porongo, Santa Cruz (Bolivia), mediante técnicas dendrocronológicas.

MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el Departamento de Santa Cruz, en la Provincia Andrés Ibáñez en el municipio de Porongo, ubicado a una distancia de 18 km al oeste de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, cruzando el río Piraí ($17^{\circ}46'51.8''\text{S}$ $63^{\circ}22'31.6''\text{W}$) por la carretera a Porongo (Figura 1). El área de estudio es de 32 ha en una plantación establecida como un emprendimiento particular privado.

El Municipio de Porongo tiene en promedio una temperatura media anual de $25,7^{\circ}\text{C}$, presentando una temperatura máxima promedio anual de 34°C y una temperatura mínima promedio anual de $17,5^{\circ}\text{C}$, según los datos meteorológicos de la estación más cercana a la zona de estudio (Figura 2), existen dos períodos bien diferenciados, conocidos como época de lluvias y época seca. El período de lluvias se inicia entre los meses de octubre y noviembre terminando generalmente en el mes de abril. En esta época, se alcanza el 80,9% de la precipitación anual y se desarrolla la campaña agrícola a secano. En cambio, la época seca comienza en el mes de mayo donde la precipitación desciende paulatinamente y termina en septiembre, presentándose en los meses de julio y agosto la caída de los menores volúmenes de agua.

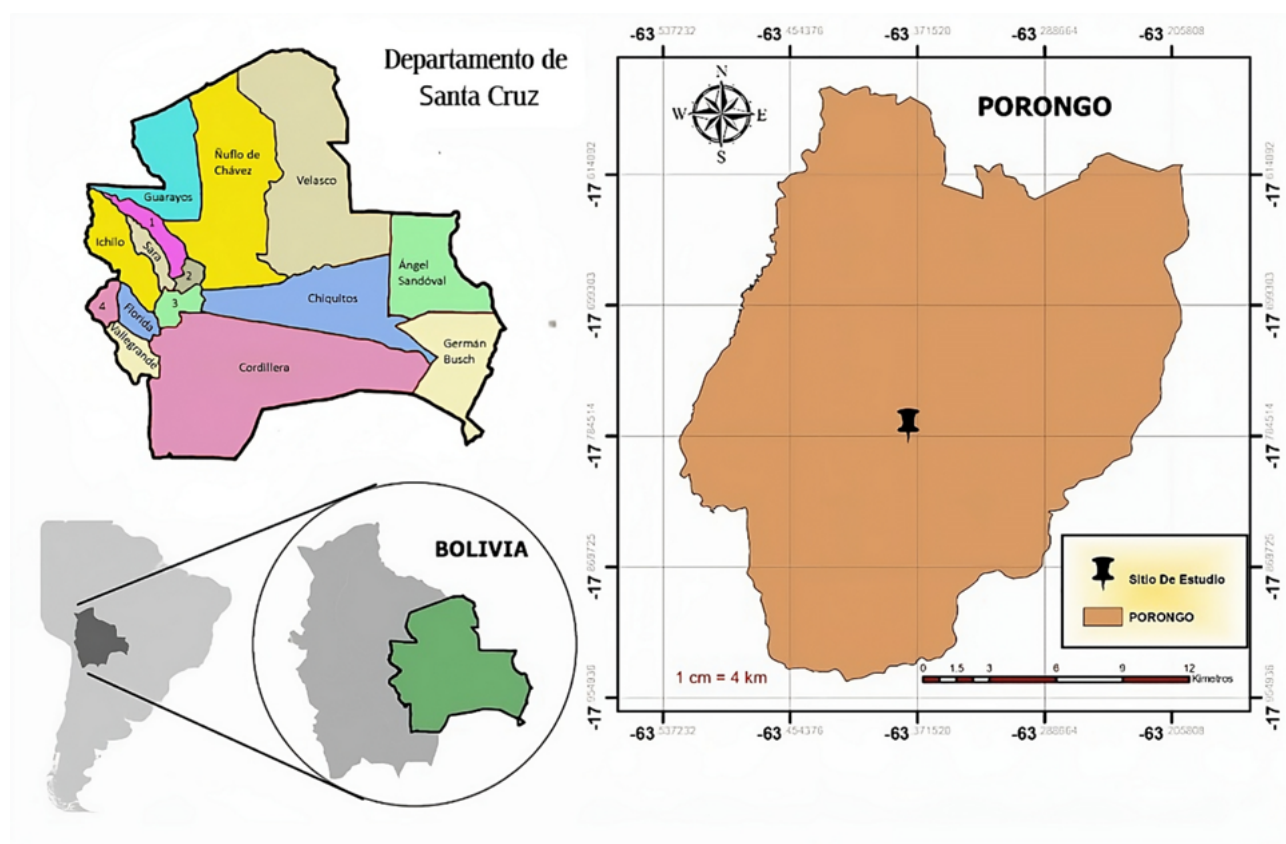


Figura 1. Localización del área de estudio en el municipio de Porongo, en el Departamento Santa Cruz

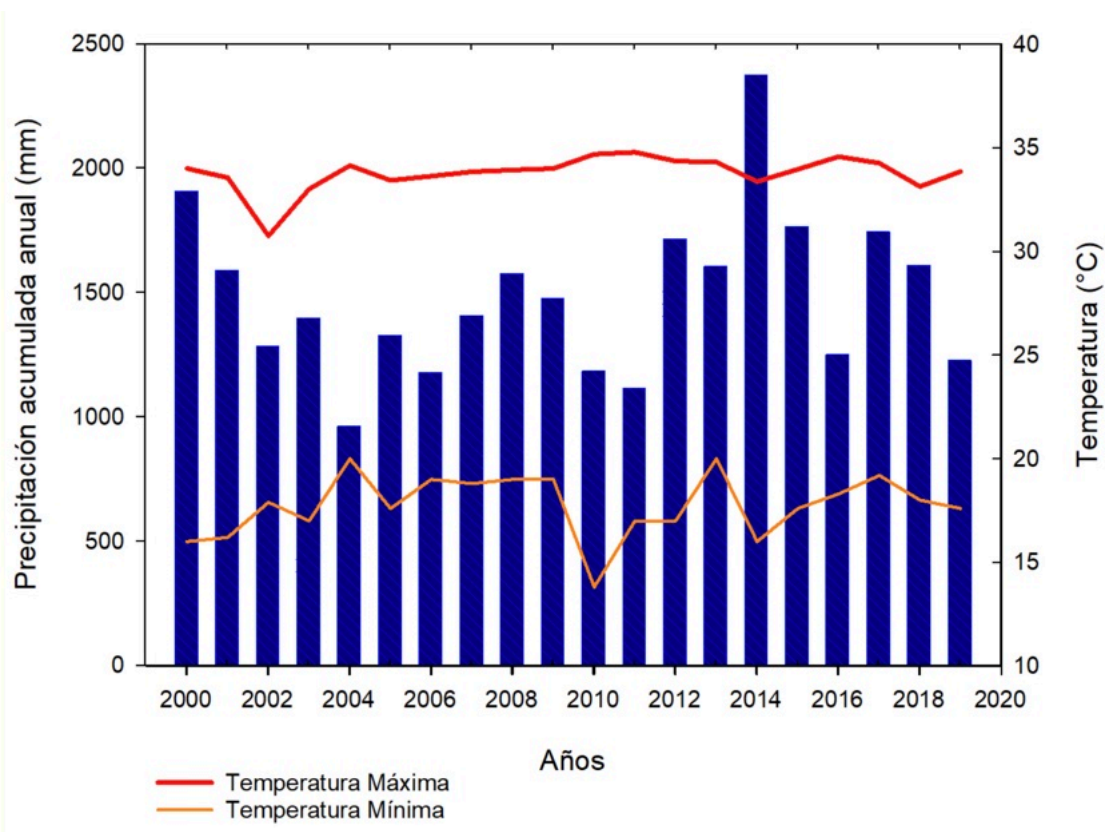


Figura 2. Climadiagrama para el periodo 2000-2020 de la zona de estudio, donde incluye la precipitación acumulada anual y la temperatura máxima y mínima

Los suelos del municipio de Porongo, según el Plan del uso del suelo del Departamento de Santa Cruz y del municipio de Porongo; son franco arenosos, textura variable, frágiles por las constantes precipitaciones, con moderado contenido de materia orgánica lo que da lugar a la baja fertilidad y varían de neutros a fuertemente ácidos con pendiente que varían de suave a escarpada y tienen un alto riesgo de erosión eólica e hídrica, con relieve accidentado y alta presión vecina (CORDECRUZ 1994). El muestreo se ha efectuado en una zona con ondulaciones, donde estaba establecida una plantación de 14 años de *Tectona grandis* (Figura 3).

Toma y análisis de datos

Se realizó la recolección de 20 muestras de rodajas, una muestra de cada árbol, provenientes de árboles que han sido identificados en cada parcela permanente de medición y situadas en el rodal con un margen de distancia entre ellas de al menos 100 metros de distancia. Las parcelas están distribuidas uniformemente a lo largo de la plantación de 32 ha.

Las secciones transversales fueron procesadas siguiendo las técnicas convencionales empleadas en dendrocronología (Stokes y Smiley, 1968). Se realizó un pulido con lijas de granos progresivamente más finos, desde el número 60 hasta 1000 μ/mm hasta lograr visualizar una superficie con anillos de crecimiento visibles. Posteriormente se realizó la observación a nivel macroscópico de las estructuras celulares que delimitan los anillos de crecimiento, con la finalidad de discriminar los anillos verdaderos de los anillos falsos. Las características anatómicas del leño más sobresalientes asociados a la delimitación de los anillos de crecimiento fueron descriptas según la metodología de la Asociación Internacional de los Anatomistas de la Madera (IAWA 1989).



Figura 3. Rodal de *Tectona grandis* establecido en líneas en terreno con ciertas inclinaciones

El fechado visual se realizó con ayuda de una lupa binocular. Los anillos han sido fechados, desde la corteza (2021) hacia la médula, asignando a cada anillo el año calendario correspondiente al año de comienzo de formación del leño siguiendo la convención para el hemisferio sur (Schulman 1956). El ancho de los anillos de crecimiento fue medido en dirección perpendicular a los tejidos radiales desde la médula hacia la corteza con una lupa conectada a un contador digital con una precisión de 0,001 mm. Se ha realizado la medición de 38 series de 20 árboles con el TwinSap. Para el control de calidad del fechado se utilizó el programa COFECHA y las series de ancho de anillos fueron estandarizadas para eliminar las tendencias biológicas propias del crecimiento y minimizar las variaciones en el crecimiento (Holmes 1986), como consecuencia las tendencias de crecimiento (ruido) fueron excluidas de cada serie de los anillos de crecimiento mediante el ajuste de una función de remoción (spline cúbico), en la tendencia de crecimiento de los árboles de la plantación, con la curva spline 10 y una longitud de serie pre-determinada de 5 años. Finalmente se utilizó el programa Arstan para generar las cronologías y los índices de crecimiento, a fin de eliminar las tendencias de crecimiento biológico y geométrico propias del árbol (Cook *et al.*, 2007).

Para el proceso de los datos de crecimiento de la plantación se ha realizado el uso del programa de EDRM para asignar años desde el inicio, posteriormente se utilizó el programa AGE de la librería de DPL (Data Processing Library) para el análisis del crecimiento de los árboles. Para el análisis de los datos del crecimiento en base a los datos del ancho de los anillos de crecimiento se ha utilizado el programa INFOSAT para realizar el análisis de los diferentes modelos matemáticos de ajuste al crecimiento de los árboles de la plantación.

Para relacionar el desarrollo del diámetro del árbol promedio en función de la edad de la plantación, se han considerado modelos matemáticos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos matemáticos utilizados para describir las curvas de crecimiento

Modelo	Ecuación
Gompertz	$Y = \alpha e^{-\beta e^{-\gamma E}}$
Logístico	$Y = \alpha (1 + \beta e^{-\gamma E})^{-1}$
Monomolecular	$Y = \alpha (1 - \beta e^{-\gamma E})$
Richards	$Y = \alpha (1 - \beta e^{-\gamma E})^m$
Exponencial	$Y = \alpha e^{-\beta/E}$

Durante la evaluación de los modelos, se seleccionaron ecuaciones con los criterios del mínimo Cuadrado Medio del Error, y parámetros significativamente diferentes de cero ($p < 0,01$). Se ajustaron ecuaciones para representar el aumento en diámetro, en función de la edad. Los datos resultantes fueron sometidos a un análisis estadístico.

RESULTADOS

Características anatómicas

El leño de *T. grandis* presenta un contraste notable de colores diferentes al interior del xilema entre albura y duramen (Figura 4a). El duramen presenta colores de tonos marrón y la albura un color más claro. Los anillos de crecimiento se distinguen a simple vista en la mayoría de las muestras, sin embargo, se puede apreciar anillos irregulares y la excentricidad de la médula. El límite de los anillos de crecimiento está definido por la presencia de la porosidad semicircular, aunque en algunas muestras se observó una porosidad con tendencia difusa.

Continuando con las características anatómicas del leño, se encuentra una diferencia del tamaño de los poros al inicio de los anillos del crecimiento. En el leño temprano se observa un diámetro mayor con diferenciaciones a simple vista. Por otro lado, se ha observado la presencia de anillos incompletos o falsos anillos en algunas secciones acompañadas de coloraciones claras que pueden generar una confusión visual y ser contabilizados como anillos (Figura 4b).

En diversas muestras del material leñoso, se ha constatado la presencia de excentricidad en la médula, acompañada simultáneamente por irregularidades en la forma de las rodajas durante su proceso de crecimiento (Figura 5). Este fenómeno sugiere que el desarrollo de los individuos no sigue un patrón uniforme, manifestándose en variaciones notables en la posición de la médula en relación con la sección transversal. Además, la falta de regularidad en la forma de las rodajas, indica posibles influencias externas o internas que han afectado el proceso de crecimiento.

Cronología

La cronología generada de la plantación tiene 14 años según el conteo de los anillos de crecimiento identificados en las muestras, los datos fueron analizados con Cofecha, presentando una correlación interseries de 0,496 y una sensibilidad media de 0,414 y una desviación estándar de 0,425.

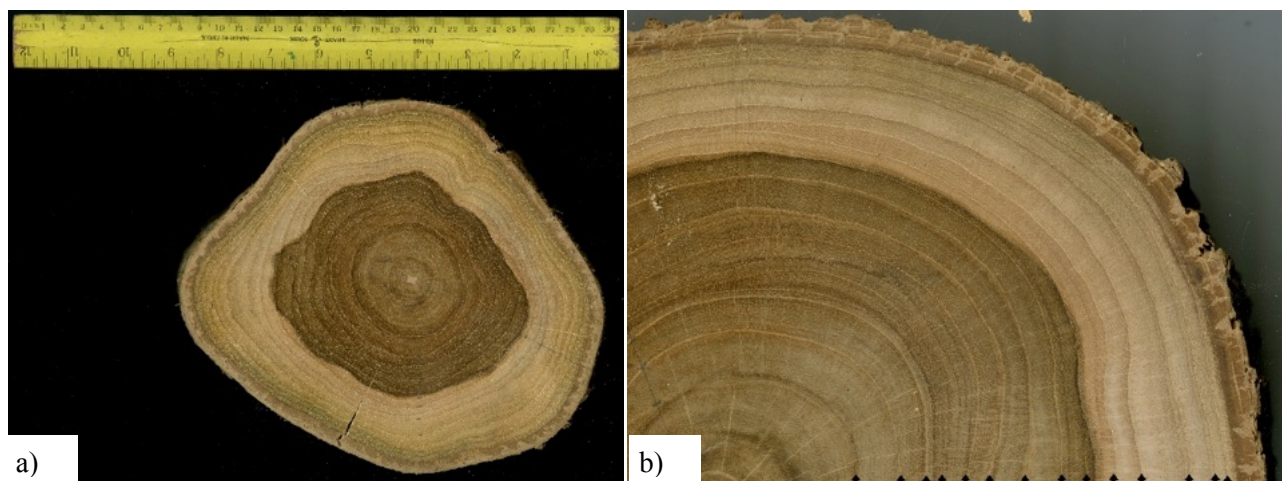


Figura 4. Material leñoso acondicionado de *Tectona grandis*. a) Tamaño relativo de las rodajas muestras, b) La identificación de los anillos de crecimiento con las flechas negras en la parte inferior.

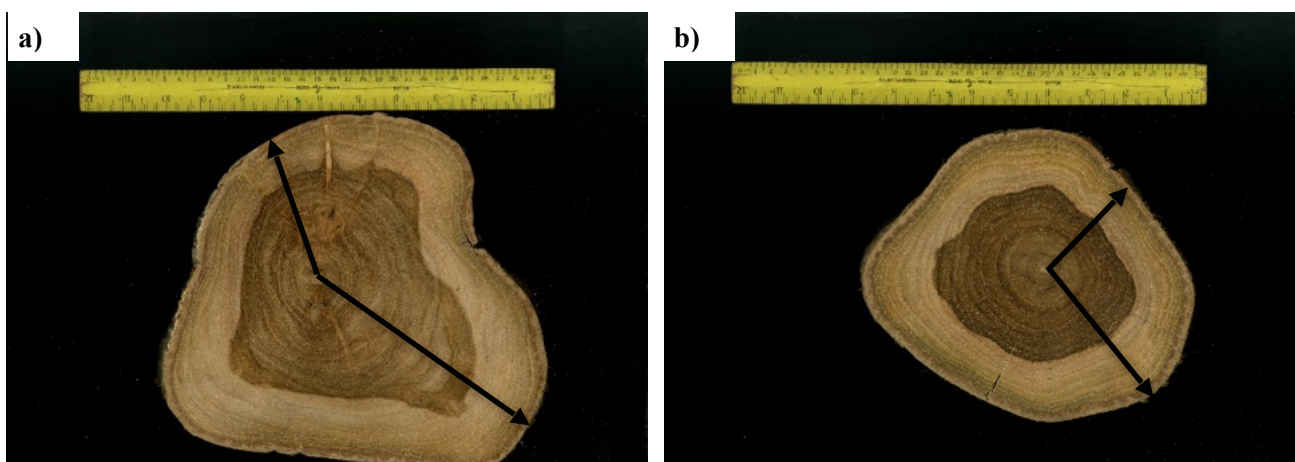


Figura 5. La excentricidad de la médula central en las muestras leñosas de Teca. a) Se puede observar una ligera inclinación de la médula y además la forma irregular de la rodaja, b) La muestra es de menor tamaño de crecimiento y también se observa la médula excéntrica.

La cronología fue generada en base a una ventana comparativa de 4 años y un traslape a 2 años, como la cronología fue de 14 años, se observó la tendencia comparativa de los anillos en función del tiempo con la media 1, se han identificado anillos delgados en los 4 primeros años del crecimiento de los árboles (Figura 6). Los índices de anillos permiten realizar comparaciones eliminando las tendencias de crecimiento geométrica y las tendencias de variabilidad por la edad del árbol. La cronología ha presentado un EPS de 0,91 que indica buena señal poblacional captada en las series y un Rbar de 0,25 probablemente debido a la asimetría de los anillos de crecimiento.

Incremento diamétrico

Las mediciones realizadas de las diferentes muestras indican que el crecimiento de la *T. grandis* ha sido relativamente bajo (Figura 7). La plantación de Teca tiene 14 años y cuenta con un incremento diamétrico medio por año de 1,25 cm/año, sin embargo, cabe resaltar que los primeros años son los que muestran con mayor crecimiento en las muestras analizadas.

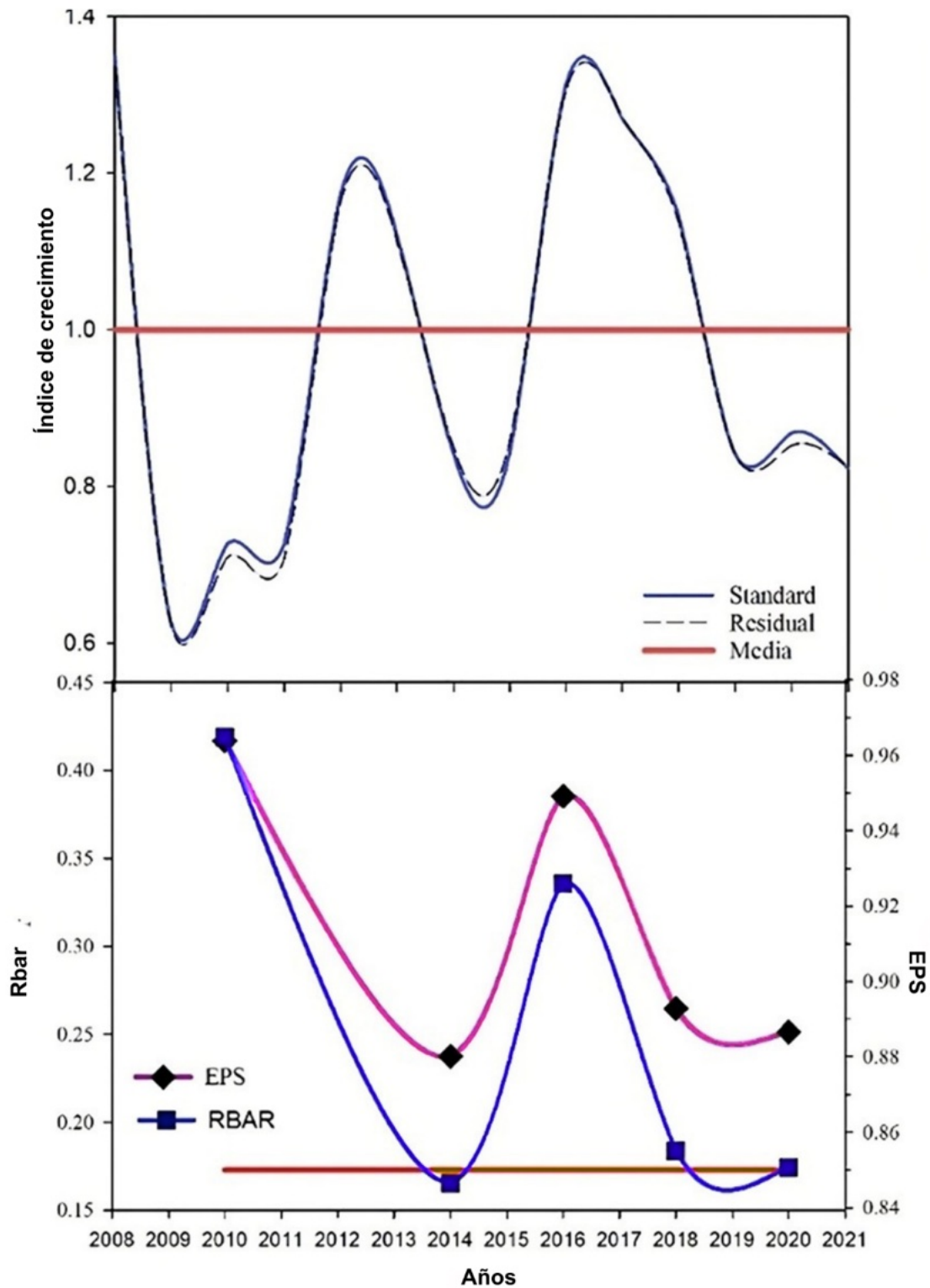


Figura 6 a) El índice de crecimiento de la cronología generada con la comparación de la media, con la estandarización, b) EPS y Rbar con la línea de referencia EPS 0,85

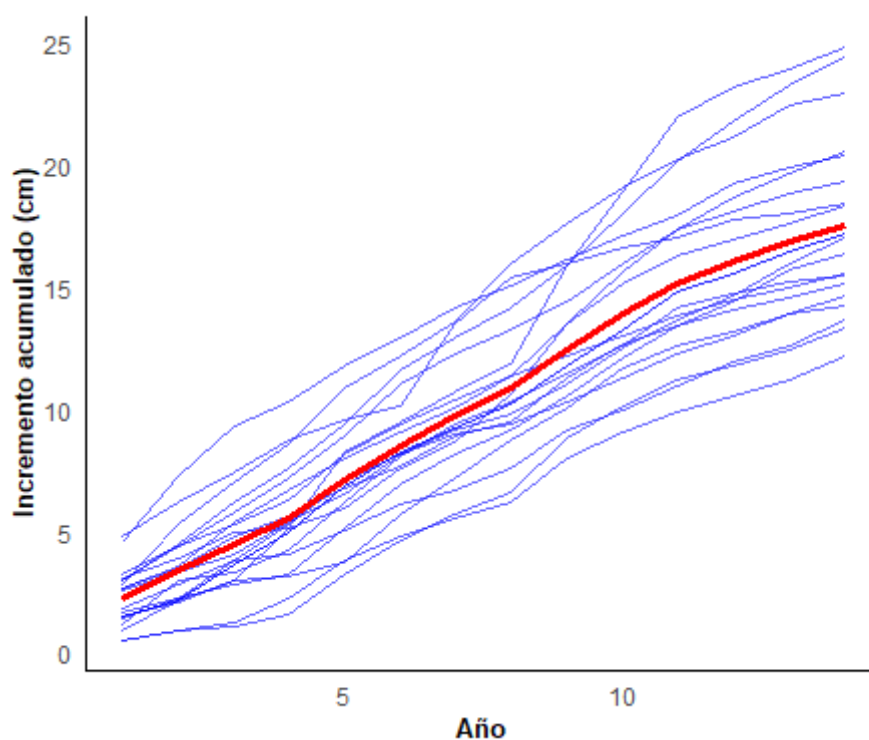


Figura 7. Tendencia del crecimiento de las mediciones con respecto a la edad del rodal de *T. grandis*. La línea roja indica la media de las mediciones y cada línea gris indica la medición de una muestra.

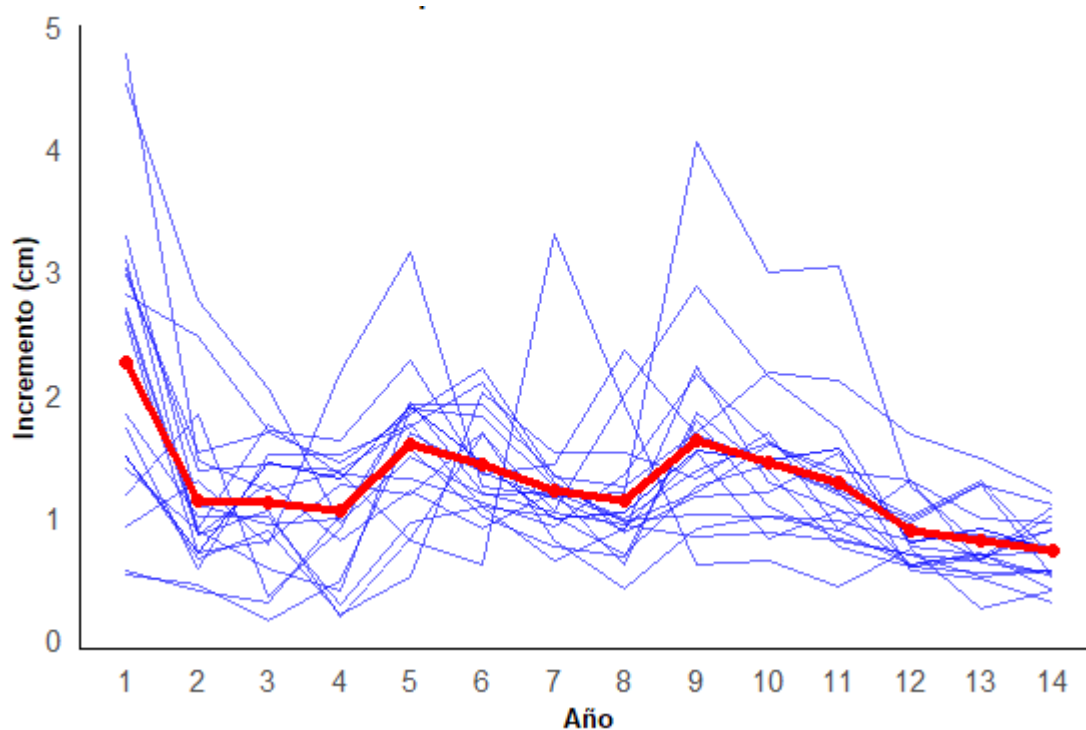


Figura 8. El incremento anual de las muestras (color gris) y el incremento de cada año promedio (línea roja)

El incremento medio por cada año del diámetro de la especie refleja los valores ajustados con la función spline de 10 (Figura 8), según el incremento acumulado con respecto a los años (Cuadro 2) se observa que el diámetro de los árboles ha sido mayor el primer año y la gran cantidad de árboles se encuentran concentrados en diámetros mayores a 15cm y menores a 17 cm según los 14 años que presenta el rodal establecido. Es importante considerar que las mediciones han sido tomadas en base a las series con mayor uniformidad ya que muchas de las muestras presentaban medula excéntrica y con eso mayor variabilidad en el ancho de los anillos con algunos sectores de anillos comprimidos.

Cuadro 2. Incremento anual medio y ajustado, con el incremento diamétrico anual acumulado en función de los años.

Año	Incremento medio anual	Incremento anual ajustado	Incremento acumulado
1	2,20184	1,579732	2,20184
2	1,08084	1,529896	3,28268
3	1,09078	1,480874	4,37348
4	1,06378	1,432936	5,43726
5	1,605	1,385766	7,04226
6	1,43078	1,338638	8,47306
7	1,22778	1,290976	9,70084
8	1,13226	1,242334	10,8331
9	1,6429	1,192196	12,476
10	1,46948	1,140034	13,94548
11	1,28542	1,085824	15,2309
12	0,86348	1,030028	16,09436
13	0,81242	0,973344	16,90678
14	0,7121	0,916316	17,6189

Los anillos de crecimiento presentan mayor tamaño primeros años del desarrollo de cada árbol y posteriormente se ven más reducidos, van reduciendo de tamaño, la tendencia es descendente (Figura 9).

Modelos matemáticos del crecimiento de *Tectona grandis*

Se han seleccionado los modelos matemáticos que ofrecen el ajuste más preciso al patrón de crecimiento de la especie. En particular, al considerar la variable medida "Diámetro", se puede apreciar en el Cuadro 2 que el modelo matemático más idóneo es aquel que exhibe el menor Cuadrado Medio del Error (CME), destacándose el modelo de Gompertz y el modelo Logístico, ambos con un CME de 7,15. Por otro lado, se observa que el modelo Exponencial exhibe un CME más amplio, con un valor de 8,67 indicando que su ajuste al crecimiento de la especie es menos preciso en comparación con los modelos mencionados anteriormente.

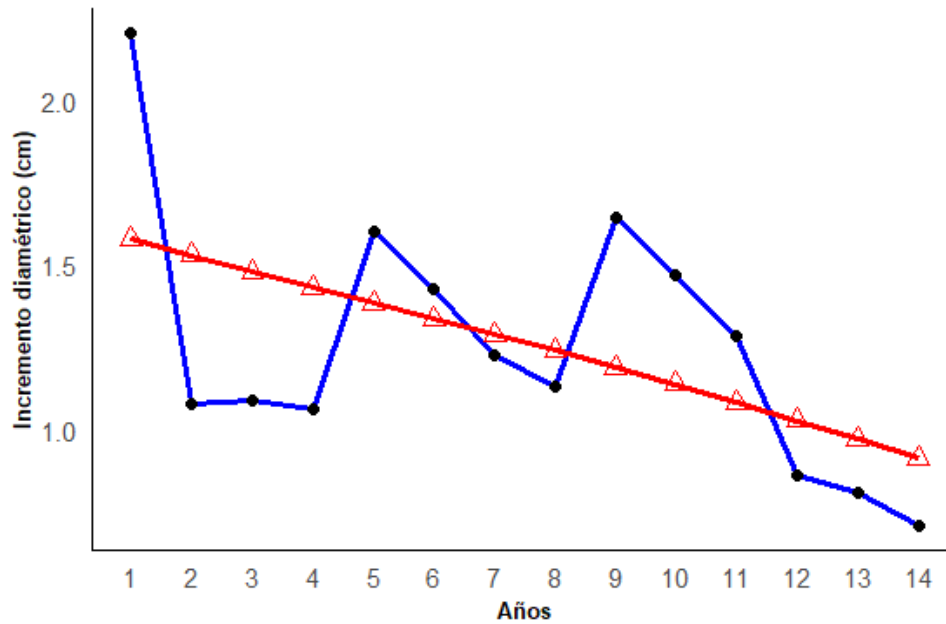


Figura 9. Incremento radial real (línea azul) y crecimiento radial ajustado (línea roja) estimados mediante un modelo de crecimiento en función de la edad del rodal.

En el ajuste de los modelos matemáticos, las medidas clásicas para la selección del mismo fueron el CMError y la σ^2 , resultando en menor importancia que las medidas de selección AIC y BIC, que son una medida de la calidad relativa de un modelo y de acuerdo a los criterios utilizados para evaluar la bondad de ajuste, el modelo adecuado fue el Logístico y Gompertz, por presentar los menores valores de AIC y BIC. En estos criterios, el modelo de menor valor es el más apropiado.

Cuadro 3. Cuadrado Medio del Error de los Modelos Matemáticos. SIGMA: Desviación Estándar AIC: Criterio de Índice de Akaike BIC: Criterio de Índice de Bayesiano

Variable	CME error	Sigma	AIC	BIC
Modelo Monomolecular				
Diámetro	7,21	2,69	1352,84	1367,38
Modelo Logístico				
Diámetro	7,15	2,67	1350,27	1364,81
Modelo Gompertz o Cuadrado				
Diámetro	7,15	2,67	1350,27	1364,81
Modelo Exponencial				
Diámetro	8,67	2,95	1403,48	1414,39
Modelo Richard				
Diámetro	7,18	2,68	1352,38	1370,56

Cuadro 4. Parámetros estimados de los modelos de crecimiento radial, basado en mediciones del diámetro ($n = 298$; $P < 0,001$). Los valores entre paréntesis indican el error estándar.

Modelo	α	β	γ	δ
Richards	24,45 (7,5)	-0,31 (1,59)	0,15 (0,11)	7,69 (0,17)
Monomolecular	72,47 (55,44)	0,99 (0,01)	0,02 (0,01)	
Lóístico	23,37 (2,25)	2,73 (0,15)	0,160 (0,02)	
Gompertz	23,37 (2,25)	2,73 (0,15)	0,16 (0,02)	
Exponencial	4,02 (2,21)	0,11 (0,005)	*	*

Los datos recopilados han sido ajustados a modelos de crecimiento, on los parámetros estimados en el Cuadro 3. Este ajuste revela una tendencia de crecimiento inicial acelerada de manera lineal durante los primeros 9 años del desarrollo de la especie. Este patrón se visualiza de manera elocuente en las Figuras 10c y 10d, donde se presentan los modelos matemáticos más destacados que logran adaptarse con precisión al crecimiento de *Tectona grandis*. Estas representaciones gráficas (Figura 10) ofrecen una visión detallada de la trayectoria de crecimiento, subrayando la idoneidad de los modelos seleccionados para capturar la dinámica del desarrollo de la especie a lo largo del tiempo.

DISCUSIÓN

La madera de *Tectona grandis* es de amplio uso y con un gran mercado a nivel internacional, debido a su gran durabilidad, belleza, buenas propiedades de trabajabilidad y excelentes propiedades físicas y mecánicas (Bhat *et al.*, 2001). En este estudio se ha observado un gran contraste de colores diferentes al interior del xilema entre albura y duramen, Segura *et al.* (2020), explica que la Teca presenta albura de color amarillo cremoso, duramen de color marrón con vetas oscuras, con cambio abrupto entre albura y duramen, con anillos de crecimiento claramente diferenciados, limitados por bandas oscuras de forma irregular. Por otro lado, Moya-Roque *et al.* (2010), señala que existe una diferenciación entre albura y duramen, presente y de forma abrupta, en la condición seca la albura de color amarillo pálido, el duramen presenta mayor variación del color desde amarillo pálido hasta marrón verde oliva ligero. En este mismo sentido Moreno y Roque (2006) señalan el contraste entre albura y duramen y es claramente notorio en la madera aserrada, debido principalmente a la diferenciación en el color, la albura presenta un color blanco a amarillo pálido, mientras que el duramen es color café a castaño.

En la madera de la Teca se observa una notable la diferencia del tamaño de los poros al inicio de los anillos del crecimiento en el leño temprano se observan que tienen un diámetro mayor y se observan diferenciados a simple vista. Existe algunas diferencias entre la porosidad de los anillos de crecimiento, con bordes distinguibles y la porosidad circular, semicircular y algunas con porosidad difusa (Insidewood 2024). Por otro lado, Zuñiga Carrillo (2012), señala que la configuración anatómica del anillo presentó bandas de parénquima marginal y porosidad semicircular. Asimismo, un factor que puede influir notablemente es la precipitación. Moya-Roque *et al.* (2010), indican que los anillos son bien marcados en sitios de baja precipitación, poco definidos en sitios de alta precipitación. También se ha observado, que en individuos jóvenes en comparación con la madera de leños adultos, se caracteriza por anillos anchos, fibras cortas, diámetro pequeño, bajo porcentaje de vasos, alta pared celular, un amplio ángulo microfibrilar y propiedades mecánicas relativamente bajas o casi similares (Bhat *et al.*, 2001).

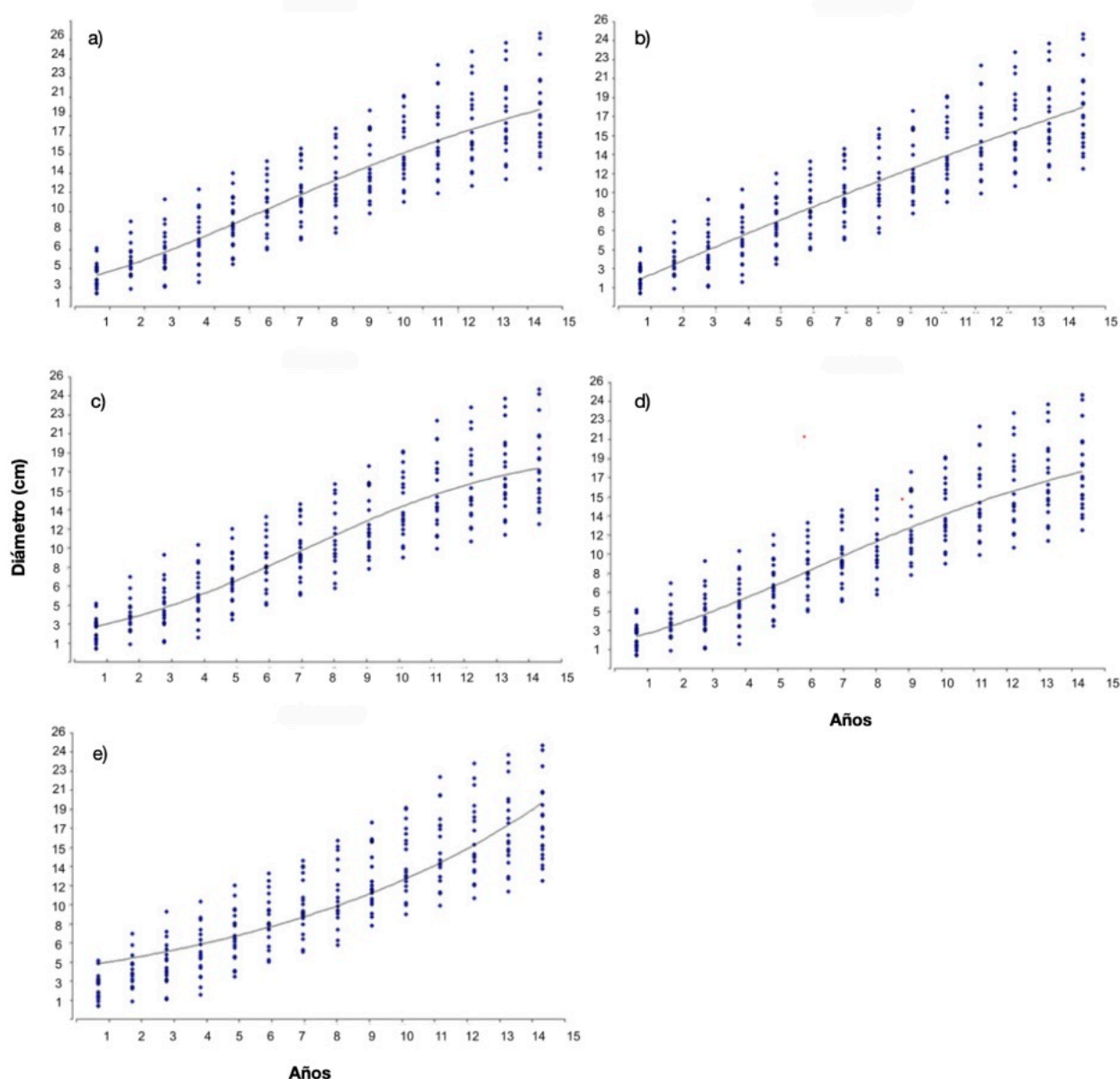


Figura 10. Curvas de crecimiento ajustadas en función del diámetro para los modelos: a) Richards; b) monomolecular; c) logístico; d) Gompertz; e) exponencial.

La Teca es una especie que se ve notablemente influenciada por el suelo, por lo que se puede observar valores de excentricidad de la médula (13% y 15%) (Akachuku y Abolarin, 1989), en este mismo sentido Rosso y Ninin (1998) indica que la excentricidad de la médula está relacionado con la pérdida de la verticalidad del fuste, considerando que la excentricidad refleja la presencia de madera de tensión (Ferreira *et al.*, 2008). En este estudio la excentricidad tuvo un papel importante para la medición de las diferentes series de cada muestra, evitando márgenes muy notables de diferencia entre series, debido a que algunos radios tenían los anillos más estrechos y en otras series los anillos más anchos. Es importante mencionar que esta condición se relaciona con diversos factores como la inclinación del terreno y efecto del viento, además de factores genéticos (Flórez *et al.*, 2014), la plantación de Teca estudiada proviene de un área con ciertos cambios en cuanto a la inclinación del terreno, observándose ondulaciones bien marcadas, lo que podría explicar la excentricidad de las médulas.

La medición de los anillos de crecimiento de la plantación de 14 años ha presentado una correlación interseries de 0,496 por su lado Zuñiga Carrillo (2012) encontró que las mediciones de árboles de una plantación de 25 años presentaron una intercorrelación de series de 0,509. En este trabajo se ha evidenciado la presencia de anillos falsos y discontinuos en las muestras, por lo que es importante entender en qué etapas se han formado y qué factores han inducido a la formación de estos anillos. Por su parte Priya y Bhat (1999), indican que la caracterización y formación de falsos anillos se debe principalmente a un déficit hídrico por disminución de precipitación pluvial.

Buras (2017), define el EPS como la potencia explicativa aproximada (r^2) al predecir la señal de la población basada en una muestra finita, reflejando como una cronología representa una población teóricamente infinita, en este sentido Briffa (1995) indica que los valores de $\text{EPS} < 0,85$ indican que la replicación en ese segmento concreto de la cronología es baja y que el número de muestras debe ser mayor para reforzar la señal común. Asimismo, Kirilyanov *et al.* (2018), señalan que no existe un estándar para el número de muestras por árbol, o de árboles por sitio, necesario para describir con precisión el patrón de crecimiento común de una población en el espacio y el tiempo. Además, se debe tener en cuenta que el crecimiento de los árboles se considera en base a la ecuación de crecimiento agregado que afectan factores climáticos, edad, factores internos del rodal y también factores externos y por último también existe un margen de error

Para la comparación del incremento medio anual diamétrico (IMA) se observa que este valor resulta relativamente bajo en relación con otros estudios (Cuadro 5). El incremento medio anual de las series muestra con mayor intensidad en la primera etapa del árbol, posteriormente baja y continua, esta variación en el crecimiento puede darse por las condiciones ambientales o por actividades silviculturales que también se ha realizado en el rodal. Estos datos pueden llegar a coincidir como una especie con crecimiento rápido en la etapa inicial, seguido de un crecimiento intermedio y finalmente una disminución progresiva, (Ramirez Silva 2017), el rendimiento es coherente con lo reportado. En el caso del uso de clones de teca (D14), los resultados muestran que a los cinco y ocho años de edad se alcanzan los mejores rendimientos, con diámetros de $14,6 \pm 1,80$ cm y $20,5 \pm 2,54$ cm respectivamente (Putro *et al.*, 2020). Por otro lado también es importante un control adecuado de la densidad en las plantaciones para mantener el crecimiento del diámetro (Pachas *et al.*, 2019), se ha observado un efecto negativo de la competencia vecinal y efecto positivo del diámetro inicial al aclareo en plantaciones de Teca (Hitsuma *et al.*, 2021).

Los modelos de regresión ajustados, para explicar las variaciones relacionadas con la edad en las propiedades de la madera juvenil, van desde ecuaciones simples y lineales hasta ecuaciones exponenciales, recíprocas y cuadráticas (Bhat *et al.*, 2001). Los simuladores de crecimiento y producción de rodales forestales son una herramienta de sencillo manejo para ser utilizada por gestores y propietarios forestales como apoyo a la toma de decisiones en el manejo forestal (Vargas-Larreta *et al.*, 2010). Zambrano *et al.* (1995) señalan que el modelo de Chapman-Richards resulta adecuado para predecir el crecimiento del área basal en plantaciones de teca, con rangos de espesura variables. El modelo ajustado permite predecir el crecimiento del área basal de la especie en las condiciones de manejo rutinarias y bajo diferentes regímenes de aclareo. Por otro lado, en este estudio En el uso de diferentes modelos matemáticos en este estudio se ha logrado evidenciar que existe un crecimiento acelerado en los primeros años de esta especie.

Cuadro 5. Comparación del incremento medio anual diamétrico (IMA) de *Tectona grandis* encontrado en este estudio con valores reportados en la literatura para plantaciones de edad similar.

Ubicación	IMA (cm/año)	Edad de los árboles	Precipitación media anual (mm)	Ecosistema	Fuente
Porongo, Bolivia	1,25	14	1600 a 1700	Seco de transición	Presente estudio
Guayas, Ecuador	2,73	1-5 años	1500 a 3000	Tropical	Verdesoto <i>et al.</i> , (2021)
Veracruz, México	2,3	1-5 años	2885	Tropical	Máximo <i>et al.</i> , (2011)
Mato Grosso, Brasil	2,11	7 años	2750	Tropical	Da Silva (2014)
Mayarí, Cuba	1,4 – 1,6	5-13 años	1250	Tropical	Batista (2017)
Llorin, Nigeria	0,84 – 1,16	5-9 años	1000 a 1500	Tropical	Okekunle y Micheal (2021)
Uyo, Nigeria	2,37	No especificado	2581	Tropical	Etigale <i>et al.</i> , (2014)
Puerto Inca, Perú	2,7 - 3,7	6	1900	Tropical	Ramírez Silva (2017)
Turrialba, Costa Rica	2,5 - 3,01	<10	1500 a 2500	Tropical	Vallejos Barra (1996)
Cuenca del Canal, Panamá	0,7	10	2000 a 2500	Húmedo tropical	Mollinedo García (2003)

CONCLUSIONES

Se han identificado caracteres anatómicos del leño de *Tectona grandis* con anillos visibles a simple vista que inician con la porosidad semicircular y en algunas muestras tiende a ser porosidad difusa, es evidente que este carácter será variable según las condiciones en las que el árbol está creciendo. También se ha evidenciado la presencia de anillos irregulares y anillos discontinuos.

El incremento del diámetro de la plantación de 14 años ha sido 1,25 cm/año, un valor relativamente menor en comparación con otros estudios. El crecimiento acelerado que se evidencia en las primeras etapas es hallazgo que ayuda a identificar que son necesarias las prácticas silviculturales y verificar la densidad para implementar raleos que podrían influir notablemente en el crecimiento de los árboles.

Finalmente es importante entender que la plantación ha tenido patrones de crecimiento relativamente bajos en los primeros años de su establecimiento y posteriormente se ha observado mayor intensidad en el crecimiento diamétrico de los árboles que se ajustan a los modelos matemáticos de Gompertz y Logístico.

AGRADECIMIENTOS

El Dr. Eduardo Sandoval apoyó con sus sugerencias y análisis de datos.

LITERATURA CITADA

- Akachuku, A. y D. Abolarin. 1989. Variations in pith eccentricity and ring width in teak (*Tectona grandis* LF). *Trees* 3: 111-116. <https://doi.org/10.1007/BF00191541>
- Altamirano-Fernández, A., A. Rojas-Palma y S. Espinoza-Meza. 2022. A mathematical model to study the dynamics of carbon capture in forest plantations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2159. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2159/1/012001>
- Batista, E. G. 2017. Evaluación del crecimiento de las plantaciones de *Tectona grandis* L. f en la Unidad Silvícola Mayarí. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 5(3): 330-339.
- Bhat, K., P. Priya y P. Rugmini. 2001. Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology* 34 (6): 517-532. <https://doi.org/10.1007/s002260000067>
- Briffa, K. R. 1995. Interpreting high-resolution proxy climate data: The example of dendroclimatology. pp. 77-94. En H. Von Storch y A. Navarra (Eds). *Analysis of climate variability, applications of statistical techniques*. Springer. Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03744-7_5
- Buras, A. 2017. A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia* 44: 130-132. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.005>
- Carnus, J.-M., J. Parrotta, E. Brockerhoff, M. Arbez, H. Jactel, A. Kremer, D. Lamb, K. O'hara y B. Walters. 2006. Planted Forests and Biodiversity. *Journal of Forestry* 104 (2): 65-77. <https://doi.org/10.1093/jof/104.2.65>
- Cook, E. R., P. J. Krusic, R. H. Holmes y K. Peters. 2007. Program ARSTAN, versión 41d, 2007. Tree-ring laboratory.
- Da Silva, F. R., Silva, V. y S. O. De Miranda. 2014. Crescimento de *Tectona grandis* em um uma plantaço no Município de Alta Floresta, Mato Grosso. *Floresta* 44 (4): 577-588. <https://doi.org/10.5380/RF.V44I4.29699>
- Etigale, E., S. Ajayi, S. Udofia, y M. Moses. 2014. Assessment of Stand Density and Growth Rate of Three Tree Species in an Arboretum within the University of Uyo, Nigeria. *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 6: 8-16. <https://www.ajol.info/index.php/jrfwe/article/view/104134>
- FAO. 2020. Evaluación de los recursos forestales mundiales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>
- Ferreira, S., J. T. Lima, P. F. Trugilho y T. C. Monteiro. 2008. Excentricidade da medula em caules de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes topografias. *Cerne* 14 (4): 335-340. ISSN: 0104-7760. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74411119007>
- Flórez, J. B., P. F. Trugilho, J. T. Lima, P. R. G. Hein y J. R. M. D. Silva. 2014. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y bosques* 20 (1): 11-20.
- Hitsuma, G., W. Himmapan, T. Yagihashi, K. Miyamoto, y T. Vacharangkura. 2021. Effects of tree density and size symmetry of competition on diameter growth in the early stages of growth in planted teak (*Tectona grandis*) trees in northern Thailand. *Journal of Forest Research*, 26(5): 321-327. <https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1902598>
- Holmes, R. L. 1986. Quality control of crossdating and measuring. Users manual for computer program COFECHA. En *Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.
- IAWA Committee. 1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. Recuperado de <https://insidewood.lib.ncsu.edu/extras/insidewood/IAWA.Hardwood.List>
- Kindermann, G. E. 2018. Developing site index curves under changing site conditions. *Austrian Journal of Forest Science/Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 135(3). ISSN 0008-9583

- Kirdyanov, A. V., A. Piermattei, T. Kolář, M. Rybníček, P. J. Krusic, A. N. Nikolaev, F. Reinig y U. Büntgen. 2018. Notes towards an optimal sampling strategy in dendroclimatology. *Dendrochronologia* 52: 162-166. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.10.002>
- Lisi, C. S., M. Tomazelo Fo, P. C. Botosso, F. A. Roig, V. R. Maria, L. Ferreira-Fedele y A. R. Voigt. 2008. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in southeast Brazil. *IAWA Journal* 29 (2): 189-207. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000179>
- Macias Ortega, B. R. (2022). Efecto de sustancias alelopáticas que causan las plantaciones de teca (*Tectona grandis*) en el crecimiento de algunas especies vegetales. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica de Babahoyo, Babahoyo, Ecuador. 20 pp
- Máximo, E. H., J. Ayala, y V. S. Monsalvo. 2011. Diameter and height growth of a mixed plantation with tropical species in Veracruz state. 2:27-42. ISSN 2007-1132.
- Mollinedo García, M. S. 2003. Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona Oeste, Cuenca del canal de Panamá. Tesis de Maestría. CATIE. Costa Rica. 93pp
- Moreno, J. R. y R. M. Roque. 2006. Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 3 (9): 50-63. ISSN-e 2215-2504
- Moya-Roque, R., F. Muñoz-Acosta, C. Salas-Garita, A. Berrocal-Jiménez, L. Leandro-Zúñiga y E. Esquivel-Segura. 2010. Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 7 (18-19): ág. 1-208. ISSN: 2215-2504
- Okekunle, A. T., y A. S. Micheal. 2021. Growth and yield characteristics of *Tectona grandis* (Linn. F.) in different age series at University of Llorin, North Central Nigeria. *Forestist*, 71(3): 127-133. <https://doi.org/10.5152/forestist.2020.20022>
- Otazua, J. U. y A. Paquette. 2018. Mixed forest plantations. En: Bravo-Oviedo. A., Pretzsch, H. del Río M. (Eds.). Dynamics, silviculture and management of mixed forests. P. 319-341. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91953-9>
- Pachas, A. N. A., S. Sakanphet, O. Soukhy, M. Lao, S. Savathvong, J. C. Newby, B. Souliyasack, B. Keoboulapha, y M. J. Dieters. 2019. Initial spacing of teak (*Tectona grandis*) in northern Lao PDR: Impacts on the growth of teak and companion crops. *Forest Ecology and Management* 435: 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.031>
- Pandey, D. y C. Brown. 2000. Teak: a global overview. *UNASYLVA-FAO* 51: 3-13. ISSN 0041-6436
- Pinto, C. A. L., R. M. H. Espezúa y L. M. L. Bermúdez. 2007. Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas. *Debate Agrario* 42: 79-110.
- PLUS-Cordecruz. 1994. Plan de Uso de Suelos Total del Departamento de Santa Cruz.
- Priya, P. B. y K. M. Bhat. 1999. Influence of rainfall, irrigation, and age on the growth periodicity and wood structure in Teak (*Tectona Grandis*). *IAWA Journal* 20 (2): 181-192. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000678>
- Putro, G. S., S. N. Marsoem, J. Sulisty, y S. Hardiwinoto. (2020). The growth of three teak (*Tectona grandis*) clones and its effect on wood properties. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 21(6): 2814-2821. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210658>
- Ramirez Silva, L. M. 2017. Incremento medio anual de teca (*Tectona grandis* L. f.) en plantaciones comerciales, distrito de Puerto Inca, Huánuco, Perú. Tesis de grado. Universidad Nacional de Cajamarca. Huánuco, Perú. 68pp. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1718>
- Rosso, F. y P. Ninin. 1998. Variabilidad de los defectos de trozas de la especie teca (*Tectona grandis* Lf) en diferentes densidades arbóreas, en la unidad experimental de la reserva forestal de Ticoporo, Barinas, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42 (2): 103-112.
- Sandoval, E. 2008. El potencial económico de las plantaciones forestales en el trópico de Bolivia. Tesis de doctorado. University of Copenhagen. Dinamarca. 113 pág.

- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press. Tucson.
- Segura, C. E. C., M. P. da Rocha, R. J. Klitzke, y H. E. G. Mora. 2020. Caracterización anatómica radial y axial de la madera de teca (*Tectona grandis* L. f.) plantada en Chanchamayo-Perú. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 11(2): 107-120.
- Stokes, M. A., y T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press. Estados Unidos.
- Thulasidas, P., y H. Baillères. 2017. Wood quality for advanced uses of teak from natural and planted forests. En: Kollert, W. y Kleine, M. (Eds.). The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). 36: 73-81pp. Vienna, Austria.
- Vallejos Barra, O. S. 1996. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* LF, *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. Tesis de Maestría. CATIE. Costa Rica. 126pp
- Vargas-Larreta, B., J. Corral-Rivas, O. Aguirre-Calderón, y J. Nagel. 2010. Modelos de crecimiento de árbol individual: aplicación del simulador BWINPro7. Madera y bosques, 16(4): 81-104.
- Verdesoto, C. A. C., J. M. Carvajal, M. A. Rodríguez, A. J. González, y Y. R. Buste Ponce. 2021. Valoración dasométrica de una plantación de *Tectona grandis* L. f. en el cantón Balzar, Provincia del Guayas. UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria, 5(3): 21-32. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v5.n3.2021.351>
- Worbes, M. 1992. Occurrence of seasonal climate and tree-ring research in the tropics. Proceedings of the International Dendrochronological Symposium. 338-342pp.
- Zambrano, T., M. Jerez, y L. Vincent. 1995. Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (*Tectona grandis* L.) en los Llanos Occidentales de Venezuela. Revista Forestal Venezolana 39: 40-48.
- Zuñiga Carrillo, C. C. 2012. Aplicación de la dendrocronología para evaluar la influencia de la precipitación y la temperatura en el crecimiento de *Tectona grandis* Lf procedente del Fundo Génova-Junín. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento Académico de Industrias Forestales. Perú. 81pp