

Índice de sitio para plantaciones forestales de *Handroanthus serratifolius* en Ucayali, Perú

Site index for forest plantations of *Handroanthus serratifolius* in Ucayali, Perú

Ymber Flores Bendezú^{1*} 

¹Estación Experimental Agraria Pucallpa, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Carretera Federico Basadre Km 4200, Pucallpa 25004, Perú

*Autor de correspondencia: yflores@inia.gob.pe

Recibido: 20/11/2024 Aceptado: 15/12/2024 Publicado: 30/01/2025

Resumen: Este estudio desarrolló por primera vez un modelo de índice de sitio para *Handroanthus serratifolius* ("tahuari amarillo") en la región de Ucayali, Perú, con el fin de evaluar su productividad en plantaciones forestales. Se utilizaron datos de altura dominante y edad de 123 árboles distribuidos en 11 sitios experimentales. Se aplicaron los modelos de Schumacher (exponencial) y Chapman-Richards (sigmoidal), ambos ampliamente empleados en modelación forestal. La edad base se fijó en 15 años. Los modelos fueron ajustados mediante regresión no lineal y evaluados usando indicadores estadísticos como R^2 , RMSE, AIC y BIC. El modelo de Chapman-Richards mostró un mejor desempeño predictivo ($R^2 = 0.83$; RMSE = 1.77 m), capturando de forma más realista el crecimiento sigmoidal de la especie. Se generaron curvas anamórficas de índice de sitio, útiles para comparar la calidad del sitio entre plantaciones. Los resultados aportan herramientas clave para la planificación forestal sostenible de *H. serratifolius* y permiten su aplicación en programas de manejo, restauración y aprovechamiento forestal en la Amazonia peruana.

Palabras clave: Altura dominante; índice de sitio; modelos de crecimiento forestal; planificación silvicultural

Abstract: This study developed, for the first time, a site index model for *Handroanthus serratifolius* ("yellow tahuari") in the Ucayali region of Peru, aiming to assess its productivity in forest plantations. Data on dominant height and age were collected from 123 trees distributed across 11 experimental sites. The Schumacher (exponential) and Chapman-Richards (sigmoidal) models, both widely used in forest modeling, were applied. The base age was set at 15 years. The models were fitted using nonlinear regression and evaluated using statistical indicators such as R^2 , RMSE, AIC, and BIC. The Chapman-Richards model showed better predictive performance ($R^2 = 0.83$; RMSE = 1.77 m), more accurately capturing the species' sigmoidal growth. Anamorphic site index curves were generated, which are useful for comparing site quality among plantations. The results provide key tools for the sustainable forest planning of *H. serratifolius*, enabling its application in forest management, restoration, and utilization programs in the Peruvian Amazon.

Keywords: Dominant height; site index; forest growth models; silvicultural planning

1. Introducción

Handroanthus serratifolius (Vahl) S.O. Grose, comúnmente llamada "tahuarí amarillo", es una especie arbórea de la familia Bignoniaceae. Es una especie muy abundante y extendida en la Amazonia (de Lima et al., 2022). Las especies de *Handroanthus* muestran un interés creciente y son apreciadas para su uso en plantaciones forestales tanto puras como mixtas, sistemas agroforestales y la restauración de áreas degradadas, gracias a su crecimiento medio, bajos requerimientos nutricionales, mínima necesidad de mantenimiento, propiedades medicinales, copa no muy densa y alta capacidad de almacenamiento de carbono (Braz et al., 2022; Gentry, 1992; Reynel et al., 2003; Rolim & Piotto, 2024; SERFOR, 2023; Vieira & Weber, 2017).

Luize et al. (2024), documentaron la presencia de 850 individuos de *H. serratifolius* en 2,023 parcelas de inventario forestal distribuidas en toda la Amazonia, lo que ofrece una visión detallada de su distribución ecológica. Esta especie se encuentra principalmente en regiones con una precipitación anual promedio de 2,035 mm, aunque puede desarrollarse en condiciones hídricas variables, desde zonas con tan solo 1,080 mm hasta otras con hasta 4,691 mm. El déficit climatológico máximo promedio es de -211 mm, con un rango de -475 mm a -7 mm, lo que indica que la especie tolera tanto ambientes secos como aquellos con menor estrés hídrico. En cuanto al suelo, *H. serratifolius* se asocia principalmente con suelos ácidos, presentando un pH promedio de 4.7 y un rango entre 4.1 y 5.7 (Luize et al., 2024). En conjunto, los datos destacan la alta plasticidad ecológica de esta especie dentro del ecosistema amazónico.

La productividad forestal, definida como la cantidad de materia producida por unidad de superficie en un área forestal, es un concepto biológico difícil de expresar matemáticamente, por lo que se emplea el índice de sitio como una estimación indirecta de la calidad del sitio (Kershaw et al., 2016). Este índice, basado en la altura promedio de árboles dominantes y codominantes sanos a una edad específica (edad base), mide el potencial de productividad forestal, prediciendo el volumen de madera y la tasa de crecimiento (Prodan et al., 1997; Sharma et al., 2002). Influenciado por factores como clima, suelo y mejora genética, es práctico, consistente y ampliamente utilizado a nivel global, aunque no perfecto (Burkhart & Tomé, 2012; Hanson et al., 2002).

Diversos modelos han sido empleados para estimar el índice de sitio con claridad. Los más destacados son el modelo Schumacher (Schumacher, 1939) y el modelo Chapman-Richards (Chapman, 1961; Richards, 1959), reconocidos por su eficacia en diferentes regiones del mundo (Araújo et al., 2024; Sharma et al., 2002). Por otro lado, establecer una edad base para modelar el índice de sitio es fundamental, ya que garantiza consistencia al comparar la productividad entre sitios, ajusta los modelos a etapas de crecimiento estables y mejora la precisión de las predicciones. Además, facilita la comparación entre estudios y áreas, permitiendo proyectar el crecimiento futuro de los árboles, esencial para la planificación forestal y la gestión sostenible (Panik, 2014; Weiskittel et al., 2011).

A pesar de una revisión exhaustiva de la literatura, no se encontraron ecuaciones de índice de sitio publicadas específicamente para *H. serratifolius*. Esta ausencia evidencia una brecha en el conocimiento sobre su dinámica de crecimiento en función de la edad y calidad del sitio, lo que justifica la necesidad de desarrollar modelos específicos para esta especie. El objetivo del estudio fue desarrollar un modelo de índice de sitio para *Handroanthus serratifolius* en la región de Ucayali, Perú, que permita evaluar su productividad en plantaciones forestales. A través del análisis de datos de altura dominante y edad, se buscó generar herramientas prácticas, como son las curvas de índice de sitio, para apoyar la planificación, manejo, restauración y aprovechamiento sostenible de esta especie en la Amazonía peruana.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Centro Experimental Alexander von Humboldt, gestionado por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicado en la región de Ucayali, Perú (8°49'37"S, 75°03'17"O), con una extensión de 174 hectáreas y a 225 m.s.n.m (Figura 1). La precipitación anual promedio alcanza los 3600 mm, siendo marzo el mes más lluvioso y agosto el menos; la humedad relativa varía entre 80% y 90% (INFOR-JICA, 1985), la temperatura media anual es de 26°C, con altitudes entre 200 y 350 m.s.n.m. Según la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge, el área corresponde a Bosque Húmedo Tropical (BHT) y Bosque Húmedo Premontano Tropical (BHP) (INFOR-JICA, 1985). La topografía incluye suaves ondulaciones y colinas con pendientes de 5% a 10%. Los suelos, de origen sedimentario, presentan texturas arcillosas, arcillo-arenosas o limosas, con buena estructura, drenaje moderado, fertilidad adecuada y un pH de 5.4 a 6.7 (Flores, 2025).

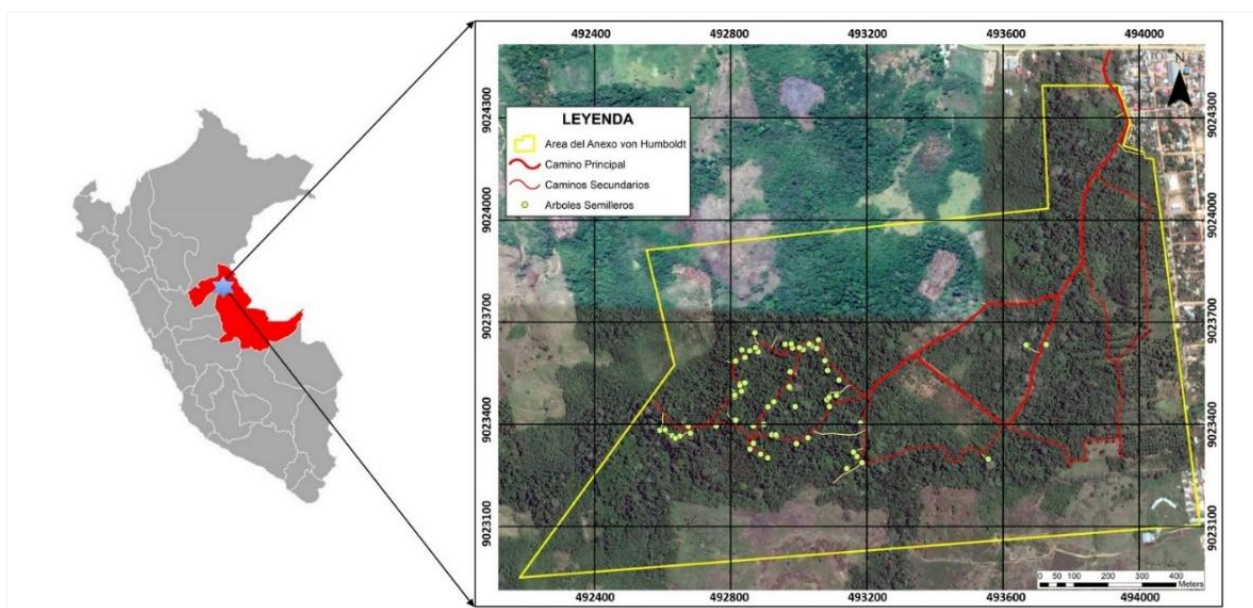


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el Centro Experimental Von Humboldt, Ucayali.



Figura 2. Ramita terminal con hojas y fruto en diseminación de *H. serratifolius*.



Figura 3. Plantación de *H. serratifolius* a campo abierto en el Centro Experimental Alexander von Humboldt, Ucayali.

H. serratifolius es un árbol grande, caducifolio y heliófito, nativo de Sudamérica, presente desde Venezuela hasta Bolivia (Grose & Olmstead, 2007). Tiene corteza escamosa, hojas digitadas, flores amarillas y frutos tipo folículo con numerosas semillas aladas (Figura 2). Se desarrolla bien en bosques de arena blanca y se cultiva por su madera y valor ornamental. En Ucayali es común y se ha establecido en plantaciones experimentales con crecimiento medio a lento (Figura 3). Se regenera naturalmente en pasturas originadas de purmas, mostrando buena adaptabilidad ecológica. La identificación taxonómica correcta de la especie fue realizada por el Herbario Amazonense AMAZ (Macedo, 2015).

2.2. Toma de datos

Existen siete definiciones de altura dominante ("top height" o "dominant height") incluidas en la literatura: 1) altura promedio de árboles dominantes y codominantes al medir la parcela; 2) altura promedio de árboles que siempre han sido dominantes o codominantes durante la vida del rodal; 3) altura media de Lorey; 4) altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea en la medición actual; 5) altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea en la última medición; 6) altura promedio del 20% de los árboles más gruesos en la medición de la parcela; y 7) altura promedio del 20% de los árboles más gruesos en cada medición que sobrevivieron hasta la última (Mason, 2019; Nakai et al., 2010; Ritchie et al., 2012; Sharma et al., 2002; VanderSchaaf, 2024). Adoptamos la definición (2), de Sharma et al. (2002), ya que se enfoca en árboles consistentemente dominantes o codominantes. Además, esta elección se apoya en la disponibilidad de datos de evaluaciones anuales del Centro Experimental Alexander von Humboldt, lo que permite un análisis confiable y longitudinal del crecimiento forestal.

Para la especie *H. serratifolius*, se evaluaron un total de 123 árboles procedentes de 11 sitios experimentales (Figura 3). La edad promedio fue de 10 años, con un rango que va desde los 2 hasta los 24 años. La altura dominante promedio registrada fue de 8.85 metros, con valores que oscilaron entre 2.55 y 21.0 metros. La desviación estándar fue de 6.68 años para la edad y de 4.34 metros para la altura dominante, indicando una considerable variabilidad en ambas variables.

2.3. Desarrollo de los modelos

Se utilizó el modelo de Schumacher (1939) y el modelo de Chapman-Richards (Chapman, 1961; Lumbres et al., 2013; Richards, 1959). El modelo de Schumacher, de tipo exponencial, relaciona la altura de los árboles con su edad y es eficaz en las primeras etapas del crecimiento forestal. Por su parte, el modelo de Chapman-Richards, una forma generalizada de la ecuación logística, permite capturar mejores patrones de crecimiento complejos, siendo más adecuado para bosques maduros. Su versatilidad lo ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en estudios de ecología forestal. En primer lugar, el modelo de Schumacher se ha sido utilizado ampliamente en su forma logarítmica como:

$$\ln(H) = a + bA^{-1} \dots\dots\dots(1)$$

En la que H representa la altura del árbol dominante (en metros), A indica la edad del árbol (en años), y a, b son parámetros del modelo.

El parámetro b, obtenido de la ecuación precedente, se utiliza como coeficiente de la curva guía en el modelo de índice de sitio. Cuando la edad A equivale a la edad base A_0 , la altura dominante corresponde al índice de sitio, permitiendo reformular la Ecuación (1) de la siguiente forma:

$$\ln(S) = a + bA_0^{-1} \dots\dots\dots(2)$$

donde:

- A_0 es la edad base (en años),
- S es el índice de sitio.

A partir de este modelo, y reorganizando las ecuaciones (1) y (2), se obtiene la siguiente expresión para la altura dominante (H):

$$\ln(H) = \ln(S) + b(A^{-1} - A_0^{-1}) \dots\dots\dots(3)$$

La ecuación anterior puede expresarse en su forma exponencial como:

$$H = \exp[\ln(S) + b(A^{-1} - A_0^{-1})] \dots\dots\dots (4)$$

Por otro lado, un modelo comúnmente utilizado para estimar el índice de sitio es el modelo de **Chapman-Richards**, cuya forma general es:

$$H = a(1 - e^{-bA})^c \dots\dots\dots (5)$$

donde:

- **H** es la altura del árbol dominante (en metros),
- **A** es la edad del árbol (en años),
- **a, b, c** son parámetros del modelo,
- **e** es la base de los logaritmos naturales.

Los parámetros **b** y **c**, estimados en la ecuación (5), actúan como coeficientes de la curva guía en el modelo del índice de sitio. En el caso de que la edad del árbol sea igual a la edad base ($A = A_0$), la altura dominante corresponde al índice de sitio (**S**), y la ecuación (5) se transforma en:

$$S = a(1 - e^{-bA_0})^c \dots\dots\dots (6)$$

A partir de las ecuaciones (5) y (6), se puede derivar la siguiente relación para el índice de sitio basado en el modelo de Chapman-Richards:

$$H / (1 - e^{-bA})^c = S / (1 - e^{-bA_0})^c \dots\dots\dots (7)$$

Finalmente, reorganizando la ecuación (7), se obtiene la forma final del modelo de índice de sitio de Chapman-Richards:

$$H = S [(1 - e^{-bA}) / (1 - e^{-bA_0})]^c \dots\dots\dots (8)$$

Se emplearon los modelos de Schumacher y Chapman-Richards, basados en datos de edad y altura dominante de 123 árboles con un total de 460 observaciones. Estos modelos son ampliamente reconocidos para modelar el crecimiento forestal (Burkhart & Tomé, 2012; Mahanta & Borah, 2014). Se utilizó la regresión no lineal con la función **nls** del software R versión 4.4 (Posit Software, 2024). Se presentarán los coeficientes, estimados mediante las ecuaciones 1 y 5, junto con los indicadores de calidad del ajuste: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE), criterio de información de Akaike (AIC) y el BIC (Bayesian Information Criterion), que permiten evaluar la precisión y adecuación de los modelos. Asimismo, se realizará una prueba *t* de muestras emparejadas para comparar las alturas observadas con las alturas estimadas por los modelos de Schumacher y Chapman-Richards, respectivamente. Esta prueba evalúa si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de ambas series de datos emparejadas (observado vs. estimado). Se ajustó una curva guía a todas las mediciones, generando una familia de curvas anamórficas, las cuales se caracterizan por compartir forma y proporcionalidad, con pendientes constantes para distintas calidades de sitio a cualquier edad y un punto de inflexión común (VanderSchaaf, 2024). Los índices de sitio para *H. serratifolius* se establecieron con intervalos de 2 metros, cubriendo el rango de alturas dominantes a la edad base definida de 15 años.

3. Resultados

Se desarrolló por primera vez un modelo de índice de sitio para *Handroanthus serratifolius*, evaluando los enfoques de Schumacher (exponencial) y Chapman-Richards (sigmoideal). El modelo de Schumacher presentó una altura base de 17.05 m (Tabla 2) con rápida desaceleración ($b=5.05$), mientras que Chapman-Richards mostró una altura máxima de 21 m con crecimiento inicial lento y estabilización tardía ($b=0.0485$, $c=0.8431$). Ambos modelos se calibraron con 460 observaciones, analizándose su ajuste mediante métricas estadísticas robustas para determinar cuál representaba mejor el crecimiento real de la especie.

Chapman-Richards demostró superioridad estadística, con menor error (RMSE=1.77 vs 2.30 m) y mayor capacidad predictiva ($R^2=0.833$ vs 0.719). Los criterios de información (AIC=1838.15, BIC=1850.54) confirmaron su mejor equilibrio entre precisión y parsimonia (Tabla 2). Con respecto a la prueba *t* para muestras emparejadas, para el modelo de Schumacher, no se detectó una diferencia estadísticamente

significativa entre las medias de las alturas observadas y calculadas ($t = 1.42$; $p = 0.156$; $n = 460$), lo que sugiere que, en promedio, el modelo reproduce adecuadamente las observaciones. Sin embargo, presentó una mayor varianza residual (8.11) y una correlación moderadamente alta con las observaciones ($r = 0.94$). En cambio, el modelo de Chapman-Richards mostró una diferencia significativa entre las medias ($t = 7.48$; $p < 0.001$; $n = 460$), con una varianza residual ligeramente menor (7.48) y una correlación más alta con los datos observados ($r = 0.99$).

La forma sigmoidea de Chapman-Richards refleja mejor las etapas típicas del desarrollo arbóreo: lento establecimiento, rápido crecimiento juvenil y posterior estabilización. Su parámetro de altura máxima (21 m) coincide con observaciones de campo, mientras que la tasa de crecimiento ($b=0.0485$) sugiere una velocidad biológicamente plausible. Esta concordancia con patrones ecológicos conocidos refuerza su validez para aplicaciones prácticas, superando al modelo exponencial de Schumacher que subestima el crecimiento en edades avanzadas.

Tabla 1. Coeficientes y estadísticas de Schumacher y Chapman-Richards de ecuación para índice de sitio modelo de *H. serratifolius*.

Ecuaciones	Coeficientes			Estadísticas				
	a	b	c	RMSE	R ²	AIC	BIC	t
$H = \exp(a + bA^{-1})$	17.0511	5.0512		2.2953	0.7192	2075.83	2084.54	1.42
$H = a(1 - e^{-bA})^c$	21.0000	0.04855	0.8431	1.769	0.8332	1838.15	1850.54	7.48

H representa la altura dominante del árbol (en metros); A indica la edad del árbol (en años); a, b, c son los coeficientes del modelo; e es la base de los logaritmos naturales; R² denota el coeficiente de determinación; AIC corresponde al Criterio de Información de Akaike, ambos como indicadores de la calidad del ajuste; RMSE (Error Cuadrático Medio) mide la precisión del modelo y el Bayesian Information Criterion (BIC) que es una medida para comparar modelos estadísticos, penalizando la complejidad del modelo (número de parámetros) para evitar sobreajuste.

Tabla 2. Modelos de índice de sitios para *H. serratifolius*.

Especie	Modelo	Ecuación
<i>H. serratifolius</i>	Schumacher	$H = \exp [\ln(S) + 5.0512 (A^{-1} - 15^{-1})]$
<i>H. serratifolius</i>	Chapman-Richards	$H = S ((1 - e^{-0.04885A}) / (1 - e^{-0.04885 \cdot 15}))^{0.8431}$

Los modelos seleccionados (Tabla 2) permitieron generar curvas anamórficas de índice de sitio (edad base=15 años) para manejo forestal. La Figura 4 muestra las curvas anamórficas de índice de sitio generadas con los modelos de Schumacher y Chapman-Richards. La superposición de los datos observados con las curvas ajustadas permite evaluar visualmente tanto la calidad del ajuste como la dispersión de los datos, proporcionando una validación empírica sin requerir supuestos estadísticos adicionales. Cada curva representa el crecimiento esperado de la altura dominante para un sitio con determinada calidad (índice de sitio). Por ejemplo, si un sitio tiene un índice de sitio de 14 m, se espera que los árboles dominantes en ese sitio alcancen 14 metros de altura a los 25 años. Las curvas más altas (como la representada con línea morada, SI = 16 m) representan sitios más productivos, donde los árboles crecen más rápido y alcanzan mayores alturas. También se observa que las curvas anamórficas cubren todo el rango de dispersión de los datos observados, pero en el modelo de Schumacher hay una subestimación a edades mayores de 16 años en las calidades de sitio superiores.

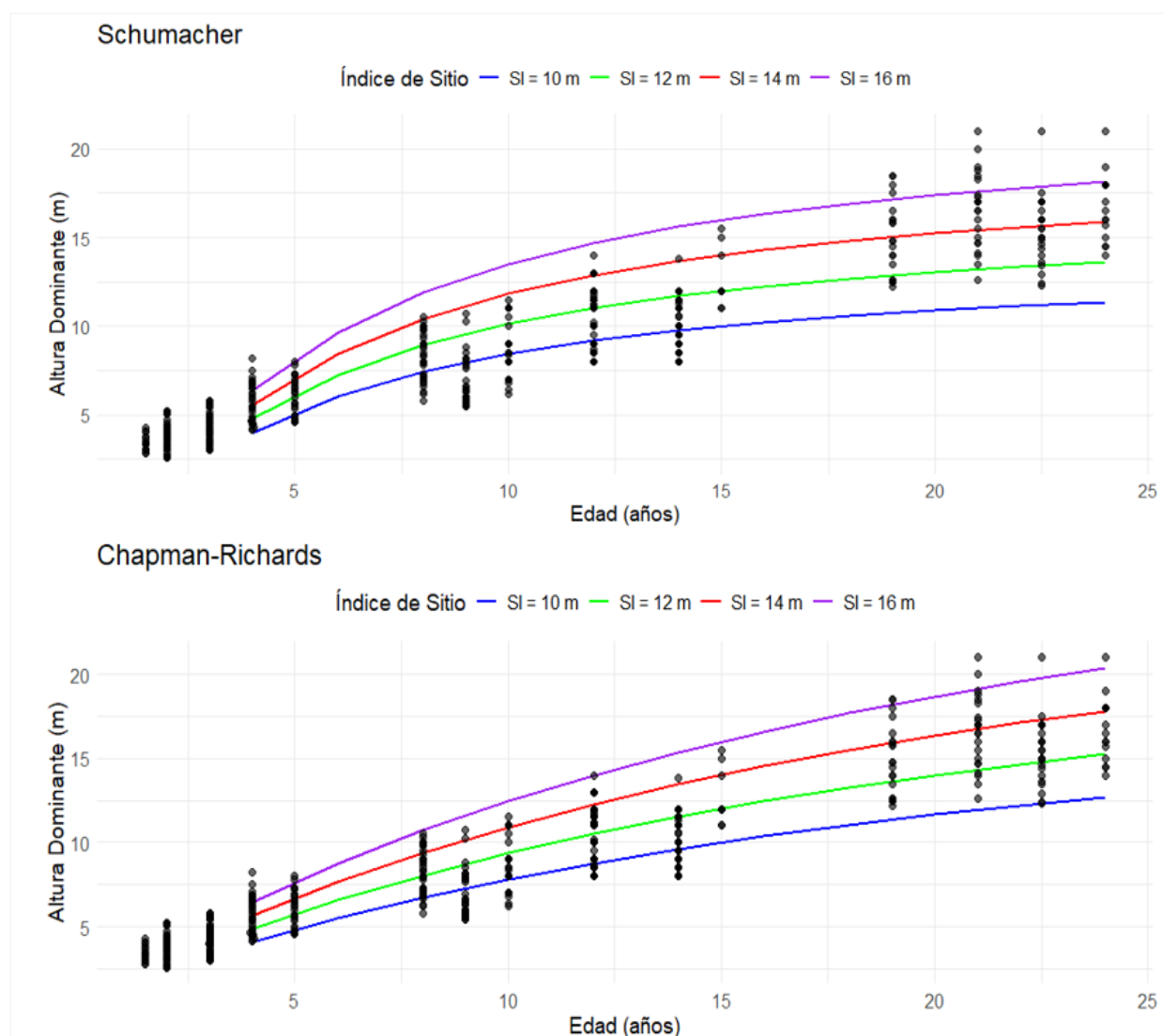


Figura 4. Curvas de índice de sitio anamórficas (edad base = 15 años) usando las ecuaciones de Schumacher y Chapman-Richards para *Handroanthus serratifolius*.

4. Discusiones

En este estudio se desarrolló por primera vez un modelo de índice de sitio para *Handroanthus serratifolius*, utilizando dos funciones comúnmente aplicadas en modelación forestal: Schumacher y Chapman-Richards. Se estableció una edad base de 15 años para ambos modelos, criterio basado en la edad promedio de los árboles muestreados y en su ritmo de crecimiento, siendo consistente con estudios similares, como en *Cedrelinga cateniformis* (Flores, 2005; Otárola et al., 2001). Aunque esta edad base puede diferir de la utilizada en otras especies amazónicas —como 5 años para *Calycophyllum spruceanum* (Ugarte & Domínguez, 2010) o 10 años para *Simarouba amara* (Paredes, 2003) —, se considera adecuada para *H. serratifolius* dadas sus características fenológicas y silvícolas, notoriamente su crecimiento lento a medio tanto en altura como en diámetro en plantaciones forestales (Macedo, 2015; Rolim & Piotto, 2024) y que incluso es más lento en los bosques naturales. Así lo demostró un estudio realizado en Brasil (Pinto et al., 2021), que evaluaron una plantación de enriquecimiento en claros de tala con *H. serratifolius*, donde a los ocho años, se obtuvo un diámetro promedio de 5.20 cm, con una tasa de crecimiento de 0.65 cm/año y el análisis financiero mostrando que la producción de madera aserrada solo resulta rentable a los 90 años.

Los resultados indican que la altura dominante es una variable eficaz para caracterizar el crecimiento y la calidad del sitio en esta especie. A pesar de ciertas limitaciones de muestreo, el tamaño de la base de datos ($n = 460$) fue suficiente para construir modelos confiables y estadísticamente robustos. La comparación entre los modelos mostró que Chapman-Richards ofrece un ajuste superior, con menor error (RMSE), mayor capacidad explicativa (R^2), y mejor desempeño según los criterios de información (AIC, BIC). Su forma sigmoidea representa de manera más realista las fases del crecimiento arbóreo: establecimiento lento, fase de crecimiento

rápido, y estabilización final. Además, el valor asintótico del modelo (21 m) concuerda con observaciones de campo, lo que refuerza su validez para aplicaciones prácticas en silvicultura.

Aunque el modelo de Schumacher también reproduce adecuadamente las alturas promedio ($p > 0.05$ en la prueba t), su mayor error y menor R^2 sugieren una menor capacidad para capturar la dinámica real del crecimiento, especialmente en edades avanzadas donde tiende a subestimar la altura.

Las ecuaciones generadas permitieron construir curvas anamórficas de índice de sitio, que asumen una forma común del crecimiento en altura entre sitios y difieren únicamente en la posición vertical determinada por el índice de sitio. Estas curvas, si bien más simples que las polimórficas, pueden ser apropiadas cuando los datos indican un patrón de crecimiento uniforme entre sitios (Binkley & Fisher, 2019; Weiskittel et al., 2011). En contraste, las curvas polimórficas o modelos GADA, que permiten diferentes formas y asíntotas según el sitio, podrían ofrecer mayor flexibilidad para especies con variabilidad de crecimiento significativa, como se ha observado en *Tectona grandis* (Dos Santos et al., 2022). En estudios futuros, contar con parcelas permanentes permitiría evaluar si este tipo de modelos mejora la estimación del índice de sitio para *H. serratifolius*. Los resultados muestran que el modelo de Chapman-Richards ajustado a las alturas dominantes permite discriminar con claridad entre clases de índice de sitio, reflejando diferencias significativas en la productividad de los rodales. Las curvas generadas ofrecen una herramienta confiable para evaluar la calidad del sitio y proyectar el crecimiento en función de la edad. Esta información tiene aplicación práctica en la planificación forestal: por ejemplo, sitios con menor índice podrían destinarse a producción a largo plazo o especies menos exigentes, mientras que aquellos con mayor índice son ideales para plantaciones intensivas orientadas a una rápida producción de madera comercial (Ashton & Kelty, 2018; Burkhart & Tomé, 2012).

La especie ha sido escasamente estudiada en términos de dinámica de crecimiento y potencial silvicultural, lo que limita el desarrollo de estrategias de manejo. Pese a su madera densa (Yelle, 2016), *H. serratifolius* no muestra un crecimiento tan lento como se esperaría, lo que podría deberse a adaptaciones ecológicas específicas. Aun así, factores como la densidad del rodal o el estrés hídrico pueden influir sobre la altura dominante, aunque generalmente afectan más al DAP y a la altura promedio (Niemistö, 1995; Tyminińska-Czabańska et al., 2022). Aspectos como la fertilidad del suelo y los valores del pH en las etapas iniciales también afecta el crecimiento de esta especie (Oliveira et al., 2019; Vieira & Weber, 2017).

La implementación de curvas de índice de sitio tiene importantes aplicaciones prácticas, permitiendo clasificar la calidad de los sitios, ajustar densidades de plantación, definir rotaciones óptimas y seleccionar tratamientos silviculturales como raleos o fertilización. Además, facilita la proyección del crecimiento futuro, el diseño de estrategias de cosecha, y la planificación comercial. De este modo, el modelo de Chapman-Richards se perfila como una herramienta útil y confiable para apoyar decisiones de manejo en plantaciones de *H. serratifolius* en la Amazonía peruana.

Conclusión

El presente estudio proporciona el primer modelo de índice de sitio para *Handroanthus serratifolius*, basado en datos empíricos de la región amazónica de Ucayali. La comparación entre los modelos mostró que Chapman-Richards supera a Schumacher en ajuste y validez biológica, al reflejar con mayor precisión las fases de crecimiento de la especie. La edad base de 15 años resultó adecuada para caracterizar la productividad del sitio, considerando las características silvícolas de esta especie. Las curvas anamórficas generadas permiten estimar la altura dominante esperada en función de la calidad del sitio, facilitando la toma de decisiones en manejo forestal. Estos modelos son herramientas fundamentales para optimizar la planificación, monitoreo y evaluación de plantaciones, así como para fortalecer iniciativas de restauración ecológica y mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono. Finalmente, se recomienda ampliar la base de datos incluyendo otras regiones y condiciones edafoclimáticas, a fin de mejorar la generalización y aplicabilidad de los modelos desarrollados.

Agradecimientos

El autor agradece al siguiente personal técnico del Programa Nacional Forestal de INIA: Ramón Pacaya, Tulio Amasifuén, Eliseo Ruiz, Ramón Lozano y Venancio Palomino.

Financiamiento

Este estudio se llevó a cabo con el apoyo del Programa Presupuestal 0121 “Mejora de la Articulación de los Pequeños Productores Agropecuarios a los Mercados” del Instituto Nacional de Innovación Agraria del Perú.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflictos de intereses.

Contribución de autores

Y. F. B.: Participó en la recopilación de información, su análisis y redacción del manuscrito.

Referencias bibliográficas

- Araújo, E. J. G. de, Silva, E. V. da, Vaz, P., Monte, M. A., Morais, V. A., Curto, R. de A., Ataíde, D. H. dos S., & Rosa, T. C. (2024). Regression Kriging in the Productive Capacity of Planted Forests. *Floresta e Ambiente*, 31(3). <https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2024-0034>
- Ashton, M. S., & Kelty, M. J. (2018). *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology*. John Wiley & Sons.
- Binkley, D., & Fisher, R. F. (2019). *Ecology and Management of Forest Soils*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119455745>
- Braz, E. M., Canetti, A., Mattos, P. P. de, D'Oliveira, M. V. N., Thaines, F., Oliveira, M. F., & Garrastazu, M. C. (2022). Occurrence and growth of *Handroanthus* spp. in the Amazon region in the states of Mato Grosso and Acre, to assist in developing standards for forest management and in assessing extinction risk. *Embrapa Florestas*.
- Burkhardt, H. E., & Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands*. Springer.
- Chapman, D. G. (1961). Statistical Problems in Dynamics of Exploited Fisheries Populations. *Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 4(4), 153–168. <https://projecteuclid.org/proceedings/berkeley-symposium-on-mathematical-statistics-and-probability/Proceedings-of-the-Fourth-Berkeley-Symposium-on-Mathematical-Statistics-and/Chapter/Statistical-Problems-in-Dynamics-of-Exploited-Fisheries-Populations/bsm>
- de Lima, R. B., Görgens, E. B., Batista, A. P. B., da Silva, D. A. S., de Oliveira, C. P., & de Sousa, C. S. C. (2022). Diversity and Big Tree Patterns in the Brazilian Amazon. *Diversity*, 14(7), 503. <https://doi.org/10.3390/d14070503>
- Dos Santos, M. L., Miguel, E. P., Dos Santos, C. R. C., De Souza, H. J., Martins, W. B. R., Lima, M. D. R., Arce, J. E., & Silva, J. N. M. (2022). Forecasting production in thinned clonal stands of *Tectona grandis* in Eastern Amazonia. *Forest Systems*, 31(3), e024. <https://doi.org/10.5424/fs/2022313-19379>
- Flores, Y. (2005). Ecuación de índice de sitio para *Cedrelinga catenaeformis* en el Bosque Alexander von Humboldt. *Revista Forestal Del Perú*, 25(1–2), 35–44.
- Flores, Y. (2025). Crecimiento del “shihuahuaco” *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke en plantaciones bajo diferentes espaciamientos y tipos de suelo en Ucayali, Amazonía peruana. *Revista Forestal Del Perú*, 39(2), 238–255. <https://doi.org/10.21704/rfp.v39i2.1829>
- Gentry, A. H. (1992). Bignoniaceae: Part II (Tribe Tecomeae). In *Flora Neotropica*, Vol. 25, No. 2.
- Grose, S. O., & Olmstead, R. G. (2007). Taxonomic Revisions in the Polyphyletic Genus *Tabebuia* s. l. (Bignoniaceae). *Systematic Botany*, 32(3), 660–670. <https://doi.org/10.1600/036364407782250652>
- Hanson, E. J., Azuma, D. L., & Hiserote, B. A. (2002). *Site Index Equations and Mean Annual Increment Equations for Pacific Northwest Research Station Forest Inventory and Analysis Inventories, 1985–2001*.
- INFOR-JICA (Instituto Forestal de la República del Perú - Japan International Cooperation Agency). (1985). *Proyecto de estudio conjunto sobre investigación y experimentación en regeneración de bosques en la Zona Amazónica de la República del Perú* (38 p.). INFOR-JICA.
- Kershaw, J. A., Ducey, M. J., Beers, T. W., & Husch, B. (2016). *Forest Mensuration*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118902028>
- Luize, B. G., Tuomisto, H., Ekelschot, R., Dexter, K. G., Amaral, I. L. do, Coelho, L. de S., Matos, F. D. de A., Lima Filho, D. de A., Salomão, R. P., Wittmann, F., Castilho, C. V., Carim, M. de J. V., Guevara, J. E., Phillips, O. L., Magnusson, W. E., Sabatier, D., Cardenas Revilla, J. D., Molino, J.-F., Irumé, M. V., ... ter Steege, H. (2024). The biogeography of the Amazonian tree flora. *Communications Biology*, 7(1), 1240.

- <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06937-5>
- Lumbres, R. I. C., Jin Lee, Y., Calora, F. G., & Parao, M. R. (2013). Model fitting and validation of six height-DBH equations for *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Benguet Province, Philippines. *Forest Science and Technology*, 9(1), 45–50. <https://doi.org/10.1080/21580103.2013.772542>
- Macedo, J. J. (2015). *Crecimiento y productividad de tres especies del género Handroantus sp. en plantaciones a campo abierto en la estación experimental Alexander Von Humboldt, Ucayali - Perú* [Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4292>
- Mahanta, D., & Borah, M. (2014). Parameter Estimation of Weibull Growth Models in Forestry. *International Journal of Mathematics Trends and Technology*, 8(3), 157–163. <https://doi.org/10.14445/22315373/IJMTT-V8P521>
- Mason, E. G. (2019). Influences of mean top height definition and sampling method on errors of estimates in New Zealand's forest plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 49. <https://doi.org/10.33494/nzjfs492019x24x>
- Nakai, T., Sumida, A., Kodama, Y., Hara, T., & Ohta, T. (2010). A comparison between various definitions of forest stand height and aerodynamic canopy height. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(9), 1225–1233. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.05.005>
- Niemistö, P. (1995). Influence of initial spacing and row-to-row distance on the growth and yield of silver birch (*betula pendula*). *Scandinavian Journal of Forest Research*, 10(1–4), 245–255. <https://doi.org/10.1080/02827589509382890>
- Oliveira, A. R. de, Boechat, C. L., Amorim, S. P. do N., Souza, M. E. L. de, Duarte, L. de S. L., & Silva, H. F. (2019). Growth and quality of *Handroanthus serratifolius* seedlings in soils incorporating amendments and inorganic residues. *Revista Ceres*, 66(3), 235–242. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201966030010>
- Otárola, E., Freitas, L., Linares, C., & Baluarte, J. R. (2001). Estimación de la calidad de sitio mediante «índices de sitio» para *Cedrelinga catenaeformis* Ducke (Tornillo) en plantaciones de Jenaro Herrera, Loreto (Perú). *Folia Amazónica*, 12(1–2), 39–51. <https://doi.org/10.24841/fa.v12i1-2.125>
- Panik, M. J. (2014). *Growth Curve Modeling*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118763971>
- Paredes, F. (2003). *Estimación de la "Calidad de Sitio" de las especies Simarouba amara Aubl. "Marupa" y Guatteria elata R.E. Fries "Carahuasca" en plantaciones del Centro de Investigaciones de Jenaro Herrera (CIJH), Loreto - Perú* [Universidad Nacional de la Amazonia Peruana]. https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/7061/Flor_Tesis_Titulo_2003.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pinto, R. C., Pinheiro, C., Vidal, E., & Schwartz, G. (2021). Technical and financial evaluation of enrichment planting in logging gaps with the high-value species *Swietenia macrophylla* and *Handroanthus serratifolius* in the Eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, 495, 119380. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119380>
- Posit Software. (2024). *RStudio: Integrated development environment for R (Versión 2024.09.0+375)* [Software]. <https://posit.co/>
- Prodan, M., Cox Zañartu, F., Peters Nario, R., & Real Hermosilla, P. (1997). *Mensura forestal*. IICA. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas : BMZ : GTZ.
- Reynel, C., Pennington, R. T., Pennington, T. D., Flores, C., & Daza, A. (2003). Árboles útiles de la Amazonía peruana y sus usos: Un manual con apuntes de identificación, ecología y propagación de las especies. *Darwin Initiative Project & ICRAF*.
- Richards, F. J. (1959). A Flexible Growth Function for Empirical Use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290–301. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
- Ritchie, M., Zhang, J., & Hamilton, T. (2012). Effects of Stand Density on Top Height Estimation for Ponderosa Pine. *Western Journal of Applied Forestry*, 27(1), 18–24. <https://doi.org/10.1093/wjaf/27.1.18>
- Rolim, S. G., & Piotto, D. (2024). Diameter growth models and performance of 100 tropical tree species in silvicultural trials in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 569, 122202. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122202>
- Schumacher, F. X. (1939). A new growth curve and its application to timber-yield studies. *Journal of Forestry*, 819–820.
- SERFOR. (2023). *Plan de acción para la adecuada implementación de la inclusión del shihuahuaco (género Dipteryx) y tahuarí (género Handroanthus) en el Apéndice II de la CITES, años 2023 y 2024*. SERFOR. <http://repositorio.serfor.gob.pe/handle/SERFOR/949>

- Sharma, M., Amateis, R. L., & Burkhart, H. E. (2002). Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 168(1–3), 163–175. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00737-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00737-X)
- Tymińska-Czabańska, L., Hawryło, P., & Socha, J. (2022). Assessment of the effect of stand density on the height growth of Scots pine using repeated ALS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102763. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102763>
- Ugarte, L. J., & Domínguez, G. (2010). Índice de Sitio (IS) de *Calycophyllum spruceanum* Benth. en relación con la altura dominante del rodal en ensayos de plantación en la Cuenca del Aguaytía, Ucayali, Perú. *Ecología Aplicada*, 9(2), 101–111. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162010000200005
- VanderSchaaf, C. L. (2024). Currently Available Site Index Equations That Use On-Site Tree Measurements for Naturally Regenerated Longleaf Pine in Its Historical Range. *Forests*, 15(5), 855. <https://doi.org/10.3390/f15050855>
- Vieira, C., & Weber, O. (2017). Saturação por Bases no Crescimento e na Nutrição de Muda de Ipê-Amarelo. *Floresta e Ambiente*, 24. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.001916>
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest Growth and Yield Modeling*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119998518>
- Yelle, D. J. (2016). Bondability of ipê (*Tabebuia* spp.) wood using ambient-curing exterior wood adhesives. <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-689>