



9CFE-1404

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1



Elaboración de curvas de calidad de estación para *Gmelina arborea* en Colombia y relación con variables edáficas y climáticas

BARRIOS TRILLERAS, A. (1), COLLAZOS AVENDAÑO, J. (1), LÓPEZ AGUIRRE, A.M (1),

(1) Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima, Ibagué-Colombia

Resumen

La productividad forestal de *Gmelina arborea* es un fenómeno complejo, estimado mediante modelos de crecimiento en altura dominante y calidad de estación. Este estudio desarrolló un modelo de altura dominante para *G. arborea* a partir de datos de parcelas permanentes de monitoreo. Se evaluaron nueve ecuaciones dinámicas, basadas en los modelos de Hossfeld y Bertalanffy-Richards, ajustadas individualmente y validadas mediante técnicas de validación cruzada. El modelo de Bertalanffy-Richards destacó por su ajuste preciso, con curvas polimórficas y una única asíntota, reflejando un comportamiento biológicamente coherente. La calidad de estación para *G. arborea* en Colombia se encuentra entre los 18.6 y 24.1 metros a una edad de 10 años, y el modelo desarrollado es aplicable a una amplia gama de condiciones de estación. Además, se evaluó el impacto del clima en la productividad forestal, encontrando una correlación significativa entre variables climáticas y edáficas y el crecimiento en altura dominante. Esto subraya la necesidad de integrar factores climáticos y edáficos en la planificación y manejo de plantaciones de *G. arborea*, especialmente en un contexto de cambio climático. Los modelos desarrollados permiten mejorar las estimaciones de crecimiento y productividad en escenarios climáticos cambiantes, apoyando una gestión más eficiente y sostenible de las plantaciones.

Palabras clave

Crecimiento forestal, ecuaciones dinámicas, calidad de estación, validación cruzada, plantaciones sostenibles.

1. Introducción

Gmelina arborea Roxb. es una especie forestal ampliamente cultivada en regiones tropicales debido a su rápido crecimiento y adaptabilidad (BARRIOS-TRILLERAS et al., 2021). En Colombia, se extiende principalmente en ecosistemas de bosque seco y húmedo tropical, siendo una opción clave para plantaciones comerciales y para la restauración ambiental (MADR, 2022).

La calidad de estación, frecuentemente estimada mediante modelos de índice de sitio, refleja la interacción entre las condiciones climáticas, edáficas y la respuesta de la especie. Este índice consiste en curvas de crecimiento donde se relaciona la altura dominante proyectada hasta una edad base definida (TAMARIT-URIAS et al., 2022).

Para el modelado dinámico, es esencial contar con datos medidos en árboles o rodales en al menos dos momentos, utilizando parcelas permanentes, o análisis troncal. Entre los métodos disponibles para la construcción de curvas de altura dominante, destacan el enfoque de ecuaciones en diferencias algebraicas (ADA), en el cual se sustituye un parámetro del modelo de crecimiento base por una función del sitio (BAILEY & CLUTTER, 1974), mientras que en el enfoque de ecuaciones en



diferencias algebraicas generalizadas (GADA), introducido por CIESZWSKI & BAILEY (2000), amplía esta metodología al permitir que varios parámetros dependan de la calidad del sitio. Esto incrementa la flexibilidad de las curvas y permite simular polimorfismos concurrentes y múltiples asíntotas, características clave de las ecuaciones de índice de sitio (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2021).

Adicionalmente, identificar las variables climáticas y edáficas relacionadas al índice de sitio es crucial, ya que permite una comprensión más profunda de los factores que influyen en el crecimiento forestal y facilita la espacialización de las predicciones (BARRIOS-TRILLERAS et al., 2021). Esto, a su vez, optimiza la planificación y el manejo sostenible de plantaciones al ofrecer herramientas predictivas aplicables a nivel regional y local.

2. Objetivos

Los objetivos del estudio son: i) desarrollar modelos de índice de sitio (IS) para *Gmelina arborea*; ii) evaluar el impacto de las variables climáticas y edáficas en la calidad de estación de la especie.

3. Metodología

Se analizaron datos de 129 parcelas permanentes ubicadas en las llanuras del Caribe y los valles interandinos del Río Magdalena, Colombia. Las parcelas fueron medidas entre los años 2008 y 2013. Las mediciones incluyeron el diámetro a la altura del pecho, de todos los árboles dentro de la parcela y la medición de la altura total a una submuestra de árboles. La altura total de los árboles no medidos fue predicha empleando un modelo local de altura-diámetro. La altura dominante (H) en cada parcelas se estimó considerando la altura media de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea. Se generaron nueve modelos dinámicos basados en los modelos de Hossfeld y Bertalanffy-Richards (Tabla 1).

Tabla 1. Modelos dinámicos de índice de sitio (IS) evaluados.

Hossfeld		$H = \frac{t^2}{a + bt + ct^2}$					
$b = X$					2		
$c = X$					3		
$a = X$	$b = b$	2	/X			4	
Bertalanffy- Richards		$H = a(1 - e^{-bt})^c$					
$b = X$					6		
$c = X$					7		
$a = eX$	$c = b$	2 +	b	3	/X		8
$a = eX$	$c = b$	2 + 1	/X			9	

Los parámetros de los modelos fueron estimados utilizando SAS 9.4, aplicando el algoritmo de Marquardt y el método de máxima verosimilitud con información completa (FIML). Para controlar la heterocedasticidad, se utilizó regresión no lineal ponderada, y para manejar la autocorrelación, se implementó una estructura autorregresiva AR(1). La validación de los modelos se realizó mediante validación cruzada (k-fold cross-validation), dividiendo los datos en 10 subconjuntos, con iteraciones que alternaron entre ajuste y validación. La bondad de ajuste se evaluó con el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) y la bondad de predicción a través del sesgo promedio, error absoluto medio (EAM) y raíz del error cuadrático medio (REMC).

Datos climáticos disponibles del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) fueron interpolados y de esta forma, para cada parcela se obtuvieron variables climáticas como (precipitación, días con lluvia, temperatura (media, mínima y máxima), y humedad relativa). Así mismo, se obtuvieron variables edáficas para cada parcela a través del análisis de suelos de muestras colectadas entre 0-30 cm de profundidad, como pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de Fosforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na). Posteriormente, un análisis de correlación de Pearson fue conducido para identificar aquellas variables climáticas y edáficas correlacionadas con la calidad de estación de *G. arborea*.

4. Resultados

La Tabla 2 muestra los parámetros estimados para los nueve modelos dinámicos de IS evaluados. Todos los parámetros fueron significativos para $\alpha = 0,05$. En general los modelos presentaron un ajuste adecuado con R^2_{aj} entre 0.883 (modelo 3) y 0.921

(modelo 7), siendo los modelos 7, 8 y 2, los más destacados. Entre estos, el modelo 7 de Bertalanffy-Richards (parámetro c) presentó el mejor ajuste ($R^2_{aj} = 0.921$), el menor EAM = 1.343 y REMC = 1.746 m.

Tabla 2. Parámetros estimados, bondad de ajuste y de predicción para nueve modelos dinámicos de índice de sitio para *Gmelina arborea*.

Modelo	#			Parámetro estimado	Bondad de ajuste	Bondad de predicción	
b1	b2	b3		R2aj	Sesgo	EAM	REMC
1	0.282437	0.017752		0.915	0.009	1.412	1.853
2	-0.101184	0.018591		0.918	0.123	1.358	1.761
3	-0.104610	0.243805		0.883	0.651	1.582	2.099
4	-3824167.7	139748761.8		0.707532	0.917	0.096	1.381 1.795
5	0.011081	0.651006		0.914	0.146	1.381	1.798
6	40.633458	0.776613		0.916	0.138	1.365	1.780
7	52.185249	0.037572		0.921	0.055	1.343	1.746
8	0.057415	1.424317	-0.034184	0.918	0.075	1.377	1.784
9	0.025778	0.454081		0.918	0.095	1.371	1.782

Las curvas generadas por el modelo 7 de Bertalanffy-Richards (parámetro c), mostraron curvas polimórficas con una única asíntota, y clasificaron los sitios en: productividad baja: $IS \leq 18.6$ m, productividad media: $18.6 \text{ m} < IS \leq 24.1$ m y productividad alta: $IS > 24.1$ m considerando una edad base de 10 años (Figura 1).

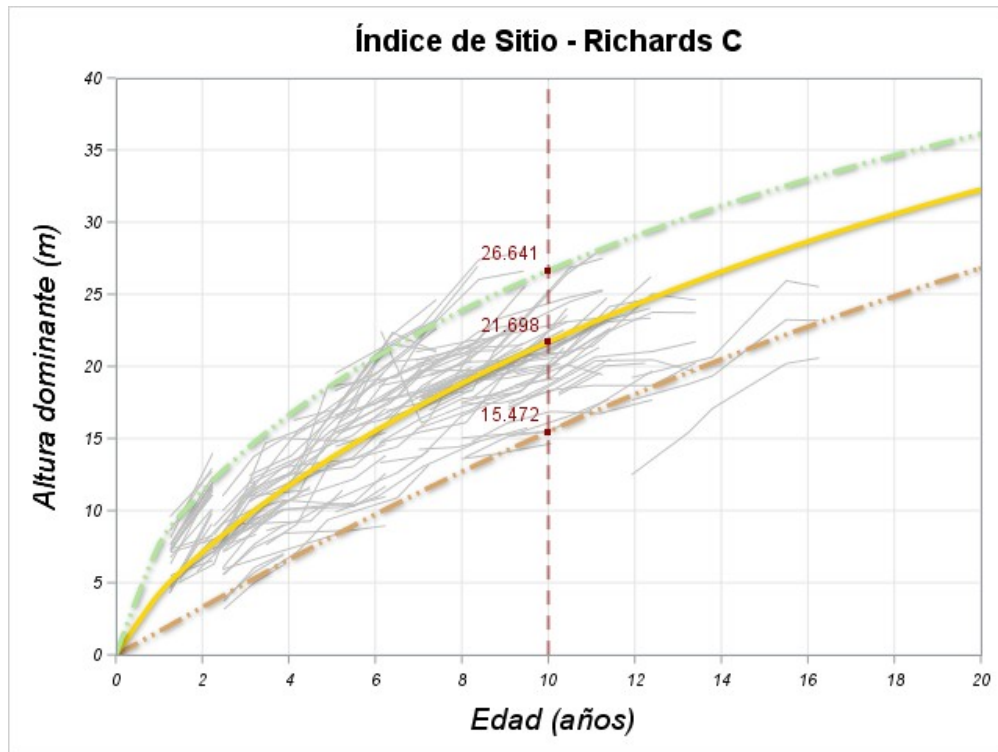


Figura 1. Familia de curvas de índice de sitio del modelo de Bertalanffy-Richards (parámetro c) para *Gmelina arborea*.

Respecto al estudio de la relación entre el índice de sitio y las variables climáticas y edáficas, los resultados evidenciaron diferencias entre las dos regiones evaluadas (Tabla 3). Las parcelas en las llanuras del Caribe presentaron mayores correlaciones con variables climáticas, mientras que en los valles interandinos destacaron las relaciones con variables edáficas. En general, las variables edáficas CIC ($r = 0.37$ $p < 0.001$), Calcio ($r = 0.44$, $p < 0.001$) y Potasio ($r = 0.37$, $p < 0.001$) mostraron correlaciones positivas significativas con el IS. En contraste, las variables climáticas, como precipitación, tuvieron menor influencia, destacando la importancia de los factores edáficos en la productividad.

Tabla 3. Relación existente entre variables edafoclimáticas y el índice de sitio de *Gmelina arborea*.

ns: la correlación se considera no significativa (ns) con valores $P > 0.05$; * $P < 0.05$;
** $P < 0.01$;*** $P < 0.001$. Fuente: Autores.

En general, las condiciones edafoclimáticas difieren notablemente entre las Llanuras del Caribe y los Valles interandinos, y presentan variaciones dentro de cada región según la calidad del sitio (Tabla 4). En las Llanuras del Caribe, la altitud se mantuvo baja, con valores promedio que aumentan ligeramente desde sitios de calidad baja (41.9 m) hasta alta (58.5 m). Las precipitaciones anuales fueron relativamente constantes (1303.4–1322.4 mm), así como la temperatura media (28.1–28.2 °C) y el número de días con lluvia (63.5–64.3 días). El pH del suelo mostró un incremento progresivo con la calidad del sitio (5.30 a 5.72), al igual que la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que varió desde 20.65 hasta 33.9 meq/100g. Los contenidos de calcio y magnesio también fueron mayores en sitios de mejor calidad, con un aumento marcado de 12.46 a 22.07 meq/100g y de 7.74 a 11.02 meq/100g, respectivamente. El potasio, aunque presente en concentraciones más bajas, también reflejó esta tendencia (0.06 a 0.31 meq/100g).

Por su parte, en los Valles interandinos, la altitud fue considerablemente mayor (336.1–354.9 m) y la precipitación media anual alcanzó valores superiores a los de las Llanuras del Caribe, con un máximo de 1709.7 mm en sitios de baja calidad. No obstante, a medida que mejora la calidad del sitio, la precipitación tiende a disminuir ligeramente. En cuanto al régimen térmico, se registraron temperaturas medias y mínimas ligeramente menores en comparación con las Llanuras del Caribe. La humedad del suelo fue más variable, con un valor máximo en sitios de calidad media (381.2 mm) y un descenso notable en sitios de alta calidad (250.8 mm). El pH también aumentó con la calidad del sitio (6.11 a 6.86), al igual que la CIC, que pasó de 6.28 a 10.97 meq/100g. Los niveles de calcio, magnesio y potasio fueron más bajos en comparación con las Llanuras del Caribe, aunque se incrementaron sistemáticamente en función de la calidad del sitio (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de las variables de clima y suelo más relacionadas con IS por calidad de estación y área para *Gmelina arborea*.

Variable	Llanuras del Caribe			Valles interandinos		
Calidad baja	Calidad media	Calidad alta	Calidad baja	Calidad media	Calidad alta	

5. Discusión

Este estudio evaluó modelos de crecimiento en altura dominante para *Gmelina arborea*, útiles para clasificar la productividad de plantaciones. Se generaron nueve modelos dinámicos a partir de las funciones base de Bertalanffy-Richards y Hossfeld, empleando las metodologías ADA y GADA, las cuales ofrecen estimaciones más precisas que el enfoque de curva guía debido a su naturaleza polimórfica (SCOLFORO et al., 2020).

Los modelos más destacados fueron el 7, 8 y 2, siendo el modelo 7, basado en Bertalanffy-Richards con el parámetro c dependiente del sitio, el más adecuado. Este modelo refleja características biológicas clave: crecimiento acelerado en edades tempranas, un punto de inflexión donde la tasa se reduce y una asíntota que representa la altura máxima alcanzable. Estos resultados concuerdan con estudios previos en Colombia (LÓPEZ et al., 2011; BARRIOS-TRILLERAS et al., 2021), aunque estudios en México han favorecido el modelo de Hossfeld para condiciones locales específicas (MARTÍNEZ-ZURIMENDI et al., 2015).

La productividad de *G. arborea* fue clasificada en tres rangos: baja ($IS \leq 18.6$ m), media ($18.6 < IS \leq 24.1$ m) y alta ($IS > 24.1$ m), utilizando una edad base de 10 años. En general, las plantaciones evaluadas mostraron una productividad media, aunque se espera que el desarrollo genético y las prácticas silvícolas puedan mejorarla. El modelo desarrollado se adapta a estos cambios y conserva su precisión predictiva, representando una herramienta robusta para el manejo forestal.

Diferenciar los sitios según su calidad, utilizando el índice de sitio, permite optimizar la planificación y el manejo de plantaciones de *Gmelina arborea*. Este estudio demuestra que la calidad de estación está positivamente relacionada con características edáficas como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las concentraciones de calcio, magnesio y potasio. En las llanuras del Caribe, los sitios de mayor calidad presentan suelos más fértiles, con mayores concentraciones de bases intercambiables y un pH más favorable (Tabla 4). En los valles interandinos, aunque las precipitaciones son más altas, los sitios de mejor calidad se asocian con suelos de mejor fertilidad, menor humedad en el suelo y pH cercano a la



neutralidad.

Estos resultados coinciden con los hallazgos de VALLEJOS (1996), quien reportó que un 59% de la variación de la calidad de sitio en *G. arborea* en Costa Rica se explica por la posición topográfica y el contenido de calcio en el horizonte superficial. De igual manera, HERRERA & ALVARADO (1998) identificaron a *G. arborea* como una especie basófila, favorecida por suelos con altos niveles de calcio (6–22.3 meq/100g) y un pH entre 5.7 y 6.4. En este estudio, se observaron concentraciones de calcio que van de 12.46 (calidad baja) a 22.07 meq/100g (calidad alta) en las llanuras del Caribe y de 2.91 (calidad baja) a 6.87 meq/100g (calidad alta) en los valles interandinos, reforzando esta tendencia (Tabla 4). En las llanuras de Caribe, la precipitación se consolida como un factor determinante, mientras que en los valles interandinos su efecto es menos marcado. Otros elementos como altitudes bajas y el uso previo del terreno como área agrícola también contribuyen al rendimiento óptimo (URREGO, 2004). Todo esto subraya la necesidad de integrar variables edáficas y climáticas en los modelos de predicción de productividad para *G. arborea*.

6. Conclusiones

El modelo de Bertalanffy-Richards (parámetro c) es una herramienta confiable para clasificar las plantaciones según su calidad de estación, predecir la productividad de *Gmelina arborea* en Colombia y poder ajustar modelos selvícolas de acuerdo a las calidades de estación. Las variables edáficas, especialmente CIC, Calcio y Potasio, tienen un impacto significativo en la calidad de estación, mientras que las variables climáticas presentan una menor influencia. Las curvas de IS generadas permiten clasificar los sitios en niveles de productividad y optimizar estrategias de manejo forestal. La adaptación regional de los modelos es crucial para garantizar su aplicabilidad en diversas condiciones ambientales.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima por el apoyo financiero otorgado para desarrollar la investigación.

8. Bibliografía

- BAILEY, R. L.; CLUTTER, J. L.; 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *For Sci* 20(2) 155-159
- BARRIOS-TRILLERAS, A.; LÓPEZ-AGUIRRE, A.M.; BÁEZ-APARICIO, C.A.; 2021. Modelamiento de la productividad de *Gmelina arborea* Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal. *Colomb For* 24(1) 71-87
- CIESZWSKI, C.J.; BAILEY, R.L.; 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations. *For Sci* 46(1) 116-126
- GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; ARELLANO-PÉREZ, S.; GONZÁLES-FERREIRO, E.; PASCUAL, A.; ALTELARREA, V.S.; RUIZ-GONZÁLEZ, A.D.; ÁLVAREZ-GONZÁLES, J.G. 2021. Developing a site index model for *Pinus pinaster* stands in NW Spain by combining bi-temporal ALS data and environmental data. *For Ecol Manag* 481 118690.
- HERRERA, B., & ALVARADO, A. 1998. Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de centro América. *Agron Costarricense* 22(1) 99-117



LÓPEZ, A.M.; BARRIOS-TRILLERAS, A.; NIETO, V. 2011. Monitoreo y modelamiento del crecimiento para el manejo de plantaciones forestales comerciales. CONIF. 100 p. Bogotá

MARTINEZ-ZURIMENDI, P.; DOMINGUEZ-DOMINGUEZ, M.; JUÁREZ-GARCIA, A.; LÓPEZ-LÓPEZ, L.M.; DE LA CRUZ, V.; ÁLVAREZ, J. 2015. Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco. *Rev Fitotec Mex* 38 415-425

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (MADR). 2022. Boletín estadístico forestal. MADR. Bogotá

SCOLFORO, H.F.; MCTAGUE, J.; BURKHART, H.; ROISE, J.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L. 2020. Site index estimation for clonal eucalypt plantations in Brazil: A modeling approach refined by environmental variables. *For Ecol Manag* 466 118079

TAMARIT-URIAS, J.C.; RODRÍGUEZ-ACOSTA, M.; QUIÑONEZ-BARRAZA, G.; SANTIAGO-GARCIA, W. 2022. New dynamic equation of dominant height and site index for *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen in Puebla and Veracruz, Mexico. *Rev Chapingo Ser Cienc For Ambiente* III(28) 331-347

URREGO, J.B. 2004. Growth potential of *Gmelina arborea* at 3 years of age in Colombia. *New For* 2(28) 269-276

VALLEJOS, O.S. 1996. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. CATIE. 147 p. Turrialba

VÁSQUEZ, W.; UGALDE, L. 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. CATIE. 40 p. Turrialba