

Estimación de la altura dominante y el área basal en bosques de *Nothofagus* de Tierra del Fuego en función del suelo, clima, topografía y vegetación

Guillermo Martínez Pastur¹, Marie-Claire Aravena Acuña², Julián Rodríguez Souilla², Jimena E. Chaves², Juan M. Cellini³, María V. Lencinas², Pablo L. Peri⁴

Palabras Clave: nutrientes del suelo, calidad de sitio, servicios ecosistémicos.

Introducción

La productividad, en términos ecológicos como económicos, es uno de los principales factores que son tenidos en cuenta en estudios científico-técnicos relacionados con la planificación y manejo de los recursos boscosos. Sin embargo, aislar la multiplicidad de factores que intervienen en el proceso es una tarea compleja que requiere de una aproximación multidimensional, ej. Bahamonde et al. (2018) determinan la influencia del suelo, el clima y el paisaje en la determinación de la calidad de sitio en bosques de *Nothofagus antarctica*. Del mismo modo, Oddi et al. (2022) también identifican una similar influencia para *Austrocedrus chilensis*, generando mapas de altura en relación a dichas variables. Otros autores, empleando técnicas de sensores remotos activos y pasivos lograron generar modelos predictivos que permiten mapear variables de estructura, ej. Silveira modeló variables de estructura para los bosques nativos de Argentina en función de variables climáticas, topográficas, paisaje e índices de vegetación (ej. altura dominante y área basal). Lograr un mayor entendimiento de la influencia de estas variables en diferentes tipos de bosque y de paisajes permitirá generar herramientas predictivas para propender a una gestión territorial más adecuada. En este contexto, el objetivo del trabajo fue analizar qué factores influyen en la altura dominante y el área basal del rodal en tres tipos de bosques de *Nothofagus* de Tierra del Fuego, empleando variables de clima, topografía y vegetación. Se analizó la influencia de los diferentes factores para distintas especies de árboles y a lo largo de un gradiente de sitio, previo a realizar modelos de regresión que permitan mapear dichas variables de rodal en el paisaje.

Materiales y Métodos

Se empleó una base de datos de estructura forestal (HD: altura dominante, AB: área basal) de tres espe-

cies (NA: *N. antarctica*, NP: *N. pumilio*, NB: *N. betuloides*) en gradientes de calidad de sitio establecidos para cada una de ellas (B: baja, M: media, A: alta) para 1215 rodales (NA: 95, NB: 19, NP: 1101). El requisito fue contar con poca intervención forestal, y un AB >30 m².ha. Asimismo, cada rodal contaba con datos de humedad del suelo (HUM) y los contenidos de carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (F) para los primeros 30 cm del perfil del suelo (ton.ha⁻¹). Asimismo, se extrajeron valores de clima (WorldClim), topográficos (ALT: altitud, PEND: pendiente), de productividad de la vegetación (PPN: productividad primaria neta). Con los datos se realizaron análisis de la varianza múltiple (especie x calidad de sitio), y regresiones lineales (Statgraphics Centurion, StatPoint, US).

Resultados

Las variables empleadas en los modelos presentan diferencias según especie, y algunas de ellas, por la calidad de sitio (Tabla 1). Estas diferencias destacan la necesidad de establecer modelos por especie, ya que los efectos se enmascaran al considerar los gradientes de sitio. Esto se refleja en los modelos obtenidos para la estimación de HD y AB, donde los modelos globales presentan menor ajuste y mayores errores que los modelos específicos (Tablas 2 y 3).

La estimación global de HD fue explicada por el contenido de P del suelo, variables climáticas (isotermalidad), la altitud y la PPN, mientras que los modelos individuales agregaron otras variables climáticas (ej. temperatura media y precipitación anual) y de suelo (C y N). Los ajustes fueron superiores al 95%, y las variables explicativas fueron significativas ($p < 0,05$) (Tabla 2). La estimación global de AB fue explicada por HD, el clima (isotermalidad y precipitación anual) y la altitud. Por otra parte, los modelos individuales agregaron otras variables climáticas (ej. coeficiente de variación estacional de la temperatura y la precipitación) y la pendiente. Los ajustes fueron superiores al 95%, y las variables explicativas fueron significativas ($p < 0,05$) (Tabla 3).

1 Laboratorio de Recursos Agroforestales (CADIC CONICET), Tierra del Fuego, Argentina. Contacto: gpastur@conicet.gov.ar.

2 Laboratorio de Recursos Agroforestales (CADIC CONICET), Tierra del Fuego, Argentina.

3 Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD UNLP), Buenos Aires, Argentina.

4 INTA - UNPA - CONICET, Santa Cruz, Argentina.

Tabla 1. Análisis de varianza múltiple para especie (NA: *Nothofagus antarctica*, NP: *N. pumilio*, NB: *N. betuloides*) y calidad de sitio (B: baja, M: media, A: alta) como factores principales, analizando AB: área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$), HUM: humedad del suelo (%), C-N-P: contenido de carbono, nitrógeno y fósforo del suelo ($ton \cdot ha^{-1}$), BIO1: temperatura media anual ($^{\circ}C$), BIO3: isotermalidad, BIO4: coeficiente de variación estacional de la temperatura, BIO12: precipitación anual, BIO15: coeficiente de variación estacional de la precipitación, ALT: altitud (m s. n. m.), PEND: pendiente (%) y PPN: productividad primaria neta ($grC \cdot m^2 \cdot año^{-1}$). F: test de Fisher, p: probabilidad. Letras diferentes muestran diferencias significativas.

		AB	HUM	C	N	P	BIO1	BIO3
A: Especie	NA	39,9a	38,0a	178,1a	10,3c	0,05a	5,1c	48,0a
	NP	61,1b	62,5b	193,4a	9,3b	0,13b	4,5a	49,8b
	NB	54,6b	135,2c	238,4b	5,5a	0,05a	4,8b	50,7c
	F(p)	104,4 ($<0,01$)	35,2 ($<0,01$)	7,8 ($<0,01$)	14,5 ($<0,01$)	41,5 ($<0,01$)	120,6 ($<0,01$)	524,2 ($<0,01$)
B: Sitio	B	53,3	79,3	209,1	7,7	0,07	4,7a	49,6
	M	50,1	93,1	198,0	8,1	0,08	4,8ab	49,5
	A	52,4	63,3	202,8	9,1	0,09	5,2c	49,5
	F(p)	0,66 (0,52)	4,4 (0,01)	0,4 (0,68)	1,8 (0,17)	0,3 (0,72)	4,5 (0,01)	0,1 (0,97)
AxB	F(p)	0,71 (0,59)	5,7 ($<0,01$)	1,0 (0,38)	0,4 (0,77)	1,8 (0,12)	6,5 ($<0,01$)	24,6 ($<0,01$)
		BIO4	BIO12	BIO15	ALT	PEND	PPN	
A: Especie	NA	3,2c	386,5a	18,8c	91,3a	4,1a	353,3a	
	NP	3,0b	445,9b	16,8b	153,1b	8,2b	490,2b	
	NB	2,9a	510,9c	15,0a	249,8c	18,2c	604,3c	
	F(p)	330,4 ($<0,01$)	118,7 ($<0,01$)	57,1 ($<0,01$)	161,0 ($<0,01$)	63,9 ($<0,01$)	34,2 ($<0,01$)	
B: Sitio	B	3,0	456,5b	16,6	184,0	11,8b	489,6	
	M	3,0	453,2a b	17,0	164,3	7,8a	495,1	
	A	3,0	433,6a	17,0	145,9	10,8b	463,1	
	F(p)	0,5 (0,59)	4,2 (0,01)	0,8 (0,43)	2,4 (0,09)	7,4 ($<0,01$)	0,5 (0,62)	
AxB	F(p)	19,5 ($<0,01$)	10,6 ($<0,01$)	13,6 ($<0,01$)	6,2 ($<0,01$)	5,1 ($<0,01$)	1,1 (0,36)	

Tabla 2. Modelos de regresión lineal de altura dominante (HD, m) para el conjunto de especies (GLOBAL) o individualmente (NA: *Nothofagus antarctica*, NP: *N. pumilio*, NB: *N. betuloides*). R^2 -aj. = coeficiente de ajuste, F: test de Fisher, T: estadístico de ajuste para la variable, p: probabilidad, EEE: error estándar de la estimación, EAM: error absoluto medio (ver variables en Tabla 1).

HD GLOBAL	HD = 17,2515 * P + 0,247608 * BIO3 + 0,0128549 * ALT + 0,00502089 * PPN
	R^2 -aj. = 95,3 % F(p) = 3671,3 ($<0,01$)
	EEE = 4,4 T(p) P = 10,7 ($<0,01$) ALT = 7,7 ($<0,01$)
	EAM = 3,6 BIO3 = 18,3 ($<0,01$) PPN = 4,9 ($<0,01$)
HD NA	HD = 0,120961 * N - 2,17581 * BIO1 + 0,405715 * BIO3
	R^2 -aj. = 97,1 % F(p) = 1051,6 ($<0,01$)
	EEE = 1,6 T(p) N = 2,0 (0,04) BIO3 = 6,6 ($<0,01$)
	EAM = 1,2 BIO1 = -4,0 ($<0,01$)
HD NP	HD = 6,30182 * P + 0,531072 * BIO3 - 0,0137698 * BIO12
	R^2 -aj. = 97,7 % F(p) = 8756,7 ($<0,01$)
	EEE = 3,2 T(p) P = 4,7 ($<0,01$) BIO12 = -4,6 ($<0,01$)
	EAM = 2,5 BIO3 = 18,7 ($<0,01$)
HD NB	HD = -0,045468 * C + 6,28587 * BIO1
	R^2 -aj. = 96,2 % F(p) = 214,0 ($<0,01$)
	EEE = 4,0 T(p) COS = -3,1 ($<0,01$)
	EAM = 3,4 BIO1 = 8,4 ($<0,01$)

Tabla 3. Modelos de regresión lineal de área basal (AB, m^2) para el conjunto de especies (GLOBAL) o individualmente (NA: *Nothofagus antarctica*, NP: *N. pumilio*, NB: *N. betuloides*). R^2 -aj. = coeficiente de ajuste, F: test de Fisher, T: estadístico de ajuste para la variable, p: probabilidad, EEE: error estándar de la estimación, EAM: error absoluto medio (ver variables en Tabla 1).

AB GLOBAL	AB = 0,832069 * HD + 0,948447 * BIO3 - 0,0456239 * BIO12 + 0,061545 * ALT
	R^2 -aj. = 95,1 % F(p) = 3570,3 (<0,01)
	EEE = 12,9 T(p) HD = 8,3 (<0,01) BIO12 = -4,0 (<0,01)
	EAM = 10,4 BIO3 = 9,5 (<0,01) ALT = 10,8 (<0,01)
AB NA	AB = 0,770652 * HD + 1,73607 * BIO15
	R^2 -aj. = 95,4 % F(p) = 975,1 (<0,01)
	EEE = 8,8 T(p) HD = 2,0 (0,04)
	EAM = 6,9 BIO15 = 8,8 (<0,01)
AB NP	AB = 0,711213 * HD + 10,7388 * BIO4 + 0,0668029 * ALT - 0,502503 * PEND
	R^2 -aj. = 95,4 % F(p) = 3134,3 (<0,01)
	EEE = 13,2 T(p) HD = 4,4 (<0,01) ALT = 10,0 (<0,01)
	EAM = 10,4 BIO4 = 8,1 (<0,01) PEND = -4,5 (<0,01)
AB NB	AB = 2,39505 * BIO3 - 0,166264 * BIO12 + 0,1194 * ALT
	R^2 -aj. = 96,9 % F(p) = 193,9 (<0,01)
	EEE = 10,0 T(p) BIO3 = 2,9 (0,01) ALT = 2,8 (0,01)
	EAM = 7,2 BIO12 = -1,8 (0,04)

Discusión

Las variables de rodal empleadas en la determinación de la productividad de los rodales, desde un punto de vista ecológico o económico (ej. volumen comercial) responde a una compleja interacción de factores (paisaje, clima, suelo, topografía) (Bahamonde et al., 2018), tal como lo evidencian la interacción de factores comparados y seleccionados en los modelos.

Las comparaciones y modelos realizados evidencian las diferencias existentes entre las diferentes especies forestales, que podrían relacionarse con sus requerimientos y amplitudes ecológicas (ej. desde deciduas a siempreverdes, creciendo desde el ecotono hasta las medias laderas atemperadas de las montañas) (Carrasco et al., 2021). Nuestro trabajo destaca dos aspectos de interés, por un lado, la existencia de variables de influencia regional que son independientes de las especies en sí, tales como la temperatura y la precipitación. Estas variables climáticas son variables de limitación del crecimiento en altas latitudes, y que se relacionan a variables topográficas (ej. ALT donde a mayor altitud menor temperatura y mayor precipitación). Por otra parte, es interesante la contribución de la PPN en la estimación global de la HD, ya que se relaciona directamente a la fijación de C de los rodales. Asimismo, se destaca la relación entre HD y varios de los modelos de AB, que raramente es determinada en los estudios de campo a escala de rodal (Martínez Pastur et al., 2021). Estas métricas relacionadas a la vegetación ya han sido indicadas como predictores de la estructura forestal, ej. Silveira et al. (2022) empleó índices relacionados a la fenología para la determinación de variables forestales a escala nacional en Argentina. Las variables relacionadas con el suelo fue-

ron importantes a escala global (ej. P), ya que es uno de los elementos limitantes en los suelos fueguinos, y tuvieron un rol más destacado en los modelos individuales (ej. N en HD de NA, o C en HD de NB). Bahamonde et al. (2018) determinaron que, en NA, la HD estaba relacionada principalmente a la altitud, suelo (textura y profundidad) y diferentes variables climáticas. Es interesante destacar que los nutrientes se evaluaron como porcentaje y no como contenido, no teniendo peso en las modelizaciones realizadas. Oddi et al. (2022) estudiaron la variación de la HD en *Austrocedrus chilensis*, y determinaron que la misma aumenta en sitios más fríos y húmedos con mayor C y menor pH. Esto destaca la importancia de variables de suelo y clima, aún en sectores más acotados y de menor variabilidad del paisaje, como el llevado a cabo en este estudio. Finalmente, Silveira et al. (2022) determinó que los índices de vegetación obtenidos con sensores remotos (activos y pasivos) en conjunto con predictores indirectos del clima (ej. latitud y longitud) son las principales variables predictoras para determinar la HD y el AB, independientemente de la especie forestal.

Conclusiones

La disponibilidad de bases de datos a escala de paisaje permite determinar más eficientemente los factores de influencia sobre métricas de rodal de amplia utilidad para la gestión del manejo y la conservación de los bosques. Se puede concluir que es factible obtener productos mapeables sencillos y suficientemente precisos como para ser incorporados en la toma de decisiones.

Agradecimientos

A Eduarda M. O. Silveira del SILVIS Lab (Department of Forest and Wildlife Ecology, University of Wisconsin-Madison) por su apoyo en la obtención de variables de paisaje y modelizaciones. A los productores agropecuarios y la Dirección General de Desarrollo Forestal (Tierra del Fuego) en la toma de datos de campo.

Bibliografía Citada

Bahamonde HA, Martínez Pastur G, Lencinas MV, Soler R, Rosas YM, Ladd B, Duarte S, Peri PL. 2018. The relative importance of soil properties and regional climate as drivers of productivity in southern Patagonia's *Nothofagus antarctica* forests. *Annals of Forest Science* 75: e-45.

Carrasco J, Rosas YM, Lencinas MV, Bortoluzzi A, Peri PL, Martínez Pastur G. 2021. Synergies and trade-offs among ecosystem services and biodiversity in different forest types inside and off-reserve in Tierra del Fuego, Argentina. En: *Ecosystem Services in Patagonia: A Multi-criteria approach for an integrated assessment* (Peri PL, Nahuelhual L, Martínez Pastur G, Eds). Springer Nature, Capítulo 4, pp 75-97. Cham, Suiza.

Martínez Pastur G, Rosas YM, Chaves J, Cellini JM, Barrera MD, Favoretti S, Lencinas MV, Peri PL. 2021. Changes in forest structure values along the natural cycle and different management strategies in *Nothofagus antarctica* forests. *For. Ecol. Manage.* 486: e118973.

Oddi FJ, Casas C, Goldenberg M, Langlois JP, Landesmann J, Gowda J, Kitzberger T, Garibaldi L. 2022. Modeling potential site productivity for *Austrocedrus chilensis* trees in northern Patagonia (Argentina). *For. Ecol. Manage.* 524: e120525.

Silveira EMO, Radeloff V, Martinuzzi S, Martínez Pastur G, Bono J, Politi N, Lizarraga L, Rivera L, Ciuffoli L, Rosas YM, Olah AM, Gavier-Pizarro G, Pidgeon AM. 2022. Nationwide native forest structure maps for Argentina based on forest inventory data, SAR Sentinel-1 and vegetation metrics from Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*. En prensa.