

Apéndice 3. Ecuaciones de regresión para la predicción de peso y rendimiento por hectárea de árboles de *L. leucocephala* los cuales reflejan efectos de micro sitio. */

No	Edad (meses)	Parámetros	Error estandar de la regresión**/	R ² %
1	12	DW = 0.28 + 0.37(R1) + 0.29(R2) + 0.012(s) (---)	0.19	50
2	18	DW = 0.21 + 0.61(R1) + 0.24(R2) + 0.12(s)	0.18	76
3	24	DW = 0.56 + 1.5(R1) + 0.55(R2) + 0.54(s)	0.56	75
4	43	DW = 1.65 + 2.34(R1) + 1.3(R2) + 1.8(s)	1.22	81
5	54	DW = 1.63 + 3.3(R1) + 1.7(R2) + 2.5(s)	1.29	88
6	61	DW = 1.0 + 4.5(R1) + 3.0(R2) + 3.2(s) (---)	2.02	88

1	12	DW/HA= 3900 + 1800(R1) + 1300(R2) - 900(s)	1100	62
2	18	DW/HA= 5000 + 2500(R1) + 1100(R2) - 960(s)	1200	65
3	24	DW/HA=14000 + 6000(R1) + 2500(R2) - 2200(s)	2700	67
4	43	DW/HA=40000 + 8600(R1) + 5500(R2) - 5200(s)	6200	61
5	54	DW/HA=49000 + 13000(R1) + 7400(R2) - 5800(s)	5600	73
6	61	DW/HA=54000 + 16000(R1) + 13000(R2) - 5800(s)	7200	69

DW = peso seco de la sección del árbol sobre el nivel del suelo (kg)
 DW/HA = peso seco por hectárea (kg)
 R1 = repetición 1
 R2 = repetición 2
 s = espaciamiento (m²)
 */ = todos los coeficientes son significativamente diferente de cero al menos al nivel del 0.001, a no ser que se indique lo contrario por (---) en donde su significancia fue menos al 0.2
 **/ = error estandar de la regresión en las mismas unidades que la variable dependiente.

MECANISMOS PARA PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO DE JAUL (*Alnus acuminata*) EN COSTA RICA.

David Hughell
 Pablo Camacho

RESUMEN

El jaúl, *Alnus acuminata*, es una de las principales especies nativas utilizadas en reforestación de las zonas altas de Costa Rica. A pesar de esta aceptación, hay muy poca información cuantitativa sobre el crecimiento de la especie para desarrollar programas de manejo. Una manera de obtener ésta información es mediante el estudio de plantaciones, no manejadas, que existen en el área de distribución natural de la especie.

Utilizando datos de parcelas temporales de jaúl en plantaciones no manejadas, se desarrolló un modelo preliminar de crecimiento, basado en correlaciones entre el dap, la altura y el área basal con la edad y el índice de sitio. Basándose en suposiciones lógicas se adaptó este modelo para predecir el crecimiento y rendimiento de plantaciones con índices de sitio diferentes y regímenes de aclareos.

INTRODUCCION

El jaúl, *Alnus acuminata* (HBK) O. Kuntze, es una de las especies principales para la reforestación de áreas entre los 1500 y 3000 m de elevación. Es una especie nativa de America Central, es fijadora de nitrógeno y se caracteriza por su crecimiento rápido. La madera se utiliza para construcciones menores, como ataúdes, cajas para transporte de hortalizas, hormas para zapatos, palos de escoba, fósforos, pulpa, carbón, leña y la fabricación de muebles.

A pesar de la aceptación como especie promisoría para la reforestación de zonas altas, existe muy poca información cuantitativa sobre el crecimiento de la especie, lo cual dió lugar a esta investigación. El objetivo es evaluar el crecimiento del jaúl, con el fin de desarrollar un modelo de predicción del crecimiento y rendimiento, con manejo.

La toma de datos fue realizada por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), y los análisis por el ITCR y el Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE). El presente estudio cubre la parte de predicción del rendimiento de un estudio mas amplio de Camacho y Murillo (3); Camacho y Hughell (2).

MEDOTODOLOGIA

Para el estudio se utilizaron 95 parcelas de 0.04 hectárea, las cuales se establecieron tratando de cubrir diferentes condiciones de suelo, drenaje, densidad de plantación y edad. Para cada una de las parcelas se midió el dap y la altura total de los árboles. En todas las plantaciones faltaba un programa de aclareos silviculturales.

El desarrollo del modelo de predicción de crecimiento y rendimiento del jaúl se realizó en dos etapas. En la primera

etapa se desarrolló un modelo de predicción de plantaciones sin manejo, basado en la muestra de 80 parcelas y posteriormente se realizó una validación de este modelo con un grupo de 15 parcelas. En la segunda etapa se unieron los dos grupos de datos para reajustar los coeficientes, y se modificó el modelo para permitir simular el rendimiento de plantaciones con un régimen seleccionado de raleos.

PREDICCION DEL RENDIMIENTO DE PLANTACIONES SIN MANEJO

El modelo de predicción del crecimiento y rendimiento en plantaciones sin manejo, consiste en la integración del sistema de ecuaciones presentadas en el Cuadro 1. Dichas ecuaciones fueron seleccionadas de un número mucho mayor, y desarrolladas mediante análisis de regresión. La selección de estas ecuaciones fue realizada con base en criterios empíricos (estadísticos) y de principios biológicos del crecimiento.

Para evaluar la calidad de sitio en cada parcela, se estableció un índice de sitio con la altura dominante a una edad base de 15 años, mediante el método de la curva guía (Alder, 1) con b común (ecuación 1 del Cuadro 1).

Posteriormente se determinó la relación entre la altura media con la edad y el índice de sitio. Se encontró que con una modificación de la ecuación de Schumacher para incorporar el índice de sitio se obtiene un ajuste bastante alto (Ecuación 2).

Cuadro 1. Sistema de ecuaciones (basados en 80 parcelas) que forma el modelo de predicción de crecimiento y rendimiento de plantaciones sin manejo de *Alnus acuminata*, en Costa Rica

No.	Ecuación de regresión	coeficiente	error estándar	R ² (%) adj.
1.	$\ln(is) = \ln(Hdom) + b*(1/edad_base - 1/edad)$	b = -2.222	0.012	63
2.	$\ln(alt) = a + b*[(1/edad) + c*(\ln(is))]$	a = -0.0720 b = -1.5735 c = 0.9977	0.144 0.069 0.050	92
3.	$N/ha = a + b*(edad)$ Con edad > 24 años N/ha se mantiene igual	a = 1231.6 b = -32.9342	73.42 7.205	17
4.	$AB = a + b*edad + c*edad^2 + d*is$	a = -17.5777 b = 2.2236 c = -0.0382 d = 0.9489	3.165 0.301 0.012 0.165	74
5.	$\ln(vtc) = a + b*\ln(dap) + c*\ln(alt)$	a = -9.133623 b = 1.986881 c = 0.763099	0.1521 0.0627 0.0999	99

Ln = logaritmo natural, base e
dap = diámetro cuadrático a la altura del pecho (cm)
is = índice de sitio (metros con edad base de 15 años)
Hdom = altura dominante (m)
alt = altura total media del rodal (m)
N/ha = número de árboles remanentes por hectárea.
AB = área basal por hectárea (m²/ha)
vtc = volumen total del árbol con corteza (m³)

Por la falta de datos de campo colectados sobre el número de árboles plantados por hectárea, y por falta de una buena correlación entre el número actual de árboles por hectárea y la edad, no se pudo desarrollar una ecuación muy precisa para estimar el número actual de árboles por hectárea. La ecuación seleccionada (Ecuación 3) se aplica en el modelo para edades hasta los 24 años, después de la cual se mantiene igual el número de árboles por hectárea.

La ecuación seleccionada para estimar el área basal es un polinomio de segundo grado (Ecuación 4). Su forma describe un crecimiento rápido hasta los 20 años, el cual disminuye después de esta edad.

Como último paso se utilizó la Ecuación 5 (Cuadro 1) para estimar el volumen total con corteza (VTC), la cual fue establecida con base a una muestra de 98 árboles entre 8 y 80 cm de dap y 10 y 40 m de altura total.

La incorporación al sistema de ecuaciones en una hoja electrónica (aquí se usó el programa Lotus 123), permite confeccionar tablas de rendimiento para plantaciones, sin manejo, de cualquier índice de sitio dentro del ámbito estudiado (15 - 30). El Cuadro 2 es un ejemplo de una tabla de rendimiento para un índice de sitio de 18 m (el promedio de las parcelas evaluadas). El crecimiento en volumen total para cuatro índices de sitios está graficado en Figura 1, y los incrementos corrientes y medios anuales (ICA e IMA) en la Figura 2. Utilizando el IMA máximo como criterio, se nota que la edad para la primera intervención es entre 4 y 7 años.

Cuadro 2. Tabla de rendimiento para un índice de sitio de 18 m de *Alnus acuminata* sin aclareo en la zona de distribución natural de la especie en Costa Rica.

edad (años)	N (N/ha)	dap (cm)	alt (m)	AB (m ² /ha)	VOL (m ³ /ha)	ICA _a (m ³)	IMA _a (m ³)
2	1166	5.5	7.6	3.80	16.0	8.00	8.0
4	1100	9.2	11.2	7.80	55.6	19.80	13.9
8	968	13.5	13.7	14.80	119.3	15.20	14.9
12	836	17.1	14.6	20.70	170.4	11.90	14.2
16	705	20.4	15.1	25.30	208.5	8.70	13.0
20	573	23.9	15.4	28.70	233.1	5.30	11.6
24	441	27.8	15.6	30.90	243.3	1.60	10.1
28	441	30.3	15.7	31.80	288.8	1.90	10.3
30	441	30.3	15.8	31.80	289.7	0.50	9.7

IS = índice de sitio
 VOL = volumen total sin corteza por hectárea (m³/ha)
 ICA = incremento corriente anual (m³/ha)
 IMA = incremento medio anual (m³/ha)

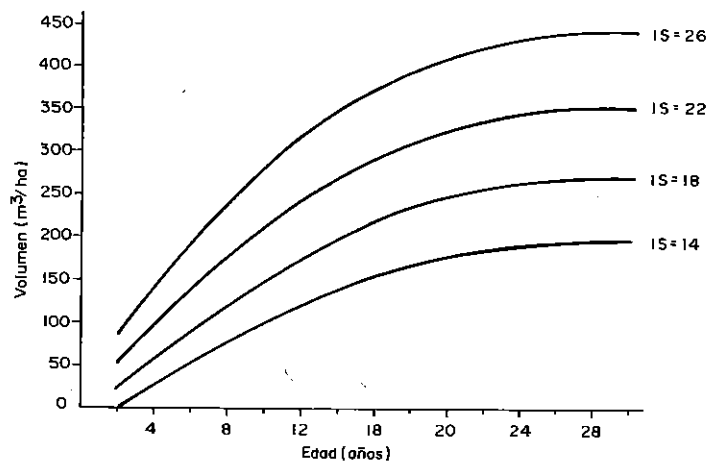


Fig. 1 El crecimiento en volumen total para los índices de sitios 14, 18, 22 y 26 en *Alnus acuminata* en Costa Rica

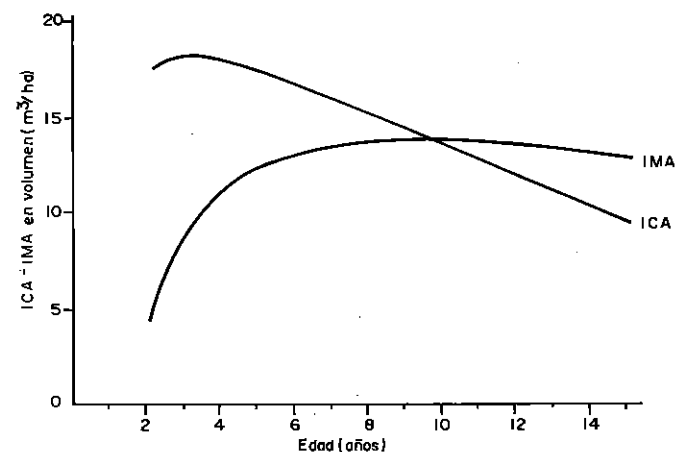


Fig. 2 El desarrollo del incremento corriente y medio anual en volumen por hectárea para un índice de 18 metros en *Alnus acuminata* en Costa Rica

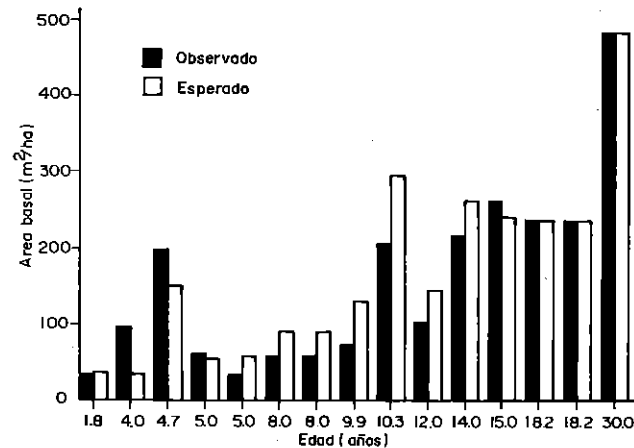


Fig. 3 Los valores esperados y observados en área basal de la muestra de validación de 15 parcelas de *Alnus acuminata* en Costa Rica

La validación del modelo sin manejo consiste en una comparación entre los valores observados en la muestra de 15 parcelas, y los valores esperados con el modelo base de la edad e índice de sitio dado. Cabe mencionar que la selección de las parcelas para la muestra fueron hechas en forma aleatoria, por clase de edad.

Los resultados de la comparación demuestran una diferencia promedio entre lo observado y esperado de 3.84 m³/ha en área basal, y 31.3 m³/ha en volumen, lo cual se considera alto y limita la aplicación del modelo. Sin embargo, un análisis de "t" con datos apareados indica que esta diferencia no es significativa (valores de "t" de 1.5 y 0.96 para área basal y volumen respectivamente). En el gráfico de los valores esperados y observados en área basal (Figura 3), aunque se notan diferencias grandes no muestra ninguna tendencia a sobre o subestimar los valores observados (no muestra sesgo).

PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO EN PLANTACIONES CON MANEJO

Para obtener una representación mejor de las condiciones de crecimiento del modelo, se agrupó la muestra para la validación de 15 parcelas con las 80 parcelas originales y se recalcularon los coeficientes del sistema de ecuaciones para el modelo sin manejo. Como las nuevas ecuaciones (Cuadro 2) están basadas en un mayor número de observaciones, se utilizaron éstas para desarrollar el modelo de predicción del rendimiento en plantaciones con manejo.

Cuadro 3. Sistema de ecuaciones reajustadas (con base en 95 parcelas) que forman el modelo de predicción de crecimiento y rendimiento de plantaciones de *Alnus acuminata* sin manejo, en Costa Rica

No.	Ecuación de regresión	coeficiente	error estandard	R ² (%) adj.
6.	ln(alt) = a + b*(1/edad) + c*(ln(is))	a = -0.1618	0.115	94
		b = -1.5754	0.060	
		c = 1.0288	0.039	
7.	N/ha = a + b*(edad)	a = 1255.9	71.019	17
8.	AB = a + b*edad + c*edad ² + d*is	Con edad > 24 años N/ha se mantiene igual	b = -33.8250	6.967
		a = -16.0925	2.795	76
		b = 2.1388	0.244	
		c = -0.0383	0.009	
		d = 0.8899	0.142	

Las variables están definidas en Cuadro 1.

Cuando la plantación llega a una densidad donde los árboles entran en competencia y se realiza un aclareo, es conocido que los árboles remanentes experimentan un incremento en el crecimiento. La modelación de este fenómeno se basó en la hipótesis de Marsh:

"El incremento de rodales con aclareos es equivalente a aquel de rodales no aclareados . . . de la misma masa y densidad . . . y de menor edad." (Marsh y Burgers, 4)

Esta hipótesis fue formulada con datos de varias especies de pino, sin embargo, se le ha encontrado válida para otras especies (Alder, 1).

Para incorporar esta hipótesis dentro del modelo, primero se formuló un programa de aclareos con la edad de la intervención y el área basal extraída. Después para cada aclareo se realizaron los siguientes pasos:

- (a) calcular el área basal remanente restando el área basal extraída con el aclareo del área basal total.

(b) determinar la edad "efectiva" de la masa remanente con la ecuación 9 abajo (lo cual es ecuación 8 con la edad despejada).

$$\text{edad efectiva} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4*(a + d*is - AB)*c}}{2*c} \quad (9)$$

Donde los coeficientes a,b,c son igual a los de ecuación 4 (Cuadro 2).

(c) calcular el área basal para la próxima edad en la tabla utilizando la edad efectiva (ecuación 9) más el incremento en edad entre líneas en la tabla.

El resultado de esta modificación fue obtener un crecimiento después del aclareo, igual al de una plantación más joven con la misma área basal. Con este componente dentro del modelo, se puede predecir el crecimiento en área basal después de cualquier intensidad seleccionada.

Para poder estimar el número de árboles extraídos se aplicó una "razón de aclareo" ("Proporción de Clareo" con la siguiente ecuación (1):

$$RA = \frac{N \text{ después del aclareo} / N \text{ antes del aclareo}}{AB \text{ después del aclareo} / AB \text{ antes del aclareo}} \quad (10)$$

Con algebra se puede despejar el dap promedio después del raleo (dap de los árboles remanentes) para obtener la ecuación 11:

$$\text{dap} = \frac{\text{dap antes del aclareo}}{RA} \quad (11)$$

Valores típicos para la razón de aclareo por abajo se encuentran entre 0.6 y 1 (Alder, 1). En ausencia de datos cuantitativos para simplificar el modelo se seleccionó valor de 0.8 para este ejemplo.

Con estas modificaciones del modelo sin manejo, se pueden calcular todos los otros parámetros para la tabla de

rendimiento. La incorporación del modelo dentro de una hoja electrónica permite confeccionar automáticamente, tablas de rendimiento para un determinado índice de sitio, número de árboles plantados y un esquema de aclareos. El Cuadro 4 es un ejemplo de una tabla de rendimiento para un índice de sitio de 18, 1600 árboles plantados por hectárea y un esquema de aclareos especificado como aclareos de 4.2, 6 y 6 m² de área basal extraído a los 6, 12 y 20 años respectivamente. En la Figura 4 se puede visualizar el desarrollo del volumen basado en esta tabla de rendimiento.

Cuadro 4. Tabla de rendimiento para plantaciones aclareadas de *Alnus acuminata* con un índice de sitio de 20 y con 1600 árboles por hectárea.

edad años	Arboles existentes					Arboles extraídos						
	N	dap	alt	AB	VOL	AB	N	dap	%	VOL	VOL	edad
	N/ha	cm	m	m ² /ha	m ³ /ha	m ² /ha	N/ha	cm	N	m ³	acum.	efic.
2	1600	5.7	7.6	4.0	23.4	0.0	0	0.0	0.0	0.0	23.4	2.0
6	808	10.6	12.8	7.2	59.5	4.2	792	7.6	49.5	30.5	90.0	3.6
10	808	14.9	14.2	14.0	123.1	0.0	0	0.0	0.0	0.0	153.6	7.6
12	418	18.3	14.6	10.9	97.0	6.0	390	13.1	48.3	47.4	174.9	5.8
16	418	22.9	15.1	17.1	153.4	0.0	0	0.0	0.0	0.0	231.3	9.8
20	243	29.0	15.4	16.1	144.0	6.0	174	20.8	41.7	53.9	275.8	9.0
24	243	33.4	15.6	21.3	190.6	0.0	0	0.0	0.0	0.0	322.4	13.0
26	243	35.0	15.7	23.4	209.8	0.0	0	0.0	0.0	0.0	341.6	15.0
30	243	37.4	15.8	26.7	240.2	0.0	0	0.0	0.0	0.0	372.0	19.0

* Edad eff. = edad efectiva utilizada para estimar el área basal en la próxima línea.

Una de las metas en el desarrollo del modelo es dar una herramienta para ayudar al técnico a encontrar la combinación de densidad de plantación y programa de aclareo que sea más adecuada para un índice de sitio especificado y para los objetivos en términos de productos a obtener.

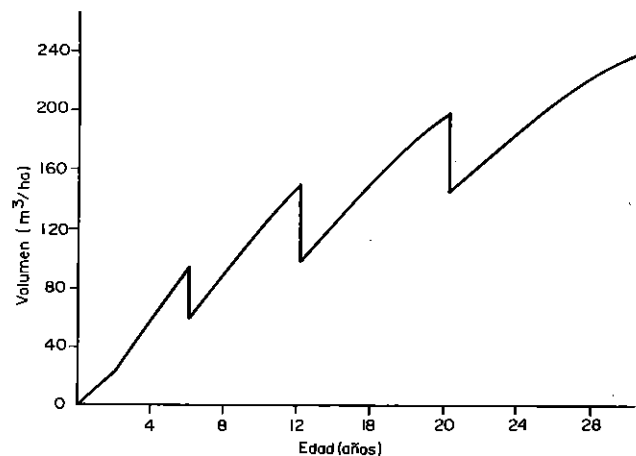


Fig. 4 Desarrollo del volumen para un índice de sitio de 18, a una densidad inicial de 1600 árboles/hectárea de Alnus acuminata el esquema de aclareo Cuadro 4

DISCUSION DE RESULTADOS

Este estudio presenta modelos preliminares de predicción de rendimiento del Jaúl, los cuales permiten la elaboración de tablas de rendimiento sin manejo, o con un esquema de aclareos. Para mejorar la predicción de estos modelos se recomienda: (1) aumentar la muestra de datos utilizados remidiendo las mismas parcelas y estableciendo parcelas nuevas en otras plantaciones y (3) establecer ensayos para evaluar el crecimiento bajo diferentes intensidades de aclareos.

El objetivo principal de este estudio fue el de mostrar el mecanismo metodológico para el desarrollo de modelos. Por lo tanto, el resultado obtenido en la elaboración de las tablas de rendimiento está sujeto a las limitaciones de la información

disponible, y se requiere de información adicional para ser utilizada en forma práctica.

Se espera que las técnicas descritas en este estudio sean de utilidad, no solamente para el modelaje del crecimiento de jaúl, sino también para otras especies donde los datos existentes son de parcelas sin manejo.

LITERATURA CITADA

1. ALDER, D. 1981. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos - predicción del rendimiento. Estudio FAO: Montes 22/2. V.2
2. CAMACHO, P. ; HUGHELL, D. 1989. Crecimiento del jaúl (Alnus acuminata), en Costa Rica. ITCR/CATIE. Unpublished.
3. CAMACHO, P. ; MURILLO, O. 1986. Algunos resultados preliminares de la epidometría del jaúl: Alnus acuminata (HBK) O. Kuntze. Cartago, Costa Rica, Departamento de Ingeniería Forestal, ITCR. 110 p.
4. MARSH, E.K. ; BURGERS, T.F. 1973. The response of even-aged pine stands to thinning. Forestry in S.Africa 14: 103-111.