
RENDIMIENTO, TURNO ÓPTIMO FORESTAL Y RENTABILIDAD DE PLANTACIONES FORESTALES DE *Tectona grandis* Y *Pinus patula* EN COLOMBIA

HÉCTOR IVÁN RESTREPO O., SERGIO ALONSO ORREGO S.,
JORGE IGNACIO DEL VALLE A. y JUAN CARLOS SALAZAR U.

RESUMEN

Las iniciativas de desarrollo e inversión forestal requieren la estimación del rendimiento y análisis económicos y financieros. Con datos provenientes de parcelas temporales de *Pinus patula* y parcelas permanentes de *Tectona grandis*, se estimaron modelos no lineales de efectos mixtos tipo von Bertalanffy, en función de la edad y covariables ambientales. Se usaron estimaciones de rendimiento forestal y flujos de caja por hectárea para la determinación del turno financiero y la rentabilidad. Los resultados indican que la asíntota y tasa de crecimiento de los modelos estimados para ambas especies se

pueden expresar en función de covariables ambientales, mientras que el parámetro de forma es un efecto fijo relacionado directamente con la tendencia del crecimiento biológico. Con la curva media de rendimiento y una tasa de interés real de 6,81%, se encontró que el turno financiero está entre 12-14 y entre 13-15 años para *P. patula* y *T. grandis*, respectivamente. Para *T. grandis* el valor económico del suelo (VES) es siempre positivo. Para *P. patula* el VES varió desde pérdidas de US\$ 1404/ha a ganancias de US\$ 1885/ha, según características de proyectos forestales contrastantes.

 Mientras que en América Latina y el Caribe se cuenta con 12,5×10⁶ha en plantaciones forestales (FAO, 2009), en Colombia su extensión se estima en 150000ha (FAO, 2005). Aunque Colombia tiene alto potencial forestal y ha suscitado bastante interés inversionista (López *et al.*, 2010), el desarrollo forestal comercial es todavía incipiente. El desarrollo de este potencial requerirá que las inversiones se sometan a un riguroso análisis de viabilidad tanto técnica como financiera.

Para la estimación del rendimiento forestal se pueden usar modelos empíricos como los modelos de

efectos mixtos no lineales (Hall y Bailey, 2001), los cuales describen relaciones entre una variable respuesta y covariables agrupadas en uno o más factores (Pinheiro y Bates, 2000). Un modelo no lineal en sus parámetros que ha mostrado tener características deseables en modelos de crecimiento como flexibilidad y explicación biológica es el von Bertalanffy (Pienaar y Turnbull, 1973; Pienaar, 1979; Vanclay, 1992, 2010). En este sentido, el modelo von Bertalanffy podría constituir una mejor alternativa para la estimación del rendimiento forestal, si se compara con los tradicionales modelos de Schumacher, Langdon, Vimmerstedt y Korf.

Los modelos de efectos mixtos no lineales tipo Bertalanffy se han usado para estimar el rendimiento forestal en función de efectos fijos y aleatorios. Los efectos fijos se han relacionado con densidad de árboles (Hall y Bailey, 2001), tratamientos silviculturales de presiembrado, características edáficas del sitio y la densidad de rodales (Hall y Clutter, 2004), clones (Calegario *et al.*, 2005), y precipitación y temperatura (Wang *et al.*, 2007). Y los efectos aleatorios se han relacionado con la variabilidad entre parcelas (Hall y Bailey, 2001), variabilidad en el rendimiento (Diéguez-Aranda *et al.*, 2006) y regiones geográficas (Bravo-Oviedo *et al.*,

PALABRAS CLAVE / Análisis de Rentabilidad / Faustmann / Modelos de Efectos Mixtos / *Pinus patula* / Rendimiento Forestal / *Tectona grandis* / Valor Esperado del Suelo (VES) / von Bertalanffy /

Recibido: 30/07/2010. Modificado: 05/12/2011. Aceptado: 06/12/2011.

Héctor Iván Restrepo O. Ingeniero Forestal y M.Sc. en Bosques y Conservación Ambiental, Universidad Nacional de Colombia (Unal). Dirección: Grupo de Investigación en Bosques y Cambio Climático, Unal, Sede Medellín, Calle 59A 63-020, Archivo y Correspondencia, Bloque 41, Of. 105. Medellín, Colombia. e-mail: hirestrepoo@unal.edu.co

Sergio Alonso Orrego S. Ingeniero Forestal, M.Sc. en Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente y Ph.D., Oregon State University, EEUU. Profesor, Unal-Medellín, Colombia. e-mail: saorrego@unal.edu.co

Jorge Ignacio del Valle A. Ingeniero Forestal y M.Sc. en Ciencias Forestales, Universidad de Costa Rica-CATIE, Costa Rica. Profesor, Unal-Medellín, Colombia. e-mail: jidvalle@unal.edu.co

Juan Carlos Salazar U. Matemático y Ph.D. en Estadística, University of Kentucky, EEUU. Profesor, Unal-Medellín, Colombia. jcsalaza@unal.edu.co

2007). No obstante, en Colombia son pocas las aplicaciones de modelos Bertalanffy para estimar el rendimiento forestal (Torres, 2004; Zapata, 2007; Torres y del Valle, 2007).

Para la determinación del turno y rentabilidad de plantaciones forestales se puede usar la solución de Faustmann (Samuelson, 1995). Esta aproximación se conoce como valor económico o valor esperado del suelo (VES), y representa el valor máximo que un inversionista estaría dispuesto a pagar por una determinada cantidad de tierra, de la cual obtiene ganancias aceptables a una mínima tasa de interés (Clutter *et al.*, 1992; Klemperer, 2003). Aunque existen varias investigaciones de rentabilidad de plantaciones forestales a nivel mundial (Reeves y Haight, 2000; Acuña y Drake, 2003; Cubbage *et al.*, 2007; Jones *et al.*, 2010) son pocos los trabajos de este tipo en Colombia (Vélez, 1975; Henao, 1982; López *et al.*, 2007).

El objetivo del presente estudio consiste en proporcionar una base conceptual y empírica para la determinación de la viabilidad técnica y financiera de inversiones forestales en Colombia. Para ello se estiman modelos de rendimiento forestal en función de covariables ambientales y se determina el turno óptimo forestal y la rentabilidad de las inversiones forestales.

Métodos

Área de estudio

El área de estudio está localizada en la región noroccidente de Colombia, en los departamentos de Antioquia, Córdoba y Sucre, entre las coordenadas geográficas $10^{\circ}8'16''$ y $5^{\circ}27'31''N$, y entre $77^{\circ}7'34''$ y $73^{\circ}52'42''O$ (Figura 1).

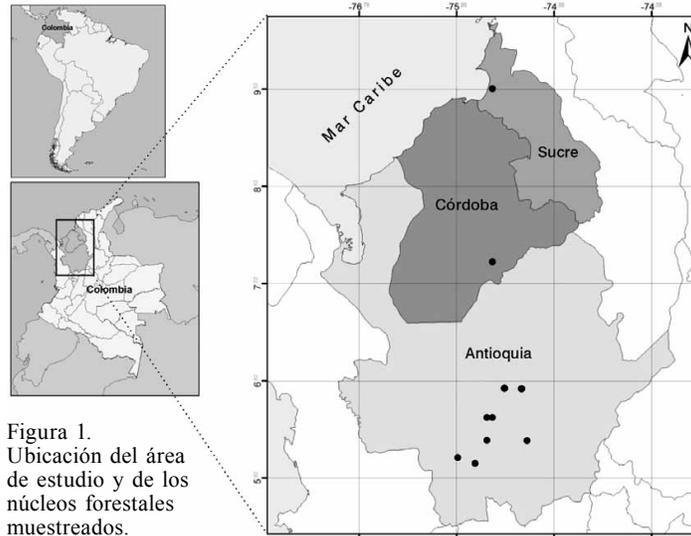


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de los núcleos forestales muestreados.

de datos consistió en mediciones realizadas en 1240 parcelas temporales de $250m^2$ durante el periodo 1998-2007 en rodales de *P. patula* ubicados en siete núcleos forestales de propiedad de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM). La tercera fuente de datos consistió en la medición de 40 parcelas temporales en plantaciones de *P. patula* de propiedad de Industrias Forestales Doña María y Cipreses de Colombia (IFDM&CC) (Lopera y Gutiérrez, 2000).

Las tres fuentes de información son homogéneas en cuanto a que no se utilizaron datos de lotes aclareados. La elección de *P. patula* y *T. grandis* corresponde a que la primera es la especie que más se plantó en la zona Andina colombiana (Endo, 1994) y, la segunda, por ser una de las especies forestales más apreciadas en los mercados internacionales por la alta calidad de su madera (Pandey y Brown, 2000; Bermejo *et al.*, 2004). Las variables ambientales usadas en el modelo de rendimiento

forestal se consideran espacialmente explícitas por representar información georreferenciada. Esta información proviene de variables espaciales obtenidas de sistemas de información geográfica, las cuales se usaron en la modelación del rendimiento forestal. Las variables o factores ambientales analizados fueron clima, pendiente y suelos, para cada punto geográfico que representa la ubicación de los sitios con información dasométrica. Variables climáticas como temperatura y precipitación se obtuvieron de la base de datos *WorldClim*, versión 1,4 (Hijmans *et al.*, 2005). En lo que respecta a la pendiente del terreno y la elevación, se calcularon para cada *pixel* o celda a partir del *SRTM* con curvas de nivel distantes 30m la una de la otra (NASA & NGA, 2008). Además, se contó con variables categóricas del suelo como pH, fertilidad, drenaje y profundidad efectiva para cada una de las unidades o asociaciones edáficas definidas en el mapa de suelos disponible en Antioquia (IGAC, 1979). En la Tabla I se presenta un resumen de los datos usados en la modelación del rendimiento forestal.

Para los análisis financieros se obtuvo información de proyectos de establecimiento de plantaciones forestales comerciales de varias empresas privadas y organismos públicos. En la Tabla II se presentan los egresos del año 0 al 15 para las dos especies estudiadas.

Modelaje y validación del rendimiento forestal

En la estimación del rendimiento forestal se usó el modelo de

TABLA I
RESUMEN DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LA ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO FORESTAL DE *P. patula* Y *T. grandis* CON MODELOS DE EFECTOS MIXTOS NO LINEALES

Datos	Variable	Unidad	<i>Pinus patula</i>				<i>Tectona grandis</i>			
			Mín	Máx	Media	Desv.	Mín	Máx	Media	Desv.
Los datos dasométricos, con su respectiva ubicación espacial, provienen de tres fuentes distintas de información. La base de datos de <i>T. grandis</i> proviene de 64 parcelas permanentes de 600 y 1000m ² ubicadas en Puerto Libertador (Córdoba) y Tolú (Sucre), medidas en promedio cada cuatro años en el periodo 1982-2007 en plantaciones de Argos S.A. La segunda base	Edad (t)	años	2,4	54,8	21,4	8,1	2,07	24,0	9,5	4,9
	Volumen (V)	(m ³ ·ha ⁻¹)	0,2	842,5	282,9	158,4	2,1	362,5	153,4	75,6
	Densidad	árboles/ha	40	3320	831	442	433	2433	1339	456
	Pendiente (P)	grados	0	54,9	14,4	6,5	1,3	7,9	3,6	1,6
	Elevación (E)	msnm	1693	2693	2216	210	40	164	86	17
	Temperatura media anual (Tma)	°C	13,9	20,4	17,4	1,1	26,9	27,4	27,2	0,1
	Temperatura media trimestre cálido (Tmte)	°C	15,3	21,3	18,0	1,1	27,5	28,3	27,7	0,2
	Temperatura media trimestre frío (Tmtf)	°C	13,5	19,7	16,8	1,1	26,5	26,9	26,8	0,1
	Precipitación media anual (Pma)	mm	1631	4176	2487	681	1186	2326	2188	241
	Precipitación mes más húmedo (Pmmh)	mm	222	453	310	74	217	300	287	17
	Precipitación mes más seco (Pmms)	mm	45	169	72	31	10	38	33	6
	Precipitación trimestre húmedo (Pth)	mm	568	1328	850	228	501	885	844	83
	Precipitación trimestre seco (Pts)	mm	186	538	269	88	33	144	132	24

TABLA II
COSTOS Y GASTOS PARA EL
ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DE
PLANTACIONES FORESTALES CON
COBERTURA PREVIA EN PASTOS*

Año	<i>Pinus patula</i>	<i>Tectona grandis</i>
0	885	1211
1	635	306
2	290	298
3	120	207
4	219	258
5	76	115
6	52	218
7	52	95
8	52	95
9	53	96
10	53	96
11	144	109
12	54	97
13	54	221
14	54	97
15	55	98

* Para cobertura previa de vegetación arbustiva de porte bajo se debe sumar al establecimiento 220 y 680 US\$/ha para *Tectona grandis* y *Pinus patula*, respectivamente. Valores en US\$/ha de 2010.

von Bertalanffy en su forma integrada, la cual se expresa como

$$Y = A(1 - b \exp(-kt))^n, \text{ con } n = (1 - m)^{-1} \quad (1)$$

donde A: asíntota ($m^3 \cdot ha^{-1}$), t: edad (años), b: parámetro que corresponde al valor que toma Y cuando $t = 0$ (es decir, Y_0 o parámetro de localización), k: tasa de crecimiento, n y m: parámetros de forma y constante alométrica, respectivamente. Todos los parámetros pueden ser explicados con base en conceptos biológicos de crecimiento (Pienaar y Turnbull, 1973).

Varios modelos de efectos mixtos se ajustaron con procedimientos de máxima verosimilitud con la librería nlme de R (Pinheiro y Bates, 2000), en los que se evaluó el efecto de cada grupo de covariables incluidas en los efectos fijos sobre el ajuste estadístico con base en el Criterio de Información de Schwarz (SBC, por sus siglas en inglés). Este criterio está compuesto por el Criterio de Información de Akaike y el Criterio de Información Bayesiana (AIC y BIC, por sus siglas en inglés, respectivamente) (Pinheiro y Bates, 2000). Específicamente, los modelos no lineales mixtos ajustados son de la forma

$$y = f(\varphi_{ij}, v_{ij}) + \varepsilon_{ij}, \quad i=1, \dots, M, \quad j=1, \dots, Z_i \quad (2)$$

donde el componente no estocástico en la Ec. 2 se puede expresar en términos de un modelo tipo von Bertalanffy como

$$f(\varphi_{ij}, v_{ij}) = A(\varphi_{ij}, v_{ij})(1 - b \exp(-k(\varphi_{ij}, v_{ij})t))^n \quad (3)$$

En las Ecs. 2 y 3, φ_{ij} : vector de parámetros fijos y valores aleatorios, v_{ij} : vector de covariables, ε_{ij} : término de error intrasujeto normalmente distribuido, M: número de parcelas y Z_i : número de mediciones tomadas en la i-ésima parcela.

En la presente aplicación A depende del pH del suelo, la pendiente del terreno y de un efecto aleatorio asociado al núcleo forestal; k depende de la precipitación media anual y n es un efecto fijo puro que depende exclusivamente de la ontogenia o tendencia del crecimiento. Aunque los efectos aleatorios se pueden considerar como parámetros, formalmente los efectos aleatorios representan una fuente de variación aleatoria en el modelo, y sus valores no deben considerarse como estimados (Pinheiro y Bates, 2000).

Para la validación de los modelos de rendimiento forestal se excluyeron aleatoriamente 64 y 30 datos (mínimo 5% de la base de datos original) de *P. patula* y *T. grandis*, respectivamente. Para la comparación entre observados y estimados se usaron las pruebas estadísticas t-student y Wilcoxon.

Cálculo de la renta y turno económico en plantaciones forestales

Los modelos estimados se usaron para predecir la curva media del rendimiento en volumen de madera, para cada año del horizonte de planeación del proyecto. El precio de la madera en pie de *P. patula* correspondió al promedio en las subastas de madera hechas por EPM de acuerdo a dos categorías de uso, aserrío= 50 US\$/ m^3 y otros usos= 16,7 US\$/ m^3 . El precio de la madera de *T. grandis* se definió como

$$P(t) = \begin{cases} 7,5 \times t, & \forall t \leq 20 \\ 150, & \forall t > 20 \end{cases} \quad (4)$$

donde P(t): precio promedio de madera en pie (US\$/ m^3) de una plantación a la edad t (años). La especificación de la Ec. 4 pretende capturar la variación temporal observada del precio en el mercado, en el que se asigna un precio mayor a la madera proveniente de plantaciones maduras (Kemperer, 2003). Al multiplicar los volúmenes estimados por el respectivo precio de la madera se obtuvieron los ingresos.

Los egresos, a su vez, están representados por rubros que corresponden a una salida de recursos económicos en efectivo, o rubros a tener en cuenta en el flujo de caja como depreciaciones, amortizaciones y gastos en general.

Con base en el flujo de caja libre típico, se definieron seis escenarios por especie para examinar el efecto en la rentabilidad del proyecto de dos coberturas

previas al establecimiento de la plantación (vegetación arbustiva de porte bajo y pastos) y tres alternativas mutuamente excluyentes de estímulos económicos (sin estímulos económicos, Certificado de Incentivo Forestal -CIF, Ley 139 de 1994; y exenciones tributarias aplicables al impuesto a la renta, Decreto 2755 de 2003).

Una vez estructurado el flujo de caja para cada proyecto se calculó el valor económico del suelo, VES, empleando la siguiente fórmula (Clutter *et al.*, 1992; Klemperer, 2003),

$$VES = \frac{\sum_{j=0}^u FC_j (1+i)^{-uj}}{(1+i)^u - 1} \quad (5)$$

donde VES: valor económico del suelo forestal, FC_j : flujo de caja del j-ésimo año, u: duración del ciclo de producción en años, i: tasa de descuento o interés, la cual se asumió igual a 6,81% (Vásquez, 2003) y refleja el comportamiento de largo plazo de la tasa de interés real.

$\sum_{j=0}^u FC_j (1+i)^{-uj}$ denota la renta periódica de la tierra cada u años. Además del VES, se calcularon el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) de la primera rotación como criterios complementarios para la evaluación de la bondad de inversión de proyectos forestales comerciales. El momento en el cual ocurre el máximo de la curva de VES corresponde al turno financiero óptimo de la plantación forestal. Los cálculos financieros se realizaron mediante el uso de un algoritmo escrito en lenguaje de programación *Visual Basic for Applications*.

Resultados

El modelo estimado para *P. patula* permitió predecir el rendimiento forestal en función de efectos fijos y aleatorios. En lo que respecta a los efectos fijos se identificaron tres covariables ambientales. El comportamiento de la asíntota (A) se explicó mediante una ecuación lineal en función de un intercepto, la categoría del pH del suelo (pH) y la pendiente del terreno (P), medida en grados. Por otra parte, la tasa de crecimiento (k) se relacionó linealmente con un intercepto y la precipitación media anual (Pma). El parámetro de forma (n) no exhibió una relación claramente discernible con las covariables analizadas y, por tanto, se puede considerar como un efecto fijo puro relacionado directamente con la ontogenia. Todos los parámetros estimados fueron estadísticamente muy significativos ($p < 0,05$).

La curva de rendimiento forestal estimada para *P. patula* exhibe un

comportamiento tipo Mitscherlich, con una asíntota entre 142 y 410m³·ha⁻¹. Por otra parte, se puede apreciar que para el sitio promedio, la intercepción de la curva de incremento corriente anual (ICA) con la curva de incremento medio anual (IMA) ocurre a los 15 años (Figura 2), lo cual define el turno biológico. El turno biológico también coincide con el IMA máximo que para el sitio promedio es de 14m³·ha⁻¹·a⁻¹ (Figura 2). El modelo se puede escribir como

$$V = (221,7 + 25,95 \times \text{pH} + 1,839 \times P + EA) \times (1 - \exp(- (0,475 - 7,8 \times 10^{-5} \times \text{Pma}) \times t))^{9,007} \quad (6)$$

EA= 0 ± 5,92 (ES); AIC= 13963; BIC= 14008; logLik= -6.973; N= 1163

donde V: volumen (m³·ha), pH: pH del suelo, P: pendiente del terreno (grados), EA: efecto aleatorio del núcleo, Pma: precipitación media anual (mm/año), t: edad de la plantación (años), y ES: error estándar.

El modelo estimado para *T. grandis* permitió predecir también el rendimiento forestal con efectos fijos y aleatorios. La asíntota (A) se relacionó con un intercepto y la temperatura media del trimestre más frío (Tmtf). La tasa de crecimiento (k) fue explicada con un intercepto y la precipitación media anual (Pma). Para el parámetro de forma (n) no se encontró ninguna relación con covariables ambientales y, por tanto, se consideró como un efecto fijo puro. Todos los parámetros que se estimaron en el modelo de *T. grandis* fueron estadísticamente muy significativos, excepto la temperatura media del trimestre más frío, Tmtf (p<0,054). La curva de rendimiento forestal presenta un comportamiento tipo Mitscherlich (Osumi e Ishikawa, 1983), con asíntota entre 81 y 548m³·ha⁻¹. El turno biológico ocurre a los 7 años con IMA máximo para el sitio promedio de 19m³·ha⁻¹·a⁻¹ (Figura 2). El modelo se puede escribir como

$$V = (6331,575 - 226,553 \times \text{Tmtf} + EA) \times (1 - \exp(- (0,313 - 5,51 \times 10^{-5} \times \text{Pma}) \times t))^{1,926} \quad (7)$$

EA= 0 ± 10,3 (ES); AIC= 2596; BIC= 2625; logLik= -1290; N= 288

donde V: volumen (m³/ha), Tmtf: temperatura media del trimestre más frío (°C), EA: efecto aleatorio de la parcela, Pma: precipitación media anual (mm/año), t: edad de la plantación (años), y ES: error estándar.

En la estimación de ambos modelos se corrigió la presencia de heterocedasticidad mediante el uso de una estructura de varianza potencial, que consiste en elevar a una potencia el inverso del i-ésimo residual. También se eliminaron algunas observaciones (~50) consideradas

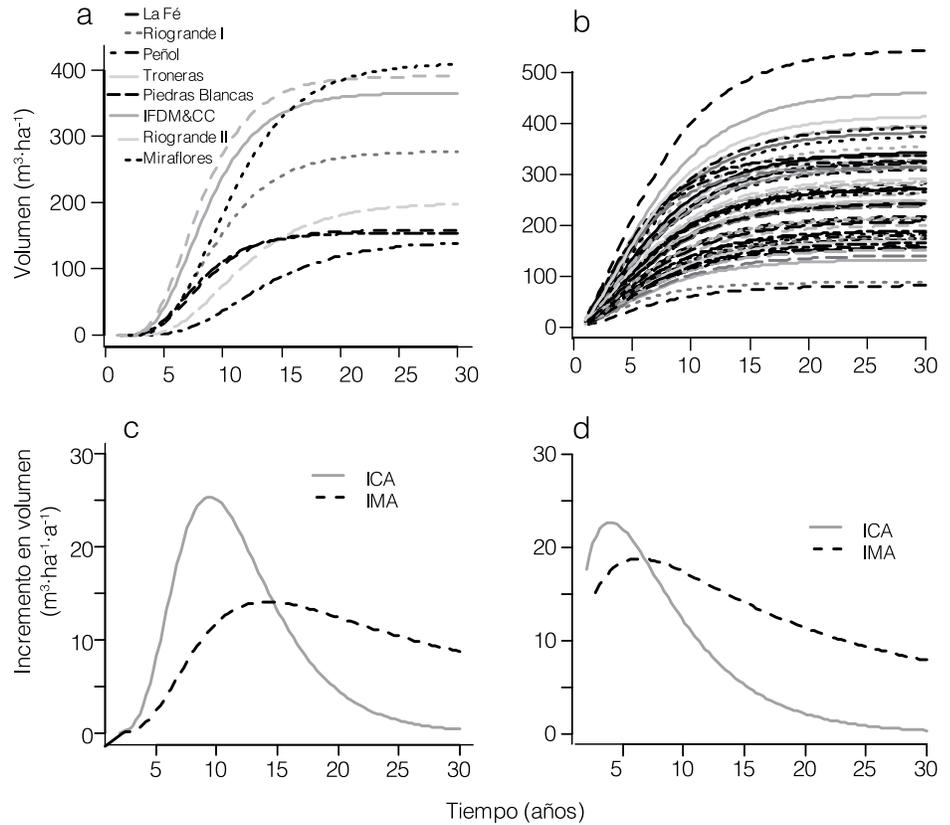


Figura 2. Curvas de rendimiento forestal. a: *Pinus patula*; b: *Tectona grandis*. Incremento corriente y medio anual (ICA, IMA) para *P. patula* (c) y para *T. grandis* (d).

como extremas en el modelo de *P. patula*, definidas como aquellas bien sea por encima o por debajo de dos residuales estandarizados.

Los resultados de las pruebas de validación sugieren que no existen diferencias significativas (p>0,05) entre los valores de rendimiento observados y los estimados con el modelo de efectos mixtos no lineales (Tabla III).

El turno financiero óptimo para *P. patula* varía entre 12 y 14 años, según los distintos escenarios evaluados. Los resultados sugieren que la rentabilidad de los proyectos de *P. patula* dependen sustancialmente de la cobertura previa al establecimiento y los estímulos económicos o tributarios que apalanquen la inversión (Tabla IV). Los turnos financieros óptimos para *T. grandis* varían entre 13 y 15 años. En lo que respecta a los escenarios, los resultados en *T. grandis* contrastan sustancialmente con lo hallado para *P. patula*, debido a que todos los escenarios evaluados fueron rentables (Tabla IV).

Discusión

Los modelos de efectos mixtos no lineales estimados para las especies forestales *P. patula* y *T. grandis* permiten el uso de covariables ambientales en la estimación del

rendimiento forestal. Estos modelos constituyen un aporte novedoso tanto en Colombia como en América Latina, ya que podrían emplearse en la estimación de la producción forestal en sitios con condiciones biofísicas similares a aquellas que caracterizan las áreas de estudio en la presente investigación. Las predicciones estadísticas, sin embargo, deberían tomarse con precaución debido a la omisión en los modelos de otras variables ambientales que podrían influenciar también la forma de la curva y la tasa de crecimiento en especies forestales.

La asíntota (A) en el modelo de rendimiento forestal de *P. patula* en Antioquia es explicada por el pH del suelo y la pendiente del terreno. Estos resultados son consistentes con resultados previos en los que tanto factores topográficos como edáficos parecen influenciar significativamente el rendimiento forestal (Evans, 1974;

TABLA III
VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE RENDIMIENTO ESTIMADOS PARA CADA UNA DE LAS DOS ESPECIES ANALIZADAS

	<i>Pinus patula</i>	<i>Tectona grandis</i>
Número de datos	64	30
t-student	-1,691 (0,096)	0,668 (0,509)
Wilcoxon	1.891 (0,456)	441 (0,901)

Valores de p entre paréntesis

Grey, 1979; Louw y Scholes, 2006). Las curvas de rendimiento para *P. patula* y *T. grandis* obtenidas de los modelos estimados exhiben ambas comportamiento tipo Mitscherlich. De acuerdo con Osumi e Ishikawa (1983) cuando $0 < m < 1$ en el modelo de von Bertalanffy, se obtienen modelos tipo Mitscherlich y se caracterizan por presentar tasas de crecimiento iniciales (ICA) muy rápidas pero que culminan muy rápidamente (Figura 2). El valor del parámetro de forma $m = 0,481$ para *T. grandis* da cuenta de su conocido explosivo crecimiento inicial (Torres, 2004) y su más rápida culminación comparado con *P. patula*, que con $m = 0,889$ presenta tasas iniciales de ICA menores pero con culminación más tardía. Aunque las tasas de crecimiento encontradas en esta investigación se encuentran dentro del intervalo de las reportadas por otros autores, el turno biológico en Colombia es significativamente menor que el reportado para otras latitudes (Tabla V).

Los núcleos forestales más productivos son Riogrande II, Miraflores y los rodales de Industrias Forestales Doña María y Cipreses de Colombia (Figura 2). El núcleo forestal de más bajo rendimiento forestal es Peñol, probablemente debido a su elevada precipitación la cual en algunos lugares es hasta de 4200mm/año. La variabilidad no explicada por las covariables está contenida en los efectos aleatorios. No obstante, las diferencias de rendimientos entre núcleos pueden deberse a interacciones entre las variables e incluso al efecto de los microorganismos del suelo, factores no analizados en la presente investigación. En la estimación del modelo de rendimiento de *T. grandis* se encontró que existe relación entre la asíntota (A) y la temperatura media del trimestre más frío (Tmtf). Las variables topográficas no explicaron el comportamiento de la asíntota, resultado consistente con lo encontrado en África (Drechsel y Zech, 1994), aunque sí puede haber influencia de variables edáficas (Lugo *et al.*, 1988; Vanclay, 1992), factor no incluido en el modelo de *T. grandis*. Los resultados del presente estudio también sugieren que la tasa intrínseca de crecimiento (k) en teca se explica por la precipitación y que el parámetro de forma (n) refleja únicamente la ontogenia o tendencia del crecimiento biológico de esta especie.

La gran variabilidad de asíntotas encontradas permite concluir que en la zona de estudio se presentan los potenciales productivos más bajos y altos que los reportados en otros lugares del mundo. No obstante, las tasas de crecimiento son, en promedio, superiores, lo cual incide también en que los turnos biológicos sean los más cortos (Tabla V).

En lo que respecta al análisis económico, no es usual la determina-

TABLA IV
DETERMINACIÓN DEL TURNO FINANCIERO ÓPTIMO Y RENTABILIDAD DE PLANTACIONES DE *P. patula* Y *T. grandis* BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE ESTRUCTURA FINANCIERA DEL PROYECTO FORESTAL Y COBERTURAS TERRESTRES

Cobertura previa	Variable	<i>Pinus patula</i>			<i>Tectona grandis</i>		
		Sin incentivos	CIF	Decreto 2755	Sin incentivos	CIF	Decreto 2755
Vegetación arbustiva de porte bajo	Turno	14	13	13	15	14	14
	VES	-1.404	-229	892	4.334	5.453	10.323
	VPN	-846	-133	513	2.720	3.284	6.219
	TIR (%)	3,9	6,2	8,3	12,1	14,8	16,9
Pasto	Turno	13	12	12	15	13	14
	VES	-459	741	1.885	4.832	5.982	10.842
	VPN	-264	406	1.030	3.033	3.442	6.532
	TIR (%)	5,7	9,2	10,6	13,1	17	18

CIF: Certificado de Incentivo Forestal, Ley 139 de 1994; Decreto 2755 constituye una exención tributaria al impuesto a la renta derivada de la actividad de aprovechamiento forestal. Valores de VES y VPN en US\$/ha de 2010.

TABLA V
RENDIMIENTO FORESTAL, INCREMENTOS MEDIOS ANUALES (IMA) Y TURNOS BIOLÓGICOS PARA *P. patula* Y *T. grandis* EN OTROS PAÍSES

País	Asíntota (m ³ ·ha ⁻¹)	IMA max (m ³ ·ha ⁻¹ ·año)	Turno biológico (años)	Referencia
<i>Pinus patula</i>				
Colombia	142-410	7-27	10-24	Este estudio (Endo, 1994) (Verzino <i>et al.</i> , 1999) (Grey, 1979)
Colombia	SD	13-15,8	11*	
Argentina	SD	22,5-24,1	16-21	
Sudáfrica	SD	20,6	20*	
<i>Tectona grandis</i>				
Colombia	81-548	18-34	7	Este estudio (Henao, 1982) (Nunifu y Murchinson, 1999) (Thapa y Gautam, 2005) (Pandey y Brown, 2000) (Bermejo <i>et al.</i> , 2004) (Pérez y Kanninen, 2005)
Colombia	200	15	6	
Ghana	144-567	4-14	31-48	
Nepal	153	14,5	10,5*	
India	172	2,7-12,3	SD	
Costa Rica	200-250	9-15	11-15	
Costa Rica	268-524	11-25	10-20	

SD: Sin dato. *Corresponde a la edad del IMA reportado y no al turno biológico.

ción del turno óptimo forestal y la rentabilidad para dos especies forestales de gran importancia en Colombia. El turno financiero óptimo y la rentabilidad de plantaciones de *P. patula* varió entre 12-14 años y entre -1404 y 1885 US\$/ha, respectivamente. La variación es explicada por la cobertura previa al establecimiento de la plantación y a los incentivos económicos y tributarios a los cuales podría acceder el inversionista. La decisión de plantar en un pastizal respecto a un área en estado sucesional más avanzado y con CIF, hace que el proyecto sea rentable en lugares con precio de tierra inferiores a 741 US\$/ha. Asimismo, acceder a la exención tributaria permite obtener una rentabilidad 2,5 veces mayor que con el acceso al CIF (Tabla IV).

Son pocos los estudios en Colombia que han determinado la rentabilidad y la rotación óptima para plantaciones de *P. patula*. Aún a nivel interna-

cional sólo algunos trabajos hacen alusión explícita a la rotación óptima del género *Pinus*. Aunque no se hace referencia a un turno forestal óptimo, el ciclo de rotación que usa Smurfit Kappa Cartón de Colombia para plantaciones de *P. patula* está entre 10 y 15 años (Endo, 1994). En Suazilandia, Sudáfrica, la edad de rotación del *P. patula* está entre 12 y 16 años (Evans, 1974). En Argentina, por su parte, se suelen aprovechar las plantaciones de pinos a edades que varían entre 28 y 30 años (Verzino *et al.*, 1999), sin ser necesariamente turnos óptimos. Las rotaciones óptimas encontradas en el presente estudio son menores a las de otras latitudes, lo cual es favorable ya que se recuperaría la inversión en menor tiempo. El VES de exención tributaria (Decreto 2755/2003) está en el intervalo 892-1885 US\$/ha, el cual es similar y comparable con los reportados por otros autores a nivel interna-

cional ya que éstos generalmente no incluyen el efecto de los impuestos (Tabla VI).

Para plantaciones de teca, los turnos financieros óptimos varían entre 13 y 15 años, con valores de VES siempre positivos que se incrementan sustancialmente con los estímulos económicos. Son varios los trabajos que reportan turnos para teca entre 40 y 60 años (Pandey y Brown, 2000; Bailey y Harjanto, 2005; Thapa y Gautam, 2005). No obstante, se tiene evidencia de que el turno para teca en Colombia podría ser menor de 25 años (Henaó, 1982), edad a la que se suele realizar, en promedio, la corta final en Costa Rica (Bermejo *et al.*, 2004; Pérez y Kanninen, 2005) y en Panamá (Zanin, 2005). Las altas asíntotas y tasas de crecimiento de teca en Colombia reducen la rotación óptima con respecto a otros países, lo cual disminuye la percepción de riesgo en proyectos forestales al recuperarse la inversión en menor tiempo. El VES del escenario de exención tributaria está en el rango 10323-10842 US\$/ha, valores significativamente superiores a los encontrados en Indonesia los cuales están entre -96 y 1851 US\$/ha y superiores a los reportados para Venezuela, 9800 US\$/ha (Cubbage *et al.*, 2010).

Los turnos financieros óptimos y rentabilidades están necesariamente influenciados por el rendimiento forestal, la tasa de interés, los precios de la madera y el costo de la tierra. Esta última variable y los estímulos económicos son fundamentales en la viabilidad financiera de proyectos forestales. Ello porque un costo muy alto de la tierra implica también alto costo de oportunidad del capital y, por tanto, mayor exigencia para la rentabilidad del proyecto forestal. Así, para aquellos escenarios de *P. patula* analizados en los que el valor de VES es negativo o, incluso, menor al valor comercial de la tierra, la conclusión es que el proyecto es poco viable desde una perspectiva financiera. Por otra parte, los proyectos con teca pueden realizarse en tierras aún más costosas sin que se ponga en peligro la rentabilidad y viabilidad de la inversión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de César Augusto Urrego, Danny Alexander Torres, Víctor Hugo Gutiérrez, Gabriel Jaime Lopera, Juan David Arango, Ingrid Natalia Mazo y Lina María Jiménez, a Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM) y Argos S.A. por suministrar los datos para realizar los modelos de rendimiento, y a la Dirección de Investigación Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (proyecto 20201007165) por la financiación parcial de la presente investigación.

TABLA VI
TURNOS FINANCIEROS ÓPTIMOS Y VALOR ECONÓMICO DEL SUELO
(VES) PARA DIFERENTES ESPECIES DE *Pinus* EN AMÉRICA

País	Especie	Turno óptimo (años)	VES (US\$/ha)	Referencia
Colombia	<i>Pinus patula</i>	12-14	892-1885 (1389)*	Esta investigación
Colombia	<i>Pinus caribea</i>	10	577-2145 (1361)	(López <i>et al.</i> , 2007)
Chile	<i>Pinus radiata</i>	22	3793	(Cubbage <i>et al.</i> , 2007)
Chile	<i>Pinus radiata</i>	21	186	(Acuña y Drake, 2003)
Brasil	<i>Pinus taeda</i>	18	2829	(Cubbage <i>et al.</i> , 2007)
Argentina	<i>Pinus taeda</i>	20	534-1658 (1096)	(Cubbage <i>et al.</i> , 2007)
Uruguay	<i>Pinus taeda</i>	22	2271	(Cubbage <i>et al.</i> , 2007)
Georgia, EEUU	<i>Pinus taeda</i>	20-35	357-660 (509)	(Reeves y Haight, 2000)
Mississippi, EEUU	<i>Pinus taeda</i>	21-26	39-4150 (2056)	(Jones <i>et al.</i> , 2010)

US\$ de 2010. *Valores correspondientes al escenario de exención tributaria. Los valores en paréntesis corresponden a la media del rango reportado.

REFERENCIAS

- Acuña E, Drake F (2003) Análisis del riesgo en la gestión forestal e inversiones silviculturales: una revisión bibliográfica. *Bosque* 24: 113-124.
- Bailey JD, Harjanto NA (2005) Teak (*Tectona grandis* L.) tree growth, stem quality and health in coppiced plantations in Java, Indonesia. *New Forests* 30: 55-65.
- Bermejo I, Cañellas I, San Miguel A (2004) Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecol. Manag.* 189: 97-110.
- Bravo-Oviedo A, del Río M, Montero G (2007) Geographic variation and parameter assessment in generalized algebraic difference site index modelling. *Forest Ecol. Manag.* 247: 107-119.
- Calegario N, Daniels RF, Maestri R, Neiva R (2005) Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal *Eucalyptus* plantation case study. *Forest Ecol. Manag.* 204: 11-20.
- Clutter JL, Fortson JC, Pienaar LV, Brister GH, Bailey RL (1992) *Timber Management: A Quantitative Approach*. Wiley. Nueva York, EEUU. 333 pp.
- Cubbage F, Mac Donagh P, Sawinski Junior J, Rubilar R, Donoso P, Ferreira A, Hoefflich V, Morales V, Ferreira G, Balmelli G, Siry J, Báez M, Alvarez J (2007) Timber investment returns for selected plantations and native forest in South America and Southern United States. *New Forests* 33: 237-255.
- Cubbage F, Koesbandana S, MacDonagh P, Rubilar R, Balmelli G, Morales V, De La Torre R, Murara M, Hoefflich V, Kotze H, González R, Carrero O, Frey G, Adams T, Turner J, Lord R, Huang J, MacIntyre C, McGinley K, Abt R, Phillips R (2010) Global timber investments, wood costs, regulation, and risk. *Bio-mass Bioenergy* 34: 1667-1678.
- Diéguez-Aranda U, Granadas-Arias J, Álvarez-González JG, Gadow KV (2006) Site quality curves for birch stands in north-western Spain. *Silva Fennica* 40: 631-644.
- Drechsel P, Zech W (1994) DRIS evaluation of teak (*Tectona grandis* L.f.) mineral nutrition and effects of nutrition and site quality on teak growth in West Africa. *Forest Ecol. Manag.* 70: 121-133.
- Endo M (1994) CAMCORE: Twelve years of contribution to reforestation in the Andean region of Colombia. *Forest Ecol. Manag.* 63: 219-233.
- Evans J (1974) Some aspects of the growth of *Pinus patula* in Swaziland. *Commonw. Forest Rev.* 53: 57-62.
- FAO (2005) *Situación de los Bosques del Mundo*. UN Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 153 pp.
- FAO (2009) *Situación de los Bosques del Mundo*. UN Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 158 pp.
- Grey DC (1979) Site quality prediction for *Pinus patula* in the Glangarry area, Transkei. *S. Afr. Forestry J.* 111: 44-48.
- Hall DB, Bailey RL (2001) Modeling and prediction of forest growth variables based on multilevel nonlinear mixed models. *Forest Sci.* 47: 311-321.
- Hall DB, Clutter M (2004) Multivariate multilevel nonlinear mixed effects models for timber yield predictions. *Biometrics* 60: 16-24.
- Henaó I (1982) Estudio de rendimientos y rentabilidad en una plantación de teca (*Tectona grandis* L.f.) del departamento de Córdoba, Colombia. *Crón. Forest. Medio Amb.* 2: 1-78.
- Hijmans R, Cameron S, Parra J, Jones P, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25: 1965-1978.
- IGAC (1979) *Suelos del Departamento de Antioquia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 2354 pp.
- Jones P, Grado S, Demarais S (2010) Financial analysis of intensive pine plantation establishment. *Journal of Forest Economics* 16: 101-112.
- Klemperer WD (2003) *Forest Resource Economics and Finance*. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. 551 pp.
- Lopera GJ, Gutiérrez VH (2000) *Viabilidad Técnica y Económica de la Utilización de Pinus patula como Sumidero de CO₂*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 146 pp.
- López AM, Barrios A, Ortega A, Nieto VM, Gasca G, Salamanca M (2007) Empleo de un modelo de crecimiento y rendimiento para la determinación de la edad óptima de rotación de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* creciendo en la región oriental de Colombia. *Col. Forest.* 10: 119-126.
- López J, de la Torre R, Cubbage F (2010) Effect of land prices, transportation cost, and site

- productivity on timber investment returns for pine plantations in Colombia. *New Forests* 39: 313-328.
- Louw JH, Scholes MC (2006) Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. *Forest Ecol. Manag.* 225: 94-103.
- Lugo A, Brown S, Chapman J (1988) An analytical review of production rates and stemwood biomass of tropical forest plantations. *Forest Ecol. Manag.* 23: 179-200.
- NASA, NGA (2008) *Shuttle Radar Topography Mission*. National Geospatial Intelligence Agency / National Aeronautics and Space Administration. www2.jpl.nasa.gov/srtm.
- Nunifu TK, Murchinson HG (1999) Provisional yield models of teak (*Tectona grandis* Lim F.) plantations in northern Ghana. *Forest Ecol. Manag.* 120: 171-178.
- Osumi S, Ishikawa T (1983) Applicability of the Richards' growth function to analysis of growth of trees. *Sci. Rep. Kyoto Prefect. Univ. Agric.* 35: 49-74.
- Pandey D, Brown C (2000) Teak: a global overview. *Unasylva* 201: 3-13
- Pérez D, Kanninen M (2005) Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecol. Manag.* 210: 425-441.
- Pienaar LV (1979) An approximation of basal area growth after thinning based on growth in unthinned plantations. *Forest Sci.* 25: 223-232.
- Pienaar LV, Turnbull KJ (1973) The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *Forest Sci.* 91: 2-22.
- Pinheiro JC, Bates DM (2000) *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer. Nueva York, EEUU. 528 pp.
- Reeves LH, Haight RG (2000) Timber harvest scheduling with price uncertainty using Markowitz portfolio optimization. *Ann Oper. Res.* 95: 229-250.
- Samuelson PA (1995) Economics of forestry in an evolving society. *J. Forest Econ.* 1:115-150.
- Thapa HB, Gautam SK (2005) Growth performance of *Tectona grandis* in the western Terai of Nepal. *Banko Janakari* 15: 6-12
- Torres DA (2004) *Modelación del Crecimiento y Producción en Volumen y Biomasa de la Teca*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 48 pp.
- Torres DA, del Valle JI (2007) Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. *New Forests* 34: 293-305.
- Vanclay J (1992) Assessing site productivity in tropical moist forest: a review. *Forest Ecol. Manag.* 54: 257-287.
- Vanclay J (2010) Robust relationship for simple plantation growth models based on sparse data. *Forest Ecol. Manag.* 259: 194-198.
- Vásquez D (2003) *Mecanismo de Cobertura para el Riesgo de Tasa de Interés Real de los Bancos Hipotecarios Colombianos*. Borrador 237. Banco de la República de Colombia. Bogotá, Colombia. 46 pp.
- Vélez N (1975) La rotación financiera en plantaciones de ciprés. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 30: 23-57.
- Verzino G, Ingaramo P, Joseau J, Astini E, Rienzo JD, Dorado M (1999) Basal area growth curves for *Pinus patula* in two areas of the Calamuchita Valley, Córdoba, Argentina. *Forest Ecol. Manag.* 124: 185-192.
- Wang Y, LeMay VM, Baker TG (2007) Modeling and prediction of dominant height and site index of *Eucalyptus globulus* plantations using a nonlinear mixed-effects model approach. *Can. J. Forest Res.* 37: 1390-1403.
- Zanin D (2005) *Feasibility of Teak Production for Smallholders in Eastern Panamá*. Tesis. Michigan Technological University. Houghton, MI, EEUU. 147 pp.
- Zapata M (2007) Modelos de sitio para plantaciones tropicales. Caso de estudio: aplicación de modelos jerárquicos bayesianos. *XVII Simposio Nacional de Estadística*. Cali, Colombia.

YIELD, OPTIMAL TURNOVER AND PROFITABILITY IN FOREST PLANTATIONS OF *Tectona grandis* AND *Pinus patula* IN COLOMBIA

Héctor Iván Restrepo O., Sergio Alonso Orrego S., Jorge Ignacio del Valle A. and Juan Carlos Salazar U.

SUMMARY

Forestry development and investment initiatives require of the estimation on yield, and of economic and financial analyses. With data from temporal plots of *Pinus patula* and permanent plots of *Tectona grandis*, non lineal multiple effect models of the von Bertalanffy type were estimated as a function of age and environmental co-variables. Forestry yield and cash flow estimates per hectare were used to determine financial turnover and profitability. Results indicate that the asymptote and growth rate of the models estimated for both species can be expressed

as a function of environmental co-variables, while the shape parameter is a fixed effect directly related to the tendency of biological growth. Using an average profitability curve and a real interest yield of 6.81% it was found that financial turnover is 12-14 for *P. patula* and 13-15 years for *T. grandis*. For *T. grandis* the soil economic value (SEV) is always positive. For *P. patula* SEV varied from losses of USD 1404/ha to gains of USD 1885/ha, according to contrasting forestry projects.

RENDIMENTO, TURNO ÓTIMO FLORESTAL E RENTABILIDADE DE PLANTAÇÕES FLORESTAIS DE *Tectona grandis* E *Pinus patula* NA COLÔMBIA

Héctor Iván Restrepo O., Sergio Alonso Orrego S., Jorge Ignacio del Valle A. e Juan Carlos Salazar U.

RESUMO

As iniciativas de desenvolvimento e investimento florestal requerem a estimativa do rendimento e análises econômicas e financeiras. Com dados provenientes de parcelas temporais de *Pinus patula* e parcelas permanentes de *Tectona grandis*, se estimaram modelos não lineares de efeitos mistos tipo von Bertalanffy, em função da idade e covariáveis ambientais. Usaram-se estimativas de rendimento florestal e fluxos de caixa por hectare para a determinação do turno financeiro e a rentabilidade. Os resultados indicam que a assíntota e taxa de crescimento dos modelos estimados para ambas as espécies

se podem expressar em função de covariáveis ambientais, enquanto que o parâmetro de forma é um efeito fixo relacionado diretamente com a tendência do crescimento biológico. Com a curva média de rendimento e uma taxa de interesse real de 6,81%, foi achado que o turno financeiro está entre 12-14 e entre 13-15 anos para *P. patula* e *T. grandis*, respectivamente. Para *T. grandis* o valor econômico do solo (VES) é sempre positivo. Para *P. patula* o VES variou desde perdas de US\$ 1404/ha a lucros de US\$ 1885/ha, segundo características de projetos florestais contrastantes.