

Análisis económico de los servicios provistos por una plantación forestal: el caso del eucalipto en Chile*

Adrián Saldarriaga Isaza**

Eric Concha Muñoz***

Resumen

En este trabajo se discute el papel que podría cumplir en la zona centro-sur de Chile las plantaciones de eucalipto teniendo en cuenta además de su uso tradicional como fuente de madera, otros usos como como fuente de dendroenergía y del servicio de sumidero de carbono. Para lograr este objetivo se aborda un modelo teórico cuya base es el modelo básico de Faustmann. Este modelo es modificado de acuerdo al problema de estudio bajo tres escenarios posibles de producción de madera: industrial; industrial y dendroenergía; e industrial, dendroenergía y sumidero de carbono. De las simulaciones numéricas se concluye que la inclusión de estos objetivos adicionales en la función de beneficios del propietario, no modifica sustancialmente la edad óptima de rotación, pero incrementa el valor presente neto de esta actividad productiva.

* Recibido: 23/05/10

Aceptado:24/08/10

** Departamento de Economía, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Integrante del Grupo de Estudios Ambientales y Socio-Políticos (GRASP). E-mail: casaldarriagai@unal.edu.co

*** MSc. en Economía de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, Universidad de Concepción (Chile). E-mail: ericconchamunoz@gmail.com

Palabras clave: sumidero de carbono, dendroenergía, rotación óptima, eucalipto.

Abstract

In this paper we discuss the role that eucalyptus plantations in Central-Southern Chile might have, considering besides its traditional use as a source of timber wood, other uses like fuelwood and carbon sequestration. In the framework of the Faustmann's model, three different scenarios for wood production are proposed: solely industrial; both industrial and fuelwood; and all-inclusive; industrial, fuelwood and carbon sequestration. Numerical simulations of the theoretical model suggest that the inclusion of these additional objectives into the owner's benefit function, does not modify to a large extent the optimal rotation period, but increase the net present value of this economic activity.

Key words: Carbon sink, fuelwood, optimal rotation period, eucalyptus.

JEL: D21, Q23, Q54

Résumé

Dans cet article nous discutons le rôle qu'ils pourraient jouer dans le centre-sud de plantations d'eucalyptus au Chili intégrant son rôle traditionnel en tant que source de bois à usage industriel, un rôle en tant que source d'énergie du bois et les services de puits de carbone. Pour atteindre cet objectif répond à un modèle théorique dont la base est le modèle de base de Faustmann. Ce modèle est modifié en fonction du problème de recherche sous trois scénarios possibles pour la production de bois: bois-énergie, industrielles et de l'énergie du bois, et industrielle et puits de carbone. D'après simulations numériques, il est conclu que l'inclusion d'objectifs supplémentaires en fonction de profit du propriétaire ne change pas l'âge de rotation sensiblement optimale, mais elle augmente la valeur actuelle nette actuelle de sa production.

Mots-clés : Puits de carbone, bois-énergie, la rotation optimale, d'eucalyptus.

1. Introducción

A pesar de los múltiples servicios que bosques y plantaciones prestan al hombre, sólo se valoran explícitamente en los mercados muy pocos de ellos. En el caso de Chile y sus plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), el valor de éstas comúnmente se mide sólo en función de su capacidad para producir madera de uso industrial en forma de trozas aserrables, pulpables y debobinables.

El presente trabajo se concentra en incluir dos servicios adicionales en la decisión de rotación de las plantaciones de eucalipto: la producción de madera para dendroenergía y su rol como sumidero de carbono. En las últimas dos décadas los residuos provenientes de la producción de madera vienen siendo parte importante de la matriz energética de varios países como Brasil, Estados Unidos y algunos de la Unión Europea (Nicholls et al., 2009). En el caso del sistema energético chileno, su vulnerabilidad con relación a su capacidad de cubrir la demanda interna, hace interesante evaluar la posibilidad de darle mayor peso a fuentes alternativas como la dendroenergía.

Según datos de la Comisión Nacional de Energía de Chile (CNE, 2008), para julio de 2007 el sistema eléctrico nacional tenía una potencia total instalada de 12.741,7 MW, de los cuales 60,56% eran centrales termoeléctricas, 37,92% hidroeléctricas, y sólo el 1,52% de la energía provenía de fuentes de energía renovable no convencional (ERNC), siendo este último distribuido entre un 1,5% para dendroenergía y el resto, 0,02%, a eólica. Mientras que las termoeléctricas funcionan en su mayoría con combustibles fósiles, los que Chile importa casi en su totalidad, el correcto funcionamiento de las centrales hidroeléctricas depende de las bondades del clima, cuadro que indica claramente la fragilidad del abastecimiento del país en un sector estratégico como el energético.

Si se considera su consumo total, los residuos forestales son una fuente de energía importante, aunque con una participación muy por debajo de fuentes como los combustibles fósiles y la energía hidroeléctrica. Además, dada la gran cantidad de leña consumida en los hogares chilenos, se podría estar hablando de una subutilización de este recurso debido a la baja eficiencia energética que reviste este tipo de uso. Un cambio en este sentido, aunado al hecho de que se espera una mayor disponibilidad de biomasa proveniente del sector forestal, llevaría a pensar en una considerable participación de la biomasa forestal dentro de la matriz energética chilena (Rodríguez, 2006).

Por otro lado, uno de los argumentos más trascendentes para el uso de madera como generadora de energía renovable es que produce menor impacto ambiental en comparación con el uso de los combustibles fósiles, dado su menor contenido de azufre y metales. Además, el CO₂ procedente del uso de la biomasa se fija de forma natural en su proceso de renovación. De este modo, se podría establecer un ciclo cerrado donde la contribución al calentamiento global del planeta es prácticamente nula si se considera un ordenamiento sustentable de las fuentes energéticas (Gong y Kriström, 2000).

Con relación a la captura de carbono, el asunto ha sido abordado en múltiples ocasiones como una externalidad positiva que puede ser incluida en un modelo de optimización forestal (Van Kooten *et al.*, 1995; Gong y Kriström, 2000). Esta consideración se ha vuelto más importante en la medida que los países han implementado acuerdos y mecanismos para incentivar una disminución importante en las emisiones de CO₂ (por ejemplo, a través del de los mecanismos de flexibilidad del Protocolo de Kyoto).

Comúnmente en la literatura se ha analizado el tema de la rotación óptima de una plantación teniendo en cuenta dos bienes: madera de uso industrial y la captura de carbono (ver por ejemplo Van Kooten *et al.*, 1995; y Gutiérrez *et al.*, 2006). Nuestro objetivo en este trabajo es determinar la factibilidad económica de las plantaciones de eucalipto en Chile teniendo en cuenta tres servicios posibles que puede ofrecer la plantación: (1) fuente de madera para uso industrial (línea base); (2) proveedora de madera para dendroenergía; y (3) rol como reservorio de carbono. Para tal se emplea el valor presente neto (VPN) como criterio de factibilidad financiera, además de considerar los cambios en la edad óptima de rotación ante la inclusión o no de cada de uno de estos servicios en la función de producción del propietario privado.

2. Métodos

En este trabajo la sección del árbol destinada a producir dendroenergía es diferente de aquella considerada para producir madera de uso industrial. En este sentido, hablamos del remanente de la cosecha, compuesto principalmente de ramas y la sección final del fuste, después del diámetro mínimo utilizable. Para extraer esta madera se pueden adoptar diferentes esquemas de manejo, por lo que acá se supone que la cosecha de este tipo de madera se realiza de forma conjunta con la extracción de la madera para uso industrial al final de la rotación.

2.1 Modelo para la producción conjunta de madera para uso industrial, dendroenergía y captura de carbono.

Uno de los criterios más usados para determinar la edad óptima de rotación de una plantación es el conocido modelo de Faustmann (1849), quien derivó una regla para determinar la edad óptima de rotación de una plantación bajo un conjunto de condiciones, una de las cuales tiene relación con el costo de plantación necesario para dar comienzo a la rotación (c). En este trabajo tal supuesto se reemplaza por el siguiente: hay un costo inicial de plantación c , pero la segunda rotación se obtiene manejando los rebrotes de tocón después de la primera cosecha con un costo asociado $g < c$. Luego, la tercera rotación se obtiene volviendo a habilitar el terreno y plantando a un costo c , y la cuarta manejando los rebrotes de tocón a un costo g , y así sucesivamente.

Siendo c el costo de plantación, p el precio del metro cúbico sólido de madera para uso industrial, g el costo de manejo de rebrotes, y $s(t)$ la función de crecimiento volumétrico de la madera para uso industrial, el valor presente neto de la producción de madera para uso industrial (VPN_i) se describe como:

$$VPN_i(t) = -c + ps(t)e^{-rt} - ge^{-rt} + ps(t)e^{-2rt} - ce^{-2rt} + ps(t)e^{-3rt} - ge^{-3rt} \\ + ps(t)e^{-4rt} - ce^{-4rt} + ps(t)e^{-5rt} - ge^{-5rt} + ps(t)e^{-6rt} - ce^{-6rt} \dots \quad [1]$$

donde r es la tasa de descuento y t el periodo correspondiente a la cosecha. Considerando a p como la unidad de cuenta de los precios (precio numerario), y por lo tanto a c y g como una proporción de p :

$$VPN_i(t) = -c \sum_{m=0}^{\infty} (e^{-2mrt}) - ge^{-rt} \sum_{m=0}^{\infty} (e^{-2mrt}) + s(t)e^{-rt} \sum_{m=0}^{\infty} (e^{-mrt}) \quad [2]$$

donde m es el número de rotaciones, con $c=0$ para $m=2, 4, 6$, etc., y $g=0$ para $m=1, 3, 5, 7$, etc. Luego, la forma reducida¹ de la función $VPN_i(t)$ es

1 Tener en cuenta que: $\sum_{m=0}^{\infty} (e^{-2mrt}) = (1 - e^{-2rt})^{-1}$

$$VPN_i(t) = \frac{-c - g * e^{-rt}}{1 - e^{-2rt}} + \frac{s(t) * e^{-rt}}{1 - e^{-rt}} \quad [3]$$

donde la condición necesaria de primer orden que maximiza esta función está dada por una tasa de crecimiento de la madera descrita de la siguiente manera²:

$$\dot{s}(t) = \frac{r}{(1 - e^{-rt})} \left(s(t) - \frac{g + 2ce^{-rt} + ge^{-2rt}}{(1 - e^{-rt})^2} \right) \quad [4]$$

2.2 Producción conjunta de madera para uso industrial y dendroenergía.

Asumiendo que la producción de ambos tipos de madera ocurre conjuntamente al momento de la cosecha final, se parte por precisar que la proporción de biomasa que se destina a leña y a madera para uso industrial cambia con el tiempo en la plantación. Así, en edades tempranas el rodal probablemente no posee madera para uso industrial, pero a la edad de rotación seguramente el volumen de ésta sobrepasará al de leña. Para introducir una relación que represente la cantidad de madera para energía al momento de la cosecha, lo ideal es contar con datos que permitan construir una función que relacione esta cantidad y el tiempo. Ante la ausencia de tal información para el caso del eucalipto en Chile al momento de hacer este trabajo, se sigue la relación de Bjornstad y Skonhott (2002), quienes proponen una función que muestra el volumen de madera para dendroenergía ($L(t)$) dependiendo del volumen de madera para uso industrial, tal que

$$L(t) = L(s(t)) = \phi s(t)^\gamma \quad [5]$$

con ϕ y γ como constantes representativas de la especie que se utilice. En este caso, y por no contarse con información que permita estimarlas para la especie considerada, se partió por asumir valores tales que la función $L(s(t))$ sea cóncava y conservadora respecto al volumen de madera que representa.

Para incluir el beneficio que la producción de leña implica para el productor privado, se considera el precio de la unidad de volumen de madera para energía (p_e) como un precio relativo entre 0 y 1, lo cual supone que la madera para uso industrial es al menos tan valiosa como la madera para

² Una descripción más detallada del desarrollo de estos resultados se puede obtener en Concha (2006).

dendroenergía. Sumando [5] y [4] se obtiene la función de valor presente neto de la producción conjunta de madera para uso industrial y dendroenergía (VPN_{ib}):

$$VPN_{ib}(t) = \frac{-c - g * e^{-rt}}{1 - e^{-2rt}} + \frac{[s(t) + p_b L(s(t))] * e^{-rt}}{1 - e^{-rt}} \quad [6]$$

2.3 Producción conjunta de madera para uso industrial, dendroenergía y captura de carbono.

Siguiendo a Van Kooten *et al.* (1995), en este trabajo se asume que el beneficio de capturar carbono podía ser modelado como una función del cambio de la cantidad de carbono almacenado en las plantaciones. Así, suponiendo que la producción maderera sólo se destina a uso industrial ($s(t)$) y a dendroenergía ($L(s(t))$), entonces la derivada de $s(t) + L(s(t))$ indica la variación de la cantidad total de madera en un momento del tiempo.

Si se representa la proporción de carbono contenido en la madera como un porcentaje de ésta (α), y se denota por q_α el valor de la unidad de carbono capturado en la plantación, entonces el valor del carbono capturado en un momento del tiempo viene dado por

$$q_\alpha * \alpha \left(L' s + \dot{s} \right) = q \left(L' s + \dot{s} \right), \quad \alpha > 0 \quad [7]$$

Al integrar esta función entre el momento de la plantación y la cosecha, es decir, desde 0 a t , y considerando $q = q_\alpha * \alpha$, se obtiene el beneficio total de la captura de carbono en ese intervalo de tiempo:

$$q * \int_0^t \left[L'(s(t)) * \dot{s}(t) + \dot{s}(t) \right] * e^{-rt} dt \quad [8]$$

Puesto que parte de la madera obtenida es usada como leña, una fracción del carbono retenido es liberado en el corto plazo, por lo que es necesario corregir [8]. Aquella fracción de la madera para uso industrial que tendría como destino estructuras que se degradan muy lentamente en el tiempo se representan por β , de manera que $(1-\beta)$ es la fracción de madera que se destina a estructuras con rápida degradación. Así, $L(s(t)) + (1-\beta) * s(t)$ es la cantidad de carbono liberado en el corto plazo después de la cosecha. Luego,

$$q^* [L(s(t)) + (1-\beta) * s(t)] * e^{-rt} \quad [9]$$

representa el valor presente del carbono almacenado que se libera durante la cosecha en una rotación. Al restar [9] de [8] se obtiene el valor presente del carbono neto capturado durante la rotación:

$$q^* \int_0^t \left[L'(s(t)) * \dot{s}(t) + \dot{s}(t) \right] * e^{-rt} dt - q^* [L(s(t)) + (1-\beta) * s(t)] * e^{-rt} \quad [10]$$

Al sumar [10] y [6], e integrando por partes, se obtiene el valor presente de una plantación de eucalipto con madera para uso industrial, energía, y captura carbono (VPN_{ibc}):

$$VPN_{ibc}(t) = \frac{-c - g * e^{-rt}}{1 - e^{-2rt}} + \frac{(p_b L(s(t)) + s(t)) * e^{-rt} + q \left(r \int_0^t (L(s(\tau)) + s(\tau)) * e^{-r\tau} d\tau + \beta s(t) e^{-rt} \right)}{1 - e^{-rt}} \quad [11]$$

2.4 Implementación numérica del modelo.

Para simular el crecimiento de una plantación de eucalipto se estimó una función de crecimiento utilizando el software EUCASIM³ (Zunino y Ferrando, 1997), con el fin de tener una proyección del crecimiento en volumen de una plantación de eucalipto desde los 3 hasta los 20 años. El software requiere el ingreso de la altura dominante o índice de sitio (en m), del área basal por hectárea (en m²/ha), de la densidad inicial de establecimiento (plantas/ha) y de la zona de crecimiento de la plantación, en este caso la zona centro-sur de Chile.

El valor de c utilizado en la simulación numérica se obtuvo de la Tabla de Costos de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2005), correspondiendo a un estándar básico para una plantación de especies exóticas. Respecto del valor de la madera para uso industrial (p), se utilizó el valor de 13465 CL\$/m³ –promedio entre el mayor y menor valor encontrado, neto de costos de cosecha y transporte (ver Concha, 2006). Dado que este valor es sensible al costo de transporte, se realizó un análisis de sensibilidad sobre este componente.

3 Este software simula el crecimiento de una plantación de eucalipto para la zona centro-sur de Chile.

De esta manera, y con el precio de la madera para uso industrial (p) como precio numerario, el valor de los parámetros usados para calcular la rotación óptima, suponiendo que la plantación sólo produce madera para uso industrial, es $c = 25,13$ como costo relativo de plantación, y $g = 2,97$ como costo relativo de manejo de rebrotes (Concha, 2006: 62). Con relación a la tasa de descuento, se encontró en literatura que estudios como el de Moura (2002) utiliza en sus cálculos un valor de 10%, mientras que Bjornstad y Skonhoft (2002) usan una tasa de descuento del 5%. En el caso chileno López (2003) usa tasas de 0,05 y 0,07 para la línea de base, y Gayoso *et al.* (2002) y Cubagge *et al.* (2007) utilizan una tasa de descuento del 8%. Considerando que al momento del estudio Chile gozaba de cierta estabilidad política, legal y macroeconómica, de un bajo riesgo país, y de una moderada tasa de incendios forestales, se estimó un 6% como tasa de descuento conveniente para un proyecto de plantación forestal en Chile. De igual forma, se elabora un análisis de sensibilidad sobre esta variable y su impacto sobre la factibilidad del proyecto de plantación forestal.

Al agregar el rol de las plantaciones de eucalipto como productor de madera para energía, los parámetros usados en el cálculo de la edad óptima de rotación y VPN_{ib} son: $\phi = 0,5$, $\gamma = 0,8$, y $pb = 0,5^4$. Dado que no se contaba con datos para estimar una función de crecimiento de madera para energía de especies del género eucalipto, los parámetros f y g fueron escogidos de manera que el volumen de madera para energía no fuera mayor al volumen de madera para uso industrial, que es el objetivo tradicional de las plantaciones. En particular, en el análisis de sensibilidad se restringió el valor de γ a 1,1, pues sobre ese valor la función de madera para energía se incrementa fuertemente sobre la función de madera para uso industrial, lo que no sucedería en la situación actual de manejo de las plantaciones. Con relación a pb , en la literatura se encontró que era bastante alto, llegando incluso a superar el valor de p en algunas zonas del país. En el análisis de sensibilidad su valor relativo máximo se limitó a 1.

El precio del carbono (q) usado en la línea de base (en CL\$/t de carbono) es el utilizado por el proyecto Chacabucuito (CONAMA, 2005). Si se considera un costo de transacción de 10% del valor por cada m^3 , el valor de q es aproximadamente 0,106. Por último, el valor de la proporción de carbono en la madera (α) se obtuvo de los resultados de Gayoso *et al.* (2002). Al no contar con un valor para el parámetro β , se tomó como referencia a Bjornstad y Skonhoft (2002), aunque

4 Para una explicación detallada de la forma de obtener estos valores, ver Concha (2006).

se piensa que podría ser menor, ya que una parte importante de la producción de madera de eucalipto en Chile se destina a celulosa para cartones y papel, productos que devuelven el carbono a la atmósfera en períodos de tiempo menores que casas o muebles, por ejemplo.

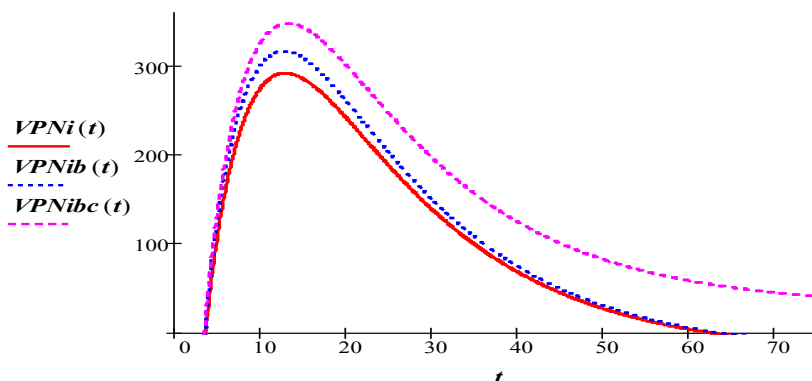
3. Resultados

El modelo de crecimiento con mayor ajuste para la plantación de eucalipto fue la ecuación logística $s(t) = [(-1178,184)/(1+(t/17,5247)^{1,993})] + 1147,391$ ($R^2 = 0,99$)⁵. Un análisis de sensibilidad sobre los parámetros de la ecuación muestra que cambios dentro de los límites de su error estándar no afectan de manera importante la edad óptima de rotación (t^*) ni el VPN (en miles de millones de pesos chilenos). A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones para cada uno de los escenarios propuestos en el análisis.

Escenario 1: Producción de madera para uso industrial.

Con los parámetros señalados en la sección anterior, se tiene que $VPN_{i\lambda}(t)$ es una función derivable en todos sus puntos, con un único máximo dentro del rango de tiempo razonable para la edad óptima de cosecha de una plantación de eucalipto en Chile (ver figura 1). Bajo estas condiciones el tiempo óptimo de rotación calculado es $t^* = 13$ años, en tanto el VPN_i es 291,4.

Figura 1. Gráfico comparativo de valores presentes netos en los tres escenarios (VPN_i , VPN_{ib} y VPN_{ibc}).



5 Un análisis detallado del análisis econométrico en torno a la obtención de esta ecuación se encuentra en Concha (2006).

En el cuadro 1 se muestra cómo la tasa de descuento (r) es un factor determinante en el cálculo de la edad óptima de rotación en el caso estudiado, pues la variación es de 6 años al pasar r de 2 a 12%. Además, la tasa de descuento afecta de forma determinante a VPN_i , disminuyendo drásticamente desde 1273 a 81 cuando la tasa de descuento experimenta el mismo cambio.

Por su parte, el análisis de sensibilidad sobre el precio de la madera para uso industrial (cuadro 2) muestra que es de importancia menor en la determinación de la edad óptima de rotación, variando ésta apenas en un 2,2% cuando el precio se mueve desde 9460 CL\$/m³ ($0,7p$) hasta 17920 CL\$/m³ ($1,3p$). En cambio, VPN_i presenta una variación moderada frente a los cambios del precio, incrementándose en un 8,8% cuando el precio de la madera pasa del menor al mayor valor.

Cuadro 1. Análisis de sensibilidad de la edad óptima de rotación y VPN_i (millardos de pesos chilenos) para distintas tasas de descuento (r).

	r					
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
t^*	16,29	14,44	13,04	11,93	11,03	10,29
VPN_i	1273,0	526,61	291,43	181,26	119,61	81,37

Cuadro 2. Edad óptima de rotación (t^*) y VPN_i (millardos de pesos chilenos) para diferentes valores del precio de la madera para uso industrial de eucalipto (p), con $r = 6\%$.

	p						
	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
t^*	13,23	13,15	13,09	13,04	13,00	12,96	12,93
VPN_i	275,67	282,22	287,34	291,43	294,79	297,60	299,97

Escenario 2: Producción de madera para uso industrial y dendroenergía.

Cuando se incluye la producción de madera para energía, VPN_{ib} se incrementa de 291,4 a 316,4 (un 8,5%), lo que puede ser atractivo para el propietario privado. Mientras que la edad óptima de rotación disminuye levemente desde 13 a 12,9 años, cambio no significativo en términos prácticos, por lo que el privado podría estar dispuesto a incorporar la producción de madera para energía como un objetivo de sus plantaciones de eucalipto, ya que no sólo aumenta la rentabilidad de

la plantación, sino que no debe realizar cambios en su planificación de largo plazo.

Por otro lado, se aprecia que variaciones del precio de la madera para energía (p_b) no influyen de manera importante sobre la edad óptima de rotación, disminuyendo ésta apenas en un 2,7% cuando la tasa de descuento es de 6% cuando p_b cambia de 0 a 1. En cambio, la tasa de descuento sigue siendo importante, generando una reducción promedio del 58% en la edad de rotación cuando r cambia de 2% a 12% (cuadro 3). Por su parte, incrementos en p_b , así como inferiores tasas de descuento, tienden a incrementar los beneficios netos descontados (cuadro 3). De manera que, en general, incrementos en el precio de la madera para energía llevan a leves disminuciones de la edad de rotación, aunque con efectos menores, mientras que en línea con lo esperado, el VPN_{ib} también se incrementa considerablemente al aumentar p_b .

Cuadro 3. VPN_{ib} y edad óptima de rotación (entre paréntesis) de una plantación con madera para uso industrial y dendroenergético para diferentes combinaciones de precios leña (pb) y de tasa de descuento (r) [$\gamma = 0,8$ y $\phi = 0,5$].

		pb						
		0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
r	0,02	1272,5 (16,28)	1310,9 (16,19)	1349,5 (16,1)	1368,7 (16,1)	1387,9 (16)	1426,6 (15,9)	1465,2 (15,9)
	0,04	526,60 (14,44)	543,46 (14,36)	560,35 (14,3)	568,80 (14,2)	577,26 (14,2)	594,2 (14,1)	611,16 (14,06)
	0,06	291,43 (13,04)	301,40 (12,96)	311,39 (12,89)	316,39 (12,85)	321,40 (12,82)	331,42 (12,75)	341,46 (12,69)
	0,08	181,26 (11,93)	187,95 (11,86)	194,65 (11,79)	198,01 (11,76)	201,37 (11,73)	208,10 (11,66)	214,84 (11,6)
	0,10	119,61 (11,03)	124,43 (10,96)	129,27 (10,9)	131,69 (10,87)	134,11 (10,84)	138,97 (10,78)	143,83 (10,72)
	0,12	81,37 (10,29)	85,01 (10,22)	88,66 (10,16)	90,49 (10,13)	92,32 (10,1)	95,99 (10,1)	99,67 (9,99)

Estos comportamientos registrados se deben básicamente a que se propuso una función cóncava de madera para dendroenergía ($\gamma < 1$). Sin embargo, hay otra zona para valores de γ mayores a 1 en la que un aumento de p_b genera el efecto contrario aunque leve sobre la edad de rotación (cuadro 4); es decir, un aumento en p_b conduce a un leve incremento de t^* . Así, para $\gamma = 1,1$ e incrementos de p_b , la edad de rotación aumenta ligeramente de 13,04 a 13,33, y VPNib desde 291,4 a 589,8 (cuadro 4).

Cuadro 4. VPN_{ib}(t) y t^* (entre paréntesis) en función del parámetro γ y el precio p_b

		p_b						
		0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
γ	0,2	291,43 (13,04)	291,71 (13,03)	291,99 (13,02)	292,13 (13,02)	292,27 (13,02)	292,55 (13,01)	292,83 (13)
	0,4	291,43 (13,04)	292,35 (13,02)	293,27 (13)	293,73 (12,99)	294,19 (12,98)	295,11 (12,96)	296,03 (12,94)
	0,6	291,43 (13,04)	294,46 (13)	297,49 (12,95)	299,00 (12,93)	300,52 (12,91)	303,56 (12,87)	306,61 (12,83)
	0,8	291,43 (13,04)	301,40 (12,96)	311,39 (12,89)	316,39 (12,85)	321,40 (12,82)	331,42 (12,75)	341,46 (12,69)
	1,0	291,43 (13,04)	324,27 (13)	357,12 (12,96)	373,54 (12,95)	389,96 (12,93)	422,82 (12,91)	455,67 (12,89)
	1,1	291,43 (13,04)	351,07 (13,13)	410,74 (13,2)	440,58 (13,23)	470,42 (13,26)	530,11 (13,3)	589,81 (13,33)

Asimismo, en la medida que γ aumenta se presentan leves disminuciones de la edad de rotación y aumentos en VPN_{ib}. Cuando p_b toma el valor de la línea base (0,5) y γ cambia desde 0,2 a 0,8, la edad de rotación disminuye de 13,02 a 12,85 y el VPNi se incrementa en un 8,3%. En cambio, para valores mayores o iguales a 1 un aumento de γ implica un aumento de la edad de rotación así como de VPN_{ib}.

En resumen, la pequeña modificación de la edad de rotación y el aumento de VPN_{ib} implica un estímulo para la incorporación de las plantaciones de eucalipto a la producción de dendroenergía. Es decir, el propietario privado podría incorporar sus plantaciones a esta actividad sin modificaciones en las edades de corta dentro de su horizonte de planificación y con ésto obtener un mayor

beneficio, sin afectar el cumplimiento de los compromisos preestablecidos para las plantaciones, ya sea el abastecimiento de aserraderos o plantas de celulosa.

Escenario 3: Producción de madera industrial, dendroenergía y captura de carbono.

Al incluir la captura de carbono en la función de beneficio del propietario privado, VPN_{ibc} está por encima tanto de VPN_{ib} como de VPN_i (ver figura 1). Además, el tiempo óptimo de rotación en este escenario aumentaría a 13,33 años, concordando con el resultado encontrado por López (2003) para los bosques de pino en Chile; edad de rotación mayor que en el caso de producción de madera para energía (12,85 años), y mayor también que para el caso simple de Faustmann (13,04). Sin embargo, en términos prácticos esta variación de la edad de rotación no es importante, pero sí el incremento del beneficio neto descontado, por lo que ambos elementos en conjunto constituyen un estímulo para que el propietario privado adopte la captura de carbono como un objetivo adicional en sus plantaciones de eucalipto.

Dentro del análisis de sensibilidad se observa que al no considerar la captura de carbono ni la dendroenergía ($p_b = q = 0$), la edad óptima de rotación es de 13,04 años, pero en la medida que aumenta q la edad de rotación también aumenta, llegando a 14,51 años cuando el precio del bono de carbono es de 10 US\$/ton. Dicha diferencia implicaría retrasar la cosecha en poco más de un año. Sin embargo, en este año y medio adicional de crecimiento de la plantación VPN_{ibc} aumenta en un 39 %, por lo que el estímulo para incorporar estas plantaciones a la captura de carbono es importante, siempre que el precio del bono de carbono llegue al menos a 10US\$/ton. Cuando se agrega la producción de madera para energía con un precio relativo de 0,5 y el precio del bono de carbono pasa desde 0 a 10 US\$/ton, la edad de rotación se incrementa un 10,7%. En este caso también la edad de rotación se eleva más de un año al incluir la captura de carbono, y por su parte VPN_{ibc} aumenta en un 35,7%.

Por otro lado, la estática comparativa desarrollada para determinar el efecto de p_b sobre t^* entrega la siguiente condición:

$$\frac{\partial L(s(t))}{\partial t} < r * \frac{L(s(t))}{1 - e^{-rt}} \quad [13]$$

la cual indica que la edad óptima de rotación disminuye al aumentar el precio de la madera para uso industrial, siempre que el incremento de la cantidad de madera para energía sea menor que su costo alternativo para las infinitas rotaciones. Nótese que la condición sólo depende de la tasa de descuento y la edad de rotación. Así, para una tasa fija del 6%, la condición se cumple para todo $t > 10,1$ (figura 2). De manera que al incrementarse p_b , t^* se reduce, concordando ésto con el análisis empírico del cuadro 5.

Cuadro 5. Edad óptima de rotación para diferentes combinaciones del precio de la madera para energía (p_b) y precio del crédito de carbono (q) [$r = 0,06$, $\gamma = 0,8$, $\phi = 0,5$ y $\beta = 0,4$]

		p_b						
		0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
q	0	13,04	12,96	12,89	12,85	12,82	12,75	12,69
	0,091	13,47	13,39	13,30	13,26	13,22	13,15	13,07
	0,106	13,55	13,46	13,37	13,33	13,29	13,21	13,14
	0,302	14,51	14,39	14,28	14,23	14,18	14,08	13,98
	0,756	16,87	16,69	16,52	16,44	16,35	16,2	16,05

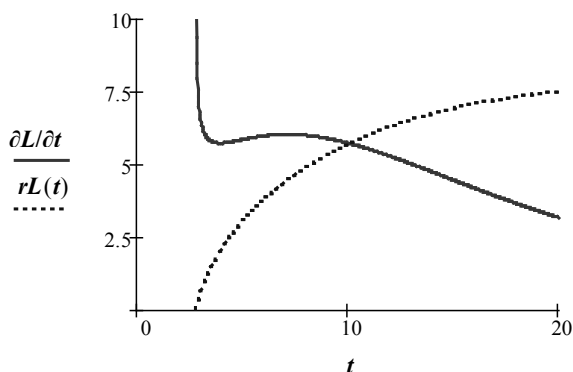


Figura 2. Gráfico que muestra la edad para la cual se cumple la condición de la ecuación [13] ($dt^*/dp_b < 0$).

El cuadro 6 sirve para contrastar el resultado de la estática comparativa desarrollada para determinar el efecto de q sobre t^* , el cual entrega la condición:

$$\beta \dot{s}(t) > r^* \left(\frac{\int_0^t [L(s(t)) + s(t)] e^{-rt} dt + \beta s(t)}{1 - e^{-rt}} - [L(s(t)) + s(t)] \right) \quad [14]$$

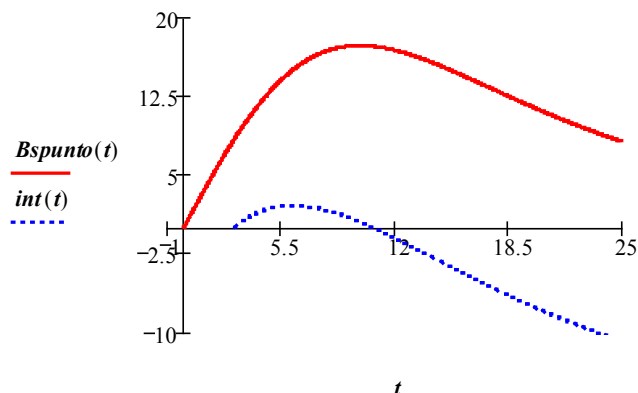
En este caso, además de t y r , la condición depende de β (la fracción de la madera para uso industrial que se degrada muy lentamente en el tiempo). En la figura 3 se observa que, al menos dentro del intervalo de tiempo de interés alrededor de la edad óptima de rotación, la condición siempre se cumple para los valores de β y r usados, de manera que siempre debería aumentar t^* cuando se incrementa q —confirmando el análisis teórico—.

Cuadro 6. VPN y edad óptima de rotación (entre paréntesis) para diferentes combinaciones de r y q [$p_b = 0,5$; $\gamma = 0,8$; $\phi = 0,5$ y $\beta = 0,4$].

		r					
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
q	0,0	1.368,7 (16,06)	568,80 (14,24)	316,39 (12,85)	198,01 (11,76)	131,69 (10,87)	904,92 (10,13)
	0,091	1.454,7 (16,39)	617,27 (14,65)	349,50 (13,26)	222,34 (12,13)	150,32 (11,2)	105,16 (10,42)
	0,106	1.468,9 (16,44)	625,35 (14,72)	355,04 (13,33)	226,43 (12,19)	153,45 (11,25)	107,62 (10,46)
	0,302	1.657,2 (17,14)	733,15 (15,62)	429,43 (14,23)	281,44 (13,01)	195,71 (11,96)	140,90 (11,06)
	0,756	2.103,6 (18,76)	993,30 (17,85)	610,77 (16,44)	416,51 (14,95)	299,98 (13,59)	223,25 (12,4)

Un análisis de sensibilidad sobre la tasa de descuento (r) y el precio del carbono (q) muestra que la primera sigue siendo importante para determinar la edad óptima de rotación. Para el precio relativo del carbono en la línea base (0,106), un aumento de r desde 0,02 a 0,12 hace disminuir la edad de rotación de 16,44 a 10,46 años. Por otro lado, se encuentra que en la medida que aumenta q también lo hace t^* . Para la tasa de descuento usada en la línea de base, cuando el precio

Figura 3. Gráfico que muestra la edad para la cual se cumple la condición de la ecuación [14] y dt'/dq es positiva. $Bspunto(t)$ es el lado izquierdo de la condición, e $int(t)$ es el lado derecho.



relativo del carbono pasa de 0 a 10 US\$/ton (0,302), t^* aumenta en un 10,7% (cuadro 6) y VPN_{ibc} en casi un 36 %. Es así como el análisis de sensibilidad conjunto de q y r confirma la relación inversa de la edad de rotación y VPN_{ibc} con r , pero positiva con el precio del crédito del carbono.

4. Discusión y conclusiones

De este trabajo se evidencia que en el caso de las plantaciones de eucalipto en Chile, es factible incorporar la producción de madera para dendroenergía y captura de carbono sin modificar de manera importante la edad óptima de rotación (13 años). De manera que las plantaciones se perfilan positivamente para contribuir a paliar las deficiencias energéticas del país y las consecuencias del efecto invernadero aprovechando mercados que tienen un buen potencial de crecimiento, como el energético y el de bonos de carbono. Asimismo, en concordancia el trabajo de Bjornstad y Skonhoff (2002) para la península escandinava, y López (2003) para plantaciones de pino en Chile, en el presente trabajo se nota un incremento con respecto al beneficio neto obtenido en la línea base, conforme se agregan nuevos servicios: dendroenergía y captura de carbono.

Cabe destacar que la edad óptima de rotación permanece relativamente estable frente a cambios en casi todos los parámetros del modelo: para todas las edades señaladas el optimizador forestal cosecharía el bosque a los 13 años. Una consecuencia importante de esto es que se pueden implementar cambios en los objetivos de producción sin temor a grandes cambios de planificación en los esquemas de manejo de largo plazo de las plantaciones. De todas las variables sometidas

a análisis de sensibilidad, únicamente la tasa de descuento mostró tener efectos realmente importantes sobre la edad de rotación, en tanto que los precios de la madera y el carbono sólo influyen en menor medida sobre t^* , aunque los efectos sobre el VPN son moderados. Un corolario significativo de esto es que si el regulador quiere modificar la conducta del privado, con relación a la edad óptima de rotación para incrementar la captura de carbono, por ejemplo, debe implementar preferentemente medidas que modifiquen su tasa de descuento.

El análisis de sensibilidad para el precio de la madera de uso industrial muestra que cambios en este parámetro no afectan de manera importante la edad de rotación, y al incrementarse éste el beneficio neto sólo aumenta moderadamente. Contrario sucede para el caso de la tasa de descuento, presentado ésta un efecto importante y opuesto sobre la edad de rotación y el beneficio neto.

En cuanto al escenario de una plantación con producción de madera para dendroenergía, el análisis de sensibilidad sobre la variable precio de la madera para este fin (p_d) muestra una influencia poco significativa sobre la edad óptima de rotación, en cambio sí afecta significativa y positivamente el beneficio neto. De igual forma, la tasa de descuento sigue mostrando un efecto inverso importante tanto sobre la edad óptima de rotación como sobre el beneficio neto.

Finalmente, en el escenario con madera aserrable y para dendroenergía, y con el servicio de captura de carbono, el análisis de sensibilidad sobre el precio de la tonelada de carbono indica que éste no afecta ampliamente la edad óptima de rotación, pero sí lo hace sobre su VPN; presentándose en ambos casos una relación directa. Tal efecto se presenta en la ausencia o existencia de producción de madera para dendroenergía.

La oferta de madera para producir dendroenergía podría verse, de esta forma, estimulada por la necesidad de diversificar la matriz energética del país. La dendroenergía es una alternativa seria, viable, y cuya actividad podría incentivarse, pues presenta varios beneficios por sobre otras formas de energía renovables y no renovables. Quizá la manera de incentivarla no debería ser por medio de la implementación de instrumentos económicos que apunten a modificar el precio de la madera o el crédito de carbono (como subsidios o impuestos), dada la magnitud necesaria para que tengan efectos importantes (López, 2003), sino por medio de modificaciones estructurales en el sector, como una adaptación de las leyes que permitiera disminuir la tasa de riesgo de las inversiones de largo plazo como las forestales, apuntando en este sentido a cambios en la conducta del privado por medio de modificaciones en su tasa de descuento (HariPriya, 2001).

Otra característica interesante es que la madera es fácilmente almacenable de forma casi indefinida, como plantación antes de cortarse, o como leña después de cortada, en contraste con otros tipos de fuentes de energías renovables como la eólica o solar que no pueden almacenarse eficientemente. Además, las plantaciones se pueden realizar sobre terrenos degradados contribuyendo en la recuperación de suelos; las faenas forestales tienen un impacto social positivo en el entorno donde se instauran, generando empleo temporal y permanente; y quizá la mayor ventaja sobre los combustibles fósiles es que la producción de dendroenergía es neutral respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo de esta forma a la reducción de emisiones de carbono, pues como se ha probado en otros estudios, el hecho de tener una creciente porción de energía proveniente de biomasa sustituye fuentes de energía fósil y por lo tanto contribuye a la reducción de emisiones de carbono (Ma y Stern, 2008).

La demanda de madera para la producción energética en Chile es aún baja, pues los proyectos de generación de dendroelectricidad son pocos, básicamente asociados a proyectos forestales que generan desechos utilizados para producir la electricidad; contrario a otras naciones en donde existe una gran incidencia de la producción de energía a partir de biomasa (Demirbas, 2008), o su potencial es ampliamente reconocido (Seyboth *et al.*, 2008). Sin embargo, eso mismo significa que existe un amplio espacio para crecer en escenarios futuros en donde se estima que el precio de la madera para dendroenergía y los bonos de carbono tenderían a aumentar, por lo que será más atractivo para el privado incluir estos objetivos adicionales a la producción de madera para uso industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bjornstad, Even, y Aders Skonhoft. 2002. "Forestry and the climate problem: joint timber and bioenergy production." En: *Environmental and Resource Economics*, 23(4): 447-465.
- CNE. 2008. "Estadísticas sector energía Chile." Comisión Nacional de Energía, Chile. <http://www.cne.cl/estadisticas/anuario/index.html> (consultado el 5 de marzo de 2008).
- CONAF. 2005. "Certificación de leña." Corporación Nacional Forestal, Chile. http://www.conaf.cl/?page=home/contents&seccion_id=007&unidad=0&articulo_unidad=0&articulo_id=583&maestra=1 (consultado el 4 mayo de 2006).
- CONAMA. 2005. "Mercado Internacional de Bonos de Carbono." Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile. <http://www.conama.cl/coain/article-28354.html> (consultado el 13 de diciembre de 2005).
- Concha, Eric. 2006. "Rol de las plantaciones de Eucaliptus en Chile frente a la necesidad de uso múltiple y el cambio climático." Tesis Magíster en Economía de Recursos Naturales y del Medio Ambiente. Universidad de Concepción, Chile.

- Cabbage, Frederick, Patricio Mac Donagh, José Sawinski Júnior, Rafael Rubilar, Pablo Donoso, Arnaldo Ferreira, Vitor Hoeflich, Virginia Morales Olmos, Gustavo Ferreira, Gustavo Balmelli, Jacek Siry, Mirta Noemi, y José Alvar. 2007. "En: Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States." *New Forests*, 33(3): 237-255.
- Demirbas, Ayhan. 2008. "Importance of biomass energy sources for Turkey." En: *Energy Policy*, 36(2): 834-842.
- Faustmann, Martin. 1849. "Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen." *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 15(1949): 441-455. Traducción al inglés republicada en: *Journal of Forest Economics*, 1(1): 7-44 (1995).
- Gayoso Jorge, José Guerra, y Daniel Alarcón. 2002. "Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas." Proyecto FONDEF D9811076. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile.
- Gong Peichen, y Bengt Kriström. 2000. "Regulating forest rotation to increase CO₂ sequestration." Department of Forest Economics, Swedish University of Agricultural Sciences, Working Paper 272.
- Gutiérrez, Víctor, Mauricio Zapata, Carlos Sierra, William Laguado, y Alf Santacruz. 2006. "Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model." *Forest Ecology and Management*, 226(1-3): 341-350.
- Haripriya, Gundimeda. 2001. "Managing Forests in India to Mitigate Carbon." En: *Journal of Environmental Planning and Management*, 44(5): 701-720.
- López, Hugo. 2003. "Incentivos económicos y política forestal óptima: beneficios de captura de carbono para el caso chileno." Tesis Magíster en Economía de Recursos Naturales y del Medio Ambiente. Universidad de Concepción, Chile.
- Chunbo, Maria y David Stern. 2008. "Biomass and China's carbon emissions: A missing piece of carbon decomposition." En: *Energy Policy*, 36(7): 2517-2526.
- Moura, Pedro. 2002. "Contabilidad y comercio del carbono, y la naturaleza temporal del almacenamiento del carbono." The Nature Conservancy. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACY492.pdf (consultado el 7 de septiembre de 2010).
- Nicholls, David. Robert, Monserud, y Dennis Dykstra. 2009. "International bioenergy synthesis—Lessons learned and opportunities for the western United States." En: *Forest Ecology and Management*, 257(8): 1647-1655.
- Rodríguez, Mario. 2006. "La biomasa forestal como fuente de energía." En :Revista Ambiente Forestal. <http://146.83.41.79/extenfor/mayo2005/biomasa.htm> (consultado el 10 de octubre de 2005).
- Seyboth, Kristin, Luuk Beurskens, Ole Lagniss, y Ralph Sims. 2008. "Recognising the potential for renewable energy heating and cooling." En: *Energy Policy*, 36(7): 2460-2463.
- Van Kooten, G. Cornelis, Clark Binkley, y Gregg Delcourt. 1995. "Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services." En: *American Journal of Agricultural Economics*, 77(5): 365-374.
- Zunino, Carlos, y Mario Ferrando. 1997. "Modelación de crecimiento y rendimiento de plantaciones de eucalipto en Chile: una primera etapa." Ponencia presentada en IUFRO Conference, Valdivia, Chile.