

LUIS DÍAZ BALTEIRO (*)

Turno forestal económicamente óptimo: Una revisión

1. INTRODUCCIÓN

La vida óptima de una masa forestal, o turno óptimo, puede definirse de muchas maneras. Así, puede entenderse por turno óptimo el que corresponde a la vida de la masa (criterio biológico), o aquél en el que se alcanza la máxima producción (utilizando conceptos habituales en la teoría de la producción, sería el máximo técnico), o aquel turno que se corresponda a la máxima productividad media de la masa forestal (mientras que en teoría de la producción se conoce como óptimo técnico, según la terminología forestal española a este turno se le llama el turno de máxima renta en especie), etc. Desde un punto de vista económico, el turno óptimo suele definirse como la vida de la masa forestal que maximiza el valor actual neto (VAN) de la inversión subyacente.

El procedimiento aceptado hoy en día para determinar turnos económicamente óptimos, se conoce como el paradigma de Faustmann, Pressler & Ohlin, FPO (ver Johansson & Löfgren, 1985), aunque en muchos otros trabajos se menciona tan sólo como el turno o solución de Faustmann (Faustmann, 1849). Dicho paradigma conceptualiza el turno óptimo

(*) Departamento de Economía y Ciencias Sociales Agrarias. Universidad Politécnica de Madrid.

como aquél que maximiza la siguiente expresión, que corresponde al VAN que subyace a una cadena de infinitos ciclos de plantación:

$$\text{VAN} = [\text{Pf}(t) \cdot e^{-it} - K] [1 + e^{-it} + e^{-2it} + e^{-3it} + \dots] \quad [1]$$

En esta expresión, P representa el precio de la madera, $f(t)$ la función de producción o curva de crecimiento, i es la tasa de descuento adoptada, y K son los gastos de forestación. Sumando los términos de la progresión geométrica encerrada en el segundo corchete de [1], y efectuando sencillas operaciones, tenemos:

$$\text{Max VAN} = \frac{\text{Pf}(t) - K e^{it}}{e^{it} - 1} \quad [2]$$

La fórmula anterior suele conocerse por fórmula de Faustmann, aunque realmente este investigador no propuso ningún procedimiento para optimizar su valor. Operando en esta expresión, Samuelson (1976) llega a la siguiente expresión:

$$\text{Pf}'(t) = i [\text{Pf}(t) + V] \quad [3]$$

Donde V es el valor del suelo obtenido por capitalización de una cadena infinita de inversiones.

A raíz del trabajo anteriormente citado de Samuelson, que supuso de hecho la aceptación casi unánime de la solución dada por Faustmann al problema del turno óptimo, han aparecido numerosos trabajos en las más prestigiosas revistas científicas del sector, intentando profundizar en las implicaciones que se derivan de este paradigma. De tal forma, no es descabellado hablar de este tópico como el que ha desarrollado la más ingente literatura en economía forestal. La mayoría de estos trabajos, o bien intentan validar la solución FPO cuando se violan alguna o algunas de las suposiciones iniciales, o bien intentan ver cómo influyen determinadas variables en la determinación de la edad o rotación óptima, considerando al bosque como un régimen productor únicamente de madera. En este trabajo no se tendrán en cuenta otras producciones (frutos, pastos, etc.), ni otros usos propios de los bosques (am-

bientales, recreativos, etc.). Las hipótesis que tradicionalmente se han considerado a la hora de estudiar el turno óptimo, son, siguiendo a Newman (1988), las siguientes:

- Ordenación de masas regulares: empezando desde un suelo desprovisto de árboles, una masa crece y es gestionada de acuerdo con los métodos de ordenación de masas regulares.
- Perfecto conocimiento de la función de crecimiento de la masa (lo que equivale a decir su producción futura), de los precios de mercado venideros, así como de las tasas de descuento y costes. Todos ellos se asumen constantes.
- Libre acceso a los mercados de capitales, lo que conlleva que el dinero pueda prestarse o pedirse a la tasa de interés del mercado.
- El precio final no es una función de la calidad del árbol, sino que es constante por unidad de volumen producido.
- Los mercados se consideran competitivos; esto es, se puede vender cualquier cantidad de madera sin afectar al precio de mercado.
- Sólo se consideran ingresos debidos a la venta de madera. Otros posibles rendimientos debidos a la venta de otros productos y servicios (e.g. externalidades positivas) son ignorados.
- La función de producción de madera sólo depende del tiempo y del esfuerzo selvícola.
- No se considerarán otros costes que no sean los de regeneración de la masa, que se contabilizarán inmediatamente después de la corta.

Kula (1988) asume estas hipótesis iniciales, e incluso las amplía introduciendo las asunciones adicionales siguientes:

- Los posibles riesgos de incendios, plagas, etc. son ignorados.
- No existen impuestos de ninguna clase.
- El propietario no incurre en los costes de corta y aprovechamiento de la madera.

También habría que admitir de forma clara alguna otra suposición, como que:

- La calidad de la estación se mantiene indefinidamente.
- Se ignoran otros posibles usos futuros de los outputs madereros.
- Se trabaja a nivel masa («stand level»), no a nivel bosque («forest level») (1).

El asumir todo este conjunto de supuestos es una licencia que se toman muchos economistas forestales para construir un modelo que explique cuál es el turno óptimo, pero implica hacerse cargo de situaciones muy alejadas de la realidad. En los apartados siguientes se verá la influencia que tiene en el turno el incumplir estas hipótesis iniciales. Hay que tener en cuenta que cuando éstas se modifican, a su vez tanto la producción como el ingreso esperado sufren alteraciones.

Por otro lado, mientras que algunos economistas subrayan una cierta resistencia entre los forestales a aplicar turnos «tan cortos» como los resultantes de la formulación FPO (Walter, 1980), otros como Berck (1979), demuestran que los propietarios privados norteamericanos no cortan sus bosques prematuramente (descuentan los ingresos futuros a una tasa real del 5 por ciento), mientras que los montes públicos se talan más lentamente de lo debido.

Como se ha afirmado anteriormente, la literatura es prolija, y si se quieren ampliar más estas cuestiones se pueden consultar, además de los trabajos citados, los siguientes: Johansson & Löfgren (1985, pp. 95-100), Comolli (1981), Chang (1983), Reed (1986), Newman (1988), Bhattacharyya *et al.* (1989), Romero (1994, cap. 7-8). En los siguientes apartados se estudiará cómo varía el turno óptimo cuando se levantan o suavizan alguna de las hipótesis arriba mencionadas, para finalizar con unos apuntes relacionados con la

(1) Como acertadamente apunta uno de los revisores de este trabajo, el vocablo «masa», equivalente del término inglés «stand», es genérico, por lo que se puede asimilar a cualquier unidad dasocrática (rodal, cuartel, etc.), pero, en este caso, no al monte en su conjunto. La traducción de «stand level» al español ha sido incorrecta («nivel árbol») en algunos casos (Azqueta & Ferreiro, 1994, cap. 9).

utilización del turno óptimo, y su relación con la gestión forestal.

2. VARIACIONES EN LOS PRECIOS DE LA MADERA

Si definimos el ingreso futuro como una función del crecimiento de la producción y del precio de venta de la manera, para muchos forestales parece que la variación en la producción es menos importante que la variación en los precios, aunque no siempre se tiene que cumplir esta predicción. Por ello, una de las apreciaciones de partida que ha sido más cuestionada para investigar los turnos óptimos es la que afirma la constancia en el precio de la madera a lo largo del turno. Así, Clawson (1979) ya señala que la tendencia en los precios de la madera no había sido constante, y McConnell et al. (1983) proclaman que mantener esta hipótesis es utópico, ya que han encontrado en los últimos 65 años incrementos en el precio del orden de un 4-5 por ciento anual en algunas especies, y el propio Servicio Forestal Americano proyecta en el intervalo 1976-2030 un incremento anual en el precio entre el 1,8-3,8 por ciento en la madera para trituración. Partiendo de esta realidad, estos autores proponen un método basado en la optimización lagrangiana para obtener, de forma aproximada, el turno óptimo cuando tanto el precio como los costes varían exógenamente. Bajo estas premisas llegan a la conclusión de que en la mayoría de los casos no se puede afirmar si se alarga o se acorta la edad óptima. Si se mantienen constantes ambas variables (precio y costes de establecimiento) se obtiene, como era de suponer, la solución FPO. Si se mantiene constante el precio (es decir, se incrementa según la tasa de descuento), la tasa de crecimiento de los costes es la que va a hacer variar el turno: así si los costes crecen por encima de la tasa de descuento, se alargará el turno y en caso contrario se acortará.

La hipótesis manejada por estos autores de crecimiento anual del precio de la madera es asumida profusamente en toda la literatura más reciente al respecto (Berck 1979, Sedjo & Lyon, 1990; Bare & Mendoza, 1992; van Kooten *et al.* 1992, etc.). En España, sin embargo, no se puede afirmar que, al menos para algunas especies, el precio de la madera tenga un

crecimiento positivo en términos reales (Díaz Balteiro, 1995, pp. 94-96). Una posible razón para el incremento anual del precio de la madera en estos países podría ser, según Hyde (1980) o Lyon & Sedjo (1992), la tala de viejos bosques vírgenes todavía existentes en América del Norte.

Muchos autores (i.e. Wear & Parks, 1994) afirman que los precios varían en un período de transición anterior al estado continuo, («steady-state» o fase óptima), y llegados a este caso, se mantienen constantes. Utilizando un modelo de optimización dinámica, Hardie et al. (1984) desarrollan reglas óptimas para determinar el turno, asumiendo la existencia de un estado continuo. Frente a los resultados obtenidos cuando se tienen en cuenta las predicciones sobre las variaciones en el precio, cuando no se tienen en cuenta estas previsiones se producen rotaciones muy cortas. Si se quisiera contrarrestar la variación de los precios mediante un ajuste en la tasa de descuento, se alcanzarían soluciones alejadas de las óptimas. También se aborda este problema utilizando una técnica similar en el trabajo de Newman et al. (1985). Estos investigadores, partiendo de que los precios reales son una función del tiempo, distinguen entre dos tipos de impactos cuando se produce una subida de precios: el impacto que se produce al incrementarse los precios relativos y el debido al cambiar el nivel de precios y concluyen que, siempre que los costes se mantengan constantes, cuando se incrementa la tasa de cambio de los precios relativos, la siguiente rotación se alarga, mientras que si aumenta el nivel inicial del precio, ésta se acorta.

Price (1989, p. 134) llega a unas consecuencias similares, y justifica estos cambios en el nivel inicial de los precios como debidos a cambios de ciclos en la economía, cambios estructurales en el mercado de la madera o en otros factores locales. Se presenta un ejemplo en donde se comprueba el alargamiento del turno de Faustmann al crecer exponencialmente los precios relativos según una tasa anual comprendida entre el 1 y el 3 por ciento. Los incrementos en el turno varían entre cantidades de tiempo no apreciables y períodos de dos años. Esta última cifra, aunque pequeña, es significativa, pues en el ejemplo comentado los turnos oscilan entre los 17/18 años, según se consideren los costes de establecimiento más altos o más reducidos. Hyde (1980) deduce similares conclu-

siones, afirmando que un propietario si percibe que los precios se están incrementando temporalmente, extenderá el turno lo más posible para aprovechar mejor este incremento. Así, cuanto mayor sea la tasa de crecimiento, más se extenderá. Resumiendo, se puede afirmar que el nivel de precios y su tasa de cambio (precios relativos) muestran resultados opuestos, lo que implica que antes de pronunciarse sobre los efectos netos de una subida de precios en el turno hay que ver la procedencia de este incremento.

Estos resultados han sido plenamente confirmados en un reciente trabajo de Yin & Newman (1995), en el que se observan los efectos en las duraciones de los turnos óptimos cuando crecen o decrecen los precios y/o los costes de plantación. Si tanto los precios como los costes crecen a un ritmo igual (inferior a la tasa de descuento), la siguiente rotación se alarga, ya que es como si se redujera la tasa efectiva de descuento, mientras que las próximas rotaciones serán idénticas. En cambio, partiendo de un mismo nivel, si los precios crecen más rápido que los costes, los siguientes turnos se acortan y viceversa.

Siguiendo esta línea de investigación, Sandhu & Phillips (1991) llegan a resultados más generales que los obtenidos por Newman *et al.* debido a que asumen la existencia de que el mercado de la madera es imperfecto (monopolístico). Así, y a diferencia del ejemplo desarrollado por estos autores, para Sandhu & Phillips los turnos óptimos se reducen cuando el precio de la madera crece exponencialmente. En el caso que analizan, el grado de decrecimiento cuando los demás factores analizados se mantienen inalterables es muy pequeño. También relacionan las consecuencias que pueden tener en el turno óptimo posibles cambios en la curva de demanda. Si no se diera el crecimiento exponencial en los precios, y al principio de cada turno se pudiera producir un cambio en la función de demanda debido a un cambio en las condiciones del mercado, entonces, si esta función se convierte en más inelástica, el turno decrecerá, mientras que si se hace más elástica, el turno se incrementará. Si se producen a la vez ambas circunstancias, el turno será algo mayor que si no fluctuara la función de demanda, pero podrá variar en función de la magnitud y la dirección del cambio en la elasticidad. De todas formas, los cambios en la longitud del turno considerando todas

estas premisas para el modelo propuesto nunca superan el 20 por ciento.

Acertadamente, Zinkhan *et al.* (1992) afirman que la volatilidad del precio de la madera implica que en el estudio financiero de una inversión forestal tiene más importancia el momento de la corta final que la tecnología asociada al crecimiento de la masa. Los efectos de las variaciones de precios en el futuro, según un estudio de Dennis & Remington (1985) para una conífera, radican en que al considerar una hipótesis de crecimiento de los precios un 2 por ciento anual, el turno se alarga unos 13 años (comparándolo con el caso en que no se considere este incremento) y se cuadruplica el valor de la tierra.

3. MERCADOS COMPETITIVOS

Otra de las hipótesis de partida que se establecieron en su momento para el desarrollo de la metodología del turno óptimo era la que asumía que los mercados fueran perfectamente competitivos. También en ese caso se citan trabajos de investigadores que suavizan este supuesto viendo cómo influyen estos cambios en el turno óptimo. Así, Nautiyal & Fowler (1980) concluyen que la aplicación del turno FPO en un mercado imperfecto provoca turnos que son mayores que los óptimos y que en el caso donde el propietario de los recursos forestales es un monopolista, (proponen un ejemplo donde el estado canadiense ejerce como tal) y bajo ciertas condiciones discutibles (los precios se mantienen constantes), el turno es más corto que en el caso de Faustmann. Este descenso es apreciable en el caso bosques no sometidos a ordenación, pero en el caso de masas ya ordenadas el descenso es prácticamente inapreciable, independientemente de la superficie ocupada por el monopolista y la tasa de descuento empleada. McConell & Phipps (1984) sugieren que los resultados obtenidos por Nautiyal & Fowler son tan sólo un caso particular, ya que éstos consideran implícitamente que la elasticidad precio-demanda decrece cuando aumenta el turno, pero esto sólo se cumple cuando las funciones de demanda son lineales. Comolli (1989) precisa estos resultados y afirma que esta circunstancia se producirá sólo en el caso

en que la tasa de crecimiento de los precios no exceda a la tasa de descuento en todo el horizonte considerado. En períodos donde la tasa de descuento empleada sea reducida, y los precios crezcan más rápido que ésta, un monopolista alargaría el turno más tiempo que un competidor en un mercado perfecto.

Crabbé & Long (1989), también rechazan las conclusiones ofrecidas por Nautiyal & Fowler. Sostienen que sólo cuando se cumplen determinadas condiciones (que la superficie forestal sea ilimitada, o que el bosque no se encuentre regulado en el momento inicial) se produce este alargamiento del turno. Es más, estos investigadores proponen dos conjuntos de condiciones suficientes bajo las cuales el turno óptimo es invariante a cualquier tipo de estructura existente en el mercado. También construyen un corolario en el que, bajo ciertos supuestos, el turno óptimo del monopolista es más largo que el del correspondiente a un mercado perfecto. Hay que resaltar que el análisis de estos autores se realiza a un nivel mucho más elevado, en el sentido de que no es a nivel rodal, sino a nivel bosque, es decir, cubriendo una extensión mucho mayor compuesta de un número determinado de rodales. También convendría citar aquí los resultados y mostrados en un apartado anterior del trabajo de Sandhu & Phillips (1991), ya que parten de una situación de mercado imperfecto (monopolio).

Contemplando la estructura de los mercados de madera desde un punto de vista dinámico, Brazee & Mendelsohn (1990) afirman que una variación repentina en la demanda de madera provocará una alteración brusca en el nivel de precios, seguido de un período (más o menos largo) en el que los precios se modificarán, al igual que los turnos y las producciones obtenidas. Este período de ajuste finalizará cuando se haya aprovechado toda la masa existente, y se vuelva al bosque normal con su turno de Faustmann.

Por ejemplo, si la demanda de madera sufre un repentino e inesperado repunte, los precios comenzarán a crecer. El mercado responderá incrementando la oferta de madera (reducción de turnos). Esta reducción provocará que los precios descendan, y llegará un momento en que toda la masa existente en el momento del incremento en la demanda se habrá cortado, y se empezará a cortar la masa que surgió tras esa conmoción en el mercado. Dicha masa no será completamen-

te madura, y los precios seguirán bajando, lo que implicará una reducción de cortas (alargamiento de turnos), hasta llegar al estado inicial. Por tanto un incremento brusco en la demanda provoca una reducción del turno óptimo en un período más o menos largo, mientras que un descenso en la misma traerá consigo una caída en el nivel de precios, o lo que es lo mismo, un alargamiento del turno.

Por otro lado, si asumimos la existencia de un mercado imperfecto y añadimos valores de tipo ambiental, pudiera ocurrir, tal y como apuntan Kuuluvainen & Salo (1991), que las decisiones óptimas de corta estuvieran influenciadas por las preferencias del propietario (contemplando ahora un escenario de propiedad privada). Es decir, si el mercado fuera perfecto, las decisiones de corta sólo dependerían del valor actual neto futuro de la madera. Al no darse esta circunstancia, se producen decisiones de corta que vienen afectadas por variables propias del propietario, como puede ser su edad. Estos autores demuestran a través de métodos econométricos que ciertas características de los propietarios forestales influyen en la oferta de la madera.

4. IMPUESTOS

Otro de los aspectos más profusamente tratados en los últimos tiempos es la relación que existe en la aplicación de ciertos tipos de impuestos en el turno óptimo. Al tratar de incluir los impuestos dentro de una futura corriente de ingresos, ya se tocan aspectos puramente financieros que pueden estar marcados por diversos factores. La mayoría de este tipo de literatura proviene de Estados Unidos, donde existen o pueden existir diferentes tipos de tasas impositivas, y en donde cada Estado es soberano para decidir cuál aplica. Es preciso tener en cuenta que los ingresos producidos por el cobro de estos impuestos tienen mucha importancia en las economías locales y estatales, pero la decisión de adoptar un determinado tipo de impuesto o de incrementar el que ya existe, puede modificar las decisiones del propietario o gestor de la masa. A título de ejemplo cabe mencionar que hasta hace relativamente pocos años, el impuesto más difundido para gravar los montes estadounidenses era el que incidía sobre el valor de la propie-

dad («property tax»), incluyendo tanto el suelo como el vuelo. Este tipo de fiscalidad provoca generalmente una disminución de la rotación, y puede provocar al igual que en algunas partes de Estados Unidos un decremento en los turnos al aumentar la presión impositiva, hasta llegar al abandono de las tierras dedicadas al uso forestal. Para evitar esto, los métodos fiscales se han ido afinando y complicando. Por ejemplo, según Hickman (1989), existen en 12 Estados 13 programas diferentes de impuestos que gravan la cantidad de volumen cortado («severance tax»), lo que puede dar idea de la complejidad del asunto.

Aunque algunos autores (Rideout & Hof, 1986) estudian los efectos de los impuestos en el valor de la tierra, considerando constantes los turnos, otros investigadores demuestran la influencia en las edades de corta. Tal y como afirman Chang (1982), Klemperer (1983), Gamponia & Mendelsohn (1987), Amacher *et al.* (1991) el legislador puede, vía impuestos, acelerar o retrasar la decisión de corta, desplazar tierras marginales hacia usos más intensivos o modificar las densidades de plantación. Sin ánimo de ahondar mucho en este tema, se puede resumir diciendo que el alargamiento o acortamiento del turno óptimo depende de factores como:

- el tipo de impuesto (bien sea al valor de la propiedad, al valor de la tierra sólo, al valor de los árboles en pie, un porcentaje en valor, en volumen de la madera aprovechada o un tanto por ciento del crecimiento anual de la masa, etc.),
- del momento de su aplicación (parece que los que se gravan anualmente recortan la rotación óptima, mientras que los que lo hacen en el momento de la corta alargan el turno),
- de las funciones de producción utilizadas para cada especie; Amacher *et al.* (1991) han encontrado variaciones muy diversas para la misma especie, tasa de descuento y precio según se tomen unas funciones u otras, y
- la calidad de la estación y edad de la masa (Gamponia & Mendelsohn, 1987).

Koskela (1989a) analiza el impacto de la fiscalidad en la oferta de madera bajo incertidumbre en los precios y conside-

rando los mercados de capitales perfectos o imperfectos (Koskela, 1989b). Teniendo en cuenta que un aumento (disminución) de la oferta se pueda asimilar a una reducción (alargamiento) del turno, en estos trabajos se puede apreciar cómo cada tipo de impuesto analizado puede ser neutral, ambiguo o variar el turno, según las circunstancias de cada caso. Asimismo se puede apreciar cómo responderían los propietarios a cambios temporales en los impuestos o a cambios en los tipos de impuestos.

Amacher *et al.* (1991), al igual que Chang (1983), también muestran el efecto que los impuestos tienen tanto en el turno como en el esfuerzo selvícola, definido en la densidad de plantación inicial. Cuando se tienen en cuenta todos estos factores a la vez, las conclusiones que se suelen obtener son muy ambiguas. Para conseguir la neutralidad de las acciones impositivas en los turnos óptimos algunos autores (Mendelsohn, 1993) proponen combinar algunos impuestos o hacerlos progresivos (no constantes). Englin & Klan (1990) relacionan los efectos de los diversos tipos de impuestos en el turno óptimo y las implicaciones que la asunción de estos métodos impositivos conlleva hacia las externalidades de los bosques (en el cálculo del turno óptimo según el modelo de FPO éstas tampoco se tienen en cuenta). Klemperer (1989), afirma incluso que la existencia de ciertos impuestos puede crear imperfecciones en el mercado, ya que inhibe posibles ventas de madera en masas inmaduras.

Kula (1988) estudia el efecto de los impuestos (británicos) en el turno óptimo. Si el impuesto se aplica sobre el ingreso percibido de la venta de la madera, esto provocaría un descenso en el turno, ya que equivaldría a una reducción en el precio neto. Si se tuviera que tributar por cambiar una tierra a uso forestal (por ejemplo, una tasa por repoblar un terreno con un determinado tipo de plantación), sería equivalente a un incremento en los costes de establecimiento, lo que alargaría la edad óptima de corta. Si las tasas aplicaran sobre los beneficios resultantes de la venta de la madera, no tendrían influencia en el turno.

En Francia, Terreaux (1989) analiza el impacto de diversos tipos impositivos sobre la gestión de un monte de *Pinus pinaster*. Se aprecia que las variaciones en el turno son muy pequeñas (descensos de 1 año) o nulas, mientras que sí se contabilizan disminuciones más sensibles en los ingresos obtenidos.

5. ENTORNO ESTOCÁSTICO

Otra de las hipótesis que ha sido refinada, en el sentido de intentar adaptar el turno óptimo a situaciones más reales, es la que se refiere a un entorno determinista. Se van a citar, a continuación, algunos trabajos que se mueven en ambientes estocásticos y que se han centrado, la mayoría, en la variabilidad de los ingresos futuros esperados, ya que las series temporales de precios de la madera exhiben en muchas ocasiones una naturaleza estocástica. Otros autores, sin embargo, proponen considerar como estocásticos tanto el precio como las existencias futuras. En este caso, como afirman Morck *et al.* (1989), el problema se convierte en estocástico y hasta asimétrico, ya que pudiera ocurrir que si los precios resultan demasiado bajos, se pueda detener temporalmente la producción de madera.

Norstrom (1975) utilizando modelos de Markov ya había demostrado que para un proceso de producción con incertidumbre en los precios de los productos o en los volúmenes de madera, los turnos óptimos se alargan. Brazee & Mendelsohn (1988) han encontrado que considerando fluctuaciones anuales en los niveles de precios, y aplicando un modelo estocástico de carácter financiero, llega a la conclusión que a mayor variación de los precios, las rotaciones óptimas se alargan, aunque ligeramente, con respecto al caso determinista. Estas ampliaciones del turno son mayores cuanto mejor sea la calidad de estación. Otros autores han construido procesos de tipo estocástico para simular variaciones en el precio de la madera. Por ejemplo, Haight (1990) ha formulado, para su aplicación en la toma de decisiones en cuestiones de manejo forestal, un modelo de precios definido como un proceso estacionario. Aunque su estudio está más orientado hacia masas irregulares, llega a las mismas conclusiones que en el caso de Brazee & Mendelsohn, excepto cuando el valor de la tierra que toma como referencia es pequeño.

Centrándose en las fluctuaciones de los precios de la madera, y con el objeto de observar qué consecuencias pueden tener estas variaciones en el manejo de las masas, Thomson (1992) desarrolla un modelo estocástico, también basado en la programación dinámica, fundamentado en que los

precios siguen un proceso de difusión de tipo lognormal. Las conclusiones de esta investigación muestran que la longitud del turno de este modelo es mayor o igual que la edad dada para el paradigma de FPO. En el ejemplo que se acompaña (especie de crecimiento medio) se puede observar que estas variaciones no son muy grandes, a excepción de una zona (con precios moderadamente bajos) en donde sí son apreciables las diferencias (25 años). También se concluye en este trabajo que el VAN es mayor utilizando este modelo.

Muchos autores proponen un turno dependiente de la relación existente entre el precio observado y un precio prefijado de referencia («reservation price»). Dependiendo de la naturaleza del proceso estocástico que siguen los precios, la estrategia será cortar cuando sea menor (procesos no estacionarios, Haight & Holmes, 1991) o, en otros casos, cuando sea al menos igual que dicho precio de referencia (procesos estacionarios y autorregresivos de primer orden, Hultkrantz, 1995). Lo que sí parece es que considerando estas variaciones en los precios los turnos se alargan. Cuando se tiene en cuenta más de una producción de madera simultáneamente, Forboseh *et al.* (1996) muestran cómo se incrementan los turnos al considerar masas que producen madera para trituración y para sierra al considerar ambos precios como una variable aleatoria con una distribución conocida. Al considerar ambos precios, el de pulpa y el de madera para sierra, como estocásticos el turno se larga ligeramente para los casos de precios medios elevados, con respecto al caso en que se considera el precio de la madera de pulpa como fijo y el de la madera de sierra como estocástico.

Utilizando un modelo similar al anterior, Clarke & Reed (1989) y Reed & Clarke (1990) estudian la solución de Faustmann considerando en un caso que el crecimiento de la masa depende de la edad, y en el otro que depende del tamaño. Cuando se consideren que tanto el crecimiento como el precio varían estocásticamente, habrá que incurrir a aproximaciones heurísticas para conocer el turno óptimo. Con un crecimiento de la función de producción determinista y con una evolución futura de los precios de tipo estocástico, parece que el VAN que se obtiene es siempre mayor, y que el turno no varía en exceso, salvo que la incertidumbre asociada al nivel

de precios sea elevada, en cuyo caso se comprueba un aumento en dicha edad óptima. Teeter & Caulfield (1981) también llegan a similares conclusiones, aunque juegan con cuatro turnos prefijados de antemano.

6. RIESGO DE SUCESOS IMPREDECIBLES

En los últimos años ha proliferado la utilización de técnicas no determinísticas en el terreno forestal. Este enfoque no determinístico se ha aplicado no sólo a predecir o simular posibles comportamientos de precios, crecimientos, etc., sino también a evaluar el riesgo de que se produzcan en el monte desastres de tipo natural (plagas, incendios, etc.). Varios autores han estudiado los efectos del riesgo de eventos impredecibles en el turno óptimo de una masa. Uno de los primeros en ocuparse de estas cuestiones ha sido Routledge (1980), que propone un método en el que se pueden incorporar estimaciones de la ocurrencia de siniestros, principalmente incendios. De su trabajo se deduce que el efecto de estas catástrofes sobre el turno dependerá críticamente del grado de superficie arbolada que se salve después del fuego. Si dicha superficie es pequeña o nula, la edad de corta descenderá con respecto a la de FPO, tanto más cuanto mayor sea la probabilidad de existencia de incendios. Inversamente, si la extensión dañada es pequeña o casi nula, el turno aumentará también según se incremente la probabilidad de ocurrencia de llamas. En el ejemplo que el autor propone, los descensos pueden llegar a ser más intensos (hasta un 18 por ciento del turno FPO para una probabilidad del 0,02 por ciento) que los aumentos (para la misma probabilidad sólo un 3 por ciento).

A conclusiones similares ha llegado tanto Caulfield (1988) como Martell (1980), quien mediante un método de programación dinámica deduce que cuando el riesgo de fuego aumenta, el turno óptimo se acorta. Reed (1984) también estudia el problema, pero a diferencia de los autores anteriores que lo hacían a través de modelos discretos, postula un modelo continuo en el que los incendios se producen de acuerdo a una distribución de Poisson (algunos autores asumen que las catástrofes naturales ocurren bajo esta distribución; ver Ross, 1970). Bajo esta premisa concluye que el considerar el riesgo

de incendios es equivalente a añadir un «premio» a la tasa de descuento utilizada, por lo que los turnos se acortarán. También realiza una aplicación interesante, calculando hasta cuánto se podría gastar por unidad de tiempo la propiedad en medidas preventivas para descender la probabilidad de ocurrencia un determinado porcentaje. Reed & Apaloo (1991) muestran dos ejemplos: uno en donde se aprecia que el turno es insensible al riesgo de existencia de fuegos, independientemente que se hayan efectuado clareos, (aunque se produce una notable disminución del VAN conforme aumenta dicha probabilidad) y otro caso en donde se produce una reducción del turno en una sexta parte cuando existe un riesgo de incendios exógeno a las actividades selvícolas. Battacharyya *et al.* (1989) afirman que cuando el riesgo de ocurrencia de catástrofes es positivo, el turno se acorta de dos formas: una debido a su impacto como prima de riesgo, y otra a través de su impacto en el valor de las producciones forestales.

Valsta (1992) ha desarrollado un modelo de optimización estocástica del que se deriva que el cambio que se puede producir en el turno óptimo, debido al riesgo (incendios o vientos) en las variaciones anuales de la función de crecimiento, es pequeño. Bajo la hipótesis de neutralidad hacia el riesgo, se aprecia que un incremento en la variabilidad del crecimiento provoca un ligero descenso en dicha edad de corta óptima, si no se han producido claras (la especie considerada es una conífera de turno largo), mientras que si éstas se han efectuado, el turno óptimo se incrementa.

Haight *et al.* (1995) estudian cómo determinar la rotación de una masa afectada por un huracán, considerando el riesgo que se produzcan futuros daños por culpa de otra tormenta. Utilizan varias hipótesis para definir este riesgo futuro: que sea constante y destruya toda la plantación, o que sea dependiente de la edad (a menor edad, menos daño) y que una parte de la misma sobreviva al evento, aunque el rendimiento esperado decrecerá debido a los posibles daños (pérdida crecimiento, inclinación de los árboles, etc.) que se observarán en el futuro. Considerando no una serie infinita de turnos, sino tan sólo uno de ellas, los autores concluyen que cuanto mayor sea el daño producido en el momento inicial, más se acortará el turno óptimo. Esta reducción en el turno puede

llegar en el caso más desfavorable a una disminución de 7 años sobre un turno sin la existencia de riesgo de 30 años.

También Kao ha abordado el problema del turno óptimo bajo riesgo (1982) o incertidumbre (1984), utilizando modelos de programación dinámica de tipo probabilístico. En lugar de maximizar el VAN y asumir el turno de FPO, Kao maximiza la producción y emplea el turno técnicamente óptimo. El autor concluye que cuando se incrementan las variaciones en la función de producción, los turnos óptimos se acortan, al igual que las producciones.

Continuando con variaciones en la función de producción debido a agentes externos, Lohmander (1989) sintetiza programaciones óptimas de corta bajo los efectos de la contaminación, lo que conlleva reducciones en el crecimiento. Para este autor, esta disminución tiene su efecto en el turno, pero es menos importante que una variación en la tasa de descuento elegida, ya que se observa la misma influencia al pasar de un 2 a un 3 por ciento que una reducción en el crecimiento del 40 por ciento.

Por último, cabe reseñar que Routledge (1987) propone un método que modifica la fórmula de Faustmann para que tenga en cuenta el impacto de la degradación del suelo en los futuros ingresos que se derivarán de la masa. No hace referencias a los turnos óptimos que deberían acompañar a este modelo, pero demuestra que las pérdidas pueden llegar a ser significativas en un entorno de tasas de descuento reducidas (≤ 2 por ciento), lo que puede constituir un argumento más para la aplicación, en los casos en donde sea posible, de tasas de descuento sociales, que no enmascaren posibles problemas existentes cuando se toma un tipo de interés más elevado.

7. AVERSIÓN AL RIESGO

Taylor & Fortson (1991) tratan de aplicar en una masa de pinos de turno corto un método de simulación, introducido por Hertz (1964) en el campo del análisis de inversiones, que permite evaluar el riesgo mediante la utilización de distribuciones de probabilidad de ciertas variables, asumiendo que éstas se distribuyen normalmente. También introducen el concepto de aversión al riesgo del propietario del bosque,

idea que ya había sido planteada en otras ocasiones con anterioridad (e.j. Battacharyya *et al.* 1989 definen la aversión al riesgo como un subrogado de una función de utilidad). Las variables elegidas por los autores son el precio de la madera, el índice de supervivencia de la plantación a los cinco años y la cantidad de madera producida. Partiendo de la base que el enfoque en el que basan su trabajo es bastante discutible y no está unánimemente aceptado, sí parecen interesantes las conclusiones que se emanan de esta simulación. De esta suerte, han encontrado que de las tres variables definidas, la principal fuente de variación viene generada por la alteración en la cantidad de madera producida, mucho más que el precio, lo cual puede chocar a primera vista, pero como ya se ha dicho anteriormente, al ser éste normalmente un dato externo, los economistas forestales le han dedicado mucha más atención que a posibles variaciones en la producción. En este trabajo también se ofrecen unas relaciones entre aversión al riesgo, densidad de plantación y turnos óptimos, y, concluyen, al igual que Caulfield (1988), que éstos serán tanto más largos cuanto mayor sea la propensión al riesgo y/o la densidad de plantación. Curiosamente, los resultados obtenidos por Valsta (1992) contradicen este último postulado, ya que ese autor ha observado que si aumenta la propensión al riesgo, se acortan ligeramente los turnos. El mismo autor justifica esta divergencia a causa de los diferentes modelos y condiciones empleados en ambos trabajos. En ámbitos estocásticos, Clarke & Reed (1989) también afirman que el turno óptimo decrece cuando la aversión al riesgo se incrementa.

8. CAMBIOS EN LA TECNOLOGÍA

Otro aspecto que estaba incluido en las suposiciones de partida para el cálculo del turno óptimo era la existencia de una tecnología que se mantuviera constante en todo el turno de transformación. Esta hipótesis se está convirtiendo en engañosa, sobre todo en lugares que ofrecen buenas calidades de estación para la implantación de especies de crecimiento rápido. Por ejemplo, Hyde *et al.* (1991) han encontrado para un pino del sur de Estados Unidos una tasa de cambio tecnológico del 0,6 por ciento anual durante los años 1950-1980.

Según Löfgren (1985), si se comparara las calidades de estación definidas en Suecia en los años 30, con las producciones obtenidas hoy en día, se puede apreciar que actualmente superan en un 30 por ciento a la producción que entonces se había considerado máxima. Las causas de este incremento, aparte de deficiencias en la construcción de los índices que miden la calidad de estación, radica en avances en las tecnologías forestal (selvicultura, preparación del terreno, etc.) así como en la biotecnología (e.g. material genético). Partiendo de diversas hipótesis acerca de la naturaleza del cambio (que sea neutral en el tiempo, e.g. una mejor tecnología selvícola, o que mejore gradualmente, e.g. introducción material genéticamente superior) se puede afirmar que el turno óptimo se acorta, ya que un cambio tecnológico, bien sea aislado o gradual a lo largo del tiempo, equivale a un aumento en el precio. El autor concluye diciendo que no es la mejora en el crecimiento lo que hace que se acorten los turnos, sino el conocimiento de las posibilidades futuras de mejoras en la función de crecimiento. Hyde (1980) afirma, en la misma línea, que expectativas futuras de cambios técnicos se traducen en turnos más breves, ya que se prefiere cambiar la masa existente por otra en donde se apliquen estos cambios.

Estas mismas conclusiones se pueden apreciar en Johansson & Löfgren (1985). Bhattacharyya & Lyon (1994) realizan un estudio para justificar el gasto en la investigación biotecnológica aplicada a las ciencias forestales en Estados Unidos, y llegan a la misma conclusión que Löfgren (1985), sólo que introducen los costes de regeneración como variable endógena en el problema.

Por otra parte, si se estudian para una misma especie el turno económicamente superior cuando se aplican distintos métodos de preparación del suelo, se aprecia que el turno disminuye cuando aumenta la tasa de supervivencia de las plántulas (ver Quicke *et al.*, 1993). También es preciso tener en cuenta que ciertos cambios en la tecnología podrían incluso provocar cambios estructurales en los mercados de madera.

En este apartado se han discutido posibles cambios futuros en la tecnología que pueden, en definitiva, aumentar la calidad de la estación y, consecuentemente, una variación en los turnos. Sin embargo, no se ha considerado que la función de producción considerada puede provocar impactos en la masa.

Es decir, el aplicar un conjunto de operaciones forestales idénticas en varios turnos consecutivos puede producir cambios tanto en la calidad de estación como en las regeneraciones futuras (sobre todo si se trata de especies de crecimiento rápido), lo que equivale a decir la calidad de la estación puede decrecer (Brumelle *et al.*, 1991). Una de las hipótesis implícitas de la formulación de Faustmann es que la calidad de la estación no varía, lo que está en contradicción con lo que se acaba de exponer. Walter (1980) ha estudiado el problema, y dado que la solución impone turnos iguales perpetuamente, la única solución sería compensar este descenso en productividad con las operaciones convenientes, lo que implicaría un incremento en los costes, que provocarían un aumento en la rotación óptima. La otra posibilidad, que es la que apunta este autor, sería el considerar turnos que no tuvieran la misma longitud. Incluso llega a proponer una fecha final para la finalización del ciclo productivo,

9. ESTRUCTURA DE LA MASA

200

Otra de las hipótesis de las que se partía era que la masa era coetánea (en el trabajo original de Faustmann el punto de partida era una tierra sin árboles) y el análisis se efectuaba a nivel rodal. Sin embargo, en bastantes casos el escenario real es diferente, por ejemplo un bosque en proceso de ordenación, o un rodal que a una determinada edad se corta en parte, mientras que el resto permanece intacto durante el tiempo considerado. En tal tipo de escenario, Oderwald & Duerr (1990) afirman que el turno FPO no es el correcto estimando que en estos casos la tendencia general es que la edad de corta sea un 10 por ciento menor que la de Faustmann. Este artículo ha provocado una encendida polémica, puesto que algunos autores (Howard, 1990; Chang, 1990; O'Laughlin, 1990; Hultkrantz, 1991) lo rebatían desde distintos ángulos. Por ejemplo, Chang afirmaba que una vez corregidos ciertos planteamientos en el trabajo de Oderwald & Duerr, (no estaba incluido en la renta de la tierra el valor de la masa que no se iba a cortar) ambas soluciones eran la misma.

Hoganson & McDill (1993) partiendo de las mismas condiciones que Oderwald & Duerr, demuestran que el turno ópti-

mo para una masa ordenada depende de la distribución inicial de edades en la misma, de la longitud del turno de transformación para obtener esa distribución deseada y de otras restricciones que se puedan introducir (limitaciones de los flujos de volúmenes en el turno de transformación). Utilizando diversas situaciones de partida, demuestran que los turnos óptimos estarán muy cerca de los ofrecidos por el turno FPO, y que no existe ninguna tendencia que indique un acortamiento o un alargamiento del mismo.

En el caso que la masa a estudiar sea una masa irregular, Chang (1981) demuestra a través de un modelo muy simple de masa irregular, que la rotación óptima para masas irregulares puede ser derivada desde una formulación muy similar a la de Faustmann, y que se pueden obtener conclusiones similares con respecto a cambios en la tasa de descuento, (al aumentar ésta, disminuye la periodicidad utilizada en las cortas) pero no así en los precios, ya que no afectan a la condición de optimalidad. A resultados similares llega también Hall (1983) a través de una generalización del trabajo de Bentley & Tee-guarden (1965). Para profundizar en estos temas, se puede acudir a los trabajos de Nautiyal (1983), y Haight (1990, 1991), aunque hay que resaltar que en las masas irregulares se pretende finalmente una distribución de pies por clases diamétricas, por lo que el paradigma FPO tendría que aplicarse bajo muchas restricciones.

10. DISTINTAS FORMAS DE MASA

Hasta ahora se ha intentado establecer cómo afectaría al turno óptimo variaciones en las hipótesis sobre las que descansa la formulación FPO, considerando siempre que el bosque en cuestión está ordenado según la forma fundamental de masa de monte alto. Esto equivale a decir que todos sus componentes se desarrollen a partir de semillas. Sin embargo, existen especies cuyas condiciones intrínsecas les permite aprovecharlas mediante otra forma fundamental de masa conocida como monte bajo, que consiste en aprovechar la capacidad de rebrote para conseguir varios turnos de una misma cepa. A continuación, se van a presentar ejemplos del efecto de aplicar las nociones del turno financiero óptimo en estos casos.

Una aplicación bastante extendida, aunque ahora en desuso, de este método de beneficio, consistía en aprovechar al máximo esta tecnología con fines energéticos (producción de biomasa o incluso de metanol). Así, en Rawart & Nautiyal, 1985 o en Moran & Nautiyal, 1985, se pueden ver ejemplos de aplicación de metodologías del tipo FPO a manejos muy intensivos de choperas (turnos de 2-4 años, 20-30.000 plantas/ha). En este tipo de selvicultura no se aprecia ninguna variación con respecto a lo que se podría esperar. Únicamente hay que tener en cuenta que al existir muchas más intervenciones en las masas, los costes juegan un papel más importante a la hora de fijar tanto los turnos como las rentabilidades.

Otro ejemplo de monte bajo muy extendido en todo el mundo (más de 4.000.000 ha, según Matthews, 1989) es el cultivo de *Eucaliptus sp.* para este fin. Medema & Lyon (1985) estudian, dada una función de producción, la determinación tanto de los ciclos como de los turnos óptimos. Llegan a la conclusión que son diferentes si se estudia un único ciclo, (los turnos o rebrotes se alargan en este caso conforme avanza el mismo) que si se consideran múltiples ciclos. En este caso, y para el mismo ejemplo, los turnos decrecen (a lo largo del ciclo). Los autores concluyen que, en el caso de considerar varios ciclos, las rotaciones serán menores que si se considerara tan sólo una, pero dependiendo de la función de producción adoptada, pueden crecer o decrecer dentro del mismo. Hay que tener en cuenta, a la hora de efectuar los cálculos, que conforme una planta rebrota sucesivamente, a partir de un determinado rebrote, va perdiendo vigor, con lo cual sus producciones serán inferiores. Para solventar este inconveniente, Medema & Lyon (1985) proponen incluir un coeficiente en la función de producción que se reduzca en cada rebrote. Otros autores, como Pohjonen & Pukkala (1988) construyen distintas funciones de producción según sea una planta que nace de semilla o de rebrote. También se puede ver una aplicación similar en Ara & Yahya (1990), donde se estudia una plantación de *Eucaliptus camadulensis* para la producción de leña.

11. CAMBIO DE USO DE LA TIERRA

Hay que reseñar también que algunos autores han considerado el hecho de que un cambio en ciertas condiciones de

mercado (fundamentalmente precios y/o costes), puede forzar al propietario de la tierra a cambiar su uso de lo forestal a lo agrícola, o viceversa. El trabajo de McConnell *et al.* (1983) plantea cómo se pueden considerar estos cambios a partir de la fórmula FPO.

En numerosas ocasiones, se puede dar una transformación en la utilización de una tierra agrícola a otra forestal, mediante la introducción por parte de las administraciones públicas de subvenciones que animen a que se produzca esta conversión. Recientemente se ha dado en la Unión Europea esta circunstancia (e.g. en España, decretos 378/93; 152/96), y se ha podido apreciar que el efecto sobre los turnos es el esperado, es decir, una reducción de los mismos. Esta reducción no es muy significativa en especies de crecimiento rápido y medio, y sí lo puede ser en algunas especies de crecimiento lento (e.g. *Fagus sylvatica*), ya que el efecto de las ayudas se traduce en unos turnos inviables selvícolamente al no permitir la regeneración natural de las masas (Díaz Balteiro & Romero, 1995).

12. EFECTOS DE LAS OPERACIONES SELVÍCOLAS

Las hipótesis sobre las que descansan la solución FPO incluían, aparte del tiempo, un factor de producción fijo (la tierra) y no tenía en cuenta ningún tipo de inputs selvícolas. La importancia que tiene estas operaciones viene dada por algunos autores (e.j. Ledyard & Moses, 1976; Hyde, 1980; Jackson, 1980; Heaps, 1982; Nautiyal & Williams, 1990; Williams & Nautiyal, 1990) que las incluyen como un input dentro del proceso de producción, denominándolas intensidad de manejo o esfuerzo selvícola.

Siguiendo a Hyde (1980), el introducir un modelo más general en el que la función de producción no depende sólo del tiempo, sino del tiempo y del esfuerzo selvícola. La introducción de esta variable viene justificada por las peculiares características de algunos bosques americanos, como puede ser la no consecución inmediata de la regeneración natural o la tendencia alcista de los precios de la madera desde hace 150 años. Como se espera que esta tendencia continúe, el propietario desea acelerar la producción mediante medidas selvícolas, como pueden ser la regeneración artificial con pies selec-

tos, con pies de más de un año o cambiando de especie. La introducción de mejores plántulas conduce a turnos más cortos. No se debe confundir estos inputs con los costes de regeneración que figuran incluidos en la solución FPO. Hay que recordar que se parte de una tierra ociosa, y hay que efectuar una inversión para que exista en el futuro una masa forestal. Cuanto mayor sea, más largo será el turno. Estas medidas de manejo suponen una clara mejora en las producciones futuras, ya que se supone que si no se aplican estas medidas, la masa alcanzará una regeneración satisfactoria, aunque esta circunstancia se producirá más tarde.

Continuando con autores que siguen el modelo tradicional de FPO, sin considerar ninguna variable de tipo selvícola, alguno de ellos como Naslund (1969) ya plantea la solución conjunta al problema de establecer una programación de cortas óptimas, pero sin resolver el problema. Para Brumelle *et al.* (1991), el uso de la silvicultura podría, básicamente, mejorar la rentabilidad financiera de las inversiones forestales al incrementarse el valor de la madera o acortando los turnos. Desgraciadamente no profundiza demasiado en un análisis coste-beneficio de dicho uso. Dentro de las operaciones selvícolas, las más importantes a efectos de influencia en el turno óptimo serían las claras.

Bajo un entorno estocástico, y a través de simulaciones, Teeter & Caulfield (1991) afirman que cuando el turno descende, si en la simulación también está incluida como variable la densidad inicial de plantación, al descender el turno (e.g. a causa de un aumento en la tasa de descuento) también se reduce el número de plantas por ha óptimas por otro lado, en un trabajo de Reed & Apaloo (1991) se muestra un ejemplo en donde la realización de un clareo provoca una reducción del turno (de 75 a 65 años), pero esta operación no resulta económicamente viable.

Cawrse *et al.* (1984) intentan, por medio de la teoría del control óptimo, determinar una programación de cortas óptimas, tanto en periodicidad como en intensidad, incluyendo la corta final. Para un caso hipotético, estos autores muestran que la introducción de claras alarga siempre los turnos. Para una relación de precios entre las claras y las cortas finales muy similares, y suponiendo que los ingresos por las cortas se incrementen en un 2 por ciento anual, jugando con la tasa

de descuento, se comprueba que al aumentar ésta, las claras se inician antes, y el intervalo entre la última clara y la corta final se reduce. Esta relación se cumple siempre que la tasa de descuento no sea muy alta (< 8 por ciento), ya que en este caso, se eleva la frecuencia de las claras, y la última clara se confunde con la corta final, provocando un sustancial alargamiento del turno. También se puede comprobar en este ejemplo que el incrementar el precio de la madera de las claras alarga ligeramente los turnos, salvo que la tasa de descuento empleada sea baja (2 por ciento). En España, Gonzalo *et al.* (1988) utilizan herramientas matemáticas de corte similar para integrar a la vez la decisión de corta junto con la política óptima de claras.

Siguiendo a Kao & Brodie (1980), se puede aseverar que al introducir en un modelo de simulación la existencia de varias claras, sin considerar costes de establecimiento, para el pino de Oregón (*Pseudotsuga menziesii*), el turno se va alargando (37 años sin claras hasta 46 con cuatro claras a partir de los 30 años), y al aumentar el número de las mismas, las primeras decrecen en intensidad.

Continuando con la misma especie, pero situados ahora en Holanda, para Filius & Dul (1992), el efecto de las claras sobre el turno óptimo sólo se aprecia cuando se eliminan restricciones para no realizar claras fuertes en los primeros períodos (así evitan posibles riesgos de derribos producidos por el viento) y si se trabaja en sitios de buena calidad de estación con tasas de descuento moderada, se alargan ligeramente los turnos. En los demás casos, parece que no se observan influencias en el turno óptimo.

En el caso de ciertas plantaciones, el espaciamiento inicial puede marcar tanto el turno como el valor actual neto que se pueda obtener en el futuro. Para Brodie *et al.* (1978), al elevarse la densidad inicial supone una reducción del turno y un incremento en la intensidad de las claras. De forma similar, Stone *et al.* (1993) muestran que en ciertas especies propias de sistemas agroforestales como *Leucaena leucocephala*, el turno óptimo se reduce notablemente (en un tercio) al incrementarse la densidad de plantación (de 5.000 a 20.000 pies/ha).

Cuando se trata de masas mezcladas, por medio de tratamientos selvícolas como las claras se puede modificar la proporción de las distintas especies hasta llegar al manejo óptimo

(entendiendo como tal el que produzca el mayor valor actual neto). Lógicamente, al variar el tratamiento que se le da a dicha masa, el turno óptimo podrá modificarse. Siguiendo a Vettenranta (1996), en el caso de masas compuestas de *Pinus sylvestris* y *Picea abies*, para una misma tasa de descuento, el turno será más largo (unos diez años) si se han aplicado claras por alto que si las empleadas fueran por bajo. Cuando la tasa de descuento se incrementa (e.g. de un 2 a un 4 por ciento), desciende el turno e incluso podría reducirse el número de claras programadas.

Otro tipo de manejo selvícolas sería el considerar un incremento en los gastos de preparación del sitio. Según Heaps (1981), si estos gastos provocan un beneficio, es decir, suponen un avance en el crecimiento de la masa, el turno óptimo se acorta, es decir, sería similar a un incremento en la calidad de sitio.

13. OTRAS PRODUCCIONES

Otra debilidad implícita en los planteamientos de FPO es que ignora opciones de estrategia comercial, como bien definen Brumelle *et al.* (1991) que puedan permitir en un momento dado el cambiar la producción final de la masa. A través principalmente de tratamientos selvícolas, se pueden cambiar la(s) diferente(s) producción(es) de madera, o sus calidades, en función de las necesidades del mercado. En el caso en que la masa no sea lo suficientemente joven para permitir esta flexibilidad, y siguiendo a Wear & Parks (1994), las decisiones adoptadas por el gestor producen una serie de productos que están determinados por las reglas del mercado, y esta mezcla de productos prácticamente sólo puede modificarse por medio del turno, ya que no suele existir posibilidad de sustitución entre distintos productos a una misma edad.

En otro trabajo se abordarán otras producciones y/o servicios no madereros, pero hay que tener en cuenta que, como ya decía Anderson (1976), las herramientas empleadas para el cálculo de turnos óptimos deben incluir otras producciones y beneficios distintos de la madera, como la producción de pasta para celulosa, pero sin estar confinada a ella. Leech (1993) muestra cómo variaría el turno en masas de *Pinus ra-*

diata al cambiar los objetivos selvícolas, ya que si el objetivo de la ordenación fuera obtener árboles que tuvieran en la madera de sierra su destino final, el turno se alarga ostensiblemente. Este alargamiento proporciona una mayor flexibilidad a la hora de conseguir una oferta de madera continua y sostenida en caso de catástrofes naturales.

En el caso en que se considere simultáneamente una masa que produzca dos clases de producciones exclusivamente madereras, Forboseh *et al.* (1996) muestran cómo al considerar una masa que puede producir materias primas cuyo destino sea la producción de celulosa, y, por otra parte, madera que sea adecuada para su tratamiento en serrerías, el turno óptimo varía con respecto al de Faustmann. Estos autores demuestran cómo se reduce la edad óptima de corta, dependiendo de precio de la madera destinada a la producción de celulosa. Así, cuando este precio se triplica, el turno desciende un 34 por ciento, y el VAN se incrementa en un 76 por ciento. Concluyen estos autores afirmando que la producción única no sólo tiende a retrasar la edad de corta, sino que infravalora el valor potencial de una masa forestal.

14. OTROS COSTES

Hasta ahora, en la determinación del turno óptimo, se habían considerado tan sólo los costes que se producían al regenerar la masa. Sin embargo, en general existen otros costes derivados de ciertas operaciones selvícolas, así como los costes en concepto de cortas y transporte. Implícitamente se asumía que estos desembolsos no los realizaba el propietario, o bien se incluían en el precio final de la madera. Al igual que Clark & de Pree (1979), Heaps & Neher (1979) estudian el caso en el que el coste de la corta varía según la intensidad de la misma, de una forma lineal o no. Heaps (1981) generaliza el trabajo de Ledyard & Moses (1976) (en el que se afirmaba que este tipo de costes actúa en la determinación del turno óptimo de la misma forma que un incremento en los gastos de regeneración), al introducir un análisis completo en el que se incluye la existencia de economías de escala en los costes de saca, dependiendo del tamaño de los troncos, y considerando un esfuerzo selvícola variable.

Howe (1979) y Lyon (1981) comparan el modelo FPO cuando se incrementan los costes de transporte de la madera. Hyde (1980) afirma que los costes derivados de la extracción pueden llegar a ser una variable crítica, ya que pueden determinar el tipo de selvicultura que se le aplica a una masa, o si esta se corta o no (dependiendo, por ejemplo de su distancia al mercado). Tanto los costes debidos a esta distancia o a dificultades en la saca influyen en el precio final, lo que alargarán los turnos (hay que tener en cuenta que estamos de nuevo ante el ejemplo americano, en donde existe un «stock» de masas no tratadas por el hombre).

15. TURNO SOCIALMENTE ÓPTIMO

Hasta ahora no se ha contemplado la estructura de la propiedad y su posible influencia en la determinación del turno óptimo. Por ejemplo, una pregunta que se han hecho algunos economistas forestales es si el turno FPO es socialmente óptimo. Anderson (1976) ya comparaba el paradigma Faustmann con los modelos de control óptimo utilizados en la economía de recursos naturales, y concluía que los resultados eran los mismos, y que apoyar los modelos de rotaciones óptimas así definidos era óptimo no sólo desde una perspectiva privada, sino también desde una política pública que intente maximizar el bienestar social proveniente de la producción de la madera sobre un horizonte de actuación infinito. El mismo autor (Anderson, 1981) afirmaba que en ausencia de externalidades, y considerando mercados perfectos, los intereses privados coincidirán con los públicos, por lo que el turno de Faustmann sería óptimo desde un punto de vista social. Johannson & Löfgren (1985), Löfgren (1985) también demostraron la coincidencia del óptimo privado y social, siempre que se cumplieran las condiciones que garantizan la competencia perfecta. También Kemp & Van Long (1983) discutieron el problema del turno óptimo en términos de un planificador maximizador del bienestar, utilizando la tierra y el trabajo como inputs. Si el trabajo es sobrante, la solución FPO es asintóticamente óptima, mientras que si lo fuera la tierra, la solución FPO no sería la adecuada.

Una práctica muy extendida es considerar a la hora de obtener la solución FPO una tasa de descuento distinta depen-

diendo de que la masa en cuestión sea privada o pública. Al adoptar una tasa pública o social implícitamente se están valorando otras funciones del bosque (asunto que no se trata en este artículo), pero existe una polémica entre todos los economistas ambientales acerca del valor que debería darse a esa tasa. Arrow (1976) afirma que sería de un 10 por ciento. Esta cifra sensiblemente alta ha sido utilizada por algún economista (Berck 1979) para demostrar que si los propietarios de masas de especies de crecimiento rápido o medio como los de *Pseudotsuga menziesii* están actuando como si estuvieran descontando al 5 por ciento, no se puede decir que empleen turnos más cortos que los óptimos. Otros autores discrepan que esa cifra refleje la tasa social de descuento, y así a título de ejemplo, Kula (1984) afirma que para Estados Unidos el índice adecuado sería del 5,3 por ciento, y para Canadá del 5,2 por ciento. El mismo autor (Kula, 1985) calcula una tasa del 3,65 por ciento para el Reino Unido.

16. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DINÁMICOS

Tal como está definida, la solución de Faustmann se basa en una aproximación al problema desde un punto de vista estático, ya que a partir de un determinado momento en el tiempo se hacían pronósticos sobre las futuras evoluciones de los precios, volúmenes y tasas de descuento. Esta solución se corresponde a un problema de optimización clásico, al que se puede llegar también a través de otros métodos estáticos como puede ser la programación lineal y la programación no lineal.

Como ya se ha podido comprobar en anteriores capítulos, las variables que influyen en el problema del turno óptimo cambian durante el tiempo, y algunos autores proponen el uso de procedimientos de tipo dinámico. Estas técnicas, muy en boga en la gestión de recursos naturales, permiten incorporar efectos de tipo estocástico, así como la determinación conjunta del turno óptimo junto a las claras.

Bastantes investigadores han seguido estas líneas de trabajo, y parece que de entre todas las herramientas existentes para resolver problemas de optimización dinámicos, las más empleadas han sido la programación dinámica y el llamado

principio de Pontryagin (Pontryagin *et al.*, 1962). Aunque el propósito de este artículo no es el de la realización de un resumen de procedimientos matemáticos (ver Williams, 1989, para un excelente revisión), es preciso aclarar que los métodos que se acaban de citar han sido empleados por algunos autores para el cálculo, directa o indirectamente, del turno óptimo y sus posibles variaciones a lo largo del tiempo.

Así, el trabajo anteriormente mencionado de Anderson (1976) ya utiliza estas teorías, que también han sido empleadas por otros autores, algunos de ellos no citados con anterioridad, como Amidon & Akin (1968); Naslud (1969); Schreuder (1971); Clark (1976); Brodie *et al.* (1978); Brodie & Kao (1979); Heaps & Neher (1979); Berck (1979); Heaps (1984); Haight *et al.* (1985); Haight & Smith (1991); Donnelly & Betters (1991), para extender investigaciones previas a este entorno dinámico. Algunos de estos autores utilizan esta técnica para calcular simultáneamente el número de claras y su intensidad, a la vez que el turno óptimo. Sin embargo, hay que puntualizar que estas aproximaciones no se han extendido mucho debido tanto a su mayor complejidad a la hora de su resolución como a limitaciones de tamaño.

17. TURNOS EMPLEADOS EN LA PLANIFICACIÓN FORESTAL

La solución de FPO, aunque desde el punto de vista teórico es la correcta cuando se halla el turno óptimo de una masa, no siempre es la empleada en la realidad. De hecho, en España no ha sido habitualmente aplicada en los proyectos de ordenación, pero eso no quita validez a la formulación de la teoría FPO. En primer lugar hay que decir que el turno de Faustmann ha sido sorprendentemente marginado en la enseñanza forestal en nuestro país. Digo lo de sorprendentemente, porque ya Mackay (1994, capítulo VI) apuntaba esta solución y explicaba concienzudamente los pros y contras de su adopción, pero a partir de esta obra la solución de Faustmann prácticamente ha desaparecido de la enseñanza y de la literatura forestal española. Desde otro punto de vista, hay que tener en cuenta que en montes de propiedad privada, aunque sea de un modo no formalizado, el turno FPO ha sido permanentemente aplicado. Al fin y al cabo, el turno FPO simple-

mente intenta maximizar las ganancias netas descontadas que el propietario obtiene por la explotación de unas masas forestales.

Por otro lado, desde hace unos pocos años, están apareciendo aproximaciones al problema que parten de una idea distinta, y que se intentará explicar a continuación.

En primer lugar, es necesario recalcar que a nivel monte (i.e. un bosque con distintos rodales en cuanto a edades, especies, tipos de masa, productividades, etc.) la solución óptima vendrá dada por la solución de un problema, normalmente de programación lineal, en el cual se maximiza el VAN, pero sujeto a una serie de restricciones. Estas restricciones suelen expresar las decisiones de manejo que el gestor ha creído conveniente aplicar a dicho monte. El resultado final son modelos como los conocidos en la literatura forestal como *Modelo I* y *Modelo II*. Si el problema tiene solución factible, generará la combinación de cortas que produzca el máximo VAN, pero no asegura que todos los rodales, cuarteles, etc. se talen a la edad indicada por el paradigma FPO.

Además, es necesario recordar que en algunos países existen turnos normativos, en los cuales la Administración fija directamente los turnos mínimos, o impone condiciones sobre la cantidad de madera que se puede aprovechar en cada período (en España, el Gobierno de Navarra ha dictado recientemente disposiciones legales en las que se prefijan turnos para algunas especies). En los Estados Unidos se promulgó en 1976 la NFMA («*National Forest Management Act*») por lo cual se obliga en estos bosques públicos a mantener un flujo de madera constante y a no cortar los árboles hasta que no alcancen el turno técnicamente óptimo, o, lo que es lo mismo, el que corresponde a su máxima producción media anual. Esta medida ha tenido gran impacto, ya que estos bosques ocupan tan sólo en los estados de Washington y Oregón más de 4×10^6 ha (Conrad & Ludwing, 1994). Sin embargo, este tipo de cautela legal ha sido fuertemente criticada por distintos economistas forestales (ver Reed, 1986, para una buena revisión del tema), aunque desde el punto de vista de asegurar otras producciones y/o externalidades del monte resulta bastante avanzada. También en otros países como Japón ha habido turnos impuestos por la Administración en ciertos programas de reforestación tras la Segunda Guerra Mundial (ver Marchak,

1992). Como señalan Teeter & Caulfield (1991), otro ejemplo de turnos prefijados, aunque no tiene nada que ver con las anteriores, se puede producir en empresas que aplican el mismo turno a sus masas de una misma especie, independientemente de la productividad de la estación y otras factores que pueden afectar al turno óptimo.

Como ya se ha anticipado anteriormente, existen modelos empíricos para el cálculo del turno óptimo, a nivel sobre todo de propietario forestal, en el que se trata de maximizar no el VAN, sino la utilidad del propietario o del gestor forestal. Estos modelos llamados «positivos» (Wear & Parks, 1994), se han empezado a desarrollar en los últimos años y emplean numerosas herramientas de tipo econométrico (modelo Tobit, etc.). Como ya se ha mencionado anteriormente (ver p. 10), las preferencias del propietario pueden jugar un papel importante en las decisiones de corta, ya que, por ejemplo, dependiendo de la edad y de la educación valorará de forma distinta los valores no ambientales. De igual forma, las decisiones de corta están influidas por el nivel de otros ingresos distintos de los procedentes de la venta de madera. Ejemplos de estos modelos positivos se pueden encontrar en los trabajos de Koskela (1989a, 1989b); Kuuluvainen & Salo (1991); Dennis (1989, 1990).

18. UNA OBSERVACIÓN FINAL

El trabajo de revisión bibliográfica abordado en este artículo pretende, en primer lugar, mostrar que el tema de los turnos óptimos no es algo totalmente resuelto, ya que a tenor de los estudios que se publican se puede apreciar que es un tema bastante dinámico, y que está recibiendo permanente atención en el campo de la Economía Forestal. El generalizar la solución FPO ampliando su campo de acción (mediante el levantamiento de las hipótesis iniciales) no constituye un mero ejercicio académico, sino que puede proporcionar datos muy útiles para la ordenación de montes, ya que los resultados que se obtienen ayudan a valorar distintas posibilidades de gestión, así como a decidir soluciones óptimas en diferentes situaciones y, en definitiva, a comprender algunas de las interacciones económico-selvícolas subyacentes en todo manejo

forestal que ayuden al gestor o propietario a tomar mejores decisiones.

Aunque en ocasiones el paradigma de FPO no sea utilizado (por ejemplo a nivel monte), ello no quiere decir que pierda utilidad, ya que debido a la complejidad subyacente en muchos modelos de «forest management» puede ayudar a formular hipótesis correctas dentro de dichos modelos, así como proporcionar resultados en cuanto a, por ejemplo, la estructura de la oferta de madera.

También merece la pena resaltar que en muchos casos el determinar, bajos unos determinados supuestos, una edad de tala óptima puede llegar a ser complicado si se atienden a las posibles variaciones e influencias entre las distintas variables. Algunos efectos se pueden contrarrestar, otros pueden ser neutros o incluso complementarios. Por todo ello, de todos los trabajos referenciados se puede sacar la conclusión general de que, salvo en casos muy puntuales, el turno definido por el paradigma FPO es, cuando menos, una buena aproximación al turno óptimo, lo que también refleja la robustez de dicha solución. No obstante, hay que señalar las indudables limitaciones al planteamiento primigenio de Faustmann para su aplicación directa hoy en día. □

AGRADECIMIENTOS

Quisiera mostrar mi agradecimiento al Profesor Carlos Romero, de la ETSI Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, por la lectura crítica de un borrador inicial. Asimismo, quisiera agradecer las aportaciones de un revisor anónimo. Este trabajo se ha realizado dentro del proyecto de investigación AGF 95-0014, financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT).

BIBLIOGRAFÍA

- AMACHER, G. S.; BRAZEE, R. J. y THOMSON, T. A. (1991): The effect of forest productivity taxes on timber stand investment and rotation age. *Forest Science*, 37 (4): pp. 1.099-1.118.

- AMIDON, E. y AKIN, G. (1968): Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *Forest Science*, 14: pp. 287-291.
- ANDERSON, F. J. (1976): Control theory and optimum timber rotation. *Forest Science*, 22 (3): pp. 242-246.
- ANDERSON, F. J. (1981): Optimum forest rotation: comment. *Land Economics*, 57 (2): pp. 293-294.
- ARA, I. y YAHYA, N. S. M. (1990): Profitability of Eucalyptus camadulensis plantation in Bangladesh. *Bangladesh Journal of Forest Science*, 19 (1 y 2): pp. 45-55.
- ARROW, K. J. (1976): The rate of discount for long-term public investment. En Ashley, H.; Rudman, R. y Whipple, C. (eds.): *Energy and the environment*. Pergamon Press, New York.
- AZQUETA, D. y FERREIRO, A. (eds.) (1994): *Análisis económico y gestión de recursos naturales*. Alianza Editorial, Madrid.
- BARE, B. B. y MENDOZA, G. A. (1992): Timber harvest scheduling in a fuzzy decision environment. *Canadian Journal of Forest Research*, 22 (4): pp. 423-428.
- BENTLEY, W. R. y TEEGUARDEN, D. E. (1965): Financial maturity: a theoretical review. *Forest Science*, 11: pp. 76-78.
- BERCK, P. (1979): The economics of timber: a renewable resource in the long run. *Bell Journal*, 10 (2): pp. 447-462.
- BHATTACHARYYA, R. N.; SNYDER, D. N. y BISWAS, B. (1989): The optimal forest rotation: some economic dimensions. *Indian Economic Journal*, 37 (2): pp. 69-82.
- BHATTACHARYYA, A. y LYON, K. S. (1994): Biotechnical progress in forestry: An optimal control analysis. *Forest Science*, 40 (1): pp. 120-141.
- BRAZEE, R. y MENDELSON, R. (1988): Timber harvesting with fluctuating prices. *Forest Science*, 34 (2): pp. 359-372.
- BRAZEE, R. y MENDELSON, R. (1990): A dynamic model of timber markets. *Forest Science*, 36 (2): pp. 255-264.
- BRODIE, J. D. y KAO, C. (1979): Optimizing thinning in Douglas-fir with three-descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. *Forest Science*, 25: pp. 665-672.
- BRODIE, J. D.; ADAMS, D. M. y KAO, C. (1978): Analysis of economics impacts on thinning and rotation for Douglas fir, using dynamic programming. *Forest Science*, 24: pp. 513-522.
- BRUMELLE, S. L.; CARLEY, J. S.; VERTINSKY, I. B. y WEHRUNG, D. A. (1991): Evaluation silvicultural invest-

- ments: A review in the Canadian context. *Forestry Abstracts*, 52 (9): pp. 803-856.
- CAUFIELD, J. P. (1988): A stochastic efficiency approach for determining the economic rotation of a forest stand. *Forest Science*, 34: pp. 441-457.
 - CAWSE, D. C.; BETTERS, D. R. y KENT, B. M. (1984): A variational solution technique for determining optimal thinning and rotational schedules. *Forest Science*, 30 (3): pp. 793-802.
 - CLARK, C. W. (1976): *Mathematical Bioeconomics: The optimal management of renewable resources*. Wiley-Interscience, New York.
 - CLARK, C. W. y DE PREE, J. D. (1979): A simple linear model for the optimal exploitation of renewable resources. *Applied Mathematics and Optimization*, 5: pp. 181-196.
 - CLARKE, H. R. y REED, W. J. (1989): The tree cutting problem in a stochastic environment. *Journal of Economic Dynamic and Control*, 13: pp. 569-595.
 - CLAWSON, M. (1979): Forests in the long sweep of American history. *Science*, 204: pp. 1.168-1.174.
 - COMOLLI, P. M. (1981): Principles and policy in forestry economics. *Bell Journal*, 12 (1): pp. 300-309.
 - COMOLLI, P. M. (1984): A proposition on imperfect stumpage markets. *Land Economics*, 60 (3): pp. 297-300.
 - CONRAD, J. y LUDWING, D. (1994): Forest land policy: the optimal stock of old-growth forest. *Natural Resource Modeling*, 8 (1): pp. 27-45.
 - CRABBE, P. J. y VAN LONG, N. (1989): Optimal forest rotation under monopoly and competition. *Journal of Environmental Economics and Management*, 17 (1): pp. 54-65.
 - CHANG, J. S. (1981): Determination of the optimal growing stock and cutting cycle for an uneven-aged stand. *Forest Science*, 27 (4): pp. 739-744.
 - CHANG, J. S. (1982): An economic analysis of forest taxations impact on optimal rotation age. *Land Economics*, 58 (3): pp. 310-323.
 - CHANG, J. S. (1983): Rotation age, management intensity, and the economic factors of timber production: do changes in stumpage prices, interest rate, regeneration cost and forest taxation matter? *Forest Science*, 29 (2): pp. 267-277.
 - CHANG, J. S. (1990): Comment II. *Forest Science*, 36 (1): pp. 177-179.

- DENNIS, D. F. (1989): An economic analysis of forest behaviour: integrating forest and ownership characteristics. *Forest Science*, 35 (4): pp. 1.088-1.104.
- DENNIS, D. F. (1990): A probit analysis on the harvest decision using pooled time-series and cross-sectional data. *Journal of Environmental Management*, 18: pp. 176-178.
- DENNIS, D. F. y REMINGTON, S. B. (1985): The influence of price expectations on forestry decisions. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2: pp. 81-83.
- DÍAZ BALTEIRO, L. (1995): *Modelos de programación matemática para la ordenación de montes: Desarrollos teóricos y aplicaciones al sector forestal español*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- DÍAZ BALTEIRO, L. (1995): Rentabilidad financiera de especies forestales arbóreas de crecimiento medio y lento. Algunas reflexiones de política forestal. *Revista Española de Economía Agraria*, 171 (1): pp. 85-108.
- DONNELLY, D. M. y BETTERS, D. R. (1991): Optimal control for scheduling final harvest in even-aged forest stands. *Forest Ecology and Management*, 46 (1): pp. 135-149.
- ENGLIN, J. E. y KLAN, M. S. (1990): Optimal taxation: timber and externalities. *Journal of Environmental Economics and Management*, 18: pp. 263-275.
- FAUSTMANN, M. (1849): Reimpreso en: Calculation of the value which forest land an immature stands possess for forestry. *Journal of Forest Economics*, 1 (1): pp. 7-44, (1995).
- FILIUS, A. M. y DUL, M. T. (1992): Dependence of rotation and thinning regime on economic factors and silvicultural constraints: results of an application of dynamic programming. *Forest Ecology and Management*, 48 (3 y 4): pp. 345-356.
- FORBOSEH, P. F.; BRAZEE, R. J. y PICKENS, J. B. (1996): A strategy for multiproduct stand management with uncertain future prices. *Forest Science*, 42 (1): pp. 58-66.
- GAMPONIA, V. y MENDELSON, R. (1987): The economic efficiency of forestry taxes. *Forest Science*, 33 (2): pp. 367-378.
- GONZALO, R.; PRIETO, A. y RÍOS, J. (1988): Determinación del turno para una política óptima de claras. *Montes*, 19: pp. 38-43.
- HAIGHT, R. G. (1990): Feedback-thinning policies for uneven-aged stand management with stochastic prices. *Forest Science*, 36: pp. 1.015-1.031.

- HAIGHT, R. G.; BRODIE, J. D. y DAHMS, W. G. (1985): A dynamic programming algorithm for optimization of lodgepole pine management. *Forest Science*, 31: pp. 321-330.
- HAIGHT, R. G. y HOLMES, T. P. (1991): Stochastic price models and optimal tree cutting: Results from loblolly pine. *Natural Resource Modelling*, 5 (4): pp. 423-443.
- HAIGHT, R. G. y SMITH, W. D. (1991): Harvesting loblolly pine plantations with hardwood competition and stochastic prices. *Forest Science*, 37 (5): pp. 1.266-1.282.
- HAIGHT, R. G.; SMITH, W. D. y STRAKA, T. J. (1995): Hurricanes and the economics of the loblolly pine plantations. *Forest Science*, 41 (4): pp. 675-688.
- HALL, D. O. (1983): Financial maturity for even-aged and all-aged stands. *Forest Science*, 29 (4): pp. 833-836.
- HARDIE, I. W.; DABERKOW, J. N. y McCONNELL, K. E. (1984): A timber harvesting model with variable rotation lengths. *Forest Science*, 30 (2): pp. 511-523.
- HEAPS, T. (1981): The qualitative theory of optimal rotations. *Canadian Journal of Economics*, 14 (4): pp. 686-699.
- HEAPS, T. (1984): The forestry maximum principle. *Journal of Economics Dynamics and Control*, 7 (2): pp. 131-151.
- HEAPS, T. y NEHER, P. A. (1979): The economics of forestry when the rate of harvest is constrained. *Journal of Environmental Economics and Management*, 6 (4): pp. 297-319.
- HERTZ, D. B. (1964): Risk analysis in capital investments. *Harvard Business Review*, 42 (1): pp. 95-106.
- HICKMAN, C. A. (1989): Timber severance taxes: current status and changing role. *Forest Products Journal*, 39 (10): pp. 31-34.
- HOGANSON, H. M. y McDILL, M. E. (1993): More on forest regulation: An LP perspective. *Forest Science*, 39 (2): pp. 321-347.
- HOWARD, T. E. (1990): Comment I. *Forest Science*, 36 (1): pp. 175-176.
- HOWE, C. W. (1979): *Natural Resource Economics: Issues, Analysis and Policy*. John Wiley & Sons.
- HULTKRANTZ, L. (1991): A note on the optimal rotation periodic a synchronized normal forest. *Forest Science*, 37 (4): pp. 1.201-1.206.
- HULTKRANTZ, L. (1995): The behaviour of forest rents in Sweden, 1909-1990. *Journal of Forestry Economics*, 1: pp. 165-180.
- HYDE, W. F. (1980): *Timber supply, land allocation and economic efficiency*. John Hopkins University Press, Baltimore.

- HYDE, W. F.; NEWMAN, D. H. y SEDJO, R. A. (1992): Forest Economics and Policy Analysis. An Overview. *World Bank Discussions Papers*, 134.
- JACKSON, D. H. (1980): The microeconomics of the timber industry. *Westview Press*, Boulder, Colorado.
- JOHANSSON, P. O. y LÖFGREN (1985): *The economics of forestry and natural resources*. Basil Blackwell, Oxford, UK and New York.
- KAO, C. (1982): Optimal stocking levels and rotation under risk. *Forest Science*, 28 (4): pp. 711-719.
- KAO, C. (1984): Optimal stocking levels and rotation under uncertainty. *Forest Science*, 30 (4): pp. 921-927.
- KAO, C. y BRODIE, J. D. (1980): Simultaneous optimization of thinning and rotation with continuous thinning and entry intervals. *Forest Science*, 26: pp. 338-346.
- KEMPS, M. C. y VAN LONG, N. (1983): On the economic of forest. *International Economic Review*, 24 (1): pp. 113-131.
- KLEMPERER, W. D. (1983): Some implications of inflation-caused changes in timing of asset yields. *Forest Science*, 29 (1): pp. 149-159.
- KLEMPERER, W. D. (1989): An income tax wedge between buyers and sellers. *Land Economics*, 65 (2): ppp. 146-157.
- KOSKELA, E. (1989a): Forest taxation and timber supply under price uncertainty: perfect capital markets. *Forest Science*, 35: pp. 137-159.
- KOSKELA, E. (1989b): Forest taxation and timber supply under price uncertainty: credit rationing in capital markets. *Forest Science*, 35: pp. 160-172.
- KULA, E. (1984): Derivation of social time preference rates for the United States and Canada. *Quarterly Journal of Economics*, 85: pp. 873-882.
- KULA, E. (1985): An empirical investigation on the social time-preference rate for the United Kingdom. *Environment and Planning A*, 17: pp. 199-212.
- KULA, E. (1988): Future generations: The modified discounting method. *Project Appraisal*, 3 (2): pp. 85-88.
- KUULUVAINEN, J. y SALO, J. (1991): Timber supply and life cycle harvest of nonindustrial private forest owners: an empirical analysis of the Finnish case. *Forest Science*, 37 (4): pp. 1.011-1.029.
- LEDYARD, J. y MOSES, L. N. (1976): *Dynamic and land use: the case of forestry*. En: Grieson (ed.) «Public and Urban Economics», Lexington, Mass.

- LEECH, J. (1993): Determination of rotation length for radiata pine plantations. *Australian Forestry*, 56 (3): pp. 195-200.
- LÖFGREN, K. G. (1985): Effect on the socially optimal rotation period in forestry of biotechnological improvements of the growth functions. *Forest Ecology and Management*, 10 (2): pp. 233-249.
- LOHMANDER, P. (1989): *Optimal forest harvesting over time in the presence of air pollution and growth reduction*. Arbetsrapport-Institutionen for Skogsekonomi, Sveriges Lantbruksuniversitet 85.
- LYON, K. S. (1981): Mining on the forest and the time path of the price of timber. *Journal of Environmental Economics and Management*, 8 (4): pp. 330-344.
- LYON, K. S. y SEDJO, R. A. (1992): Comparative advantage in timber supply: Lesson from history and the timber supply model. En Nemetz, P. (ed.): *Emerging Issues in Forest Policy*. UBC Press, Vancouver.
- MACKAY, E. (1944): *Fundamentos y métodos de la ordenación de montes. Primera parte*. Escuela especial de Ingenieros de Montes. Sección de Publicaciones, Madrid.
- MARCHAK, M. P. (1992): Global markets in forest products: Sociological impacts on Kyoto prefecture and British Columbia interior regions. En Nemetz, P. (ed.): *Emerging Issues in Forest Policy*. UBC Press, Vancouver.
- MARTELL, D. L. (1980): The optimal rotation of a flammable forest stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 10 (1): pp. 30-34.
- MATTHEWS, J. D. (1989): *Silvicultural Systems*. Clarendon Press, Oxford.
- McCONNELL, K. E.; DABERKOW, J. N. y HARDIE, I. W. (1983): Planning timber production with evolving prices and cost. *Land Economics*, 59: pp. 292-299.
- McCONNELL, K. E. y PHIPPS, T. (1984): Optimum forest rotation in an imperfect stumpage market: comment. *Land Economics*, 60 (2): pp. 215-217.
- MEDEMA, E. L. y LYON, G. W. (1985): The determination of financial rotation ages for coppicing tree species. *Forest Science*, 31 (2): pp. 398-404.
- MENDELSON, R. (1993): Note: Non-linear forest taxes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 24: pp. 296-299.

- MORAN, L. A. y NAUTIYAL, J. C. (1985): Present and future feasibility of short-rotation energy farms in Ontario. *Forest Ecology and Management*, 10: pp. 323-338.
- MORCK, R. E.; SCHWATRZ, E. y STANGELAND (1989): The valuation of forestry resources under stochastic prices and inventories. *Journal Financial and Quantitative Analysis*, 24 (4): pp. 473-487.
- NASLUND, B. (1969): Optimal rotation and thinning. *Forest Science*, 15 (4): pp. 446-451.
- NAUTIYAL, J. C. (1983): Towards a method of uneven-aged forest management based on the theory of financial maturity. *Forest Science*, 29 (1): pp. 47-59.
- NAUTIYAL, J. C. y FOWLER, K. S. (1980): Optimum forest rotation in an imperfect stumpage market. *Land Economics*, 56 (2): pp. 213-226.
- NAUTIYAL, J. C. y WILLIAMS, J. S. (1990): Response of optimal stand rotation and management intensity to one-time changes in stumpage price, management cost and discount rate. *Forest Science*, 36 (2): pp. 212-223.
- NEWMAN, D. H. (1988): *The optimal forest rotation: A Discussion and Annotated Bibliography General Technical Report, 48*. USDA Southeastern Forest Experiment Station, Asheville.
- NEWMAN, D. H.; GILBERT, C. E. y HYDE, W. F. (1985): The optimal forest rotation with evolving prices. *Land Economics*, 61 (4): pp. 357-394.
- NOSTROM, C. J. (1975): A stochastic model for the growth period decision in forestry. *Swedish Journal of Economics*, 77 (3): pp. 329-337.
- O'LAUGHIN, J. (1990): Comment III. *Forest Science*, 36 (1): pp. 180-184.
- ODERWALD, R. G. y DUERR, W. (1990): Köning-Fautmanism: A critique. *Forest Science*, 36: pp. 169-174.
- POHJONEN, V. y PUKKALA, T. (1988): Profitability of establishing *Eucalyptus globulus* plantations in the Central Highlands of Ethiopia. *Silva Fennica*, 22 (4): pp. 307-321.
- PONTRYAGIN, L. S.; BOLTYANSKII, V. G.; GAMKRELIDZE, R. V. y MISHENKO, E. F. (1962): *The mathematical theory of optimal processes*. John Wiley & Sons, New York.
- PRICE, C. (1989): *The Theory and Application of Forest Economics*. Basil Blackwell, Oxford, UK.

- QUICKE, H.; CAUFIELD, J. y SOUTH, D. (1993): Evaluating site preparation methods based on risk. *Forest Ecology and Management*, 56: pp. 163-174.
- RAWAT, J. K. y NAUTIYAL, J. C. (1985): An application of a production function for juvenile hybrid poplar to intensive forest management. *Forest Science*, 31 (1): pp. 143-156.
- REED, W. J. (1984): The effects of the risk on fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of Environmental Economics and Management*, 11 (2): pp. 180-190.
- REED, W. J. (1986): Optimal harvesting models in forest management: a survey. *Natural Resource Modelling*, 1: pp. 55-79.
- REED, W. J. y APALOO, J. (1991): Evaluating the effect of risk on the economics of juvenile spacing and commercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research*, 21: pp. 1.390-1.400.
- REED, W. J. y CLARKE, H. R. (1990): Harvest decisions and asset valuation for biological resource exhibiting size-dependent stochastic growth. *International Economic Review*, 31: pp. 147-169.
- RIDEOUT, D. y HOF, J. G. (1986): A re-evaluation of the site burden concept when forest land value is maximized. *Forest Science*, 32 (2): pp. 511-516.
- ROMERO, C. (1994): *Economía de los Recursos Ambientales y Naturales*. Alianza Editorial, Madrid.
- ROSS, S. M. (1970): *Applied Probability Models with Optimization Applications*. Holden-Day, San Francisco.
- ROUTLEDGE, R. D. (1980): The effect of potential catastrophic mortality and other unpredictable events on optimal forest rotation policy. *Forest Science*, 28 (3): pp. 389-399.
- ROUTLEDGE, R. D. (1987): The impact of soil degradation on the expected net worth of future timber harvest. *Forest Science*, 33 (4): pp. 832-834.
- SAMUELSON, P. (1976): Economics of forestry in a evolving society. *Economic Inquiry*, 14: pp. 466-492.
- SANDHU, G. S. y PHILLIPS, W. E. (1991): Optimum forest rotation in an imperfect stumpage market with a changing demand function. *Land Economics*, 67 (2): pp. 240-254.
- SCHREUDER, G. F. (1971): The simultaneous determination of optimal thinning schedule and rotation for an even-aged forest. *Forest Science*, 17: pp. 333-338.
- SEDJO, R. A. y LYON, K. S. (1989): *The Long-Term Adequacy of World Timber Supply. Resources for the Future*, Washington DC.

- STONE, S. W.; KYLE, S. C. y CONRAD, J. M. (1993): Application of the Faustmann principle to a short-rotation tree species: an analytical tool for economists, with reference to Kenya and leucaena. *Agroforestry Systems*, 21 (1): pp. 79-90.
- TAYLOR, R. G. y FORTSON, J. C. (1991): Optimum plantation planting density and rotation age based in financial risk and return. *Forest Science*, 37 (3): pp. 886-902.
- TEETER, L. D. y CAULFIELD, J. P. (1991): Stand density management strategies under risk: effects of stochastic prices. *Canadian Journal of Forest Research*, 21 (9): pp. 1.373-1.379.
- TERREAUX, J. P. (1989): Impacts de différents impôts et subventions sur la gestion optimale des forêts en univers non aléatoire. *Annales des Sciences Forestières*, 46 (4): pp. 397-410.
- THOMSON, T. A. (1992): Optimal forest rotation when stumpage prices follow a diffusion process. *Land Economics*, 68 (3): pp. 329-342.
- VALSTA, L. (1992): A scenario approach to stochastic anticipatory optimization in stand management. *Forest Science*, 38: pp. 430-447.
- VAN KOOTEN, G. C.; VAN KOOTEN, R. E. y BROWN, G. L. (1992): Opportunity cost of regional income redistribution evidence from reforestation investments in British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: pp. 525-533.
- VETTENRANTA, J. (1996): Effect of species composition on economic return in a mixed stand of Norway spruce and Scots pine. *Silva Fennica*, 30 (1): pp. 47-60.
- WALTER, G. R. (1980): Financial maturity of forest and the sustainable yield concept. *Economic Inquiry*, 18 (2): pp. 327-332.
- WEAR, D. N. y PARKS, P. J. (1994): The economics of timber supply: an analytical synthesis of modelling approaches. *Natural Resource Modelling*, 8 (3): pp. 199-223.
- WILLIAMS, B. K. (1989): Review of dynamic optimization methods in natural resource management. *Natural Resource Modelling*, 3 (2): pp. 137-217.
- WILLIAMS, J. S. y NAUTIYAL, J. C. (1990): The long-run supply function. *Forest Science*, 36 (1): pp. 77-86.
- YIN, R. y NEWMAN, D. H. (1995): Optimal timber rotations with prices and costs revisited. *Forest Science*, 41 (3): pp. 477-490.
- ZINKHAN, F. C.; SIZEMORE, W. R.; MASON, G. H. y EBNER, T. (1992): *Timberland Investments: a Portfolio perspective*. Timber Press, Portland, Oregón.

RESUMEN**Turno forestal económicamente óptimo: Una revisión**

El concepto de turno forestal óptimo arranca de un trabajo de 1849 del forestal alemán Faustmann. Aportaciones posteriores de otros forestales y economistas enriquecieron el planteamiento original de Faustmann, dando paso a los que desde mediados de los setenta el economista americano Samuelson denominó paradigma de Faustmann, Pressler y Ohlin (FPO). Este marco teórico se apoya en una serie de hipótesis, que siendo necesario aceptar para poder formalizar rigurosamente el análisis, sin embargo se revelan hoy en día como poco realistas. Debido a ello, numerosos autores han ampliado la solución de FPO eliminando o relajando alguna o algunas de las hipótesis iniciales. Este trabajo pretende recopilar estas extensiones al problema de turno óptimo, considerando sólo aquellos trabajos que consideren a los bosques únicamente como productores de madera, sin tener en cuenta otras producciones y/o externalidades. Como principal conclusión de este estudio cabe resaltar la idea de que a pesar de sus limitaciones, la solución FPO es, cuando menos, una buena optimización al verdadero óptimo social.

PALABRAS CLAVE: Turno óptimo, fórmula de Faustmann, economía forestal, ordenación de montes.

RÉSUMÉ**Service forestier économiquement optimal: Une revision**

Le concept du service forestier optimal procède d'un travail du forestier allemand Faustmann, en 1849. Des contributions postérieures des autres forestiers et économistes ont enrichit l'idée original de Faustmann, en cédant le passage à ceux, qui l'économiste américain Samuelson depuis le milieu des années 70 a nommé paradigme de Faustmann, Pressler et Ohlin (FPO). Ce cadre théorique s'appuie sur une série d'hypothèses, qui doivent être acceptées pour pouvoir formaliser rigoureusement l'analyse, pourtant aujourd'hui elles se montrent très peu réalistes. Comme conséquence, de nombreux auteurs ont amplifié la solution du FPO, en supprimant ou relâchant une ou plusieurs hypothèses initiales. Cette recherche veut compiler ces extensions au problème du service optimal, en incluant uniquement les études qui considèrent les forêts comme des producteurs de bois, sans tenir compte des autres productions et/ou des externalités. Comme principale conclusion de cette recherche nous pouvons distinguer l'idée que, malgré ses limitations, la solution FPO est, tout au moins, une bonne optimisation au véritable optimal social.

MOTS CLÉF: Service optimal, formule de Faustmann, économie forestier, aménagement des monts

SUMMARY**Economically optimum forestry rotation: A review**

The concept of optimal forestal arises from a work written by the german forester Faustmann in 1849. The initial Faustmann's framework has been enriched with important contributions by another foresters and economist leading to a theoretical structure which was coined by Samuelson as Faustmann, Pressler and Ohlin (FPO) paradigm. This theoretical framework is underpinned by a set of assumptions necessary to formalise the FPO paradigm. However, many of these assumptions are considered nowadays unrealistic. For this reason, several authors have improved in the last years the FPO paradigm by eliminating or relaxing the strongest

supporting assumptions. In this paper this type of extensions are thoroughly reviewed, for the case where only the timber output of the forest is considered. It is concluded that, despite of their limitations, the updated FPO paradigm lead to solutions quite close with respect to the true optimal forest rotation.

KEYWORDS: Optimal harvest rotation, Faustmann formula, forest economics, forest management.