

LA CAPTURA DE CARBONO COMO UN NUEVO OBJETIVO EN LA ORDENACION DE MONTES

L. DÍAZ BALTEIRO⁽¹⁾; C. ROMERO⁽²⁾

⁽¹⁾ E.T.S. Ingenierías Agrarias. Avda. Madrid, 57. 34071 Palencia.

⁽²⁾ E.T.S. Ingenieros de Montes. Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid

RESUMEN

El carbono capturado por los ecosistemas forestales se ha convertido durante los últimos años en un objetivo que se debe incluir en la gestión forestal, sobre todo desde que el Protocolo de Kyoto lo ha considerado expresamente como una forma de mitigar el exceso de emisiones de ciertos gases contaminantes. Sin embargo, la integración de este nuevo criterio en los métodos tradicionales de ordenación de montes resulta muy complicada debido a las características intrínsecas de los mismos. En este trabajo se incorpora una metodología, basada en técnicas multicriterio (básicamente la programación por metas), que permite una incorporación eficiente de este objetivo a la gestión forestal. Dicha metodología se ha aplicado al monte "Pinar de Navafría", a partir de la ordenación realizada utilizando modelos basados en la programación matemática. Los resultados muestran un elevado grado de conflicto entre la consecución de niveles altos de captura de carbono frente a criterios tradicionalmente empleados en el manejo forestal como puede ser la constancia en los flujos de volumen durante cada uno de los períodos considerados. A pesar de esta circunstancia, las soluciones obtenidas se pueden calificar de robustas y aceptables para el centro decisor.

P. C.:Captura de Carbono, Economía Forestal, Gestión Forestal.

SUMMARY

The carbon captured by the forest ecosystems has become, during the last years, in an objective that should be included in forest management, mainly since the Protocol of Kyoto has considered it expressly like a form of mitigating the excess of emissions of certain polluting gases. However, the integration of this new approach in the traditional forest management methods is very complicated due to the intrinsic characteristics of this kind of methods. This paper proposes an approach based on the multicriteria decision making (basically goal programming) that allows an efficient incorporation from this objective to forest management. This methodology has been applied to forest "Pinar de Navafría", using a management model based on the mathematical programming. The results show a high conflict grade among the attainment of high levels of capture of carbon in front of traditional objectives in the forest management, as it can be the volume control during each one of the periods. The solutions obtained can be qualified of robust and acceptable for the decision maker.

K. W.:Carbon Sequestration, Forest Economics, Forest Management.

INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos del uso múltiple que ofrecen las masas forestales y que últimamente es objeto de un mayor debate, sobre todo a raíz de la aprobación de las recomendaciones incluidas en el Protocolo de Kyoto (VV.AA., 1997) y de las sucesivas reuniones de comités de expertos sobre el cambio climático, es la posible consideración de los bosques como posible sumidero del CO₂ atmosférico. Por otro lado, a pesar de estar contenido este objetivo explícitamente en las estrategias forestal española y europea, los mecanismos de gestión usualmente no lo incluyen, debido a diversas circunstancias que van desde la complejidad en su valoración, debido a su condición de bien público puro, hasta la carencia de metodologías que incorporen adecuadamente este objetivo a los proyectos de ordenación de montes actualmente en vigor. Sin profundizar en la eficiencia de esta medida en cuanto a su capacidad global para resolver el problema del incremento en las emisiones de este gas, resulta indudable que desde un punto de vista forestal, pasar de una única producción (madera) a una producción conjunta madera-CO₂ puede suponer una alteración en ciertos aspectos de la gestión: cambios en el uso de la tierra, elección de especies, modificación de los niveles de aspiración fijados para otros objetivos, variación en el turno óptimo, incorporación de ciertos tratamientos culturales, etc.

A continuación se planteará un modelo de gestión forestal basado exclusivamente en el empleo de técnicas matemáticas. En primer lugar se describirá el monte en cuestión, así como la metodología empleada, para finalmente exponer los resultados y las conclusiones obtenidas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El Monte "Pinar de Navafría" se encuentra situado en la cara Norte del Sistema Central, dentro de la provincia de Segovia. En cuanto a la cabida, se estima en 2760 Ha, de las que 2504 se consideran como superficie forestal poblada. La especie principal es *Pinus sylvestris*, que se encuentra como especie dominante y principal en la práctica totalidad del monte. Este monte es, sin duda, uno de los montes más estudiados y analizados en nuestro país. Como es sabido, comenzó a ser ordenado en 1895 por el método de tramos periódicos permanentes, y actualmente se está completando la décima revisión, aunque los datos del monte que se han incluido en el modelo se corresponden a los de la 9ª revisión.

A partir de esta información se ha construido un modelo para la ordenación de este monte, basado en la programación lineal, introduciendo para ello objetivos tanto selvícolas (volumen total, volumen de chapa) como económicos (VAN). Como restricciones se han empleado las más comunes en el ámbito de la gestión forestal (igualdad de los flujos de volumen en cada período considerado, un inventario mínimo al final del turno de transformación y un monte regulado en cuanto a la distribución espacial de cada clase de edad). En Díaz Balteiro & Prieto (1999) se pueden encontrar los detalles de este modelo, así como las soluciones obtenidas, que, en lo referente a la posibilidad del primer período, superan la propuesta en la 9ª revisión.

Partiendo de esta base, se ha intentado incluir en la gestión otro tipo de objetivos de carácter ambiental, entre los que se encontraría la captura de carbono. Hoy en día está unánimemente admitido que hay tres formas posibles de incrementar la acumulación de carbono en las masas arbóreas: dado que los árboles acumulan carbono en su proceso de crecimiento, procediendo a realizar repoblaciones o reforestaciones se ayudaría a incrementar esta captura. La segunda forma tiene que ver con la eficiencia de ese proceso de acumulación de carbono. Si se promueve que el uso final de la madera se destine a productos que presenten una dilatada vida útil, se logrará que la re-emisión de CO₂ a la atmósfera sea lo más tardía posible. Por último, la tercera forma será la de sustituir los combustibles fósiles por biomasa vegetal.

Dejando a un lado la última forma citada, resulta evidente que el análisis se puede efectuar a distintos niveles, dependiendo del grado de conocimiento que se tenga de las fases que van desde el aprovechamiento de las masas hasta que el carbono integrante de los distintos productos obtenidos a través de las distintas trozas regresa a la atmósfera. Esto implica que aspectos como la elección del turno de la masa resultarán básicos por un doble motivo: por un lado al incrementar el carbono total capturado, y por otro, redistribuyendo dicho carbono de los bosques a otras fuentes y sumideros, en función de la aptitud de los productos obtenidos a esa edad de corta. Por las mismas razones la duración del período de regeneración y el número y peso de las claras influirán en el carbono acumulado. En este contexto los métodos tradicionalmente utilizados en la gestión forestal no son aplicables. Así, para el cálculo del turno óptimo no son aplicables ni la metodología de Faustmann, al no incorporar otros bienes y servicios no madereros, ni la de Hartman (Hartman, 1976), al requerir este enfoque la estimación de un flujo de servicios medidos en unidades monetarias. En van Kooten et al. (1995), Romero et al. (1998) se pueden encontrar metodologías que permiten la integración de ambos outputs.

Si la escala del problema se amplía y nos encontramos ante situaciones a nivel monte, no a nivel rodal, persisten las mismas dificultades si se utilizan los métodos tradicionales de gestión. En efecto, aunque se puede definir a los ecosistemas forestales como sistemas productores de bienes y servicios múltiples, se puede afirmar que históricamente el objetivo primordial de la gestión forestal en nuestro país ha gravitado en torno a la obtención de unos determinados volúmenes de madera. El resto de funciones u objetivos se supeditaban a la consecución de una determinada posibilidad. Globalmente, se trata de asegurar una producción sostenida que asegure la demanda de determinados productos forestales. Por lo tanto, el incorporar en este tipo de técnicas cualquier otro tipo de objetivo (especialmente cualquiera de las externalidades positivas asociadas a los bosques), y cuantificar los resultados de la gestión prevista en el futuro resulta inviable.

En definitiva, para incorporar adecuadamente este objetivo a la gestión forestal es necesario acudir a procedimientos basados en el empleo de herramientas propias de la Investigación Operativa. En el caso que nos ocupa, partiendo del modelo anteriormente introducido del monte "Pinar de Navafría", se va a utilizar una metodología multicriterio, la programación por metas, para abordar este problema. Antes de pasar a describir brevemente esta técnica, es preciso definir los objetivos (metas) que se han considerado en el problema. En concreto, se ha considerado una meta de carácter económico (minimizar la desviación con respecto al máximo VAN factible en el monte), tres de carácter selvícola (minimizar las desviaciones del flujo de volumen en cada período, minimizar posibles desviaciones en la condición de regulación, y

minimizar las posibles desviaciones con respecto a un volumen del inventario al final del turno de transformación igual al existente en la actualidad), y otro de carácter ambiental, que se corresponde a la minimización de posibles desviaciones respecto a la cantidad máxima de carbono capturado por el monte a lo largo del turno de transformación introducido (100 años).

Para estimar el carbono contenido en el monte, se ha seguido el procedimiento descrito en Díaz Balteiro (1999). Mediante una serie de cálculos se evalúa el carbono futuro que se capturará en cada período (10 años), incluyendo no sólo el relativo al crecimiento de la masa, sino también el carbono retenido en productos obtenidos a partir de la madera de las cortas de regeneración. Para ello se consideran tres tipos de destinos para la madera: chapa, sierra y tableros, descartándose un posible uso para la obtención de pasta o papel. El cálculo del carbono según cada posible destino se realiza asumiendo las hipótesis efectuadas por Row & Phelps (1996).

Una vez definidos los objetivos, se puede construir la función que incorpora las variables de desviación no deseadas para cada objetivo. Para proceder a minimizar dicha función (sujeta a un conjunto de restricciones tanto endógenas como exógenas), se han utilizado dos modelos de programación por metas lexicográficas. En Díaz Balteiro & Romero (2000) se pueden encontrar detalles acerca de la formulación de ambos modelos. Básicamente, en ambos modelos se agrupan las metas en tres niveles de prioridad, según su importancia para el centro decisor. En este caso el primer nivel se corresponde al cumplimiento de la meta relativa al inventario final. El segundo nivel incluye la meta relativa a la condición de regulación, mientras que el último nivel abarca las tres metas restantes: minimizar la desviación respecto al máximo VAN, la igualdad de flujos de volumen en cada período y la máxima captura de carbono. Los dos modelos se diferencian en cómo realizan esta optimización. Así, mientras que en un caso (Modelo 1) se procede a la minimización de la suma correspondiente a las variables de desviación normalizadas y ponderadas, en el otro (Modelo 2) se minimiza la máxima desviación correspondiente a las discrepancias de las metas situadas en el último nivel de prioridad. En Romero (1991) e Ignizio & Cavallier (1994) se puede profundizar en la aplicación de estas técnicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La primera información que se obtiene de la aplicación de estas técnicas es la matriz de pagos ("*pay-off matrix*"). Se trata de una matriz cuadrada, con dimensión coincidente con el número de metas consideradas, en la que se muestran los resultados de optimizar cada uno de los 5 criterios por separado (véase Tabla 1). La principal utilidad de esta tabla radica en la información que ofrece al gestor sobre el grado de conflicto entre las metas anteriormente elegidas. Así, se puede comprobar cómo existe una importante divergencia entre la captura de carbono y los objetivos "selvícolas" introducidos. En efecto, la captura es notablemente menor (aproximadamente se reduce a su tercera parte) cuando se cumple el objetivo de que en cada uno de los períodos el flujo de volumen sea igual. Lo mismo se puede decir si se cumple el objetivo de que el monte esté regulado en cuanto a la distribución espacial de cada clase de edad al final del turno de transformación o si se intenta que el inventario final en ese momento sea igual al existente en el momento inicial. Inversamente, la solución que proporciona la máxima captura (última columna de la Tabla 1) proporciona los peores resultados con respecto a los demás objetivos. Por último, para facilitar el carácter informativo de esta matriz se han añadido dos filas que reflejan el volumen total y el turno medio para cada objetivo.

En principio, ninguna de las soluciones presentadas en esta matriz parece lo suficientemente atractiva para un gestor interesado en integrar todos los objetivos propuestos. Por ello, se han aplicado las metodologías anteriormente citadas, y ante la ausencia de pesos subjetivos por parte de un centro decisor para cada nivel de prioridad anteriormente descritos, se han asignado diversos pesos a cada uno de los niveles. En principio se otorgó el mismo peso a cada una de las metas. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

De la información contenida en esta tabla, cabe destacar que los dos primeros niveles de prioridad se cumplen completamente en todos los casos estudiados. Es decir, todas las soluciones mostradas cumplen al 100% las metas relativas al inventario final y a la condición de regulación. Por el contrario, no se cumple el tercer nivel de prioridad para ninguna de las tres metas que lo componen, proporcionándose resultados dispares según el tipo de solución y la meta elegida. Además, se puede comprobar cómo estas soluciones resultan más equilibradas y apetecibles para el gestor que las indicadas en la matriz de intercambio.

Cabe destacarse que mientras que las diferencias en cuanto al carbono capturado resultan bastante apreciables, las variaciones en cuanto al VAN, el volumen total o el turno medio utilizado no son

significativas. En definitiva, algunos de los objetivos recurrentemente incluidos en los problemas de gestión forestal resultan inelásticos ante cambios en los pesos o en el tipo de metodología utilizados. Finalmente, es preciso señalar que las soluciones presentadas resultan robustas ante cambios en los pesos preferenciales asignados a cada nivel de prioridad.

CONCLUSIONES

A través de la metodología expuesta en los apartados anteriores se ha mostrado una forma de incluir dentro de los modelos de gestión forestal un objetivo ambiental como es la captura de carbono. Además, se ha comprobado cómo el intentar maximizar el cumplimiento de este objetivo entra en conflicto con algunos de los objetivos tradicionalmente recogidos en los métodos tradicionales de ordenación (e.g., la idea de “bosque normal”). Este resultado resulta muy interesante por las posibilidades que se abren para la incorporación de técnicas modernas de optimización a la gestión forestal.

Los modelos introducidos, además de proporcionar soluciones perfectamente asumibles para un gestor forestal, ofrecen a éste la posibilidad de medir y contrastar los efectos de posibles decisiones en alguno de los objetivos indicados en el modelo. Esta circunstancia resulta de gran ayuda, sobre todo a la hora de introducir en el manejo forestal un objetivo nuevo y que carece de precio de mercado, como es la captura de carbono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DÍAZ BALTEIRO, L. (1999). La captura del carbono como subrogado a la gestión sostenible de los montes. Aplicación al monte de Navarra. I Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes. Santiago de Compostela

DÍAZ BALTEIRO, L., PRIETO, A. (1999). Modelos de planificación forestal basados en la programación lineal. Aplicación al monte “Pinar de Navarra” (Segovia). Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. 8 (1): 63-92.

DÍAZ-BALTEIRO, L., ROMERO, C. (2000). Carbon Captured and the Sustainable Management of a Forest: A Multicriteria Approach. 17th European Conference on Operational Research (EURO2000). Budapest, Hungary, July 2000

HARTMAN R. (1976). The harvesting decision when a standing forest has value. Economic Inquiry. 16: 52-58.

IGNIZIO, J. P., CAVALIER, I. (1994). *Linear Programming*. Prentice Hall, New Jersey

ROMERO, C. (1991). *Handbook of Critical Issues in Goal Programming*. Pergamon Press, Oxford

ROMERO, C., RÍOS, V., DÍAZ-BALTEIRO, L. (1998). Optimal forest rotation age when carbon captured is considered: Theory and applications. Journal of the Operational. Research. Society. 49: 121-131.

ROW, C., PHELPS, R.B. (1996). Wood carbon flows and storage after timber harvest. In: *Forests and Global Change, Volume 2: Forest Management Opportunities for Mitigating Carbon Emissions*. Edited by R. N. Sampson and D. Hair. American Forests, Washington,. pp. 27-58.

VAN KOOTEN G.C., BINKLEY C.S., DELCOURT G. (1995). Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. American. Journal of Agricultural Economics. 77: 365-374.

VV.AA. (1997). United Nations, Conference Of The Parties. Kyoto Protocol to the United Nations Framework on Climate Change, FCCC/CP/1997/L.7/Add. 1

Tabla 1. Matriz de Intercambio para los objetivos incluidos en el análisis

	VAN	Igualdad flujo de volumen	Regulación	Inventario Final	Carbono capturado
	nVAN	niH+piH	nif+pif	nkI+pkI	nCB
VAN (*10 ⁶ pta)	5.837	4.489	4.163	4.696	4.220
	0	1,349	1.675	1.141	1.618

nVAN					
niH+piH	1.051.,803	0	0	43.359	589.471
nif+pif	2.133	442	0	293	3.080
nkI+pkI	286.833	35.305	6.048	0	413.824
Carbono capturado (Tm)	49.887	55.365	60.761	58.585	101.470
nCB	51.583	46.105	40.709	42.884	0
Volumen (m ³)	1.298.536	1.018.108	966.115	1.008.948	609.812
Turno medio	99,4	113,8	113,4	107,5	103,6

Tabla 2. Resultados obtenidos mediante la aplicación de los modelos de programación por metas

	Pesos preferenciales							
	$w_1 = w_2 = w_3 = 1$		$w_1 = 2; w_2 = w_3 = 1$		$w_1 = w_3 = 1; w_2 = 2$		$w_1 = w_2 = 1; w_3 = 2$	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
VAN (*10 ⁶ pta)	5.177	4.814	5.192	5.252	5.167	4.800	5.157	4.325
niH+piH	55.308	646.476	67.151	696.153	50.066	327.573	107.417	1.147.643
Carbono capturado (Tm)	61.700	69.146	61.682	64.842	61.625	68.712	64.180	70.157
Volumen (m ³)	1.046.223	1.033.637	1.046.258	1.042.516	1.046.305	1.035.385	1.050.647	1.010.222
Turno medio (años)	109,9	109,8	108,1	107,2	108,2	111,0	108,1	116,0

Leyenda:

VAN: Valor actual neto.

nVAN: Desviación (millones de pts.) respecto al máximo VAN que se puede obtener en el monte, de acuerdo con las restricciones consideradas.

niH+piH: Desviaciones, positivas y negativas (en m³) respecto al cumplimiento absoluto del objetivo relativo a la igualdad de flujos de volumen en cada período.

nif+pif: Desviaciones, positivas y negativas (en ha) respecto al cumplimiento de la condición de regulación.

nCB: Desviación (Tm de Carbono) respecto a la máxima captura de carbono que se puede producir en el monte a lo largo del turno de transformación.

Volumen: Volumen total aprovechado a lo largo del turno de transformación.

Turno medio: turno medio, ponderado por las superficies respectivas, de las unidades de corta obtenidas cuando se maximiza cada uno de los objetivos por separado.