

# EL PAPEL DEL CHOPO COMO SUMIDERO DE CO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO

RODRÍGUEZ, F.; SERRANO, L.; AUNÓS, A.

Dpto. Producción Vegetal y Ciencia Forestal. Universitat de Lleida. Av. Rovira Roure 191. 25198 Lleida. [Francisco.rodriguez@pvcf.udl.es](mailto:Francisco.rodriguez@pvcf.udl.es)

## Resumen

Los procesos de captura y emisión de CO<sub>2</sub> en un bosque se basan en cuatro grupos de almacenamiento de carbono; la biomasa aérea, la biomasa radical, la materia orgánica en descomposición y los productos forestales almacenados fuera del bosque. Cada uno de estos grupos posee una vida media de almacenamiento distinta, siendo el grupo de los productos forestales el que presenta un valor mayor, y dentro de éste, mayor vida útil conforme aumenta la calidad del producto. En este trabajo se analiza la capacidad de secuestro de carbono atmosférico que ofrecen choperas repobladas en la cuenca del río Cinca con tres diferentes. Tomando una productividad media de la zona, los chopos fijan en torno a 20 tm/ha·año<sup>-1</sup> de carbono. La inclusión, en el análisis económico, de la captura de CO<sub>2</sub> incrementa en todos los casos la rentabilidad de la inversión (en términos de TIR y de VAN), proporcionalmente al índice de productividad de la parcela y al precio de la tonelada de CO<sub>2</sub> fijada.

**Palabras clave:** fotosíntesis / productos / carbono / plantaciones

## INTRODUCCIÓN

En el contexto forestal, se entiende por rentabilidad económica la que se proporciona para el conjunto de la sociedad, es decir, contabilizando los beneficios y costes sociales. Las repoblaciones forestales, además de sus producciones comerciales (madera, corcho, resina, etc.) acostumbran a generar simultáneamente una serie de beneficios que en la literatura forestal suelen denominarse “beneficios indirectos”. Éstos se refieren a los ámbitos paisajísticos, de protección del suelo, conformación de biotopos significativos para la fauna, etc. Su particularidad es el hecho de que carecen en general de un precio de mercado, entrando entonces bajo la consideración de lo que se conoce como externalidades positivas o bienes públicos. Su valoración, siempre difícil, se realiza a través de los precios sombra (*second best*).

La aportación de las repoblaciones de choperas en esa esfera puede interpretarse como modesta, llegando incluso a considerarse como negativa cuando alteran sotos naturales. No obstante, hay un aspecto de notable actualidad, que es el papel como sumidero de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), donde su contribución puede *a priori* devenir relevante.

La atmósfera no contaminada proporciona un efecto invernadero necesario para el mantenimiento de la vida ole!. Se acepta que una mayor proporción de CO<sub>2</sub> en el aire produce un incremento de este efecto invernadero, y como consecuencia, contribuye al calentamiento global. Dos son las principales vías para disminuir este efecto invernadero; disminuir las emisiones brutas de CO<sub>2</sub> o bien aumentar la fijación del CO<sub>2</sub> del aire transformándolo en materia orgánica. En este sentido, las masas forestales actúan como sumidero de CO<sub>2</sub>, ya que éste, se incorpora a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, pasando a formar parte de sus tejidos.

Así, el Protocolo de Kyoto, el Convenio Marco y la Estrategia Forestal Española proponen la incorporación de la fijación del CO<sub>2</sub> como un objetivo dentro de los criterios de gestión de los

bosques, por lo que las choperas, al ser especies de crecimiento rápido, pueden desempeñar un papel importante en este sentido.

El conocimiento de la dinámica del flujo neto del carbono entre el bosque y la atmósfera es fundamental para poder incorporar el carbono como un objetivo más en la gestión forestal. Los procesos de captura y emisión de éste, en un bosque, se basan en cuatro grupos de almacenamiento; la biomasa aérea, la biomasa radical, la materia orgánica en descomposición y los productos forestales almacenados fuera del bosque (MONTERO *et al.*, 2004). Cada uno de estos grupos posee una vida media de almacenamiento distinta, siendo el grupo de los productos forestales el que presenta un mayor valor, y dentro de éste, mayor vida útil conforme aumenta la calidad del producto.

En este trabajo se analiza la cantidad de CO<sub>2</sub> atmosférico que son capaces de capturar tres clones de chopo (Luisa Avanzo, MC e I-214) en el valle del Cinca, en función de su Índice de Productividad (IP), definido éste como el diámetro medio de una chopera, bien poblada, a la edad de 7 años. También se estudia el incremento en la rentabilidad de la repoblación, que supone incorporar la captura de carbono atmosférico como un *input* más.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Para este trabajo se utilizaron las tablas de gestión propuestas por RODRÍGUEZ (2005). Así, para cada uno de los clones e Índices de Productividad se disponía de la predicción del crecimiento en diámetro y altura, y el volumen de los distintos productos susceptibles de ser obtenidos tras la corta. Para poder realizar el análisis económico resulta imprescindible conocer la cantidad de CO<sub>2</sub> fijada por las distintas partes del árbol, puesto que en función de donde se almacene, la remisión a la atmósfera va a ser más pronta o más tardía.

El cálculo de las fijaciones (en biomasa) y emisiones (en la corta y transformación), para el análisis de rentabilidad, se basó en las siguientes hipótesis:

- Se consideró que la biomasa total era 2 veces la biomasa del fuste. HUSCH (2001) estima que ésta, es entre 1,3 y 2,5, mientras que se considera que en coníferas es 1.3 veces y en frondosas en torno a 2 veces.
- Las emisiones en el momento del aprovechamiento, correspondientes a la biomasa contenida en el sistema radical, ramas, rabeón, corteza y hojas, representan la mitad de la biomasa total existente en el árbol en pie (HEAN *et al.*, 2004) .
- Las emisiones en las transformaciones de la madera se consideraron del 30% de la biomasa del fuste (BAONZA y GUTIÉRREZ, 2002). Para un cálculo más preciso sería necesario un análisis exhaustivo del rendimiento de los distintos productos transformados procedentes del chopo.
- Se adoptó un porcentaje de corteza del 10%, común a los tres clones, y como media de los propuestos por BAONZA y GUTIÉRREZ (2002).

La determinación de CO<sub>2</sub> capturado se basó en la biomasa total. Así, para transformar la biomasa en toneladas de carbono, se adoptó el porcentaje medio de carbono en la madera (referido a materia seca) del 50%, de acuerdo a la propuesta por KOLLMANN (1959). Para obtener la materia seca que posee el fuste, no hay más que multiplicar su volumen (en verde o saturado) por su densidad básica (o peso seco volumétrico), la cual representa la relación entre el volumen saturado y su peso anhidro. Según RUEDA (1997), la densidad básica de I-214, LA (Luisa Avanzo) y MC es de 0,29; 0,345 y 0,37 t/m<sup>3</sup>, pon los número en comas respectivamente. El CO<sub>2</sub> acumulado se estima a través de la relación existente entre el peso de la molécula de CO<sub>2</sub> (44) y el del átomo de carbono (12), lo que equivale a decir que por cada unidad de carbono almacenado en la biomasa seca del fuste, éste ha capturado 3.67 unidad de CO<sub>2</sub> atmosférico. En la ecuación [1] se presenta el método de cálculo.

$$CO_2 \text{ acumulado } (t) = 3.67 \cdot C_{\text{almacenado}}(t) \rightarrow C_{\text{almacenado}}(t) = 0.5 \cdot D_{\text{basica}}(t/m^3) \cdot V_{\text{FUSTE}}(m^3)$$

$$\text{donde : } D_{\text{basica}}(t/m^3) = \frac{\text{Peso anhidro (t)}}{\text{Vol. saturado (m}^3\text{)}} \text{ y } V_{\text{FUSTE}}(m^3) = V_{\text{DES}} + V_{\text{SG}} + V_{\text{SD}} + V_{\text{Trit}} \quad [1]$$

Los precios estimados para el mercado del carbono, aunque inciertos, se sitúan entre 10 y 20 €/tm de CO<sub>2</sub> (DÍAZ BALTEIRO, 2002; EL PAÍS, 18 de junio de 2004). Así, en este trabajo se han utilizado tres precios, 10, 15 y 20 € por tonelada de CO<sub>2</sub>, para estudiar la influencia sobre la rentabilidad económica de la chopera.

En la Figura 1 se muestra de forma simplificada el ciclo de emisiones y fijaciones de carbono en una chopera. Así, mientras los árboles crecen, fijan carbono tanto en la parte aérea (fuste, ramas y hojas) como en la radical. Cuando se realiza la corta, gran parte de ese carbono fijado vuelve a la atmósfera puesto que ni las ramas ni las hojas ni el sistema radical se aprovechan para futuras transformaciones en productos comerciales. Una vez la madera en las distintas industrias, éstas también remiten carbono a la atmósfera puesto que el rendimiento de los distintos productos nunca representa el 100%. Los productos tendrán una vida útil, y al final de ésta, remitirán su carbono almacenado a la atmósfera.

Aunque la vida media de los productos transformados es una función continua (KARJALAINEN *et al.*, 1994; HARMON & SEXTON, 1996; ROW & PHELPS, 1996), en la que a través del tiempo se va incorporando el carbono a la atmósfera, se adoptó la simplificación de utilizar la vida media del producto y suponer que todo el carbono del producto retorna a la atmósfera cuando se alcanza dicha edad. Los periodos de persistencia asumidos fueron:

- Productos clasificados como madera de trituración (aquellos con un diámetro en punta delgada entre 12 y 7 cm): 2,5 años (HEAN *et al.*, 2004).
- Productos de sierra delgada y sierra gruesa o desenrollo con nudos (aquellos con un diámetro en punta delgada superior a 12 cm, pero con nudos): 12 años (SKOG & NICHOLSON, 1998).
- Productos de desenrollo sin nudos (aquellos con un diámetro en punta delgada superior a 22 cm y libre de nudos): 30 años (SKOG & NICHOLSON, 1998).

Para el cálculo de la rentabilidad económica (integración del carbono capturado) se ha empleado una metodología similar a la propuesta por ROMERO *et al.* (1998) y utilizada por DÍAZ BALTEIRO (2002) para el chopo y el pino radiata. Así, se introduce una subvención de A € por tonelada de CO<sub>2</sub> fijada por la masa el mismo año que se fija, y se aplica un impuesto, también de A € por cada tonelada de CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera, tanto en el momento de la corta como al final de la vida útil de los distintos productos transformados. En nuestro caso, la chopera va cada año capturando carbono (el doble de la biomasa de su fuste) y el año de la corta emite a la atmósfera una cantidad igual a la biomasa de su fuste, posteriormente, pero en el mismo año, emite un 30% de la biomasa de su fuste en el proceso de transformación. Los distintos productos emiten a la atmósfera todo su carbono en función de la vida útil de los productos.

Para el caso de un solo ciclo productivo, tanto el VAN [2] como el TIR [3] incorporan al flujo de caja (S<sub>t</sub>) el carbono capturado en forma de cobro cuando se fija y en forma de pago cuando se libera a la atmósfera. El análisis para infinitos ciclos de corta se basa en lo que se conoce en la literatura económica forestal como solución de Faustmann en la cual se asimila el producto  $P \cdot f(t)$  con una función de ingreso temporal  $l(t)$  que representa el ingreso obtenido por la venta de madera (producto del precio  $P$  por la producción  $f(t)$ ) a los  $t$  años. Además del coste de plantación ( $K$ ), existen otros cobros y pagos que es necesario introducir en el análisis. Así,  $G$  representa los pagos anuales de explotación e  $Y_s$  serían los pagos debido a labores culturales, y  $C_c$  y  $C_e$  son las toneladas de CO<sub>2</sub> capturado y emitido, respectivamente. Introduciendo todas estas componentes, el cálculo del VAN se realiza según la ecuación [4].

$$VAN(i) = \sum_{t=0}^T S_t \cdot e^{-i \cdot t} \quad [2]$$

$$\sum_{t=0}^T S_t \cdot e^{-i \cdot t} = 0 \rightarrow i = TIR \quad [3]$$

$$VAN = \frac{I \cdot e^{-i \cdot t} - K - G \cdot \frac{e^{-i} \cdot (e^{-i \cdot t} - 1)}{e^{-i \cdot t} - 1} \alpha - \sum_{\forall s} Y_s \cdot e^{-i \cdot s} + A \sum_{\forall s} C_c \cdot e^{-i \cdot s} - A \sum_{\forall s} C_e \cdot e^{-i \cdot s}}{1 - e^{-i \cdot t}} \quad [4]$$

La costes e ingresos considerados en este trabajo han sido los mismo a los considerados por RODRÍGUEZ (2005), suponiendo, para todos los clones y calidades de estación, una poda con una altura media de 8 m y alcanzada en dos intervenciones.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Carbono fijado

En función de la producción total y de la densidad básica de cada uno de los clones se calculó la cantidad de CO<sub>2</sub> fijada según la estación en donde crece. En la Figura 2 se presentan gráficamente los resultados.

El clon I-214, además de ser el que menos crece, es también el que fija menos dióxido de carbono atmosférico, ya que posee menor densidad básica su madera (0,29 tm/m<sup>3</sup>), mientras que es el clon MC el que fija mayor cantidad de CO<sub>2</sub>, al presentar una producción total parecida a la de LA, pero mayor densidad básica.

### Rentabilidad financiera de las distintas alternativas

Los resultados del *TIR* y del turno de Boulding, para cada uno de los clones, calculados a partir de la valoración relativa de los productos sobre un precio base de la madera de 55 €/m<sup>3</sup>, se muestran en la Tabla 1. Siempre se analiza el caso de un único ciclo productivo y de infinitos ciclos.

Obviamente, según aumenta la fertilidad de la parcela, la rentabilidad aumenta y el turno óptimo tiende a reducirse. Es importante resaltar que tal y como postulan AUNÓS *et al.*, (2002) existen grandes diferencias en rentabilidad según se considere un solo ciclo productivo o infinitos, ya que en este último caso no se tiene en cuenta el valor del suelo. En RODRÍGUEZ (2005) se puede consultar la influencia de distintos tratamientos de poda, así como el análisis de sensibilidad del precio de la madera.

En general, para el caso de un único ciclo productivo el turno óptimo corresponde a árboles de aproximadamente 40 cm de D<sub>AP</sub>, mientras que si se consideran infinitos ciclos productivos, el D<sub>AP</sub> medio de los árboles se reduce entre 3 y 5 cm. Estos datos parecen corroborar lo que se ha acostumbrado a llamar como turno tecnológico de las choperas (diámetro de corta entre 35 y 40 cm) que no es más que su turno óptimo financiero.

Resulta interesante destacar que el turno de máxima renta en especie está muy alejado del turno financiero, ya que en ninguno de los casos se da a edades inferiores a 16 años. En este sentido, BRAVO *et al.* (1996) obtienen resultados análogos para el valle del Duero sobre el clon Campeador.

## **Rentabilidad económica.**

Los resultados, tanto en TIR como en turno óptimo financiero, de la diferencia de incluir o no el dióxido de carbono capturado, para cada uno de los clones se muestran en la Tabla 2. Los precios base de los dos productos fueron de 55 €/m<sup>3</sup> de madera y 15 €/tm de CO<sub>2</sub>. Se analizó tanto para un único ciclo productivo como para infinitos ciclos.

De la Tabla 2 se desprende que según aumenta la fertilidad de la parcela, la rentabilidad económica aumenta al incluir la fijación de carbono. El turno, sin embargo, tiende a disminuir para la calidad media ( $IP=20$ ) y aumenta para las calidades superiores.

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad de la variación del TIR, al incluir del CO<sub>2</sub> fijado, respecto al precio de madera (40 y 70 €/m<sup>3</sup>) y al precio de la CO<sub>2</sub> capturado (10 y 20 €/tm). A modo de ejemplo, en la Figura 3 se muestra, en el clon MC, con índice de productividad de 20, la influencia del precio de la madera y del precio del dióxido de carbono sobre su TIR.

Para el caso de un único ciclo productivo, según aumenta el precio de la madera y el precio del CO<sub>2</sub>, la variación de la rentabilidad (respecto a no considerar el CO<sub>2</sub>) es también mayor. En el caso de infinitos ciclos productivos, el máximo aumento de la rentabilidad para cada uno de los precios de CO<sub>2</sub> se da con el precio actual de mercado de la madera (55 €/m<sup>3</sup>).

## **CONCLUSIONES**

La productividad y captura de CO<sub>2</sub>, para un mismo índice de productividad, es mayor en MC y LA, que en I-214. Puede ser que ambas estén subestimadas en I-214 debido a su poca dominancia apical y facilidad para presentar bifurcaciones, las cuales no son cuantificadas en los modelos del perfil del fuste.

La inclusión, en el análisis económico, de la captura de CO<sub>2</sub> atmosférico incrementa en todos los casos la rentabilidad de la inversión (en términos de TIR y de VAN), proporcionalmente al índice de productividad de la parcela y al precio de la tonelada de CO<sub>2</sub> fijada.

El chopo representa un especie a tener en muy cuenta cuando uno de los objetivos perseguidos, en la gestión, sea la captura de carbono atmosférico debido a su gran capacidad para fijarlo, en torno a 20 t/ha·año<sup>-1</sup>.

## **Agradecimientos**

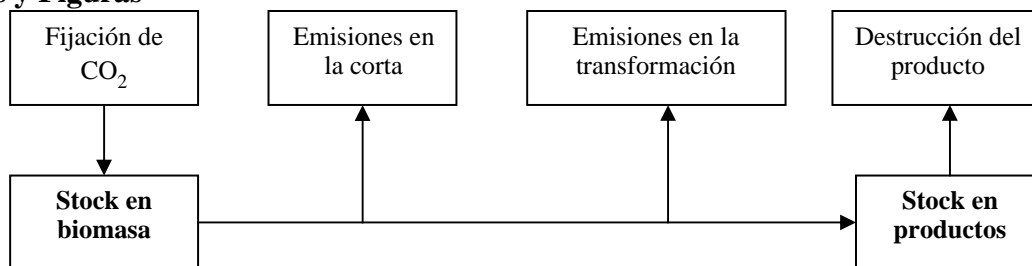
Los autores expresan su agradecimiento a la Diputación General de Aragón, y particularmente a Antonio Padró, José Ángel Pueyo y Enrique Torres. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, a través de los proyectos AGF97-0844, AGL2000-1255 y AGL2003-01472 y por la Universitat de Lleida, a través de una beca predoctoral.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

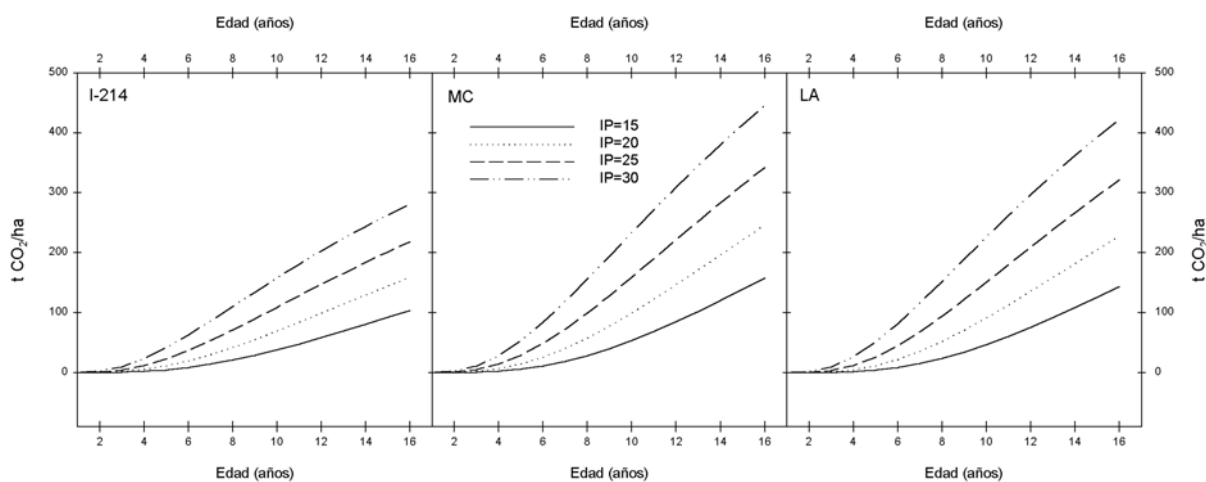
- AUNÓS, A.; RODRÍGUEZ, F. y GARASA, M.; 2002. Análisis de sensibilidad sobre la rentabilidad financiera de choperas de Huesca y Lérida. *Montes: Revista de Ámbito Forestal* 69:25-32.
- BAONZA, M.V. y GUTIÉRREZ, A.; 2002. Rendimiento y calidades de chapa en clones de chopo a diferentes alturas de fuste. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.* 11(2): 311-323.
- BRAVO, F.; GRAU, J.M. y GONZÁLEZ, F.; 1996. Curvas de calidad y tablas de producción para *Populus x euramericana* en la cuenca del Duero. *Montes: Revista de Ámbito Forestal* 44:43-46.

- DÍAZ BALTEIRO, L.; 2002. Los sistemas forestales y la provisión de bienes ambientales. *Jornada Temática "Aspectos Medioambientales de la Agricultura"*. Madrid, 12pp.
- HARMON, M.E. & SEXTON, J.; 1996. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems. *US LTER. Publication 20. Univ. of Washington*.
- HEAN, R.L.; CACHO, O.J. & MENZ, K.; 2004. Temporary carbon storage and discount rates. *The Economic potential of land-use change and forestry for carbon sequestration and poverty reduction. Working Paper (CC10)*. 11pp.
- HUSCH, B.; 2001. Estimación del contenido en carbono de los bosques. *En: Simposio Internacional de Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en los Sistemas Forestales*. Chile. 9 pp.
- KARJALAINEN, T.; KELLOMÄKI, S. & PUSSINEN, A.; 1994. Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. *Silva Fennica* 28(2):67-80.
- KOLLMAN, F.; 1959. Tecnología de la Madera y sus aplicaciones. *Tomo I. Instituto Forestal de Investigaciones Agrarias*. Madrid. 675pp.
- RODRÍGUEZ, F.; 2005. Modelos de producción de las choperas del valle del Cinca. *Tesis Doctoral*. UdL. 214 pp
- 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. *En: opportunities for Mitigating Carbon Emissions. American Forest*, Washington: 27-58.
- SKOG, K. & NICHOLSON, G.; 1998. Carbon Cycling through wood products: The role of wood and paper products in carbon sequestration. *Forest Products Journal* 48(7/8):75-83

## Tablas y Figuras



**Figura 1:** Ciclo de emisiones y capturas de carbono por una chopera



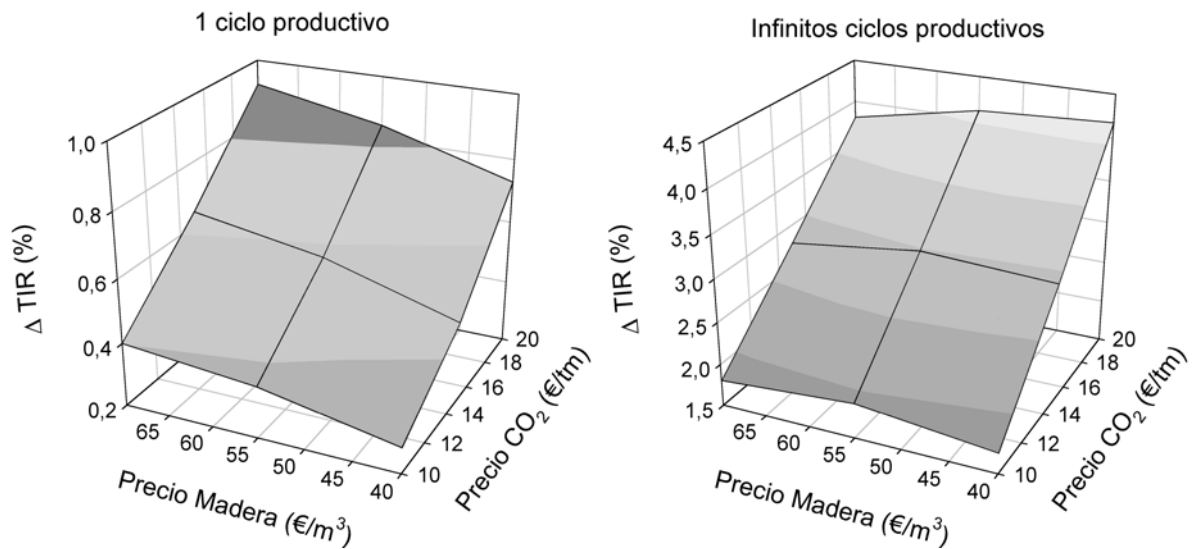
**Figura 2:** CO<sub>2</sub> atmosférico capturado en función de la fertilidad de la estación

**Tabla 1:** Rentabilidad financiera para las distintas productividades tomando un precio base de la madera de 55 €/m<sup>3</sup>

IP	Rent.	1 solo ciclo productivo			∞ ciclos productivos		
		I-214	MC	H <sub>p</sub> =8	I-214	MC	LA
IP=15	TIR	2.57%	3.25%	3.12%	5.39%	6.91%	6.63%
	Turno	16	16	16	16	16	16
IP=20	TIR	4.38%	5.25%	5.23%	9.18%	10.74%	10.70%
	Turno	16	16	16	15	15	15
IP=25	TIR	5.92%	6.93%	7.02%	12.62%	14.33%	14.61%
	Turno	14	14	14	12	11	11
IP=30	TIR	7.84%	8.95%	9.24%	17.21%	18.96%	19.71%
	Turno	11	11	11	9	9	9

**Tabla 2:** Incremento de la rentabilidad económica, en puntos porcentuales, al incluir la captura de C atmosférico

		1 solo ciclo productivo			$\infty$ ciclos productivos		
IP	Rent.	I-214	MC	LA	I-214	MC	LA
IP=15	TIR	0.06	0.13	0.12	0.80	1.28	1.52
	Turno	0	0	0	0	0	0
IP=20	TIR	0.34	0.56	0.72	2.07	3.01	3.65
	Turno	0	-1	-2	-1	-1	-1
IP=25	TIR	0.84	1.25	1.59	2.98	4.11	5.14
	Turno	0	0	0	0	1	1
IP=30	TIR	1.11	1.65	2.12	3.88	5.27	6.90
	Turno	0	1	1	0	1	1



**Figura 3:** Evolución de la variación *TIR* con el precio de la madera y del CO<sub>2</sub>, en el clon MC con *IP*=20. En la parte izquierda se analiza sobre un único ciclo productivo, mientras que en la derecha sobre infinitos ciclos productivos.