

# Los bosques como sumideros de CO<sub>2</sub>: incertidumbre en los cálculos y necesidad de potenciar la investigación

F.R. López; E. Rubio;  
D. Moya.; J. de las Heras.; M.  
Andrés; A. del Cerro;  
F.A. García; J.M. Sánchez;  
M.E Lucas; T. Dadi;  
J.L. González; E. Martínez;  
D. Candel

Grupos de investigación  
de "MEDIO AMBIENTE Y  
RECURSOS FORESTALES"  
y "ECOLOGÍA FORESTAL"  
Escuela Técnica Superior  
de Ingenieros Agrónomos  
de Albacete e Instituto  
de Energías Renovables  
Universidad de  
Castilla-La Mancha

*En este artículo se lleva a cabo una reflexión acerca de la importancia de la investigación en el campo de los sumideros de carbono naturales, fundamentalmente debido a las incertidumbres y dificultades en la ejecución práctica de las mediciones que requieren los conceptos de productividad. El concepto de productividad es todavía poco preciso, y, por este motivo, muchos de los trabajos realizados en bosques de todo el mundo no pueden compararse debido a una falta de acuerdo en la definición. Además, a efectos del protocolo de Kioto, la consideración del papel "sumidero" o "fuente" de CO<sub>2</sub> del bosque depende de la aplicación correcta de las definiciones de productividades. Por ello se dan definiciones exactas de lo que entendemos por fijación o emisión neta de CO<sub>2</sub>, se estima un concepto de productividad (NNCI) para las masas forestales que pueblan nuestra comunidad y, también, se hace hincapié en el efecto que determinados tratamientos selvícolas habituales (clareos y resalveos) tienen en esta productividad, de tal manera que se pueden sacar conclusiones prácticas acerca de cuándo una masa sometida a tratamientos selvícolas de esta índole llega a recuperar la productividad que tenía previa a la ejecución de tales trabajos. Finalmente se mencionan los diferentes procedimientos científico-técnicos que permiten estimar de forma precisa los conceptos de productividad.*

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es el próximo gran desafío que se vislumbra en el horizonte, y se necesitan con urgencia investigaciones forestales para orientar las técnicas de ordenación y de silvicultura encaminadas tanto a su mitigación como a la adaptación al mismo. Es cierto que muchas técnicas selvícolas y de ordenación, actualmente aceptadas, pueden ser utilizadas a tales efectos. Sin embargo, el interés de los países forestales y de los posibles inversores en reducir las emisiones resultantes de la deforestación en los países en desarrollo, así como aumentar la fijación de bosques ya existentes en países desarrollados, debe ir acompañado por una comprensión de los medios más eficaces, eficientes y equitativos de transformar las transferencias financieras tanto nacionales como internacionales en cambios sobre el terreno. La investigación puede ayudar a determinar qué es lo que debe hacerse ahora para conseguir una mayor capacidad de resistencia de los bosques frente a los impactos del cambio climático y garantizar el flujo constante de bienes y servicios forestales con destino a las comunidades, las economías mundiales y el mundo. La investigación en numerosas disciplinas es necesaria para ayudarnos a hacer realidad nuestra visión sobre los bosques.

La temperatura y la precipitación, dos de los factores climáticos que se espera que cambien conforme se incrementan las concentraciones de gases de efecto invernadero, son los determinantes principales de la productividad, el estado sanitario y la distribución espacial de los bosques (Spurr y Barnes, 1980). Pero además, el cambio climático puede afectar a los regímenes de plagas y enfermedades, incendios y eventos meteorológicos catastróficos, que tendrán adicionalmente efectos indirectos en los bosques (IPCC, 1996a). Las actividades humanas también tendrán un profundo impacto en cómo los bosques responderán a los cambios climáticos. Los cambios en la población y en las preferencias sobre productos y recursos del bosque podrían conformar un determinado modelo de gestión que podría influir en la composición y el estado sanitario de los ecosistemas forestales.

En este escenario, Castilla-La Mancha (CLM), una comunidad cuya su-

perficie es de unos 7,95 millones de ha, presenta una superficie forestal arbórea que ocupa un 22% de la misma (IFN2, 1995). Las especies más importantes, desde el punto de vista de su abundancia, son los pinos (*Pinus halepensis*, *P. pinaster*, *P. nigra* subsp. *salzmannii*, *P. pinea* y *P. sylvestris*), las especies del género *Quercus* (*Quercus ilex* subsp. *ballota*, *Q. faginea*, *Q. pyrenaica* y *Q. suber*) y la sabina albar (*Juniperus thurifera*). Estas 10 especies arbóreas suponen el 96,8% de toda la superficie forestal castellano-manchega. De todas las especies, *Quercus ilex*, *Pinus nigra*, *P. pinaster* y *P. halepensis* son las que ocupan la mayor superficie forestal de CLM, representando, en su conjunto, el 77% (30, 19, 14 y 14% respectivamente). Desde el punto de vista de distribución espacial, las especies forestales están desigualmente repartidas a lo largo de las cinco provincias, destacando la escasa vegetación forestal natural presente en la provincia de Toledo, donde hay dos comarcas (Campo de Talavera y Toledo) que no presentan vegetación arbórea natural de importancia (IFN2, 1995).

## LA NECESIDAD DE INVESTIGACIÓN EN LOS SUMIDROS DE CARBONO

Entre las funciones de un bosque, las ecológicas y productoras son de las más importantes y, además, están íntimamente relacionadas. Haciendo una simplificación tal vez excesiva, podríamos indicar que ambas dependen de cómo esté considerado el ecosistema forestal, si como sumidero o como fuente de CO<sub>2</sub>. Este balance de carbono está gobernado por dos conceptos: la fotosíntesis y la respiración (tanto autotrófica como heterotrófica, Figura 1). La productividad primaria neta (PPN) es definida como la fotosíntesis bruta (cantidad total de carbono fijado en el proceso de fotosíntesis) menos la respiración de la propia planta (respiración autotrófica). La productividad neta del ecosistema (PNE) se define como la PPN menos la respiración de los organismos no autótrofos (p.e., los descomponedores y transformadores de la materia muerta -respiración heterotrófica-). De esta manera, la PPN supondría, cuando se considera acumulada a lo largo del tiempo, una indicación de la producción del árbol. Adicionalmente, la PNE indicaría el papel de sumidero o fuente del ecosistema forestal.

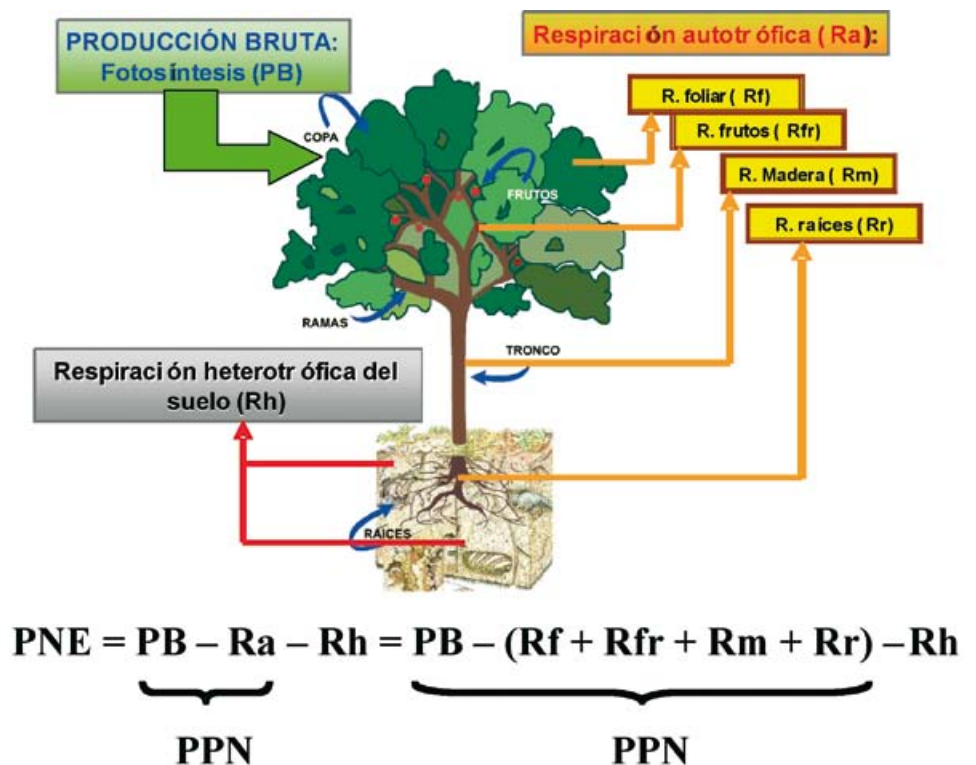


Figura 1: Esquema mostrando los conceptos de productividad primaria neta (PPN) y productividad neta del ecosistema (PNE)

Aunque existe mucha literatura acerca del concepto de productividad (principalmente, la productividad primaria neta, PPN), hay que admitir que todavía no se aplica correctamente o, al menos, no se indica qué concepto se está ofreciendo. La productividad primaria neta representa un flujo global de carbono entre la atmósfera y la biosfera y tiene una función clave tanto ecológica como biogeoquímica. Consecuentemente, es muy importante definir claramente qué componentes de la PPN están siendo medidos, ya que, de otra manera, no se podrán hacer comparaciones entre diferentes estudios y, lo que es peor, se estaría infravalorando el verdadero valor de PPN.

La PPN se podría definir como todo el material orgánico fijado por una planta o bosque durante un intervalo de tiempo. Esto supone evaluar la biomasa nueva fijada en hojas, en madera, en frutos, carbohidratos no estructurales, etc., así como todo el carbono nuevo fijado en las raíces, incluyendo los carbohidratos que se exportan a los organismos simbiotes. Sin embargo, tal como se puede deducir, la realidad hace prácticamente inviable la cuantificación práctica de todos estos componentes ¿Qué podemos cuantificar con técnicas clásicas de inventariación y ensayos destructivos para aproximarnos al concepto de PPN? Realmente sólo podemos evaluar los incrementos en biomasa aérea y subterránea (utilizando técnicas alométricas, López Serrano *et al.*, 2009) y añadir todas las pérdidas que se producen (consumo por herbívoros, chupadores de savia, hojarasca caída, compuestos orgánicos volátiles, raíces gruesas y finas que mueren, exudados de las raíces, carbohidratos exportados a los organismos simbiotes, pérdidas por incendios, etc.), lo cual resulta realmente complicad en determinados casos.

Pero la consideración de un bosque como sumidero (o fuente) se hace basándose en el concepto de PNE, que,

como ya se ha mencionado, es la PPN menos las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a la respiración heterotrófica. Así, el Grupo de Expertos Intergubernamental sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC*) propone para el cálculo de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero relacionadas con el sector Usos del suelo, cambios del uso del suelo y bosques, (*Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF*) (IPCC, 2003), en la metodología a utilizar para cuantificar la PNE, la ecuación mostrada en la figura 2, lo cual supone evaluar el incremento (en un periodo fijado) del carbono acumulado que hay en la biomasa viva,  $\Delta C_{FFLB}$ , de los incrementos de carbono ubicados en la materia orgánica muerta,  $\Delta C_{FFDOM}$ , y de los que hay en los suelos,  $\Delta C_{FFSoils}$ , de los incrementos de carbono ubicados en la materia orgánica muerta y de los que hay en los suelos. Pero esta metodología también es realmente complicada. Por tanto, lo que podemos medir habitualmente es lo que se llama el incremento neto de nuevo carbono fijado en los árboles (*NNCI*, según las siglas anglosajonas), que dista del concepto de PPN tanto más cuanto mayores sean las pérdidas mencionadas anteriormente. Pero es más, llegar al concepto de PNE supondría tener que cuantificar todas las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de los organismos heterótrofos del suelo.

Consecuentemente, es imperativo avanzar en los estudios acerca de procedimientos para evaluar a escala local (cantones, tramos, cuarteles, montes) y regional los conceptos de productividad mencionados.

La comunidad científica ha respondido a estas necesidades iniciando un conjunto de programas de investigación que combinan aproximaciones experimentales con metodologías basadas en modelos de simulación. Existen cuatro programas de Investigación en Cambio (*Global Change Research*) (*WCRP*,

*IGBP*, *IHDP* y *DIVERSITAS*) dentro de la Sociedad para el Estudio Integrado del Sistema Tierra (*Hearth System Science Partnership*). En este marco se ha establecido el Proyecto Ciclo de Carbono (*Global Carbon Project*) (*GCP*) con objeto de identificar y cuantificar los procesos clave que gobiernan el balance terrestre de CO<sub>2</sub>. Este tipo de iniciativas aglutinan el conocimiento generado en esta área y permiten establecer directrices y estándares en las aproximaciones experimentales.

Uno de los procedimientos más utilizados hasta el momento para la estimación de la biomasa acumulada actual y los incrementos de biomasa y de carbono consiste en la realización de ensayos destructivos e inventariación sucesiva de parcelas de seguimiento, ya mencionado en párrafos anteriores. Este tipo de investigación podemos considerarla como información “verdad del terreno” en el estudio del papel sumidero/fuente de los distintos elementos que integran los ecosistemas, de gran valor para la posterior modelización de la PPN mediante modelos funcionales y para la extrapolación a escala regional con técnicas de observación de la Tierra.

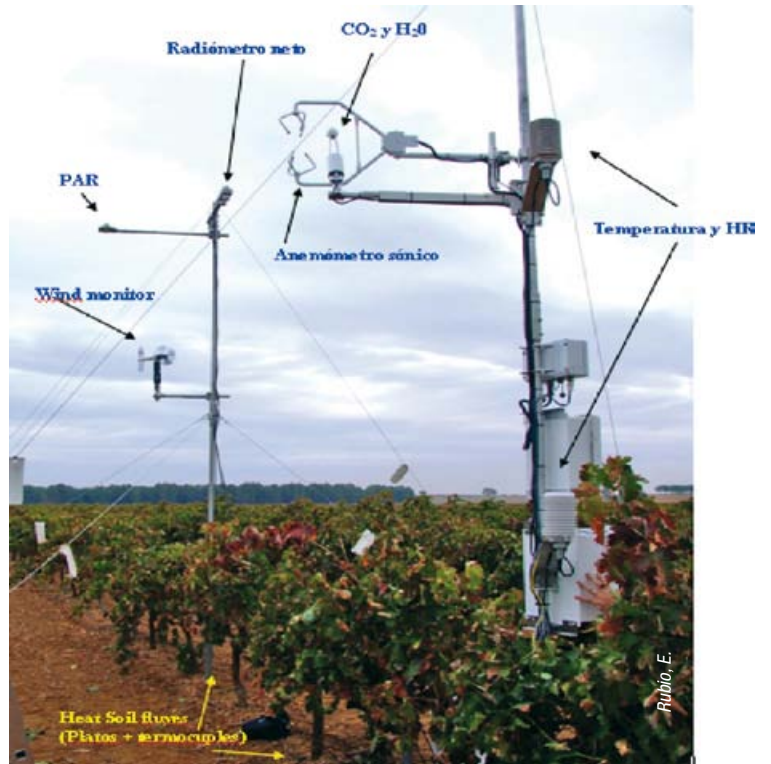
La determinación del secuestro de carbono requiere un conocimiento adecuado de las variaciones inter e intraanuales de los intercambios de carbono entre ecosistema y atmósfera. Aunque ahora el énfasis es el intercambio de carbono, éste no se da de forma aislada, sino simultáneamente a procesos turbulentos de transferencia de momento, calor y vapor de agua. Todo ello alimentado por el aporte de energía neta que supone el balance entre la radiación solar y la terrestre en la superficie terrestre. En este problema de intercambio de materia y energía, el ecosistema es contemplado como una condición de contorno (en concreto se modeliza como fuente/sumidero). El estudio de los flujos de carbono es por consiguiente uno de los métodos

**EQUATION 3.2.1**

**ANNUAL EMISSIONS OR REMOVALS FROM FOREST LAND REMAINING FOREST LAND**

$$\Delta C_{FF} = (\Delta C_{FFLB} + \Delta C_{FFDOM} + \Delta C_{FFSoils})$$

Figura 2: Ecuación para la cuantificación de la productividad neta del ecosistema según el IPCC (2003).  $\Delta C_{FFLB}$  es el incremento en biomasa/carbono de la biomasa viva,  $\Delta C_{FFDOM}$  es el incremento en biomasa/carbono de la materia orgánica muerta y  $\Delta C_{FFSoils}$  es el incremento de carbono en los suelos



más sólidos para estudiar la capacidad de sumidero de  $\text{CO}_2$  a nivel de ecosistema, esto es, su productividad neta (PNE). Los recientes desarrollos efectuados en las técnicas micrometeorológicas de medida de flujos de  $\text{CO}_2$  y vapor de agua permiten la cuantificación de la evapotranspiración y la PNE de forma continua, en tiempo casi-real, estudiar las factores ambientales dominantes y calcular flujos anuales, como ha quedado patente en las redes Ameriflux (Desjardins, 1992) y Euroflux, (Aubinet *et al.*, 2000). Dos técnicas de medición destacan por su más amplia aceptación: la técnica de covarianza de torbellino (*eddy covariance*) y la técnica de Balance de Energía por Razón de Bowen (BERB) (Frank y Dugas, 2001). La técnica de covarianza de torbellino es un método de medida directa de flujos de calor sensible, vapor de agua y  $\text{CO}_2$  mediante el uso de un anemómetro sónico de medida tridimensional con medida de temperatura y un analizador de gases de lazo abierto de alta frecuencia (Figura 3). La técnica de BERB proporciona medidas indirectas de flujos de  $\text{CO}_2$ , ya que se basa en las teorías de viscosidad turbulenta donde se asume una difusión constante a lo largo del gradiente vertical de concentración medio para unas condiciones específicas (Figura 4). Estas técnicas han sido usadas extensivamente para determinar las componentes del ba-

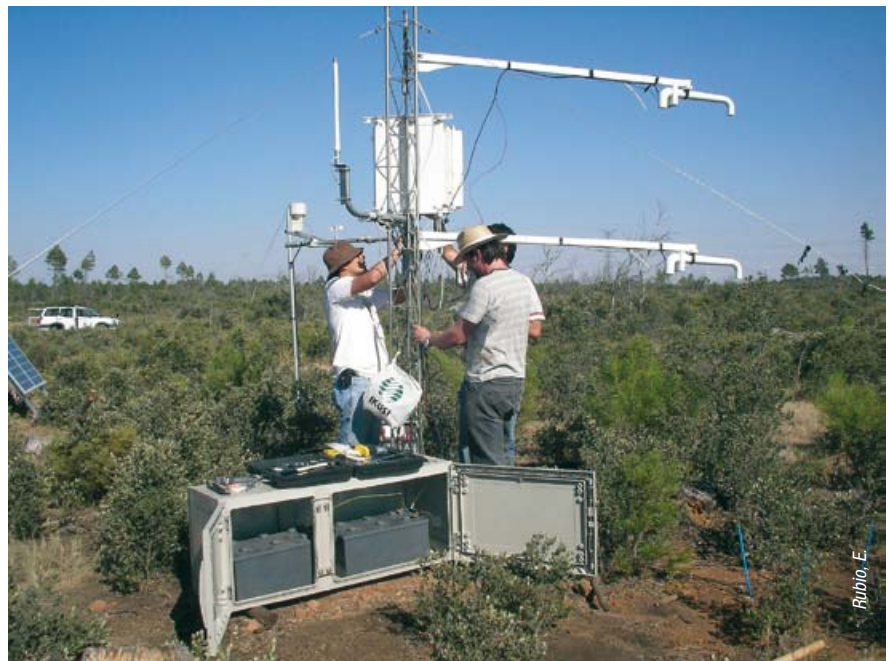


Figura 3: Imágenes de dos estaciones Eddy Covariance. Izquierda, en "Cerro Colorado" Panamá (Fuente: López-Serrano,F) y a la derecha, en una viña en Tarazona de la Mancha (Albacete).

Figura 4: Estación Bowen ubicada en un encinar regenerado tras incendio en Almodovar del Pinar (Cuenca)

lance de energía y los flujos de evapotranspiración y  $\text{CO}_2$  sobre cultivos y masas forestales.

No se puede olvidar que este intercambio neto en forma de flujo de  $\text{CO}_2$  entre la superficie y la atmósfera, que puede ser integrado a escala anual y a más largo plazo, es el resultado del intercambio gaseoso que se da a esca-

las pequeñas (estomas de las hojas, lenticelas en troncos, poros en suelo, microorganismos, herbívoros...) y que además involucra escalas temporales de una hora, incluso menores. La medición simultánea de asimilación de carbono y flujos de vapor de agua a nivel de hoja nos proporcionará información para comprender las conexiones entre

factores ambientales y procesos fisiológicos, los cuales pueden ser utilizados para reproducir estos flujos a escala de cubierta/ecosistema y a largo plazo. Para la medida de estos flujos a nivel de hoja, tronco e incluso en suelo se utilizan sistemas de medida basados en cubetas y cámaras cerradas dentro de las cuales se cuantifica el intercambio de gases en ppm por medio de analizadores de gases por infrarrojo (IRGA, *Infra Red Gas Analyzer*). Uno de los dispositivos de medida que integran cámara y analizador de gases es el modelo Li-6400 de la casa LiCor. Con objeto de modelizar estos intercambios gaseosos a nivel de hoja, suelos, troncos..., estas mediciones se efectuarán en condiciones ambientales lo más variables posible y para individuos representativos de la población presente en la zona de estudio. Aun así, este tipo de mediciones por sí solas no nos permitirían tener una estimación de la PPN o la PNE. Abordar el paso a cubierta requiere el uso combinado de estas mediciones en modelos de simulación (3PG, Gotilwa+, Biome-BGC).

El papel del suelo como sumidero/fuente de CO<sub>2</sub> es fundamental y no puede despreciarse en ningún caso en este tipo de estudios. La mayor parte del carbono almacenado por los ecosistemas terrestres se encuentra en los suelos. El IPCC estima que el suelo de los bosques almacena 2,5 veces más carbono que la vegetación (IPCC, 1994). La respiración en el suelo (Figura 5) comprende la respiración autotrófica (principalmente, respiración de raíces) y la respiración heterotrófica (incluye: respiración rizomicrobiana, descomposición de residuos de plantas y exudados de las raíces y descomposición microbiana de materia orgánica del suelo). Estos procesos suponen distintos tiempos de permanencia del carbono en suelo, por lo que el efecto sumidero/fuente a largo plazo de un suelo no es inmediato de determinar.

Un área de investigación que ha concentrado enormes esfuerzos es la encaminada a la obtención de flujos de CO<sub>2</sub> y vapor de agua a nivel planta y suelo de flujos mediante modelización. En los últimos 25 años, los esquemas y parametrizaciones utilizadas para describir el intercambio de flujos de energía, agua y carbono en el sistema suelo-vegetación-atmósfera han pasado de simples e inexactos a esquematizaciones creíbles



Figura 5: Medición de la respiración del suelo con el analizador de gases Li-6400 y la cámara de suelos modelo Li-6400-09

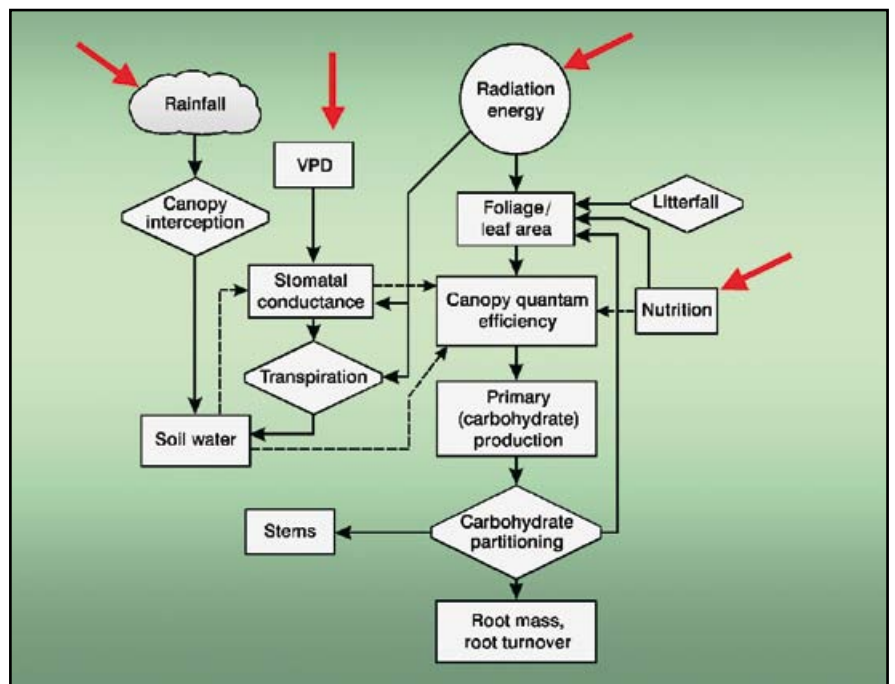


Figura 6: Diagrama de flujo del modelo Process Model of Forest Growth (3PG) tomado de Landsberg y Waring, (1997).

basadas en los avances ocurridos en fisiología vegetal e hidrología, así como en la interpretación de las medidas desde satélite y los resultados de experimentos a gran escala (Sellers *et al.*, 1997). Esta reciente generación de modelos emplea modernas teorías que relacionan la fotosíntesis con el ciclo del agua en la planta y proporcionan una descripción consistente de los intercambios de energía, H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> efectuados por la planta. Son los conocidos como

modelos funcionales (*process based models*). Estos modelos funcionales son la mejor herramienta disponible para predecir la respuesta de los ecosistemas a incrementos de CO<sub>2</sub> y cambio climático a nivel de masa forestal o a escala global. En la figura 6 se muestra el esquema de procesos que incorpora uno de estos modelos de crecimiento de masa forestal. Se trata del *Process Model of Forest Growth* (3PG), desarrollado por Landsberg y Waring, (1997).

## ALMACENAMIENTO DE CARBONO Y PRODUCTIVIDAD (NNCI) DE NUESTROS BOSQUES

Aunque no está publicada para Castilla-La Mancha la PPN de cada una de las especies forestales mencionadas, en este artículo realizamos una estimación de la misma basada en datos del II Inventario Forestal Nacional (IFN2). Cabe indicar que lo que realmente se calcula es el incremento en biomasa viva que se ha creado en un periodo determinado (p.e., 1 año), es decir, el NNCI definido en párrafos anteriores. Para ello, se ha utilizado las existencias maderables dadas por el IFN2 y se ha aplicado la metodología sugerida por el IPCC para el cálculo de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero relacionadas con el sector LULUCF (IPCC, 1996b; IPCC, 2003). La ecuación general a aplicar es  $Bt = [V \cdot D \cdot BEF] \cdot (1 + R)$ , donde Bt es la biomasa seca total (aérea y subterránea), V es el volumen comercial dado por el IFN2 ( $m^3$ ), D.BEF es el producto que corresponde a un factor de expansión de biomasa para convertir el volumen comercializable en biomasa seca arbórea sobre el suelo (validados internacionalmente a través de la acción COST-E21, Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales –CREAF-) y R es la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea. Esta misma ecuación ha sido utilizada aplicándola a los crecimientos corrientes en volumen para obtener una estimación de la PPN.

La tabla 1 muestra que las masas de *Quercus suber*, *Pinus sylvestris*, *P. pinaster* y *P. nigra* son las formaciones forestales que más biomasa acumulan por ha (entre 40 y 52 t/ha de materia seca). En el otro extremo se encuentran los sabinares y encinares (10-12 t/ha de materia seca). En cuanto a la productividad (NNCI), todas las especies presentan valores que oscilan entre 0,9 y 1,9 t/ha.año, excepto para los sabinares, que desciende a 0,3 t/ha.año. Todos estos valores son razonablemente esperados, dada la íntima relación existente entre las especies y el hábitat que ocupan. Sin embargo, los resultados muestran unos niveles bajos de productividad, dado que los valores medios de PPN a nivel mundial oscilan entre 4 y 12 t.  $ha^{-1}año^{-1}$  (Liu et al., 1997), aunque no debe olvidarse que nuestros datos no responden

Especie	Sup. (ha)	BEFD	R	Bt (t/ha)	PPN (t/ha.año)	PPNtotal (t/año)
<i>Juniperus thurifera</i>	102.695	0,80	0,34	<b>12,50</b>	<b>0,30</b>	<b>30.809</b>
<i>Pinus halepensis</i>	236.099	0,74	0,34	<b>21,57</b>	<b>0,85</b>	<b>200.684</b>
<i>Pinus nigra</i>	330.850	0,64	0,34	<b>40,63</b>	<b>1,18</b>	<b>390.403</b>
<i>Pinus pinaster</i>	236.190	0,55	0,34	<b>44,61</b>	<b>1,89</b>	<b>446.399</b>
<i>Pinus pinea</i>	37.459	0,73	0,34	<b>27,28</b>	<b>1,11</b>	<b>41.580</b>
<i>Pinus sylvestris</i>	104.282	0,62	0,34	<b>51,80</b>	<b>1,70</b>	<b>177.280</b>
<i>Quercus ilex</i>	516.640	1,28	0,33	<b>9,70</b>		
<i>Quercus faginea</i>	57.617	1,11	0,33	<b>26,96</b>	<b>0,89</b>	<b>51.279</b>
<i>Quercus pyrenaica</i>	29.033	1,11	0,33	<b>33,51</b>	<b>1,28</b>	<b>37.163</b>
<i>Quercus suber</i>	7.633	1,28	0,33	<b>52,26</b>		
RESTO spp.	29.758			<b>10,97</b>	<b>1,27</b>	<b>37.793</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.688.256</b>				<b>TOTAL</b>	<b>1.413.388</b>

Tabla 1: Estimación de la biomasa seca total (aérea y subterránea, t/ha) y la productividad primaria neta por ha (PPN,  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$  de biomasa seca) y total (PPN total,  $t\ año^{-1}$ ) para Castilla-La Mancha para las diferentes especies forestales. BEFD es el parámetro de expansión de volumen con corteza a biomasa seca total aérea y R es la relación biomasa subterránea/biomasa aérea

al concepto de PPN. Datos concretos obtenidos por nosotros en la región de Castilla-La Mancha muestran que para encinares regenerados tras incendios, con siete años de edad, el NNCI actual (del último año analizado) llega hasta 3,1 t/ha.año, mientras que el NNCI medio anual (total de biomasa dividida por la edad) es de 1,4 t/ha.año, no habiendo alcanzado todavía el máximo esperable (López Serrano et al., 2009). Para otros tipos de encinares no recientemente quemados (y fuera de la comunidad castellano-manchega) se obtuvieron valores de 9,1-10,2 t/ha.año (Sabaté et al., 2002). La tabla 1 también muestra que las principales formaciones forestales de Castilla-La Mancha llevan a cabo una fijación anual de casi 1,5 millones de toneladas de biomasa (aproximadamente 2,75 millones de toneladas de  $CO_2$  equivalente). Todo ello sin contabilizar las pérdidas mencionadas en la sección anterior. Sin embargo, no existen estudios en nuestra comunidad acerca de las pérdidas por respiración heterotrófica, lo cual nos permitiría estimar la productividad neta del ecosistema y, por tanto, evaluar el verdadero valor de sumidero de  $CO_2$  que ellos realizan. Esto también pone de relieve las lagunas que todavía existen en cuanto a la investigación de estos procesos a nivel regional y nacional.

## UN EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO A PROBLEMAS REALES: "EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS SELVÍCOLAS (CLAREOS Y RESALVEOS) EN LA PRODUCTIVIDAD"

Nuestro grupo de investigación ha realizado evaluaciones de los efectos de los tratamientos de clareo y resalveo en pinares y encinares, respectivamente, regenerados tras incendio. La primera zona de estudio se localiza en la sierra de Segura, en el término municipal de Yeste (Albacete). Esta zona sufrió un gran incendio forestal en el verano de 1994 que destruyó unas 14.000 ha de pinares de *Pinus halepensis* y *P. pinaster*. Cinco años después del fuego se observa un gran contraste en el regenerado del pinar. Así, en algunas zonas se daban densidades de más de 10.000 pies/ha, mientras que en otras la regeneración era nula, detectándose en algunas laderas procesos de erosión incipientes. En este regenerado natural se ubicó una zona experimental para el replanteo de las parcelas de investigación cuando los pinos tenían una edad de cinco años (1999). En dicha zona se realizó un diseño experimental para evaluar la productividad y los efectos de los tratamientos (clareos a dos intensidades, 1.600 y 800 pies/ha, densidad final, incluyendo otros tratamientos culturales, ver tabla 2). La

segunda zona de estudio corresponde a un encinar regenerado tras un incendio en 1993, en Campillo de Altobuey (Cuenca), quemándose casi 500 ha. La densidad inicial de la masa oscilaba entre 11.000-15.000 chirpiales/ha en 1999. En esta zona se llevó también a cabo un diseño experimental para evaluar la productividad y el efecto de la intensidad de resalveo (densidades finales de 5.000 chirpiales/ha –T<sub>m</sub>-, 1.800 –T<sub>d</sub>-, corta total a matarrasa –T<sub>f</sub>- y control –C-) en la productividad. En ambos casos hubo que realizar inventarios continuos y muestreos destructivos (Figuras 7 y 8).

La tabla 2, para el caso de pino carrasco, muestra que dos años después de la aplicación de los tratamientos (clareos), el incremento medio anual de biomasa total seca (aérea y subterránea) no alcanzó al obtenido en las parcelas control, aunque no hubo diferencias significativas. La tabla 3, para la encina, indica que un resalveo medio (5.000 chirpiales/ha, densidad final) fue el tratamiento que prácticamente se aproximó en cuanto a productividad al obtenido en parcelas control tan solo un año después de aplicar los tratamientos. Cabe destacar que la estimulación del crecimiento medio anual para este tipo de resalveo fue máxima, minimizándose el rebrote de encina posterior al tratamiento. Además, se muestra que cualquiera otra intensidad de resalveo empeora la productividad de la masa, al menos un año después de su aplicación. Finalmente, una comparación entre ambas especies indica que siete años después del incendio, la productividad (NNCI) de la encina duplica a la del pino carrasco. Este

Tratamientos	MAP <sub>+1</sub>
Clareo (1.600 pies/ha)	<b>0,65</b>
Clareo (1.600) y poda	<b>0,42</b>
Clareo (1.600), desbroce y poda	<b>0,55</b>
Control	<b>0,69</b>
Clareo (800 pies/ha), desbroce y poda	<b>0,65</b>

Tabla 2: NNCI (incremento neto de biomasa viva aérea y subterránea (t/ha.año) en biomasa seca en un pinar de pino carrasco regenerado tras incendio (7 años de edad)

Fuente: González-Ochoa (2003), Tesis Doctoral  
MAP<sub>+1</sub>: Crecimiento medio anual en febrero-2001

	Intensidad resalveo	MAP (t ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	LAP (t ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	MAP <sub>+1</sub> (t ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	S <sub>MAP</sub> (%)
Biomasa seca	C	1,10 <sup>a</sup>	3,11 <sup>a</sup>	1,39 <sup>a</sup>	25,8 <sup>a</sup>
	T <sub>m</sub>	0,87 <sup>a</sup>	3,53 <sup>a</sup>	1,10 <sup>ab</sup>	27,1 <sup>a</sup>
	T <sub>d</sub>	0,88 <sup>a</sup>	2,70 <sup>a</sup>	0,84 <sup>bc</sup>	-4,0 <sup>b</sup>
	T <sub>f</sub>	0,84 <sup>a</sup>	1,72 <sup>a</sup>	0,60 <sup>c</sup>	-28,7 <sup>b</sup>
Equivalente CO <sub>2</sub>	C	1,98 <sup>a</sup>	5,48 <sup>a</sup>	2,48 <sup>a</sup>	25,2 <sup>a</sup>
	T <sub>m</sub>	1,57 <sup>a</sup>	6,04 <sup>a</sup>	1,95 <sup>ab</sup>	24,5 <sup>a</sup>
	T <sub>d</sub>	1,59 <sup>a</sup>	4,47 <sup>a</sup>	1,48 <sup>bc</sup>	-6,9 <sup>b</sup>
	T <sub>f</sub>	1,52 <sup>a</sup>	2,80 <sup>a</sup>	1,05 <sup>c</sup>	-30,9 <sup>b</sup>

Tabla 3: NNCI (aérea y subterránea, en biomasa seca y CO<sub>2</sub> equivalente) en un encinar regenerado tras incendio (7 años de edad)

MAP: crecimiento medio anual en 1999 antes de los resalveos; LAP: crecimiento corriente del último año (dic-99 a febr-2001); MAP<sub>+1</sub>: crecimiento medio anual en febr-2001. S<sub>MAP</sub>: Estimulación del crecimiento medio anual después de los tratamientos i.e., 100\*(MAP<sub>+1</sub>-MAP)/MAP. C: control; T<sub>m</sub>: resalveo dejando una densidad final de 5.000 chirpiales/ha; T<sub>d</sub>: resalveo a densidad final 1800; T<sub>f</sub>: corta a matarrasa (Fuente: López-Serrano et al. 2009)

resultado podría justificarse por la diferente estrategia de regeneración tras incendio que ambas especies poseen, aparte del posible efecto de la diferente calidad de estación.

Por tanto, estos resultados podrían orientar a técnico a la hora de planificar las actuaciones en masas de este tipo, siempre bajo el punto de vista de la productividad.



Figura 7: a) Procedimiento de extracción de chirpiales para llevar a cabo los ensayos destructivos; b) Chirpial extraído en la masa de encinar regenerado tras incendio con el objetivo de evaluar su biomasa (aérea y subterránea) y poder definir relaciones alométricas



Figura 8. A: Aspecto de la masa testigo antes de la corta. B: Pie recién apeado dispuesto para su medición en secciones. C: Separación de las ramas de la sección superior. D: Ramas de la sección inferior. E: Sección inferior de un pie no podado. F: Pesado de ramas. G: Sección superior e inferior del tronco. H: Pesado del tronco. I: División del tronco en trozas. (Fuente: González Ochoa, 2003)

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUBINET, M., GRELE, A., IBROM, A., RANNIK, U., MONCRIEFF, J., FOKEN, T., KOWALSKI, A. S., MARTIN, P.H., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C., CLEMENT, R., ELBERS, J., GRANIER, A., GRUNWALD, T., MORGENSTERN, K., PILEGAARD, K., REBMAN, C., SNIJDERS, W., VALENTINI, R. & VESALA, T. (2000). Estimates of the annual net carbon and water exchange of forest: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* 30: 113-175.

DESJARDINS, R. L., HART, R. L., MACPHERSON, J. L., SCHUEPP, P. H. & VERMA, S. B. (1992). Aircraft-based and tower-based fluxes of carbon dioxide, latent, and sensible heat. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97: 18477.

FRANK, A. B. & DUGAS, W. A. (2001). Carbon dioxide fluxes over a northern, semiarid, mixed-grass prairie. *Agricultural Meteorology* 108: 127- 317.

IFN2 (1995). *Segundo Inventario Forestal Nacional (1986-1995)*. Instituto Nacional de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

IPCC (1996a). *Climate change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses*. Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. & Dokken, DJ (eds.). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (1996b). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. (Directrices del IPCC revisadas en 1996 para Inventarios Nacionales de Gases Efecto Invernadero).

IPCC (2003). *Good Practice Guidance (GPG) for Land Use,*

*Land-Use Change and Forestry (LULUCF)*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit. (IGES, Japan).

LANDSBERG, J.J. & WARING, R.H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95: 209-228.

LIU, J., CHEN, J.M., CIHLAR, J. & PARL, W.M. (1997). A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment* 62: 158-175.

LÓPEZ-SERRANO, F.R., HERAS, J. DE LAS, MOYA, D., GARCÍA-MOROTE, A. & RUBIO, E. (2009). Is the net new carbon increment of a coppice forest stand of *Quercus ilex* affected by post-fire thinning treatments and by recurrent fires? *International Journal of Wildland Fire* (aceptado para publicación).

SABATÉ, S., GRACIA, C.A. & SÁNCHEZ, A. (2002). Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management* 162: 23-37.

SELLERS, P.J., DICKINSON, R.E., RANDALL, D.A., BETTS, A.K., HALL, F.G., BERRY, J.A., COLLATZ, G.J., DENNING, A.S., MOONEY, H.A., NOBRE, C.A., SATO, N., FIELD, C.B. & HENDERSON-SELLERS, A. (1997). Modelling the exchanges of energy, water, and carbon, between continents and the atmosphere. *Science* 275: 502-509. **F**