

9. IMPACTOS SOBRE EL SECTOR FORESTAL

Carlos Gracia, Luis Gil y Gregorio Montero

Contribuyentes

J. Ezquerro, E. Pla, S. Sabaté, A. Sánchez, G. Sánchez-Peña, J. Vayreda

Revisores

J. Martínez Chamorro, S. Mutke Regneri, M. J. Sanz

RESUMEN

Los bosques ocupan en España cerca de 15 millones de hectáreas a los que hay que añadir otros 11.5 millones de hectáreas más de matorral diverso y pastos en terrenos forestales. Esta superficie forestal produce, en su conjunto, 1200 millones de euros anualmente (sin considerar la producción ganadera) de los que la madera supone cerca de 800 millones. La sociedad recibe del bosque otros bienes y servicios, hoy por hoy de difícil cuantificación económica, pero no por eso menos importantes, entre los que destacan la protección frente a la erosión, el control y regulación del ciclo hidrológico, la contribución a la conservación de la biodiversidad y el uso recreativo.

El origen de algunas especies de pinos o robles se remonta a millones de años y han superado varias fluctuaciones climáticas. Los árboles adultos son capaces de soportar un cierto grado de estrés ambiental pero su sensibilidad aumenta en las fases de regeneración de la masa forestal. Junto al cambio climático, la regresión del medio aumenta la sensibilidad de las especies, dado que muchos bosques no pueden reocupar hoy áreas que ocuparon con anterioridad, debido por ejemplo, a los problemas de erosión por falta de cubierta vegetal.

Plagas y enfermedades forestales pueden jugar un papel fundamental en la fragmentación de las áreas forestales. Algunas especies perforadoras o defoliadoras pueden llegar a completar dos ciclos biológicos en un año ó aumentar su área de colonización como consecuencia de los inviernos más benignos.

La fisiología de la mayor parte de especies forestales se puede ver profundamente afectada. Los caducifolios alargan su periodo vegetativo, La renovación foliar y de las raíces finas de los perennifolios se acelera, alterando el balance de carbono interno de la planta. El mayor consumo de carbono que el árbol debe invertir para renovar estas estructuras incrementa el consumo de carbohidratos de reserva y aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales. El retorno de materia orgánica al suelo en forma de hojarasca y raíces finas puede aumentar los aportes de materia orgánica al suelo a la vez que reduce la producción de madera. Existe un riesgo muy alto de que muchos de nuestros ecosistemas forestales se conviertan en emisores netos de carbono durante la segunda mitad del presente siglo. Las zonas culminales de las montañas, los ambientes más xéricos, y los bosques de ribera son algunas de las zonas que pueden resultar más vulnerables al cambio climático.

Ante los cambios previsibles, es aconsejable aplicar una gestión adaptativa. El resalveo de los montes bajos reduciendo la densidad de pies demuestra ser un eficaz tratamiento que mejora la respuesta de estos montes al cambio climático. El control y la adecuación de los turnos e intensidades de aprovechamiento, deben ser considerados para optimizar la respuesta del bosque. Igualmente resulta importante la cuidadosa selección de las procedencias de las semillas en las repoblaciones para una gestión adecuada de la diversidad genética.

Entre las necesidades más apremiantes para el futuro destacan la necesidad de disponer de un conocimiento más preciso sobre las biomásas subterráneas de nuestras especies forestales, dado el papel primordial que la fracción subterránea juega en la respuesta a las perturbaciones y con el fin de precisar los valores del carbono acumulado en nuestros bosques, el establecimiento o consolidación de redes de observación y análisis de los factores ecofisiológicos que determinan la regeneración y, en conjunto, la respuesta del bosque a los cambios ambientales y potenciar el desarrollo y aplicación de los modelos de crecimiento forestal, especialmente los basados en procesos fisiológicos, para prever las respuestas del bosque a cambios ambientales o patrones de gestión.

9.1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales constituyen una de las unidades de paisaje natural más complejas en cuanto a función, estructura y dinámica. Desde los albores de su existencia el hombre ha utilizado y se ha beneficiado de los diversos productos y servicios que los territorios forestales le han proporcionado: madera, leñas, frutos, resinas, hongos, cobijo y resguardo, esparcimiento, etc. Esta diversidad de productos es el mejor indicador de su propia complejidad.

En el pasado, los montes se aprovechaban de acuerdo a las necesidades de los pueblos y comunidades que vivían en el entorno, sin tener en cuenta su capacidad productiva. No existía el concepto de producción forestal sostenible, que aparece durante la primera mitad del siglo XIX, con la aplicación generalizada de la Ordenación de Montes y de las primeras bases de la técnica selvícola.

Actualmente, el mantenimiento, cuidado y mejora de las masas forestales no obedece a simples razones productivas, aún por importantes que éstas sean, sino que es fundamental considerar la necesidad que tienen los países de contar con superficies forestales abundantes y bien distribuidas, como base para el equilibrio biológico y social del territorio. En sociedades industrializadas, como la nuestra, ha arraigado fuertemente la idea del bosque multifuncional, estructura generadora de diversidad biológica, y fuente de múltiples productos, servicios y utilidades. La sociedad, demandante y receptora última de los productos y servicios generados por los territorios forestales, ya no exige que la producción maderera sea exclusiva en nuestros montes. En esta línea, los sistemas forestales y silvopastorales propios del medio mediterráneo constituyen un claro ejemplo de gestión multifuncional del territorio forestal.

El alcance e importancia del Sector Forestal en España queda reflejado en la extensión que ocupan los terrenos forestales en nuestro país; en la diversidad y valor de los productos y servicios que estos terrenos proporcionan a la sociedad; y, para aquellos productos donde se dispone de información suficiente, en la valoración de los sectores industriales asociados al sector.

9.1.1. Superficie Forestal Española

La Ley de Montes 43/2003 de 21 de noviembre de 2003 define en su artículo primero la superficie forestal o monte como “...todo terreno en el que el vegetan especies forestales arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, sea espontáneamente o procedan de siembra o plantación, que cumplan o puedan cumplir funciones ambientales, protectoras, productoras, culturales, paisajísticas o recreativas ...”. Utilizando esta definición, el Plan Forestal Español estima que la superficie forestal nacional se cifra en 26.273.235 ha, lo que supone el 51.4% de la superficie nacional. Esta superficie puede clasificarse de acuerdo al tipo de cubierta vegetal que sustenta (tabla 9.1):

Tabla 9.1. Distribución de la superficie forestal española según cubierta. (FCC=fracción de cabida cubierta)

Tipo de cubierta	Superficie (ha)	Tipo de especie	Superficie (ha)
Forestal arbolado (FCC>5%)	14.732.247	Coníferas	5.833.970
		Frondosas	4.287.084
		Mixtas	4.581.729
Matorral diverso con arbolado (FCC<5%)	9.228.407		
Pastos forestales no arbolados	2.312.581		

La titularidad de estos territorios forestales corresponde al Estado, las CC.AA., entidades locales y propietarios particulares, en la proporción presentada en el gráfico siguiente:

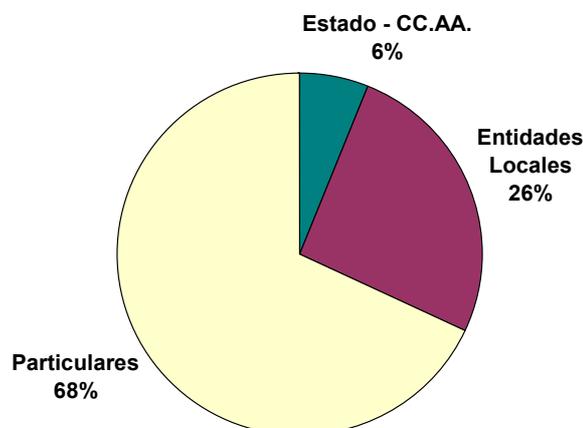


Fig. 9.1. Titularidad de los territorios forestales en España

9.1.2. Producciones forestales: Cuantificación y valoración

La falta de una Fuente de Estadística Forestal exclusiva y la no existencia de mercados centrales de los productos forestales dificultan la cuantificación y valoración de los productos de interés comercial. Asimismo, es necesario incluir en las producciones forestales una serie de bienes y servicios que los montes proporcionan a la sociedad, cuya valoración y cuantificación se ha de desarrollar mediante métodos indirectos (encuestas, valoración contingente, etc.). Estos condicionantes dificultan la valoración y cuantificación de la producción forestal general.

9.1.2.1. Productos de interés comercial

El aprovechamiento de los productos forestales, de acuerdo a la vigente Ley de Montes, corresponde a los titulares del terreno forestal. La regulación de los mismos recae, sin embargo, en la administración forestal competente, lo que supone una garantía para la persistencia y sostenibilidad de las masas y sus producciones asociadas. La tabla 9.2 muestra la cuantificación y valoración anual de los distintos productos forestales, valorados en cargadero (extraídos del monte pero no transformados industrialmente). El total de la producción forestal no transformada asciende a 1200 millones de euros al año (sin considerar producción ganadera). Este cifra implica que la renta media anual de los terrenos forestales (considerando únicamente los productos de interés comercial) puede cifrarse en 45.67 €/ha.

Tabla 9.2. Valoración y cuantificación de los productos forestales de interés comercial

Producto	Categoría	Producción (10 ³ tm/año)	Valoración (10 ⁶ €/año)
Madera	Coníferas	9082 *	396
	Frondosas	5696 *	253
	Sin clasificar	3289 *	143
Leñas	Gruesas	1250	40
	Biomasa	2000	
Corcho		85	90
Resina		4.2	2.5
Frutos	Bellota	400	19
	Castaña	20	13
	Piñón con cáscara	6	18
Hongos		9	30
Plantas medicinales		3	0.03
Caza		1326000 ⁺	155
Pesca continental		834680 ⁺	25
Miel		0.02	0.06
Extracciones	Arena	1500	0.38
	Grava	1750	3
	Piedra	3000	1.6
Ganado		140000 ^{**}	
Otros			9
Total madera			800
Total productos no maderables			400
TOTAL PRODUCTOS FORESTALES			1200

* 10³ m³ con corteza ; ⁺ licencias expedidas; ^{**} toneladas en peso vivo, no valoradas económicamente. Fuente Anuario de Estadística Agraria (AEA).

9.1.2.2. Producción maderera

La principal producción de interés comercial obtenida en los terrenos forestales es la madera, cuyo valor se estima en 800 millones de euros al año. Las extracciones anuales de madera en España se cifran en 18.000.000 de m³. Un indicador global de la sostenibilidad de la producción maderera es la comparación entre las extracciones y el crecimiento anual de las existencias maderables acumuladas en nuestros bosques. Según el Plan Forestal Español (PFE) los bosques españoles acumulan 675.000.000 de m³ de madera, con un crecimiento anual cercano a 35.500.000 de m³. Esto supone que únicamente se extrae el 50% del crecimiento anual de las masas forestales, lo que garantiza la compatibilidad entre la persistencia y expansión de la cubierta forestal y los aprovechamientos madereros.

El consumo aparente de madera en España (extracción + importación – exportación) se estima en 32.500.000 de m³. El déficit entre la producción y el consumo se cubre actualmente a través de las importaciones, tanto de madera en rollo como de productos ya transformados (pasta de papel, madera aserrada, muebles, etc.). El consumo medio de madera por habitante y año en España es de 0.8 m³. El hecho de que esta cifra sea inferior a la de los países de nuestro entorno, unido a la tendencia creciente que mantiene en los últimos años, hace suponer que en los próximos años se producirá un incremento en el consumo aparente de madera en nuestro país, que tendrá que ser cubierto bien mediante un incremento de la producción nacional bien de las importaciones.

9.1.2.3. Otros bienes y servicios producidos en los terrenos forestales

Fijación de CO₂

Los terrenos forestales, especialmente los arbolados, actúan como elementos fijadores del CO₂, principal gas que contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global del planeta. La fijación de CO₂ en los bosques y en los productos forestales derivados constituye un elemento fundamental del ciclo del carbono. En 2004, se estima que los bosques españoles (considerando únicamente el terreno forestal arbolado) acumulaban un total de 2050 millones de toneladas de CO₂, con un incremento neto anual de las fijaciones equivalente a unos 40 millones de toneladas (Montero *et al.* 2002, 2004). Esta cifra equivale aproximadamente a un 10% del total de CO₂ emitido a la atmósfera en España en el año 2002 (Anónimo 2004).

Protección frente a la erosión y control del ciclo hídrico

La erosión hídrica es el principal agente de desertificación en España. En España un 18,2% del territorio sufre pérdidas erosivas superiores a 50 tm/ha/año (Anónimo 2000). La erosión hídrica provoca la pérdida de suelos fértiles en zonas donde son necesarios para el mantenimiento del potencial biológico del territorio, y la posterior acumulación de estos materiales en otras áreas, con consecuencias muchas veces catastróficas (inundaciones, avenidas...). De entre las posibles cubiertas del territorio, las formaciones arboladas forestales son las que ejercen la función protectora con mayor eficacia, favoreciendo la regulación y calidad del agua, la prevención de inundaciones y alargando la vida de los embalses.

Conservación de la biodiversidad. Espacios naturales protegidos.

En España se han incluido más de 12 millones y medio de hectáreas de terreno en la Red Natura 2000, bien como *Lugares de importancia comunitaria* (LIC) o *Zonas de especial protección de Aves* (ZEPA). En estos territorios, la normativa obliga a que se incorporen a la gestión las medidas y mecanismos necesarios que garanticen la conservación de la biodiversidad. Más del 70% de los territorios incluidos en la Red (cerca de 9 millones de hectáreas) se clasifican como terrenos forestales, lo que indica que los bosques constituyen el elemento del territorio de mayor importancia en la conservación de la biodiversidad. Los activos ambientales de no uso (protección y conservación de la biodiversidad) se valoran en 1220 millones de euros al año (Anónimo 2003)

Uso recreativo y paisaje

Los terrenos forestales constituyen un elemento básico del paisaje, así como una zona de esparcimiento y expansión de la población. La gestión de los montes españoles incluye entre sus objetivos el disfrute controlado y racional de los mismos, compatible con los aprovechamientos tradicionales. Una de las herramientas básicas en el cumplimiento de estos objetivos ha sido la creación y mantenimiento de zonas de concentración (áreas recreativas, áreas de acampada y refugios) y de centros de interpretación y aulas de la naturaleza, instalaciones que facilitan el acercamiento, comprensión e integración del ciudadano en el medio forestal. El uso recreativo y paisajístico de los terrenos forestales ha sido valorado mediante métodos de valoración contingente en 640 millones de euros al año (Anónimo 2003).

9.1.3. Valoración económica de los distintos productos y servicios obtenidos en los terrenos forestales

La tabla 9.3 presenta el valor anual total y por hectárea asignado a los diferentes productos y servicios obtenidos en los terrenos forestales. Estas cifras están infravaloradas, al no haber considerado la producción ganadera e incluir únicamente el valor del carbono neto fijado anualmente por los terrenos arbolados (sin considerar el fijado en los terrenos no arbolados, ni asignar un valor por el carbono acumulado).

Tabla 9.3. Valoración de servicios y productos. (Fuente: Anónimo 2003)

Servicio o producto	Valor anual (10 ⁶ €)	Valor anual (€/ha)
Madera	800	30.45
Productos forestales no madereros	400	15.22
Fijación neta anual CO ₂ *	220	8.37
Activos ambientales (protección, conservación)	1220	46.45
Uso recreativo y paisaje	640	24.36
TOTAL	3280	124.85

* (únicamente terreno forestal arbolado, usando como referencia un valor de 5.5€/ t CO₂)

9.1.4. Inversión pública en el sector forestal

La inversión pública en el sector forestal supone el 20% del total de la inversión pública en medio ambiente, alcanzando un valor en 2002 superior a 820 millones de euros (ASEMFO 2002). La inversión pública en el sector forestal se ejecuta principalmente desde las Administraciones Autonómicas (580 millones de €) y la Administración Central del Estado (240 millones €). Las administraciones autonómicas financian tanto actuaciones en los terrenos forestales cuya gestión controlan (normalmente de titularidad pública) como subvenciones para la intervención en terrenos forestales de titularidad privada. Las inversiones procedentes de la Administración Central del Estado se centran tanto en el mantenimiento de servicios integrados (protección frente a incendios forestales y agentes nocivos, Banco de Datos de la Naturaleza), gestión de Parques Nacionales y actuaciones cofinanciadas con las CCAA (FEOGA, medidas complementarias PAC).

Considerando la superficie forestal española, la inversión media por hectárea y año, financiada a través de fondos públicos, se estima en 31.53 €.

Tabla 9.4. Resumen Programa de Forestación de Tierras Agrarias (1994-1999)(Anónimo 2003)

AYUDA A LA FORESTACIÓN	
Expedientes aprobados tras ejecución trabajo	34 981
Superficie subvencionable	451120 ha
Coste total (FEOGA+Estado)	608 10 ⁶ €
Superficie media por beneficiario	12.9 ha
Coste medio forestación	1348 €/ha
PRIMA DE MANTENIMIENTO DE SUPERFICIES FORESTADAS	
Número de beneficiarios con solicitud aceptada	34 697
Superficie subvencionable	439923 ha
Coste total subvencionable	421 10 ⁶ €

El principal destino de inversión forestal en España durante los últimos años ha sido el Programa de Forestación en Tierras Agrarias, ejecutado como medida de acompañamiento a la PAC, en el marco del reglamento comunitario 2080/92. Esta actuación, financiada principalmente a través de fondos comunitarios, ha supuesto una inversión media, entre 1994 y 1999, superior a los 200 millones de euros. El principal resultado de este plan ha sido el aumento de 450000 ha en la superficie forestal nacional. La tabla 9.4 resume los resultados del Programa para el quinquenio 1994-1999.

9.1.5. Balance producción-inversión en los terrenos forestales

Considerando la valoración anual de los productos, bienes y servicios producidos por una hectárea de terreno forestal español en un año, que se ha estimado en 124.85 €, y las inversiones públicas asignadas, valoradas en 31.53 € / hectárea.año, se obtiene un claro balance positivo, superior a los 90 € / hectárea.año. Considerando que en esta valoración no se ha incluido la producción ganadera forestal, ni la valoración del carbono acumulado (únicamente se ha considerado el carbono neto fijado cada año), y a la vista del resultado obtenido, se concluye que el mantenimiento, gestión y aprovechamiento sostenible de los terrenos forestales es una actividad netamente positiva para la sociedad.

9.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

Para las principales especies forestales, las que definen el paisaje y son un complemento a las economías rurales, los cambios climáticos no son un fenómeno reciente. El origen de algunas especies de *Pinus* o *Quercus* se remonta a millones de años, por lo que han superado varias fluctuaciones climáticas. Por su longevidad, el cambio se da en su propio ciclo, razón por la que obligadamente han superado los valores extremos que se han dado en los últimos siglos. Los estudios filogeográficos muestran como linajes localizados en refugios glaciales situados en la Península Ibérica tuvieron suficiente variación genética para adaptarse al cambio. Bajo el calentamiento del Holoceno, las especies forestales remontaron las montañas o se desplazaron hacia al norte conforme se retiraban los casquetes glaciares. Tal ha sido el caso de los robles blancos, uno de los grupos mejor estudiados en Europa (Petit *et al.* 2002).

Los árboles adultos son capaces de soportar niveles de estrés ambiental importante, si bien su sensibilidad es mayor cuando la masa forestal se encuentra en fase de regeneración. Esta requiere el éxito continuado en varios procesos ecológicos sucesivos, desde la polinización hasta el establecimiento de las plántulas. Estos procesos son, muchos de ellos, poco conocidos en las especies forestales, y se han de situar en un régimen de perturbaciones que crea oportunidades diferenciales para la coexistencia de varias especies arbóreas; situación que es general en nuestro país.

El cambio climático no es el único factor al que se enfrentan las especies forestales. La sensibilidad al clima actual es mayor por la regresión del medio que pueden ocupar. Muchos bosques no pueden recuperar terrenos que ocuparon con anterioridad. El efecto de la degradación del hábitat es más intenso en territorios de topografía abrupta, ahora con suelos rejuvenecidos en su perfil y con problemas de erosión por falta de cubierta vegetal, o bajo climas poco favorables para la regeneración por la baja pluviometría. Entre otros procesos, destaca la sobreexplotación de acuíferos que ha eliminado la capa freática próxima a la superficie y colocado en situaciones de extinción a numerosas poblaciones, entre los que se encuentran alcornocales, encinares o quejigares afectados por la denominada “seca”, así como manifestaciones de gran singularidad como la población de *Pinus sylvestris* de Coca (Segovia), localizada entre pinares de *Pinus pinaster* gracias a la existencia en el pasado de un freático accesible. La severa reducción a la que se ha visto sometida esta población ha influido de forma sustancial en el sistema reproductivo de una especie anemófila y alógama (Robledo-

Annuncio et al. 2004). El último evento regenerativo de la población ocurrió hace casi un siglo y una población adaptada a las características térmicas de la Meseta Norte, más severas que en las laderas de la Sierra del Guadarrama, está en trance de desaparecer.

La capacidad de adaptación a los cambios ambientales va unida, a corto plazo, a una mayor plasticidad fenotípica, que es más elevada en las especies que superan el medio milenio (*Pinus nigra*, *P. canariensis*, *P. sylvestris*, *Quercus ilex* o *Q. petraea*) y con áreas de distribución extensas. En ellas, la variabilidad intrapoblacional es alta, pues el flujo genético impide la selección disruptiva y la especiación. La selección natural es poco eficiente por ser el ambiente heterogéneo y el componente de variación dentro de las poblaciones es mucho mayor que el existente entre poblaciones. En las especies de mayor nivel evolutivo, como robles y encinas, cabe esperar una diversidad genética intrapoblacional mayor; en particular, si son indiferentes edáficos, pues soportan mayor heterogeneidad ambiental en espacio y tiempo. En especies heliófilas, como los pinos, la variabilidad es más reducida, pues colonizan espacios vacíos y sólo adquieren la condición de permanentes en terrenos rústicos, donde la pobreza de suelo no permite medrar con éxito a encinas y robles, pudiendo, entonces, las coníferas superarlas por su mayor crecimiento.

A medio plazo, la sensibilidad de las especies forestales dependerá de su capacidad de dispersión y de la existencia de variabilidad genética en el seno de sus poblaciones. El hombre las ha eliminado o ha fragmentado su área de distribución y degradado su hábitat. La posible velocidad de respuesta se ha reducido, pues los terrenos más aptos están destinados a un uso agrícola y son más extensos los propicios a las especies pioneras. En habitats secos, abiertos y contrastados, los valores extremos del clima se manifiestan con mayor rigor y se dispersan con más facilidad las especies diseminadas por el viento. Especies con fructificaciones frecuentes facilitan su coincidencia con años adecuados para el establecimiento del regenerado; pero una mayor longevidad permite la aparición de eventos favorables en las especies veceras.

A igualdad de otras causas, la sensibilidad al clima actual está relacionada con el efectivo demográfico de las poblaciones, también con la existencia de eventos reproductivos recientes de origen sexual y que han sido sometidos a la presión selectiva del medio. Procesos que favorecen la diversidad genética, en particular, en los caracteres afectados por el cambio climático, como puede ser el sobrecalentamiento foliar, al que los pinos son menos vulnerables que las especies de hoja ancha, por tener sus hojas aciculares y enfriarse con mayor eficacia. Se asume que los lugares donde aparecen más de una especie se debe a una diversidad espacial y a la fluctuación temporal de las variables climáticas. Esta situación favorece la ocupación de los nichos existentes por poblaciones de elevada plasticidad y diversidad intraespecífica. La competencia en el ecotono entre estirpes de distinta significación ecológica es responsable de valores de diversidad más elevados, si se compararan con los poseídos en territorios de mayor homogeneidad.

Otro aspecto a considerar, positivo y que caracteriza el último medio siglo, son las repoblaciones forestales y el abandono de las prácticas agropastorales tradicionales, extensivas y marginales. El bosque ha recuperado superficies importantes, lo que permite que se manifieste gran parte del potencial adaptativo de sus especies por el incremento de sus efectivos demográficos.

9.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

9.3.1. Plagas y enfermedades forestales

El impacto previsible del cambio climático tiene una especial incidencia en los ecosistemas forestales, tanto directamente como a través de los diversos elementos que forman este universo, y entre ellos las plagas y enfermedades pueden llegar a jugar un papel relevante en

la fragmentación de áreas forestales, la rarificación de especies y la simplificación de la biodiversidad inherente a estos espacios, coadyuvando en casos extremos a la desaparición de la vegetación. Cambio, simplificación y riesgo de desaparición son consecuencias previsibles a corto y medio plazo.

La presencia de plagas y enfermedades forestales está indisolublemente asociada a los ecosistemas forestales. Como un elemento más de la red trófica contribuye, actuando de forma endémica o epidémica, al rejuvenecimiento y a la dinámica de la vegetación existente. Puntualmente, son elementos clave en la sucesión de formaciones vegetales y pueden ser utilizadas como un indicador de la variabilidad climática: la poiquilothermia inherente a la mayoría de los artrópodos los convierte en bioindicadores del clima y sus variaciones. Por tanto la importancia de las plagas y enfermedades ante un escenario de cambio climático debe conceptuarse bajo dos enfoques radicalmente diferentes:

- su presencia o ausencia como indicadores de alerta temprana de variaciones climáticas en el medio
- el impacto asociado al daño que provocan, elemento que acelera la ruptura del equilibrio planta-sistema ambiental y a menudo enmascara otros agentes precursores o inductores del desequilibrio (en este caso la variación climática).

El incremento de las temperaturas, y el consiguiente alargamiento de condiciones óptimas para el desarrollo de plagas y enfermedades, tienen como consecuencia un mayor y más duradero impacto sobre la vegetación de la que se alimentan. Por ejemplo: los perforadores de coníferas, *Ips acuminatus* e *Ips sexdentatus*, pueden llegar a completar más de dos generaciones en el año, si el movimiento de imagos se puede adelantar un mes por la bonanza térmica y alargarse durante el otoño; defoliadores, como *Diprion pini*, pueden desarrollar dos ciclos completos de forma habitual, o la procesionaria del pino, *Thaumetopoea pityocampa*, incrementa el área susceptible de ser colonizada, al poder subir en altitud ante inviernos más benignos y colonizar de forma natural pinares de pino silvestre hasta ahora libres de su impacto.

En todos estos casos, los insectos no son sino meros indicadores de las condiciones climáticas, y su impacto enmascara el papel jugado por estos agentes precursores. Junto a esto, los vegetales, sometidos a un mayor estrés hídrico o térmico, ven afectada su capacidad de resistencia ante su ataque.

Pero sin duda el mayor peligro lo constituyen las plagas y enfermedades exógenas al medio, los denominados *alien species* u organismos de cuarentena. La combinación de la introducción de estas especies, fruto indeseado del comercio internacional, frente a unos hospedantes desprovistos de mecanismos de atenuación del impacto o adaptación, y una climatología óptima para el desarrollo del nuevo patógeno, tiene como consecuencia el desarrollo exponencial de daños ante los cuales la vegetación no tiene apenas defensa. El desarrollo de *Lymantria dispar* en el continente norteamericano, la presencia de escolítidos y otros perforadores alóctonos en cualquier sistema forestal, o el desarrollo de síndromes como la *Seca* en el sudoeste europeo o el *Sudden oak death* en Norteamérica, donde interaccionan hongos como *Phytophthora*, *Bothryosphaeria*, bacterias como *Brennia*, escolítidos y el impacto de continuados déficits hídricos y olas de calor que impiden la recuperación de las reservas hídricas del suelo, plantean un panorama que en el mejor de los casos pasa por la sustitución de unas especies forestales por otras mejor adaptadas a las nuevas condiciones, o en el más pesimista, por la progresiva fragmentación y desaparición de algunas especies forestales. La preocupante situación de *Abies alba* en algunas zonas del Pirineo o de *Quercus suber* en el cuadrante sur-oeste peninsular pueden ser un indicador de este complejo proceso.

9.3.2. Fenología foliar: La vida media de las hojas de los perennifolios se reducirá en el futuro

La renovación foliar, que se puede representar por la vida media de las hojas, está muy ligada a la temperatura (Aussenac y Vallette 1982, Mohren y Kramer 1997). Se ha observado, en el caso de árboles de hoja perenne, como es el caso de la encina y los pinos, cómo un aumento de la temperatura puede acelerar su dinámica foliar disminuyendo la duración de las hojas en las copas, lo que se acelera aún más en el caso de condiciones de sequía. La vida media de las hojas de encina es de 2.8 años en el Montseny, donde la temperatura media es de 10° C y llueven 700 mm anuales y de 1.7 años en Sevilla, donde la temperatura media es de 18.8° C y llueven 535 mm anuales (Gracia *et al.* 2001). Estas observaciones también pueden ser válidas para las raíces finas que, en promedio duran poco más de 100 días en el encinar de Prades y que, en condiciones de sequía desaparecen (López *et al.* 1997, 1998, 2000, 2001a, 2001b). Por tanto, ambas estructuras requieren más carbono móvil de reserva para hacer frente a su renovación. Si el cambio climático apunta hacia un incremento de las temperaturas, se deduce que la renovación foliar y de las raíces finas se verá acelerada. Por otro lado, en el caso de los árboles que pierden la hoja en invierno (como hayas y robles), la duración de las hojas se alarga: adelantan el momento de la brotación y retrasan el momento de la caída lo que se traduce en un periodo vegetativo más largo y por tanto mayor periodo de producción. Ahora bien, si estas especies han de afrontar periodos de sequía estival más acentuados por el cambio climático, pueden pasarlo mal (McClougherty *et al.* 1982, 1984). No hay que olvidar que las hojas de un caducifolio son, en general, menos esclerofilas y más sensibles a las pérdidas de agua que las de un perennifolio de hoja dura, como la encina, y que, por lo tanto, podrán resistir peor las pérdidas de agua ante un episodio prolongado de estrés hídrico.

El impacto del cambio climático sobre la duración de la hoja, y sus efectos fisiológicos derivados se ha evaluado utilizando los datos de 147 parcelas de especies perennifolias procedentes del Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (Gracia *et al.* 1992, 2000). El valor medio de la variable para las 147 parcelas analizadas resulta ser de 2.6 años con la mayor parte de los valores comprendidos entre 2 y 3 años y sólo en algunos enclaves, todos ellos en zonas de montaña ya sea en los Pirineos, en los Puertos de Beceite o en el Montseny, se dan valores superiores a los tres años. En el año 2040, la distribución prevista en los resultados de las simulaciones cambia notablemente, con un valor medio resultante de 1.9 años, lo que representa una reducción del 27 por ciento de la vida media de las hojas. Esta reducción de la vida de las hojas se traduce en un aumento de la producción de hojarasca, que pasa de los 205 g de C m⁻²·año⁻¹ actuales a valores de 377 g de C m⁻²·año⁻¹ en el año 2040. Este aumento de casi el 80 por ciento de la materia orgánica que llega al suelo tiene su repercusión en las tasas de respiración. Como respiración total entendemos aquí la suma de la respiración autotrófica de los árboles (la respiración de mantenimiento más la respiración de crecimiento invertida en la formación de nuevos tejidos del árbol) más la respiración heterotrófica procedente principalmente de la descomposición de materia orgánica del suelo. La cantidad de carbono devuelto anualmente a la atmósfera por los bosques de Cataluña es, en promedio, de 1462 g de C m⁻²·año⁻¹ y este valor aumenta hasta 2307 g de C m⁻²·año⁻¹ en el año 2040, lo que supone un aumento del 70 por ciento respecto a los valores actuales.

9.3.3. Distribución de reservas: El mayor consumo de Carbohidratos móviles incrementará la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales

En las encinas, la formación de los nuevos rebrotes se produce gracias a la movilización de una considerable cantidad de carbohidratos de reserva almacenados en las estructuras subterráneas (Breda *et al.* 1995). El almidón representa más del 95 por ciento de carbono de reserva. La figura 9.2 muestra el contenido de almidón en la corteza y en la madera de las estructuras subterráneas.

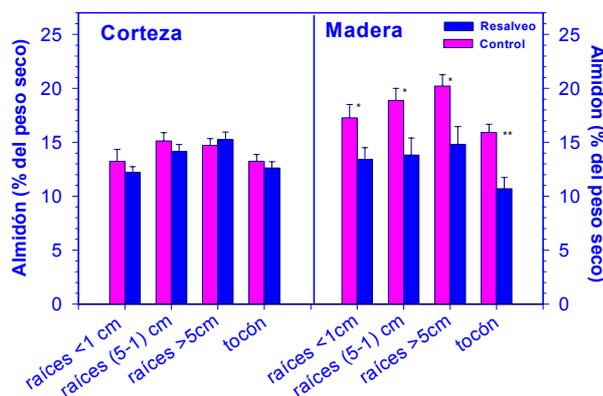


Fig. 9.2. Porcentaje de almidón en diferentes fracciones del sistema radical de las encinas de las parcelas control y resalveadas medido un año después de efectuado el resalveo. El porcentaje de almidón en la madera de las parcelas resalveadas es un cinco por ciento inferior al de las parcelas control. La diferencia se debe al almidón movilizado tras el resalveo para recuperar la estructura de las copas y formar los nuevos rebrotes. Este porcentaje representa, en términos absolutos una cantidad que ronda las 10 toneladas de carbono que se movilizan tras el resalveo. Este resultado pone de manifiesto la importancia de las reservas de carbono móvil en los árboles.

El almidón representa aproximadamente el 15 por ciento de la biomasa del tocón y de las raíces y no experimenta cambios significativos tras el resalveo (Gracia *et al.* 1994, 1996, 1999a). En los tejidos leñosos el almidón supone entre un 15 y un 20 por ciento de la biomasa subterránea, lo que equivale a 21.2 Mg/ha. De esta cantidad acumulada en la biomasa subterránea, un año después de producirse el resalveo se habían movilizado, en el tratamiento al que hace referencia la figura 9.2, 6.1 Mg/ha, que supone cerca del 30 por ciento de las reservas acumuladas en las raíces.

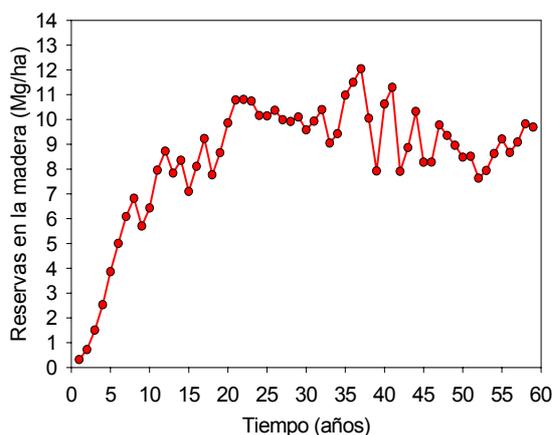


Fig. 9.3. La movilización de almidón tras el resalveo o tras un incendio o cualquier otra perturbación, debe de ser compensada con el carbono fijado en la fotosíntesis. Cuando se movilizan cantidades importantes, como en el experimento de resalveo que se comenta, el tiempo que tarda el árbol en reponer la reserva puede ser considerable. Durante todo ese tiempo la planta puede resultar más sensible a otras perturbaciones a las que no pueda hacer frente por la falta de reservas de carbono móvil. La recuperación de las diez toneladas movilizadas tras el resalveo, requiere un tiempo aproximado de 20 a 25 años, como muestra la gráfica.

En la movilización de esta considerable cantidad de carbono de reserva descansa la capacidad de la encina para regenerar las estructuras que se han visto alteradas por una perturbación. Sin embargo, este consumo de la reserva deja temporalmente a la planta en condiciones de cierta precariedad, al impedirle hacer frente a perturbaciones que se presenten con una recurrencia demasiado elevada. Por ello resulta pertinente preguntarse acerca del tiempo que requiere la planta para volver a situar sus reservas a los niveles anteriores al resalveo. La figura 9.3 muestra la evolución del almidón de reserva en la madera de la biomasa subterránea. De la consideración de estos resultados se desprende que el tiempo necesario para acumular los 6.1 Mg/ha movilizados en el resalveo es de unos 20 años. Este resultado coincide con el tiempo que tradicionalmente ha mediado entre dos carboneos sucesivos en el aprovechamiento tradicional de estos encinares, lo que vendría a justificar en términos de la fisiología del árbol una cierta optimización empírica de la explotación tradicional de estos bosques. El aumento de la sequía estival en los ambientes de tipo mediterráneo predicho por los modelos de cambio climático contribuirá a aumentar el consumo de carbohidratos de reserva incrementando a su vez la vulnerabilidad de muchas especies forestales a los episodios adversos (Aussenac y Granier 1988, Ball *et al.* 1987, Brix y Mitchell 1986, Jarvis 1998).

9.3.4. Régimen hídrico del suelo: La Reserva hídrica de los suelos forestales se reducirá dificultando la superación de los episodios de sequía estival

El contenido de agua en un suelo forestal varía ampliamente desde valores muy próximos a cero durante la sequía estival hasta valores máximos durante periodos de pluviosidad más o menos abundante y continua. Según los análisis llevados a cabo sobre las 147 parcelas forestales a las que hemos hecho referencia anteriormente, la reserva hídrica del suelo en los bosques de Cataluña (promediada a lo largo del año) resulta ser de 32 mm. Las simulaciones muestran que el incremento de temperatura y la mayor demanda evaporativa de la atmósfera hacia el año 2040 reducirán este valor promedio anual de la reserva a 24 mm, lo que representa una disminución del 25 por ciento del contenido actual de agua en los suelos forestales (Gracia *et al.* 2001, 2002).

En aquellos enclaves en los que el bosque dispone de agua suficiente para compensar la mayor demanda hídrica asociada al aumento de temperatura y evapotranspiración potencial, se puede prever un aumento de la producción forestal. Ahora bien, en los lugares con déficit hídrico, que son frecuentes entre los ecosistemas forestales de España, se pueden esperar cambios importantes que van desde la reducción de la densidad de árboles hasta cambios en la distribución de las especies. En casos extremos, áreas actualmente ocupadas por bosques pueden ser sustituidas por matorral y áreas actualmente ocupadas por matorral pueden quedar expuestas a importantes impactos erosivos.

De ahí que resulte importante tratar de anticipar los cambios a los que estamos expuestos y el posible papel de la gestión adaptativa para tratar de reconducir en lo posible, y en todo caso, optimizar la respuesta de nuestros bosques al cambio climático.

9.3.5. Ciclo del carbono: Nuestros bosques se transformarán en emisores netos de carbono en la segunda mitad del presente siglo

Los mapas de la figura 9.4, que representa la producción neta de los ecosistemas forestales europeos y los mapas de las figuras 9.5 y 9.6, referidos a la Península Ibérica, representan un intento de explorar el efecto del cambio climático sobre algunas variables consideradas especialmente sensibles para el ciclo del carbono. Para ello se ha utilizado el modelo GOTILWA+ (Gracia *et al.* 1997, 1999b, 2001, Kramer *et al.* 2002, Mohren 1999, Mohren *et al.* 1997, 2000), habiéndose referenciado los datos a un píxel de 10 minutos x 10 minutos. El clima

de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (Carter *et al.* 2000, IPCC 2001 Watson 2001). Los resultados de la figura 9.5 representan la producción neta del ecosistema en los bosques europeos en los años 1990, 2020, 2050 y 2080. Los resultados son elocuentes y coinciden, a grandes rasgos, con los patrones que predicen otros modelos (Aubinet *et al.* 1998, Ceulemans y Mousseau 1994, Epron y Dreyer 1993a, 1993b, Medlyn y Dewar 1996, Medlyn y Jarvis 1997). A pesar de que, en la Península Ibérica, los bosques pueden aumentar transitoriamente su efecto sumidero durante algunas décadas, hacia la segunda mitad del presente siglo invertirán su papel de sumideros para transformarse en emisores netos de carbono a la atmósfera. En cuanto a la reserva de agua en el suelo, los resultados de la figura 9.6 ponen de manifiesto que, en la Península Ibérica, la reserva de agua en el suelo durante los meses de verano, disminuye progresivamente. La falta de agua en el suelo en la época estival supone un grave riesgo para la supervivencia de algunos bosques.

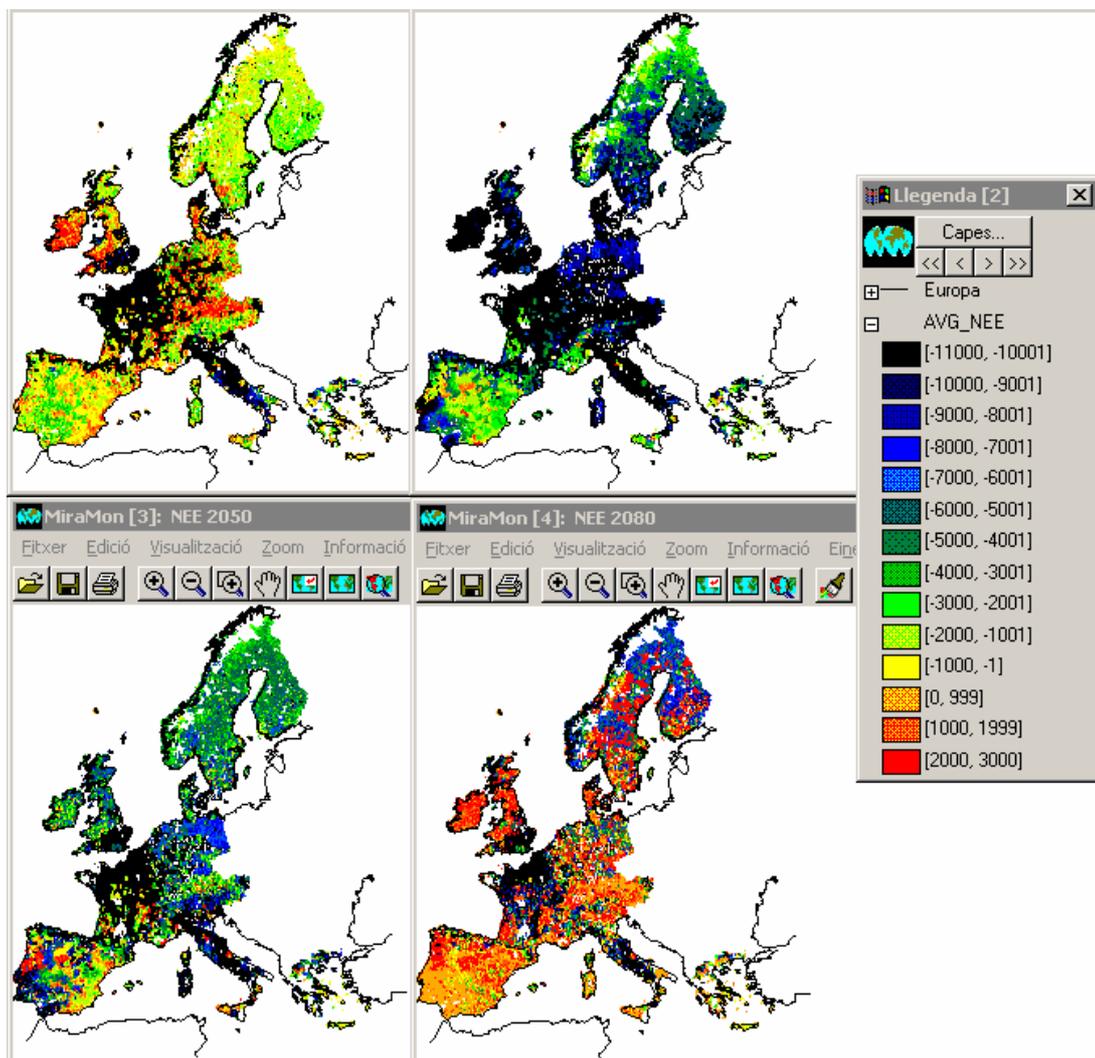


Fig. 9.4. Estimación de la Producción neta del ecosistema en los bosques europeos. Los mapas representan la situación en los años 1990, 2020, 2050 y 2080 según las simulaciones del modelo GOTILWA+ para el crecimiento de los bosques europeos bajo diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático definidos por el IPCC. Los mapas de la figura se han obtenido utilizando un pixel de 10 minutos x 10 minutos. El clima de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (IPCC 2001). Los resultados ponen de manifiesto que, en la Península Ibérica, los bosques pueden aumentar transitoriamente su efecto sumidero durante algunas décadas pero hacia la segunda mitad del presente siglo los bosques de la Península invertirán su papel de sumideros para transformarse en emisores netos de carbono a la atmósfera.

9.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Las poblaciones con su límite meridional en las partes altas de los sistemas montañosos serán las más afectadas. En particular si coexisten con especies más termófilas, o si son poseedoras de una variabilidad genética reducida. En general las denominadas procedencias de área restringida, recogidas por Martín *et al.* (1998), tanto por situarse fuera del área principal de distribución, como por los problemas derivados de la deriva genética, o de su susceptibilidad a perturbaciones naturales o debidos a la intervención humana, son más vulnerables. Las amenazas serán determinantes si van ligadas a cambios del régimen de precipitaciones.

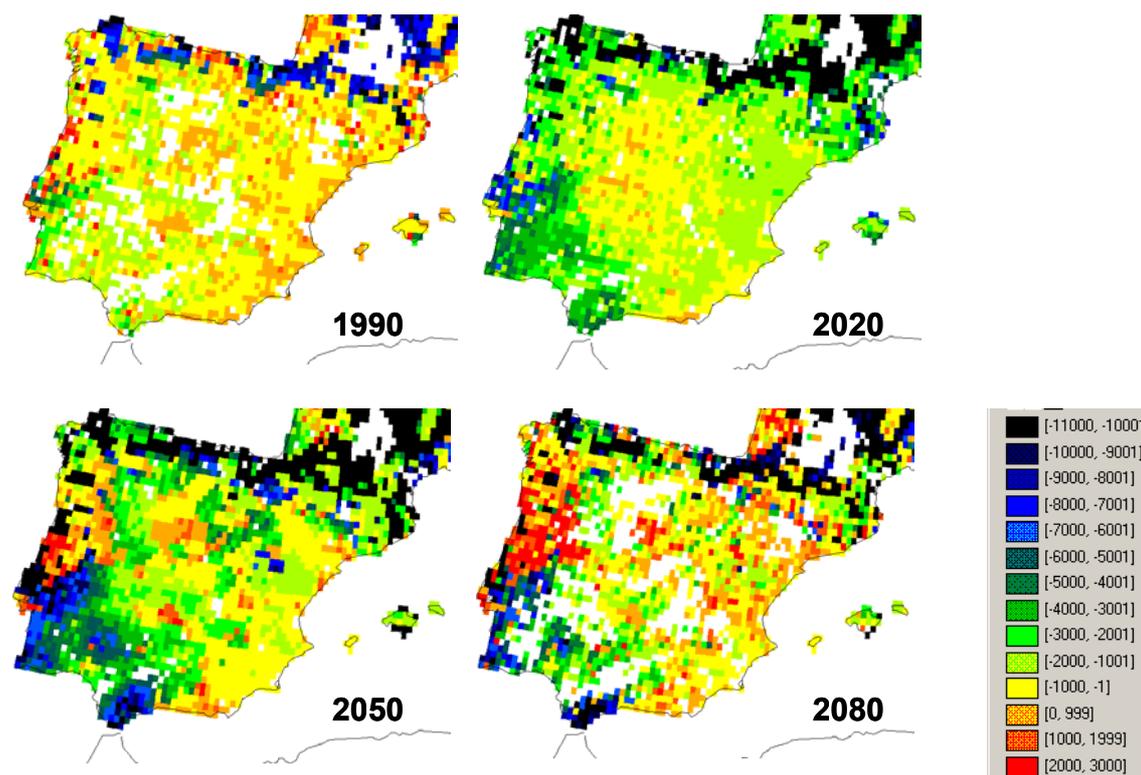


Fig. 9.5. Estimación de Producción neta del ecosistema en los bosques de la Península Ibérica. Los mapas representan la situación en los años 1990, 2020, 2050 y 2080. En el proyecto ATEAM se está utilizando el modelo GOTILWA+ para simular el crecimiento de los bosques europeos bajo diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático definidos por el IPCC. Los mapas de la figura se han obtenido utilizando un pixel de 10 minutos x 10 minutos. El clima de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (IPCC, 2001). Ver figura 9.11.

En la Península Ibérica el espacio forestal, no necesariamente arbolado, aparece como un continuo que recorre todos los sistemas orográficos, en general conectados entre ellos por alineaciones de menor entidad. La posibilidad de su funcionamiento como corredores es aceptable en un buen número de situaciones para las especies rústicas, como las coníferas del género *Pinus*. Un incremento de las temperaturas y la irregularidad de lluvias harán menos frecuentes situaciones favorables para el establecimiento y consolidación de la vegetación arbórea. Una menor capacidad de acumular reservas va ligada también a una mayor vulnerabilidad a las perturbaciones (fuegos, plagas, enfermedades), al no poder superar procesos renovadores.

El debilitamiento por falta de adecuación a las nuevas condiciones climáticas ha de dar lugar a una mayor disponibilidad trófica a plagas y enfermedades, que cumplirán su papel de

iniciadores del ciclo de descomposición de la materia orgánica. Si el calentamiento global va ligado a un incremento de la aridez es de esperar una mayor proliferación de insectos, por la mayor sensibilidad de hongos y otros microorganismos a los periodos secos. La falta de vigor de las poblaciones vegetales actuales en un área extensa permitiría incrementos destacados de las poblaciones de patógenos. Las perturbaciones serán aceleradores del cambio de las poblaciones actuales, que serán renovadas por un regenerado más adaptado a la nueva situación o sustituidas por otras especies más termófilas y que soportan mejor la aridez. Tal es el caso de la sustitución de *Pinus pinaster* por *Pinus halepensis* en las montañas del interior valenciano, o la del alcornoque y el quejigo por la encina.

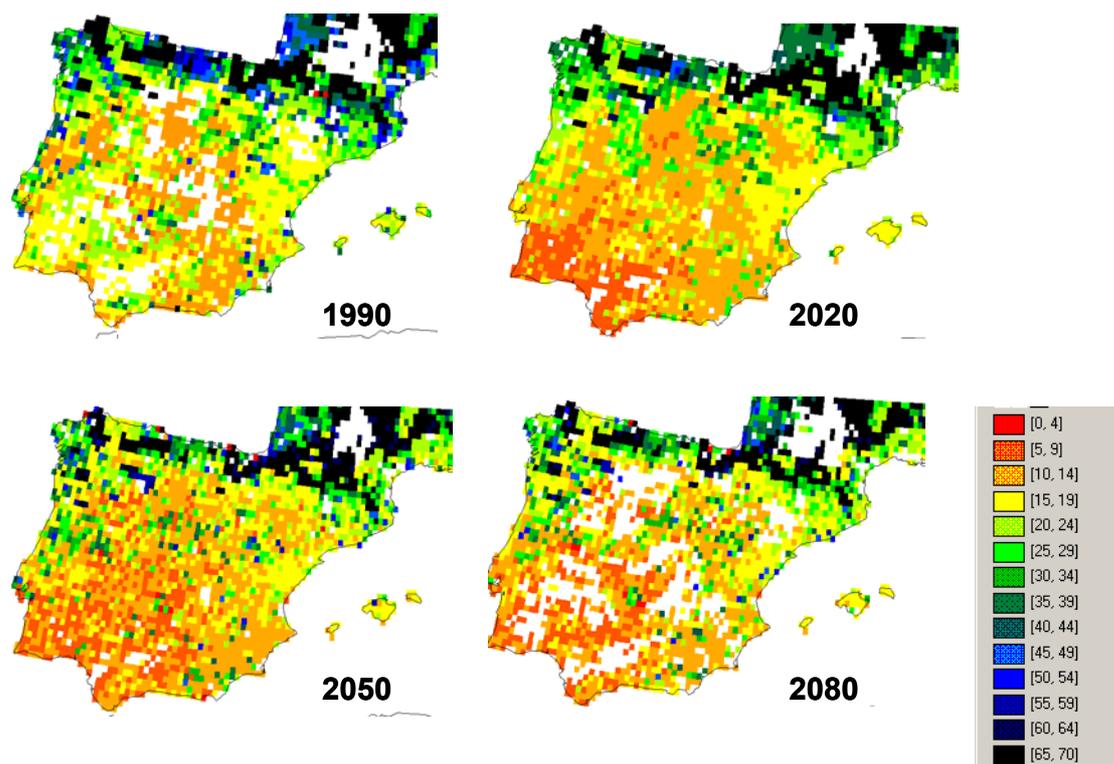


Fig. 9.6. Estimación de la reserva media de agua en el suelo durante los meses estivales en los bosques de la península Ibérica. Los mapas representan la situación en los años 1990, 2020, 2050 y 2080. En el proyecto ATEAM se está utilizando el modelo GOTILWA+ para simular el crecimiento de los bosques europeos bajo diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático definidos por el IPCC. Los mapas de la figura se han obtenido utilizando un pixel de 10 minutos x 10 minutos. El clima de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (IPCC, 2001). Los resultados ponen de manifiesto que, en la Península Ibérica, la reserva de agua en el suelo disminuye progresivamente. La falta de agua en el suelo durante la época estival supone un grave riesgo para la supervivencia de algunos bosques.

9.4.1. Zonas de cumbres

Si el área de distribución abarca el último tramo de los sistemas orográficos, sin que exista límite natural del bosque —como en la mayoría de las sierras levantinas o las de la mitad sur peninsular, a excepción de Sierra Nevada— no es posible el ascenso altitudinal tras un incremento de las temperaturas. Las amenazas se ciernen sobre las escasas manifestaciones de *Abies pinsapo*. También se verán afectadas las poblaciones de *Pinus sylvestris* en la Sierra de Baza, las de *Pinus nigra* en las Sierras Béticas o las de *Pinus uncinata* en la Sierra de Gúdar. En todos estos casos, las poblaciones señaladas poseen efectivos demográficos bastante reducidos, por lo que son más sensibles al cambio y están en peligro de extinción. En

particular, las andaluzas por estar asociados a una baja variabilidad genética, motivada por problemas de deriva genética asociada a la intervención humana histórica.

9.4.2. Ambientes xéricos

El calentamiento global asociado a cambios en el régimen de precipitaciones, puede suponer la desaparición de la vegetación arbolada en los territorios que están en su límite de adaptación a la sequía, dando paso a formaciones de herbáceas cuya aparición está ligada a la presencia de lluvias esporádicas. Un ejemplo con efectos económicos por ser uno de los productos no maderables más típicos del bosque mediterráneo, se encuentra en las poblaciones de *Pinus pinea* de los arenales de la Meseta Norte, pero es extensible a otras localizaciones. Este pino genera una semilla de gran tamaño dispersada por animales frente a las otras especies poseedoras de semilla alada. La variación interanual de la producción provincial de piña en Valladolid durante 40 años muestra el descenso continuado de la media móvil de los últimos 20 años figura 9.7. Esta tendencia se agudiza en los pinares con producciones de piña más reducidas, y que se convierten en incapaces de asegurar la reproducción de la especie (Gordo 2004).

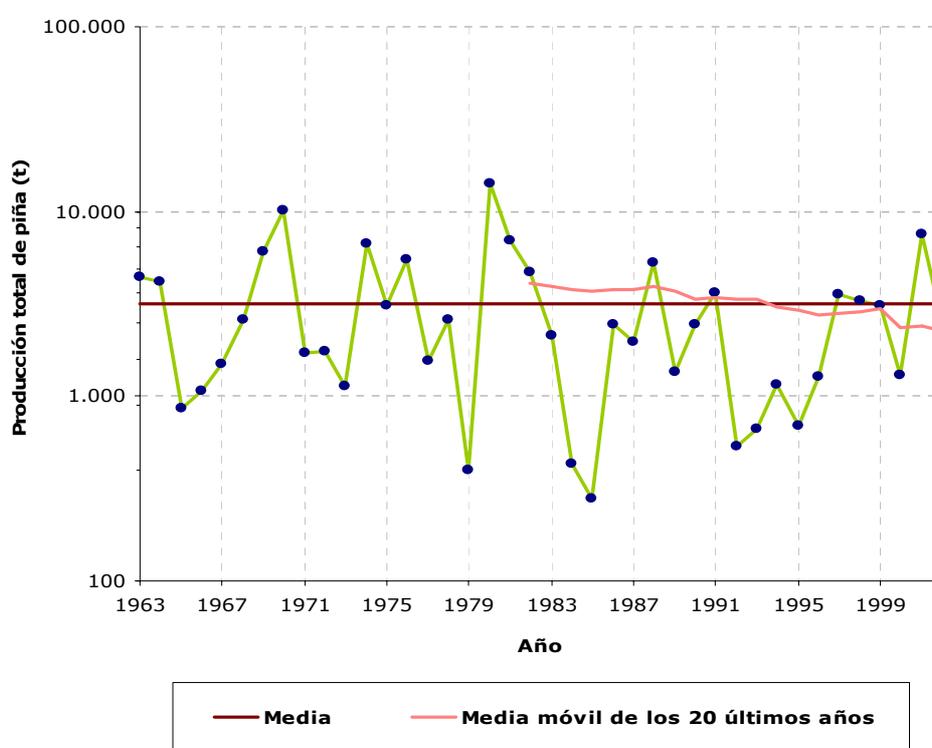


Fig. 9.7. Irregularidad de las cosechas provinciales de piña (toneladas) de *Pinus pinea* en montes públicos de la provincia de Valladolid, en la que se observa un descenso continuado de la media móvil de los últimos 20 años. Fuente: Gordo 2004.

Pese a su adaptación a las zonas más cálidas y con marcada aridez estival, la regeneración natural del pino piñonero está comprometida. Bajo las tendencias climáticas actuales figura 9.8, cada vez será más improbable coincidir una cosecha buena y unas condiciones ambientales favorables en años sucesivos para permitir el establecimiento de las plántulas y su supervivencia en sus primeras edades. Una cosecha buena satura a los predadores que actúan como dispersores y con variabilidad genética suficiente para expresar un potencial adaptativo capaz de superar las nuevas condiciones. La regresión superficial ocurrirá pese a la adaptación a medios muy pobres que exigen bosques muy abiertos. Interpretación que se deduce por ser un pino cuya copa esférica es resultado de su adaptación a condiciones de desarrollo a plena luz, sin competencia lateral por la presencia de otros árboles. Esta

morfología es resultado de la falta de vigor de los meristemos apicales del tallo y de las ramas principales.; pues este hábito de crecimiento permite maximizar el número de ejes codominantes. Sólo ramas de cierto grosor son capaces de sostener conos de 0,3 kg de peso (Mutke *et al.* 2004).

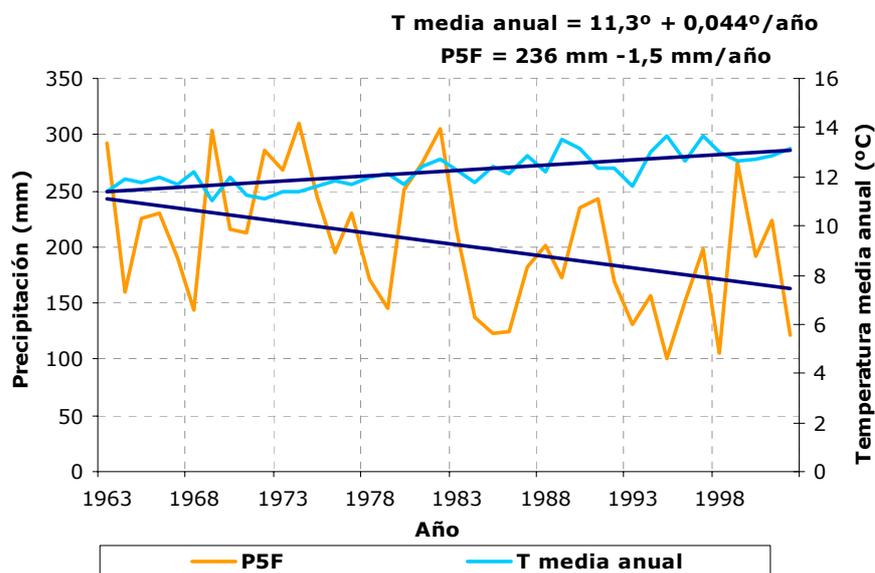


Fig. 9.8. Evolución de la temperatura media anual y de la precipitación de los cinco meses anteriores a la floración de *Pinus pinea* L en el observatorio de Valladolid. Fuente: Gordo 2004

La disponibilidad de la serie productiva en un área típica de la especie ha permitido conocer los factores que determinan la magnitud de las cosechas; estableciendo un modelo que explica el 75 % de la variación y muestra tendencias significativas hacia un clima más cálido y seco (Gordo 2004). La variable climática más determinante en la importancia de las cosechas se corresponde con la suma de las precipitaciones de enero a mayo (P5F, figura 9.8) del año en que se produce la formación de los estróbilos femeninos y su polinización. Su seguimiento, a partir de los datos del observatorio de Valladolid, muestra una tendencia que reduce la precipitación en este periodo en 15 mm cada década. Descenso relacionado con la aparición de cosechas más pequeñas, que reducen la base genética del regenerado expuesto a temperaturas estivales mayores. La especie es vulnerable en las localizaciones más áridas de su distribución actual y quedará unida a condiciones ambientales menos extremas, como los enclaves donde exista un freático que asegure un aporte hídrico que permite la constancia en el tamaño de las cosechas.

9.4.3. Bosques de ribera

Los bosques riparios constituyen uno de los sistemas más afectados por la acción humana, que los ha fragmentado de manera drástica y reducido su variabilidad —al usar la capacidad clonal de sus especies como forma de reproducción exclusiva— en detrimento de la vía sexual. La construcción de embalses, la regulación del curso de los ríos, el establecimiento de escolleras o la transformación de sus márgenes para cultivos agrícolas, o forestales como las choperas, ha fragmentado sus alineaciones y reducido a mínimos sus manifestaciones espontáneas, con la extinción de corredores ecológicos de gran singularidad. Saucedas (*Salix* spp.), alisedas (*Alnus* sp.), pobedas y alamedas (*Populus* spp.), fresnedas (*Fraxinus* spp.), olmedas (*Ulmus* spp.) y tamarizales (*Tamarix* spp.) son formaciones ligadas a la existencia de una capa freática más o menos permanente. Un aumento de las temperaturas medias irá unida a un incremento de la demanda evaporativa, lo que exigirá una mayor regularidad de la capa

freática. Los cambios en el régimen de precipitaciones incrementarán la torrencialidad de nuestros cursos de agua y los hará más irregulares. Un carácter más esporádico de la lámina de agua puede suponer el cambio de la vegetación ribereña y aumentará la vulnerabilidad de la mayoría de los freatófitos. En el caso de las olmedas el peligro de extinción por el cambio global es mayor por la aparición de la grafiosis. Enfermedad que afectó severamente al tamaño de sus poblaciones a finales del siglo pasado. La rápida difusión del hongo estuvo propiciada por la baja diversidad de la especie, tanto en nuestro territorio como en otros países europeos. Su domesticación por el uso extensivo que se hizo en el mundo romano de forma clonal (Gil *et al.* 2004), muestra la necesidad de poseer altos niveles de diversidad genética para poder responder a las perturbaciones. Es obligado tomar medidas que favorezcan la conservación dinámica de nuestras especies para asegurar el mantenimiento de su potencial adaptativo.

9.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

9.5.1. El resalveo de los montes bajos y la conversión a monte alto: un eficaz tratamiento que mejora la respuesta del monte al cambio climático

Una buena parte de las especies forestales mediterráneas son rebrotadoras y algunas, como la encina, desarrollan grandes lignotuberos en los que la biomasa subterránea se acumula mientras la aérea se quema o se corta más frecuentemente. Estas diferencias originan una preponderancia de la biomasa subterránea (más del 50 por ciento de la biomasa total) frente a la biomasa aérea (Canadell *et al.* 1997, 1999). Cuando el tratamiento silvícola de estas masas se abandona, el bosque crece muy lentamente dado que la elevada densidad de resalvos de pequeño diámetro conduce a una situación muy próxima al estancamiento (Djema *et al.* 1994, Rodà *et al.* 1999, 2003, Hilbert y Canadell 1995, Sabaté 1993, Sabaté *et al.* 1992, 1994, 1995) .



Fig. 9.9. Parcela experimental resalveada en el encinar de Prades. La reducción de la densidad de pies modifica el balance de agua y de carbono del bosque y ha permitido analizar algunos de los posibles efectos que cambios ambientales análogos inducidos por el cambio climático pueden provocar en los bosques mediterráneos. Más explicación en el texto.

En experimentos de campo llevados a cabo sobre encinares de las montañas de Prades (Tarragona) se puso de manifiesto que, en estas condiciones, la biomasa acumulada es la responsable de que, durante una parte del año, la respiración sea superior a la producción bruta dando lugar a producciones netas negativas (Albeza *et al.* 1996, Djema 1995). Los árboles superan estas condiciones utilizando para su mantenimiento una fracción del carbono móvil de reserva.

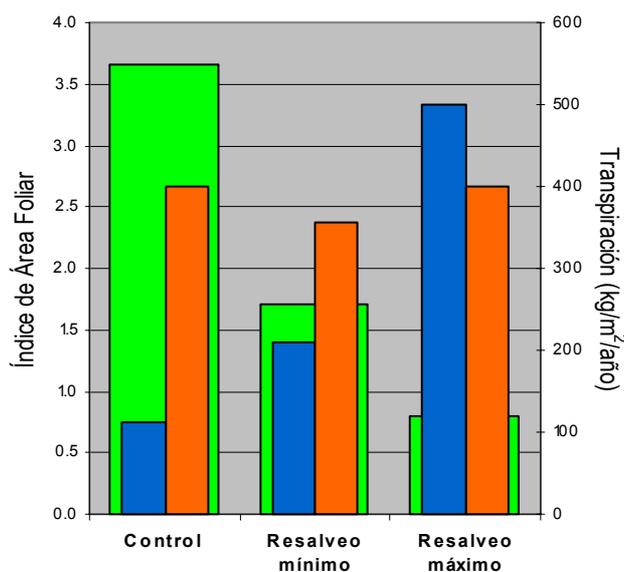


Fig. 9.10. La respuesta del encinar de Prades a diferentes intensidades de resalveo (ver figura 9.9) pone de manifiesto el papel primordial del agua en la respuesta del bosque a los cambios estructurales o ambientales y permita anticipar algunas de las respuestas que cabe esperar en el marco del cambio climático. La reducción del índice de área foliar (verde) según la intensidad del resalveo no tiene efecto sobre la tasa de transpiración referida a toda la copa (naranja, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ de suelo·año⁻¹). La reducción del índice foliar se compensa por un aumento de la tasa de transpiración por unidad de superficie foliar (azul, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ de hoja·año⁻¹). El resultado, que tiene profundas repercusiones en la fisiología de los árboles, pone de manifiesto la restricción que impone la escasez de agua al crecimiento de los bosques mediterráneos que condiciona todas las respuestas de los bosques mediterráneos al cambio climático.

Si el periodo desfavorable se prolonga, la reserva puede consumirse hasta su agotamiento provocando primero la destrucción de las raíces finas y defoliación y más tarde la muerte de los árboles. La reducción de la biomasa aérea que supone el resalveo tiene profundas consecuencias sobre los balances de agua y carbono del bosque (Tello *et al.* 1994). La reducción de la superficie foliar mejora considerablemente el estado hídrico de los pies remanentes. La transpiración medida por unidad de suelo fue, en el tratamiento experimental de Prades, de unos $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ en todas las parcelas, independientemente de la densidad de árboles, lo que significa que aumenta la tasa de transpiración de los árboles (transpiración por unidad de área foliar) en las parcelas resalveadas lo que reduce las tasas de mortalidad durante los periodos desfavorables.

9.5.2. Gestión adaptativa: cómo optimizar la respuesta de los bosques al cambio climático

El papel de la gestión en el control de la respuesta de los bosques al cambio climático se ha explorado en profundidad en el proyecto SilviStrat. Sucintamente, el proyecto adopta tres escenarios climáticos que se corresponden básicamente a las condiciones actuales y dos escenarios de cambio climático previstas por dos modelos de circulación atmosférica general (ECHAM4 y HadCM2). El crecimiento del bosque se analiza combinando dichos escenarios con un conjunto de escenarios alternativos de gestión. El objetivo es dilucidar el papel de la gestión en el marco de diferentes escenarios climáticos. Para definir los escenarios de gestión se parte en cada región del régimen de gestión que se aplica habitualmente por los gestores. A partir de esta base se aumenta y reduce en una proporción determinada el valor de dos variables: el periodo de tiempo que media entre dos intervenciones y la intensidad de las mismas. Reduciendo el intervalo de corta, se aumenta la frecuencia de los aclareos lo que

supone una mayor intervención sobre el bosque. La intensidad de la intervención se define de acuerdo con la proporción del área basal presente en el bosque en el momento del aclareo que no es cortada. Paralelamente se han analizado los efectos de entresacar los árboles mayores, menores o una combinación de diferentes clases diamétricas.

En el caso de los bosques mediterráneos se han analizado los efectos sobre los encinares de Prades (Tarragona) y Puechabon (Montpellier, Francia) y el pinar de pino albar de Montesquiú (Barcelona). Los resultados que se discuten a continuación analizan el efecto de incrementar o decrementar un 33 por ciento el intervalo de tiempo entre aclareos sucesivos. El intervalo base sobre el que se aplica la variación del 33 por ciento fue, de acuerdo con la opinión de los gestores, de 15 años en el pinar y de 20 en el encinar. Análogamente la intensidad de la corta en cada ocasión, expresada como el porcentaje de área basal de la masa que se extrae, se incrementó y decrementó en un valor del 30 por ciento respecto de las prácticas habituales que son, así mismo específicas para cada especie forestal.

Tabla 9.5. Carbono en la biomasa aérea (CAB, Mg/ha), carbono en el suelo (CS, Mg/ha), madera extraída en un periodo de 100 años (Y, Mg/ha) y fracción del agua disponible no utilizada por el bosque (WY, mm/year) en el encinar de PRADES. Las tablas recogen los resultados de cada variable bajo los tres escenarios climáticos explorados en el proyecto SilviStrat en las nueve combinaciones de gestión que se definen en la matriz de gestión. Ref representa las prácticas de gestión actuales, ∇ and Δ representan el decremento y el incremento respectivamente de los componentes de gestión (intervalo entre entresacas e intensidad del aclareo) que se discuten en el texto.

Intensidad de aclareo

		CRU			ECHAM			HadCM2			
		∇	ref	Δ	∇	ref	Δ	∇	ref	Δ	
Intervalo entre cortas	CAB	∇	34.9	31.0	27.3	39.3	35.3	31.9	38.0	36.0	31.1
		ref	35.5	33.2	29.1	40.7	35.6	32.5	41.7	38.5	34.8
		Δ	35.2	32.8	30.1	39.5	38.4	33.7	42.7	38.9	35.6
	CS	∇	74.2	73.4	73.4	78.9	79.2	77.7	89.2	87.8	81.2
		ref	74.0	73.6	71.5	78.8	81.6	81.6	87.8	86.3	86.9
		Δ	74.7	75.1	74.7	80.0	77.9	79.4	88.4	90.5	90.0
	Y	∇	76.6	102.8	124.4	105.1	126.1	172.6	137.4	149.4	200.4
		ref	71.6	86.9	109.9	92.6	106.6	110.8	118.5	48.3	143.6
		Δ	62.6	82.1	93.8	79.6	103.4	95.3	120.2	100.6	116.0
WY	∇	170.2	171.5	172.7	149.4	149.6	149.2	182.7	184.0	188.9	
	ref	169.8	170.9	173.9	149.0	149.2	148.8	183.0	184.6	183.6	
	Δ	169.7	171.3	170.7	148.4	149.7	148.1	183.1	182.2	182.6	

Por lo que concierne a la gestión, se pone de manifiesto que el efecto de retirar más o menos área basal es mucho más importante que el efecto que se deriva de modificar los intervalos entre cortas sucesivas. En los escenarios climáticos futuros (ECHAM4 y HadCM2), aumenta la temperatura y la precipitación media se mantiene aproximadamente constante mientras incrementa su variabilidad. En estos escenarios, los bosques boreales y templados presentan una respuesta positiva: aumenta el carbono acumulado en el suelo, si bien muy ligeramente, del mismo modo que aumenta la producción anual y, por tanto, el carbono acumulado en la biomasa. Sin embargo, en las condiciones mediterráneas, en las que el agua resulta el factor limitante más importante, se producen los efectos contrarios. Del análisis de los resultados se desprende que la respuesta de los bosques al incremento de temperatura depende estrechamente del agua disponible. En aquellas condiciones en las que la evapotranspiración potencial es menor que la precipitación, el incremento de temperatura origina un aumento de la tasa de crecimiento y del carbono almacenado en el sistema. Por el contrario, en aquellos

bosques en los que la evapotranspiración potencial supera a la precipitación, el aumento de temperatura tiende a reducir la cantidad de carbono almacenada en los diferentes compartimentos del bosque.

Tabla 9.6. Carbono en la biomasa aérea (CAB, Mg/ha), carbono en el suelo (CS, Mg/ha), madera extraída en un periodo de 100 años (Y, Mg/ha) y fracción del agua disponible no utilizada por el bosque (WY, mm/year) en el pinar de *Pinus sylvestris* de Montesquiu (Barcelona). Las tablas recogen los resultados de cada variable bajo los tres escenarios climáticos explorados en el proyecto SilviStrat en las nueve combinaciones de gestión que se definen en la matriz de gestión. Ref representa las prácticas de gestión actuales, ∇ and Δ representan el decremento y el incremento respectivamente de los componentes de gestión (intervalo entre entresacas e intensidad del aclareo) que se discuten en el texto.

Intensidad de aclareo

		CRU			ECHAM			HadCM2			
		∇	ref	Δ	∇	ref	Δ	∇	ref	Δ	
Intervalo entre cortas	CAB	∇	64.4	60.1	47.8	51.2	48.8	42.4	60.8	58.6	48.1
		ref	67.9	61.4	51.0	54.3	51.5	43.3	64.7	58.5	50.1
		Δ	70.0	63.8	55.3	57.6	52.9	51.5	65.3	61.5	53.1
	CS	∇	47.7	46.7	46.3	43.4	43.0	41.7	51.3	50.3	48.4
		ref	47.4	47.2	46.3	42.9	42.5	41.5	50.6	50.0	48.4
		Δ	47.6	46.9	46.1	42.5	43.2	41.0	51.2	51.1	49.4
	Y	∇	188.7	244.7	298.9	10.3	69.2	145.5	112.2	159.0	342.8
		ref	158.7	192.7	268.3	0.0	22.0	142.4	75.9	166.4	248.1
		Δ	105.1	191.6	237.6	0.4	0.0	121.4	36.7	11.7	115.9
WY	∇	449.3	450.8	454.9	348.8	349.9	352.6	364.3	366.7	369.2	
	ref	448.1	449.8	453.7	350.5	351.6	354.2	365.8	366.4	369.8	
	Δ	447.3	450.9	453.0	350.4	349.8	352.8	365.9	366.9	370.5	

Las figuras 9.11 y 9.12 resumen los resultados obtenidos al analizar 7 especies diferentes en 17 localidades de toda Europa. El crecimiento se ha simulado bajo los tres escenarios climáticos y aplicando todos los casos de la matriz de gestión ya descritos. La gestión de base corresponde a la gestión actual de modo que, en cada caso particular, se reproduce la práctica habitual. Al aumentar la intensidad de corta y/o decrecer el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (1 a 4) y, por el contrario, decrementando la intensidad de corta y/o incrementando el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (6 a 9). Un análisis conjunto de la capacidad de las técnicas de gestión forestal para modificar la respuesta de los bosques europeos al cambio climático, llevada a cabo en el marco del proyecto SilviStrat, pone de manifiesto que las diferentes alternativas de gestión apenas tienen efecto cuando se aplican a bosques europeos que se localizan en condiciones de crecimiento restrictivas, representadas por las localidades mediterráneas en un extremo, limitadas por falta de agua, y los bosques boreales, limitados por las bajas temperaturas (figura 9.12).

9.5.3. Otras opciones adaptativas

Que la madera sea prácticamente en un 50 por ciento de su composición carbono, evidencia la facilidad de su secuestro mediante su acumulación en los árboles. Entre las técnicas que lo permiten se encuentran las que mejoran la productividad de la estación, como puede ser el control de la capa freática, y su recuperación cuando haya descendido por un uso agronómico. El alargamiento de los turnos de aprovechamiento, en particular de las especies con rotaciones cortas como chopos, eucaliptos o pino radiata, permitiría lograr incrementos destacados por

sus periodos muy reducidos que contrastan con los de las especies ibéricas; pues estos árboles suponen el mayor porcentaje de la madera que se corta anualmente. Una actuación similar sería el establecimiento de reservas forestales con las coníferas ibéricas de montaña como *Pinus sylvestris*, en la actualidad con edades de corta muy inferiores en relación a su longevidad natural. Bien al contrario, las mismas alternativas de gestión aplicadas a los bosques centroeuropeos se traducen en respuestas mucho más diferenciadas.

Mediante el empleo de la mejora genética se debe promocionar en las especies más productivas el uso de material forestal de reproducción selecto, como pueden ser genotipos, procedencias o especies más eficaces en la formación de madera. Asimismo, en otras especies arbóreas, se debería considerar la utilización de un material con sus patrones de almacenamiento de carbono alterados hacia una localización en los sistemas radicales; por ejemplo, el uso de *Quercus pyrenaica*, dada su capacidad de rebrotar de raíz, supone una adaptación que permite incrementar biomasa subterránea.

La recuperación de la gran extensión de terrenos degradados y desarbolados, mediante la repoblación forestal, constituye una actuación prioritaria. Para ello, se han de elegir las especies y procedencias adecuadas a los objetivos de la repoblación. Frente a la "matorralización" de los sistemas forestales, la implantación de árboles rústicos y heliófilos permite una estratificación horizontal, que alcanza las mayores acumulaciones de biomasa. La mejora respecto de la situación de partida exige la aplicación posterior de técnicas selvícolas que controlen la densidad del rodal y se prevengan perturbaciones catastróficas como incendios forestales, plagas y enfermedades. Actuaciones extensibles a las masas ya creadas.

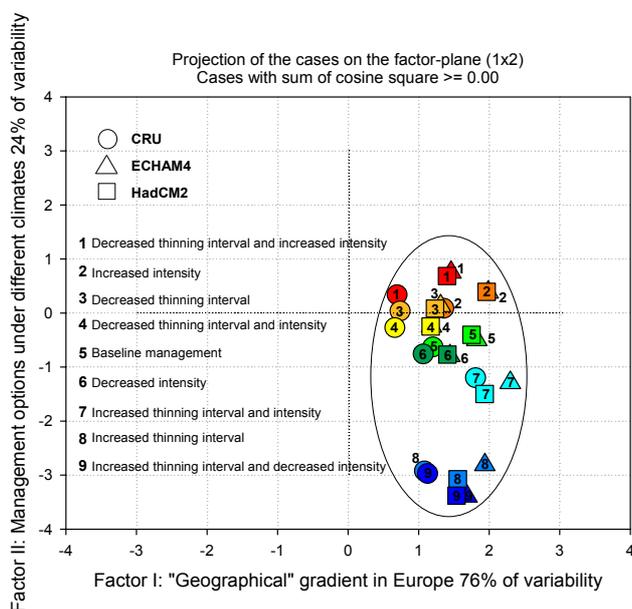


Fig. 9.11. Ejemplo de un conjunto completo de simulaciones del hayedo de Fabrikschleichach en Alemania. La gestión de base corresponde a la gestión actual de modo que, en cada caso particular, se reproduce la práctica habitual. Al aumentar la intensidad de corta y/o decrecer el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (1 a 4) y, por el contrario, decreyendo la intensidad de corta y/o incrementando el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (6 a 9). Estas estrategias de gestión se exploran bajo tres escenarios climáticos diferentes: CRU, ECHAM4 y HadCM2.

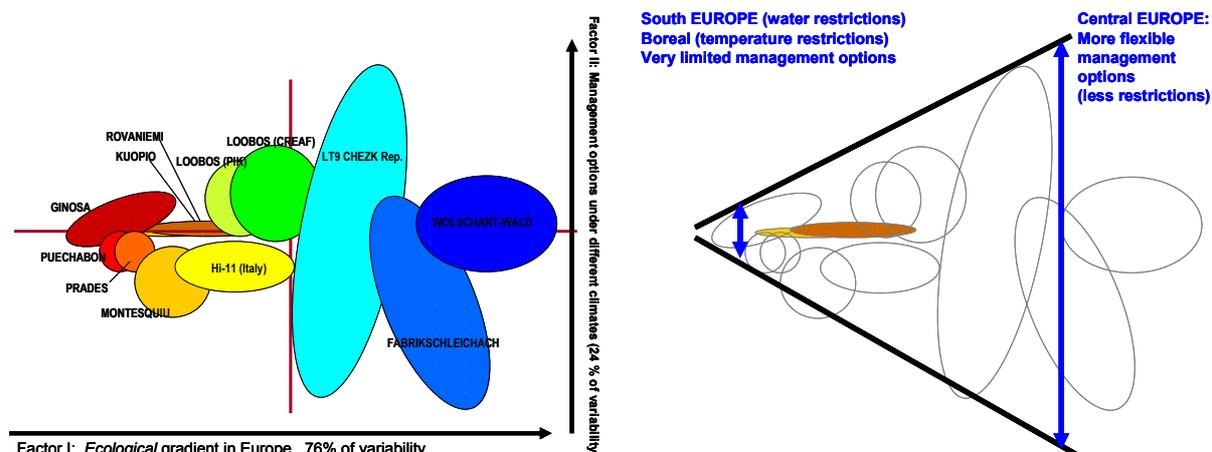


Fig. 9.12. Un análisis conjunto de la capacidad de las técnicas de gestión forestal para modificar la respuesta de los bosques europeos al cambio climático, llevada a cabo en el marco del proyecto SilviStrat, pone de manifiesto que las diferentes alternativas de gestión apenas tienen efecto cuando se aplican a bosques europeos que se localizan en condiciones de crecimiento restrictivas (representadas por las localidades mediterráneas en un extremo, limitadas por falta de agua, y los bosques boreales, limitados por las bajas temperaturas. Bien al contrario, las mismas alternativas de gestión aplicadas a los bosques centroeuropeos se traducen en respuestas mucho más diferenciadas.

Finalmente, el uso de la madera como material base de productos manufacturados o para su empleo estructural en la construcción civil, constituye otra más de las opciones para reducir los efectos del cambio climático. Las maderas con duramen o las enteadas en el caso de los pinos, en particular *Pinus canariensis*, deben ser promovidas por proporcionar productos con ciclos de vida de gran durabilidad y de calidad estética elevada. Adicionalmente, en su proceso de fabricación, la madera además de ser un producto natural renovable, consume menos energía que otros materiales como ladrillos, cristal, acero, aluminio, o plástico. En este sentido destaca la promoción del empleo del corcho frente a alternativas cada vez mayoritarias de derivados plásticos.

9.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

El Sector Forestal como generador de bienes y de riqueza ambiental influye en las industrias ligadas con sus producciones comerciales. Las funciones ecológicas, recreativas y paisajísticas ligadas a estos sistemas, y relacionadas con el ocio de las sociedades urbanas y el turismo rural, no sufrirán cambios significativos cuya valoración sea sencilla. El paisaje es un concepto subjetivo y el que hoy observamos es un producto de nuestra cultura.

9.6.1. Industrias de la madera

Este sector abastece a varios sectores industriales como las de aserrado, tableros, pasta y papel y mueble. El aserrado, por su carácter local, podrá ser el más afectado. En particular el que depende de las especies ibéricas de montaña, como el pino silvestre (*Pinus sylvestris*) o el haya (*Fagus sylvatica*), cuyos aprovechamientos son en la actualidad importantes. En el resto de sectores, la materia prima que se consume procede en un porcentaje muy elevado de las especies de crecimiento rápido, localizadas en la Cornisa Cantábrica o en plantaciones clonales situadas en zonas con aportes suplementarios de agua. Un déficit de estos productos

sería superado por las importaciones dada la escasa valoración en pie de estos productos y el importante valor añadido que se consigue en el proceso de transformación.

9.6.2. Efectos sobre la caza

La actividad cinegética resulta hoy día esencial en la socioeconomía de gran parte del país. Como las especies principales son animales herbívoros, no parece que a nivel global el conjunto de este sector se vea muy afectado por el cambio climático, pero sí son de esperar cambios de cierta entidad en el comportamiento y distribución de numerosas especies objeto de caza, con las consiguientes repercusiones a nivel regional.

En concreto, las influencias atribuibles al cambio climático, a su vez, pueden producirse a consecuencia de varios procesos diferentes:

- Cambio en las áreas de distribución de las especies objeto de caza, en función de sus demandas ecológicas directas.
- Cambio en las áreas de distribución de las especies objeto de caza, en función del cambio operado en la estructura de los ecosistemas en que habitan.
- Cambio en la etología de las especies objeto de caza, especialmente en el caso de las migradoras.

El primero de los factores citados operaría de forma directa en base a las disponibilidades hídricas y a los regímenes térmicos, motivando en líneas generales una expansión de las especies más ligadas a ámbitos mediterráneos (por ejemplo, la perdiz moruna) a costa de las ligadas a ámbitos atlánticos (por ejemplo, la perdiz pardilla). De forma local, especialmente con grupos animales “en límite de área”, esto puede llevar a la desaparición de determinadas piezas de la zona, afectando de forma determinante a la biodiversidad por extinción de subespecies o variedades, como pudiera ser el caso del corzo en los montes de alcornocal de las serranías subbéticas.

Otro rango de influencias puede venir de los cambios previsibles en la estructura de los ecosistemas en que habitan las piezas objeto de caza. En los últimos decenios, el abandono general de las prácticas propias del sistema agrario tradicional, traducido en incremento de masas arboladas en detrimento de áreas de pastizal-matorral, está deparando un incremento notable de las especies de caza mayor, frente a una rarefacción acusada de las de caza menor, salvo en las áreas de actividad agrícola intensa. Las limitaciones que el nuevo régimen climático puede imponer a la recuperación de espacios abiertos por parte del arbolado o a la consecución de doseles arbóreos cerrados en algunas áreas mediterráneas, puede contribuir a paliar o invertir esta tendencia, favoreciendo a las especies de caza menor ligadas a estructuras abiertas.

El último de los niveles de cambio hace referencia a los cambios operados por la variación climática general en los regímenes migratorios de numerosas especies. Algunas aves que apenas pasaban tres meses en verano en nuestra Península, como tórtolas o codornices, irán incrementando progresivamente su periodo de estancia, llegando a permanecer como estantes en algunas áreas más templadas, como se ha constatado ya para la codorniz en algunos enclaves andaluces. Por el contrario, es posible que se asista a una disminución de efectivos en las migratorias estivales ligadas a zonas húmedas, a consecuencia de la rarefacción de éstas. En cuanto a las migratorias invernantes, igualmente se debería asistir a una modificación a la baja, aunque de modo fuertemente condicionado a los cambios climáticos esperables en sus países de procedencia. Por último, son de esperar cambios difícilmente predecibles en las pautas migratorias generales, como el abandono de los pasos tradicionales de palomas en el Pirineo e Ibérico Norte, probablemente atribuible a la frecuencia de borrascas otoñales precoces en dichas áreas.

9.6.3. Efectos sobre la actividad micológica

Los cambios esperables en las actividades relacionadas con la recogida de setas irán también ligados a los cambios directos de los regímenes térmicos e hídricos y a los cambios operados en los ecosistemas forestales en que se desarrollan. Parece previsible que el efecto más inmediato provenga de las variaciones de las disponibilidades hídricas en la época otoñal, lo que reduciría el área vital de numerosas especies asociadas a otoños lluviosos. Sin embargo, no es de menospreciar el posible efecto de los regímenes térmicos, en especial a causa de la irregularidad de los mismos: los fríos extemporáneos y bruscos del inicio del otoño están limitando el periodo de fructificación en gran parte del norte de especies tan apreciadas como la *Amanita cesarea*, mientras que las fases calurosas en otoño, invierno y primavera favorecen una rápida descomposición de muchos de los cuerpos generados y rápidas colonizaciones por parte de parásitos que deprecian el producto. En general, si los cambios se producen de forma suficientemente gradual y si existe una cierta continuidad de las masas arboladas, es previsible una migración hacia el norte o en altitud de los principales grupos, en busca de condiciones más semejantes a las que existen actualmente en sus áreas de distribución.

9.6.4. Efectos sobre el sector corchero

Las influencias en éste campo pueden resultar variables a su vez en función de los aspectos considerados:

- Distribución y estado de las masas de alcornocal.
- Repercusiones en el proceso de aprovechamiento.
- Características comerciales del producto.

La mayor influencia ha de venir motivada por el primero de estos puntos, en concreto por la posible reducción de la superficie de alcornocal existente, que reduciría drásticamente las existencias comercializables del producto. No es posible ignorar las mortandades de alcornoques que en su día, hacia 1995, se atribuyeron al episodio complejo de “la seca”, pero que han seguido actuando con inusitada virulencia durante todos estos años en algunas áreas de alcornocal de Cádiz, deparando la muerte de laderas enteras. Además de esta influencia cabe destacar la posible reducción de la época de aprovechamiento condicionada por las últimas lluvias de primavera y por la aparición del parón vegetativo estival. Finalmente, la tendencia del producto en mercado será la de una disminución general de los calibres disponibles, lo que puede suponer en algunas zonas un alargamiento de los turnos.

9.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

El conjunto de resultados que hemos comentado, ponen de manifiesto algunas posibles consecuencias adversas del cambio climático sobre los ecosistemas forestales. Evidentemente existe un grado de incertidumbre considerable asociado a los complejos análisis que se requieren para explorar los efectos de un cambio complejo en sí mismo, del que aún no conocemos los detalles, sobre sistemas tan complejos a su vez como son los ecosistemas forestales cuya biología es el resultado de las interacciones de un elevado conjunto de procesos.

Necesitamos herramientas que nos ayuden a refinar los análisis y, en este sentido, las administraciones implicadas deberían dedicar un esfuerzo especial a la recopilación y puesta a punto de las bases de datos necesarias. Un ejemplo paradigmático lo constituye la falta de información sobre la biomasa subterránea de nuestros bosques. Hemos visto que, en algunos casos, esta biomasa es, superior a la biomasa aérea y, por tanto, su contribución a los balances de carbono es primordial. Sin embargo apenas se dispone de información sobre la

biomasa del compartimento subterráneo de nuestros bosques y mucho menos sobre su dinámica. Pero, en contra de lo que sería deseable, la posibilidad de que sea financiado un proyecto de investigación competitivo dedicado a cuantificar extensivamente la biomasa subterránea de los bosques es remota.

Otro ejemplo de necesidades no cubiertas lo constituyen los inventarios forestales. El diseño tradicional de los inventarios forestales nacionales dedicados tradicionalmente a cuantificar las *existencias de volumen maderable*, sin considerar el papel de los restantes componentes (hojas, ramas, corteza, raíces gruesas, raíces finas) que de modo grotesco se han calificado de la “basura del bosque” por algunos técnicos desinformados, deben de dejar paso a diseños basados en una concepción más moderna del bosque como ecosistema en el que la producción de madera va dejando paso, en algunos casos, a otros servicios alternativos como el efecto ampliamente comentado de sumidero de carbono, aunque solo sea temporalmente.

9.7.1. Los Factores de expansión de la biomasa

A la hora de realizar los inventarios nacionales de carbono acumulado en los bosques se pone de manifiesto la necesidad de disponer de valores de los llamados factores de expansión de la biomasa.

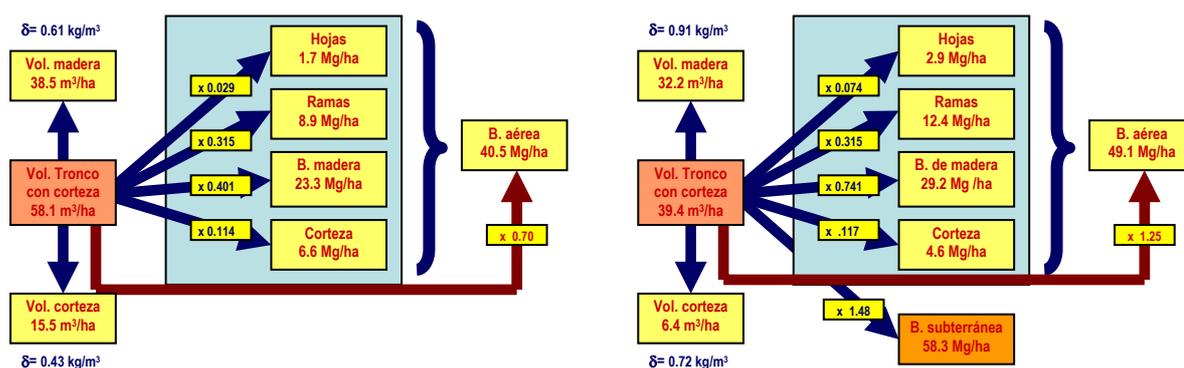


Fig. 9.13. Componentes de los factores de expansión de la biomasa en dos especies: *Quercus ilex* (izquierda) y *Pinus halepensis* (derecha). Los datos se basan en el análisis de 1666 parcelas de encinar y 2045 parcelas de pino carrasco. La variable más frecuente en los inventarios forestales es el volumen del tronco con corteza y sus dos componentes: el volumen de madera y el volumen de corteza. Las densidades específicas de madera y corteza permiten calcular su biomasa. La biomasa de los restantes componentes del árbol se puede obtener multiplicando el volumen del tronco por los factores correspondientes de cada fracción. Multiplicando el volumen del tronco con corteza por el factor 1.25 de la encina (ó 0.70 del pino carrasco) se puede estimar la biomasa total aérea del árbol que es la base de la estimación del carbono.

Dado que la mayor parte de los inventarios forestales se orientan principalmente a la determinación del volumen o biomasa del tronco, para extender estas medidas a la determinación de otros componentes importantes del balance de carbono del bosque tales como raíces, ramas, hojas, hojarasca o carbono presente en el suelo, se han adoptado los llamados factores de expansión de la biomasa (BEF). Con frecuencia los valores que se utilizan en el momento actual suponen una nueva fuente de incertidumbre y de posibles errores ya que desgraciadamente, las bases de datos conteniendo medidas extensivas de los componentes del árbol antes mencionados son muy limitadas (FAO 2000, 2001). Más allá de este problema, la conversión de los datos de biomasa a valores de carbono también requiere atención ya que

la proporción de carbono puede diferir entre diferentes componentes del árbol o diferentes especies.

El detalle con que se han muestreado las 10644 parcelas del Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IEFC) (Gracia et al, 1992, 2000) ha proporcionado información acerca de la biomasa de los diferentes componentes de los árboles de las 95 especies muestreadas. La base de datos resultante representa la imagen más completa existente de los bosques de la región mediterránea en sus más de dos millones de registros. Se puede consultar en <http://www.creaf.uab.es/iefc>.

A partir de esta base de datos se han determinado los factores de expansión de la biomasa de las principales especies. La figura 9.13 resume los valores de cada uno de los componentes que intervienen en la determinación de los factores de expansión de la biomasa en el caso de la encina y el pino carrasco. Una estimación del valor del factor de expansión de la biomasa aérea (ABEF) de las principales especies de la península se puede consultar en Sabaté et al. (enviado).

9.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

9.8.1. Las Plagas como bioindicadores de variaciones climáticas

La presencia de plagas y enfermedades endémicas está íntimamente asociada a ciertas formaciones forestales: defoliadores de quercíneas como *Tortrix viridana* están asociadas al género *Quercus*, y su eclosión suele coincidir con el desarrollo de las yemas primaverales en las especies hospedantes. La modificación del ciclo fenológico anual de la planta puede incidir en la presencia y abundancia de esta especie, y en su concurrencia y competencia con otros defoliadores respecto a los que su ciclo biológico está ligeramente adelantado, como *Lymantria dispar* o *Catocala* sp.

Del mismo modo algunos insectos perforadores (especies del género *Ips* en coníferas) necesitan el mantenimiento de ciertos niveles de humedad en la madera decrepita donde se desarrollan sus galerías larvares y de alimentación. La rápida desecación del material vegetal inhabilita su detección por parte de los imagos, que ven reducido su posibilidad de desarrollo.

9.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

9.9.1. Gestión selvícola basada en el fomento de la diversidad intra e interespecífica.

En términos generales la selvicultura se ha identificado tradicionalmente con la actividad que tiene por objeto el establecimiento, la conservación y el aprovechamiento económico de los montes. La cuestión, por tanto, puede parecer hoy poco importante desde el punto de vista ambiental, pero el objetivo actual de la selvicultura, sin renunciar al aprovechamiento económico, reside en la necesidad de la intervención por parte del hombre para mantener o restablecer la eficacia funcional de los sistemas forestales actuales – bosques intervenidos.

Según la teoría del bosque permanente es el bosque el que debe marcar al forestal su nivel de intervención y no al contrario. Es decir, los fines del hombre no deben prevalecer sobre las exigencias del bosque. Esta forma de entender el bosque y la selvicultura consideran al monte como sujeto del aprovechamiento selvícola y no como objeto del mismo.

Por otra parte, la consideración que se debe al bosque como espacio de utilidad pública, por el insustituible papel de productor de bienes y servicios de interés público, no es condición suficiente para postular el abandono, la no intervención o el no uso. Si por un lado es necesario anteponer los intereses a largo plazo a los más inmediatos y comerciales, es también verdad que la persistente y preconcebida hostilidad hacia la aplicación de la selvicultura como principal

actividad de gestión del bosque, preconizando el no uso como forma más eficaz de conservación, no tiene razón de ser, porque además de no sustentarse en argumentos científicamente coherentes y conformes a la realidad de los hechos, puede no ser legítima y comprensible en el plano técnico, pues no permite observar al microcosmos forestal tal y como realmente es, distinto a veces a como nos gustaría que fuese.

Es justamente en el engarce entre el mantenimiento y la mejora de la funcionalidad biológica de los sistemas forestales y el aprovechamiento de sus bienes, comerciales o no, donde encuentra su espacio la silvicultura.

Si, como se ha dicho antes, las condiciones ecológicas imponen la intensidad y el tipo de tratamiento silvícola que deben aplicarse a un bosque, se desprende fácilmente que si estas condiciones específicas cambiasen debería producirse también un cambio de la silvicultura aplicada. La idea general es intuitiva y fácilmente asumible, pero en la práctica, las relaciones clima-silvicultura se mueven en un intervalo relativamente amplio y no bien cuantificado. A efectos de la vegetación se produce un cambio climático significativo, cuando las condiciones del clima cambian en cuantía tal que sus efectos producen modificaciones en las estrategias de vida de las especies forestales, pudiendo llegar a modificarse la dinámica y la composición florística del bosque. Es decir, cuando la vegetación existente, adaptada al clima anterior, tiene dificultades para perpetuarse en el nuevo clima.

Los estudios sobre cambio climático son numerosos pero pocos tienen en cuenta la significación fitológica de esos cambios que es el aspecto más interesante cuando se trata de diseñar estrategias para la amortiguación de sus efectos. El conocimiento de la vegetación y el estudio del clima en el pasado permiten identificar las condiciones de partida. Sin embargo, existe un cierto grado de incertidumbre sobre las características del clima final al que ha conducido o podrían estar conduciendo los aparentes cambios actuales.

En general, la tendencia del cambio apunta hacia una mayor aridez como resultado de una elevación de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones. Esta tendencia o cambio, cuando se produce, se considera perjudicial para la vegetación en las zonas con climas mediterráneos áridos o semiáridos. Por el contrario, en zonas donde las variaciones termoplumiométricas no tengan efectos limitantes, la vegetación puede verse favorecida y como consecuencia puede producirse un aumento de la productividad e incluso de la diversidad.

9.9.2. Promover las intervenciones silvícolas con capacidad para mitigar el cambio

Durante la última época de sequía, que duró hasta 1994-95, se hicieron numerosas observaciones visuales sobre las masas forestales para intentar establecer relaciones entre el grado de mortalidad de los árboles por sequía y el tratamiento silvícola que se estaba aplicando. En ocasiones puntuales parecían establecerse relaciones de causaefecto, que pocas veces aguantaban una generalización mayor (Fernández y Montero 1993). Los estudios generalistas que establecen tendencias, en general débiles, entre la densidad de la masa en un momento dado y su comportamiento ante un posible y no bien determinado cambio climático, son indicativas y útiles para orientar futuros comportamientos pero, por supuesto, no garantizan una relación causa-efecto cuantificada, siquiera fuese en un amplio intervalo de densidad de la masa forestal para responder a una oscilación o cambio climático cuantificado en términos similares.

Parece que el cambio climático no implica todavía un cambio de vocaciones biológicas a gran escala (Allué 1995a, b). Sólo en algunos emplazamientos, con climas áridos y semiáridos, pueden estarse produciendo avisos de cambio futuro. En estos casos, podría estar justificado iniciar tratamientos silvícolas tendentes a amortiguar los efectos del cambio climático.

Para diseñar acciones selvícolas cuya aplicación pueda estar justificada, es necesario tener evidencias de que se ha producido un cambio de clima, que éste se mantendrá en el futuro y que además se considera incompatible con la existencia de la vegetación actual. Además debemos tener en cuenta, si es posible, la preservación de especies de especial interés, ayudándolas durante un periodo transitorio a acelerar su adaptación, cambiando, por ejemplo, la regeneración vegetativa por la sexual, modificando las densidades en proporción al cambio producido, etc. Si la cuantía, la persistencia y/o la velocidad del cambio no permiten la readaptación de la vegetación a las nuevas condiciones climáticas, la selvicultura por sí sola no podrá amortiguar el proceso de cambio, si no es con la incorporación de grandes aportes de energía, como riegos, fertilizaciones y otras protecciones, tal como se hace en agricultura. En nuestra opinión las técnicas de amortiguación de efectos producidos por este u otro proceso deben tener un horizonte temporal limitado al periodo tiempo que duren esos efectos cuyas causas habrán de ser combatidas por otros procedimientos.

Para finalizar, decir que en nuestra opinión las incertidumbres de futuro pueden ser abordadas, siempre que se mantengan las expectativas de duda. La selvicultura, actuando sobre los sistemas forestales puede ser una herramienta para amortiguar, transitoriamente los efectos del cambio. El aclarado de las masas puede amortiguar el efecto de la sequía durante cortos periodos. Si el cambio persiste, sería necesario aplicar técnicas selvícolas más complejas que incluyan la programación espacio-temporal de las mismas, adaptando las intervenciones a determinados momentos del ciclo vital de las especies que se desea mantener o preservar de los efectos del nuevo clima.

Si el cambio es trascendente y persiste de manera estable en el tiempo, se hará necesario definir una nueva selvicultura adaptada a las nuevas condiciones climáticas y a la nueva dinámica evolutiva de las comunidades vegetales instaladas como consecuencia del cambio. Habrá de aplicarse, como siempre, una selvicultura adecuada a un medio ecológico, que acompaña y ayuda en ocasiones, a la evolución de la vegetación natural y no pretende ningún efecto amortiguador de los factores naturales que afectan sobre ese medio.

9.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

9.10.1. Líneas prioritarias de investigación para el conocimiento del cambio climático y amortiguación de sus efectos en los sistemas forestales

A. Aspectos básicos

- Cuantificación, estructura y dinámica del carbono acumulado en las formaciones boscosas y matorrales. Partes aérea, radical y carbono en el suelo.
- Medición de fotosíntesis y flujo de carbono en sistemas forestales.
- Modelos de simulación del crecimiento de biomasa en sistemas forestales, con especial énfasis en modelos de procesos.
- Balance actual del carbono en los principales sistemas forestales y posible influencia del cambio climático en el mismo. Consecuencias para la gestión forestal.
- Identificación de los principales factores eco-fisiológicos que limitan la regeneración natural de las masas forestales.
- Influencia del cambio climático sobre el desplazamiento de la vegetación y modificaciones de la cubierta vegetal.
- Evaluación de la variación adaptativa entre procedencias.
- Efecto del cambio climático sobre los bosques. Elaboración de indicadores de detección del cambio para la puesta a punto de sistemas de alerta temprana.

B. Aspectos aplicados

- Métodos experimentales de estimación de biomasa aérea y radical de las principales especies forestales, para su valoración rápida como sumideros de carbono. Adaptación al Inventario Forestal Nacional.
- Cuantificación de los factores de expansión de biomasa para las principales especies forestales. Aplicación al Inventario Forestal Nacional.
- Desarrollo de metodologías para la estimación de biomasa en matorrales y sotobosques.
- Optimización de las prácticas de gestión para potenciar la eficiencia de los bosques como sumideros. Silvicultura del carbono.
- Aplicación de técnicas selvícolas para mitigar los efectos del cambio climático sobre las masas forestales.
- Estudio para la sustitución parcial de materiales de construcción obtenidos a partir de procesos altamente contaminantes por otros procedentes de recursos naturales renovables.
- Estimación de la vida media de los diferentes productos forestales y su valoración como almacenes temporales de carbono.
- Posibilidades económicas de aprovechamiento energético de los residuos forestales (restos de corta y otros).
- Desarrollo de técnicas de cultivo y selección de especies y clones destinados a la producción de biomasa para su aprovechamiento energético.
- Técnicas de cultivo agroforestales (cultivos agrícolas intercalados con plantaciones de frondosas) como instrumento para cumplir con el Protocolo de Kioto.
- Estudio de los factores que limitan la utilización de los mecanismos de flexibilidad forestales previstos en el Protocolo de Kioto. Comercio de emisiones, proyectos MDL y de AC. Valoración socioeconómica, metodología y asignación de créditos.

9.10.2. Identificación de futuros proyectos integrados.

El Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 incluye líneas prioritarias adicionales en el Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias, a fin de facilitar e impulsar la contribución del Sector Agrario a la reducción de los gases de efecto invernadero.

Estas líneas de investigación deben ser estudiadas conjuntamente por grupos de investigadores y técnicos desde los ministerios de Educación y Ciencia, Medio Ambiente, Agricultura Pesca y Alimentación, Industria y Tecnología, etc. La idea sería definir proyectos conjuntos conservados en su contenido y comprometiéndose en su financiación así la Comunidad Científica trabajará en líneas orientadas a resolver problemas concretos y bien identificadas por los especialistas responsables de políticas económicas y gestión de recursos energéticos.

Las grandes empresas energéticas, o grandes consumidoras de energía deben de participar necesariamente con la comunidad científica y con las Administraciones implicadas.

9.11. BIBLIOGRAFIA

- Albeza E., Sabaté S. y Gracia C.A. 1996. A long term thinning experiment on a *Quercus ilex* forest. In Ecosystem Manipulation Experiments. En: Jenkins A., Ferrier R.C. y Kirby C. (eds.). Ecosystems Research Report nº 20. ECSC-EC-EAEC. Pgs. 200-208.
- Allué, J.L. 1995a. El cambio climático y los montes españoles. Cuadernos de la S.E.C.F. nº2, 35-64

- Allué, J.L. 1995b. Naturaleza, efectos y amortiguamientos del cambio climático en los montes españoles. Montes nº 40, 21-28
- Anónimo 2000. Estrategia Forestal de España. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Anónimo 2003. Plan Forestal Español. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Anónimo 2004. Inventario de Gases de Efecto Invernadero: Informe de España 1990-2002. Dirección General de Calidad Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.
- ASEMFO (Asociación Nacional De Empresas Forestales). 2002. III Estudio de Inversión y Empleo en el Sector Forestal.
- Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik Ü., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer Ch., Clement R., Elbers J., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R. y Vesala T. 1998. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* 30: 113-175
- Aussenac G. y Granier A. 1988. Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 18: 100-105.
- Aussenac G. y Vallette J.C. 1982. Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manettl, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Will. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Annales des Sciences Forestieres* 39: 41-62.
- Ball J.T., Woodrow I.E. y Berry J.A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. En: Bingsins I.J. (ed.). *Progress in photosynthesis research*. Vol IV 5, Martinus Nijhoff, Dordrecht, Netherlands. Pgs. 221-224.
- Breda N., Granier A. y Aussenac G. 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology* 15: 295-306.
- Brix H. y Mitchell A K 1986 Thinning and nitrogen fertilisation effects on soil and tree water stress in a Douglas-fir stand. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 1334-1338.
- Canadell J. y López-Soria L. 1997. Lignotuber reserves support regrowth following clipping of two Mediterranean shrubs. *Functional Ecology* 12(1): 31-38.
- Canadell J., Djema A., López B., Lloret F., Sabaté S., Siscart D. y Gracia C.A. 1999. Structure and dynamics of the root system. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer, Berlin. Pgs. 48-59.
- Carter T.R., Hulme M., Crossley J.F., Malyshev S., New M.G., Schlesinger M.E. y Tuomenvirta H. 2000. *Climate Change in the 21st Century. Interim Characterizations based on the new IPCC Emissions Scenarios*. Finnish Environment Institute.
- Ceulemans R. y Mousseau M. 1994. Tansley Review No. 71. Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants. *New Phytologist* 127: 425-446
- Djema A., López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 1994. A Long-Term Thinning Experiment on a *Quercus ilex* L. Forest: Changes in root biomass and nutrient contents. *Noticiero de Biología* 2(3):21, Santiago de Chile, Chile
- Djema A. 1995 Cuantificación de la biomasa y mineralomasa subterránea de un bosque de *Quercus ilex* L. Master Thesis. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza, Zaragoza
- Epron D. y Dreyer E. 1993a. Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and *Quercus robur* L.] in a natural stand. *New Phytologist* 125: 381-389.
- Epron D. y Dreyer E. 1993b. Photosynthesis of oak leaves under water stress: maintenance of high photochemical efficiency of photosystem II and occurrence of non-uniform CO₂ assimilation. *Tree Physiology* 13: 107-117
- FAO. 2000. *Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries)*, UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest Resources Assessment 2000, Main Report. United Nations, New York and Geneva. 445 pgs.
- FAO. 2001. *State of The World's Forests 2001*. FAO, Rome. 159 pgs.
- Fankhauser R. 1994. The social cost of greenhouse gas emissions: an expected value approach. *The Energy Journal* 152: 157-184.

- Fernández, J.A. y Montero, G. 1993. La seca de *Quercus* en Extremadura y La Mancha. *Montes* 32: 32-36
- Gil L., Fuentes-Utrilla P., Soto A., Cervera M.T. y Collada C. 2004. English elm (*Ulmus procera*) is a 2000-year-old Roman clone. *Nature* 431: 1035.
- Gordo Alonso J. 2004. Selección de grandes productores de frutos de *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte. Tesis Doctoral ETS Ingenieros de Montes, UPM. Madrid. 153 pgs.
- Gracia C.A., Abril M., Barrantes O., Burriel J.A., Ibáñez J.J., Serrano M.M. y Vayreda, J., 1992. Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Mètodes. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, Generalitat de Catalunya, Barcelona. 104 pgs.
- Gracia C.A., Sabaté S., Albeza E., Djema A., Tello E. Martínez J.M., López B., León B. y Bellot J. 1994. Análisis de la respuesta de *Quercus ilex* L. a tratamientos de aclareo selectivo: Producción, biomasa y tasa de renovación de hojas y raíces durante el primer año de tratamiento. Reunión de coordinación del Program de restauración de la cubierta Vegetal de la Comunidad Valencia. Alicante
- Gracia C.A., Bellot J., Sabaté S., Albeza E., Djema A., León B., López B., Martínez J.M., Ruíz I. y Tello E. 1996. Análisis de la Respuesta de *Quercus ilex* L. a tratamientos de aclareo selectivo. En: Restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. Fundación CEAM. Pgs. 547-601.
- Gracia C.A., Sabaté S. y Tello E. 1997. Modelling the response to climate change of Mediterranean forest managed at different thinning intensities: effects on growth and water fluxes. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Pgs. 243-252.
- Gracia C.A., Sabaté S., Martínez J.M. y Albeza E. 1999a. Functional responses to thinning. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer, Berlin. pgs. 329-338.
- Gracia C., Tello E., Sabaté S. y Bellot J. 1999b. GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer, Berlin. pgs. 163-180.
- Gracia C.A., Burriel J.A, Mata T. y Vayreda J. 2000, Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. 9 volúmenes.
- Gracia C.A., Sabaté S., López B. y Sánchez A. 2001. Presente y futuro del bosque mediterráneo: balance de carbono, gestión forestal y cambio global. En: Zamora R. y Pugnaire F. (eds.). Ecosistemas mediterráneos: Análisis funcional. CSIC y AEET. Pgs. 351-372
- Gracia C.A., Sabaté S. y Sánchez A. 2002. El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. *Ecosistemas* 2. <http://www.aeet.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm>
- Hilbert D.W. y Canadell J. 1995. Biomass partitioning and resource allocation of plants from Mediterranean-type ecosystems: possible responses to elevated atmospheric CO₂. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (eds.). Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems. Springer, Berlin. Pgs. 76-101
- IPCC 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press. 994 pgs
- Jarvis P.G. (ed.). 1998 European Forests and Global Change: The likely impacts of Rising CO₂ and temperature. Cambridge University Press. Cambridge. 380 pgs.
- Kramer K., Leinonen I., Bartelink H.H., Berbigier P., Borghetti M., Bernhofer Ch., Cienciala E., Dolman A.J., Froer O., Gracia C., Granier A., Grünwald T., Hari P., Jans W., Kellomäki S., Loustau D., Magnani F., Matteucci G., Mohren G.M.J., Moors E., Nissinen A., Peltola H., Sabaté S., Sanchez A., Sontag M., Valentini R. y Vesala T. 2002. Evaluation of 6 process-based forest growth models based on eddy-covariance measurements of CO₂ and H₂O fluxes at 6 forest sites in Europe. *Global Change Biology* 8: 1-18.
- López B., Sabaté S., Ruiz I. y Gracia C.A. 1997. Effects of elevated CO₂ and decreased water availability on holm-oak seedlings in controlled environment chambers. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). Impacts of global change on tree physiology and forest ecosystems. Kluwer, Dordrecht. pgs. 125-133.

- López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 1998. Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: Effects of drought and stem density. *Tree Physiology* 18: 601-606.
- López B. 2000. The fine root system of a mediterranean Holm Oak forest. General aspects and effects of Thinning. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona. 296 pgs.
- López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 2001a. Annual and seasonal changes of fine roots biomass of a *Quercus ilex* L. forest. *Plant and Soil* 230: 125-134.
- López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 2001b. Fine root longevity of *Quercus ilex*. *New Phytologist* 151(3): 437-441.
- Martín S., Díaz-Fernández P. y De Miguel J. 1998. Regiones de procedencias de las Especies Forestales Españolas. Géneros *Abies*, *Fagus*, *Pinus* y *Quercus*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- McClougherty C.A., Aber J.D. y Melillo J.M. 1982. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology* 63:1481-1490
- McClougherty C.A., Aber J.D. y Melillo J.M. 1984. Comparative root and soil dynamics on a white pine watershed and in the hardwood forest in the Coweeta Basin. *Oikos* 42: 378-386.
- Medlyn B.E. y Dewar R.C. 1996. A model of long-term response of carbon allocation and productivity of forests to increased CO₂ concentration and nitrogen deposition. *Global Change Biology* 2: 367-376.
- Medlyn B.E. y Jarvis P.G. 1997. Integration of results from elevated-CO₂ experiments on European forest species: the ECOCRAFT project. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). *Impacts of global change on tree physiology and forest ecosystems* Kluwer Academic Publishers. *Forest Sciences* 52, 273-279.
- Mohren G.M.J. y Kramer K. 1997. Simulation of direct effects of CO₂ and temperature increase on forest growth: the LTEEF project. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). *Impacts of global change on tree physiology and forest ecosystems*. Kluwer Academic Publishers. *Forest Sciences* 52: 307-317.
- Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). 1997. *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 372 pgs.
- Mohren G.M.J. 1999. Long-term effects of CO₂-increase and climate change on European Forests. En: Valentini R. y Brüning C. (eds.). *Greenhouse gases and their role in climate change: the status of research in Europe*. European Commission DG XII/B.I EUR (19085 EN. pgs. 20-31.
- Mohren G.M.J., Bartelink H.H, Kramer K., Magnani F., Sabaté S. y Loustau D. 2000. Modelling long term effects of CO₂ increase and Climate Change on European Forests, with emphasis on Ecosystem Carbon Budgets. En: Ceulemans R.J.M., Veroustraete F., Gond V. y Van Rensbergen J.B.H.F. (eds.). *Forest ecosystem modelling, upscaling and remote sensing*. SPB Academic Publishing bv, La Haya, The Netherlands. Pgs. 179-192
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Cañellas, I., Candela, J.A. y Pavón, J. 2002. La fijación de CO₂ por las masas de pino piñonero de Andalucía". *Forestalia*, 7 - 12-23.
- Montero, G., Muñoz, M., Donés, J. y Rojo, A. 2004. Fijación de CO₂ por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Wild. En los montes "Pinar de Balsaín y Matas de Balsaín". *Investigaciones Agrarias (Sistemas y Recursos Forestales)* 13(2):399-415.
- Mutke S., Sievänen R., Nikinmaa E., Perttunen J. y Gil L. 2004. Crown architecture of grafted Stone pine (*Pinus pinea* L.): shoot growth and bud differentiation. *Trees* (en prensa, online <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-004-0346-7>)
- Petit R.J., Brewer S., Bordacs S., Burg J., Cheddadi R., Coart E., Cottrell J., Csai U., Deans D., Fineschi S., Finkelday R., Goicoechea P.G., Jensen J., König A., Lowe A.J., Madsen S.F., Matyas G., Oledska I., Popescu F., Slade D., Van Dam B. de Beaulieu J.-L. y Kremer A. 2002. Identification of postglacial colonisation routes of European white oaks based on chloroplast and fossil pollen evidence. *Forest Ecology and Management* 156: 49-74.
- Robledo-Arnuncio, J.J., Alía R. y Gil L. 2004. Increased selfing and correlated paternity in a small population of a predominantly outcrossing conifer, *Pinus sylvestris*. *Molecular Ecology* 13(9): 2567-2577.

- Rodà F., Ibáñez J. y Gracia C. 2003. L'estat dels boscos. A: L'estat del Medi Ambient a Catalunya. Generalitat de Catalunya. (en prensa)
- Rodà F., Mayor X., Sabaté S. y Diego V. 1999. Water and nutrient limitations to primary production. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer, Berlin. pgs. 183-194.
- Sabaté S., Calvet S. y Gracia C.A. 1992. Preliminary results of a fertilization-irrigation experiment in a *Quercus ilex* L. forest in relation to leaves and twigs characteristics. Vegetatio 99-100: 283-287
- Sabaté S. 1993 Canopy structure and nutrient content in a *Quercus ilex* L. forest of Prades Mountains: Effects of natural and experimental manipulation of growth conditions. PhD thesis dissertation. University of Barcelona
- Sabaté S y Gracia C 1994 Canopy nutrient content of a *Quercus ilex* L. forest: fertilization and irrigation effects. Forest Ecology and Management 68: 31-37.
- Sabaté S., Sala A., Gracia C.A. 1995 Nutrient content in *Quercus ilex* canopies: seasonal and spatial variation within a catchment. Plant and Soil 168-169: 297-304
- Sabaté S., Gracia C., Vayreda J. e Ibáñez J. (enviado). Differences among species in aboveground biomass expansion factors in Mediterranean forests.
- Tello E., Sabaté S., Bellot J. y Gracia C. 1994. Modelling the Responses of Mediterranean Forest to Climate Change: The role of canopy in water fluxes. Noticiero de Biología 2(3):55. Santiago de Chile, Chile.
- Watson R. (ed.) 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra.

