

## Capítulo 7

# Efecto del cambio climático en los montes castellano-manchegos

Francisco Ramón López Serrano  
Eva Rubio Caballero  
Manuela Andrés Abellán  
Antonio del Cerro Barja  
Francisco Antonio García Morote  
Jorge de las Heras Ibáñez  
Manuel Esteban Lucas Borja  
Daniel Moya Navarro  
Magali Odi Lara

*Dpto. de Producción Vegetal y Tecnología Agraria.  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete*

## Introducción

En el pasado histórico, los bosques han experimentado numerosos cambios medioambientales, unos de larga duración -p.e. unos 100000 años- tales como las épocas glaciales (Bowen, 1979) y otros de muy corta -p.e. de una década- dentro de lo que es el periodo de vida de un mismo árbol. Estos cambios medioambientales han podido ser paulatinos o muy repentinos. En las dos últimas décadas, y como consecuencia de las recientes actividades antrópicas, se han producido rápidos cambios climáticos (Alig et al., 2002), lo cual resulta preocupante para el futuro de las especies arbóreas (entre otras), fundamentalmente por la intensidad y la tasa del cambio a las que se están produciendo. En cuanto a la intensidad de cambio, existe la preocupación de que si este es muy intenso, las especies arbóreas no tendrán una adecuada variación genética para adaptarse a las nuevas condiciones ambientales (Davis y Zabinski, 1992). En cuanto a la rapidez de dicho cambio, si este ocurre con demasiada celeridad, los árboles, con largos periodos de regeneración, quizás no podrán adaptarse lo suficientemente rápido a las nuevas condiciones. Pero a lo anterior habría que añadir que, aunque los árboles tuvieran una adecuada diversidad genética, podría ocurrir que no fueran capaces de dispersar sus semillas en los nuevos hábitats debido a la fragmentación tanto de hábitats como de poblaciones (Clark, 1998).

Muchas características de las poblaciones forestales indican que los árboles, comparados con otras especies de plantas, están únicamente capacitados para soportar cambios medioambientales direccionales. Su longevidad, junto con su plasticidad fenotípica (p.e. Gil y Aranzazu, 1993, argumentan el éxito de los pinos, entre otros, por este motivo), deberían permitir a los individuos y poblaciones sobrevivir unas pocas décadas a condiciones medioambientales adversas. Durante este tiempo, la recombinación o cruce entre individuos, puede producir genotipos que estén mejor adaptados a este nuevo régimen ambiental. Recíprocamente, si el clima cambia en una misma dirección durante un largo periodo de tiempo, la longevidad de los árboles podría ser una desventaja puesto que el tiempo de respuesta de la población podría ir retrasado con respecto a la tasa de cambio climático. Sin embargo, a menos que toda la reproducción y establecimiento de plántulas sea eliminada, las poblaciones podrían ser mantenidas incluso si la regeneración fuese menor que lo necesario para la completa recuperación de la masa forestal (Hamrick, 2004).

Evidencias paleoecológicas indican que la distribución geográfica de las especies arbóreas se ha expandido y contraído varias veces desde la última época glacial en respuesta a cambios direccionales del clima. Para la mayor parte de especies forestales arbóreas, estas fluctuaciones

se han llevado a cabo sin ninguna aparente pérdida de diversidad genética. Una posible explicación, que distingue a la mayor parte de las especies arbóreas de muchas plantas herbáceas, es que gran cantidad de variación genética dentro de las especies arbóreas se encuentra dentro más que entre sus poblaciones. Así, la extinción de gran parte de poblaciones de una especie arbórea no daría lugar a una gran pérdida en diversidad genética. El mantenimiento de altos niveles de diversidad genética en poblaciones marginales, ante la intensa presión de selección, debería permitir a las poblaciones de árboles responder a los cambios medioambientales mejor que las especies que mantienen menos diversidad genética dentro de sus poblaciones. Estudios phylogeográficos indican que, para algunas especies de árboles, la heterogeneidad del hábitat en los refugios glaciales puede haber preservado variaciones genéticas adaptativas que, cuando se recombinan y se exponen a la selección natural en los hábitats nuevamente colonizados, dan lugar a las adaptaciones locales actuales.

El mantenimiento de la diversidad genética, ante la extensiva fragmentación del hábitat, es también otra preocupación ante el cambio climático. Sin embargo, muchos bosques pueden aislarse de los efectos adversos de la fragmentación del hábitat, debido a: i) la longevidad de determinados árboles puede retardar la extinción de la población y permitir que individuos y poblaciones sobrevivan hasta que se recupere el hábitat y ii) existen evidencias de que las especies de árboles polinizadas por animales o el viento reciben niveles de flujo de polen que son suficientes para contrarrestar el efecto de pérdida de diversidad genética. Así, la combinación de alta longevidad, alta intra-diversidad genética y el potencial para altas tasas de flujo de polen, debería hacer a las especies arbóreas especialmente resistentes a la extinción y a la pérdida de diversidad genética durante condiciones medioambientales cambiantes (Hamrick, 2004).

El cambio climático afectará a las especies arbóreas de diferentes maneras. Algunas especies verán reducido su rango donde habitaban, mientras que otras pueden incluso ampliar su extensión (Rehfeldt et al., 2002). Incluso, algunas especies podrían llegar a extinguirse si los cambios continúan durante periodos largos o si la tasa de cambio es demasiado rápida para que las especies de crecimiento lento puedan adaptarse. Además, especies arbóreas con limitada distribución y/o variabilidad genética reducida serían más propensas a la extinción (McLaughlin et al., 2002). Hay considerables evidencias que indican que el calentamiento global ha provocado cambios en el comportamiento de plantas y animales (cambios fenotípicos, Jensen, 2003), pero lo que no se sabe es como estos cambios fenotípicos pueden afectar a la capacidad a largo plazo de poblaciones para reproducirse y colonizar nuevas áreas. Los árboles combinan características adquiridas a lo largo de su vida y niveles de diversidad genética que les permitirán adaptarse con relativa rapidez a los cambios climáticos, cosa que no es posible para otras especies de plantas con otras características. Los árboles se han enfrentado a cambios climáticos muchas veces a lo largo de su evolución histórica. Incluso, aunque los cambios pueden haber ocurrido muy rápido, la mayor parte de las especies han sobrevivido. Sin embargo, el actual cambio climático se diferencia de

estos otros ocurridos en el pasado en dos aspectos fundamentales: i) el cambio climático global está ocurriendo rápidamente en territorios que están actualmente altamente fragmentados y ii) la introducción, durante el cambio climático, de patógenos, plagas de insectos y plantas invasoras, pueden interactuar con el cambio climático dando lugar a la extinción de algunas especies arbóreas y, otras veces, algunas especies arbóreas podrían responder mejor a los efectos del cambio climático cuando estas plagas eliminan la competencia de esos otros árboles afectados. Por tanto, es difícil predecir como una especie o grupos de especies arbóreas responderán ante el cambio climático global.

La temperatura y precipitación, dos de los factores climáticos que se espera cambien conforme se incrementan las concentraciones de gases de efecto invernadero, son los determinantes principales de la productividad, estado sanitario y distribución espacial de los bosques (Spurr y Barnes, 1980). Pero además, el cambio climático puede afectar a los regímenes de plagas y enfermedades, incendios y eventos meteorológicos catastróficos, que tendrán adicionalmente efectos indirectos en los bosques (IPCC, 1996a). Las actividades humanas también tendrán un profundo impacto en cómo los bosques responderán a los cambios climáticos. Los cambios en la población y en las preferencias sobre productos y recursos del bosque podrían conformar un determinado modelo de gestión que podría influenciar la composición y estado sanitario de los ecosistemas forestales (Langston, 1995). Pero ¿cómo se pueden prever los cambios en los bosques?

Los efectos de los cambios climáticos en los bosques se pueden evaluar mediante modelos que permitan a los investigadores reunir todos los factores que influyen en las respuestas potenciales de los bosques o ecosistemas a esos cambios, tanto los atmosféricos como los biológicos y climáticos. Cada modelo pone énfasis en uno o varios procesos, de tal manera que los resultados pueden ser diferentes dependiendo del proceso priorizado.

Los primeros trabajos en modelización daban la respuesta de las especies o tipos de bosques al efecto de cambio climático usando datos históricos climáticos y datos de polen para poder seguir cómo la distribución de varias especies estaba correlacionada con los regímenes climáticos pasados (Overpeck y Bartlein, 1989). Otros trabajos aplicaron las previsiones de los Modelos de Circulación General de la atmósfera (MCG) a los actuales rangos donde las especies habitan y así mostraban como esos rangos podrían cambiar (Zabinski y Davis, 1989; Davis y Zabinski, 1992). Otros modelos matemáticos que analizan la respuesta de los bosques al cambio climático, van desde los modelos de regresión lineal simple (Pan y Raynal, 1995), hasta modelos más complejos que representaban sistemas biológicos. Dentro de estos, algunos se han centrado en incorporar procesos fisiológicos y respuestas detalladas de estos procesos a los cambios climáticos. Así, en la actualidad se utilizan dos grandes tipos de modelos: i) los "tree 'gap' models" o modelos a nivel árbol, que simulan el ciclo de vida de individuos de una determinada especie, mediante la modelización de la respuesta del árbol a la luz, disponibilidad de nutrientes, temperatura y

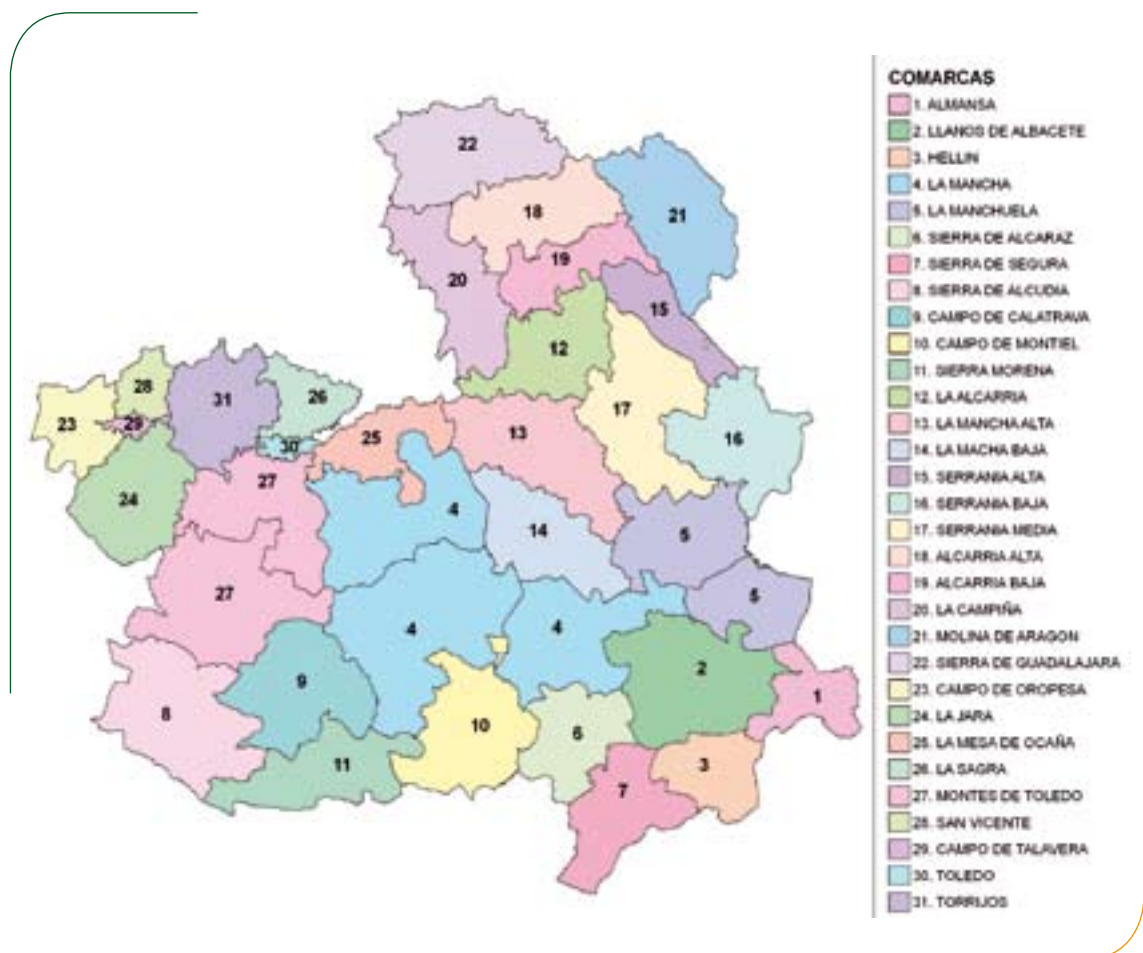
precipitación (Bugmann et al., 1996), y ii) los modelos a nivel ecosistema que incluyen modelos biogeoquímicos y biogeográficos (VEMAT Members, 1995) y otros modelos de carbono, nitrógeno y reparto de agua a nivel bosque (Aber et al. 1995).

Los *modelos a nivel árbol* presentan el inconveniente de que no pueden dar a veces la importancia adecuada a las capacidades de las especies para sobrevivir ante condiciones fuera de su rango, aunque predicen adecuadamente bajo condiciones dentro de sus límites actuales de hábitats (Loehle y Leblanc, 1996). Esto se justifica porque los árboles pueden estar más limitados por la competencia con otras especies que por las condiciones climáticas. Los *modelos más simples de regresión* también dan resultados similares a los de nivel árbol, con los mismos inconvenientes, donde la respuesta al cambio climático dependerá de las condiciones locales de la masa forestal y de la relativa tolerancia de las especies a la sequía. Los *modelos biogeográficos* simulan la distribución geográfica de ecosistemas a través de un análisis de la respuesta de un ecosistema a restricciones ecofisiológicas impuestas por las condiciones climáticas y por limitaciones en los recursos básicos tales como agua, luz, nitrógeno (Nielsen, 1995). Así, estos modelos muestran como la distribución de ecotipos cambian de un estado de equilibrio a otro. Por último, los *modelos biogeoquímicos* simulan la productividad y almacenamiento de carbono de un ecosistema a lo largo de un periodo de tiempo, mediante el análisis de la respuesta de procesos que se dan en el suelo y en las plantas a los cambios en los ciclos de carbono y nutrientes impuestos por las condiciones ambientales. Por tanto, pueden evaluar la productividad pero no pueden mostrar como los diferentes ecosistemas están o estarán distribuidos geográficamente.

Actualmente, estos modelos funcionales (modelos basados en procesos) son la mejor herramienta disponible para predecir la respuesta de los ecosistemas a incrementos de CO<sub>2</sub> y cambio climático a nivel de masa forestal (Thornley y Cannell, 1996) o a escala global (Cramer et al., 1999). Sin embargo, hay todavía lagunas en el conocimiento de procesos clave en las plantas y en los ecosistemas: si bien la fotosíntesis y, hasta cierto punto, la respiración son bien conocidas, otras funciones importantes como la entrada de nutrientes y el reparto de la biomasa en las distintas partes de la planta, están aún por alcanzar (Luo et al, 1999). Así, cada uno de los procesos fundamentales que se dan en las plantas, ha sido modelado por separado e integrado en modelos que simulan el funcionamiento de ecosistemas terrestres (ver revisión en Magnani y Matteucci, 2001): i) La fotosíntesis de la hoja (Farquhar et al., 1980; Pearcy et al., 1997), ii) La conductancia estomática (Ball et al., 1987; Leuning 1995), iii) La variación de la composición bioquímica de las hojas (Dewar et al, 1998), iv) La respiración (no hay un modelo todavía similar al de fotosíntesis, pero Thornley y Cannell, 2000, proponen varias alternativas para modelar la respiración de mantenimiento y la de crecimiento), v) El reparto en la planta de la producción primaria neta (Thornley y Cannell, 1996), vi) fenología (salida de yemas, cese del crecimiento, floración, caída de la hoja, Kramer 1994) y vii) respiración del

suelo (Liski et al., 1999). Así estos modelos tienen la ventaja, frente a los clásicos modelos empíricos, de ser muy flexibles para la evaluación a largo plazo de tendencias y la descripción de diferentes escenarios. Por el contrario, requieren un conjunto grande de datos de entrada, precisos y calibrados, los cuales no están siempre disponibles y son difíciles de obtener (Magnani y Matteucci, 2001; Hall et al., 1997).

De todos modos, no está claro lo que puede pasar a largo plazo y en las complejas condiciones de los ecosistemas. Conviene ser prudente en la extrapolación a partir de experimentos que han estado mayoritariamente llevados a cabo en condiciones muy controladas, con plantas aisladas, jóvenes y a corto plazo. Así, estas respuestas podrían amortiguarse con el tiempo y en algunas plantas ha habido aclimatación de la fotosíntesis o han desaparecido las reducciones en las concentraciones de elementos como el N tras seis años de crecimiento a alto CO<sub>2</sub> (Peñuelas et al., 1997, citado en Peñuelas et al., 2004).



**Figura 1:** Situación y denominación de las comarcas agrarias de Castilla-La Mancha

Fuente: Comarcalización Agraria de España (MAPA, 1996).

Por estas y otras razones y dadas las limitaciones actuales en cuanto al conocimiento y uso de modelos aplicables a nuestra región, realizaremos este informe basándonos en una metodología fundamentada en los rangos actuales donde habitan, con mayor o menor estabilidad, las distintas especies forestales en Castilla-La Mancha (ver metodología). Por tanto, el **objetivo general** de este informe será realizar una aproximación de cómo las masas forestales de nuestra comunidad autónoma serán afectadas por los cambios climáticos que se ocasionen como consecuencia de la elevación de la concentración en la atmósfera de los gases de efecto invernadero. Los **objetivos particulares** serán: i) analizar la situación actual de los montes en la región a nivel Comarca Agraria desde los puntos de vista de su distribución espacial y adecuación a su hábitat y su productividad primaria neta, ii) estimar, ante los cambios de los parámetros climáticos en distintos escenarios y periodos futuros, cual podría ser la distribución espacial de las masas forestales para cada comarca, iii) evaluar de forma general el impacto en la productividad primaria neta y iv) sugerir medidas para contrarrestar los efectos negativos que pudieran causar estos cambios.

## 1. Situación actual de las masas forestales

### 1.1 Composición y distribución espacial

Castilla La Mancha (CLM), una comunidad cuya superficie es de unos 7.95 millones de ha, presenta una superficie forestal arbórea que ocupa un 22% de la misma (IFN2, 1995). Las especies más importantes, desde el punto de vista de su abundancia, son los pinos (*Pinus halepensis*, *P. pinaster*, *P. nigra subs. salzmanii*, *P. pinea* y *P. sylvestris*), las coercíneas (*Quercus ilex subs. ballota*, *Q. faginea*, *Q. pyrenaica* y *Q. suber*) y la sabina albar (*Juniperus thurifera*). Estas 10 especies arbóreas suponen el 96.8% de toda la superficie forestal Castellano-Manchega. Para cada una de las Comarcas agrarias (según definición de comarca dada por el MAPA, 1996, Figura 1), la Tabla 1 muestra la importancia, en cuanto a superficie cubierta, de las especies forestales mencionadas. De todas las especies, el *Quercus ilex*, el *Pinus nigra*, el *P. pinaster* y el *P. halepensis*, son las que ocupan la mayor superficie forestal de CLM representando, en su conjunto, el 77% (30, 19, 14 y 14% respectivamente). Desde el punto de vista de distribución espacial (Figura 2), las especies forestales están desigualmente repartidas a lo largo de las 5 provincias, destacando la escasa vegetación forestal natural presente en la provincia de Toledo, donde hay dos comarcas (Campo de Talavera y Toledo) que no presentan vegetación forestal natural de importancia (IFN2, 1995).

Es bien sabido que la presencia de una determinada especie en un sitio depende fundamentalmente de parámetros climáticos, aunque no hay que olvidar los factores edáficos limitantes que, en determinadas ocasiones, permiten o imposibilitan la existencia de una especie aunque

**Tabla 1:** Superficie forestal arbolada (ha) ocupada por las 10 las especies forestales más representativas en Castilla-La Mancha.

Ph: *Pinus halepensis*; Pn: *P. nigra*; Ppr: *P. pinaster*; Ppa: *P. pinea*; Ps: *P. sylvestris*; Jth: *Juniperus thurifera* Qi: *Quercus ilex*; Qf: *Q. faginea*; Qp: *Q. pyrenaica*; Qs: *Q. suber*; Resto: *Populus sp*; Regenerado incendio, matorral; ...  
Fuente: IFN2, 1995.

Nombre comarca	Nº	Ph	Pn	Ppr	Ppa	Ps	Jth	Qi	Qf	Qp	Qs	Resto	Total
Almansa	1	20205			34			3674				0	23913
Llanos de Albacete	2	13000	26	4086	2969		12	11330	153			0	31575
Hellín	3	32401		99	62		4	134				205	32904
La Mancha	4	1750		3862	5319		2167	32280				5113	50491
La Manchuela	5	52715	2374	4568	7596	6	312	22839				60	90468
Sierra de Alcaraz	6	2235	11759	27568	3290		848	24956				88	70744
Sierra del Segura	7	55737	12409	23444	3255		1678	1114				9330	106966
Sierra de Alcudia	8			11547	2413			81317	663	526	585	879	97929
Campo de Calatrava	9			7014	3172			18901			24	71	29182
Campo de Montiel	10	118		22	369		1535	35483		89		3	37618
Sierra Morena	11			12865	537			63972	229	2067	367	234	80270
La Alcarria	12	6997	14646	683	4	65	804	9515	2390	134		265	35504
Mancha Alta	13	2930	799	399	455		40	14309	957	8		308	20205
Mancha Baja	14	1080	38	34	5975		35	14619				172	21953
Serranía Alta	15	20	44909	675		51205	1586	1424	1400			128	101347
Serranía Baja	16	24101	70424	23119	352	946	10241	9958	771	81		16045	156038
Serranía Media	17	7193	122530	20333	93	5177	10499	15389	4194	207		687	186302
Alcarria Alta	18	4738	5815	7403		305	17420	34473	13622	1869		629	86274
Alcarria Baja	19	4025	25548	469		2503	5286	20659	3096	33		147	61767
Campaña	20	6835	260	34			638	20005	4293	14		469	32549
Molina de Aragón	21		12594	23742		21876	46319	12497	14630	7131		172	138961
Sierra de Guadalupe	22		6718	18978		22198	3272	21214	8633	13766	7	380	95167
Campos de Oropesa	23			68				0				46	115
La Jara	24			10320				3999		2939	1204	10402	28864
La Mesa de Ocaña	25											731	731
La Sagra	26											126	126
Montes de Toledo	27	21		34666	494			41908	2586	128	5446	6870	92120
San Vicente	28			191	93			357		41		1233	1915
Campos de Talavera	29												
Toledo	30												
Torrijos	31				981			312				327	1620
<b>Total</b>		<b>236099</b>	<b>330850</b>	<b>236190</b>	<b>37459</b>	<b>104282</b>	<b>102695</b>	<b>516640</b>	<b>57617</b>	<b>29033</b>	<b>7633</b>	<b>55120</b>	<b>1713619</b>

esta esté ubicada en sitios donde las condiciones climáticas sean inadecuadas o adecuadas, respectivamente, para su existencia. De igual manera, el hecho de que no exista una especie en un lugar podría ser consecuencia bien de las actuaciones antrópicas del pasado, bien de las coacciones heterotípicas de otros organismos vivos de la comunidad o, quizás, a que no tuvo oportunidad de ecesis (Gandullo y Sánchez-Palomares, 1994). Sin embargo y de una forma general, podríamos indicar que los regímenes climáticos son los que determinan la distribución de las especies y de los biomas a través de los límites específicos de cada especie con respecto a la temperatura y la disponibilidad de agua. Por esta razón, y dado que el clima está cambiando (como puede demostrarse con la comparación de las temperaturas y precipitaciones medias en dos periodos diferentes, 1950-2006 y 1980-2006, Tabla 1, Capítulo 2), es interesante cuantificar la situación actual de las especies forestales en sus zonas de presencia de acuerdo a los rangos donde se constata que habitan o han habitado, para localizar aquellas masas que, ante un futuro cambio climático, serán más vulnerables por localizarse en sitios próximos a los límites donde pueden habitar.



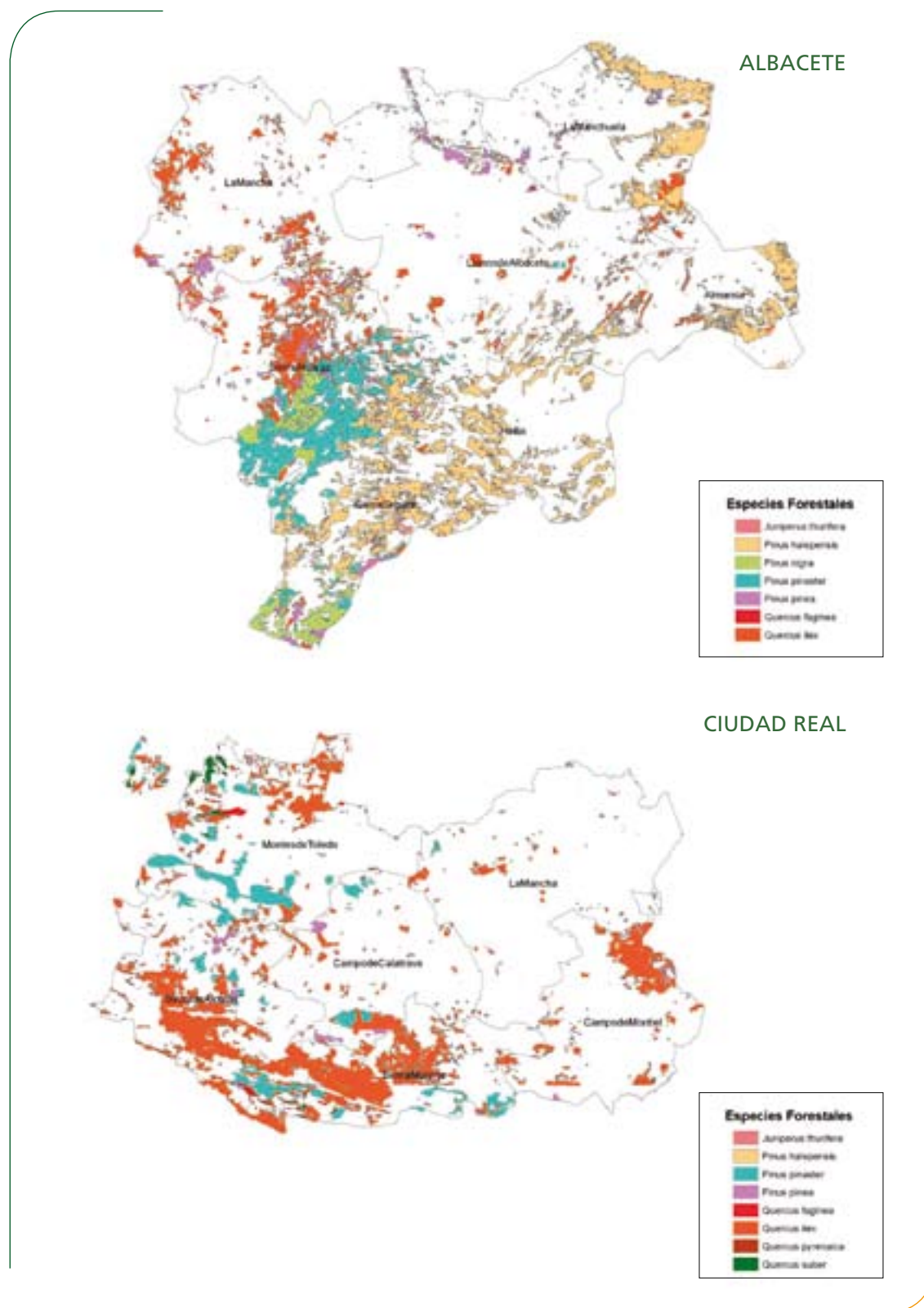


Figura 2: Distribución espacial de las 10 especies principales forestales que pueblan Castilla-La Mancha, para cada una de las 5 provincias que componen la comunidad.

## TOLEDO



## GUADALAJARA

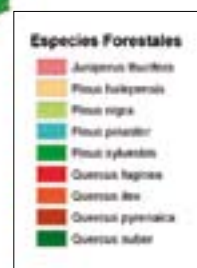
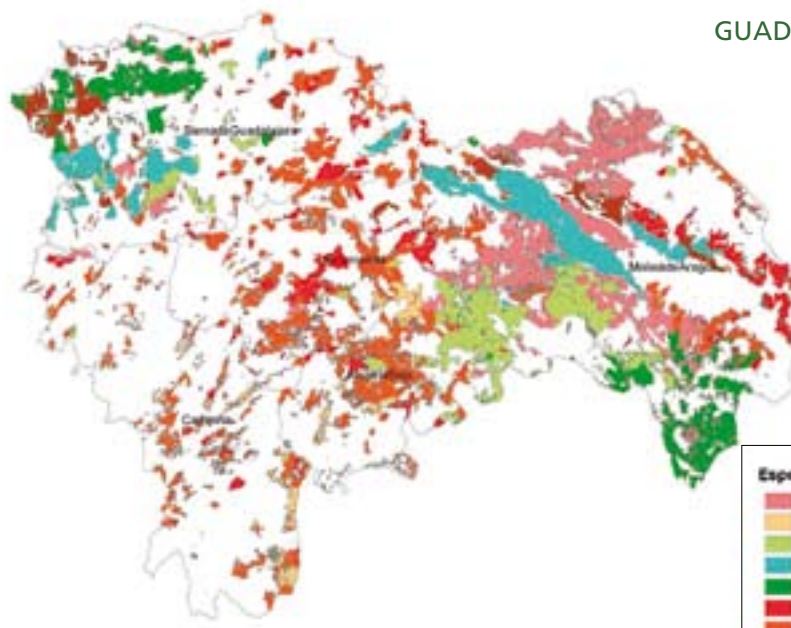
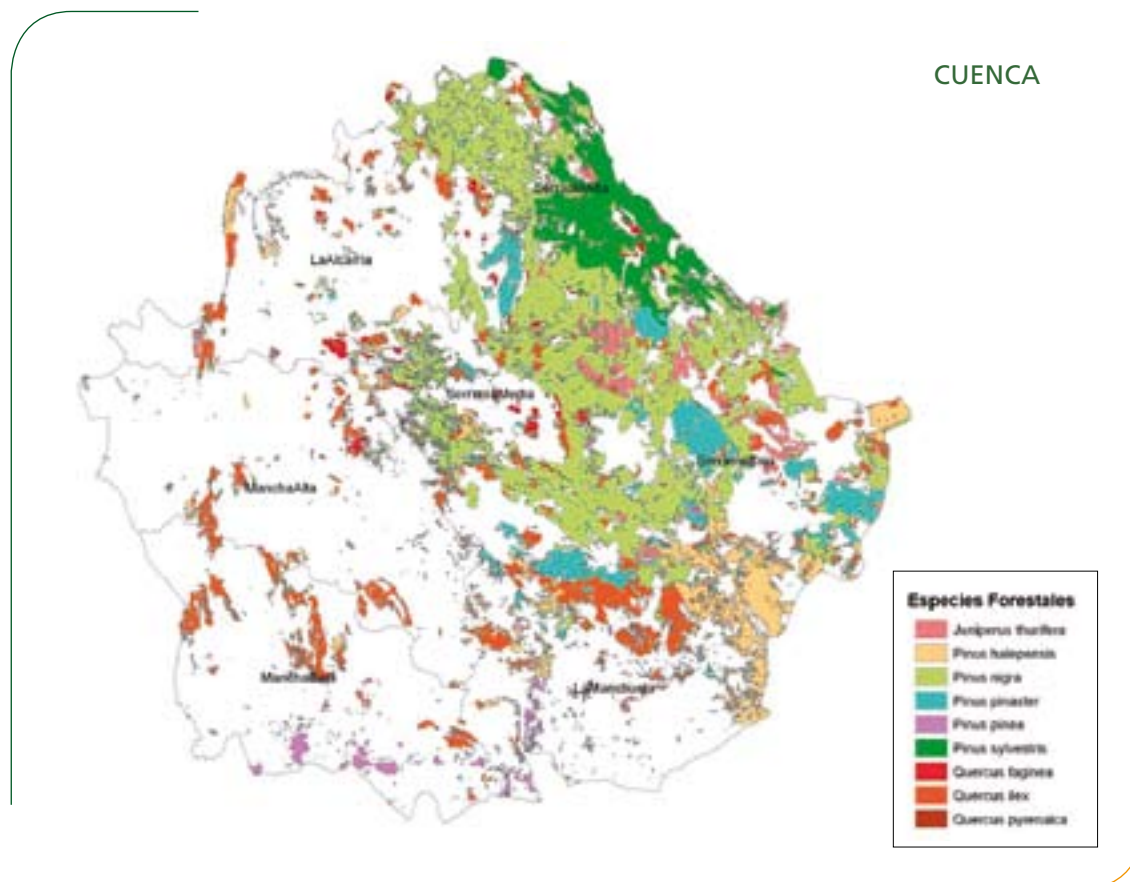


Figura 2 (continuación): Distribución espacial de las 10 especies principales forestales que pueblan Castilla-La Mancha, para cada una de las 5 provincias que componen la comunidad.



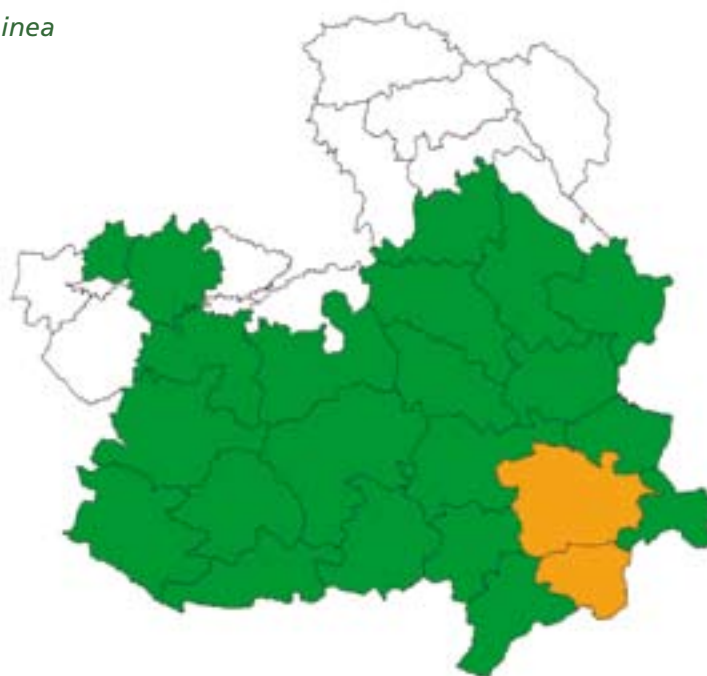
**Figura 2 (continuación):** Distribución espacial de las 10 especies principales forestales que pueblan Castilla-La Mancha, para cada una de las 5 provincias que componen la comunidad.

Así, siguiendo la metodología de Gandullo y Sánchez-Palomares (1994), podremos clasificar si una especie se encuentra en su hábitat central (rango del parámetro climático correspondiente dentro del cual se encuentran el 80% de las masas forestales estudiadas a nivel nacional), hábitats marginales (delimitado por los límites superior –valor máximo registrado en parcelas muestreadas- e inferior –valor mínimo registrado- y los valores del rango de hábitat central) y hábitat extramarginal, que ocurre cuando se sitúa fuera de los anteriores (ver Gandullo y Sánchez-Palomares, 1994). Dada la información climática aportada en el Capítulo 2 (De Castro) y las restricciones metodológicas propias del procedimiento, sólo hemos podido analizar tres variables (precipitación anual, precipitación de verano y temperatura media anual). De esta manera, la Figura 3 muestra, para cada especie y comarca donde actualmente está presente, si una especie está en su hábitat central, marginal o extramarginal, desde el punto de vista climático multivariante.

*Pinus halepensis*



*Pinus pinea*



■ Hábitat central.    ■ Hábitat marginal.    ■ Hábitat extramarginal.

**Figura 3:** Situación actual de las distintas especies forestales en cuanto al hábitat climatológico para cada comarca.

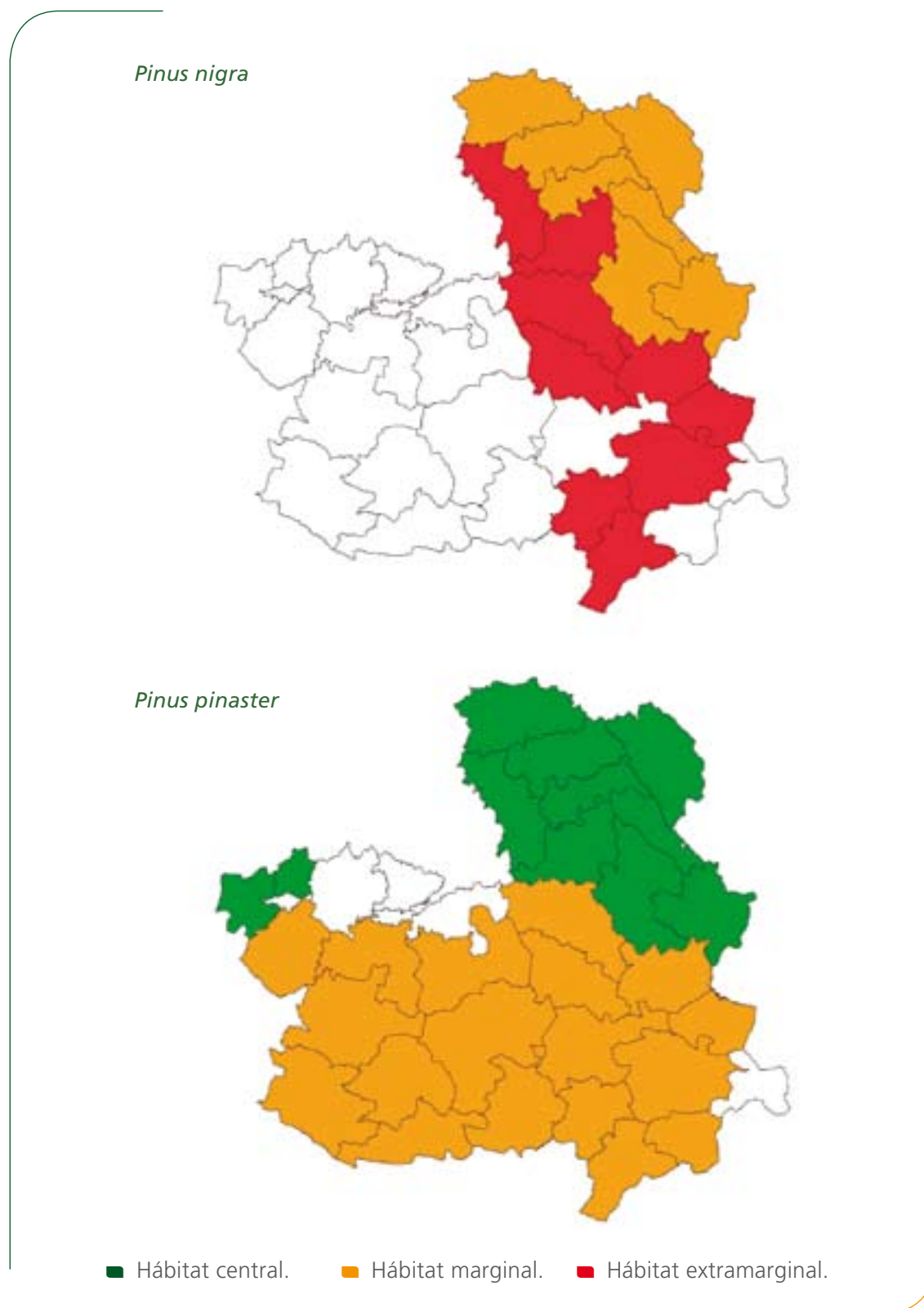


Figura 3 (continuación): Situación actual de las distintas especies forestales en cuanto al hábitat climatológico para cada comarca.

*Pinus sylvestris*



*Juniperus thurifera*



■ Hábitat central.    ■ Hábitat marginal.    ■ Hábitat extramarginal.

Figura 3 (continuación): Situación actual de las distintas especies forestales en cuanto al hábitat climatológico para cada comarca.

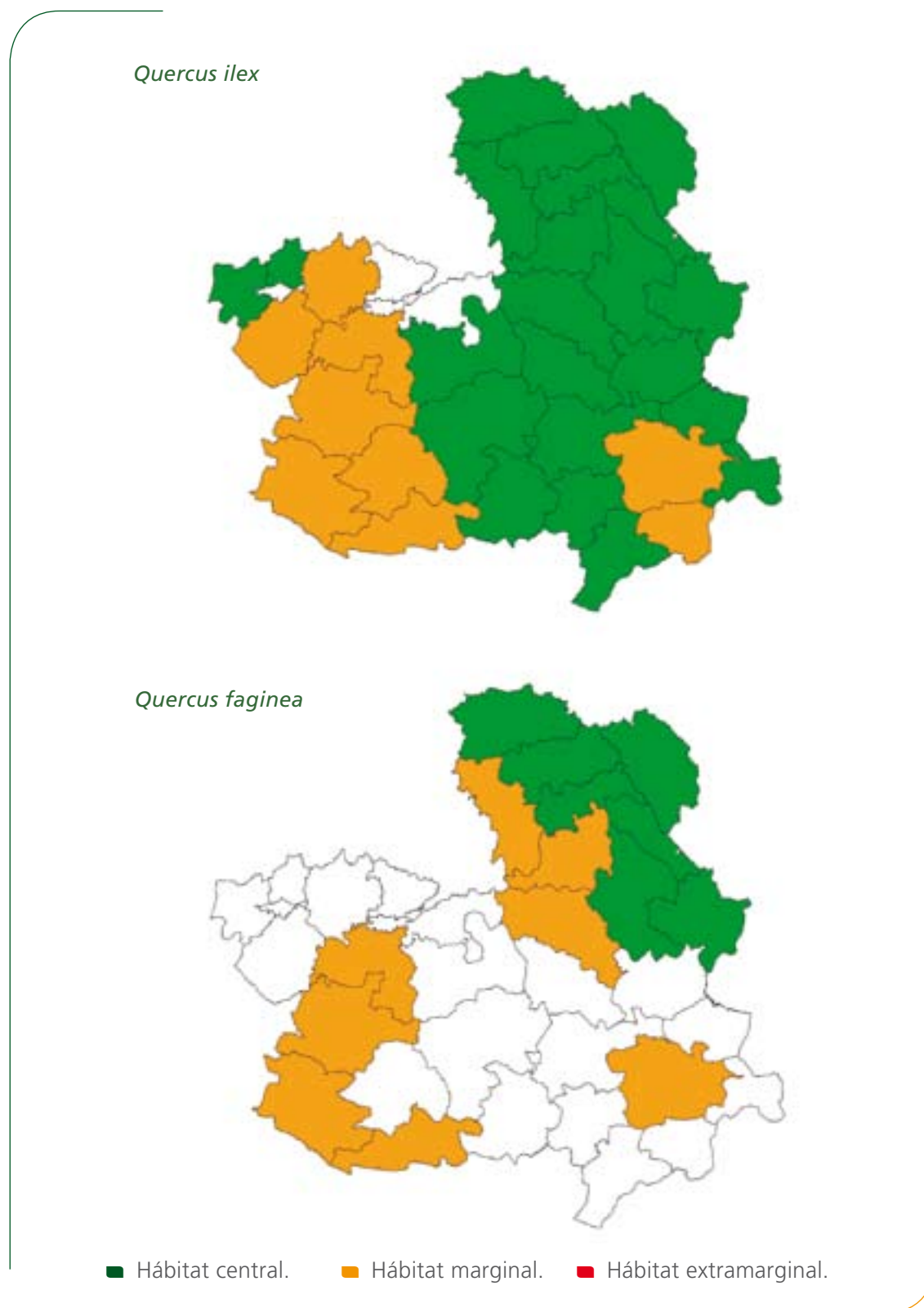
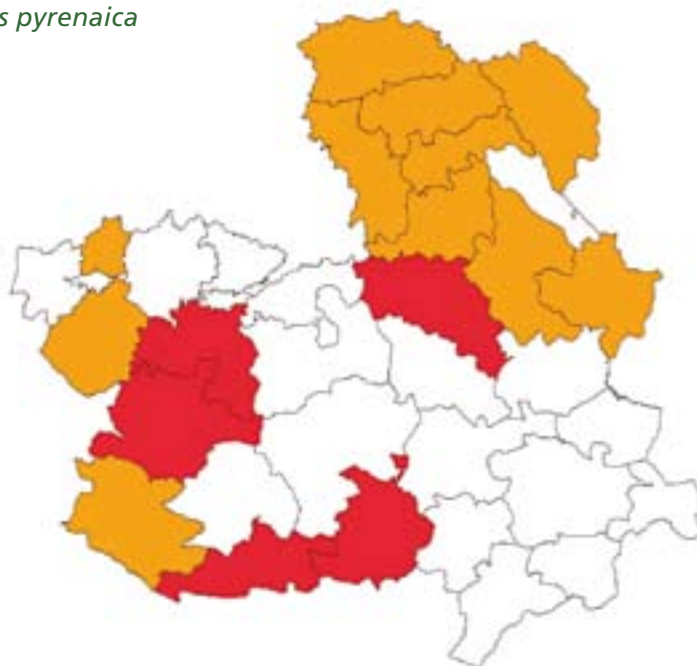


Figura 3 (continuación): Situación actual de las distintas especies forestales en cuanto al hábitat climatológico para cada comarca.

*Quercus pyrenaica*



*Quercus suber*



■ Hábitat central.    ■ Hábitat marginal.    ■ Hábitat extramarginal.

**Figura 3 (continuación):** Situación actual de las distintas especies forestales en cuanto al hábitat climatológico para cada comarca.



Los resultados que se derivan del análisis de esta figura indican que las especies mejor ubicadas en su hábitat actual, desde el punto de vista climático mencionado, son el pino carrasco (*Pinus halepensis*), el pino piñonero (*Pinus pinea*) y la sabina albar (*Juniperus thurifera*), dado que se encuentran en su hábitat central. En el otro extremo se encuentran el pino negral o laricio (*Pinus nigra*), el pino albar (*Pinus sylvestris*) y el rebollo (*Quercus pyrenaica*), todos ellos presentándose en CLM en su hábitat marginal y extramarginal. Finalmente, el resto de especies se presentan bien en su hábitat central-marginal (pino rodeno –*Pinus pinaster*-, la encina –*Quercus ilex*- y el quejigo –*Quercus faginea*-) o bien en su hábitat marginal (el alcornoque –*Quercus suber*-). En base a este análisis podríamos concluir que las especies situadas actualmente en los hábitats marginales y extramarginales serán las más sensibles a los cambios climáticos, fundamentalmente si estos cambios son en la misma dirección en la que los hábitats se hacen más marginales o extramarginales.

### 1.2 Productividad primaria neta actual en Castilla-La Mancha

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

Actualmente, no están publicadas en Castilla-La Mancha la PPN para cada una de las especies forestales mencionadas. No obstante, para este informe hemos realizado la estimación de las mismas. Para ello, nos basamos en los datos de existencias maderables dados por el IFN2 y aplicamos la metodología dada por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) para el cálculo de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero relacionadas con el sector LULUCF (IPCC, 1996b; IPCC, 2003). La ecuación general a aplicar es  $Bt = [V \cdot D \cdot BEF] \cdot (1 + R)$ , donde Bt es la biomasa seca total (aérea y subterránea), V es el volumen comercial dado por el IFN2 (m<sup>3</sup>), D.BEF es el producto que corresponde a un factor de expansión de biomasa para convertir el volumen comercializable en biomasa arbórea sobre el suelo (validados internacionalmente a través de la acción COST-E21, Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales –CREAF-) y R es el ratio biomasa subterránea a biomasa aérea. Esta misma ecuación ha sido utilizada aplicándola a los crecimientos corrientes en volumen para obtener una estimación de la PPN.

**Tabla 2:** Existencias (Área basimétrica –G-, Volumen madera con corteza –V-), crecimientos anuales medios absolutos y relativos en volumen (-ΔV- y -CcV-, respectivamente) y porcentaje que representa el volumen de cada especie respecto al total nacional en Castilla-La Mancha (2IFN, 1995)

<sup>1</sup> Incluye además: *Juniperus oxycedrus*, *J. communis*, *J. phoenicea*, *J. sabina*.

<sup>2</sup> Incluye: *Frangula alnus*, *Rhamnus alaternus*, *Populus alba*, *P. tremula*, *Salix spp.*, *Platanus spp.*, *Sambucus nigra*, *S. racemosa*, *Tamarix spp.*

<sup>3</sup> Incluye: Otros eucaliptos.

<sup>4</sup> Incluye: *Amelanchier ovalis*, *Euonymus europaeus*, *Myrtus communis*, *Acacia spp.*, *Phillyrea latifolia*, *Cornus sanguinea*, *Ailanthus altissima*, *Malus sylvestris*, *Celtis australis*, *Crataegus spp.*, *Pyrus spp.*, *Quercus rubra*, Otros *quercus*, *Ulmus spp.*, *Ilex aquifolium*.

Especies	G (m <sup>2</sup> )	Vcc (m <sup>3</sup> )	ΔV (m <sup>3</sup> /año)	CcV (%)	% España
<i>Juniperus thurifera</i> <sup>1</sup>	450,587	1,200,238	28,763	2.40	32.86
<i>Pynus halepensis</i>	1,431,286	5,148,508	202,854	3.94	12.62
<i>Pynus nigra</i>	3,047,792	15,708,417	455,593	2.90	34.21
<i>Pynus pinaster</i>	3,085,115	14,327,589	608,437	4.25	24.55
<i>Pynus pinea</i>	287,998	1,047,079	42,739	4.08	7.81
<i>Pynus sylvestris</i>	1,201,804	6,517,013	213,343	3.27	7.14
<b>TOTAL CONÍFERAS</b>	<b>9,504,582</b>	<b>43,948,844</b>	<b>1,551,730</b>	<b>3.53</b>	<b>12.09</b>
<i>Castanea sativa</i>	9,250	37,227	1,343	3.61	0.21
<i>Populus nigra</i>	55,515	341,433	40,052	11.73	5.22
<i>Quercus ilex</i>	1,462,670	2,954,073	-	-	8.17
<b>Otros árboles ripícolas<sup>2</sup></b>	<b>23,571</b>	<b>94,714</b>	<b>6,415</b>	<b>6.77</b>	<b>3.17</b>
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> <sup>3</sup>	11,744	43,836	11,000	25.09	1.38
<i>Quercus faginea</i>	432,353	1,055,544	34,769	3.29	10.58
<i>Quercus pyrenaica</i>	195,256	660,944	25,245	3.82	3.38
<i>Quercus suber</i>	97,314	235,038	-	-	2.08
Otras Frondosas <sup>4</sup>	63,337	152,799	17,634	11.54	1.92
<b>TOTAL FRONDOSAS</b>	<b>2,351,011</b>	<b>5,575,607</b>	<b>136,458</b>	<b>5.72</b>	<b>2.42</b>
<b>TOTAL ESPECIES</b>	<b>11,855,593</b>	<b>49,524,451</b>	<b>1,688,188</b>	<b>3.41</b>	<b>8.33</b>

En primer lugar, es necesario obtener los volúmenes comerciales (fuste) a nivel regional. De acuerdo a los datos proporcionados por el 2º Inventario Forestal Nacional (IFN2, 1995, dado que el 3º todavía no está publicado en nuestra región), Castilla-La Mancha posee el 8.33% del total nacional en cuanto a existencias (volumen con corteza, Tabla 2). De todas las especies, el pino laricio, la sabina albar, el pino rodeno, el pino carrasco y el quejigo son los que mayor porcentaje, respecto al total nacional por especies, representan (34, 33, 25, 13 y 11%, respectivamente, Tabla 2). En la misma tabla se pueden observar los crecimientos relativos corrientes (crecimientos absolutos en volumen maderable, divididos por las existencias actuales, en %) comprobándose que las coníferas crecen a una tasa media de un 3.53% anual, mientras que las frondosas lo hacen al 5.72% (nótese que en esta cifra no se ha considerado el crecimiento de la encina y del alcornoque, pues son datos no aportados por el IFN2). Esta información es una referencia que nos ilustrará a la hora de estimar las productividades primarias netas (PPN) de las distintas especies.

**Tabla 3:** Estimación de la biomasa seca total (aérea y subterránea, t/ha) y la productividad primaria neta (PPN, t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de biomasa seca) para las diferentes especies forestales que pueblan CLM. BEFD es el parámetro de expansión de volumen con corteza a biomasa seca total aérea y R es el ratio biomasa subterránea a biomasa aérea.

Especie	BEFD	R	Bt (t/ha)	PPN (t/ha.año)
<i>Juniperus thurifera</i>	0.80	0.34	12.50	0.30
<i>Pinus halepensis</i>	0.74	0.34	21.57	0.85
<i>Pinus nigra</i>	0.64	0.34	40.63	1.18
<i>Pinus pinaster</i>	0.55	0.34	44.61	1.89
<i>Pinus pinea</i>	0.73	0.34	27.28	1.11
<i>Pinus sylvestris</i>	0.62	0.34	51.80	1.70
<i>Quercus ilex</i>	1.28	0.33	9.70	
<i>Quercus faginea</i>	1.11	0.33	26.96	0.89
<i>Quercus pyrenaica</i>	1.11	0.33	33.51	1.28
<i>Quercus suber</i>	1.28	0.33	52.26	
RESTO spp			10.97	1.27

Así, utilizando la información de volúmenes y crecimientos anuales en volumen (Tabla 2), hemos aplicado la metodología mencionada para obtener las existencias actuales en biomasa seca y la PPN (Tabla 3). De la tabla se puede deducir que *Quercus suber*, *Pinus sylvestris*, *P. pinaster* y *P. nigra* son las formaciones forestales que más biomasa acumulan por ha (entre 40 y 52 t/ha de materia seca). En el otro extremo se encuentran los sabinarses y encinares (10-12 t/ha de materia seca). En cuanto a la productividad primaria neta actual, todas las especies presentan valores que oscilan entre 0.9 y 1.9 t/ha.año, excepto para los sabinarses que desciende a 0.3 t/ha.año. Todos estos valores son razonablemente esperados, dada la íntima relación existente entre las especies y el hábitat que ocupan. Datos concretos obtenidos por nosotros en la región de Castilla-La Mancha, muestran que para encinares regenerados tras incendios, con 7 años de edad, la PPN actual (del último año analizado) llega hasta 3.1 t/ha.año, mientras que la PPN media anual (total biomasa dividida por la edad) es de 1.4 t/ha.año, no habiendo alcanzado todavía el máximo esperable (López-Serrano et al., en revisión). Para otros tipos de encinares no recientemente quemados (y fuera de nuestra comunidad) se obtuvieron valores de 9.1-10.2 t/ha.año (Sabaté et al., 2002).

## 2. Proyección en diferentes escenarios

En el Capítulo 2 se han descrito los diferentes escenarios (B1, B2, A2, A1) que serán analizados en los 3 periodos tridecenales (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). Estos escenarios son los

descritos en el “Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones” (IPCC, 2001) y se refieren a las emisiones globales antropogénicas de dióxido de carbono a lo largo del presente siglo. A modo de recordatorio indicar que el escenario B1 corresponde a un escenario de emisiones bajas, el B2 a uno de emisiones medias-bajas, el A2 al de emisiones medias-altas y el A1 al de emisiones altas. Según se muestra en la Tabla 4, estos escenarios supondrán un aumento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> que provocará aumentos ligeros en la temperatura y descensos poco apreciables en la precipitación en cualquier escenario en el primer periodo de simulación (2011-2040). Sin embargo, en el último periodo (2071-2100) habrá cambios significativos en todos los parámetros climáticos. Así en la temperatura media anual el aumento oscilará entre un +2.8°C a +5.7°C (escenarios B1 a A1, respectivamente), la precipitación media anual descenderá entre un -12.2% a un -24.8% y la precipitación de verano entre -19.8% a -40.1% (escenarios B1 a A1). Ante esta futura situación, vamos a analizar que ocurriría en cuanto a la distribución espacial de los bosques, en cuanto a la productividad primaria neta y, finalmente, qué otros efectos adicionales podría tener sobre nuestros bosques.

## 2.1 Estimación de la distribución espacial potencial de las masas forestales en los distintos escenarios y periodos futuros

Según el IPCC (2002) muchos resultados de simulaciones a escalas regional y mundial presentados en los informes del IPCC, se han obtenido en base a dos suposiciones conceptualmente diferentes sobre la forma en la que los ecosistemas responden al cambio mundial. El enfoque ‘*movimiento de ecosistemas*’ supone que los ecosistemas migren relativamente intactos a nuevos emplazamientos que tengan un clima y entorno parecidos, lo que constituye una simplificación excesiva de lo que ocurrirá en la realidad. En base a los conocimientos ecológicos actuales, este enfoque es muy improbable que ocurra en realidad debido a diferencias en la tolerancia climática de las distintas especies dentro del ecosistema, la variabilidad genética dentro de muchas de ellas, sus diferentes longevidades, sus distintas capacidades migratorias, y los impactos de especies invasoras. Sin embargo, éste tiene como ventaja el empleo de la relación bien demostrada entre el emplazamiento de un ecosistema y el clima existente, para estimar la nueva distribución del ecosistema en escenarios con climas cambiados, siendo útil para estudiar escenarios del cambio climático y sus efectos potencialmente importantes.

El segundo enfoque, conocido como ‘*modificación de ecosistemas*’, asume que a medida que el clima y otros factores ambientales cambien, se produzcan cambios in situ en la composición y dominio de las especies. La población de algunas de estas especies disminuirá o se extinguirá localmente, mientras que la de otras aumentará. La longevidad de los individuos, la estructura de la edad de las poblaciones existentes, y la llegada de especies invasoras moderarán estos cambios. El resultado será ecosistemas de tipos bastante diferentes de los que vemos hoy en día. El problema con este enfoque es que es muy difícil de utilizar para algún pronóstico práctico

sobre posibles cambios, debido a la falta de información detallada sobre la distribución actual de cada una de las especies y a nuestro inadecuado conocimiento de sus interacciones. Por lo tanto, la mayoría de los estudios regionales y mundiales que intentan evaluar los impactos potenciales del cambio climático han tenido que utilizar el enfoque ‘movimiento de ecosistemas’.

Por estas razones y por las argumentadas en el apartado inicial de este informe (Introducción), seguiremos una aproximación basada en los movimientos de los ecosistemas. Así, en base a los potenciales cambios climáticos medios de futuro (Tabla 4), en este informe se han simulado las futuras temperaturas y precipitación para cada comarca de Castilla-La Mancha. Teniendo en cuenta exclusivamente estas variables climáticas, y conociendo los rangos donde habitan cada una de las diez especies forestales consideradas (Gandullo y Sánchez-Palomares, 1994, Díaz-Fernández et al, 1995; Jiménez et al., 1996; Ceballos y Ruiz de la Torre, 1979), se han clasificado las comarcas agrarias según el criterio del hábitat central, marginal y extramarginal (visto en el apartado anterior) para cada una de dichas especies forestales en cada periodo tridecenal y para cada escenario de cambio climático.

**Tabla 4:** Cambios en las temperaturas medias anuales (°C), precipitación anual (%) y precipitación de verano (%) para los cuatro escenarios de cambio climático y los tres periodos tridecenales en Castilla-La Mancha (valores medios y coef. de variación –CV–)

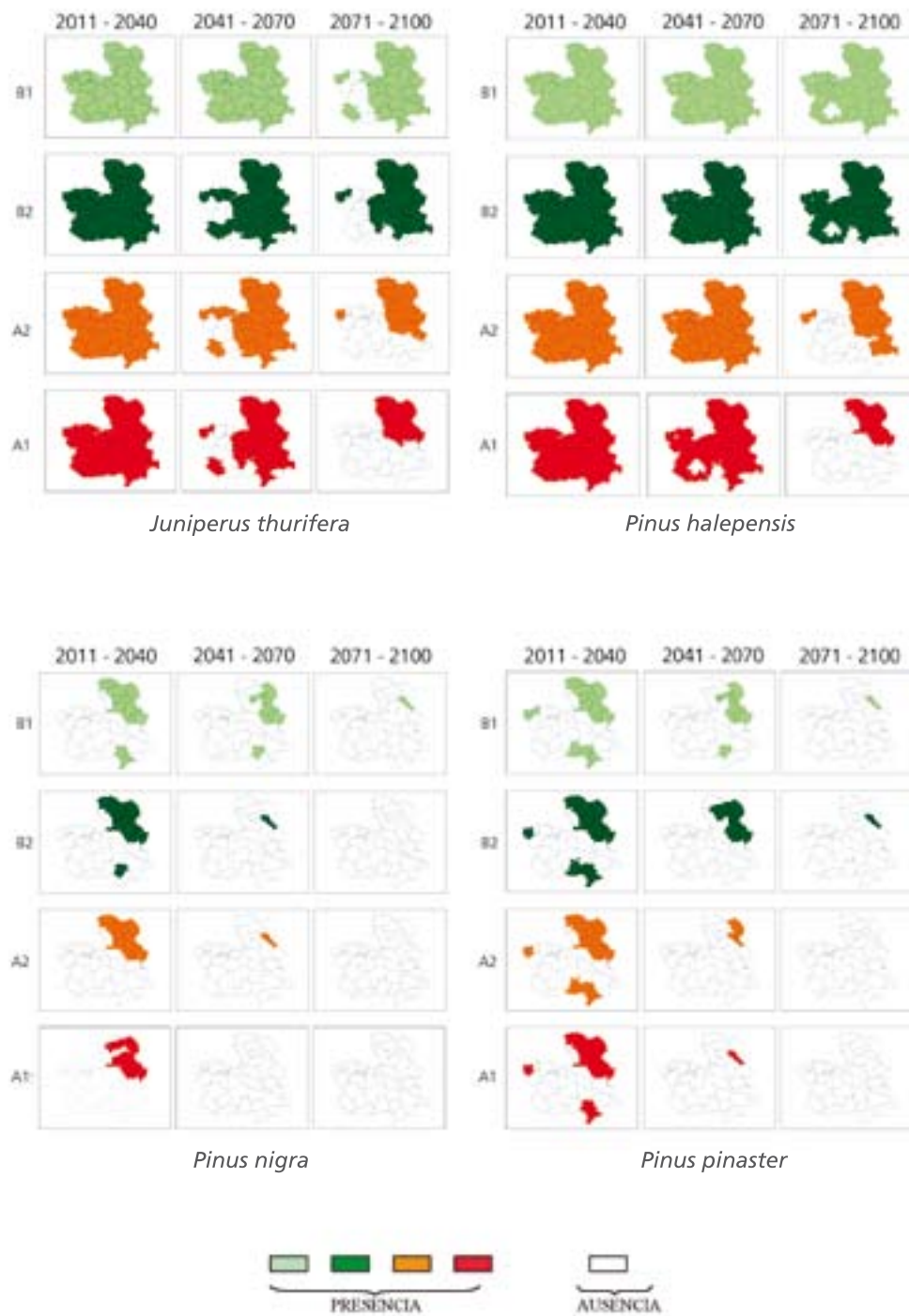
Periodos	Escenarios	T anual (°C)	CVT anual (%)	P anual (%)	CVP anual (%)	P ver (%)	CVP ver (%)
2011-2040	B1	1.0	3.3	-4.5	-13.0	-7.3	-19.3
2041-2070	B1	1.9	3.2	-8.1	-13.0	-13.2	-19.9
2071-2100	B1	2.8	3.2	-12.2	-13.0	-19.8	-19.9
2011-2040	B2	1.2	3.3	-5.4	-13.0	-8.7	-19.8
2041-2070	B2	2.4	3.2	-10.5	-13.0	-17.0	-19.9
2071-2100	B2	3.5	3.2	-15.0	-13.0	-24.3	-19.9
2011-2040	A2	1.3	3.2	-5.6	-13.0	-9.1	-19.8
2041-2070	A2	2.8	3.2	-11.9	-13.0	-19.3	-19.8
2071-2100	A2	4.9	3.2	-21.1	-13.0	-34.2	-19.9
2011-2040	A1	1.4	3.3	-6.0	-13.0	-9.8	-19.9
2041-2070	A1	3.3	3.2	-14.4	-13.0	-23.2	-19.9
2071-2100	A1	5.7	3.2	-24.8	-13.0	-40.1	-19.9

La presencia o ausencia potencial de una determinada especie en una comarca, ha sido asignada mediante la técnica de Análisis Discriminante. Las funciones de clasificación utilizadas para ello se han obtenido de los datos actuales de presencia o ausencia por comarca, utilizando variables continuas definidas tomando como base los parámetros climáticos actuales y los umbrales superiores o inferiores donde una especie habita (López-Serrano, no

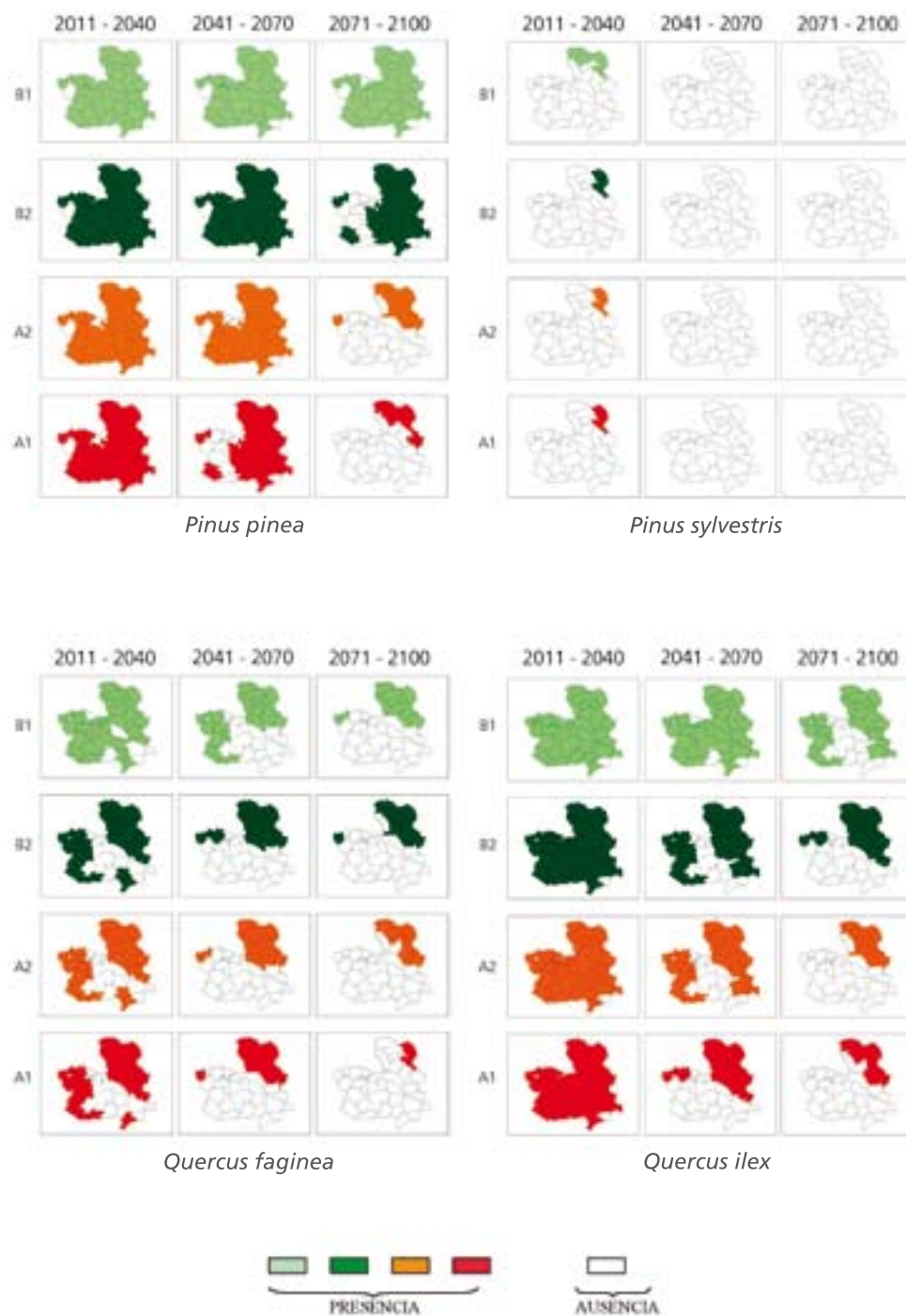
publicado). Esto ha sido así para aquellas especies forestales donde actualmente los datos permitían realizar este tipo de análisis, esto es, donde se encontraron una gama aceptable de situaciones (combinaciones posibles) en cuanto al tipo actual de hábitat. Sin embargo, para otras especies (p.e. *Pinus halepensis*, *Juniperus thurifera*), este no era el caso, dado que prácticamente en todas las comarcas la especie se presenta en su hábitat central. Para esta situación, la asignación de presencia o ausencia potencial de una especie en una comarca, se ha realizado mediante un algoritmo que clasificaba como ausente a una especie cuando en más de una variable climática su hábitat previsto correspondía al extramarginal. Finalmente, se ha optado por asignar la presencia o ausencia de una especie en una comarca concreta exclusivamente en función de su hábitat climático, independientemente de que actualmente esté o no presente, dado que no es posible conocer la razón por la cual una especie no está actualmente en una comarca (ver Figura 3 donde aparecen clasificadas las comarcas según su hábitat actual para cada una de las especies,). Esto se ha realizado para todas las especies excepto para el alcornoque (*Quercus suber*), ya que se sabe muy bien el motivo por el cual actualmente no se presenta en todas las comarcas que potencialmente (bajo el punto de vista climático) podría darse. Este motivo es que esta especie se desarrolla únicamente en sustratos silíceos, lo cual limita grandemente su implantación.

La Figura 4 muestra los resultados de la simulación mencionada para cada especie y para cada escenario en cada uno de los tres periodos tridecenales. Como era de suponer, cuanto más desfavorable es un escenario y más lejano es el periodo analizado, más adversas son las condiciones ambientales que, lógicamente, limitarán la presencia de las especies forestales. Sin embargo, las respuestas reales de la distribución de especies forestales pueden variar significativamente en función de su capacidad colonizadora, interacciones entre especies, la fragmentación del territorio y perturbaciones. Por tanto los rangos de distribución real pueden ser aún más reducidos que los señalados en esta simulación.

Los resultados de esta simulación (Figura 4) muestran que dentro del género *Pinus* hay que destacar la diferencia entre especies como el *P. halepensis* y el *P. pinea* frente al resto. Estas dos especies mantienen potencialmente su presencia en todos los escenarios y hasta el segundo periodo tridecenal, reduciéndose paulatinamente su presencia en el tercer periodo conforme se pasa del escenario B1 para finalmente quedar reducido a la zona noreste de CLM en el escenario A1. Parece una huida hacia el noreste de la comunidad, buscando las alturas del Sistema Ibérico. Este comportamiento es similar para la especie *Juniperus thurifera*. Sin embargo, para el resto de pinos (*Pinus pinaster*, *P. nigra* y *P. sylvestris*) la desaparición es mucho más rápida, comenzando ésta en el escenario B1 en el 2º periodo y desapareciendo completamente en el 3º periodo en todos los escenarios para las especies *P. pinaster* y *P. nigra*, mientras que el *P. sylvestris* desaparece completamente de la región a partir del 2º periodo en cualesquiera de los escenarios.

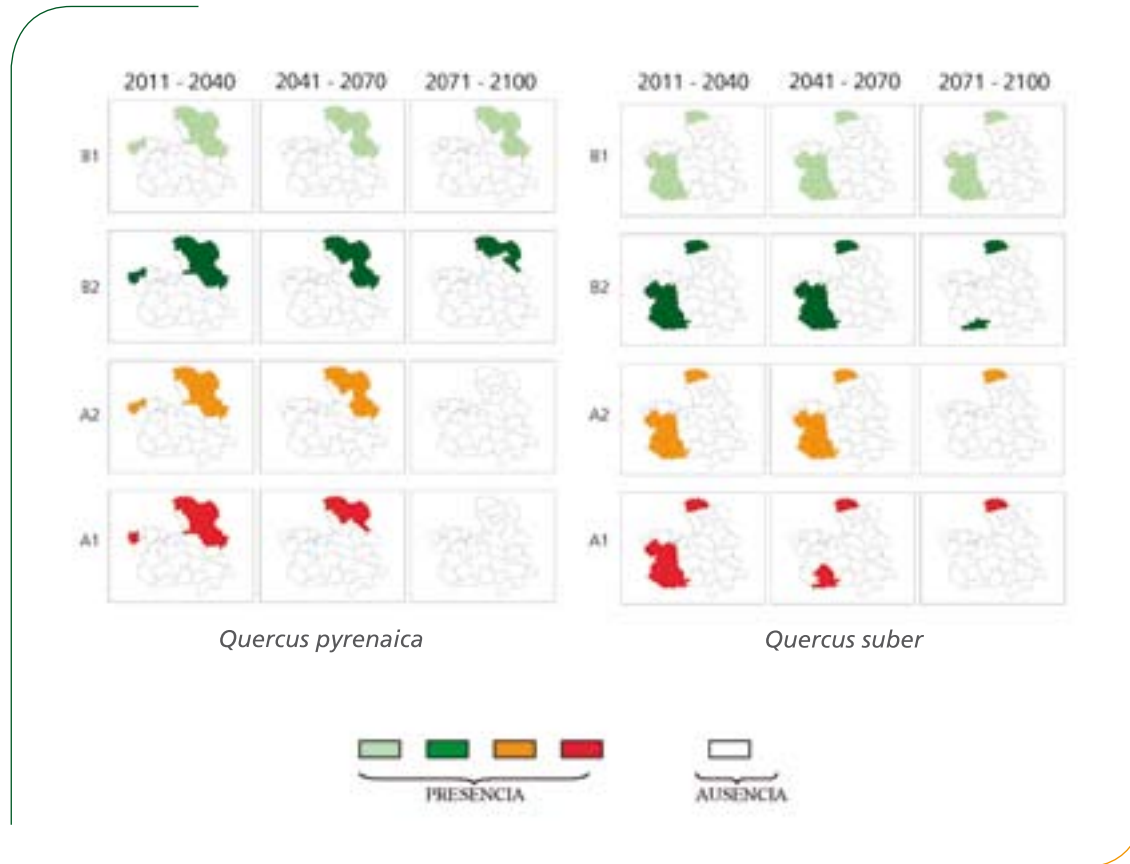


**Figura 4:** Predicciones, en cuanto a presencia o ausencia, para cada una de las 10 especies forestales que potencialmente podrían poblar las comarcas agrarias de Castilla-La Mancha, para cada periodo tridecenal del siglo XXI y para cada uno de los cuatro posibles escenarios de emisiones: B1 (emisiones bajas), B2 (emisiones medias-bajas), A2 (emisiones medias-altas) y A1 (emisiones altas).



**Figura 4 (continuación):** Predicciones, en cuanto a presencia o ausencia, para cada una de las 10 especies forestales que potencialmente podrían poblar las comarcas agrarias de Castilla-La Mancha, para cada periodo tridecenal del siglo XXI y para cada uno de los cuatro posibles escenarios de emisiones: B1 (emisiones bajas), B2 (emisiones medias-bajas), A2 (emisiones medias-altas) y A1 (emisiones altas).





**Figura 4 (continuación):** Predicciones, en cuanto a presencia o ausencia, para cada una de las 10 especies forestales que potencialmente podrían poblar las comarcas agrarias de Castilla-La Mancha, para cada periodo tridecenal del siglo XXI y para cada uno de los cuatro posibles escenarios de emisiones: B1 (emisiones bajas), B2 (emisiones medias-bajas), A2 (emisiones medias-altas) y A1 (emisiones altas).

Para el género *Quercus* se produce un comportamiento similar al de los pinos pero mucho más acentuado. El *Q. ilex* parece ser la especie que sigue el comportamiento más parecido al *P. halepensis* y *P. pinea*, pero diferenciándose de ellos en que parece que el movimiento espacial de las masas es, hasta el 2º periodo, hacia el este y el oeste simultáneamente, para finalmente quedar reducido, al igual que los pinos, al noreste de la comunidad. Este *Quercus* se mantiene potencialmente en todas las comarcas hasta finales del primer periodo tridecenal, comenzando a desaparecer en la zona central de CLM en el 2º periodo, y quedando reducida a la zona noreste al final del tercer periodo en los escenarios A2 y A1. *Quercus faginea* es la especie que sigue un comportamiento parecido a la encina pero con un desfase de 30 años, es decir, ya en el primer periodo, la situación es similar a la de la encina en su segundo periodo. *Quercus pyrenaica* es una de las coercíneas más afectadas con el cambio climático (al igual que *P. nigra* y *P. sylvestris*), pues desde el primer periodo (y para cualesquiera de los escenarios) se produce una desaparición en las comarcas centrales donde estaba presente (su presencia actual es extramarginal, ver Figura 3). Finalmente, dadas las peculiaridades del *Quercus suber*, prácticamente no será afectado

por el cambio climático en el escenario B1. Para los escenarios B2 y A2, no será hasta el final del 3<sup>er</sup> periodo cuando dejará de estar presente en la mayor parte de las comarcas donde lo estaba, quedando reducido a la comarca de la Sierra de Guadalajara. Sin embargo, en el escenario A1 la desaparición comenzará en el 2<sup>o</sup> periodo, quedando reducido en el 3<sup>er</sup> periodo, como en el caso del escenario A2, a la comarca de la Sierra de Guadalajara.

Como conclusión, y tal como era de suponer, las especies más resistentes al cambio climático serán el *Pinus halepensis*, *P. pinea*, *Juniperus thurifera*, *Quercus ilex* y *Q. suber*. En el lado opuesto estarán el *Pinus sylvestris*, *P. nigra* y *Quercus pyrenaica*.

A pesar de lo indicado anteriormente, existe gran incertidumbre acerca de la capacidad de los ecosistemas para migrar. Según el IPCC (2002), las simulaciones de ecosistemas y clima sugieren que las zonas climáticas apropiadas para especies de plantas templadas y boreales se pueden desplazar unos 200–1.200 Km. hacia el norte para el año 2100 (ya que se estima que la mayoría de las masas terrestres de latitudes media a alta se calienten en unos 2–8°C). Las pruebas paleoecológicas sugieren que, en el pasado, la mayoría de las especies de plantas migraron sólo unos 20–200 Km por siglo, aunque dicha migración puede haberse limitado por el régimen del cambio climático en esa época. Para muchas especies de plantas, la migración se puede haber retrasado aún más debido a la fragmentación de hábitats apropiados por actividades humanas. Por esto, el desplazamiento de la cubierta de bosques hacia los polos se puede encontrar décadas o siglos por detrás de los cambios en las temperaturas, tal y como ocurrió en la migración de diferentes especies de árboles después de la última glaciación. También se pone en duda si el desarrollo de la estructura del suelo puede seguir el ritmo del cambio en el clima. Por esta razón, el conocimiento que se tiene de las peculiaridades de las especies más resistentes será de gran interés en la lucha con el cambio climático, siempre que el hombre sea capaz de adelantarse a los acontecimientos.

Nuestro informe presenta unos resultados, en cuanto a la distribución potencial de las especies forestales, en base a una metodología propia donde no se han utilizado las simulaciones basadas en los modelos bioclimáticos que definen el nicho de cada especie (tales como los definidos por Garzón et al., 2006,) o modelos dinámicos de vegetación global (Hybrid v4.1, Friend et al., 1997, citado en White et al, 1999). Aparentemente parece una metodología simplista, pero dada la situación actual de los modelos y el conocimiento que se tiene de la verdad del terreno (verdad de composición y distribución espacial de las especies forestales al nivel de detalle que requieren los modelos, interacciones entre especies, ...), ofrece resultados consistentes y avalados por simulaciones de esos mismos modelos a nivel nacional (no regional, como es nuestro caso). Así, el Informe OSE (OSE, 2007), indica que “España será, previsiblemente, uno de los países de la UE más afectados por el cambio climático, con un impacto muy negativo sobre los principales tipos de hábitat forestales, fundamentalmente

*Pinus sylvestris*, *Quercus pyrenaica*, *Q. faginea* y *P. nigra* subs. *Salzmanii*" y "los resultados para los bosques mediterráneos muestran una disminución importante de las zonas potencialmente utilizables, lo que implicaría desplazamientos altitudinales y latitudinales". De igual manera, el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2005), en su informe sobre principales conclusiones de los impactos del cambio climático, indica que "el cambio climático, junto a la regresión del medio, puede aumentar la sensibilidad de muchas especies, dado que no podrán ocupar terrenos en los que estuvieron con anterioridad, debido a erosión u otros cambios".

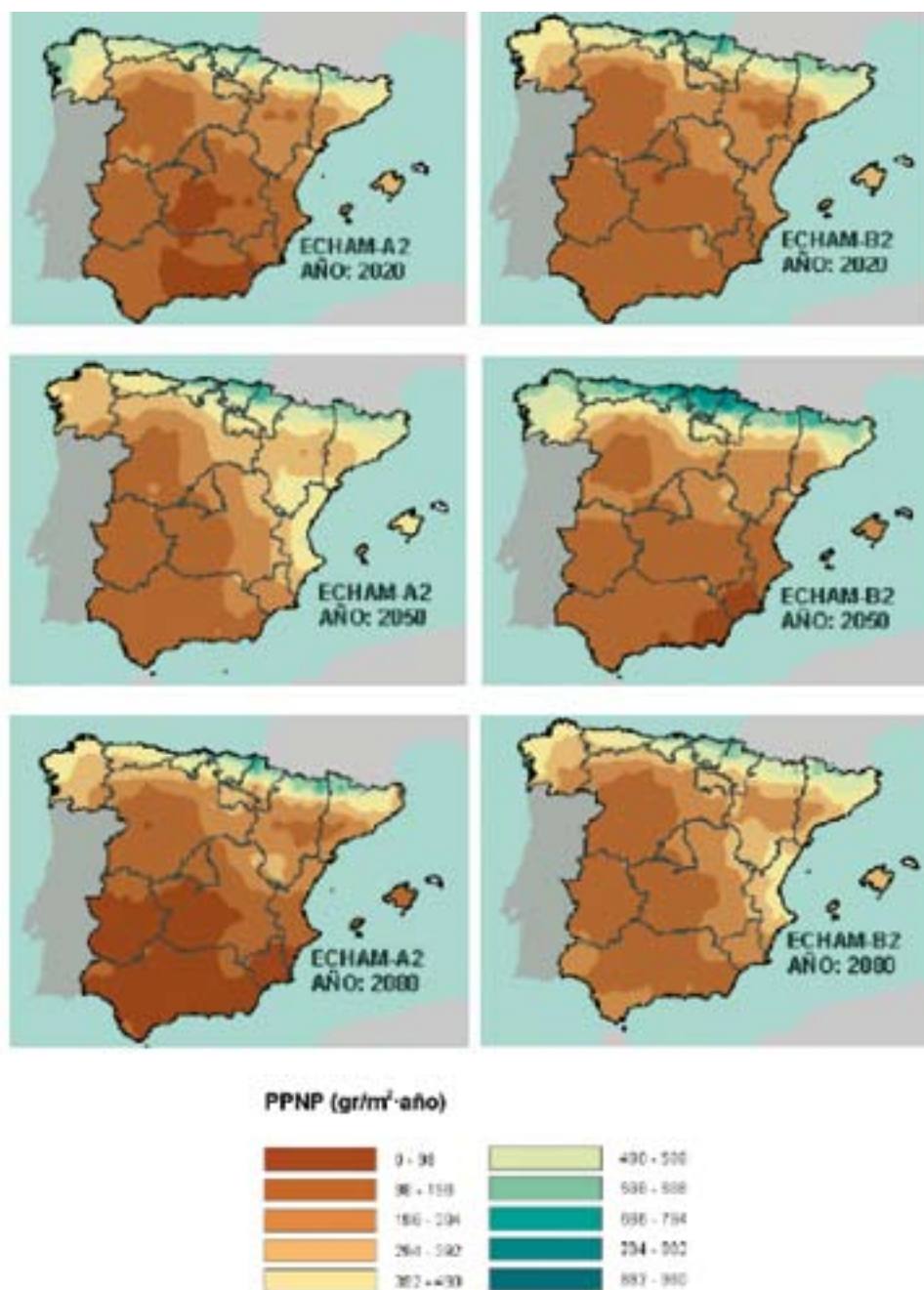
### 2.2 Efectos del cambio climático en la productividad primaria neta

Conocidos los conceptos de PPN y PNE, es imprescindible saber que éstos están gobernados por parámetros climáticos (radiación, temperatura, precipitación), de tal manera que a mayor radiación, temperatura y humedad (todo hasta ciertos límites), la fotosíntesis y respiración autotrófica aumentan, aumentando la PPN. Sin embargo, también aumenta la respiración heterotrófica, con lo cual el balance (PNE) no está tan claro. A su vez, la duración de las hojas en los árboles (y de las raíces finas) está ligada fundamentalmente a la temperatura, con lo que un aumento de la misma, hará que los árboles perennifolios las renueven más a menudo y permanezcan menos tiempo en el árbol (mayor gasto en renovar dicho componente) y, por el contrario, los caducifolios mantengan más tiempo las hojas durante su ciclo vegetativo, teóricamente aumentando la productividad (Sabaté et al., 2002; Peñuelas et al., 2004). Finalmente, al disponer en la atmósfera de mayor cantidad de CO<sub>2</sub> (actualmente la concentración es de aproximadamente 370-390 ppm) aparentemente se aumentará la fotosíntesis, lo cual conlleva a su vez un aumento en la eficiencia del uso del agua. Pero si esta agua está limitada (caso muy probable) entonces los efectos positivos de la fertilización con CO<sub>2</sub> desaparecen e incluso podrían provocar daños estructurales en las hojas (calentamiento excesivo, Winnet, 1998).

Pero en un mundo cambiante y, en nuestro caso concreto de previsiones de futuro para CLM, donde la temperatura media aumentará y las precipitaciones se reducirán, lo más probable es que tanto la PPN y la PNE se reduzcan, dependiendo de las especies consideradas en los hábitats que ocupen, en caso de poder migrar. El principal factor limitante, en caso de CLM, es la disponibilidad de agua: el cambio climático aumentará el estrés hídrico de nuestra vegetación, la cual ya vive, en muchos casos, al límite de sus posibilidades, como en el caso de algunos encinares y pinares que presentan tasas de evapotranspiración iguales a las de precipitación.

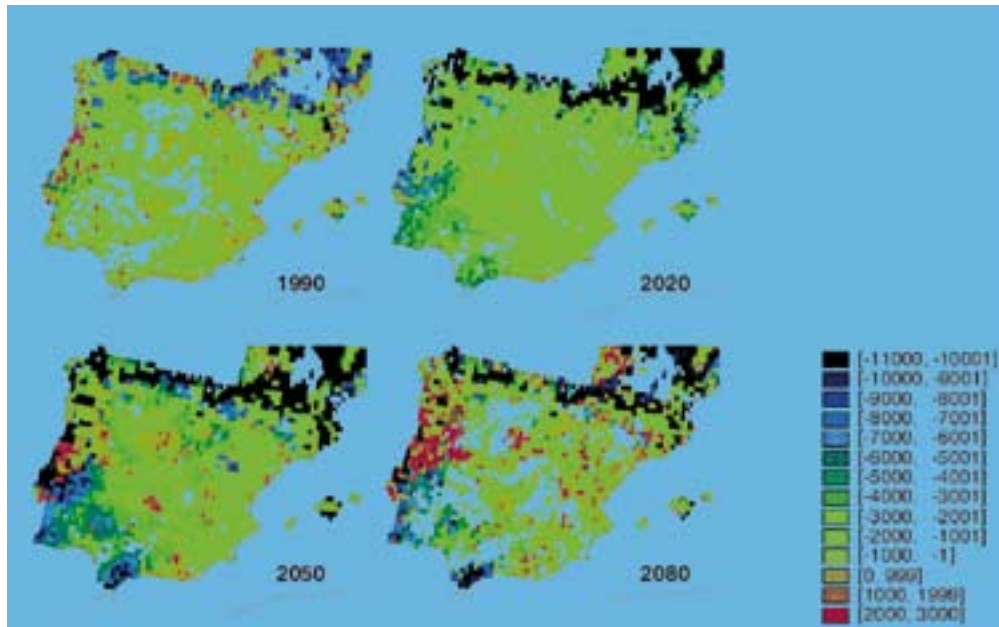
Las especies resistentes –típicamente mediterráneas- como son *P. halepensis*, *P. pinea*, *Juniperus thurifera* y *Quercus ilex*, son las que, en caso de no migrar, reducirían la PPN. En caso de que lograsen alcanzar hábitats ubicados al noreste de CLM, quizás aumentarían su PPN, dependiendo de los suelos y microclimas donde se instalasen. Para el resto de especies (*Pinus pinaster*, *P. nigra*,

*P. sylvestris*, *Quercus faginea*, *Q. pyrenaica*, *Q. suber*), en el caso de que puedan migrar y, por consiguiente subsistir, reducirían su PPN.



**Figura 5:** Simulación de la productividad primaria neta potencial (PPNP) para toda España en dos escenarios ECHAM-A2 y ECHAM-B2, en diferentes fechas (2020, 2050 y 2080). Fuente: Sostenibilidad en España 2007 (OSE, 2007).

En cuanto a la PNE es difícil concluir. Lo más probable es que descienda, incluso pueda llegar a ser negativa en algún periodo (si fuera prolongadamente negativa, la especie desaparecería). No obstante, es preciso realizar más estudios para poder entender con profundidad el funcionamiento de los balances de carbono incluyendo la respiración heterotrófica.



**Figura 6:** Estimación de la producción neta del ecosistema (kg/ha.año) en los bosques de la Península Ibérica. Los mapas representan la situación en los años 1990, 2020, 2050 y 2080. FUENTE: Oficina Española de Cambio Climático: Principales Conclusiones de la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático, 2005.

Según los modelos de cambio climático utilizados (OSE, 2007), se prevé un descenso de la PPN en España y también en CLM en los años 2020, 2050 y 2080. A nivel nacional, la PPN media será algo superior bajo el escenario B2, con una PPN un 10% más elevada en el periodo 2071-2100 que la predicha por el mismo modelo bajo el escenario A2 (Figura 5). Así, en el escenario B2, la PPN será de 2.71, 2.52 y 2.56 t ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> de materia seca en los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente. Para el escenario A2 se prevé una PPN de 2,65, 2.52 y 2.31 t ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> de materia seca. Concretamente, a nivel CLM y en el escenario A2, la PPN potencial media pasa de 1.66 t ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> de materia seca durante el primer periodo tridecenal (2011-2040) a 1.35 t ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> en el tercer periodo (2071-2100). Las comarcas situadas en la zona noreste de CLM son la que presentaría una PPN mayor en comparación con el resto.

En cuanto a la PNE, la Figura 6 muestra una simulación realizada utilizando el modelo GOTILVA+ (Sabaté et al., 2002; MMA, 2005), para simular el crecimiento de los bosques europeos bajo diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático definidos por el IPCC. El clima de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (IPCC 2001. Third Assessment Report). Los valores negativos indican que el territorio se comporta como un sumidero neto de carbono, desde moderado (tonos amarillos y verdes) a fuerte (tonos azules y negros). Los valores positivos indican que el territorio se comporta como una fuente neta de carbono (tonos anaranjados y rojos). 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 invertirán su papel de sumideros para transformarse en emisores netos de carbono a la atmósfera.

### 2.3 Otros efectos en los bosques

Aparte de la información aportada en la Tabla 4, donde las temperaturas medias aumentan y las precipitaciones, tanto las anuales como las de verano, disminuyen, la simulaciones de cambio climático indican (ver Capítulo 2, De Castro) que, en CLM, la oscilación térmica diaria, a final de siglo XXI, tenderá a ser creciente en los diversos escenarios de cambio climático. Hay que reseñar que las oscilaciones se suavizan en invierno en todas las comarcas y se acrecientan en primavera (en la mitad sur) y en verano en las regiones del interior. Estacionalmente se prevén las máximas reducciones en la precipitación en primavera y verano, seguido a distancia del otoño, y en los escenarios de altas emisiones. Estas reducciones se moderan en escenarios de menor emisión. En invierno las reducciones presentan tendencias muy pequeñas, incluso en escenarios de altas emisiones (A1). Además, la variabilidad interanual de las temperaturas medias anuales y estacionales, así como las precipitaciones, tendería a incrementarse en todas las comarcas.

Como consecuencia de todo lo anterior, y sumado a lo ya mencionado en cuanto a los efectos en la distribución de las especies y en cuanto a la PPN, se producirán probablemente otros efectos tales como eventos catastróficos (sequías severas, incendios forestales), emisión de compuestos volátiles, eutrofización, plagas y enfermedades sobre los bosques y una pérdida general de biodiversidad, a parte de otros efectos directos o indirectos en otros sectores que no mencionamos aquí por tratarse de temas específicos que se abordarán en otros capítulos de esta publicación.

Las *sequías severas* son ya un hecho constatado en el pasado reciente y que, previsiblemente, se podrán repetir con más intensidad y frecuencia. Así recordemos los años 1994 y 1995 o el verano del 2003, donde las especies sometidas a más estrés hídrico sufrieron e, incluso, murieron. Como un ejemplo, en la provincia de Albacete, en los sabinares de El Bonillo (Albacete), en 1995 perecieron aproximadamente un 20% del total de individuos situados en las zonas de

peores características del suelo (García Morote, 2007, Tesis Doctoral, no publicada). Dentro de esta provincia, en el término municipal de Tarazona de la Mancha, ejemplares de pino pinaster mezclados con pino piñonero procedente de reforestaciones muy antiguas, tras la sequía de 1994, desaparecieron, dado que el hábitat del pino pinaster no es el más adecuado en esta localidad (López-Serrano, comunicación personal). Igualmente, según Peñuelas et al. (2001), en 1994, el 80% (de un total de 190) de los bosques y matorrales estudiados resultaron dañados, siendo el daño diferente dependiendo de la orientación, tipo de suelo, especie dominante y si está gestionado o no el bosque (menos daños en bosques gestionados).

En cuanto a los *Incendios forestales* y dado que existe un capítulo ex profeso de este tema, sólo comentar que, si no se realizan medidas preventivas, probablemente se intensificarán y se harán más frecuentes. En cualquier caso, los incendios contribuyen a una reducción del contenido de materia orgánica del suelo, la cual, a su vez, puede disminuir la medida y la estabilidad de los agregados del suelo. Como, además, hay una disminución de la cubierta vegetal, puede reducirse la infiltración del agua al suelo e incrementarse la escorrentía superficial, con lo que se facilita la erosión del suelo y la consiguiente desertificación. Desde el punto de vista social y económico, los incendios forestales ponen en peligro vidas humanas y propiedades, eliminan durante mucho tiempo las rentas obtenidas de la madera y alteran paisajes apreciados sentimental y económicamente.

El aumento de temperatura tiene muchos otros efectos directos sobre la actividad de los organismos vivos. Uno importante ambientalmente es el aumento exponencial de la emisión biogénica (en las plantas) de *compuestos orgánicos volátiles* (COVs). Estas emisiones biogénicas de COVs afectan la química atmosférica, no solamente con respecto al ciclo del carbono o la formación de aerosoles, sino por su papel en el equilibrio oxidativo del aire (niveles de OH, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>..., Peñuelas y Llusia, 2001, 2003, citado en Peñuelas et al., 2004). Ligada con el cambio climático, una de las funciones más importantes que parecen tener algunos de estos COVs, como por ejemplo el isopreno y los terpenos, en la fisiología vegetal, es la de actuar como elementos termoprotectores. *Quercus ilex* emplearía estos compuestos como estabilizadores de las membranas celulares y, más concretamente, aquellas membranas íntimamente relacionadas con los fotosistemas, y también como desactivadores de los radicales oxidados para protegerse de las altas temperaturas del verano (Peñuelas y Llusia, 2002). Pero además de "refrigerar" la planta, estas emisiones de COVs podrían retroalimentar negativamente el calentamiento del propio clima atmosférico, al actuar como aerosoles que disminuyen la irradiancia. Hará falta estudiarlo, porque también podrían retroalimentar positivamente el calentamiento a través de su efecto invernadero directo, al absorber la radiación infrarroja, e indirecto, al alargar la vida al metano y otros gases invernadero (Peñuelas y Llusia, 2003). Estamos ante un ejemplo más del importante papel que juegan los ecosistemas sobre el mismo clima y el posible cambio climático, aparte del más conocido e importante efecto sobre el balance del CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Otro de los procesos biogeoquímicos que también dependen de la temperatura y que preocupa como componente importante del cambio global, tanto en el mundo como particularmente en muchas zonas de España, es la progresiva *eutrofización*. Esto es el enriquecimiento en nutrientes, sobre todo nitratos, y especialmente en las aguas subterráneas. Aquí va ligada en muchos casos al exceso de purines, pero el aumento de temperatura, o las sequías no son del todo ajenas a este fenómeno. El calentamiento aumenta la mineralización, y la sequía impide el uso de nutrientes por parte de las plantas y facilita las pérdidas del sistema cuando llegan las lluvias. En resultados experimentales en matorrales (Peñuelas et al., 2004) dónde se aprecia como el calentamiento, y también la sequía, aumentan la liberación de nitratos a los lixiviados del suelo. Otro ejemplo de alteración biogeoquímica lo tenemos en la estimulación de la descomposición por el calentamiento. La falta de agua, por el contrario, la retarda.

Finalmente, el clima influencia la supervivencia y propagación de los insectos y patógenos, así como la susceptibilidad de los ecosistemas forestales. Por este motivo, es probable que bajo las condiciones climáticas más adversas en un próximo futuro, los ataques de insectos y patógenos – *plagas y enfermedades*- sean mucho más frecuentes que en la actualidad. Los cambios en temperatura y precipitación afectan directamente a la supervivencia, reproducción, dispersión y distribución de los insectos y patógenos; e indirectamente, a través de la desaparición de los nidos de pájaros y efectos sobre los hongos micorrícicos. Otro efecto indirecto incluye los impactos del cambio climático en los enemigos naturales y competidores que regulan la abundancia de plagas y enfermedades. También, al aumentarse la temperatura lo más probable es que aumente la diversidad de insectos a altas latitudes. Debido a que los insectos migran mucho más rápido que los árboles, muchas especies de árboles de zonas templadas serán atacadas por insectos herbívoros inicialmente limitados a bosques subtropicales. Por último, indicar que las potenciales medidas mitigadoras que el hombre pueda realizar, también podrían afectar negativamente a las masas forestales. Por ejemplo, ya se han producidos daños no esperados por insectos defoliadores (*Pachyrhinus squamosus*) en algunas masas de la provincia de Albacete (Yeste) y Murcia (Calasparra) como consecuencia de los tratamientos de clareo con el objetivo de disminuir la competencia intraespecífica (González Ochoa y De las Heras, 2002).

Finalmente, el cambio climático determinará una *pérdida de biodiversidad* en algunos ecosistemas. Estos efectos del calentamiento no nos han de extrañar porque es bien conocido que los regímenes climáticos determinan la distribución de las especies y de los biomas a través de los límites específicos de cada especie con respecto a la temperatura y la disponibilidad de agua. Y todo esto no sólo hace referencia a las plantas; los animales no son menos sensibles. Al contrario, responden más rápidamente dada su movilidad. Se han documentado muchos desplazamientos de especies animales relacionados con el clima. Se han descrito desplazamientos de 35 a 240 km hacia el Norte durante el siglo XX en 34 especies de mariposas con distribución europea incluyendo áreas ibéricas.



### 3. Medidas recomendables de adaptación y posible mitigación

Las estrategias para sobrellevar y mitigar los potenciales efectos negativos del cambio climático en los bosques Castellanos Manchegos variarán dependiendo de la naturaleza de la alteración que el cambio climático imponga, del propio valor del bosque y del rango de opciones aceptables que se puedan aplicar. Muchas veces, la respuesta que minimiza los efectos ecológicos negativos después de una alteración causada por algún evento (tanto natural como artificial) es no hacer nada. Sin embargo, es muy habitual que los gestores de los bosques o la misma sociedad y opinión pública pidan una actuación para restaurar el daño causado incluso cuando tal acción podría retrasar la recuperación natural del ecosistema (Dale et al, 1998; Dale et al., 2001). Pero es más, los objetivos y valores de manejo de los bosques se establecen en base a los recursos que se pueden dedicar a su gestión y, estos valores pueden cambiar. Por ejemplo, en la política forestal norteamericana sobre los incendios, se reconoce al fuego como una parte natural del desarrollo del bosque que no siempre debe ser controlado. En cualquier caso, lo cierto es que ante la incertidumbre de cómo responderán los ecosistemas ante el cambio climático, siempre se pueden proponer estrategias de lucha contra los efectos negativos del mismo. Y esto es así porque los conocimientos actuales de las posibles alteraciones que se pueden producir en los bosques ya tienen un procedimiento para su manejo, puesto que muchas medidas que se toman para solventar o sobrellevar determinados problemas actuales son válidas para otro tipo de efectos.

Podríamos plantear el siguiente esquema para tratar de abordar las estrategias contra las alteraciones que el cambio climático pueda ocasionar en los montes: 1) Medidas o estrategias a aplicar antes de que ocurra el efecto, 2) Medidas para manejar o atacar la alteración mientras se está produciendo, 3) Gestionar el ecosistema justo después de haberse producido la alteración y 4) realizar un programa de seguimiento continuo para conocer cómo la alteración afecta a los bosques y para actualizar nuestro conocimiento de cómo el cambio climático está potencialmente influenciando los regímenes de alteraciones.

Antes de que ocurran las alteraciones se pueden llevar a cabo distintas actuaciones, bien *reducir la vulnerabilidad* de los ecosistemas o bien *mejorar la posible recuperación* del mismo en caso de que ocurra la alteración. Para *reducir la vulnerabilidad*, se puede, mediante la gestión forestal, alterar la estructura o la composición del bosque, esto es, p.e. eliminar especies sensibles al viento, o reducir densidad para minimizar el efecto de la sequía. También se pueden llevar a cabo otras acciones tales como eliminar pies muertos para evitar el ataque de plagas y minimizar el riesgo de incendio, pero no hay que olvidar que esto puede tener un efecto negativo en, p.e., el ciclo de nutrientes y, por tanto, en la fertilidad del suelo. Otras opciones es mantener las especies que se cree son más resistentes a los futuros efectos del cambio climático (sequía, ataques de insectos y patógenos, ...) y si no están presentes, ir introduciéndolas paulatinamente. Un enfo-

que más amplio sería realizar cambios a nivel territorio, mucho más allá del propio bosque. Así, modelos adecuados de clareos y claras a nivel comarca reducirían los efectos de vientos y vientos desecantes en la masa o, incluso, el diseño de las vías forestales y carreteras que atravesen el territorio también tendrá su efecto en evitar posibles problemas de movimientos de tierra, si este fuera el caso por excesivas lluvias o lluvias torrenciales, o para evitar excesivas magnitudes de los incendios forestales, al actuar aquellas como cortafuegos artificiales y líneas de ataque directo del incendio. Para *mejorar la posible recuperación* del ecosistema en previsión de una alteración futura, podríamos modificar la estructura forestal para acelerar el proceso de regeneración: p.e. González-Ochoa et al., 2004, demuestran que los clareos tempranos en *Pinus halepensis* mejoran el crecimiento y anticipan la producción de piñas, para así, ante un nuevo evento de incendio, tener la posibilidad de regenerarse naturalmente.

Mientras que se está produciendo la alteración o evento perturbador, p.e., incendio, plagas, enfermedades y sequías, si se dispone de un sistema de alerta, entonces se puede actuar para minimizar la intensidad o frecuencia de los efectos. La actuación dependerá del tipo de alteración.

Una vez provocado el daño, una de las opciones es no hacer nada y otra sería actuar para manejar el estado del ecosistema y controlar el proceso de recuperación. Sin embargo, aún siendo adecuadas las actuaciones para recuperar el ecosistema, se deben realizar después de profundas consideraciones referentes a los impactos que ellas puedan causar, tales como daños al suelo o a los árboles remanentes. Las masas se pueden recuperar de forma natural sin eliminar la madera muerta o árboles dañados. Si hubiera que llevar cabo estas acciones, podrían ser tales como añadir elementos estructurales para crear sombras u otros sitios seguros desde donde se pueda reiniciar el reestablecimiento de la vegetación. También se podrían introducir directamente especies próximas al clímax para así adelantar el proceso de sucesión, eso sí, con las consideraciones específicas acordes con la situación actual del ecosistema después de la alteración. Concretamente, en masas de *Quercus ilex* regeneradas tras incendio, López-Serrano et al. (en revisión) demuestran que el resalveo es una técnica cultural muy interesante para acelerar la recuperación del ecosistema y mejorar el estado general de la masa forestal, simplemente eliminando la competencia intraespecífica. Este resalveo consistió en eliminar un 60% de los pies totales (inicialmente había aprox. unos 12000 chirpiales/ha), para dejar unos 5000 pies/ha. Pero además demuestran que, justo un año después de llevar a cabo dicho resalveo, la PPN de las parcelas resalveadas fue similar a la que tendría el encinar sin haber llevado a cabo los trabajos de mejora, con lo que se concluye y se da luz a las incertidumbres relacionadas con los efectos negativos que las medidas de mitigación pueden producir.

Finalmente, ante situaciones de cambio climático, es imprescindible realizar un seguimiento de las masas forestales desde múltiples puntos de vista y ensayar diferentes actuaciones para, a modo de ensayo experimental, poder concluir cuales de ellas son las más adecuadas para poder

luchar contra los efectos perniciosos del cambio climático. Esto es así porque todavía existen importantes incertidumbres acerca de cómo afectará a la dinámica de poblaciones vegetales. Así, si p.e. el cambio climático permite la llegada de especies vegetales no autóctonas, el conocimiento científico actual que tenemos acerca de las interacciones entre especies y las herramientas de gestión para solventarlo puede que no sean aplicables a la nueva situación de competencia entre especies autóctonas y alóctonas. Por tanto, de cara al futuro, se considera que habría que emprender las siguientes actuaciones:

- Explorar la evolución de la producción neta de nuestras masas forestales, teniendo en cuenta los escenarios climáticos regionales para el futuro y los impactos previstos según estos escenarios.
- Explorar el impacto de cambios de gestión encaminados a incrementar la capacidad adaptativa de los bosques a las futuras condiciones.
- Elaborar recomendaciones en base a los dos puntos anteriores para la gestión forestal en los diferentes ecosistemas forestales representados en nuestro territorio.
- Evaluar el coste de las actividades, priorizar las zonas donde realizar las actividades en base a criterios basados en las múltiples funciones que los ecosistemas forestales desempeñan en nuestro territorio, no solo su capacidad de sumidero.

### 3.1 Medidas generales encaminadas para combatir las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de las fuentes y no necesariamente medidas exclusivas para prevenir o mitigar los efectos del cambio climático en nuestros bosques de CLM

Dada la complejidad que conlleva el sector forestal y todo lo relacionado con el uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra, hay que dejar claro que no siempre este sector representa un sumidero de CO<sub>2</sub>. Muchas veces, de forma repentina, se convierten en fuentes emisoras de CO<sub>2</sub>, p.e. cuando hay un incendio o, simplemente, si se produce una deforestación. Así, la deforestación en los trópicos es considerada como la responsable del 18% de las emisiones mundiales (MMA, 2007). Los bosques como sumideros de carbono, presentan unas características peculiares que es necesario conocer (y que ya hemos comentado algunas en apartados anteriores) para establecer su papel dentro de las estrategias integradas de lucha contra el cambio climático: son sumideros no permanentes indefinidamente, vulnerables al propio cambio climático (ya hemos mencionado que la PPN decrecerá), limitados (existe un tope máximo en almacenamiento cuando los ecosistemas llegan a la madurez) y, finalmente, pueden ser un elemento perturbador y competidor con otras reducciones permanentes (más efectivas a medio-largo plazo).

Las actividades de mitigación en este sector deben ir enfocadas a aumentar el sumidero de CO<sub>2</sub> actual, o en su defecto mantenerlo y conservar los reservorios actuales. Desde el punto de

vista del Protocolo de Kyoto, las únicas actividades, dentro de este sector, que se van a computar para determinar su cumplimiento o no en el período 2008-2012, son la *deforestación*, la *reforestación*, la *forestación* de tierras agrícolas y la *gestión forestal*. Por tanto, y dado que la mera conservación de los bosques no contribuye a la mitigación, y que su pérdida si puede ser una importante fuente de emisiones, las políticas de lucha contra la *deforestación* (fundamentalmente por incendios), el apoyo a la *forestación* de espacios agrícolas abandonados y a la *reforestación*, serán las actividades a priorizar, pero teniendo en cuenta las condiciones que se están proyectando para el futuro inmediato. La *gestión* de los espacios forestales ha de incorporar una planificación a gran escala que considere la combinación de espacios de tipo diverso, una gestión forestal sostenible que contemple aspectos adaptativos, así como su múltiple uso y el efecto de las perturbaciones.

### 3.2 Medidas particulares para mitigar los efectos del cambio climático en nuestros bosques

Prácticamente, todos los ecosistemas que están presentes en CLM son ecosistemas mediterráneos, que presentan una gran variedad orgánica en el espacio y el tiempo, además de una gran resiliencia. Esta heterogeneidad multidimensional y resiliencia son el resultado de la co-evolución con los humanos y sus actividades. La dinámica de nuestros ecosistemas, casi todos seminaturales, se puede entender como una serie de degradaciones antropogénicas y regeneraciones subsiguientes. De hecho, tanto la sobreexplotación como la protección completa pueden llevar a estadios inferiores del atractivo escénico y de la utilidad económica de estos ecosistemas terrestres. La introducción de estrategias multiuso para la gestión y rehabilitación de los ecosistemas terrestres mediterráneos requiere un gran esfuerzo educacional y de investigación, y otro gubernamental para dar esperanza al futuro desarrollo de estos ecosistemas terrestres y de sus recursos en el marco de los cambios actuales de clima y usos del suelo (Peñuelas et al., 2004).

A continuación, indicaremos unas sugerencias a tener en cuenta tanto en la gestión de las masas forestales actuales así como las que están o vayan a estar reforestadas o forestadas:

#### ***En masas forestales existentes se propone***

Una *gestión forestal más detallada* de la que actualmente se lleva a cabo. El objetivo es la gestión sostenible y la prevención contra el cambio. Fundamental realizar proyectos de ordenación de montes, tanto a nivel monte como comarcal, basados en una gestión sostenible y enfocada a la producción y conservación, con los objetivos simultáneos de conservar y adaptarse al cambio, pero también de obtener productos forestales de gran utilidad para la producción de energías renovables y de productos que puedan tener una larga vida y, por tanto, sean un almacenamiento permanente de CO<sub>2</sub>. Afortunadamente, los pasos están dados ya que la vigente Ley de

Montes de la Comunidad de CLM (Ley 3/2008) va encaminada en esta dirección, pero hace falta dedicar los recursos necesarios para que se haga realidad.

Aplicación de *técnicas selvícolas específicas* para la adaptación de los montes actuales a los futuros cambios del clima. Se sugiere ir introduciendo biodiversidad vegetal en los montes, utilizando aquellas especies forestales con más probabilidad de tener éxito ante un cambio climático (ver Figura 3, donde se muestran los hábitats centrales, marginales y extramarginales de las distintas especies forestales). Así, en caso de darse un cambio repentino y continuado en los parámetros meteorológicos, habrá especies capaces de ser el centro de dispersión de nuevos individuos en los huecos que vayan dejando las especies que no puedan soportar dicho cambio. Esto deberá planificarse por expertos conocedores de las disciplinas clásicas de la ciencia forestal tales como ecología, fisiología vegetal, silvicultura, repoblaciones y ordenación de montes.

Una técnica específica que parece ser muy útil es la *reducción de competencia intraespecífica* dentro del bosque, mediante la realización de *clareos* y *claras* en coníferas (González-Ochoa et al., 2004) o bien *resalveos* (López-Serrano et al., en revisión; Gracia et al., 1997).

### En reforestaciones y forestaciones

En estos casos, el conocimiento científico-técnico forestal al que aludíamos anteriormente será crucial para que cuando se programen actuaciones de recuperación de terrenos para su dedicación forestal, se introduzcan, con *técnicas adecuadas* (fundamentalmente con miras a no producir daños excesivos en el suelo), diferentes especies simultáneamente para procurar introducir diversidad vegetal (mucho más que la que actualmente se está llevando a cabo). Así, estas masas artificialmente creadas serán más resistentes y menos vulnerables al cambio climático, debido a que las especies tendrán distinta tolerancia a las características del cambio, distintas capacidades para migrar y una diferente efectividad frente a las especies que invadan su hábitat. Pero es más, en estas re-forestaciones resulta importante la cuidadosa *selección de la procedencia de las semillas* para la producción de planta en vivero, para una gestión adecuada de la diversidad genética y, sobre todo, para garantizar el éxito de aquellas.

### En terrenos agrícolas

Se sugiere a los legisladores en esta materia, proponer *planes de recuperación de linderos y ribazos* para el uso forestal. Así se podría proponer, para parcelas catastrales superiores a una determinada superficie (p.e. 2 ha) la obligatoriedad de mantener unos linderos de una anchura determinada y con una plantación bien de especies arbóreas y/o de matorrales (pudiéndose intercalar algún árbol frutal). Así se rompería lo que es la fragmentación y permitiría a las especies poder migrar cuando las variables climáticas cambien.

Habría que impulsar los *cultivos agroforestales* y las *plantaciones bioenergéticas*, pues son un ejemplo de prácticas innovadoras para mejorar la productividad general, incrementar la fijación de carbono y reforzar la capacidad del sistema para tratar con los efectos adversos del cambio climático. Además, permitiría ayudar a disminuir la presión sobre los bosques naturales, promoviendo la conservación del suelo y suministrar servicios ecológicos al ganado y a la industria productora de energías renovables (IPCC, 2007).

Sea cualesquiera el caso contemplado, sería muy importante avanzar en la **gestión forestal sostenible**. Este tipo de gestión implica conocer las principales funciones del ecosistema y los efectos de las prácticas realizadas por el hombre. Una gestión sostenible, tanto de los bosques naturales como los plantados, permitiría reducir la pobreza (o aumentar la riqueza), reducir la deforestación, detener la pérdida de biodiversidad, reducir la degradación de los recursos y de la tierra, y contribuir a la mitigación del cambio climático. A su vez, si se lleva a cabo esta gestión forestal sostenible, habría que **fomentar el consumo de productos de madera** para actividades tales como la construcción, pues de esta manera, gran cantidad de CO<sub>2</sub> se mantendría permanentemente en forma de muebles, puertas, ventanas, vigas, etc., con el consiguiente ahorro que esto supondría de otros materiales que suponen un alto coste en emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (cementos, acero, plásticos,...).

Finalmente, un aspecto fundamental, que ya se ha mencionado, es la necesidad de **investigación** en este sector. Entre las necesidades más apremiantes de investigación destacan el disponer de un conocimiento más preciso sobre los stocks de biomasa aérea pero, sobre todo, de la *subterránea* de nuestras especies forestales. Pero además, se necesita más investigación para conocer con detalle (variabilidad temporal y espacial) la *productividad primaria neta* (PPN) y de la *productividad neta del ecosistema* (PNE). Por otra parte, es prioritario potenciar el desarrollo y aplicación de los *modelos de crecimiento* forestal, para prever las respuestas del bosque a cambios ambientales o patrones de gestión. La mayor parte de los modelos tienen limitaciones, ya que no incluyen procesos ecológicos clave y tampoco se retroalimentan con la información producida y validada. Existen todavía inconsistencias entre los modelos usados por ecólogos para estimar los efectos del cambio climático en la producción y composición de los bosques y los modelos utilizados por los forestales para predecir la producción (tablas de producción) del monte (Easterling et al., 2007). También, a pesar de la fuerza y logros de los diferentes enfoques de los modelos actualmente existentes, existen problemas de fondo todavía no resueltos en los modelos globales de uso de la tierra.

Para terminar, es fundamental e imperioso el establecimiento o consolidación de *redes de observación y análisis de los factores ecofisiológicos y de aspectos micrometeorológicos* (mediante técnicas tales como Eddy Covariance o Razón Bowen), que determinan y cuantifican los parámetros de los que dependen algunas fases clave para el éxito en la colonización (como es la rege-

neración) y también cuantifican los balances de energía y de gases (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) en la respuesta del bosque a los cambios ambientales.

## Bibliografía

- ABER, J.D., OLLINGER, S.V., FEDERER, C.A., REICH, P.B., GOULDEN, M.L., KICKLIGHTER, D.W., MELILLO, J.M., LATHROP, R.G., 1995. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climm. Res.* 5, 207-222.
- ALIG, R.J., ADAMS, D.M., MCCARL, B.A., 2002. Projecting impacts of global climate change on the US forest and agricultural sectors and carbon budgets. *For. Ecol. Mange.* 169, 3–14.
- BALL, J.T., WOODROW, I.E., BERRY, J.A., 1997, A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Biggens, J. (ed.) *Progress in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff, The Netherlands, 221-224.
- BOWEN, D.Q., 1979. Geographical perspective on the Quaternary. *Prog. Phys. Geogr.* 3, 167–186.
- BUGMANN, H.K.M., XIAODONG, Y., SYKES, M.T., MARTIN, P. LINDNER, M., DESANKER, P.V., CUMMING, S.G., 1996. A comparison of forest gap models: model structure and behavior. *Clim. Change* 34: 289-313.
- CEBALLOS, L., RUIZ DE LA TORRE, J., 1979. *Árboles y arbustos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.
- CLARK, J.S., 1998. Why trees migrate so fast: confronting theory with dispersal biology and the paleorecord. *Am. Nat.* 152, 204–224.
- CRAMER, W., KICKLIGHTER, D.W., BONDEAU, A., MOORE, B., CHURKINA, C., NEMRY, B., RUIMY, A., SCHLOSS, A.L., 1999, Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 5: 1-15.
- DALE, V.H., JOYCE, L.A., MCNULTY, S., NEILSON, R.P., AYRES, M.P., FLANNIGAN, M.D., HANSON, P.J., IRLAND, L.C., LUGO, A.E., PETERSON, C.J., SIMBERLOFF, D., SWANSON, F.J., STOCKS, B.J., WOTTON, M., 2001. Climate change and forest disturbances. *BioScience*, 51, 723-734.
- DALE, V.H., LUGO, A., MACMAHON, J., PICKETT, S., 1998. Ecosystem management in the context of large, infrequent disturbances. *Ecosystems* 1, 546-557.
- DAVIS, M.B., ZABINSKI, C., 1992. Changes in geographical range resulting from greenhouse warming: effects on biodiversity in forests. In: Peters, R.L., Lovejoy, T.E. (Eds.), *Global Warming and Biological Diversity*. Yale University Press, pp. 297–308.
- DEWAR, R.C., MEDLYN, B.E., MCMURTRIE, R.E., 1998, A mechanistic analysis of light and carbon use efficiencies. *Plant, Cell and Environment* , 21: 573-588.
- DÍAZ-FERNÁNDEZ, P., JIMÉNEZ, P., CATALÁN, G., MARTÍN, S., Y GIL, L., 1995. Regiones de procedencia de *Quercus suber* L. Ed. ICONA, M.A.P.A, Madrid, 49 pp. + cartografía

- EASTERLING, W., P. AGGARWAL, P. BATIMA, K. BRANDER, L. ERDA, M. HOWDEN, A. KIRILENKO, J. MORTON, J.F. SOUSSANA, J. SCHMIDHUBER, F. TUBIELLO, 2007. Food, Fibre, and Forest Products, Chapter 5 in: Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability, The IPCC Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge.
- FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERER S., BERRY, J.A., 1980, A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, 149: 78-90.
- FRIEND, A.D., STEVENS, A.K., KNOX, R.G., CANNELL, M.G.R., 1997. A process-based terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0). *Ecological Modelling* 95, 249-287.
- GANDULLO, J.M. Y SÁNCHEZ-PALOMARES, O., 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA. Madrid.
- GARZÓN, M.B., BLAZEK, R., NETELER, M., SÁNCHEZ DE DIOSA, R., SAINZ-OLLEROA, H., FURLANELLOBET, C., 2006. Predicting habitat suitability with machine learning models: The potential area of *Pinus sylvestris* L. in the Iberian Peninsula. *ecological modelling* 197, 383–393.
- GIL, L. Y ARÁNZAZU, M., 1993. Los pinos como especies básicas de la restauración forestal en el medio mediterráneo. *Ecología*, 7: 113-125.
- GONZÁLEZ-OCHOA, A.I., DE LAS HERAS, J., 2002. Effects of post-fire silviculture practices on *Pachyrhinus squamosus* defoliation levels and growth of *Pinus halepensis* Mill. *For. Ecol. Manage.* 167, 185–194.
- GONZÁLEZ-OCHOA, ANA I., LÓPEZ-SERRANO, FRANCISCO R., DE LAS HERAS, J., 2004. Does post-fire forest management increase tree growth and cone production in *Pinus halepensis*? *Forest Ecology and Management* 188 (1-3), 235- 247.
- GRACIA C, BELLOT J, SABATÉ S, ALBEZA E, DJEMA A, LEÓN B, LÓPEZ B, MARTÍNEZ JM, RUIZ I, TELLO E (1997) Análisis de la respuesta de *Quercus ilex* L. a tratamientos de resalveo selectivo. In: 'La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana.' (Ed R Vallejo) pp. 547-601. (Fundación CEAM: Valencia).
- HALL, F. G., KNAPP, D. E., HUENNRICH, K. F., 1997, Physically based classification and satellite mapping of biophysical characteristics in the southern boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24): 29567– 29580.
- HAMRICK, 2004. Response of forest trees to global environmental changes. *Forest Ecology and Management* 197, 323–335.
- IFN2, 1995. ICONA Segundo Inventario Forestal Nacional (1986-1995). Instituto Nacional de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- IPCC, 1996A. Climate change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH, Dokken, DJ (eds). Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 1996B Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” (Directrices del IPCC revisadas en 1996 para Inventarios Nacionales de Gases Efecto Invernadero).



- IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC, 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC: Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo II del IPCC. Gitay, H, Suárez, A, Watson RT, Dokken, DJ (eds). Cambridge University Press.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance (GPG) for Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF). IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit. (IGES, Japan).
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY.
- JENSEN, M.W., 2003. Consensus on ecological impacts remains elusive. *Science* 299, 38.
- JIMÉNEZ, M.P., DÍAZ-FERNÁNDEZ, P.M., IGLESIAS, S. DE TUERO Y DE REINA, M. AND GIL, L., 1996. Regiones de Procedencia de "Quercus ilex". ICONA. Madrid. Jiménez, M.P., Díaz-Fernández, P.M., Iglesias, S. De Tuero y de Reina, M. and Gil, L., 1996. Regiones de Procedencia de "Quercus faginea". ICONA. Madrid.
- JIMÉNEZ, M.P., DÍAZ-FERNÁNDEZ, P.M., IGLESIAS, S. DE TUERO Y DE REINA, M. AND GIL, L., 1996. Regiones de Procedencia de "Quercus pyrenaica". ICONA. Madrid.
- JIMÉNEZ, M.P., DÍAZ-FERNÁNDEZ, P.M., IGLESIAS, S. DE TUERO Y DE REINA, M. AND GIL, L., 1996. Regiones de Procedencia de "Quercus suber". ICONA. Madrid.
- KRAMER, K., 1994, A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant, Cell and Environment*, 17, 367-377.
- LANDSBERG, J.J., WARING, R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95: 209-228.
- LANGSTON, N., 1995. Forest dreams, forest nightmares: the paradocs of old growth in the Inland West. University of Washington Press, Seattle.
- LEUNING, R., 1995, A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. *Plant, Cell and Environment*, 18: 339-355.
- LISKI, J., ILVESNIEMI, H., MÄKELÄ, A., WESTMAN, C.J., 1999, CO2 emissions from soil in response to climatic warming are overestimated. The decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature. *Ambio*, 28: 171-174.
- LOEHLE, C., LEBLANC, D., 1996. Model based assessments of climate change effects on forest: a critical review. *Ecol. Model.* 90, 1-31.
- LUO, Y.Q., REYNOLDS, J., WANG, Y.P., WOLFE, D., 1999, A search for predictive understanding of plant responses to elevated CO2. *Global Change Biology* , 5: 143-156.

- MAGNANI, F., MATTEUCCI, G., 2001, Modelling the impact of greenhouse gases on forests. In: Karnosky, D.F., Ceulemans, R., Scarascia-Mugnozza, G.E., Innes, J.L. (Eds), The impact of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases on forest ecosystems. CABI Publishing and IUFRO, London, 269-295.
- MAPA, 1996. Comarcalización Agraria de España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica. Madrid.
- MCLAUGHLIN, J.F., HELLMAN, J.J., BOGGS, C.L., EHRLICH, P.R., 2002. Climate change hastens population extinctions. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 99, 6070–6074.
- MMA, 2005. Principales Conclusiones de la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE. Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático-Oficina Española de Cambio Climático (OECC). Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MMA, 2007. El cambio climático en España. Estado de situación. Documento resumen. Informe para el Presidente del Gobierno elaborado por expertos en cambio climático. Oficina Española de Cambio Climático (OECC) y el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE). Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- NIELSEN, R.P., 1995. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. Ecol. Appl. 5, 362-385.
- OSE, 2007. 3er Informe de Sostenibilidad en España, 2007. Observatorio de la Sostenibilidad en España. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares. Madrid.
- OVERPECK, J.T. AND BARTLEIN, P.J., 1989. Assessing the response of vegetation to future climate change: ecological response surfaces and paleoecological model validation. In: Smith JB, Tirpak DA (eds). The potential effects of global climate change on the United States, Appendix D: Forest. EPA-230-05-89-054. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC (Chapter 1).
- PAN, Y., RAYNAL, D.J., 1995. Predicting growth of plantation conifers in the Adirondack Mountains in response to climate change. Can. J. For. Res. 25:48-56.
- PEARCY, R.W., GROSS, L.J., HE, D., 1997, An improved dynamic model of photosynthesis for estimation of carbon gain in sunfleck light regimes. Plant, Cell and Environment, 20, 411-424.
- PEÑUELAS, J., IDSO, B., RIBAS, A., Y KIMBALL, B.A. 1997. Effects of long-term atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the mineral concentration of Citrus aurantium leaves. New Phytologist 135: 439-444.
- PEÑUELAS, J., LLORET, F., MONTOYA, R. 2001. Drought effects on mediterranean vegetation and taxa evolutionary history. Forest Science 47: 214-218.
- PEÑUELAS, J., LLUSIÀ, J. 2001. The complexity of factors driving volatile organic compound emissions by plants. Biologia Plantarum 44: 481-487.
- PEÑUELAS, J., LLUSIA, J. 2002. Linking photorespiration, monoterpenes and thermotolerance in Quercus. New Phytologist 155 (2): 227-237.

- PEÑUELAS, J., Y LLUSIA, J. 2003. BVOCs: Plant defense against climate warming?. Trends in Plant Science 8: 105-109.
- PEÑUELAS, J., SABATÉ, S., FILELLA I., Y GRACIA, C., 2004. Efectos del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres: observación, experimentación y simulación. En: Valladares, F.(Ed). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 425-460. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid.
- REHFELDT, G.E., TCHEBAKAVA, N.M., PARFENOVA, Y.I., WYKOFF, W.R., KUZMINA, N.A., MILYUTIN, L.I., 2002. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. Glob. Change Biol. 8, 912–929.
- SABATE, S., GRACIA, C.A., SÁNCHEZ, A., 2002. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. Forest Ecology and Management 162, 23–37.
- SPURR, S.H. AND BARNES, B.V., 1980. Forest ecology, 3rd edn. John Wiley & Sons, New York.
- THORNLEY, J.H.M., CANNELL, M.G.R., 1996, Temperate forest responses to carbon dioxide, temperature and nitrogen: a model analysis. Plant, Cell and Environment ,19: 1331-1348.
- THORNLEY, J.H.M., CANNELL, M.G.R., 2000, Modelling the components of plant respiration. Representation and realism. Annals of Botany, 85: 55-67.
- VEMAT MEMBERS, 1995. Vegetation/ecosystem modeling and analysis project: comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystems responses to climate change and CO<sub>2</sub> doubling. Global Biogeochem Cycles 9(4): 407-437.
- WHITE, A., CANNELL, M.G.R., FRIEND, A.D., 1999. Climate change impacts on ecosystems and the terrestrial carbon sink: a new assessment.
- WINNETT, S.M., 1998. Potential effects of climate change on U.S. forest: a review. Climate Research, 11, 39-49.
- ZABINSKI, C. AND DAVIS, M.B., 1989. Hard times ahead for Great Lakes forests: a climate threshold model predicts responses to CO<sub>2</sub>-induced climate change. In: Smith JB, Tirpak DA (eds). The potential effects of global climate change on the United States, Appendix D: EPA-230-05-8-054. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC (Chapter 5).

