



2022  
Lleida

27·1  
junio · juny  
julio · juliol

Cataluña  
Catalunya

## 8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
**Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022**  
**ISBN 978-84-941695-6-4**  
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



## Homologación ecológica de estaciones forestales en escenarios de cambio climático

GÓMEZ-SANZ, V.<sup>1</sup>, SERRADA HIERRO, R.<sup>2</sup> y ALONSO PONCE, R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación ECOGESFOR. E.T.S. de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

<sup>2</sup> Sociedad Española de Ciencias Forestales.

<sup>3</sup> föra forest technologies SLL.

### Resumen

El “índice aditivo de idoneidad ecológica” y el “indicador de marginalidad” son metodologías recientes de homologación ecológica fundamentadas en el conocimiento generado en las últimas décadas sobre la autoecología de las principales especies forestales arbóreas españolas. Entre sus utilidades está la evaluación aplicada del papel del medio físico a escala estación, tanto en la respuesta vegetal arbórea actual como la previsible en función de distintas situaciones de cambio global. Con ello es posible aproximar el grado de estabilidad ecológica de las especies presentes en una determinada localización, así como el de las especies a utilizar ante la necesidad de restauración de su cubierta vegetal. Con el uso del software “ModERFoRest”, ambas metodologías son testadas en cuatro ámbitos biogeográficos y estacionales de la Península Ibérica marcadamente diferenciados (Albarracín, Bande, Monfragüe y Quintos de Mora), bajo los hipotéticos escenarios de cambio climático establecidos por la AEMet. Los resultados obtenidos permiten confirmar la aplicabilidad y sensibilidad de ambas herramientas metodológicas para identificar las limitaciones ecológicas más importantes asociadas al medio físico de cada estación. Se posibilita así no sólo explicar situaciones pasadas o presentes de inestabilidad ecológica, sino también anticipar contextos futuros de cambio global, y en base a ello, fundamentar, diseñar y ejecutar tareas de mitigación y de adaptación oportunas.

### Palabras clave

Autoecología paramétrica, marginalidad ecológica, biotopo, inestabilidad ecológica, ModERFoRest.

### 1. Introducción

La evaluación del contexto físico asociado a una estación debe ser una referencia ineludible para aproximar el grado de estabilidad ecológica tanto en la respuesta vegetal arbórea actual como en la previsible en función de distintas situaciones de cambio global. Se consigue con ello minimizar el riesgo de ejecución de tratamientos selvícolas inadecuados o de elección equivocada, tanto de las especies compatibles, como del lugar de procedencia del material de reproducción más adecuado ecológicamente para la estación de introducción.

Las diferentes herramientas metodológicas que estiman del grado de compatibilidad entre los requerimientos ambientales de una especie y las condiciones del medio físico de una estación (homologación ecológica de base autoecológica) parten frecuentemente de la inferencia del “nicho fundamental” de una especie (HUTCHINSON, 1957) a partir de su rango ecológico parametrizado, restringido al área de distribución ocupada por la especie en la actualidad, que es reflejo del “nicho efectivo” y del manejo histórico realizado por el hombre de la especie en cuestión.

Esta idea de nicho ecológico fundamental de Hutchinson supone una modelización empírica del hábitat de una especie de dimensión práctica y manejable, que da prioridad a la aplicabilidad frente a la perfección (GUISAN & ZIMMERMANN, 2000). Es, por tanto, una simplificación de la realidad que se construye a partir de la observación del nicho efectivo, considerado éste como el

medio en el que vive un especie, acotado a partir de la cuantificación de un conjunto de variables ambientales (parámetros) que lo definen (de ahí que también se llame “hábitat paramétrico”) y que excluye las interacciones bióticas, como la competencia o el mutualismo, y las capacidades de las especies para llegar a los sitios en los que puede vivir.

El rango ambiental completo de una especie delimita un espacio conceptual cuyos ejes incluyen todas las variables ambientales que afectan a la instalación, desarrollo y persistencia de la especie. Este rango ecológico se focaliza fundamentalmente en variables ambientales de carácter climático y fisiográfico, mientras que, desafortunadamente, la información edáfica ha sido y es frecuentemente evitada, debido a la dificultad de su muestro y análisis a escala estación.

Sobre esta idea, a mediados del siglo XX se iniciaron, en el entonces Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE), los estudios sobre la autoecología de las especies forestales arbóreas con mayor representación territorial en España. Liderados sucesivamente por Antonio Nicolás, José Manuel Gandullo, Otilio Sánchez-Palomares y Gregorio Montero, los diferentes estudios realizados han proporcionado una información especialmente valiosa sobre el rango ambiental en el que 22 taxones relevantes del ámbito forestal español viven y se reproducen de forma efectiva (LÓPEZ-SENEPLEDA *et al.*, 2018). La base de datos generada tiene un valor añadido especial, pues junto a los datos de carácter climático, fisiográfico y selvícola de unas 3000 localizaciones con presencia de masas forestales estables, se incluye información detallada y estandarizada de las condiciones edáficas de cada estación, algo especialmente singular y relevante dentro del conocimiento autoecológico de especies vegetales arbóreas.

Con el reciente desarrollo de la aplicación informática *ModERFoRest* (Modeling Environmental Requirements for Forest Restoration) una parte sustancial de esta valiosa información se pone al servicio de técnicos, investigadores y estudiantes. Implementada en el lenguaje C++ por *fora forest technologies SLL*, Carlos Rodríguez Núñez y Karontek S.L.U., se distribuye de manera gratuita a la comunidad científica y técnica desde la página del INIA (<https://www.inia.es/serviciosyrecursos/recursosinformaticos/modernforest/Paginas/ModERFoRest.aspx>).

Dos de los módulos de *ModERFoRest*, concretamente el de Modelos de Distribución de Especies (MDES) y el de Adecuación de Especies para la Repoblación Forestal (AERF), incorporan algoritmos que permiten evaluar para el conjunto de especies forestales arbóreas cuya autoecología ha sido parametrizada en el territorio español, el grado de homologación ecológica a unas condiciones ambientales concretas:

1. El Índice aditivo (Additive Potential Index, API; ALONSO PONCE *et al.*, 2010a, 2010b). Este es un índice de idoneidad ecológica que se basa en la teoría de campos aplicada al espacio  $p$ -dimensional no euclídeo que definen los  $p$  parámetros definidores del hábitat de cada especie (WU *et al.*, 1985). La función diseñada (función de potencial dependiente de la distancia) es monótona creciente y devuelve valores acotados entre 0 (mínima idoneidad o máxima incompatibilidad ambiental) y 1 (máxima idoneidad o compatibilidad ambiental) para así hacer posible la comparación entre distintas especies y territorios.
2. El indicador de marginalidad (IM; GÓMEZ-SANZ, 2019). La hipótesis de partida es que si se supone que existe independencia del contexto biótico, y se acepta que son las condiciones abióticas las que imponen límites fisiológicos a la capacidad de la especie para persistir en una estación determinada, la estimación del grado de marginalidad ecológica (espacios del hipervolumen ambiental definidos por los valores más distantes al óptimo ecológico) puede aproximar la evaluación de la estabilidad de la especie (crecimiento positivo de la población) en el ámbito geográfico correspondiente. El signo del indicador revela si la marginalidad se presenta en los valores máximos del rango de

variación del parámetro, cuando toma valores mayores de 0, o si lo hace en los valores mínimos del mismo, cuando adquiere valores inferiores a 0. El valor del indicador está acotado entre los valores -1 y 1 que indican una marginalidad, inferior y superior respectivamente, extrema (inadmisible) del valor del parámetro considerado en la estación para la especie de interés. Valores de 0 en el indicador indican adecuación ecológica plena, con total ausencia de marginalidad en relación al espectro de variación observado de la variable analizada.

## 2. Objetivos

La comunicación que se presenta tiene como objetivo mostrar los resultados de la aplicación de estos modelos, implementados en el software *ModERFoRest*, a la identificación de especies compatibles con diferentes condiciones actuales de estación (especies ecológicamente más homologables), incorporando además proyecciones de cambio climático sobre ellas, en la idea de facilitar la prevención de sus efectos y la mitigación de sus consecuencias. Todo ello con la finalidad de mostrar la sensibilidad, fiabilidad y utilidad de estas nuevas herramientas de modelización ecológica que incluye dicha aplicación informática.

## 3. Metodología

A lo largo del territorio peninsular español se han seleccionado un total de 4 localizaciones que responden a ámbitos biogeográficos y estacionales netamente diferenciados (tabla 1): el interior montañoso de Galicia (Bande; 1.BND), los Montes de Toledo (Quintos de Mora; 2.QNT), las sierras septentrionales extremeñas (Monfragüe; 3.MNF) y las estribaciones del Sistema Ibérico (Albarracín; 1.ALB). En cada una de ellas se ha procedido al inventario detallado de su medio físico.

Tabla 1. Estaciones de estudio

Estación	Coordenadas UTM (ETRS89)			Altitud (m)	Litología	Clasificaciones Bioclimáticas	
	Huso	X	Y			Allué (1990)	Rivas Martínez (1987)
1.BND	29	586907	4653892	960	Granito/gneis	VI(IV) <sub>2</sub>	Piso Supramediterráneo Húmedo
2.QNT	30	406355	4363294	835	Cuarcita	IV(VI) <sub>1</sub>	Piso Mesomediterráneo Seco
3.MNF	29	755545	4417722	410	Cuarcita	IV <sub>3</sub>	Piso Mesomediterráneo Subhúmedo
4.ALB	30	606398	4468823	1565	Caliza	VIII(VI)	Piso Montano Húmedo

La información climática se ha obtenido del Atlas Climático Ibérico (AEMET, 2011) que ofrece información termométrica y pluviométrica media para el periodo de referencia 1971-2000 con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>.

Respecto de las condiciones climáticas a futuro, los escenarios de cambio climático son una potente herramienta para analizar el grado de exposición de las especies a los efectos del mismo (DAWSON *et al.*, 2011). Con este fin, se han considerado las proyecciones de cambio climático que ofrece la AEMet, relativas al escenario de emisiones que se considera más probable (escenario AB1) (IPCC, 2007) y desarrolladas dentro del proyecto ENSEMBLE (AEMET, 2015; SAURA *et al.*, 2015). Las variables proyectadas son las correspondientes a precipitación acumulada y temperaturas medias anuales y mensuales para tres ámbitos temporales: corto plazo (promedio 2010-2039), medio plazo (promedio 2040-2069) y largo plazo (promedio 2070-2099).

El inventario en campo consistió en la elección de un punto de muestreo, representativo de las condiciones de medio físico y de dosel dominantes y, en torno a él, se fijó una parcela circular de 12,6 m de radio, sobre la que posteriormente se llevó a cabo la recogida de información fisiográfica, botánica y selvícola. El inventario del estado edáfico se realizó mediante la apertura de una calicata

(hasta una profundidad máxima de 1,25 m si previamente no se había alcanzado la roca madre coherente y dura), identificando y describiendo los distintos horizontes edáficos, y tomando una muestra representativa de cada uno de ellos. Las muestras fueron enviadas a un laboratorio especializado, homologado y certificado, que procedió a su análisis según los estándares oficialmente establecidos. Los análisis efectuados fueron: elementos gruesos, textura según USDA, carbono orgánico, pH en agua y en cloruro potásico, carbonatos (totales y activos) y nitrógeno.

Toda la información capturada ha sido organizada y almacenada en soporte electrónico, procediéndose a continuación a la caracterización paramétrica del medio físico de cada uno de las estaciones inventariados. Para este fin se seleccionaron algunas de las variables físicas (parámetros) que incorpora la aplicación *ModERFoRest*, que están ampliamente reconocidas como evaluadoras de la influencia del clima y del suelo sobre la respuesta vegetal (GANDULLO y SÁNCHEZ, 1994). La tabla 2 recoge el resultado de este proceso.

Con toda esta información se ha ejecutado el módulo AERF de *ModERFoRest* para un subconjunto de variables (aquellas que mostraban una mayor variabilidad entre estaciones), obteniéndose los valores correspondientes al índice aditivo de idoneidad ecológica (API) y a los indicadores de marginalidad de cada variable (IM<sub>i</sub>) en las estaciones analizadas para las especies forestales arbóreas más representativas del ámbito biogeográfico español.

El análisis realizado se ha desarrollado en dos fases. En un primer análisis se ha ejecutado el Módulo AERF para las 8 variables seleccionadas (climáticas y edáficas) y referidas a la situación correspondiente al período 1971-2000 (situación “actual”). Posteriormente, en una segunda fase, tras generar los valores de las variables climáticas proyectadas a corto plazo (valores medios para el período 2010-2039), medio plazo (valores medios para el período 2040-2069) y largo plazo (valores medios del período 2070-2099), se han obtenido los valores de los algoritmos API e IM para las especies que resultaron más homologables ecológicamente en la primera de las fases.

Tabla 2. Descripción paramétrica de las estaciones analizadas

Variables		Estación			
		1.BND	2.QNT	3.MNF	4.ALB
Climáticas	PV(00) (mm)	84,0	53,9	41,1	139,8
	PV(39) (mm)	79,2	49,3	37,6	129,2
	PV(69) (mm)	64,2	45,8	33,1	126,4
	PV(99) (mm)	47,4	42,7	27,8	107,5
	PT(00) (mm)	1087,0	556,7	707,8	952,9
	PT(39) (mm)	973,5	488,0	648,5	880,9
	PT(69) (mm)	896,3	480,3	616,7	839,2
	PT(99) (mm)	696,9	390,5	529,7	711,4
	TM(00) (° C)	10,8	13,6	16,4	8,6
	TM(39) (° C)	11,7	14,6	17,4	9,5
	TM(69) (° C)	12,8	15,9	18,6	10,8
	TM(99) (° C)	13,8	17,1	19,8	12,0
	TMI(00) (° C)	5,2	5,6	8,3	1,9
	TMI(39) (° C)	5,9	6,3	8,9	2,6
	TMI(69) (° C)	6,8	7,4	10,0	3,8
	TMI(99) (° C)	7,3	7,8	10,4	4,4

Edáficas	TF (%)	95,6	25,1	31,6	88,4
	Arena (%)	63,2	45,9	49,9	72,7
	Limo (%)	23,5	41,7	37,1	12,3
	Arcilla (%)	13,3	12,4	13,0	15,1
	MOS (%)	10,84	3,32	4,00	2,63
	PHA	4,85	6,50	5,20	7,62
	CA (%)	0,00	0,00	0,00	1,85
	CI (%)	0,00	0,00	0,00	2,63

Donde: PV, Precipitación media en verano; PT, Precipitación media anual; TM, Temperatura media del aire anual; TMI, Temperatura del aire media en invierno; TF, valor medio del contenido en Tierra Fina; Arena, valor medio del contenido en Arenas USDA en Tierra Fina; Limos, valor medio del contenido en Limos USDA en Tierra Fina; Arcilla, valor medio del contenido en Arcillas USDA en Tierra Fina; MOS, contenido en Materia Orgánica en los 25 cm más superficiales del perfil; PHA, valor medio del pH en agua; CA, contenido medio en Carbonatos Activos; CI, contenido medio en Carbonatos inactivos (Totales).

La cifra entre paréntesis en las variables climáticas hace referencia a las dos últimas cifras del año final del período temporal de 30 años correspondiente. Los valores medios en las variables edáficas son aquellos ponderados con el espesor de cada horizonte.

#### 4. Resultados

Los resultados obtenidos para las estaciones analizadas en la primera de las fases se muestran en la tabla 3. En ella se incluyen las 5 especies que obtienen los valores más altos de API, lo que equivale a considerar que son las que gozan de una mayor homologación ecológica para las condiciones ambientales de cada localización (ALONSO PONCE *et al.*, 2010b).

Tabla 3. Resultados de los algoritmos de homologación ecológica.

Estación	Especie	API	Indicadores de marginalidad							
			IM_PT	IM_PV	IM_TM	IM_TMI	IM_ARE	IM_TF	IM_PHA	IM_MOS
1.BND	QRB	0,243	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	PRA	0,078	0,025	0,460	-0,027	-0,057	0,000	0,000	0,000	0,000
	PPTA	0,068	0,000	0,023	-1,000	-1,000	0,000	0,000	0,000	0,049
	PSY	0,061	0,000	0,025	0,000	0,041	0,000	0,000	-0,037	0,000
	PPTM	0,046	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	-0,824	0,000
2.QNT	QIXB	0,276	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	PPTM	0,176	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,000	0,000
	PPN	0,156	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,484	0,000	0,000
	QFG	0,125	0,000	0,304	0,068	0,006	0,000	0,025	0,000	0,000
	QSB	0,103	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,071	0,000
3.MNF	QIXB	0,257	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,005	0,000
	QSB	0,203	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

	CST	0,142	0,014	0,007	0,586	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
	PPN	0,137	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,110	-0,032	0,006
	PPTM	0,069	0,000	0,000	0,224	0,000	0,000	0,009	-0,050	0,000
4.ALB	PSY	0,196	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	PPTM	0,105	0,004	0,127	-0,906	-0,702	0,000	0,000	0,000	0,000
	QIXB	0,101	0,006	0,009	-0,354	-0,117	0,004	0,007	0,000	0,000
	PAV	0,069	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,053	0,065	-0,020
	QPT	0,063	0,000	0,005	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	-0,122

Donde: QRB, *Quercus robur*; PRA, *Pinus radiata*; PPTA, *Pinus pinaster* ssp. atlantica; PSY, *Pinus sylvestris*; PPTM, *Pinus pinaster* ssp. mesogeensis; QIXB, *Quercus ilex* ssp. *ballota*; PPN, *Pinus pinea*; QFG, *Quercus faginea*; QSB, *Quercus suber*; CST, *Castanea sativa*; PAV, *Prunus avium*; QPT, *Quercus petraea*; API, Índice Aditivo Potencial; IM\_PT, indicador de marginalidad de la Precipitación Anual; IM\_PV, indicador de marginalidad de la Precipitación en Verano; IM\_TM, indicador de marginalidad de la Temperatura del aire Media anual; IM\_TMI, indicador de marginalidad de la Temperatura del aire media en invierno; IM\_ARE, indicador de marginalidad del contenido medio en Arena; IM\_TF, indicador de marginalidad del contenido en Tierra Fina; IM\_PHA, indicador de marginalidad del valor medio de pH en agua; IM\_MOS, indicador de marginalidad de la Materia Orgánica Superficial.

Los valores de API alcanzados son bastante heterogéneos, reflejo de que las distintas estaciones tienen diferentes condiciones ambientales. Así, los valores más elevados se sitúan ligeramente por debajo de 0,3 (concretamente para *Quercus ilex* ssp. *ballota* en Quintos de Mora o en Monfragüe). En Bande (Orense), los valores de API son todos inferiores a 0,1, salvo para *Quercus robur* que se coloca próximo a 0,25, mientras que en Albarraçín (Teruel) son un poco más altos, llegando tres especies a superar el valor de 0,1 (entre ellas destaca *Pinus sylvestris* que obtiene un valor próximo a 0,2).

Los valores obtenidos de los indicadores de marginalidad (IM) presentan un rango de variación casi completo (no se alcanzan valores máximos de marginalidad superior en ninguna de las variables utilizadas). Mayoritariamente son indicadores de condiciones de marginalidad no severa o incompatible, lo cual es congruente con el hecho de que se correspondan con aquellas especies que presentan en cada estación los valores más elevados de API. No obstante, si aparecen valores muy altos de marginalidad climática en dos especies de las seleccionadas por valores termométricos fríos (*Pinus pinaster* ssp. *atlantica* en la estación de Bande y *Pinus pinaster* ssp. *mesogeensis* en la de Albarraçín) y otra por elevados valores termométricos para *Castanea sativa* en Monfragüe. Respecto a la marginalidad edáfica, sólo para la subespecie *mesogeensis* del pino resinero los valores de pH en agua, fuertemente ácidos, suponen cifras comprometedoras para su estabilidad ecológica.

La figura 1 y la tabla 4 muestran los resultados del análisis de la evolución de las especies seleccionadas en los distintos escenarios de cambio climático contemplados. Sólo se han tenido en cuenta las variables climáticas, con lo que los valores de API en la considerada como "situación actual" son algo inferiores a los anteriormente comentados (tabla 3). Como era de esperar, los valores de API, salvo excepciones, van reduciéndose según aumenta la intensidad del cambio.

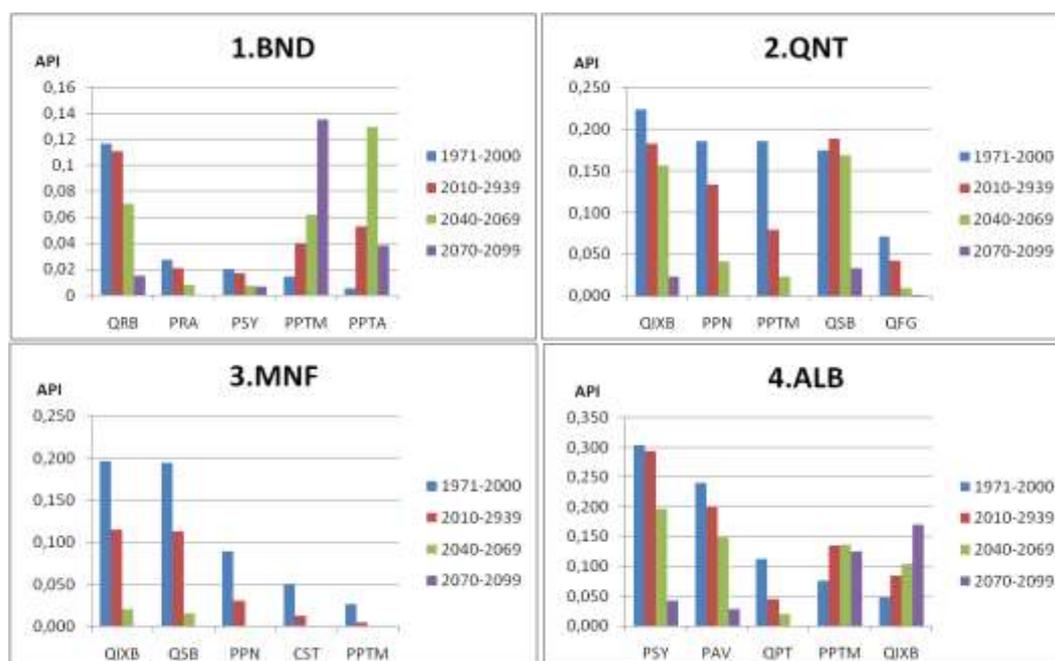


Figura 1. Evolución temporal del índice aditivo de idoneidad ecológica (API).

Tabla 4. Indicadores de marginalidad máximos en diferentes periodos temporales.

Estación	Especie	1971-2000		2010-2039		2040-2069		2070-2099	
		IM <sub>max</sub>	Variable						
1.BND	QRB	-0,052	PV	-0,077	PV	-0,230	PV	-0,692	PT
	PRA	-0,460	PV	-0,556	PV	-0,804	PV	-0,995	PT
	PSY	0,042	TM	0,402	TMI	0,964	TMI	0,994	TMI
	PPTM	0,010	PT	0,005	PT	0,000	-	0,000	-
	PPTA	-1,000	TM	-1,000	TM	-0,826	PV	-1,000	PV
2.QNT	QIXB	0,000	-	0,000	-	-0,005	PT	-0,207	PT
	PPN	0,000	-	0,000	-	0,000	-	-0,810	PT
	PPTM	0,000	-	0,000	-	0,029	TM	0,810	TM
	QSB	0,000	-	-0,065	PT	-0,092	PT	-0,896	PT
	QFG	-0,304	PV	-0,487	PV	0,963	TM	1,000	TM
3.MNF	QIXB	0,000	-	0,071	TM	0,996	TM	1,000	TM
	QSB	0,000	-	0,018	TM	0,980	TM	1,000	TM
	PPN	0,000	-	0,000	-	1,000	TM	1,000	TM
	CST	0,586	TM	0,978	TM	1,000	TM	1,000	TM
	PPTM	0,224	TM	0,946	TM	1,000	TM	1,000	TM
4.ALB	PSY	0,000	-	0,000	-	0,000	-	0,032	TM
	PAV	0,000	-	0,000	-	0,000	-	0,000	-
	QPT	-0,005	PV	-0,053	PV	-0,099	PV	-0,903	PV
	PPTM	-0,906	TM	-0,082	TMI	0,004	PV	0,000	-
	QIXB	-0,354	TM	-0,035	TM	0,005	PV	0,000	-

Donde: IM<sub>max</sub>, Indicador de Marginalidad máximo en valor absoluto; QRB, *Quercus robur*; PRA, *Pinus radiata*; PSY, *Pinus sylvestris*; PPTM, *Pinus pinaster* ssp. mesogeensis; PPTA, *Pinus pinaster* ssp. atlantica; QIXB, *Quercus ilex* ssp. *ballota*; PPN, *Pinus pinea*; QFG, *Quercus faginea*; QSB, *Quercus suber*; CST, *Castanea sativa*; PAV, *Prunus avium*; QPT, *Quercus petraea*;

## 5. Discusión

Los algoritmos aplicados mediante la ejecución del módulo AERF de *ModERFoRest* han arrojado un rango de variabilidad que permite hacer una diagnosis sobre el grado de homologación ecológica de determinadas especies vegetales a las condiciones estacionales analizadas, tanto actuales como futuras, y en consecuencia, extraer valoraciones que pueden ser ecológicamente relevantes. En general, los resultados son concordantes con los expresados por BENITO-GARZON *et al.* (2008) a pesar de que las escalas espaciales de aproximación no son homólogas. A continuación se procede a su interpretación individualizada para cada una de las estaciones analizadas.

En Bande, de las 5 especies que obtienen los valores más altos de API, *Pinus pinaster* ssp. *atlantica* muestra un valor de marginalidad térmica por frío severa o incompatible con su estabilidad ambiental en las condiciones actuales. Además los valores de precipitación estival son bastante reducidos para *Pinus radiata*, lo cual lleva a valores de marginalidad moderada para esta especie. Desde el punto de vista edáfico, los valores de pH en agua están también en situación de marginalidad manifiesta, siendo más reducidos de los observados en la distribución peninsular de *Pinus pinaster* ssp. *mesogeensis*. Todas estas situaciones de marginalidad pluviométrica y edáfica inducen a considerar como altamente probable que las dos especies que las presentan puedan sufrir situaciones de inestabilidad que comprometan seriamente su viabilidad ecológica en esta estación. En consecuencia, sólo *Quercus robur* y *Pinus sylvestris* se podrían considerar en la actualidad como ambientalmente compatibles con la misma.

Respecto de su evolución futura, las condiciones climáticas proyectadas se mantienen como incompatibles para *Pinus pinaster* ssp. *atlántica*, a corto plazo por frío y a medio y largo plazo, por precipitaciones reducidas en verano, que también afecta en este sentido a *Pinus radiata*, mientras que el descenso de precipitaciones totales pone en marginalidad severa a *Quercus robur* a largo plazo. *Pinus sylvestris* se mantiene con cierta estabilidad, aunque con valores de API muy bajos y marginalidad térmica por valores elevados en los meses de invierno y es *Pinus pinaster* ssp. *mesogeensis* el que va logrando unas condiciones climáticas más favorables, con valores de marginalidad muy reducidos o nulos.

La situación es bastante distinta en Quintos de Mora, donde sólo aparece una marginalidad moderada para la especie *Pinus pinea* respecto de los valores de Tierra Fina en el suelo (el reducido valor de esta variable –elevada presencia de elementos gruesos- puede suponer riesgo de inestabilidad ecológica por reducida capacidad de retención de agua en el suelo). Así mismo, la escasa diferencia entre los valores de API obtenidos hace que el conjunto de especies seleccionadas pueden considerarse con un grado de homologación ecológica bastante parejo. Esta situación permanece bastante estable a corto plazo, mientras que ya a medio plazo *Quercus faginea* presenta una marginalidad moderada respecto de la precipitación en verano. A largo plazo, la situación se complica para *Pinus pinea* y *Quercus suber*, con valores de marginalidad inferior severos para la precipitación total y para *Pinus pinaster* ssp. *mesogeensis* y *Quercus suber*, al alcanzarse una marginalidad térmica también severa por valores elevados (calor excesivo).

Para Monfragüe, la homologación ecológica de las especies seleccionadas cae de forma acusada y progresiva en los intervalos temporales considerados. La evolución climática que en ellos se proyecta es hacia un marcado incremento de los valores termométricos, lo que se traduce en un neto descenso de los valores de API para todas las especies. *Castanea sativa* muestra ya actualmente marginalidad térmica moderada, situación que se incrementa notablemente con el tiempo y a la que se unen, con valores incompatibles, el resto de especies a medio y largo plazo. El elevado estrés térmico en los momentos más cálidos del año, que en el entorno peninsular acontecen con los períodos del año de menor entrada de precipitaciones, generará un intenso

estrés hídrico, lo que supone un evidente riesgo de inestabilidad para todas las especies seleccionadas, circunstancia que puede comprometer la instalación, el crecimiento y la reproducción de las mismas.

Finalmente, Albarracín resulta actualmente idóneo ambientalmente para cuatro de las especies seleccionadas. Sólo *Pinus pinaster ssp. mesogeensis* tiene una marginalidad térmica muy severa, consecuencia de unos valores de temperatura media anual más reducidos (fríos) que los observados en la distribución de la especie en la Península Ibérica. No obstante, esta situación de marginalidad mejora con el tiempo, haciendo que la idoneidad ambiental para esta especie crezca (API incrementa sus valores).

En su evolución proyectada, la reducción de la precipitación estival en Albarracín sitúa en situación de marginalidad creciente a *Quercus petraea*, llegando a ser incompatible a largo plazo. Para las cuatro especies restantes, el valor de API disminuye en *Pinus sylvestris* y *Prunus avium*, mientras que aumenta en *Pinus pinaster ssp. mesogeensis* y *Quercus ilex ssp. ballota*, haciendo que estas dos últimas especies sean las que consigan un mayor grado de estabilidad ambiental si se cumplen las proyecciones de cambio climático aplicadas.

Las diferencias ambientales, tanto actuales como futuras (escenarios de cambio climático contemplados), entre las cuatro estaciones analizadas han quedado patentes con los resultados obtenidos de la aplicación de dos de los algoritmos implementados en *ModERFoRest*. La situación actual va a ir cambiando de manera progresiva pero con distintas consecuencias ecológicas para las especies seleccionadas en cada una de ellas. Así en Monfragüe el cambio va a ser relativamente rápido e intenso, llevando a condiciones de marginalidad severa a todas las especies más homologables en la actualidad, comprometiendo seriamente su viabilidad futura. Quintos de Mora es la estación que parece ser que va a tener una mayor estabilidad en la homologación ecológica de las especies seleccionadas, especialmente a corto y medio plazo. Por último, en Bande y en Albarracín, la evolución de las condiciones ambientales va a perjudicar a algunas de las especies seleccionadas, para finalmente favorecer la estabilidad ecológica de otras (este efecto es particularmente notorio con *Pinus pinaster ssp. mesogeensis* en la estación orensana).

Asumiendo que la adaptación local y la plasticidad fenotípica de cada especie pueden amortiguar los efectos del cambio climático sobre ella, afectando a los rangos de distribución inferidos bajo diferentes escenarios de cambio climático (ZAVALA *et al.*, 2015), las tendencias identificadas con las metodologías testadas permiten advertir sobre posibles situaciones no deseadas, que pudieran comprometer la viabilidad ecológica a futuro de actuaciones selvícolas a implementar a corto plazo.

## 6. Conclusiones

La aplicación del software *ModERFoRest* a la evaluación del grado de homologación ecológica de especies forestales arbóreas a estaciones de ámbitos biogeográficos diferenciados ha resultado de fácil implementación, arrojando resultados de sensibilidad adecuada a la escala considerada (estación), de marcado carácter aplicado y ecológicamente coherentes.

La satisfactoria aplicabilidad de las herramientas metodológicas que incorpora (el índice aditivo de idoneidad ecológica y el indicador de marginalidad) ha permitido identificar las limitaciones ecológicas más importantes asociadas al medio físico de cada estación. Esta información es especialmente valiosa, pues posibilita no sólo explicar situaciones pasadas o presentes de inestabilidad ecológica, sino también anticipar contextos futuros de cambio global, y en base a ello, fundamentar, diseñar y ejecutar las tareas de mitigación y de adaptación oportunas.

## 7. Agradecimientos

A Antonio Nicolás, José Manuel Gandullo, Otilio Sánchez-Palomares y Gregorio Montero, que a lo largo de casi 50 años fueron liderando los trabajos de autoecología paramétrica de las principales especies forestales arbóreas españolas, y al amplio equipo de colaboradores que participaron activamente en ellos.

## 8. Bibliografía

AEMET; 2011. Atlas climático ibérico. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. 80 pp.

AEMET; 2015. Escenarios-PNACC Datos mensuales. Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) Datos mensuales. Guía de usuario. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.

ALONSO PONCE, R.; ÁGUEDA, B.; ÁGREDA, T.; MODREGO, M. P.; ALDEA, J.; MARTÍNEZ-PEÑA, F.; 2010a. Un modelo de potencialidad climática para la trufa negra (*Tuber melanosporum*) en Teruel (España). *For. Syst.* 19(2):208–220.

ALONSO PONCE, R.; LÓPEZ SENESPLEDA, E.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; 2010b. A novel application of the ecological field theory to the definition of physiographic and climatic potential areas of forest species. *Eur. J. For. Res.* 129(1):119–131.

BENITO-GARZON, M.; DE DIOS, R.S.; OLLERO, H.S.; 2008. Effects of climate change on the distribution of Iberian tress species. *Appl. Veg. Sci.*, 11: 169-178.

DAWSON, T.P.; JACKSON, S.T.; HOUSE, J.I.; PRENTICE, I.C.; MACE, G.M.; 2011. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332: 53-58.

GANDULLO, J. M.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA, 188 p. Madrid.

GÓMEZ-SANZ, V.; 2019. Site- scale ecological marginality: Evaluation model and application to acase study. *Ecol. Model.* 408, 108739.

GUISAN, A.; ZIMMERMANN, N.E.; 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135: 147-186

HUTCHINSON, G.E.; 1957. Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22:415-427.

IPCC; 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, New York.

LÓPEZ-SENEPLEDA, E.; MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; ALONSO PONCE, R.; SERRADA, R.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; 2018. Cincuenta años de autoecología forestal paramétrica en España. *Foresta*. 70:40–47

SAURA, S.; ESTREGUIL, C.; CAUDULLO, G.; 2015. Pilot analysis of the connectivity of the Natura 2000 forest sites to guide forest conservation and restoration. Final report of SC16 contract in 2nd Framework service contract for the provision of forest data and services in support to the European Forest Data Centre (Reference: 2012/ S 78-127532) <http://739uq.w4yserver.at/index.php/projects>.

WU, H.; SHARPE, P.J.H.; WALKER, J.; PENRIDGE L.K.; 1985. Ecological field theory: a spatial analysis of resource interference among plants. *Ecol. Modell.* 29:215–243.

ZAVALA, M.A.; RÚÍZ-BENITO, P.; BENITO-GARZÓN, M.; GARCÍA-VALDÉS, R.; 2015. Aplicación de los Modelos de Distribución de Especies (MDE) para el análisis de los efectos del cambio climático en los bosques ibéricos. En: HERRERO A.; ZAVALA M.A. (eds.) *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*. pp: 419-432. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.