



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-008

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

AUTOECOLOGÍA DE LAS PRINCIPALES ESPECIES DE *EUCALYPTUS* EN ANDALUCÍA

SESEÑA RENGEL, A.¹, GUZMÁN ÁLVAREZ, J.R.², VENEGAS TRONCOSO, J.¹

¹ Agencia de Medio Ambiente y Agua. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía.

² Dirección General de Gestión del Medio Natural. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.

Resumen

En este estudio se ha caracterizado el hábitat actual de las especies de eucaliptos presentes en Andalucía, estableciendo los valores que lo definen. Los datos de inventario del IFN3, de ordenación de montes públicos y llevados a cabo por ENCE, se relacionaron con variables ambientales definidoras del biotopo (orografía, suelo y clima). El estudio autoecológico se abordó mediante dos metodologías distintas: a) Distribución potencial de una especie a partir de la caracterización paramétrica de variables del medio físico, (Metodología caracterización paramétrica) y b) Distribución de probabilidades de máxima entropía de presencia de una especie (Metodología MaxEnt). Se han obtenido como resultado mapas de la distribución potencial de *Eucalyptus globulus* y *E. camaldulensis*, así como curvas de respuesta que relacionan las variables ambientales con la probabilidad de presencia para las especies analizadas.

Palabras clave

Eucaliptos, *E. camaldulensis*, *E. globulus*, biomasa, caracterización paramétrica, MaxEnt, curvas respuesta, variables ambientales, biotopo, hábitat.

1. Introducción

Este estudio forma parte de los trabajos emprendidos por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio para aumentar el conocimiento sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal en Andalucía.

La autoecología es la ecología de las especies o los individuos considerados aisladamente y se ocupa específicamente de cómo responden los organismos a las características del medio externo (MARGALEF, 1974). Los estudios autoecológicos de las especies forestales en España cuentan ya con una dilatada trayectoria. De hecho, se desarrollaron inicialmente con el estudio autoecológico de las principales especies de pinos peninsulares abarcando un gran número de artículos y monografías basados en la metodología de la autoecología paramétrica (NICOLÁS y GANDULLO, 1967, 1969; GANDULLO, 1972, 1974; ELENA *et al.*; 1985; SÁNCHEZ PALOMARES *et al.*; 1990; ELENA y SÁNCHEZ PALOMARES, 1991; GANDULLO y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994; GANDULLO *et al.*; 2000). El hábitat actual potencialmente idóneo de una especie está determinado por la existencia de condiciones del medio que no impidan su establecimiento y favorezcan su perpetuación, incluyendo los factores abióticos y los bióticos. Estas variables delimitan el área actual de hábitat, concepto de base ecológica de gran utilidad práctica para la silvicultura aplicada. Si, adicionalmente, se aborda la determinación del área potencial de distribución en un entorno evolutivo, teniendo en cuenta el marco cambiante de las condiciones ambientales (especialmente las climáticas, lo que en la actualidad cobra especial relevancia), se obtendrá, además, una importante herramienta para la planificación territorial.

Para la caracterización del hábitat es preciso contar con información de partida lo más representativa posible. También es un requisito importante que la información se haya obtenido a partir de metodologías que permitan realizar contrastes estadísticos entre la distribución de las especies y las variables ambientales que definen el hábitat. El punto de partida para la aprehensión de las relaciones entre las condiciones ambientales y la observación sobre la presencia o ausencia de las especies es la asociación de relaciones entre unas y la otra: la repetición de la presencia de una especie conduce a asociar con esta manifestación los valores umbrales u otros (medias, medianas) que caractericen a los factores ambientales. Desde que el uso de los ordenadores permite realizar potentes procesos de cálculo, esta capacidad de asociación ha sido multiplicada, desarrollándose en

paralelo diversos métodos para poner en relación el fenómeno que se desea explicar (la presencia o, en su caso, abundancia de una especie) con el valor que adoptan las variables definidoras del biotopo (ALONSO PONCE, 2008).

2. Objetivos

El objetivo del trabajo es la determinación de la distribución potencial y caracterización del hábitat de las especies de eucaliptos presentes en Andalucía estableciendo los valores que lo definen, actualizando las metodologías desarrolladas hasta la fecha a partir de la mejor información disponible.

3. Metodología

En este estudio se ha partido de las parcelas de muestreo del Inventario Forestal Nacional III, (IFN3), parcelas de inventario de Proyectos de Ordenación de montes públicos e inventarios proporcionados por la Empresa de Energía y Celulosa (ENCE). En total se han contado con datos de inventario de 2.980 parcelas de muestreo de *E. camaldulensis* y 13.425 parcelas de muestreo de *E. globulus*.

Tabla 1. Número de parcelas de inventario: IFN3, proyectos de de ordenación y ENCE.

FUENTE	NÚMERO DE PARCELAS	
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
Proyectos de Ordenación	2.707	2.210
IFN3	255	326
ENCE	18	10.889
<i>Total</i>	2.980	13.425

Es importante reseñar que en este estudio se ha partido de una presencia de las especies que responde a condiciones ambientales definidas, pero que está muy influida por las decisiones técnicas que han determinado la implantación y difusión del eucalipto en Andalucía. Por otro lado, cabe destacar que para la caracterización del hábitat de distribución de estas especies se ha empleado toda la información disponible, pero ha de tenerse en cuenta que estamos tratando con una especie de crecimiento rápido y con turnos de corta relativamente cortos, en la que no se han contemplado las variaciones que se hayan podido producir en las zonas cartografiadas e inventariadas desde que se tomaron los datos en campo (cortas finales, intervenciones selvícolas como claras, aprovechamientos, incendios o algún otro tipo de circunstancia) en un sector muy dinámico, máxime como respuesta a los importantes cambios en el mercado de los productos maderables y biomásicos, lo que introduce un elemento a considerar a la hora de interpretar los resultados que de este estudio se obtengan.

Respecto a las variables ambientales, en la Tabla 2 se especifican las que se han utilizado en este estudio, que han sido las mismas que fueron empleadas para la publicación "Modelos de existencias, crecimiento y producción coníferas para Andalucía" GUZMÁN ÁLVAREZ *et al.* (2012), así como las Componentes Principales (CP) obtenidas a partir de estas.

Tabla 2. Variables ambientales.

Variables Orográfica	
mde	Elevación del terreno (m).
pte	Pendiente del relieve (grados).
cur_md	Curvatura media (1/m).
orien	Orientación del relieve (grados).
ins	Insolación (adimensional).
Variables Climáticas	
ptt	Precipitación anual (mm).
pin	Precipitación de invierno (mm).
pp	Precipitación de primavera (mm).

pv	Precipitación de verano (mm).
po	Precipitación de otoño (mm).
ta	Temperatura media anual (°C).
tminf	Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C).
tmaxc	Temperatura media de las máximas del mes más cálido (°C).
osc1	Oscilación térmica media (°C).
tmf	Temperatura media del mes más frío (°C).
tmc	Temperatura media del mes más cálido (°C).
osc2	Oscilación térmica total (°C).
etott	Evapotranspiración de referencia anual (mm).
ssup	Suma de superávits (mm).
sdef	Suma de déficits (mm).
iha	Índice hídrico anual (adimensional)
<i>Variables Edáficas</i>	
are	Media ponderada del contenido de arena en todo el perfil del suelo (%).
lim	Media ponderada del contenido de limo en todo el perfil del suelo (%).
arc	Media ponderada del contenido de arcilla en todo el perfil del suelo (%).
cod_hid	Media ponderada de la conductividad hidráulica saturada en todo el perfil del suelo (cm/día).
mo	Media ponderada de materia orgánica en el perfil del suelo (%).
mo_sup	Contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo (%).
ph	Media ponderada del pH en todo el perfil del suelo.
tf	Media ponderada del contenido de tierra fina en todo el perfil del suelo (%).
ca	Caliza activa (%).
cic	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 gr).
psb	Porcentaje de saturación de bases (%).
n_sup	Contenido de nitrógeno en el horizonte superficial del suelo (%).
crad	Media ponderada de la capacidad de retención del agua en todo el perfil del suelo (mm/m).

Para la caracterización del hábitat actual de las especies de eucaliptos presentes en Andalucía se han seguido dos metodologías distintas:

- A) Distribución potencial de una especie a partir de la caracterización paramétrica de variables del medio físico o factores de biotopo (Metodología de caracterización paramétrica).
- B) Distribución de probabilidades de máxima entropía de presencia de una especie (Metodología MaxEnt).

A. Metodología de caracterización paramétrica

La autoecología paramétrica engloba una serie de técnicas de análisis (que en su base se derivan de análisis multivariante de regresión) que han ido evolucionando con el paso del tiempo y que comparten el enfoque del método de las envolventes ambientales cuya finalidad es calcular el nicho ecológico de una especie (descrito por su presencia/ausencia y abundancia en una red de puntos de muestreo) como la mínima envolvente del espacio multidimensional conformado por los factores ambientales considerados (definidos por los valores que adopten las variables ambientales en los puntos de muestreo). Bajo el concepto de nicho ecológico se incluye la respuesta (presencia versus ausencia y abundancia) de la especie a la incidencia de los factores ambientales.

El fundamento de la metodología consiste en establecer los valores de los parámetros ambientales que caracterizan la estación ecológica en una red representativa de parcelas con presencia de la especie para, posteriormente, extrapolar espacialmente esta caracterización a la totalidad del territorio. En el estudio se ha seguido la metodología de caracterización paramétrica de los biotopos ocupados por parcelas con presencia de la especie estudiada, realizando posteriormente una extrapolación de lo observado al resto del territorio (GANDULLO y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994; GÓMEZ, *et al.*, 2002; GANDULLO, *et al.*, 2004a, 2004b; SÁNCHEZ PALOMARES, *et al.*, 2007a, 2007b, 2008; ALONSO PONCE, *et al.*, 2010).

La metodología de aplicación de la autoecología paramétrica ha incluido el cálculo del Índice de Potencialidad, publicado por SÁNCHEZ PALOMARES *et al.* (2004). Este índice permite evaluar la

aptitud de una estación en relación con la mayor o menor posibilidad de éxito a la hora de realizar una introducción o restauración de una especie forestal mediante un indicador numérico que es función del valor que adopta un parámetro ambiental dado, evaluando si este valor se sitúa dentro de los tramos centrales o marginales definidos.

Tabla 3. Establecimiento de Clases de Potencialidad

Valor del Indicador	Clase	Denominación
$lpot \geq 3,85$	1	Potencialidad Óptima
$3,85 > lpot \geq 3,75$	2	Potencialidad Alta
$3,75 > lpot \geq 3,65$	3	Potencialidad Media
$lpot < 3,65$	4	Potencialidad Baja

Para aplicar esta metodología se diseñó una aplicación SIG específica basada en análisis de coberturas ráster y fundada en el planteamiento metodológico de GANDULLO y SANCHEZ PALOMARES (1994), a partir de la cual, una vez determinada la red representativa de parcelas con presencia de la especie, se establecieron los valores de los parámetros ambientales característicos de la estación ecológica, y, posteriormente, se realizó la extrapolación espacial de dicha caracterización, así como el cálculo del índice de potencialidad y de la clase de potencialidad en cada pixel del territorio.

B. Metodología MaxEnt

En los últimos años se han desarrollado métodos alternativos a la autoecología paramétrica para modelizar la distribución territorial de las especies forestales. Estas modelizaciones incluyen la interpolación espacial de los resultados, de modo que se obtienen mapas territoriales (coberturas gráficas) a distintas escalas de representación espacial.

El punto de partida de estos modelos es relacionar los datos de presencia (o abundancia) de una especie con variables ambientales predictoras. Entre los métodos con enfoque predictivo o probabilístico que permiten obtener modelos de distribución potencial de especies se encuentra MaxEnt, que es un modelo de distribución de especies del tipo “modelado con datos de presencia solamente” que permite estimar la relación entre los registros de las especies y un conjunto de variables ambientales (ELITH *et al.*, 2011). En los últimos años se está extendiendo su aplicación en investigaciones ecológicas relacionadas con la distribución de la vegetación y la predicción de cambios ante variaciones medioambientales (LIU *et al.*, 2005; PHILLIPS *et al.*, 2006; WARREN y SEIFERT, 2011; NAVARRO *et al.*, 2011).

MaxEnt (Máxima Entropía) (PHILLIPS *et al.*, 2006; PHILLIPS y DUDÍK, 2008) es un método multi-objetivo para realizar predicciones o inferencias a partir de información incompleta. Tiene su fundamento en el principio estadístico de máxima entropía, resuelto a partir de la estimación de una distribución de probabilidades, denominadas de máxima entropía, sujeta a una serie de restricciones que reflejan la información incompleta que poseemos sobre la distribución real de la especie (PHILLIPS *et al.*, 2006). En MaxEnt, cada variable ambiental (“característica” o “features”) que tiene relación con la presencia actual de la especie satisface la restricción de que su valor medio esperado al aplicar el modelo se debe aproximar al valor medio obtenido a partir de los puntos de muestreo disponibles.

El resultado de la aplicación de MaxEnt es la modelización de la distribución potencial de la especie dentro del territorio de estudio. MaxEnt tiene tres formatos de salida: “raw”, “cumulative” y “logistic”. El tercero es el empleado en este trabajo, y representa la probabilidad de presencia de una especie en base a las variables ambientales incluidas en el modelo.

Una vez determinada la probabilidad de presencia de la especie en el territorio analizado mediante el modelo generado por MaxEnt (que adopta valores entre 0 y 1), es posible generar un mapa de distribución potencial determinando un umbral de probabilidad a partir del cual se considera que la especie puede estar representada en el territorio. Existen varios criterios para establecer el corte del valor umbral adecuado para delimitar las zonas potenciales para el desarrollo de cada especie. En este trabajo se optó por el umbral logístico que maximiza la suma de la tasa de positivos verdaderos y la tasa de negativos verdaderos tanto en la muestra de entrenamiento como de testado (LIU *et al.*, 2005; FREEMAN y MOISEN, 2008). Es decir, se elige el valor umbral que maximiza la suma

del número de muestras de presencia que ocupan las zonas clasificadas como adecuadas para el desarrollo de la especie, más las muestras de ausencia (pseudausencias) que se encuentran en las zonas clasificadas como no adecuadas.

MaxEnt es sensible a la existencia de correlación entre las variables ambientales que definen el biotopo, lo que puede originar problemas de multicolinealidad. Aunque MaxEnt es más estable en el manejo de la multicolinealidad que los modelos de distribución potencial basados en análisis de regresión y, por tanto, hay menos necesidad de eliminar las variables correlacionadas (ELITH *et al.*, 2011), siempre es aconsejable excluir las variables que, a priori, son ecológicamente menos relevantes.

Los problemas ligados a la colinealidad se han soslayado adoptando como “características” las componentes principales (CP) calculadas a partir de las 36 variables ambientales originales. Sin embargo, al utilizar las CP no es posible interpretar directamente el impacto de cada variable ambiental sobre la idoneidad del área de estudio para cada especie analizada, por lo cual se optó por utilizar un procedimiento mixto. En primer lugar, se aplicó MaxEnt eliminando las variables ambientales altamente correlacionadas y menos relevantes desde el punto de vista ecológico. Esta fase del estudio permitió obtener las curvas de respuesta que relacionan la probabilidad de presencia de las especies con cada una de las variables ambientales y, asimismo, fue posible analizar el impacto de cada variable ambiental sobre la presencia de las especies en el territorio. Las curvas de respuestas de las variables ambientales originales muestran la variación que experimenta la probabilidad de presencia de la especie al modificar cada una de las variables ambientales. Conviene poner de manifiesto que la probabilidad que se obtiene de cada curva de respuesta, representa solo una fracción de la probabilidad de presencia final de la especie, dependiendo de la importancia que tenga la variable ambiental sobre su distribución.

Posteriormente, se ejecutó de nuevo la aplicación MaxEnt empleando 20 CP (que explican el 98,2% de la varianza total de los datos), obteniendo de este modo los mapas de probabilidades de presencia de cada especie a partir de las mismas. Este procedimiento permite representar la distribución potencial de las especies evitando los problemas de multicolinealidad. La valoración de la importancia de cada variable ambiental en la distribución de cada especie se ejecutó mediante el procedimiento conocido como Jackknife, que consiste en excluir una variable y ejecutar el modelo con el resto de las variables ambientales. De esta forma es posible cuantificar el impacto de la variable excluida sobre los resultados finales del modelo, repitiéndose este proceso para el conjunto de variables. Se obtienen conclusiones más fiables analizando los resultados de la aplicación del método Jackknife sobre una muestra de casos que no han intervenido en el entrenamiento que dio lugar a la definición del modelo, reservados para el testado del procedimiento. La importancia de cada variable se expresó a través de un índice de ganancia, de manera que las variables más influyentes alcanzaron índices de ganancias más elevados.

4. Resultados

Los resultados finales y de cada una de las etapas metodológicas pueden consultarse a través de la Red de Información Ambiental (REDIAM) de la Junta de Andalucía.

A Metodología de caracterización paramétrica

En las siguientes tablas se ofrecen los resultados de la caracterización paramétrica para las dos especies de eucaliptos predominantes en Andalucía. Estos datos suponen una ampliación y actualización de los obtenidos en estudios anteriores (SERRADA *et al.*, 2008) y son coherentes con ellos.

Tabla 4. Caracterización paramétrica para *Eucalyptus globulus*

VARIABLE		LI	UI	M	US	LS
Altitud	mde	1,4	93,6	264,6	463,5	900,1
Pendiente	pte	0,1	1,3	3,5	8,8	24,7
Insolación Gandullos	ins	0,3	0,8	1,0	1,1	1,3
Curvatura media	cur_md	-0,2	0,0	0,0	0,1	0,2
Orientación	orien	0,0	37,4	189,3	320,6	360,0
Precipitación de Invierno	pin	242,9	273,6	331,6	401,8	599,5

VARIABLE		LI	UI	M	US	LS
Precipitación de Primavera	pp	137,7	158,2	204,0	246,8	308,9
Precipitación de Verano	pv	15,6	25,0	35,5	58,2	58,2
Precipitación de Otoño	po	145,1	167,8	206,6	235,9	290,9
Precipitación de Total	ptt	558,3	622,0	776,6	929,5	1.218,9
Temperatura Media Anual	ta	14,4	15,9	17,1	17,9	18,6
Temperatura media máx. mes cálido	tmaxc	27,6	33,4	34,1	34,9	36,2
Temperatura media mín. mes frío	tminf	1,4	3,3	4,7	5,6	8,3
Temperatura media mes cálido	tmc	22,6	24,5	25,7	26,6	27,5
Temperatura media mes frío	tmf	7,1	8,5	9,7	10,4	11,9
Oscilación Térmica Media	osc1	12,3	15,7	16,0	16,6	18,8
Oscilación Térmica Total	osc2	19,9	28,8	29,4	30,5	32,2
Índice hídrico anual	iha	-29,0	-21,0	-6,0	11,0	72,0
Evapotranspiración de referencia anual	etott	920,2	1.343,4	1.416,5	1.469,1	1.578,6
Suma de déficit	sdef	306,0	395,0	481,0	583,0	714,0
Suma de superavit	ssup	55,0	106,0	216,0	355,0	735,0
Porcentaje de tierra fina	tf	18,6	38,0	52,3	87,7	100,0
Porcentaje de Arcillas	arc	5,0	19,4	24,1	28,4	41,0
Porcentaje de Arena	are	19,6	41,7	49,6	61,9	91,8
Porcentaje de Limo	lim	2,5	18,5	26,3	31,2	53,5
Capacidad de Retención de Agua	crad	43,9	114,2	137,6	157,2	185,1
pH	ph	4,6	5,2	5,6	6,3	7,9
Materia Orgánica	mo	0,4	1,0	1,4	1,9	3,4
Materia Orgánica superficial	mo_sp	0,2	1,3	1,9	2,5	3,4
Conductividad hidráulica	cod_hid	13,6	19,7	31,2	64,6	608,0
Nitrógeno superficial	n_sup	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3
Capacidad de intercambio catiónico	cic	0,0	4,2	10,7	15,8	31,2
Porcentaje saturación bases	psb	46,1	87,9	93,1	99,7	100,0
Caliza activa	ca	0,3	1,1	1,4	1,9	7,9

LI: Límite Inferior (valor mínimo de la serie de datos); UI: Umbral Inferior (percentil 10 de la serie de datos); M: Mediana; US: Umbral Superior (percentil 90 de la serie de datos); LS: Límite Superior (valor máximo de la serie de datos)

Tabla 5. Caracterización paramétrica para *Eucalyptus camaldulensis*

VARIABLE		LI	UI	M	US	LS
Altitud	mde	0,0	42,3	319,6	488,9	863,5
Pendiente	pte	0,0	0,8	5,6	12,8	28,8
Insolación Gandullos	ins	0,3	0,8	1,0	1,2	1,4
Curvatura media	cur_md	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,3
Orientación	orien	0,1	30,4	173,2	307,3	359,8
Precipitación de Invierno	pin	42,1	268,7	339,5	410,4	733,2
Precipitación de Primavera	pp	65,4	158,6	211,1	247,3	345,5
Precipitación de Verano	pv	14,2	24,1	37,6	57,0	57,0
Precipitación de Otoño	po	75,4	171,1	211,5	242,2	342,4
Precipitación de Total	ptt	206,3	625,2	799,7	944,5	1.420,4
Temperatura Media Anual	ta	14,4	15,7	16,9	18,0	18,8
Temperatura media máx. mes cálido	tmaxc	26,5	33,1	34,4	35,5	36,5
Temperatura media mín. mes frío	tminf	1,5	2,6	4,4	5,8	9,6
Temperatura media mes cálido	tmc	22,3	24,2	26,1	27,0	27,8
Temperatura media mes frío	tmf	6,5	8,0	9,4	10,6	12,8
Oscilación Térmica Media	osc1	10,0	15,4	16,2	18,1	19,8
Oscilación Térmica Total	osc2	17,0	28,8	29,9	32,4	34,0
Índice hídrico anual	iha	-46,0	-16,0	-3,0	16,0	123,0
Evapotranspiración de referencia anual	etott	748,6	1.288,4	1.393,6	1.454,9	1.636,8

VARIABLE		LI	UI	M	US	LS
Suma de déficit	sdef	217,0	381,0	473,0	533,0	765,0
Suma de superavit	ssup	0,0	129,0	237,0	382,0	989,0
Porcentaje de tierra fina	tf	15,2	33,5	54,5	94,4	100,0
Porcentaje de Arcillas	arc	4,6	16,5	22,8	28,4	48,0
Porcentaje de Arena	are	10,4	40,8	51,6	67,8	91,4
Porcentaje de Limo	lim	2,5	11,9	25,0	32,0	53,0
Capacidad de Retencion de Agua	crad	45,0	100,2	135,5	159,1	201,1
pH	ph	4,9	5,3	5,8	6,5	8,4
Materia Organica	mo	0,4	0,8	1,2	2,0	3,5
Materia Organica superficial	mo_sp	0,2	1,4	1,9	2,6	4,5
Conductividad hidráulica	cod_hid	10,4	19,3	34,6	105,8	587,4
Nitrógeno superficial	n_sup	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4
Capacidad de intercambio cationico	cic	0,1	1,2	11,6	18,7	31,2
Porcentaje saturación bases	psb	15,9	81,2	92,9	99,7	100,0
Caliza activa	ca	0,1	1,0	1,4	5,0	11,6

LI: Límite Inferior (valor mínimo de la serie de datos); UI: Umbral Inferior (percentil 10 de la serie de datos); M: Mediana; US: Umbral Superior (percentil 90 de la serie de datos); LS: Límite Superior (valor máximo de la serie de datos)

A partir de la caracterización paramétrica, mediante la extrapolación espacial de los resultados a la totalidad de la región andaluza se obtuvieron los mapas del Índice de Potencialidad (Figura 1 y 2) de las dos especies de eucaliptos que, a su vez, fueron reclasificados en las cuatro categorías de potencialidad especificadas anteriormente.

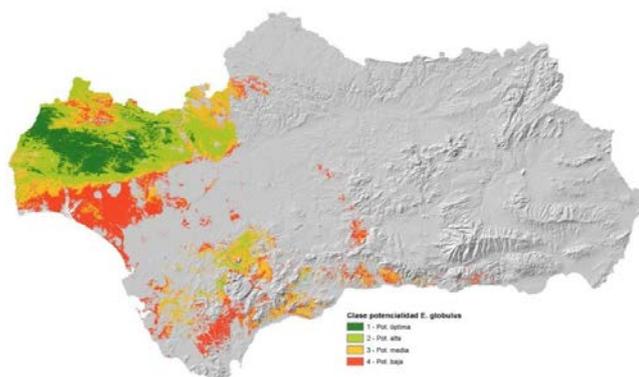


Figura 1. Índice de Potencialidad E. globulus

La siguiente tabla muestra la distribución de superficie por clase de potencialidad para cada una de las especies de eucalipto analizadas, así como la superficie de presencia de las distintas especies actualizada para el año de referencia 2013, aspecto tratado en profundidad en el artículo paralelo presentado en el presente Congreso cuyo título es “Distribución actual de los eucaliptares en Andalucía y modelos de crecimiento y producción de biomasa”, (VENEGAS et al., 2017).

Tabla 6. Distribución de superficie por clase de Potencialidad. Regional

Área de Potencialidad	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
Óptima	253.656	583.040
Alta	548.507	978.527
Media	432.095	2.003.862
Baja	482.910	1.353.350
<i>Total</i>	<i>1.717.168</i>	<i>4.918.779</i>
Sup. Distribución Actual (2013)	121.851	31.079

Además se particulariza estos datos para las provincias de Huelva y Sevilla por ser las que en la actualidad presentan mayor superficie de eucaliptares y con mayor capacidad productiva.

Tabla 7. Distribución de superficie por clase de Potencialidad. Huelva-Sevilla

Área de Potencialidad	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
Óptima	253.530	578.661
Alta	522.380	554.673
Media	290.238	497.022
Baja	306.969	364.715
<i>Total</i>	<i>1.373.117</i>	<i>1.995.071</i>
Sup. Distribución Actual (2013)	121.778	23.850

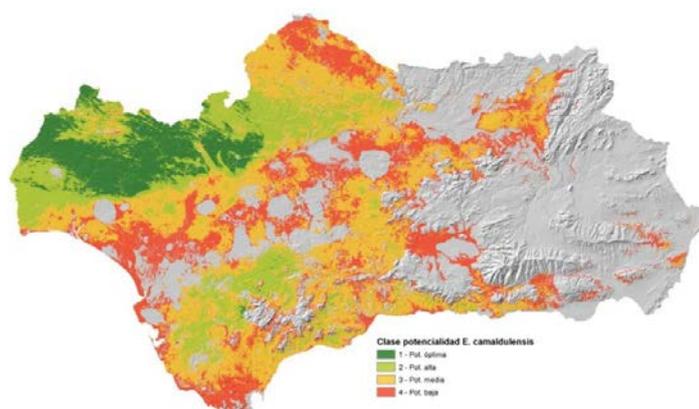


Figura 2. Índice de Potencialidad *E. camaldulensis*

B. Metodología MaxEnt

En las Figuras 3 y 4 se presentan los mapas de probabilidad de presencia de las dos especies de eucaliptos presentes en Andalucía, que han sido resultado de la aplicación del modelo MaxEnt, siendo representado el resultado obtenido para las provincias de Huelva y Sevilla por ser las que en tiempos recientes han presentado mayor superficie de eucaliptares y con mayor capacidad productiva. Además, y de modo ilustrativo, en la Figura 5 y 6 se presentan las curvas de respuesta de las 25 variables ambientales con mayor relevancia para el modelo MaxEnt. Los picos pueden interpretarse como los intervalos de las condiciones ambientales que resultan más favorables para la presencia de la especie en el territorio.

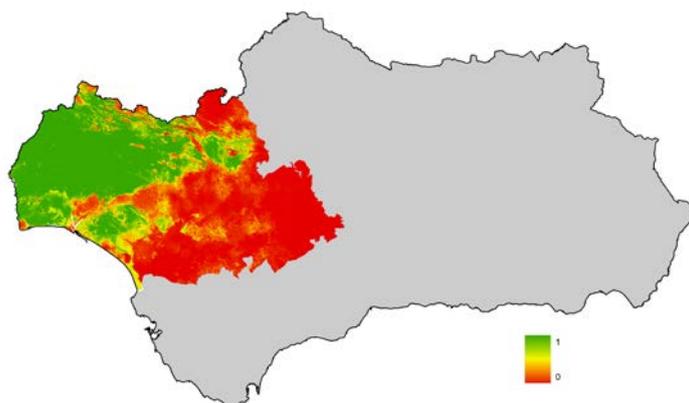


Figura 3. Probabilidad de presencia potencial. *E. globulus*

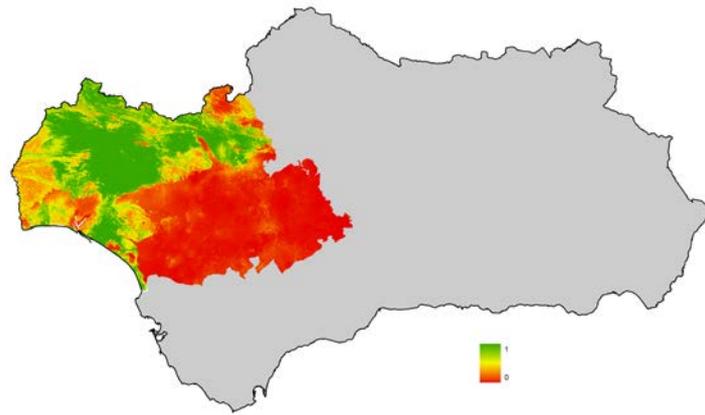


Figura 4. Probabilidad de presencia potencial. *E. camaldulensis*

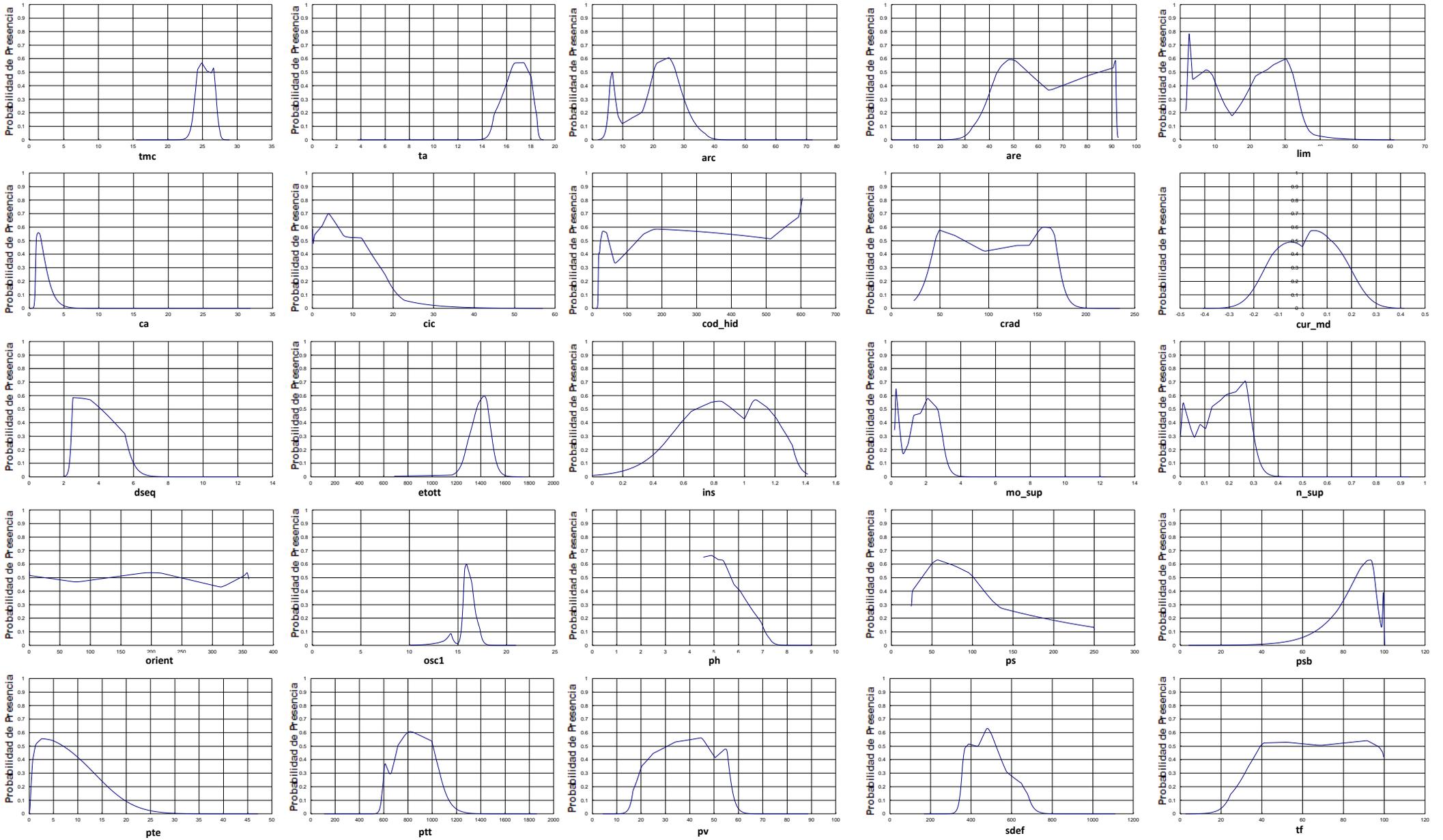


Figura 5. Curvas de respuestas de variables ambientales. *E. globulus*

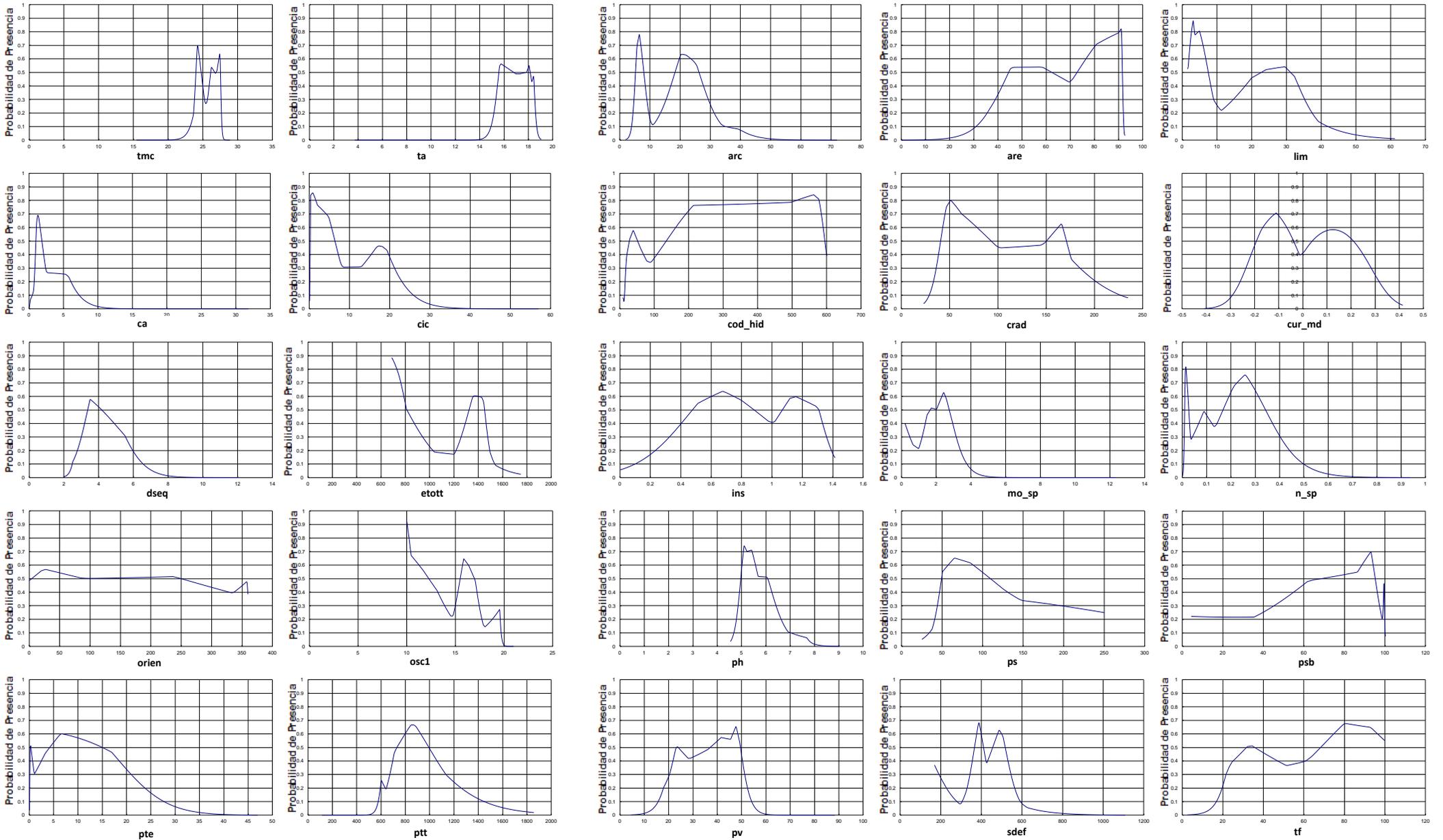


Figura 6. Curvas de respuestas de variables ambientales. *E. camaldulensis*

5. Discusión

En relación con la información de partida sobre vegetación, es importante remarcar que no se han discriminado los datos de partida en función de si los eucaliptos proceden de plantación, replantación o están naturalizados debido a que no se contaba con esta información de partida que abarcara todo el territorio de estudio y las dos especies.

Es importante llamar la atención sobre la existencia de una fuente de error en los modelos generados (que hay que tener en cuenta en la interpretación de los resultados) al partir del presupuesto de que la especie vegeta de forma adecuada en todas los sitios, cuando realmente se pueden dar lugar a condiciones de vegetación óptimas, subóptimas o, incluso, claramente deficientes.

En cuanto al estudio paramétrico, los resultados amplían y actualizan los presentados en trabajos anteriores (SERRADA *et al.*, 2008) ofreciendo una panorámica de mayor resolución al haberse abordado en una escala regional contando además con la mejor información ambiental disponible.

La aplicación de la metodología MaxEnt aporta una perspectiva complementaria a los estudios de la distribución potencial de los eucaliptares en Andalucía. Un buen indicador de la bondad de los modelos derivados de la aplicación de MaxEnt son los gráficos que relacionan el umbral acumulado y la tasa de omisión (Figura 7, como ejemplo para el caso de *Eucalyptus globulus*). La relación ideal entre el umbral acumulado y la tasa de omisión es una recta de pendiente 1:1. En la medida en que las tasas de omisión correspondientes a los datos de entrenamiento y testado se acercan a la omisión ideal, la clasificación obtenida por la aplicación MaxEnt será mejor.

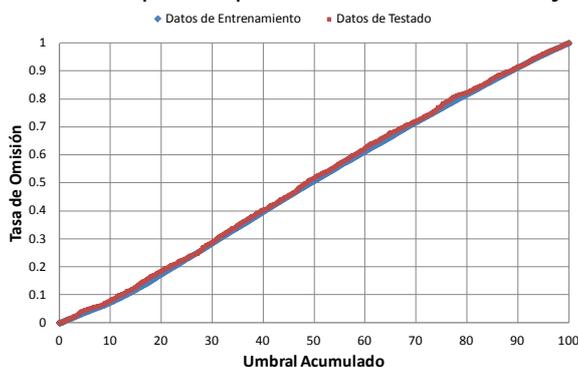


Figura 7. Tasas de omisión obtenidas para *E. globulus*

Puede apreciarse en la Figura 7 que para la especie analizada, las tasas de omisión para los datos de entrenamiento y testado se acercaron a la tasa de omisión ideal, confirmando que el modelo obtenido con MaxEnt fue adecuado, siendo este también el comportamiento de la otra especie. Un segundo indicador de la bondad del modelo es la calidad de la curva ROC, que representa la idoneidad de un algoritmo de clasificación. Cuanto más se asemejen las curvas ROC de los datos de entrenamiento y de testado mejor será el modelo. En la Figura 8 puede apreciarse que la curva ROC obtenida mostró un comportamiento adecuado y permitió confirmar la capacidad predictiva y generalizadora de MaxEnt para las condiciones analizadas en este estudio. Otro indicador que proporciona MaxEnt es el área bajo la curva ROC (AUC). AUC es la probabilidad de que el algoritmo de clasificación ordene correctamente dos eventos escogidos aleatoriamente. Una clasificación perfecta alcanza un valor de AUC igual a 1, mientras que una clasificación totalmente aleatoria se corresponde con un AUC igual a 0,5.

6. Conclusiones

Los dos métodos anteriores, autoecología paramétrica y MaxEnt, han permitido obtener información geográfica de detalle sobre la distribución potencial de las especies de eucaliptos en Andalucía. MaxEnt proporcionó, además, las curvas de respuesta de las variables ambientales, así como la importancia de las mismas para cada una de las especies analizadas en el presente estudio. Esta información supone un buen punto de partida para el diseño de modelos de gestión orientados

43 en la distribución de las especies en el territorio. No obstante, hay que tener presente que en la
 44 información de vegetación de partida no se ha discriminado el origen de las especies presentes en el
 45 territorio, asumiendo por ello una fuente de error en los modelos generados al igualar la relevancia de
 46 la presencia de las especies cuando realmente se pueden dar lugar a condiciones de vegetación
 47 óptimas, subóptimas o, incluso, claramente deficientes.

48
 49

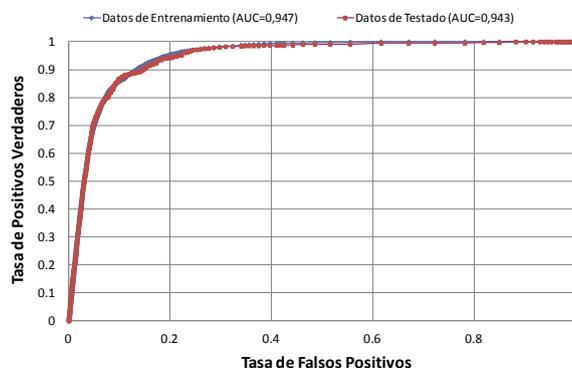


Figura 8. Curvas ROC y área bajo la curva (AUC) para *E. camaldulensis*

50
 51

52

53 7. Agradecimientos

54 El proyecto ha contado con la financiación del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio
 55 Ambiente a través del Fondo para el Aprovechamiento de la Biomasa Forestal Residual (Subconcepto
 56 755.02) del Fondo del Patrimonio Natural de los Presupuestos Generales del Estado.

57

58 8. Bibliografía

59

60 ALONSO PONCE, R. 2008. Autoecología paramétrica de *Juniperus thurifera* L. en Castilla y
 61 León. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

62

63 ALONSO PONCE, R.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; ROIG, S., LÓPEZ SENESPLEDA, E.; GANDULLO,
 64 J.M. 2010. Las estaciones ecológicas actuales y potenciales de los sabinars albares
 65 españoles, 19. Monografías INIA. Serie Forestal nº19. Madrid.

66

67 ELENA ROSSELLÓ, R.; SÁNCHEZ PALOMARES, O. 1991. Los pinares españoles de *Pinus nigra*
 68 Arn.: síntesis ecológica. Monografías INIA, 81. Madrid.

69

70 ELENA ROSSELLÓ, R.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; CARRETERO CARRERO, M. P. 1985. Estudio
 71 fisiográfico y climático de los pinares españoles de *Pinus nigra* Arn. Comunicaciones INIA.
 72 Serie Recursos Naturales, 36. Madrid.

73 ELITH, J.; PHILLIPS, S. J.; HASTIE, T. , DUDIK, M.; CHEE, Y. E. , YATES, C.E. 2011. A statistical
 74 explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43–57.

75

76 FREEMAN, E. A.; MOISEN, G. G. 2008. A comparison of the performance of threshold criteria
 77 for binary classification in terms of predicted prevalence and kappa. *Ecol. Model.* 217: 48-
 78 58.

79

80 GANDULLO, J.M. 1972. Ecología de los pinares españoles. III. *Pinus halepensis* Mill. Instituto
 81 Nacional de Investigaciones Agrarias. Madrid.

- 82
83 GANDULLO, J.M. 1974. Ensayo de evaluación cuantitativa de la insolación en función de la
84 orientación y de la pendiente del terreno. Anales I.N.I.A. Serie Recursos Naturales, I. Madrid.
85
86 GANDULLO, J.M. y SÁNCHEZ PALOMARES, O. 1994. Estaciones ecológicas de los pinares
87 españoles. ICONA. Colección Técnica.
88
89 GANDULLO, J.M.; GONZÁLEZ ALONSO, S.; SÁNCHEZ PALOMARES, O. 2000. Programa Pinares.
90 Montes, 60: 5-9.
91
92 GANDULLO, J.M.; BLANCO, A.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; RUBIO, A.; ELENA, R. y GÓMEZ, V.
93 2004a. Las estaciones ecológicas de los hayedos españoles. Monografías INIA. Serie Forestal
94 nº8. Madrid.
95
96 GANDULLO, J.M.; BLANCO, A.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; RUBIO, A.; ELENA, R. y GÓMEZ, V.
97 2004b. Las estaciones ecológicas de los castaños españoles. Monografías INIA. Serie
98 Forestal nº7. Madrid.
99
100 GÓMEZ, V.; BLANCO, A.; SÁNCHEZ PALOMARES, O.; RUBIO, A.; ELENA, R.; GRAÑA, D. 2002.
101 Autoecología de los castaños andaluces. Invest. Agr.: Sist. Recur. For., 11(1): 205-226.
102
103 GUZMÁN ÁLVAREZ, J.R.; VENEGAS TRONCOSO, J.; SESEÑA RENGEL, A.; SILLERO ALMAZÁN,
104 M.L.; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, J.A. 2012. Biomasa forestal en Andalucía, Modelo de existencias,
105 crecimiento y producción. Coníferas. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.
106
107 LIU, C.; BERRY, P. M.; DAWSON, T. P.; PEARSON, R. G. 2005. Selecting thresholds of
108 occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28: 385 - 393.
109
110 MARGALEF, R. 1974. *Ecología*. Ediciones Omega. Barcelona.
111
112 NAVARRO-CERRILLO, R. M.; HERNÁNDEZ-BERMEJO, J. E.; HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R. 2011.
113 Evaluating models to assess the distribution of *Buxus balearica* in southern Spain. *Applied*
114 *Vegetation Science*, 14: 256 -267.
115 NICOLÁS, A.; GANDULLO, J.M. 1967. *Ecología de los pinares españoles: Pinus pinaster Ait.*
116 Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid.
117
118 NICOLÁS, A.; GANDULLO, J.M. 1969. *Ecología de los pinares españoles: Pinus sylvestris L.*
119 Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid.
120
121 PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of
122 species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190: 231-259.
123
124 PHILLIPS, S. J.; DUDIK, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new
125 extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31: 161-175.
126
127 SÁNCHEZ PALOMARES, O.; ELENA ROSSELLÓ, R.; CARRETERO CARRERO, M.P. 1990.
128 Caracterización edáfica de los pinares autóctonos españoles de *Pinus nigra* Arn.
129 *Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales*, 55. Madrid.

- 130
131 SÁNCHEZ PALOMARES, O.; RUBIO, A.; BLANCO, A. 2004. Definición y cartografía de las áreas
132 potenciales fisiográfico-climáticas de hayedo en España. Inv. Agrar.: Sist. Recur. For. Fuera de
133 serie: 13-62.
- 134
135 SÁNCHEZ PALOMARES, O.; JOVELLAR, L.C.; SARMIENTO, L.A.; RUBIO, A.; GANDULLO, J.M.
136 2007a. Las estaciones ecológicas de los alcornocales españoles. Monografías INIA. Serie
137 Forestal nº14. Madrid.
- 138
139 SÁNCHEZ PALOMARES, O.; ROIG GÓMEZ, S.; DEL RÍO GAZTELURRUTIA, RUBIO SÁNCHEZ, A.;
140 GANDULLO, J.M. 2007b. Las estaciones autoecológicas actuales y potenciales de los
141 rebollares españoles. Monografía INIA: Serie Forestal nº17. Madrid.
- 142
143 SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; ROIG, S.; RÍO, M.; RUBIO, A.; GANDULLO, J.M. 2008. Las
144 estaciones ecológicas actuales y potenciales de los rebollares españoles. Monografías INIA:
145 Serie Forestal, nº 17. Madrid.
- 146
147 SERRADA, R.; MONTERO, M.; REQUE, J. 2008. Compendio de Selvicultura Aplicada en
148 España. INIA y FUCOVASA. Madrid.
- 149
150 VENEGAS TRONCOSO, J., GUZMÁN ÁLVAREZ, J.R., SESEÑA RENGEL, A. Distribución actual de
151 los eucaliptares en Andalucía y modelos de crecimiento y producción de biomasa. Actas del
152 7º Congreso Forestal.
- 153
154 WARREN, D. L.; SEIFERT. S. N. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of
155 model complexity and the performance of model selection criteria. Ecol. Appl. 21: 335–342.