

Método de cálculo de la variable “Distribución potencial de <especie vegetal>” (alias = DP_<alias especie vegetal>) según los modelos de autoecología paramétrica (IPOT y NVO) (alias = IPOT_<alias especie vegetal> y NVO_<alias especie vegetal>) y algoritmos de machine learning (GAM) (GAM_<alias especie vegetal>).

La serie de variables de “Distribución potencial de <especie vegetal>” $IPOT_{00}^m$, NVO_{00}^m y GAM_{00}^m (adimensionales) (de la cada especie vegetal indicada en la *tabla 2*) del periodo anual ($p=00$) para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100) con los datos registrados (histórico observado) o proyectados (por cada combinación de Modelo de Circulación General (MCG) y escenario de emisiones (ESN)), consiste en una estimación de la aptitud del territorio para el crecimiento de la especie vegetal (27 especies, *tabla 2*) en función de 21 variables de hábitats (*tabla 3*) mediante la metodología de la autoecología paramétrica de GANDULLO y SANCHEZ PALOMARES, 1994, GOMEZ, et al. 2002, GANDULLO, et al. 2004a, 2004b, SANCHEZ PALOMARES, et al. 2007, 2008, ALONSO PONCE, et al. 2010, y el algoritmo de machine learning Generalized additive model (GAM).

La distribución potencial de una especie vegetal depende de una gran multitud de variables. Estas variables pueden agruparse en factores del biotopo, componentes bióticas relacionadas con la interacción con otras especies, y por último los agentes antrópicos. De esta manera, en autoecología (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)), la distribución potencial de una especie es en teoría la definida por los factores relacionados con el biotopo.

De esta manera, el área potencial de una especie queda definida como la delimitación espacial del territorio donde puede desarrollarse correctamente teniendo en cuenta solo las variables del medio físico, es decir orografía, suelo y clima, las mismas que determinan la calidad de la estación forestal o índice de sitio. Para ello es necesario en primer lugar acotar los valores de las variables de la estación ecológica donde la especie se desarrolla correctamente, para posteriormente extender dicha delimitación al terreno.

Modelos de autoecología paramétrica.

En este contexto, se ha optado por una metodología que ha dado muy buenos resultados, basada en una caracterización paramétrica de los biotopos ocupados por parcelas de control donde se sabe que prospera la especie estudiada, para después realizar 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. 2007, 2008, ALONSO PONCE, et al. 2010). En estas publicaciones son definidas las variables ecológicas cuya caracterización delimita correctamente la estación de la especie, así como el método operativo generalizado que permite acotar los intervalos óptimos y marginales de las variables.

El fundamento de esta metodología, consiste en determinar en una red representativa de parcelas de la especie en estudio, los valores de los parámetros de la estación ecológica. Dada una distribución de los valores de una variable cualquiera, el método define como intervalos marginales máximo y mínimo ($LI_i - UI_i$, $LS_i - US_i$), a los definidos por los cuantiles que recogen el 10% de las parcelas a uno y otro lado de la distribución, extramarginales los que se encuentran fuera del rango (menor que LI_i , mayor que LS_i), y el intervalo óptimo como el definido por el cuantil central de la distribución u 80% del área central ($UI_i - US_i$). La distribución óptima de la especie quedaría definida por el área en donde todas las variables ecológicas consideradas son óptimas, mientras que la potencial sería la definida por el área con un número determinado de variables ecológicas óptimas, con diferente grado de marginalidad en función del número de variables óptimas que suman. Finalmente el área no potencial correspondería a zonas donde una o más variables entran en el rango extramarginal, que según el criterios de “Liebig o factor limitante”, invalidaría al resto de variables.

Para realizar la aplicación de esta metodología ha sido necesario diseñar un programa SIG específico basado

en análisis raster, que permite poner en marcha dicho método, de manera fiel, flexible y rápida. Las variables ecológicas introducidas en este programa son las 34 especificadas anteriormente.

Por otro lado, se ha calculado un Índice de Potencialidad a partir de la metodología publicada por primera vez por SÁNCHEZ PALOMARES et al. (2004) y desarrollada en trabajos posteriores. El proceso metodológico anterior, es la base para poder 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. Por tanto, este índice surge como la necesidad de expresar esta aptitud mediante un indicador numérico, función de la posición en que el valor del parámetro se sitúa dentro de los tramos centrales o marginales definidos, de la forma siguiente:

Dada una estación determinada, para el parámetro i , conocemos los valores que definen los hábitats: $LI_i - UI_i$, M_i (valor medio), US_i y LS_i . Para un valor del parámetro x_i el índice de aptitud p_i toma los siguientes valores:

- p_i igual a 1 si x_i es igual a M_i .
- p_i proporcional a la distancia ($x_i - M_i$) e inferior a 1 mientras nos encontremos en el intervalo ($UI_i - US_i$).
- p_i disminuyendo linealmente desde el valor que toma en UI_i hasta alcanzar el valor cero en LI_i y, análogamente, entre US_i y LS_i .

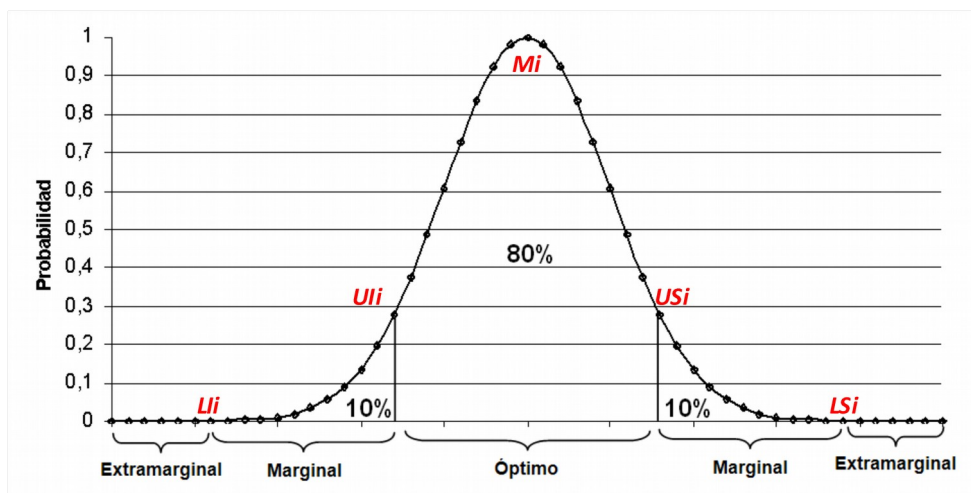


Imagen 65. Clasificación de los intervalos de una variable ecológica.

Es decir:

$$\begin{aligned}
 x_i \in [UI_i, US_i] &\rightarrow p_i = 1 - \left(\frac{|M_i - x_i|}{US_i - UI_i} \right) \\
 x_i \in [LI_i, UI_i] &\rightarrow p_i = \frac{(US_i - M_i) \cdot (x_i - LI_i)}{(US_i - UI_i) \cdot (UI_i - LI_i)} \\
 x_i \in [US_i, LS_i] &\rightarrow p_i = \frac{(M_i - UI_i) \cdot (LS_i - x_i)}{(US_i - UI_i) \cdot (LS_i - US_i)} \\
 x_i \notin [LI_i, LS_i] &\rightarrow p_i = 0
 \end{aligned}$$

Para el conjunto de todos los parámetros, definimos el indicador final (indicador de potencialidad - Ipot) como el producto de todos los índices de aptitud obtenidos de manera individual para cada parámetro, de forma análoga a como se definen otros índices factoriales (índices de fertilidad, de productividad, etc.).

Con objeto de hacer más manejables los resultados y con vistas a establecer una serie de clases, mostramos el valor numérico del indicador de potencialidad como el logaritmo decimal del producto de los índices de

aptitud, multiplicados éstos por 10^4 , dividiendo el resultado final por el número de parámetros considerados ($NP=21$), siempre que todos los índices de aptitud de cada parámetro sean mayores que cero. Si alguno de ellos tomase ese valor, se situaría fuera del intervalo definido entre los límites inferior y superior y, por consiguiente, de acuerdo con lo establecido anteriormente, estaríamos en el hábitat extramarginal, no procediendo valoración de aptitud alguna.

Es decir:

$$Ipot_{00}^m = \frac{1}{NP} \cdot \log(p_1 \cdot 10^4 \cdot p_2 \cdot 10^4 \dots p_{NP} \cdot 10^4) = 4 + \frac{1}{NP} \cdot \log(p_1 \cdot p_2 \dots p_{NP})$$

De esta forma el valor de Ipot varía desde prácticamente cero hasta 4, independiente del número de parámetros utilizados. El modelo definitivo obtenido permite calificar el territorio andaluz para las especies más representativas y es susceptible de generar la cartografía correspondiente.

Para que dicha cartografía a realizar tenga una representación suficientemente clara y para que su utilización pueda tener carácter práctico para el gestor y planificador forestal, resulta conveniente establecer clases de potencialidad, en función de los valores que alcanza el indicador correspondiente. Tras varios ensayos y examinando la distribución que presentan los valores del indicador en el conjunto del territorio, se propone la clasificación que figura en la siguiente tabla.

Establecimiento de Clases de Potencialidad.

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

Tabla 1

Por otra parte, el “número de variables óptimas” NVO_{00}^m para una especie vegetal es calculado mediante la siguiente expresión:

$$NVO_{00}^m = \sum_{i=1}^{NP} \text{con}(x_i \in [UI_i, US_i], 1, \text{con}(x_i \in [LI_i, UI_i] \cup x_i \in [US_i, LS_i], 0, 'NA'))$$

ID	Alias	Alias especie vegetal	Nombre
43	DP_ppinea	ppinea	Distribución potencial de Pinus pinea
44	DP_ppinat	ppinat	Distribución potencial de Pinus pinaster
45	DP_phalep	phalep	Distribución potencial de Pinus halepensis
46	DP_psylys	psylys	Distribución potencial de Pinus sylvestris
47	DP_pnigra	pnigra	Distribución potencial de Pinus nigra
48	DP_qsuber	qsuber	Distribución potencial de Quercus suber
49	DP_qilex	qilex	Distribución potencial de Quercus ilex
50	DP_qcan	qcan	Distribución potencial de Quercus canariensis
51	DP_qfag	qfag	Distribución potencial de Quercus faginea
52	DP_qpyren	qpyren	Distribución potencial de Quercus pyrenaica
53	DP_csiliq	csiliq	Distribución potencial de Ceratonia siliqua
54	DP_oeurop	oeurop	Distribución potencial de Olea europaea sub sylvestris
55	DP_csativ	csativ	Distribución potencial de Castanea sativa
56	DP_apins	apins	Distribución potencial de Abies pinsapo
57	DP_ecamal	ecamal	Distribución potencial de Eucalyptus camaldulensis
58	DP_eglobl	eglobl	Distribución potencial de Eucalyptus globulus
59	DP_joxy	joxy	Distribución potencial de Juniperus oxycedrus
60	DP_jphoe	jphoe	Distribución potencial de Juniperus phoenicea
61	DP_auned	auned	Distribución potencial de Arbutus unedo
62	DP_cmonog	cmonog	Distribución potencial de Crataegus monogyna
63	DP_agranat	agranat	Distribución potencial de Acer granatensis
64	DP_amons	amons	Distribución potencial de Acer monspessulanum
65	DP_plent	plent	Distribución potencial de Pistacia lentiscus
66	DP_ptereb	ptereb	Distribución potencial de Pistacia terebinthus
67	DP_roffic	roffic	Distribución potencial de Rosmarinus officinalis
68	DP_vtinus	vtinus	Distribución potencial de Viburnum tinus
69	DP_caust	caust	Distribución potencial de Celtis australis

Tabla 2

La siguiente tabla contiene el listado de especies considerado en el presente trabajo:

Variable del hábitat	Tipo	Nombre	Unidades	Proyectado?	Lli	Uli	Mi	Usi	Lsi
pendiente	Orográfico	Pendiente	%	NO	3,3	10,9	27,4	45,8	65,6
inci_sol	Orográfico	Incidencia Solar	horas	NO	952,0	1125,0	1678,0	2163,0	2302,0
precipitacion_total	Climático	Precipitación acumulada anual	mm	SI	438,1	613,7	722,3	1053,1	1353,1
prec_wint	Climático	Precipitación acumulada invernal	mm	SI	154,1	202,5	253,1	367,5	444,5
prec_spr	Climático	Precipitación acumulada primavera	mm	SI	99,4	126,8	148,2	222,6	287,9
tmedia	Climático	Temperatura media anual	°C	SI	7,4	8,9	10,6	11,9	14,8
ETo	Climático	Evapotranspiración de referencia	mm	SI	627,8	810,9	892,5	937,5	1020,8
SUP	Climático	Superávits	mm	SI	85,7	189,5	306,6	573,1	881,9
IHD	Climático	Índice de humedad anual	ad	SI	-26,5	-12,2	3,7	37,9	107,6
tmmc	Climático	Temperatura media de las máximas del mes más cálido	°C	SI	23,9	24,6	28,2	30,6	31,7
tmmf	Climático	Temperatura media de las mínimas del mes más frío	°C	SI	-4,3	-3,5	-2,1	2,0	4,2
osct	Climático	Oscilación térmica total	°C	SI	21,6	23,1	31,3	32,8	33,6
BH	Climático	Balance hídrico	mm	SI	27,2	78,1	151,6	336,9	567,9
PF	Climático	Potencial fotosintético	°C·hora	SI	60,2	367,0	709,1	1360,1	1751,0
arena	Edáfico	% de arena	%	NO	23,4	34,2	47,0	58,6	63,2
arcilla	Edáfico	% de arcilla	%	NO	9,7	15,1	17,5	31,2	36,6
capretagua	Edáfico	Capacidad de retención de agua	mm/m	NO	74,0	98,4	133,4	149,8	166,1
calazct	Edáfico	Caliza activa	%	NO	0,0	0,1	0,2	3,4	18,4
ph	Edáfico	pH	ad	NO	5,5	6,0	7,6	8,0	8,3
capincat	Edáfico	Capacidad de intercambio Catiónico	meq/100g	NO	5,1	9,6	14,5	17,5	22,8

Tabla 3. Hábitat para la especie Pino piñonero (*Pinus pinea*)

NVO-<alias de la especie vegetal>_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

NVO= alias de “número de variables óptimas de <especie vegetal>”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

La nomenclatura del nombre de los fichero que almacena los datos de la variable “Distribución potencial de <especie vegetal>” para el índice de potencialidad es la siguiente:

ipot-<alias de la especie vegetal>_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

IPOT= alias de “índice de potencialidad de <especie vegetal>”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

Algoritmos de machine learning

GAM fue entrenado a partir de ausencias procedentes del IFN3. Su uso se llevó a cabo por su probado rendimiento (Gastón A. & García-Viñas J.I., 2011), ya que se aconseja el uso de algoritmos parsimoniosos para proyecciones futuras de cambio climático (Iturbide M. et al., 2018). No obstante, debido a las diferencias entre los resultados de GAM y autoecología paramétrica, se decidió verificar los resultados de GAM mediante el entrenamiento y proyección a los distintos escenarios de un ensemble de 5 algoritmos de MDE distintos, con los parámetros por defecto: MAXENT, Multivariate adaptive regression spline (MARS), Boosted Regression Trees (BRT), Generalized linear model, y el propio Generalized additive model (GAM). En gran parte de las especies, los resultados entre GAM y el ensamblado fueron muy parecidos y mostraron la misma tendencia, demostrando que la opción inicial elegida (GAM) era solvente.

La nomenclatura del nombre de los ficheros que almacena los datos de la variable “Distribución potencial de *<especie vegetal>*” para el “área potencial” según GAM es la siguiente:

GAM-<alias de la especie vegetal>_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

GAM= alias de “área potencial de *<especie vegetal>* según GAM”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

Más información en

https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/montes/usos_y_aprov/jornadas_biomasa/Publicaciones/biomasa1.pdf