

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES PARAMÉTRICAS DE ESPECIES FORESTALES UTILIZANDO MODELOS LINEALES GENERALIZADOS

Agustín Rubio Sánchez*, Eduardo T. Mezquida & Isabel Nogales Ruiz

Dpto. Silvopascicultura. E.T.S.I. de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 28040-MADRID (España).
Correo electrónico: agustin.rubio@upm.es

Resumen

Las metodologías con las que se han definido áreas potenciales de presencia de especies forestales se han basado en la construcción de modelos paramétricos a partir de variables climáticas, fisiográficas y, en algunos casos, edáficas. Sin embargo, estos procedimientos requerían la toma de ciertas decisiones no exentas de valoraciones poco objetivas. Actualmente existe una amplia gama de procedimientos estadísticos que, unidos al gran desarrollo de los sistemas de información geográfica, permiten identificar los hábitats potenciales en el territorio de un modo más objetivo. Por ello y con el fin de valorar la bondad de la predicción de los modelos de indicadores de potencialidad tan útiles para los técnicos forestales se ha realizado un proceso paralelo ajustando un modelo lineal generalizado. A partir de los datos del Inventario Forestal Nacional sobre la presencia de *Pinus uncinata* en España, se ha construido una matriz de puntos de presencias de la especie, a la que se ha añadido una equivalente de ausencias para poder calibrar el modelo lineal generalizado y los resultados del modelo construido se han comparado con la predicción del modelo tradicional.

Palabras clave: *Autoecología, Parámetros fisiográficos, Parámetros climáticos, Potencialidad*

INTRODUCCIÓN

Diversas aproximaciones regionales han establecido la distribución potencial de distintas especies forestales en base a la idoneidad de las características ecológicas de los territorios (ROUGET *et al.*, 2001 y THUILLER *et al.*, 2003, en Cataluña, y FELICÍSIMO *et al.*, 2002, en Asturias). Sin embargo, cuando los técnicos forestales intentan valorar la viabilidad técnica del establecimiento de especies forestales en tierras agrícolas marginales, no siempre disponen de suficiente información práctica sobre las condiciones en las que las especies forestales pueden vivir. Por ello SÁNCHEZ-PALO-

MARES *et al.* (2004) propusieron una metodología con *Modelos de Indicadores de Potencialidad* (MIP) que se apoyaba en los numerosos trabajos de autoecología paramétrica de especies forestales llevados a cabo en la E.T.S.I. de Montes de la UPM y en el CIFOR del INIA. En estos trabajos se evaluaba la potencialidad de un sitio para el establecimiento de una especie forestal mediante un conjunto de parámetros climáticos, fisiográficos y edáficos (ver entre otros los trabajos de GANDULLO & SÁNCHEZ-PALOMARES, 1994 y SÁNCHEZ-PALOMARES *et al.*, 2004). En ellos se planteaba la consecución de los siguientes objetivos: 1º) definición y clasificación paramétrica de los hábi-

tats de la especie en su área de distribución, 2º) elaboración de modelos de estimación de la calidad de la estación para la especie, en función de los parámetros ambientales más significativos, y 3º) identificación y cartografía de las áreas potenciales de expansión de la especie.

La definición paramétrica del hábitat de una especie es la base para poder evaluar la aptitud de una estación en relación con la mayor o menor posibilidad de éxito de la introducción o restauración de una especie forestal. Esta mayor o menor adecuación se evaluaba mediante un *índice de aptitud* para cada parámetro, siendo integrado el conjunto de todos los *índices de aptitud* en un único *indicador de potencialidad* (SÁNCHEZ-PALOMARES et al., 2004) y así, gracias a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), poder tener una representación territorial.

Los MIP desarrollados para *Fagus sylvatica* L. (SÁNCHEZ-PALOMARES et al., 2004, RUBIO & SÁNCHEZ-PALOMARES, 2006a) y para *Pinus uncinata* Miller (RUBIO & SÁNCHEZ-PALOMARES, 2006b) fueron validados mediante fuentes externas tales como otros mapas de vegetación potencial (RIVAS-MARTÍNEZ, 1987) y datos de vegetación real (Inventario Forestal Nacional –IFN–). Sin embargo, a lo largo del proceso de elaboración de los MIP hay que tomar una serie de decisiones con las que se puede mejorar notablemente la delimitación de los límites geográficos y paramétricos de las áreas potenciales. A pesar de ello, la metodología de los MIP presenta notables ventajas respecto a otros mapas de vegetación potencial como los basados en la metodología fitosociológica, puesto que no hace falta llevar a cabo laboriosos trabajos florísticos y por lo tanto la calidad de los mapas no varía en función del conocimiento del experto (FELICÍSIMO et al., 2002). Además, hoy en día la mayoría de los Servicios Administrativos Forestales de España disponen de los modelos digitales del terreno con los que poder desarrollar los MIP.

En este trabajo hemos planteado aplicar a *Pinus uncinata* en la Península Ibérica un MIP y un modelo estadístico. Una vez elaborados ambos modelos, comparamos los mapas de distribución potencial resultantes para evaluar la calidad de las predicciones del MIP. Finalmente, basándonos en esta comparación proponemos un ajuste o calibración objetiva de las áreas de distribución potencial derivadas del MIP.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se restringió a las provincias españolas donde aparece *Pinus uncinata* (pino negro) de manera espontánea. Este árbol puede alcanzar hasta 25 m de altura cuando vive en suelos profundos y ricos. Su área de distribución natural se reparte por los Alpes occidentales y por los Pirineos, con algunas poblaciones en los Alpes centrales y el Sistema Ibérico.

Datos

Los dos tipos de modelos desarrollados en este trabajo se nutren de la misma base de datos, procedente del IFN. Tras excluir las parcelas en las que el pino negro manifestaba un carácter repoblado, se seleccionaron 977 parcelas en las que el pino negro estaba presente, bien como especie principal o no.

Para este estudio hemos considerado 14 parámetros ecológicos con los que hemos intentado reflejar las características fisiográficas y climáticas de su hábitat (Tabla 1) cuyos detalles de elaboración se pueden consultar en RUBIO & SÁNCHEZ-PALOMARES (2006a).

El Modelo de Indicador de Potencialidad

Con los valores de estos parámetros en los 997 puntos del IFN en los que aparece *Pinus uncinata* hemos definido los hábitats central y marginales (para detalles metodológicos consultar GANDULLO & SÁNCHEZ-PALOMARES, 1994) desde el punto de vista fisiográfico y climático. El MIP toma en consideración la posición del valor de cada parámetro en cada punto del territorio en relación a los tramos centrales o marginales del hábitat de la especie para calcular su *indicador de aptitud*. La contribución global de todos los parámetros considerados se realizó mediante un *indicador de potencialidad*, calculado como el producto de todos los *índices de aptitud* obtenidos para cada parámetro de manera individual. Este *indicador de potencialidad* puede ser aplicado a totalidad de un territorio mediante un SIG. El Modelo Digital del Terreno (MDT) utilizado tiene una resolución de 25 metros. En el mapa de distribución resultante los valores de la potencialidad fueron divididos en cuatro categorías (potencialidad óptima, eleva-

Parámetro	Límite inferior	Umbral inferior	Media	Umbral superior	Límite superior
Altitud (m)	857	1448	1781	2094	2519
Pendiente (%)	0,0	11,3	24,7	38,8	57,3
Insolación	0,00	0,37	0,81	1,22	1,41
Precipitación de primavera (mm)	215	240	303	358	755
Precipitación de verano (mm)	196	266	320	369	530
Precipitación de otoño (mm)	183	220	309	389	898
Precipitación de invierno (mm)	100	131	208	282	830
Temperatura media (°C)	2,7	4,4	6,1	7,9	11,2
Oscilación termométrica (°C)	17,9	22,1	25,3	28,2	31,1
Evapotranspiración potencial (mm)	267	417	495	569	676
Suma de superávits (mm)	231	375	665	952	2569
Suma de déficits (mm)	0	0	20	44	120

Tabla 1. Valores medio, del umbral inferior (percentil 10), umbral superior (90), y los límites superior e inferior de los 12 parámetros ecológicos seleccionados

da, media o baja) de acuerdo a sus cuartiles de distribución (SÁNCHEZ-PALOMARES *et al.*, 2004).

El Modelo Estadístico

Diferentes técnicas estadísticas permiten modelizar áreas de distribución potencial (GUISAN & ZIMMERMANN, 2000). En este trabajo se han utilizado los Modelos Lineales Generalizados (MLG) basados en datos de presencia/ausencia, puesto que han sido ampliamente utilizados en modelos predictivos (GUISAN *et al.*, 1998; THUILLER *et al.*, 2003), con la intención de compararlos con el MIP. Para ello hemos tenido en cuenta las 977 parcelas del IFN en las que el pino negro está presente como datos de presencia. Para las ausencias se ha generado una red de puntos semejante a la del IFN (1 km de lado), excluyendo las que se situaron por debajo de los 700 m puesto que el pino negro no aparece en bajas altitudes (en las 977 parcelas del IFN se situó entre los 857 y los 2519 m), seleccionándose al azar otros 977 puntos con los que representar las ausencias y equilibrándose así con el número de presencias (MANEL *et al.*, 2001). A los datos binarios de presencias y ausencias de *Pinus uncinata* se aplicó un MLG con distribución binomial de errores y una función de asociación tipo logística. De las 14 variables ambientales consideradas como posibles predictores en los MIP y MLG se eliminaron la precipitación anual (muy correlacionada con las estacionales) y la duración de la sequía (siempre nula). Dado que

los MIP utilizan todas las variables ambientales disponibles, en el MLG también se optó por definir un modelo saturado que permitiera una mejor comparación con el MIP, descartando técnicas que podrían haber simplificado el modelo.

El conjunto de datos originales (977 presencias y 977 ausencias) fue dividido en dos partes para llevar a cabo, por un lado la calibración (2/3), y por otro la evaluación (1/3) (GUISAN & ZIMMERMANN, 2000) con una validación cruzada. El MLG predice unos valores entre 0 y 1, y para seleccionar el umbral de probabilidad que mejor redujo la probabilidad de ajuste se utilizó el estadístico kappa de Cohen (COHEN, 1960). El cálculo del coeficiente de kappa requiere una matriz de confusión que identifique casos predichos por el modelo como verdaderos positivos, falsos positivos, falsos negativos y verdaderos negativos. Los valores de kappa también oscilan entre 0 y 1, pudiendo ser considerados valores inferiores a 0,4 como indicadores de un bajo grado de similitud entre los valores reales y los predichos; entre 0,4 y 0,6 moderado, entre 0,6 y 0,8 sustancial y más de 0,8 similitud casi perfecta (MANEL *et al.*, 2001). La ecuación de regresión obtenida también ha sido integrada en un SIG y aplicado al territorio estudiado sobre el mismo MDT.

Comparación de ambos modelos

En primer lugar los mapas de distribución potencial del MIP y del MGL resultantes fueron considerados como mapas de presencia-ausencia

de la especie, a fin de ser comparados mediante un coeficiente kappa. En segundo lugar se buscó el mejor ajuste entre el *indicador de potencialidad* y el valor predicho por el MGL mediante la maximización del coeficiente kappa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores medios, así como los percentiles 10 y 90 junto con los valores máximo y mínimo de cada parámetro con los que se definen los habitats central y marginales del pino negro calculados con las parcelas del IFN (Tabla 1) han servido para calcular cada *índice de aptitud* y el *indicador de potencialidad* con el que se ha elaborado el MIP, cuya plasmación en un SIG ha permitido crear el mapa de distribución potencial de la figura 1. El rango de variación del *indicador de potencialidad* se situó entre 2,64 y 3,98, y éste se categorizó en cuatro clases de potencialidad: óptima (3,98 a 3,80), alta (3,80 a 3,69), media (3,69 a 3,57) y baja (3,57 a 2,64). Los valores de los coeficientes de regresión que han resultado del ajuste con el MLG utilizando todas las variables predictoras se muestran en la tabla 2. El mejor coeficien-

te de kappa obtenido con la evaluación fue 0,76, correspondiente al umbral de probabilidad de 0,6, que fue el finalmente utilizado para generar el mapa de presencia-ausencia del MLG (Figura 2). Este valor del coeficiente kappa nos permitió calificar como razonablemente bueno el ajuste conseguido entre los valores predichos y los reales.

Los modelos predictivos de distribución geográfica basados en las condiciones ambientales de los sitios de presencias conocidas han constituido una importante técnica con aplicaciones en distintos campos de la ecología (CORSI et al., 1999; PETERSON & SHAW, 2003; PETERSON et al., 1999; SCOTT et al., 2002; WELK et al., 2002; YOM-TOV & KADMON, 1998). Sin embargo, la posibilidad de disponer de datos de presencia y ausencia permiten el uso de diversas técnicas estadísticas en la elaboración de dichos modelos predictivos (CORSI et al., 2000; ELITH, 2002; GUISAN & ZIMMERMAN, 2000; SCOTT et al., 2002). En nuestro caso, la comparación entre ambos modelos de distribución potencial del pino negro, considerando tan solo su presencia o ausencia del MIP (Figura 1) y el MLG (Figura 2) puede ser valorada inicialmente como de baja a moderada (kappa = 0,41).

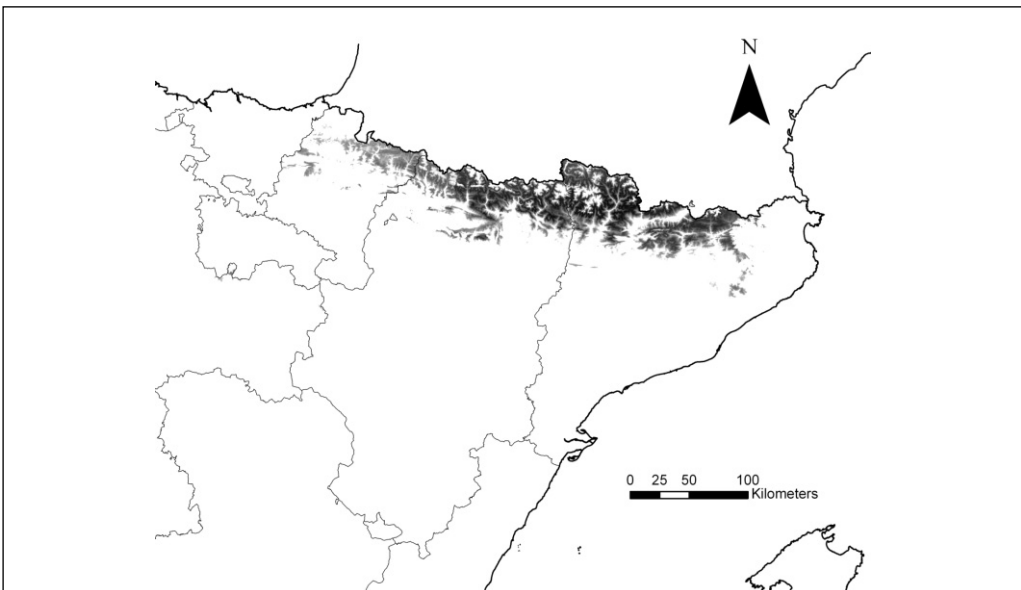


Figura 1. Mapa del área potencial de *Pinus uncinata* con el MIP

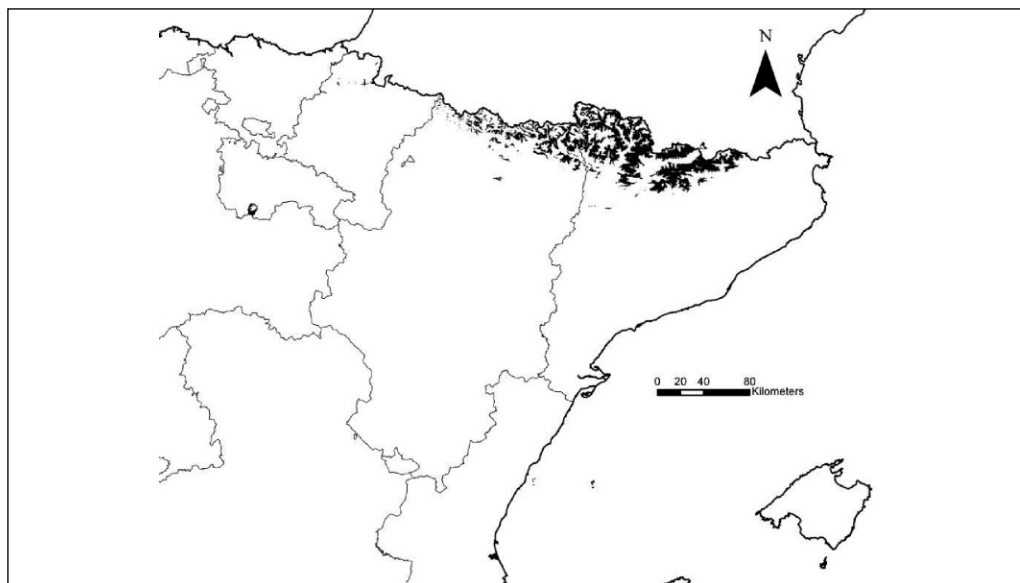


Figura 2. Mapa del área potencial de *Pinus uncinata* con el MLG

Término	Coefficiente de regresión	Término	Coefficiente de regresión
Intercepto	-54,087	Precipitación de primavera (mm)	-0,270
Altitud (m)	0,010	Precipitación de verano (mm)	-0,231
Pendiente (%)	-0,008	Precipitación de otoño (mm)	-0,304
Insolación	-1,418	Precipitación de invierno (mm)	-0,241
Temperatura media (° C)	-2,196	Evapotranspiración potencial (mm)	0,344
Oscilación termométrica (° C)	0,426	Suma de superávits (mm)	0,267
		Suma de déficits (mm)	-0,280

Tabla 2. Coeficientes de regresión obtenidos mediante el Modelo lineal generalizado con las variables predictoras.

El nivel de corte en el *indicador de potencialidad* para elaborar un nuevo mapa de presencia-ausencia con el que maximizar el nivel de ajuste entre los dos modelos fue 3,74. Este umbral del *indicador de potencialidad* permite obtener así un coeficiente kappa de 0,69. A su vez, este valor del *indicador de potencialidad* de 3,74 se situó en las denominadas clases de potencialidad óptima y alta (primer y segundo cuartiles de la distribución) coincidiendo así con el empleo que hizo RUBIO (2005) de la clase óptima de estos MIP para modelizar cambios en la distribución de *Pinus uncinata* ante distintos escenarios de cambio climático.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la entusiasta colaboración del profesor Sánchez-Palomares en el desarrollo de este trabajo. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto AGL2004-01941/FOR del MEC.

BIBLIOGRAFÍA

COHEN, J.; 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20: 37-46.

- CORSI, F.; DUPRÈ, E. & BOITANI, L.; 1999. A large-scale model of wolf distribution in Italy for conservation planning. *Conserv. Biol.* 13: 150-159.
- CORSI, F.; DE LEEUW, J. & SKIDMORE, A.; 2000. Modelling species distribution with GIS. In: L. Boitani & T. Fuller (eds.) *Research Techniques in Animal Ecology*: 389-434. Columbia University Press. New York.
- ELITH, J.; 2002. Quantitative Methods for modeling species habitat: comparative performance and an application to Australian plants. In: S. Ferson & M. Burgman (eds.), *Quantitative Methods for Conservation Biology*: 39-58. Springer-Verlag. New York.
- FELICISIMO, A.M., FRANCÉS, E., FERNÁNDEZ, J.M., GONZÁLEZ-DÍEZ, A. & VARAS, J.; 2002. Modelling the Potential Distribution of Forest with a GIS. *Photogram. Eng. Rem. Sensing* 68: 455-461.
- GANDULLO, J.M. & SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; 1994. *Estaciones ecológicas de los pinares españoles*. ICONA. Madrid. España.
- GUISAN, A., THEURILLAT, J.-P. & KIENAST, F.; 1998. Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment. *J. Veg. Sci.* 9: 65-74.
- GUISAN, A. & ZIMMERMANN, N.; 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135: 147-186.
- GUISAN, A. & THUILLER, W.; 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993-1009.
- MANEL, S.; WILLIAMS, H.C. & ORMEROD, S.J.; 2001. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *J. Appl. Ecol.*, 38: 921-931.
- PETERSON, A.T. & SHAW, J.; 2003. Lutzomya vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distribution, and climate change effects. *Int. J. Parasitol.* 33 : 919-931.
- PETERSON, A.T. ; SOBERÓN, J. & SÁNCHEZ CORDERO; 1999. Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science* 285: 1265-1267.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S.; 1987. *Memoria del mapa de series de vegetación de España, 1:400.000*. Ser. Técnica, ICONA, M.A.P.A. Madrid. España.
- ROUGET, M.; RICHARDSON, D.M.; LAVOREL, S.; VAYREDA, J.; GRACIA, C. & MILTON, S.J.; 2001. Determinants of distribution of six Pinus species in Catalonia. Spain. *J. Veg. Sci.* 12: 491-502.
- RUBIO, A.; 2005. *The distribution of forest under global change: the case of Pinus uncinata in Spain*. STARDEX Meeting 6. University of East Anglia. Madrid, Spain.
- RUBIO, A. & SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; 2006a. Physiographic and climatic potential areas for Fagus sylvatica based on habitat suitability indicator models. *Forestry* 79: 439-451.
- RUBIO, A. & SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; 2006b. Definición de áreas potenciales paramétricas de especies forestales. El caso de Pinus uncinata. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 20(2): 271-283.
- RUBIO, A., ELENA, R., SÁNCHEZ-PALOMARES, O., BLANCO, A., SÁNCHEZ-SERRANO, F. & GÓMEZ, V.; 2002. Soil evaluation for Castanea sativa afforestation in northeastern Spain. *New Forests* 23: 131-141.
- SÁNCHEZ-PALOMARES, O., RUBIO, A. & BLANCO, A.; 2004. Definición y cartografía de las áreas potenciales fisiográfico-climáticas de hayedo en España. *Inv. Agrar.: Sist. Rec. For. Fuera de serie*: 13-62
- THUILLER, W.; VAYDERA, J.; PINO, J.; SABATÉ, S.; LAVOREL, S. & GRACIA, C.; 2003. Large-scale environmental correlates of forest tree distributions in Catalonia (NE Spain). *Global Ecol. Biogeogr.* 12: 313-325.