



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1338

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Desarrollo de un modelo predictivo de la calidad de la estación para pino laricio de Austria (*Pinus nigra* subs. *nigra*) en Navarra

MIAILLIER, G. (1), GÓMEZ CORRAL, N. (1) y MOLINA TERRÉN, C. (2)

(1) Basarte S.L.

(2) Negociado de Planes y Programas del Medio Natural, Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Rural, Gobierno de Navarra.

Resumen

La calidad de la estación forestal es un indicador de la capacidad productiva de un lugar para una determinada especie y tipo de producto. El indicador más extendido como índice de calidad de estación forestal es la altura dominante de los árboles en relación con su edad. Este tipo de indicador es muy útil para el estudio de las masas ya existentes, pero no permite conocer la calidad de estación de terrenos desarbolados que se quieren repoblar con una determinada especie.

Se ha desarrollado un modelo de cartografía predictiva para la calidad de estación del pino laricio de Austria en Navarra, tomando como base diversas variables climáticas, topográficas y edáficas. El objetivo es crear una herramienta práctica que apoye al gestor en la toma de decisiones sobre si un terreno es adecuado para la repoblación con esta especie, y su priorización respecto a otros.

El modelo ha sido creado con resolución fina (25m), empleando técnicas de Generalized Additive Models (GAM) y utilizando los datos del informe existente sobre las repoblaciones realizadas en Navarra entre los años 1930 y 1980 con esta especie, lo que ha permitido trabajar con más de 15.000 ha de pinares cuya edad y calidad de estación eran conocidas.

Palabras clave

Modelización, Cartografía predictiva, GAM, Hábitats forestales.

1. Introducción

El pino laricio de Austria (*Pinus nigra* subs. *nigra*) ha sido muy empleado como especie de repoblación en Navarra, con importantes campañas de plantación entre los años 1930 y 1970. En muchos casos, estas repoblaciones se instalaron sobre terrenos degradados con el objetivo de estabilización del suelo y reducción de erosión, por lo que el desarrollo del arbolado no ha sido siempre el óptimo.

Uno de los retos de estas repoblaciones, ahora que alcanzan edades adultas y por lo tanto el final de su ciclo, es determinar el futuro de estos terrenos y las especies de repoblación que se pueden emplear en ellos con fines productores de madera. La cuestión clave es diferenciar los terrenos en los que esta especie puede tener un interés productivo real, de aquellos en los que no.



Las tablas de producción del pino laricio de Austria (*Pinus nigra* subs. *nigra*) en Navarra fueron creadas en el año 1996 y definen tres calidades de estación para esta especie basadas en la relación edad/altura dominante de las repoblaciones. Estas herramientas permiten por lo tanto estudiar la calidad de estación en masas existentes, pero no ofrecen información sobre la calidad de estación de terrenos desarbolados o poblados con otras especies.

Según la definición de la SECF (2005), la calidad de la estación forestal para una especie es un indicador de la capacidad productiva de un lugar para dicha especie y tipo de producto. Se trata por lo tanto de una característica propia del terreno, y no de las masas forestales instaladas en él.

Los factores climáticos, topográficos y edáficos son los más adecuados para predecir la capacidad productiva de los sitios desde el punto de vista forestal (GANDULLO et al., 1994; EGMASA, 2003; BERGÈSA et al., 2005). Sin embargo, existen pocas herramientas que permitan determinar la calidad de estación de un sitio en base a estos criterios, por lo que la calidad de estación se suele apreciar a posteriori, sobre masas existentes, empleado para ello indicadores como el índice de calidad de estación, basado en una relación edad/altura dominante de las masas.

2. Objetivos

El objetivo del trabajo es predecir la calidad de estación del pino laricio de Austria (*Pinus nigra* subs. *nigra*) con suficiente detalle como para dotar a los gestores forestales de una herramienta útil capaz de proporcionar una predicción de la calidad de estación incluso en terrenos que actualmente no están poblados con esta especie.

Para ello, se ha optado por la creación un modelo predictivo de la calidad de estación basado en datos descriptivos del medio (climatología, topografía, geología, etc.). En ese sentido, se quiere predecir la calidad de estación para el pino laricio de Austria (*Pinus nigra* subs. *nigra*) en cualquier punto del área de estudio en Navarra, independientemente de su estado actual.

El interés de trabajar de forma continua también permite afinar la apreciación de la calidad de estación respecto a un análisis a escala de masa, puesto que las condiciones en una misma masa de varias hectáreas son generalmente heterogéneas.

Este modelo ha sido posteriormente empleado para generar una cartografía predictiva de este parámetro a escala del territorio navarro.

3. Metodología

El presente estudio se ha marcado como premisa trabajar de forma continua sobre el territorio navarro, con el objetivo de ofrecer una visión lo más precisa posible de las condiciones de crecimiento del pino laricio de Austria dentro del ámbito de trabajo. Para ello, se ha recopilado información cartográfica de distintas fuentes, por lo que se cuenta con varias capas ráster de diversa resolución y distinto ajuste espacial.



Para poder trabajar con estos datos ha sido necesario homogeneizar la información recopilada. Una de las principales cuestiones planteadas ha sido la elección de la resolución de trabajo, para lo cual es necesario tener en cuenta varias cuestiones como el volumen de datos a tratar o la definición de los diferentes parámetros estudiados.

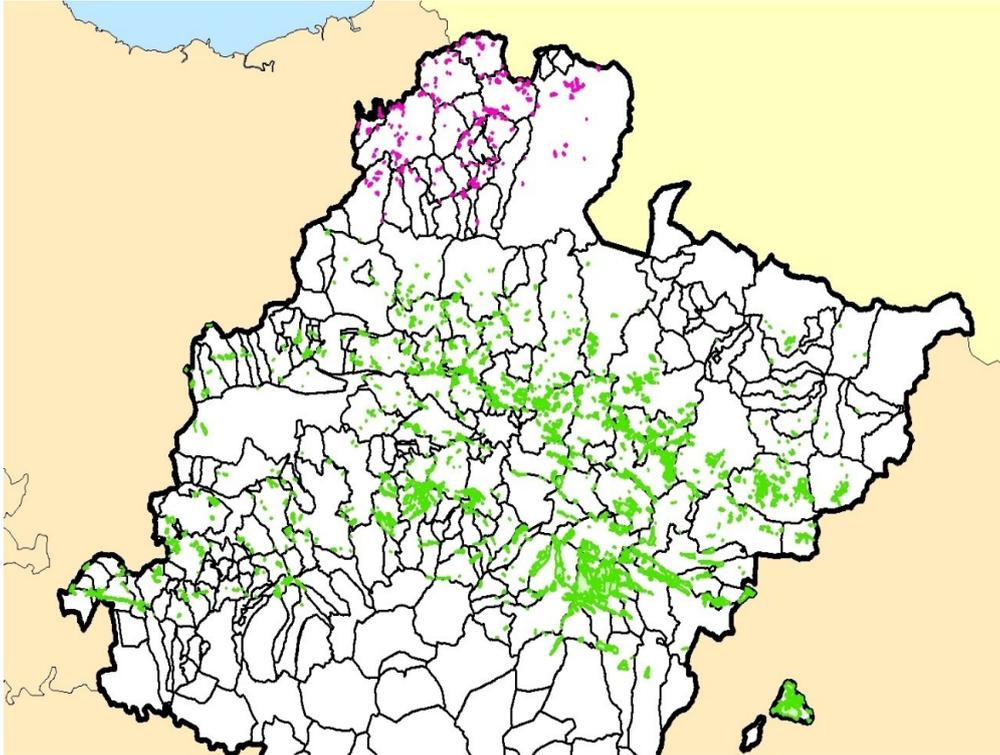
Finalmente, se ha elegido una resolución de 25x25m para los rásters de este estudio, que responde de forma satisfactoria al equilibrio entre volumen de datos y significancia de los valores obtenidos.

Para la definición del plan de muestreo, la primera fase ha consistido en la recopilación de la información acerca de las masas de pino laricio de Austria para las cuales se dispone de la información suficiente para determinar su calidad de estación, es decir masas en las que se dispone de edad y altura dominante.

Se ha empleado el mapa de cultivos y aprovechamientos de 2019 como principal fuente de información cartográfica de las repoblaciones existentes de pino laricio de Navarra. Esta información base se ha completado con otras fuentes como los planos comarcales y las bases de datos de las ordenaciones forestales, existentes en Navarra.

Las fuentes consultadas no diferencian el pino laricio de Austria (*Pinus nigra* subs. *nigra*) del pino laricio de Córcega (*Pinus nigra* subs. *corsicana*). No obstante, ambas especies están presentes en ámbitos geográficos claramente diferenciados: el pino laricio de Córcega se encuentra principalmente en la vertiente atlántica de Navarra, mientras que el pino laricio de Austria está presente en el resto del territorio navarro. Por estas razones y a efectos exclusivos de este estudio, se han excluido todas las repoblaciones ubicadas en la zona cantábrica.

Siguiendo este criterio, la superficie inicial de trabajo fue de 23.600hectáreas de pinares, el 96% de la superficie ocupada por pino laricio en Navarra.



Para la determinación de la altura dominante de los pinares, se ha optado por emplear los datos del vuelo Lidar del año 2017 que cubre la totalidad del territorio navarro y cuenta con una densidad de 14 puntos/m².

El modelo de altura dominante disponible para descarga en los servidores del IDENA tiene una resolución de píxel de 10x10 m. Por lo tanto, ha sido necesario reajustar la resolución a 25x25 m, calculando para cada nuevo píxel la media ponderada de los valores del modelo de altura dominante original.

La gran mayoría de la información relativa a la edad de los pinares se ha obtenido gracias a un informe del Servicio de Montes fechado de marzo de 1982 que ofrece una relación de las “Plantas de pino laricio colocadas en repoblaciones de patrimonio forestal de Navarra, concejos tutelados, comunales de Ayuntamientos y Concejos, y montes de propiedad privada”. Este informe proporciona información acerca de 26.450 hectáreas de repoblaciones, pero su contenido es difícilmente explotable, ya que consiste en una relación de repoblaciones para las cuales están disponibles el año de plantación, el pueblo, la superficie y el paraje (a veces aproximado o sin relación con la toponimia oficial actual). Para el presente estudio, se ha hecho un laborioso e importante trabajo de interpretación de este documento, cruzando estos datos con información cartográfica variada (vuelos fotográficos históricos de varios años, toponimia, etc), para la obtención de la edad de las repoblaciones de pino laricio.

Estos datos se han completado consultando otras fuentes como la base de datos de ordenaciones de montes del Servicio de Gestión Forestal o las bases de datos de las campañas de reforestación de tierras agrícolas.

En conjunto, se ha podido determinar con cierta fiabilidad la edad (año de plantación) de más de 15.800 ha de pinares.



En cuanto al plan de muestreo, se ha optado por aplicar un muestreo sistemático. Con el fin de asegurar la coherencia de los datos, se ha empleado una malla cuyas dimensiones fuera un múltiplo del tamaño de pixel, procurando que los puntos cayeran en el centro de los píxeles. Se ha optado por una malla cuadrada de lado 150x150 m, que se corresponde con una intensidad de muestreo de 1 punto cada 2,25 ha. Esta densidad de puntos de muestreo ofrece un buen compromiso entre densidad de muestreo y representatividad de la variabilidad de condiciones de los pinares.

Una vez posicionada la cuadrícula se ha realizado una revisión manual de cada punto de muestreo, haciendo pequeños ajustes en caso de que los puntos coincidieran con el límite de la repoblación, claros, bosquetes de frondosas, etc. Según los casos, se han eliminado los puntos, si eran no procedentes, o desplazado a las inmediaciones, de forma que quedasen corregidas todas las anomalías detectadas en el plan de muestreo.

Además, en el caso de pinares de escasa superficie en los que no caían puntos de la malla cuadrada, se ha optado por añadir posteriormente de forma manual un punto de muestreo en su centroide, con el objetivo de que también quedaran incluidos en el plan de muestreo.

Como fase final, se han eliminado los puntos de muestreo de aquellas repoblaciones de las que no se ha podido determinar la fecha de plantación, manteniendo los puntos de todas aquellas en las que se conoce la edad para la realización del estudio.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el número de puntos de muestreo posicionados para este estudio asciende a 6.879 unidades. Para cada uno de estos puntos de muestreo se han calculado las variables geográficas y de caracterización del terreno que se describen a continuación.

Para cada punto de muestreo, se han calculado cuatro variables dasométricas asociadas a la masa de pino laricio, y cuarenta variables explicativas que describen las condiciones topográficas, climatológicas y geológicas o litológicas del terreno sobre el que se asientan.

Las variables dasométricas incluyen el año de plantación y la altura dominante, ya



descritas. La edad de las masas se ha calculado para el año 2017, que corresponde al año de medición de la altura mediante vuelo lidar del PNOA.

La última variable dasocrática es la calidad de estación, para la cual se han empleado las clases de calidad de estación definidas en las tablas de producción del Pino laricio de Austria (*Pinus nigra nigra*) en Navarra (1996), en las que se definen tres calidades en base a una relación entre altura dominante y edad de las repoblaciones. A partir de las ecuaciones proporcionadas en este estudio, se obtiene la siguiente fórmula para la determinación del índice de calidad de estación en base a altura dominante y edad de la repoblación:

$$\text{CalEst} = 1/3,332586 \times (24,99439 - H_0 / (1 - 1/e^{0,05 \times \text{Edad}})^{2,02232362})$$

Donde H es la altura dominante y Edad la edad de la repoblación.

En cuanto a las variables explicativas, era imprescindible contar con variables que permitan posteriormente generalizar el modelo al conjunto del área de estudio. Por ello, se ha trabajado únicamente con datos disponibles en formato ráster. Este requerimiento ha condicionado el tipo de variables que podían emplearse.

Las variables topográficas utilizadas han sido las coordenadas geográficas (latitud y longitud en grados en el sistema geodésico WGS84) y la serie de variables fisiográficas calculadas en base al modelo de terreno derivado del vuelo Lidar del año 2017: altitud, pendiente, orientación e índice de posición topográfica.

Para la orientación, se empleó el valor del azimut con su seno y coseno, que permiten representar los gradientes este-oeste y norte-sur, respectivamente.

El índice de posición topográfica (TPI) es un método de clasificación de la posición de la pendiente y de tipos de geomorfología. Permite distinguir características topográficas como la posición en la parte alta de una ladera o en la parte baja, en el fondo del valle, en una cresta, etc. Esta cuestión está relacionada con las dinámicas de aportes y pérdidas de suelo y agua por laminación o escorrentía, con la consiguiente importancia para el crecimiento del arbolado en condiciones mejores o peores. Este índice se calcula comparando la elevación de cada píxel con sus vecinos circundantes. Por ello, la cantidad de vecinos con los que lo compara (es decir, el radio de búsqueda) puede generar importantes diferencias en los resultados obtenidos (WEISS 2001 y JENESS 2006). En el presente estudio, se emplearon radios de 100 metros (TPI100) y 250 metros (TPI250).

Finalmente, para cada repoblación, se ha apreciado si el terreno estaba aterrazado o no. Esta variable es la única que no se ha obtenido para el conjunto del territorio navarro, sino como un atributo de las repoblaciones analizadas en el estudio.

En cuanto a las variables climatológicas, se han empleado los datos de la base de datos WordClim 2.1. Esta base de datos ofrece datos climatológicos para el periodo 1970-2000 en todo el mundo.

Los datos empleados en el presente estudio han sido las temperaturas medias mensuales, temperatura media anual, precipitaciones mensuales y precipitaciones anuales. El estudio de estas variables ha puesto en evidencia una fuerte colinealidad entre los datos mensuales y anuales, por lo que se ha optado por emplear únicamente los valores anuales.

Las variables geológicas y edafológicas se consideran, a priori, muy influyentes en



la calidad de estación. Sin embargo, la información edáfica disponible es escasa. Por ello, se ha tratado de aprovechar la información existente para sacarle el máximo partido.

El mapa geológico de Navarra (escala 1:25.000) es la mejor fuente de información que se ha encontrado que ofrezca una cobertura de toda el área de estudio. Ofrece las siguientes variables: unidad geológica, era, edad y piso.

Este mapa presenta varios inconvenientes en relación con el presente estudio. Se trata de un mapa a escala 1:25.000, es decir que su precisión es considerablemente menor que la de la escala de trabajo. Muchas de las unidades litológicas descritas en el mapa son relativamente heterogéneas en cuanto a sustrato litológicas (unidades descritas como alternancias de materiales de distintas naturalezas). Por lo que, en una misma unidad, pueden existir condiciones edáficas muy distintas. Y finalmente, no ofrece variables numéricas directamente utilizables para la elaboración de modelos (profundidad de suelo, reserva útil, pH, etc.), sino que la litología se ha de usar como parámetro.

Por ello, se ha optado por zonificar el ámbito del estudio en grandes zonas de características geológicas similares. Esta alternativa no es la óptima, pero al menos permite tener en cuenta la variable geológica dentro del modelo que se pretende construir. Esta zonificación se ha abordado de 3 formas distintas: agrupando las unidades geológicas por ámbitos geográficos, por era geológica o por grupos de unidades similares.

Finalmente, se ha empleado el Mapa de cultivos y aprovechamientos de Navarra del año 1956 como base y se ha realizado un trabajo de fotointerpretación de la ortofoto de dicho año para la apreciación del uso antiguo del territorio en cada una de las repoblaciones existentes utilizadas para este trabajo. Se han clasificado los usos previos a la repoblación de pino laricio en cinco categorías: forestal, matorrales, pastos, cultivos e improductivo.

Posteriormente, se ha realizado la depuración de los datos en base a diversas variables teniendo en cuenta la realidad de las repoblaciones estudiadas.

Teniendo en cuenta el perfil de las curvas de calidad y el rango de edad de las repoblaciones que han servido para su elaboración, se ha optado por aplicar un filtro sobre la edad de las masas estudiadas. La determinación de la calidad de estación es más sensible a variaciones de altura en edades jóvenes, por lo que las imprecisiones tanto en la determinación de edad o altura tienen más impacto en estas repoblaciones. En el otro extremo del rango de edades, se han eliminado de la muestra las repoblaciones de mayor edad, puesto que no se tuvieron en cuenta repoblaciones tan viejas para la construcción de las curvas de calidad. En resumen, solamente se han conservado para este estudio las masas con edades comprendidas entre 35 y 65 años.

La altura dominante de los pinares se ha determinado en base a un modelo obtenido con datos Lidar del vuelo de 2017. Para evitar la inclusión de errores ligados al modo de medición, se han eliminado las repoblaciones de escasa altura (inferior a 7m), que pueden ser repoblaciones de desarrollo anormalmente malo o puntos con errores en el modelo de altura dominante. Del mismo modo, se han eliminado de la muestra aquellas repoblaciones en las que la altura parece muy elevada para esta especie (repoblaciones con un desarrollo excepcional, poco representativo, o en la que existen otras especies en mezcla de mayor altura), fijando el límite superior en 25 metros de altura dominante.

Al igual que para la altura, se han eliminado de la muestra aquellos puntos para los cuales se han obtenido valores de calidad de estación anormalmente altos o bajos. Solo se han conservado los puntos para los que el valor de calidad de estación estaba comprendido entre -1 y 5.

La base de datos de puntos de muestreo obtenida tras este proceso de depuración incluye un total de 5.495 registros, que serán con los que se construya el modelo.

En la construcción de los modelos se han empleado varias técnicas de modelización para establecer relaciones entre las variables explicativas y la calidad de estación. Todos los trabajos de modelización se realizaron con el programa R. Para el trabajo con los GAMs, se empleó el paquete *mgcv*.

Los primeros modelos se construyeron mediante regresión lineal múltiple con selección de variable con método *stagewise*. Esta técnica presenta la ventaja de ser relativamente sencilla de aplicación, e interpretación, pero con ciertas limitaciones para la explicación de interacciones biológicas. La consideración del factor geológico ha tenido que abordarse de forma distinta al resto de variables, al no tratarse de valores numéricos. Se ha optado por elaborar un modelo para cada contexto geológico, creando los 8 modelos siguientes: un modelo global para todo el ámbito de trabajo (utilizando la globalidad de los puntos de muestreo depurados), un modelo para cada una de las tres eras geológicas (mesozoico, terciario continental y terciario marino) y un modelo para cada uno de los cuatro ámbitos geológicos definidos (Secundario norte, Secundario sur, Terciario marítimo y Terciario continental).

En una segunda fase, se construyeron modelos mediante GAM (*Generalized Additive Models*): técnica más compleja y exigente en capacidad de cálculo, pero que ofrece buenos resultados para modelización de interacciones no lineales. La interpretación de los resultados suele menos intuitiva que en modelos lineales. El proceso de selección de variables en la construcción de modelos no es tan sistemática en el caso de los GAMs. Los modelos se obtuvieron construyendo un primer modelo incorporando una componente espacial y las todas las variables que se sospechaba que tenían un efecto sobre la calidad de estación (tabla 1), para posteriormente ir eliminado las variables no significativas.

degx_25_na		smooth	
	degy_25_na		
mdt_25_na		smooth	
pend_25_na		smooth	
orient_25_na		smooth	
TPI100_25_na	TPI 100 (Índice de posición topográfica).	Devuelve la diferencia entre la media de alturas en un radio de 100m y la posición considerada	smooth
prec_t_25_na		smooth	
tavg_t_25_na		smooth	

MCA56_25_na	Uso del suelo según Mapa de Cultivos y aprovechamientos basado en ortofotos de 1956:	1-Forestal, 2-Matorral, 3-Pastos, 4-Cultivos
	GrpLito_25_na	
CodTerr	Código de presencia de terrazas:	0-Ausentes, 1-Presentes

4. Resultados

En total, se elaboraron 8 modelos mediante regresión lineal múltiple (tabla 2). Las variables seleccionadas varían para cada modelo, pero algunas variables aparecen en un gran número de ellos. Entre ellas merece destacar el índice topográfico, la temperatura, el gradiente de exposición norte-sur o la altitud.

Modelo	Ecuación	R2	StdDev
Modelo Global	CalEst = -3.7884326 - 0.0044182×prec_t + 0.0511640×TPI100 - 0.3939107×cosor + 0.6343536×tavg_t - 0.0925056×CodTerr + 0.0026659×mdt	0,3397	0,9144
Era Mesozoica	CalEst = 244.850550 - 5.697927×degy + 1.048078×degx + 0.040462×TPI100 + 0.184813×tavg_t	0,3262	0,8824
Era terciaria marítimo	CalEst = -1.440914 - 0.00429×prec_t - 0.4894033×cosor + 0.0500813×TPI100 - 0.1723506×CodTerr - 0.0062945×pend + 0.5022641×tavg_t + 0.0017479×mdt	0,2688	0,9941
Era terciaria continental	CalEst = 100.6 + 0.06945×TPI100 - 0.447×cosor - 0.0022×mdt - 2.282×degy - 0.2479×degx	0,2403	0,8139
Ámbito secundario norte	CalEst = 0.0280740 + 0.0028146×mdt + 0.0315256×TPI250 + 0.6492128×degx - 0.0092147×pend	0,1680	0,7592
Ámbito secundario sur	CalEst = 944.7 - 21.85×degy + 0.01543×pend + 0.08739×TPI100 - 0.001685×orient + 4.702×degx + 0.4216×CodTerr	0,5073	0,8020
Ámbito terciario marítimo	CalEst = -2.4088476 - 0.0036624×prec_t - 0.5434394×cosor + 0.0542768×TPI100 + 0.5031488×tavg_t - 0.1067539×CodTerr + 0.0019798×mdt	0,2858	0,9493
Ámbito terciario continental	CalEst = -2.823103 + 0.069029×TPI100 + 0.441978×tavg_t - 0.320148×cosor	0,2271	0,8138

La validación de estos modelos se hizo mediante validación cruzada, con el método de K-Fold Cross-Validation. con un valor de k=10. En todos los casos se ha podido comprobar la robustez de los modelos.

El R² de los modelos está comprendido entre 0,16 y 0,50. Estos valores pueden

parecer relativamente bajos a primera vista, pero están comprendidos en el rango de valores obtenidos en estudios similares (MORENO-FERNÁNDEZ, D., 2018).

Es interesante apreciar que, por regla general, la reducción del área de estudio ha conllevado una disminución del R^2 en los modelos. Esta situación se debe al hecho que, al acotar el área de estudio, la variabilidad en algunos de los parámetros de entrada (temperatura, latitud, longitud, etc.) también se ha disminuido, reduciendo el aporte de estas variables a los modelos.

Para la validación de los modelos, se han comprobado las hipótesis iniciales de los modelos, y en concreto las ligadas a los residuos: homocedasticidad y normalidad.

En estos aspectos no todos los modelos presentan resultados buenos. Como regla general, los modelos desarrollados para poblaciones más grandes presentan unos residuos con mayores defectos. Es especialmente patente en el caso del modelo global y de los modelos para el terciario marítimo. Las desviaciones respecto a la normalidad de los residuos son menos acusadas que el incumplimiento de la heterocedasticidad, y pueden estar ligados a la existencia de puntos anormales (*outliers*),

Los defectos de heterocedasticidad son problemáticos, puesto que revelan un sesgo en algunos modelos. Esto ocurre con el modelo global, mientras que el modelo para la era Mesozoica ofrece resultados aparentemente mejores.

El trabajo con los GAM permitió producir un único modelo. El ajuste espacial tiene un peso especialmente grande en el modelo obtenido. Entre las variables seleccionadas, se vuelven a encontrar las que destacaban en la construcción de los modelos con regresión lineal múltiple, así como algunas nuevas. La Tabla 3 muestra un resumen de las variables empleadas en el modelo, junto con el tipo de función de suavizado empleado y el tamaño de base atribuido.

degx_25_na		300
	degy_25_na	
mdt_25_na		10
pend_25_na		10
orient_25_na		10
TPI100_25_na		10
prec_t_25_na		10
tavg_t_25_na		20
MCA56_25_na	Uso del suelo en 1956:	1-Forestal, 2-Matorral, 3-Pastos, 4-Cultivos

El R^2 es de 0,659 y el porcentaje de desviación explicado es del 67,6%. Estos resultados pueden considerarse muy buenos para la modelización de variables de este tipo.

El estudio de los residuos del modelo también proporciona resultados globalmente



satisfactorios. La homocedasticidad no parece ser respetada totalmente, pero los resultados no son aberrantes.

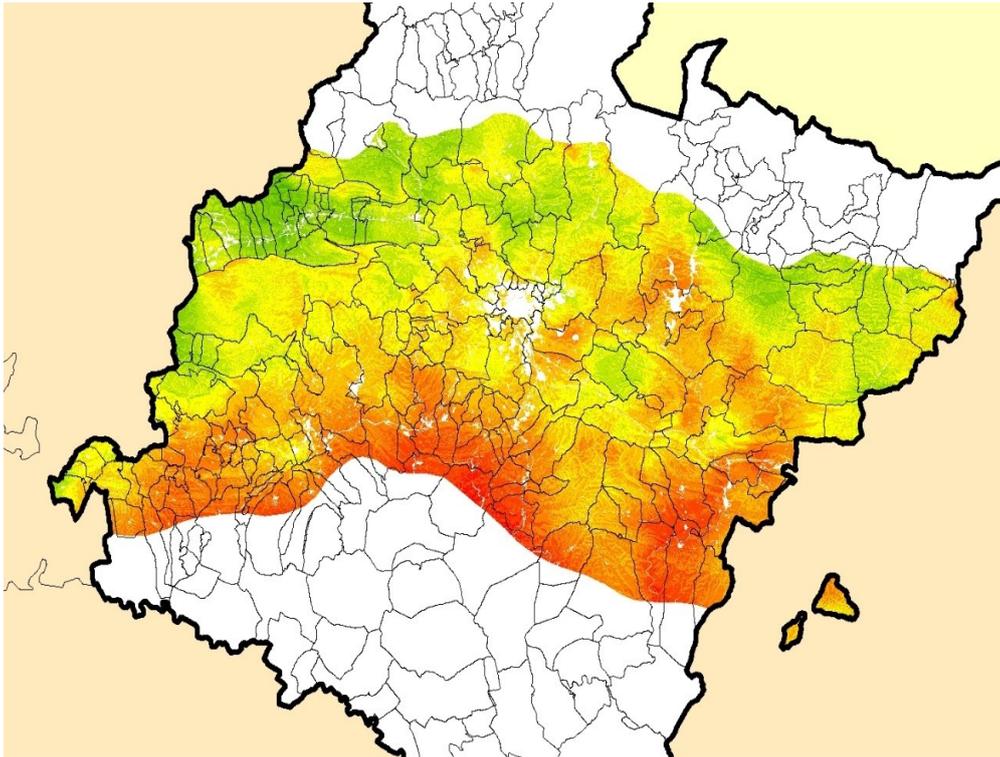
El modelo obtenido mediante GAM ofrece mejores resultados que el obtenido mediante regresión lineal, tanto en términos de variabilidad explicada como en el comportamiento de los residuos. Por lo tanto, este ha sido el que se ha elegido como modelo final.

El modelo se ha extendido a todo el territorio navarro en base a las capas ráster descritas en este trabajo. Aunque este cálculo se haya hecho para toda Navarra (extensión de las capas ráster), es importante resaltar que la validez del modelo es la del ámbito para el que ha sido creado, es decir el área de distribución de las parcelas de muestreo del pino laricio de Austria en Navarra.

Dentro de la zona de validez del modelo existen ciertos contextos que han de entenderse como fuera del ámbito de aplicación del modelo, ya que no se encuentran representados en el muestreo. Por ejemplo, los pies de acantilados devuelven valores de calidad de estación muy buena cuando no constituyen estaciones particularmente buenas. En este caso, concreto, se debe a que el índice topográfico en la base de los acantilados presenta valores especialmente bajos, no representados en el muestreo (no hay repoblaciones de pino laricio en estos contextos), lo que distorsiona la respuesta del modelo.

Otra consecuencia de la forma en la que se ha generalizado el modelo es que se ha calculado de forma continua para todo el territorio, sin tener en cuenta el uso del suelo u otras particularidades. De este modo, se han calculado valores de calidad de estación para terrenos no forestales (zonas urbanizadas, láminas de agua, etc) o no productivas (canteras, roquedos, etc.). Estos terrenos también han de considerarse como fuera del ámbito de aplicación del modelo.

Finalmente, este modelo extendido se ha utilizado para generar tres productos cartográficos: un mapa de índice de calidad de estación (capa raster con los resultados brutos proporcionados por el modelo, recortados al ámbito de aplicación y excluidos los terrenos no productivos), un mapa de clases de calidad de la estación (capa raster con los resultados del modelo agrupados por clase de calidad, recortados según la zona de validez y excluidos los terrenos no productivos), un mapa de clases agrupadas de calidad de la estación (capa raster derivada de la anterior, en la que se han agrupado los valores inferiores o igual a 1 (estaciones de buena calidad) y excluido los valores superiores a 3) y un mapa vectorial de clases agrupadas de calidad de la estación (capa vectorial elaborada a partir del ráster Mapa de clases agrupadas de calidad de la estación, y con un tamaño mínimo de recinto de 0,5 ha)



5. Discusión

Se han identificado diversos factores que pueden contribuir a que los modelos generados tengan limitaciones en cuanto a la representatividad o correlación. A continuación, se describirán cada uno de ellos.

La función de correlación espacial del modelo obtenido con los GAMs tiene una base de gran dimensión y, por sí sola explica una parte importante de la variabilidad de los datos. Por lo tanto, se puede sospechar que el ajuste espacial esconde el efecto de otras variables que también tienen cierta correlación espacial, como algunas relacionadas con la geología o las condiciones climáticas.

La altura dominante de los pinares se ha obtenido en base al modelo de altura dominante elaborado a partir de los datos del vuelo Lidar de 2017 (fuente IDENA). Este modelo puede por lo tanto presentar pequeñas imprecisiones debidas a la calidad de la clasificación del suelo y correcto cálculo de la altura de vegetación.

Para la estimación de la edad, se ha utilizado el informe del Servicio de Montes (1982) que ofrece una relación de las “Plantas de pino laricio colocadas en repoblaciones de patrimonio forestal de Navarra, concejos tutelados, comunales de Ayuntamientos y Concejos, y montes de propiedad privada”.

El presente estudio se ha basado en esta información y un ingente trabajo de análisis e investigación para poder localizar dichas repoblaciones. No obstante, hay que ser consciente que no se conoce la precisión de dicho documento. En



ocasiones incluye referencias poco precisas sobre las superficies y los parajes, o si sobre toda la superficie se repobló en ese año o fue el año de inicio, pudiendo prolongarse la plantación durante varias campañas.

La variable edáfica es una parte muy importante e influyente en la calidad de la estación de un determinado lugar para una especie dada. De acuerdo con estudios similares, parámetros como la reserva en agua o la riqueza trófica se revelan como factores muy importantes en la modelización de la calidad de la estación para las especies forestales.

Sin embargo, en Navarra no existe esta información de forma generalizada, por lo que no se ha podido incorporar dichas variables a la modelización. Posiblemente, buena parte de la variabilidad que no queda explicada en los modelos construidos resida en estos parámetros.

Asumimos que la altura dominante es estable e independiente de la selvicultura que se aplique a las repoblaciones. No obstante, el grado de apertura de una masa podría afectar a este parámetro, más aún cuando se han realizado en ocasiones cortas muy fuertes, como es el caso de algunas de las repoblaciones de pino laricio existentes en Navarra.

Finalmente, se suele considerar la calidad de estación como un factor relativamente estable, cuando en realidad varían y evolucionan en la medida que las características del medio lo hacen.

Este aspecto es no solo relevante en un contexto de cambio climático, sino también en cuanto la propia vegetación forestal es capaz de cambiar las características del suelo. Este segundo punto es particularmente relevante en el caso de esta especie y su uso en Navarra para la repoblación de terrenos degradados en los que han contribuido a restaurar un ambiente y suelo forestal.

6. Conclusiones

Este trabajo supone un punto de avance respecto a los trabajos existentes a nivel estatal, siendo conscientes de los puntos de mejora descritos y los restos que quedan por delante.

Los productos obtenidos suponen una mejora de los conocimientos de esta especie, y ofrece herramientas prácticas y útiles para la gestión de los montes navarros. Este mapa fue empleado, por ejemplo, para la planificación de los trabajos de restauración de pinares afectados por incendios forestales.

Se trata de un recurso adicional a disposición de los técnicos y gestores en la elaboración de su diagnóstico. Junto con otras herramientas y técnicas tradicionales, permite mejorar la planificación de los trabajos de repoblación o la toma de decisiones de gestión para las masas de pino laricio. Todo lo cual redunda en una mejora de la gestión forestal.

La ciencia forestal aplicada a la gestión cuenta todavía con lagunas importantes en diversos campos, que deberán irse completando con iniciativas como esta.

7. Agradecimientos



Al equipo de trabajo de Basarteia.

Al Servicio de Gestión Forestal por los datos facilitados.

Al Negociado de Suelos y Climatología, y en particular a Javier Eslava Lecumberri, por el trabajo y colaboración realizada.

A Jokin del Valle de Lersundi, por su colaboración y asesoramiento en materia de suelos.

A Jesús Garitacelaya, por conservar en su archivo personal una copia de documentos que no se pudieron localizar en ningún otro.

8. Bibliografía

AGUIRRE ARNAIZ, A. (2020). Modelización de existencias y stocks de carbono en pinares a lo largo del gradiente de aridez de la España peninsular [Tesis doctoral].

ÁLVAREZ, J. G., TRONCOSO, J. V., RENGEL, A. S., y ÁLVAREZ, J. A. (2013). Modelos de crecimiento y producción de biomasa de los pinares de Andalucía. Congresos - CARGA FINAL.

AERTSEN, W., KINT, V., VAN ORSHOVEN, J., OZKAN, K., & MUYS, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, 221(8), 1119-1130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007>

BRAVO, F., & MONTERO, G. (2001). Site index estimation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the High Ebro Basin (northern Spain) using soil attributes. *Forestry*, 74(4), 395-406. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.4.395>

BRAVO OVIEDO, F., BRAVO NÚÑEZ, A. (2017) Clasificación de la calidad de estación forestal mediante técnicas de aprendizaje automático (machine learning). [Poster], 7º Congreso Forestal Español

BUEIS, T., BRAVO, F., PANDO, V., & TURRIÓN, M. (2016). Relationship between environmental parameters and *Pinus sylvestris* L. site index in forest plantations in northern Spain acidic plateau. *IForest*, 9(3), 394-401. <https://doi.org/10.3832/ifor1600-008>

CALAMA, R., DEL RIO, M., COQUILLAS, V., CAÑELLAS, I., y MONTERO, G. (2004). Modelos de calidad de estación y de perfil de fuste para masas de *Pinus uncinata* Ram. en el Pirineo español. *Investigación agraria*, 13(S1), 176. <https://doi.org/10.5424/srf/200413s1-00865>

EPENOUX (D') F.. Diagnostic des potentialités forestières pour le pin noir d'Autriche



dans les Alpes externes méridionales. Exemple d'une étude liaison milieu-production., Forêt Méditerranéenne, 1990, XII (4), pp.565-568. hal-03555962

GAUDIN, S., PIEDALLU, C., MADROLLES, F., & REBOUL, J. (2016c). Les stations forestières : intérêts et limites des cartographies prédictives et par échantillonnage. HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe).

GÉGOUT, J.-C., PIEDALLU, C., CORNU, J.-F., (2006) Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien. https://www.researchgate.net/publication/239526047_Cartographie_predictive_des_stations_forestieres_du_massif_Vosgien

GONZÁLEZ, O. C., y PALOMARES, O. S. (2005). Modelo de calidad de estación para el cerezo de monte (*Prunus avium* L.) en Castilla y León mediante la relación entre incremento diametral y parámetros ecológicos. Congresos - CARGA FINAL.

JENESS, J. (2006): Topographic Position Index (TPI) v. 1.2. http://www.jenessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf

JIMÉNEZ, J. G., LÓPEZ, J. P., y CAMACHO, C. A. (2005). Modelización de factores fitoclimáticos de la España peninsular. Congresos - CARGA FINAL.

MENÉNDEZ, E. M., y CANCIO, A. (2005). Sistema informático para la generación de datos climáticos y fitoclimáticos. Congresos - CARGA FINAL.

MINOCHE, D. (2020). Desarrollo de índice de sitio, diagrama de manejo de densidad y modelos selvícolas para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Tabasco, México. [Tesis Doctoral]. <https://doi.org/10.35376/10324/48112>

MODREGO, M., y ELENA-ROSELLO, R. (2004). Efectos de las repoblaciones por terrazas con *Pinus sylvestris* L. en las propiedades físicas del suelo en el Sistema Ibérico soriano. *Forest Systems*, 13(2), 417-428. <https://doi.org/10.5424/843>

MORENO-FERNÁNDEZ, D., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., PASALODOS-TATO, M., CAÑELLAS, I., MONTES, F., FJELLSTAD, W. J., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., CRECENTE-CAMPO, F., ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P., BARRIO-ANTA, M., & PÉREZ-CRUZADO, C. (2018). National-scale assessment of forest site productivity in Spain. *Forest Ecology and Management*, 417, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.016>

MORENO-FERNÁNDEZ, D., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, CAÑELLAS, I., MONTES, F., y PÉREZ CRUZADO, C. (2018). Mapas nacionales de calidad de estación para *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Fagus*



sylvatica y *Quercus pyrenaica*. *Foresta*, 71(71), 50-57.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6533847>

ORTEGA, A., & MONTERO, Y. G. (1988). Evaluacion de la calidad de las estaciones forestales. Revision bibliografica. *Ecología*, 2, 155-184.
http://www.mapama.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_02_11_tcm7-45460.pdf

PIEDALLU, C., GÉGOUT, J.-C., CORNU, J.-F. & CLUZEAU, C. (2006) Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien - Elaboration, validation et applications.

PIEDALLU C., LEBOURGEOIS F. F., GÉGOUT J.-C., SEYNAVE I., VEPIERRE R., et al. Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques. [Rapport de recherche] ign. 2007. hal-00835912

RIPOLL, M., JIMÉNEZ, M. A., FERNÁNDEZ-ONDOÑO, E., NAVARRO, F., GALLEGU, E. V., & DE SIMÓN, E. (2005). Influencia de las características edáficas, topográficas y climáticas en la captación de escorrentías superficiales en forestaciones de zonas semiáridas. Congresos - CARGA FINAL.

RODRÍGUEZ-Ochoa, R., Alonso, H., Olarieta, J.R. (2018). Suelos y plantaciones de *Pinus nigra* ssp. *salzmannii* en La Rioja (España). *Ecosistemas* 27(2): 126-135. Doi.: 10.7818/ECOS.1559

SENEPLEDA, E. L., GONZÁLEZ, G. M., RUIZ-PEINADO, R., PONCE, R. A., HIERRO, R. S., y PALOMARES, O. S. (2018). Cincuenta años de autoecología forestal paramétrica en España. *Foresta*, 70, 40-47. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6399058>

SIMPSON, G. (2020) Introduction to generalized additive models with R and mgcv

WOOD, S. N. (2017). Generalized Additive Models: An Introduction with R, Second Edition (2nd ed.). CRC Press.