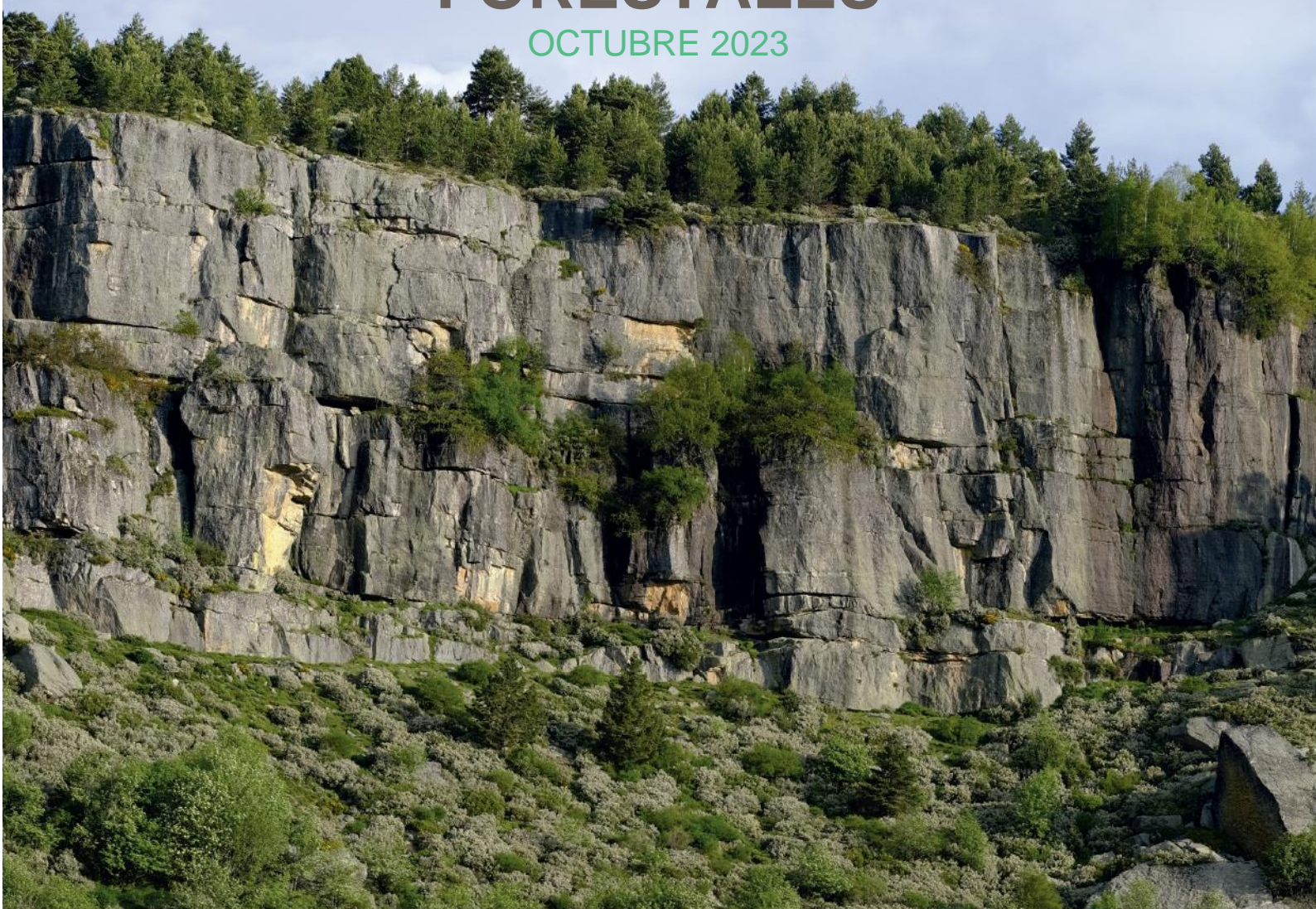




LIFE SORIA
ForestAdapt

MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL POTENCIAL DE LAS MASAS FORESTALES

OCTUBRE 2023



CON LA CONTRIBUCIÓN DEL INSTRUMENTO FINANCIERO LIFE DE LA UNIÓN EUROPEA





ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Objetivos	3
2. METODOLOGÍA.....	4
2.1 Recopilación y preparación de los datos de presencia y ausencia de la especie.....	4
2.2 Obtención de datos climáticos y selección de variables.....	5
2.3 Generación de los modelos.....	7
2.4 Proyección del modelo bajo diferentes condiciones climáticas.....	9
2.5 Limitación de la interpretación de los modelos de distribución de especies	9
3. RESULTADOS	12
3.1 Evaluación de la sensibilidad de las principales especies forestales sorianas al cambio climático	12
3.2 Pino albar: <i>Pinus sylvestris</i> L.	14
3.3 Pino salgareño: <i>Pinus nigra</i> J.F. Arnold	24
3.4 Pino negral: <i>Pinus pinaster</i> Aiton.	33
3.5 Pino carrasco: <i>Pinus halepensis</i> Mill.	42
3.6 Sabina albar: <i>Juniperus thurifera</i> L.	51
3.7 Haya: <i>Fagus sylvatica</i> L.	60
3.8 Encina: <i>Quercus ilex</i> L.....	69
3.9 Quejigo: <i>Quercus faginea</i> Lam.	78
3.10 Rebollo: <i>Quercus pyrenaica</i> Willd.	88
3.11 Análisis conjunto de la sensibilidad de las especies del proyecto al cambio climático	98
4. BIBLIOGRAFÍA.....	101

El presente documento se corresponde con la **sub-acción C1.2 Módulo de modelización de la distribución espacial potencial de las masas forestales del proyecto LIFE Soria ForestAdapt**.

En este estudio se ha modelizado la distribución potencial actual y futura de las nueve especies forestales analizadas. Para ello, se han obtenido las presencias del inventario forestal nacional y se han usado tres escenarios climáticos (Shared Socioeconomic Pathways) del último informe del IPCC y cuatro periodos temporales.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de distribución de especies (MDE) son algoritmos que establecen una relación estadística entre los puntos conocidos de la distribución de una especie y diferentes variables que describen las condiciones ambientales de un área, extrapolando esta relación al resto del área de estudio. De esta forma se obtiene como resultado un mapa que indica la idoneidad de la especie en cada punto del área de estudio (ver revisiones de: Elith y Leathwick, 2009, Franklin, 2010).

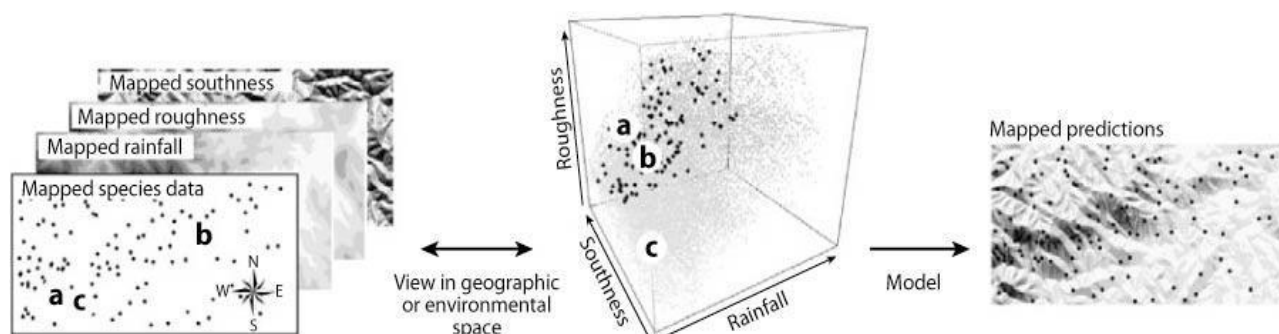


Figura 1: Representación ambiental y espacial de las presencias de una especie. Izquierda: relación entre las especies mapeadas y los datos ambientales. Centro: el espacio ambiental. Derecha: predicciones mapeadas de un modelo usando las presencias y las variables ambientales. La cercanía en distancia geográfica entre dos presencias (a y c) no implica que estén cerca en el espacio ambiental (Elith y Leathwick, 2009).

Estos modelos se han establecido como una herramienta muy utilizada en diversos campos, como son la investigación de los impactos del cambio climático, la gestión de las especies y territorios, gestión forestal, biogeografía y conservación de especies amenazadas, entre otros.

Estos modelos permiten inferir cambios en la distribución de las especies en el espacio y en el tiempo al proyectar los modelos bajo las condiciones climáticas de los escenarios futuros (IPCC, 2022). Los MDE proporcionan información objetiva de qué especies o regiones serán susceptibles al cambio climático permitiendo incluso cuantificar la variación en la distribución de las especies. Por tanto, los MDE constituyen una herramienta muy útil para la toma de decisiones en la gestión adaptativa y conservación de ecosistemas forestales frente al cambio climático.

1.1 OBJETIVOS

Los objetivos del presente estudio son los siguientes:

- Modelizar la distribución potencial actual de las ocho especies forestales objetivo.
- Proyectar los modelos a las nuevas condiciones climáticas de los escenarios del sexto informe del IPCC.
- Obtener los mapas de idoneidad futura de las especies y los mapas de cambio respecto a las condiciones de referencia.

2. METODOLOGÍA

Para generar los modelos de distribución de especies es necesario seguir un proceso que se puede resumir en los siguientes pasos principales (fig.2):

- 1) recopilación y preparación de los datos de presencia y ausencia de la especie (variable respuesta).
- 2) obtención y preparación de los valores de las variables ambientales (variables predictoras).
- 3) calibración y validación de los modelos de idoneidad con las presencias/ausencias de la especie y los valores de las variables ambientales en esos puntos para el periodo de referencia.
- 4) Proyección espacial del modelo de idoneidad bajo diferentes condiciones climáticas temporales (escenario de referencia y escenarios futuros).

A continuación, se muestra un esquema gráfico del proceso:

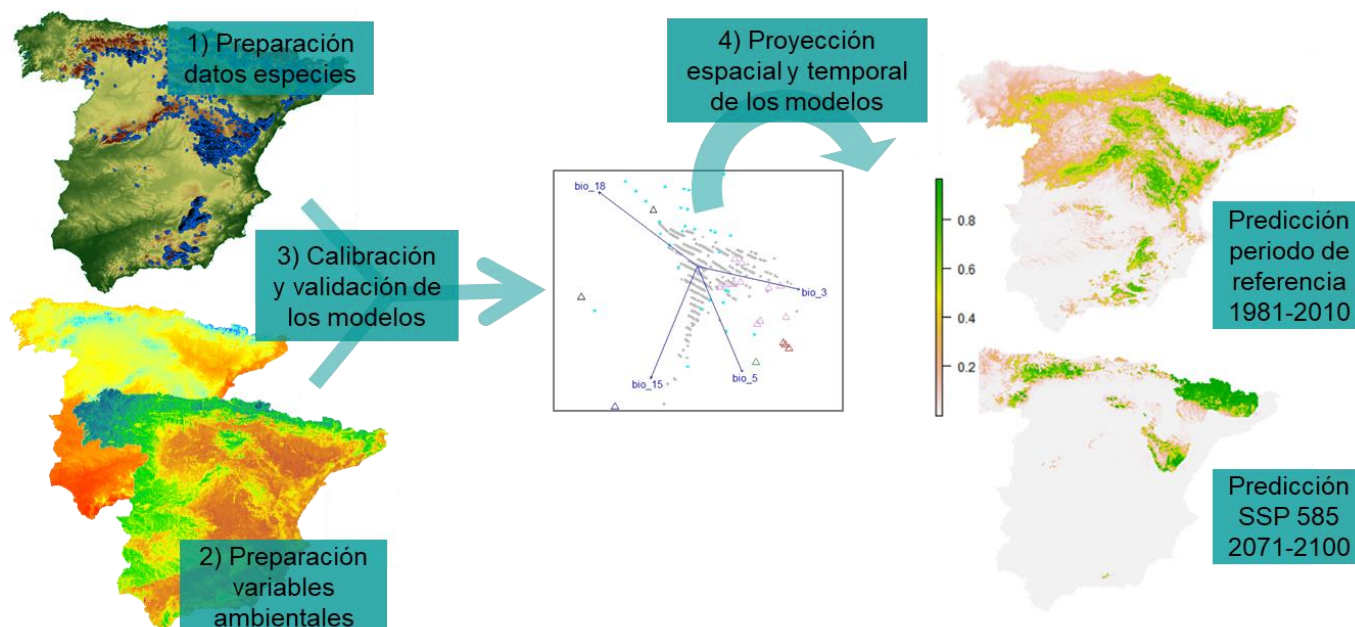


Figura 2: Proceso de generación de los modelos de distribución de especies.

2.1 RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE LOS DATOS DE PRESENCIA Y AUSENCIA DE LA ESPECIE

La recopilación y preparación de las presencias de las especies es un punto clave del proceso de modelización ya que se necesitan una gran cantidad de datos de presencia (y ausencias) de la especie con una referenciación precisa en el área de estudio.

En este estudio se han usado los datos del tercer inventario forestal nacional (IFN3, 2008) por estar disponible para todas las provincias y cubrir el periodo temporal del periodo usado como referencia para los modelos actuales (1981-2010). El inventario forestal nacional proporciona datos de gran calidad para la generación de los MDE con información de presencias y ausencias reales derivadas de inventario sistemático de campo con esfuerzo de muestreo uniforme y gran precisión de coordenadas a 1km de resolución.





Para la calibración de los modelos es importante que las presencias recojan todo el rango ambiental de la especie, para minimizar los riesgos de extrapolación fuera de la zona de entrenamiento de las variables ambientales (Hijmans y Elith, 2013). Por ello, los modelos se calibraron en el periodo de referencia con los datos del IFN3 y los datos de clima para toda la Península Ibérica.

2.2 OBTENCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS Y SELECCIÓN DE VARIABLES

2.2.1 PREPARACIÓN DE DATOS DE CLIMA

Para realizar los modelos de distribución de especies además de registros de presencia y ausencia de la especie, es necesario disponer de información ambiental (temperatura, precipitación, topografía, tipo de suelo, etc.) del área de estudio. En este estudio se han usado 26 variables ambientales (Tab. 1) a una resolución espacial de 30 arc sec (~1 km). Del total de variables, 19 son variables bioclimáticas derivadas de las temperaturas y precipitaciones mensuales obtenidas interpolando los datos de las observaciones de las estaciones meteorológicas. Estas variables tienen gran sentido biológico como factores limitantes a la hora de explicar la distribución de los organismos, ya que no sólo muestran tendencias mensuales, sino que también incluyen tendencias trimestrales importantes para la vegetación.

Las variables bioclimáticas para el presente (periodo 1981-2010) se derivaron de la base de datos de temperatura y precipitación observados de la red de estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET). Estos datos fueron interpolados a una cuadrícula con una resolución de 1 km para la España continental siguiendo la metodología de interpolación de Thin Plate Splines (Hutchinson, 1991) y utilizando la altitud como covariable tanto para la temperatura como para la precipitación por la Fundación para la Investigación del Clima (FIC).

Además de las variables bioclimáticas, se han incluido variables topográficas como la orientación, pendiente, índices de humedad de suelo y la radiación solar para recoger el efecto exposición solana-umbría y otros efectos locales en los modelos.

Las variables topográficas (diversidad topográfica, posición topográfica, pendiente, orientación e índice de humedad) para la Península Ibérica se obtuvieron a partir del modelo de elevación de la Misión Topográfica de Radar Shuttle (USGS, 2004). Estas variables se incluyeron para caracterizar la complejidad topográfica del área siguiendo a Benito et al., (2011 y 2016).

Código	Descripción
BIO 01	Temperatura media anual
BIO 02	Rango diurno de temperaturas (media mensual (max temp - min temp))
BIO 03	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 04	Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar*100)
BIO 05	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 06	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 07	Rango de temperatura anual (BIO05-BIO06)
BIO 08	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO 09	Temperatura media del trimestre más seco
BIO 10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO 12	Precipitación anual
BIO 13	Precipitación del mes más húmedo
BIO 14	Precipitación del mes más seco
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)

BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío
Pendiente	Pendiente
Orientación	Orientación
pH	pH calculado siguiendo la fórmula propuesta por Hengl et al. (2017).
Solar_rad	Radiación solar
Wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_position	Índice de posición topográfica
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 1: Variables ambientales usadas en el estudio.

Para simular las condiciones climáticas futuras se utilizaron los valores medios de 10 modelos climáticos de circulación general (CMIP6), para las proyecciones del 6º Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC6, 2022) para tres periodos temporales 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 y tres trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways-SSPs) (126, 370 y 585) para cinco modelos de circulación general (GCM) (Tab. 2, Fig. 3).

Las trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways-SSPs) (126, 370 y 585) para cinco modelos de circulación general (GCM) (Tab. 2, Fig. 3).

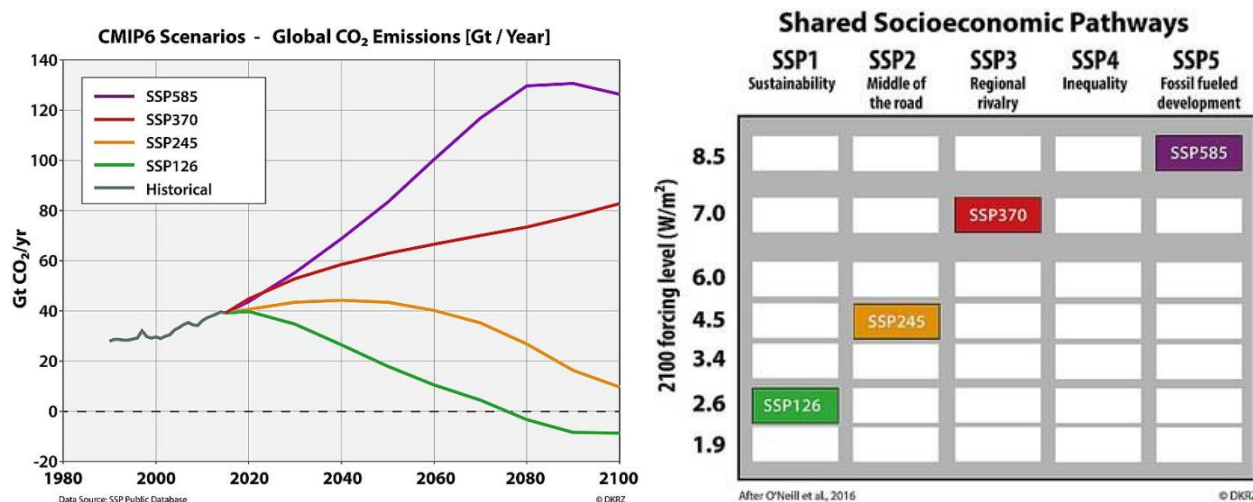


Figura 3: Izquierda: Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs) del 6º informe del IPCC y su correspondencia con las trayectorias de concentración representativas (RCPs) del 5º del IPCC. Derecha: Emisiones de CO₂ anuales según la trayectoria socioeconómica compartida (SSPs). Fuente: <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>.

Se obtuvieron los datos de las variables ambientales para los 10 modelos de circulación general y se generaron los valores medios de los 10 modelos climáticos para la Península Ibérica a 1km (Tab. 2).

Modelo	Institución	País	Resolución nativa
ACCESS-CM2	Australian community climate and earth system simulator	Australia	1.875°×1.25
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration	China	2.7905°x 2.8125°
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and	Canada	2.8°x 1°



	Analysis (CCCma)		
CMCC-ESM2	Euro-Mediterranean Centre on Climate Change (CMCC) Foundation		0.9°x 1.25°
CNRM-ESM2-1	National Center for Meteorological Research	Francia	1°
EC-EARTH3	European consortium of national meteorological services and research institutes		0.25°
MPI-ESM1-2-HR	Met Office Hadley Centre, Fitzroy Road, Exeter, Devon, EX1 3PB	Reino Unido	384x192
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Tsukuba, Ibaraki 305-0052	Japón	320x160
NorESM2-MM	Norwegian Climate Centre (NCC)	Noruega	2.5°x 1.9°
UKESM1-0-LL	Met Office Hadley Centre, Fitzroy Road, Exeter, Devon, EX1 3PB	Reino Unido	192x144

Tabla 2: Modelos climáticos usados para simular las condiciones de clima futuro del CMIP6.

2.2.2 SELECCIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES

Previamente a la realización de los modelos se analiza la correlación existente entre las variables para evitar incluir variables correlacionadas en el mismo modelo, lo que aportaría información redundante y afectaría negativamente a la capacidad predictiva del modelo. La reducción de variables se puede realizar mediante un análisis de correlación de las variables ambientales en los puntos de presencia de la especie en el área de estudio, calculando el coeficiente de correlación de Pearson. Las variables se comparan para descartar las variables con menor sentido biológico y con mayor correlación con el resto de variables cuando el coeficiente de correlación es superior a cierto valor. Asimismo, se puede realizar un análisis de factor de inflación de varianza (Variance Inflation Factor, VIF) que mide la correlación de cada variable con una combinación del resto de variables del modelo. Con este análisis se eliminan las variables correlacionadas y que puedan presentar problemas de multicolinealidad.

Finalmente, las variables para generar los modelos de cada especie se seleccionaron teniendo en cuenta la ecología de la especie (criterio de experto) y mediante un análisis de correlación para eliminar variables correlacionadas (correlación de Pearson <0.75), y de factor de inflación de varianza (VIF <6).

2.3 GENERACIÓN DE LOS MODELOS

En este estudio se han generado los modelos utilizando el algoritmo Maxent (Phillips et al., 2006; Phillips et al., 2008). Maxent está considerada como una técnica discriminante (necesita presencias y ausencias), que sin embargo permite generar modelos solo con datos de presencia ya que es capaz de generar sus propias "ausencias" denominadas background (Phillips et al., 2006; Phillips et al., 2008). Esta técnica se utiliza frecuentemente en estudios que proyectan las distribuciones actuales de las especies hacia diferentes periodos temporales (Elith et al., 2011) y se ha elegido principalmente por estos motivos: 1) muestra buenos resultados en las comparaciones con otros métodos de modelización ecológica (Elith et al., 2006); 2) no necesita datos de ausencia (Phillips et al., 2006); 3) permite la interpretación biológica de los resultados y ver la importancia de cada variable ambiental en la distribución de la especie; 4). Maxent es uno de los algoritmos más usados en modelización de distribución de especies). Los modelos se han generado con el paquete de R "dismo" (Hijmans et al., 2015).

Para construir los modelos es necesario disponer de presencias y ausencias observadas que informen sobre la distribución actual de la especie. En este estudio se dispone de presencias de la especie derivadas de un inventario sistemático de campo (IFN3), lo que constituyen observaciones fiables para realizar los modelos. A

pesar de que también se dispone de las ausencias del inventario forestal, se ha preferido usar las “ausencias” generadas por el propio algoritmo de modelización Maxent para evitar posibles sesgos en la caracterización ambiental de la especie. Maxent permite generar modelos solo con datos de presencia ya que es capaz de generar sus propias “ausencias” denominadas background (Phillips et al., 2006). Los datos de background son puntos generados al azar dentro del área de estudio que permiten caracterizar el espacio ambiental donde la especie se desarrolla (Phillips et al., 2008).

Para generar los modelos individuales se realizará una partición de los datos de presencias y ausencias (o datos de background) de la especie en dos grupos de datos (Fig. 4), datos de calibración y datos de evaluación, lo que requiere tener un número suficiente de presencias de la especie. El set de datos de calibración se usará para calibrar, construir o entrenar el modelo y el set de datos de evaluación se usará para evaluar el modelo, es decir, para comprobar la capacidad de predicción del modelo en datos diferentes a los usados para construir el modelo.

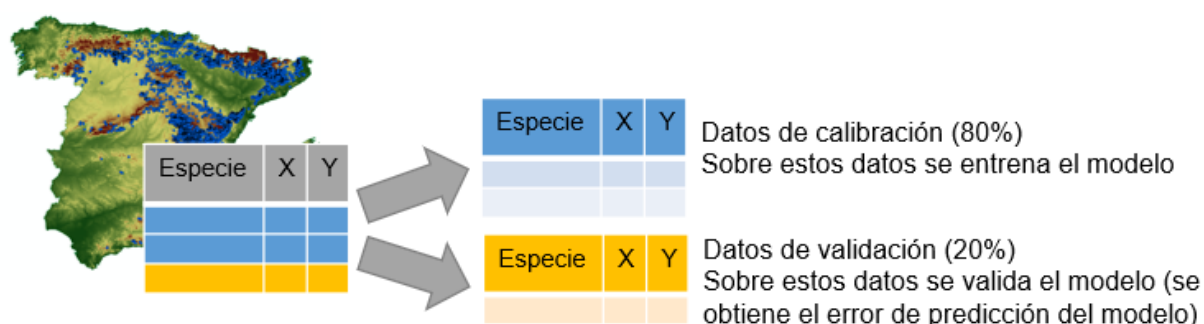


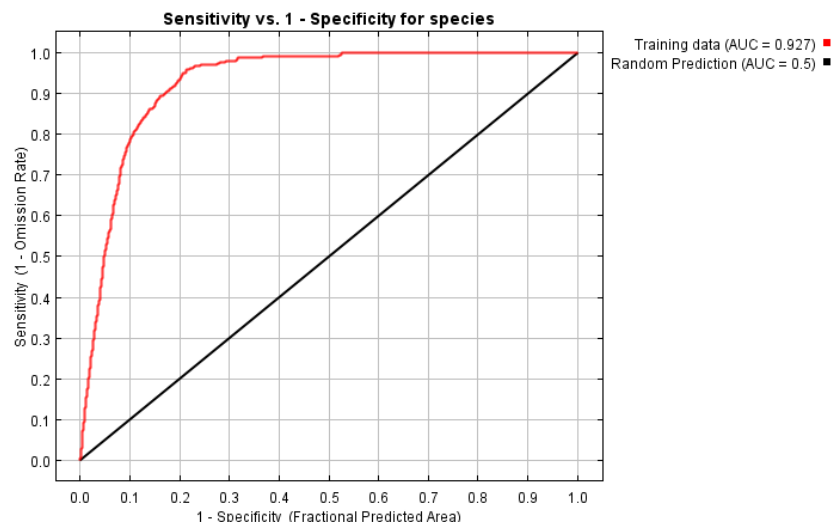
Figura 4: División de los datos para la calibración y evaluación de los modelos de distribución de especies.

Posteriormente, los modelos individuales son evaluados estadísticamente (con el set de datos de validación) para ver la capacidad predictiva del modelo; es decir, es necesario evaluar su capacidad de clasificar correctamente las presencias y ausencias reales de la especie. En este trabajo se ha realizado una validación cruzada (cross-validation) dividiendo al azar los datos en datos de calibración (80%) y el 20% restante para validación (Fig. 4).

Una vez se tiene el set de datos de evaluación del modelo (datos de test o validación), se contrasta las presencias/ausencias reales con la predicción del modelo en esos puntos y se evalúa el error que comete el modelo mediante la proporción de casos clasificados de forma incorrecta. Los errores pueden ser de dos tipos: 1) error de comisión o falsos positivos que consiste en predecir como presencia una ausencia real y 2) error de omisión o falsos negativos que ocurren al predecir como ausencia una presencia real. Los falsos negativos pueden resultar de datos erróneos o inexactitudes del modelo y los falsos positivos pueden resultar de factores bióticos o abióticos que impiden a la especie ocupar el hábitat idóneo, como son las limitaciones de dispersión o las barreras históricas (Miller, 2010).

El AUC (área bajo la curva ROC - Característica Operativa del Receptor) es el estadístico de validación de MDE más usado en la actualidad. La curva ROC es la representación gráfica de la capacidad discriminativa de un modelo, es decir, la capacidad del modelo de distinguir entre presencias y ausencias (Fielding y Bell, 1997). El eje de ordenadas representa la sensibilidad (sensitivity) que es la proporción de presencias observadas correctamente predichas y el de abscisas representa el error de comisión o falsos positivos, puntos predichos para la especie (presencia predicha) que no están ocupados (ausencia real).

Figura 5: Ejemplo de gráfica del estadístico AUC (Área bajo la curva ROC) para el modelo de una especie. La curva roja representa el ajuste del modelo a los datos. La línea negra representa la línea esperada si el modelo no fuese mejor que por azar. La sensibilidad (sensitivity) es la proporción de presencias observadas correctamente predichas y la especificidad (specificity) es la proporción de ausencias observadas correctamente predichas.



La curva ROC es independiente del umbral al calcular la sensibilidad y el error de comisión

para todos los umbrales (Fig. 5). Esto permite comparar la capacidad predictiva de los algoritmos ya que estos generan predicciones continuas. En la curva ROC (Fig. 5), si la curva roja cae por debajo de la línea negra, indica que el modelo es peor que si se hubiese hecho al azar. En cambio, cuanto más se aproxime la línea roja a la esquina superior izquierda, el modelo tiene mejor capacidad de predicción.

El área bajo la curva ROC corresponde a la probabilidad de que, al tomar al azar un par de casos, uno de presencia y otro de ausencia real, el modelo asigne un valor de idoneidad mayor a la presencia que a la ausencia. El valor de AUC varía entre 0 y 1, siendo 1 el valor que indica que todos los casos se han clasificado correctamente y 0.5 el valor que muestra que el modelo no clasifica los casos de forma distinta a una clasificación al azar.

2.4 PROYECCIÓN DEL MODELO BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS

El modelo estadístico generado con Maxent se proyectó a los siguientes periodos temporales (Tab. 3):

Escenarios climáticos	Periodos temporales
Periodo de referencia	1981-2010
ssp126	2011-2040, 2041-2070, 2071-2100
ssp370	2011-2040, 2041-2070, 2071-2100
ssp585	2011-2040, 2041-2070, 2071-2100

Tabla 3: Escenarios climáticos simulados para los diferentes periodos temporales por los modelos de circulación general (GCMs) considerados en este estudio.

Como se ha comentado anteriormente, en lugar de elegir un modelo climático de circulación general (GCM) para todos los SSPs y periodos temporales, el modelo de idoneidad del periodo de referencia generado para cada especie se proyectó a los escenarios futuros usando la media de los 10 modelos climáticos para generar proyecciones de mayor robustez.

Al proyectar los modelos bajo condiciones climáticas diferentes hay que revisar los resultados ya que pueden aparecer combinaciones climáticas (non-analogue climates) diferentes a las existentes en el clima presente con el que se ha calibrado el modelo. En ese caso el modelo no tendría información del comportamiento de la especie en ese nuevo clima, realizando extrapolaciones fuera de los límites de calibración de las variables predictoras (Elith et al., 2010).

2.5 LIMITACIÓN DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES

Los modelos de distribución de especies (MDE) han sido ampliamente utilizados para predecir la distribución espacial de las especies y su nicho ecológico, así como las respuestas a cambios ambientales en campos como la gestión de territorios y la conservación de especies, entre otros.

En el sector forestal, estos modelos se han usado para valorar si un territorio es idóneo para albergar una especie, en estudios de plantaciones o repoblaciones forestales (Gastón et al., 2014; Booth, 2018) y para establecer medidas de gestión adaptativa mediante el estudio de los cambios que sufrirá la distribución espacial de una especie al proyectar los modelos bajo las condiciones climáticas futuras (Janowiak et al., 2017; Pecci et al., 2019).

Sin embargo, estos modelos como cualquier modelo estadístico tienen limitaciones que pueden afectar a la interpretación de los resultados. Las principales limitaciones tienen que ver con las asunciones o principios de partida a la hora de plantear un proceso de modelización, fundamentales para poder interpretar correctamente los modelos y determinar el grado de confianza de sus predicciones. Entre las asunciones de los modelos están, entre otras; que las especies están en equilibrio con las condiciones ambientales, que no se incluyen los fenómenos de interacción entre especies, como competencia o facilitación u otras relaciones bióticas, o la no inclusión de la variabilidad intraespecífica y la plasticidad fenotípica de las diferentes poblaciones de la especie (Benito-Garzón et al., 2011).

Asimismo, los diferentes puntos del proceso modelizador introducen cierta variabilidad en los resultados. Por ello, es fundamental hacer frente a la incertidumbre detrás de los diferentes pasos durante el proceso de modelización, desde la entrada de los datos a la obtención de resultados (Araújo et al., 2022; Arenas-Castro et al., 2022). Cómo trabajar y, especialmente, cómo comunicar esta incertidumbre es un aspecto fundamental si queremos que el resultado de los modelos pueda ser interpretado correctamente y aplicado por los gestores o utilizadores finales.

Por ejemplo, la elección del umbral de corte para transformar la predicción continua de idoneidad de la especie en un modelo binario de valor tipo presencia/ausencia es una decisión importante que influye en el resultado del modelo (Nenzén y Araújo, 2011; Vale et al., 2014.). Este umbral es el valor de idoneidad a partir del cual se considera que la especie está presente y posibilitan el cálculo de áreas y el estudio de los cambios en las distribuciones de las especies. No hay unanimidad en su elección³ y en algunos casos no se recomienda su uso por la variabilidad en los resultados en los mapas binarios de idoneidad potencial futura predicha para la especie. No obstante, el uso de umbrales es imprescindible para obtener una predicción binaria tipo presencia/ausencia (1-0) que nos permita calcular superficies e índices de supervivencia o sensibilidad de la especie frente al cambio climático.

Para reducir el efecto de la selección del umbral en los modelos se recomienda contrastar visualmente la información proporcionada por los mapas potenciales futuros de cambio con los mapas continuos de distribución potencial futura para cada especie.

Una consideración importante a la hora de interpretar las salidas de los modelos es que estos están basados en datos geoespaciales y temporales específicos, si estos datos de presencias o de clima cambiasen, las predicciones podrían verse afectadas. Igualmente, estos datos y los algoritmos de modelización están sujetos a unos errores e incertidumbres que pueden afectar a la precisión de las predicciones. Por tanto, es importante interpretar con cautela los resultados presentados en el presente módulo de modelización. Por otra parte, los modelos están prediciendo el hábitat potencial de la especie para distintos periodos temporales considerados, no dónde se encontrará en el futuro la especie, ya que esto depende de otros factores como la disponibilidad de suelo adecuado, del tipo de sustrato (ph), la dispersión de la especie o la competencia con otras especies, entre otros.

Si bien los resultados de los modelos proporcionan información muy valiosa respecto a la idoneidad de una especie en un territorio para un periodo temporal o escenario de emisiones concreto, permitiendo valorar

tendencias a largo plazo en la evolución de la idoneidad de la especie en un determinado territorio, es necesario tener presente que los modelos llevan asociada cierta incertidumbre.

3. RESULTADOS

3.1 EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LAS PRINCIPALES ESPECIES FORESTALES SORIANAS AL CAMBIO CLIMÁTICO

En el estudio de la vulnerabilidad de las especies al cambio climático se utilizan diferentes indicadores derivados de los cambios en las superficies potenciales de los modelos de distribución de especies. En algunos casos, se usa el porcentaje de pérdida de superficie potencial de una especie (p.e. Settele et al., 2008) mientras que otros autores (Felicísimo et al., 2011) han utilizado el grado de solapamiento entre el área actual y el área potencial de una especie, penalizando el cambio espacial incluso cuando aumenta el área potencial futura. Sin embargo, no hay un consenso en la elección de un indicador para el estudio de la sensibilidad futura de una especie (Felicísimo et al., 2011, Settele et al., 2008 y UICN, 2012).

En el caso de las especies del proyecto LIFE Soria ForestAdapt se han utilizado las dos aproximaciones para evaluar su sensibilidad al cambio climático; por un lado, se ha estudiado cualitativamente mediante la evaluación visual del cambio de idoneidad de las especies seleccionadas y, por otro lado, cuantitativamente estudiando el porcentaje de pérdida de superficie potencial para cada especie. Al ser la provincia de Soria la escala del estudio, se han hecho análisis con alto grado de detalle de la evolución de la distribución de la especie bajo los diferentes escenarios climáticos, valorando visualmente los posibles desplazamientos del área potencial futura respecto a la distribución actual de la especie. Además, se combinan todos los mapas potenciales de las 9 especies del estudio para determinar los lugares de la provincia con mayor pérdida potencial de especies, proporcionando información sobre qué especies serán potenciales en el futuro para ayudar en la toma de decisiones en futuras repoblaciones (Gray et al., 2011; MacKenzie et al., 2021) o migraciones asistidas en el caso de especies muy vulnerables al cambio climático con problemas de dispersión (Hällfors et al., 2016; 2017). Es importante indicar que no se han considerado las características del suelo, como por ejemplo el pH o la profundidad, dentro de los modelos por lo que las decisiones de plantación deben considerar este aspecto que puede variar a escalas reducidas.

Los resultados de este estudio muestran que, en la provincia de Soria, a grandes rasgos, las especies que más sufrirán los impactos derivados del cambio climático serán las especies eurosiberianas seguidas de las especies submediterráneas. Por otro lado, las especies mediterráneas serán las que menos sufrirán los efectos del cambio climático, estas tendencias también han sido observadas en otros trabajos en la misma región (Ruiz-Labourdette et al., 2012).

Las especies con más potencialidad en el periodo de referencia (1981-2010) son *Quercus faginea*, *Juniperus thurifera*, y *Pinus nigra*, con una superficie idónea potencial de 87.1%, 82.1 y 74.1%, respectivamente. Las especies con menos superficie potencial en este periodo son *Fagus sylvatica* y *Pinus halepensis*, con una superficie potencial de 15.2% y 7.3%, respectivamente.

Pese a ser la especie con menor potencialidad en el periodo de referencia, la especie mediterránea *Pinus halepensis* es la especie que sufrirá los mayores aumentos en cuanto a su distribución potencialmente idónea, con aumentos de superficie para todos los escenarios climáticos respecto a la superficie potencial del periodo de referencia. A corto plazo, las predicciones indicarían aumentos de superficie potencial hasta alcanzar entre el 35-40% de la superficie de la provincia y hasta el 46% a medio y largo plazo.

El cambio predicho en otras especies mediterráneas del estudio como *Pinus pinaster* y *Quercus ilex* incluye tanto aumento como disminución de la superficie potencial, según el escenario de emisiones considerado. Estas dos especies presentan una elevada distribución potencial en el periodo de referencia (66.4% *Q. ilex* y 61.3% *P. pinaster*) y las predicciones serían de aumento de la superficie para las dos especies a corto plazo,

con aumentos de hasta el 86% para la encina y el 75% para el pino negral, a medio plazo pérdidas para el pino y ganancia para la encina y a largo plazo pérdida de superficie para las dos especies hasta ocupar el 29% de la superficie para la encina y 31% para el pino.

La especie del estudio con mayor superficie potencialmente idónea en el periodo de referencia en la provincia es *Quercus faginea*, con un 87.1% seguida de *Juniperus thurifera* con un 82.1%. No obstante, el aumento de temperaturas y aumento de aridez supondrán que, para estas especies, el rango de distribución futuro varíe desde un aumento del 11% de la superficie hasta una disminución del 7% de la superficie potencial futura, según el escenario para el quejigo y de una disminución de hasta el 82% en el caso de la sabina.

Las especies submediterráneas, como *Quercus pyrenaica* y *Pinus nigra* sufrirían importantes reducciones en sus rangos de distribución en los diferentes escenarios, con pérdidas de superficie de entre 60-100% para *Q. pyrenaica* y hasta el 98% para *P. nigra*.

Para las especies eurosiberianas *Fagus sylvatica* y *Pinus sylvestris* cuyas condiciones óptimas son frías y húmedas, se pronostican disminuciones muy importantes en su rango de distribución, con valores que oscilan entre el 95-100% para el haya y el 51-99% para el pino silvestre, en función del escenario. Se prevé que estas especies eurosiberianas experimenten el mayor desplazamiento altitudinal de todas las especies del estudio, elevando el límite altitudinal del bosque y con gran reducción de su área de distribución, viéndose reemplazadas por especies esclerófilas submediterráneas, como se ha visto en otros estudios (Ruiz-Labourdette et al., 2012).

A largo plazo, las especies mediterráneas *Pinus halepensis* y *Quercus faginea* son las especies del estudio que menos sufrirán las consecuencias del cambio climático ya que, aunque en el caso del quejigo, su superficie potencialmente habitable se verá reducida, esta especie presentará las menores reducciones de superficie. Según las predicciones las especies con mayor superficie potencial serían; *Quercus faginea*, *Pinus pinaster*, *Quercus ilex*, *Pinus halepensis* y *Juniperus thurifera*, pudiendo ocupar el 81%, 31%, 29%, 13% y 12% de la superficie de la provincia en el periodo 2070-2100 en la trayectoria SSP585, aquella con más emisiones de CO₂ y, por tanto, asociada con los mayores aumentos de temperatura.

A continuación, se presentan los resultados del presente estudio por especie:

3.2 PINO ALBAR: *PINUS SYLVESTRIS* L.

3.2.1 RESUMEN EJECUTIVO

El pino silvestre va a sufrir especialmente los efectos del cambio climático. La ausencia de altitudes más elevadas para colonizar va a conducir a una progresiva reducción de su área potencial, sin existir ganancias que lo compensen.

Más de la mitad de la superficie de la provincia de Soria tiene una idoneidad potencial alta para el pino albar en el periodo de referencia (1981-2010). Estas zonas engloban el norte de la provincia alrededor de las zonas que ocupa actualmente; Tierra de Pinares, Tierras Altas y Moncayo.

Los modelos de idoneidad futuros reflejan una reducción notable para la especie idoneidad predicha para el pino albar en todas las trayectorias SSP, con una pérdida superior al 50% en el periodo 2011-2040 para todas las trayectorias SSP. Estas predicciones empeoran según avanza el periodo temporal, oscilando entre unas pérdidas a finales de siglo del 66% para la trayectoria más optimista y el 99% para la más pesimista.

Todos los modelos muestran un mismo patrón con una pérdida progresiva de las zonas más bajas, difiriendo únicamente en la velocidad. Por otra parte, todos coinciden en la ausencia de ganancias en el área potencial, debido a la imposibilidad de encontrar zonas más elevadas para colonizar. Al no existir zonas por colonizar todos los pinares que se mantendrán en el futuro estarán en zonas donde pueden estar en la actualidad.

3.2.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

El pino silvestre es una de las especies más importantes desde el punto de vista comercial, particularmente en los países nórdicos (Houston et al., 2016) y una de las especies, junto con *P. pinaster*, que más volumen de madera produce en la provincia de Soria.

Su rango de distribución abarca desde el este de Siberia hasta la Península Ibérica, siendo el pino de mayor distribución mundial (Fig. 3.2.1). Latitudinalmente se distribuye desde el norte de Escandinavia (70°N) hasta Sierra Nevada en el sur de la Península Ibérica (37°N) (Houston et al., 2016). Su rango altitudinal varía desde el nivel del mar en la parte norte de su distribución hasta los 2.600 m.s.n.m (Houston et al., 2016). En España llega hasta 2.000 m.s.n.m. en el Sistema Central y se encuentra en todo tipo de sustratos, ácidos, calizos, arenas e incluso yesíferos aunque presenta los mayores desarrollos sobre suelos ácidos (Blanco et al., 1997).

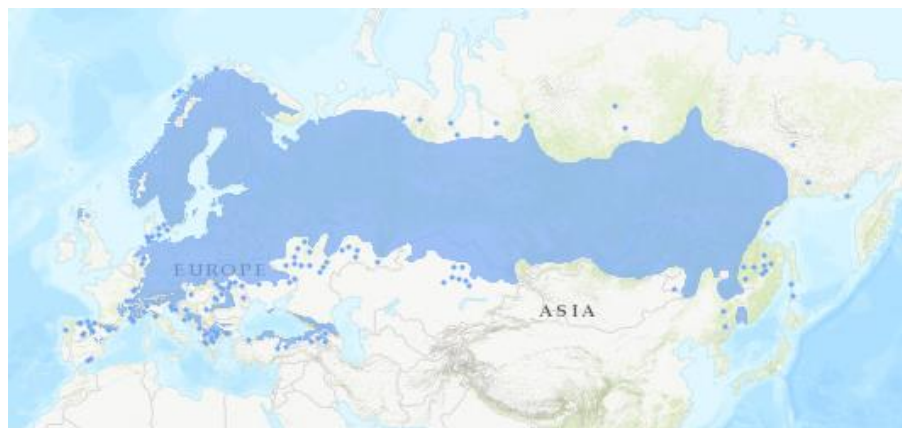


Figura 3.2.1. Izquierda: Distribución natural de *Pinus sylvestris*. Fuente: EUFORGEN. <https://www.euforgen.org/>. Derecha: Ejemplares de *P. sylvestris* en las cercanías de Urbión.

La Península Ibérica supone el límite suroccidental de la especie (Fig.3.2.2), con tres grandes núcleos de población: las montañas pirenaicas y prepirenaicas, el Sistema Ibérico y el Sistema Central. Además, aparece en enclaves aislados de gran interés biogeográfico, como el pinar de Lillo (León) y el de Velilla de Río Carrión (Palencia), únicos enclaves naturales de la especie en la Cordillera Cantábrica, o los de la Sierra de Baza y el

pico Trevenque (Granada), donde encuentra su límite meridional (Blanco et al., 1997). Su superficie en España se ha expandido por su frecuente uso en repoblaciones forestales, incluso fuera de su área de distribución natural en zonas de media montaña de la mayor parte de los sistemas montañosos (Alía et al., 2009a).

Es una especie con gran amplitud ecológica, de requerimientos frescos, capaz de soportar períodos de heladas seguras entre uno y seis meses, tolerando un periodo relativamente corto de sequía (Alía et al., 2009a). Habita en zonas con temperaturas medias anuales entre 7-11.8°C, con temperaturas medias máximas de verano por debajo de los 20° (en el norte de la Península Ibérica), presentando gran resistencia a la continentalidad (con oscilaciones térmicas muy acusadas, de hasta 50°C a lo largo del año en algunas de sus poblaciones). Su rango de precipitaciones se sitúa mayoritariamente entre 700-1300 mm anuales, necesitando 200 mm en verano. En las poblaciones más meridionales, situadas en la España mediterránea, sus poblaciones presentan un periodo de sequía más acusado y menor precipitación, 30-50mm e incluso 10mm en el mes más seco, refugiándose en vertientes umbrosas con suelos frescos y húmedos (Blanco et al., 1997).

En cotas elevadas el pino albar contacta con otras especies como *Pinus uncinata*, *Abies alba*, *Juniperus communis*, *Juniperus sabina* y *Fagus sylvatica*, esta última desplaza al pino albar salvo en zonas de suelos esqueléticos. En cotas inferiores, *P. sylvestris* contacta con *Quercus faginea*, *Quercus humilis*, *Quercus ilex* o *Quercus pyrenaica* y con otras especies de pino como *Pinus nigra*, *Pinus pinaster* e incluso *Pinus halepensis* (Blanco et al., 1997; do Amaral Franco, 1986a).

En Soria el pino silvestre aparece en las partes altas del norte de la provincia. En las zonas más elevadas contacta con la población de *Pinus uncinata* del Castillo de Vinuesa, gran parte de su rango se haya en zonas potenciales para el hayedo, mientras que en altitudes más bajas coincide con *Quercus pyrenaica* y *Pinus pinaster*. En las zonas centrales y bajas del valle del Duero su presencia se reduce al aumentar la sequía estival, aunque en zonas de umbría se encuentran pequeños núcleos procedentes de repoblación (Segura et al., 2000), así como una población natural en el Pinar de Losana al norte de la Sierra de Pela, en lo que sería una prolongación de los pinares del Sistema Central. En la provincia de Soria se encuentra la región de procedencia montaña Soriano-Burgalesa que recoge los pinares de las Sierras de Urbión y Cebollera, cuyas masas monoespecíficas son de gran calidad, a pesar de estar asentadas sobre suelos silíceos de escaso desarrollo (Alía et al., 2009a).

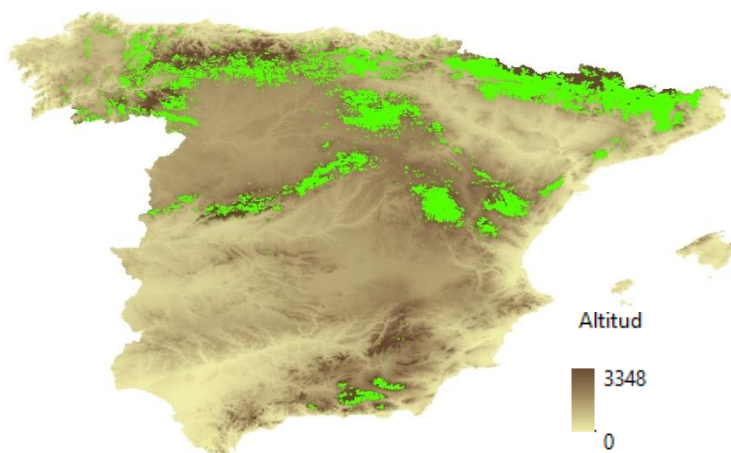


Figura 3.2.2: Distribución de *Pinus sylvestris* en España.
Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

3.2.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Pinus sylvestris* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.2.3).

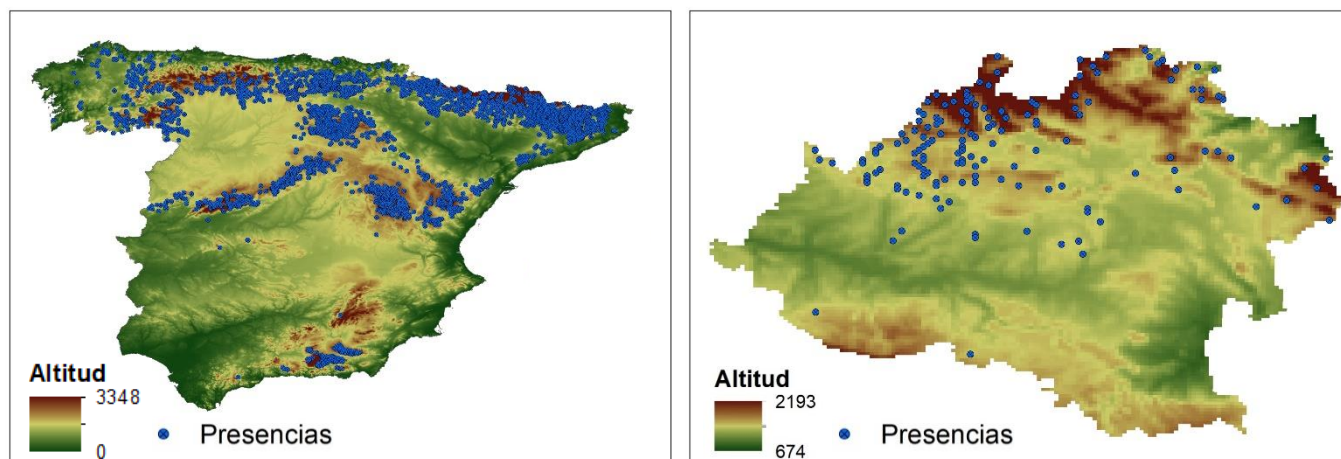
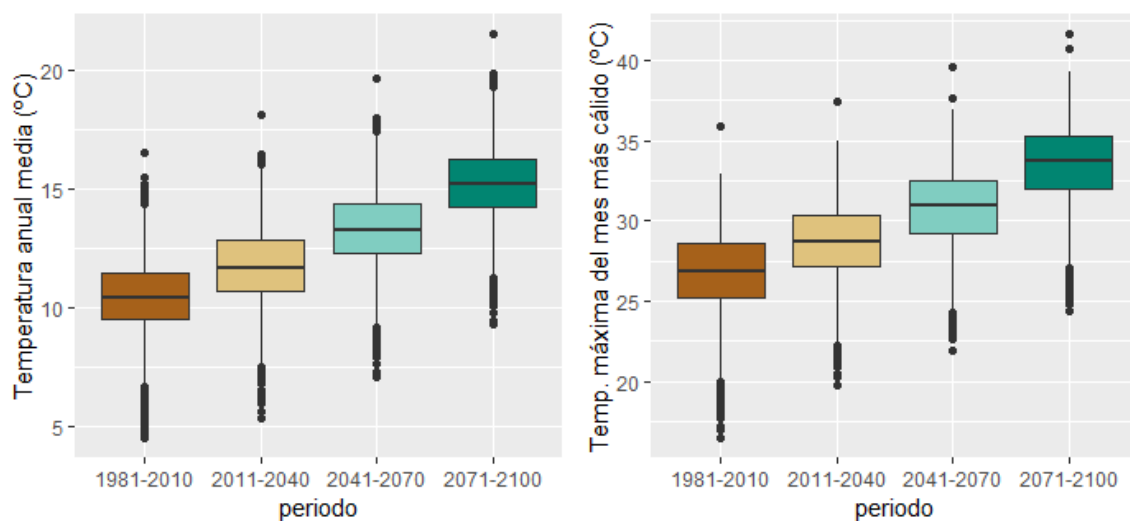


Figura 3.2.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Pinus sylvestris* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

El pino silvestre habita en lugares con temperatura media anual de 9-11°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 25-29°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 600-900(2000) mm anuales con 100-140 (300) mm en verano (Fig. 3.2.4). las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones continúen cercanos a los valores de referencia.



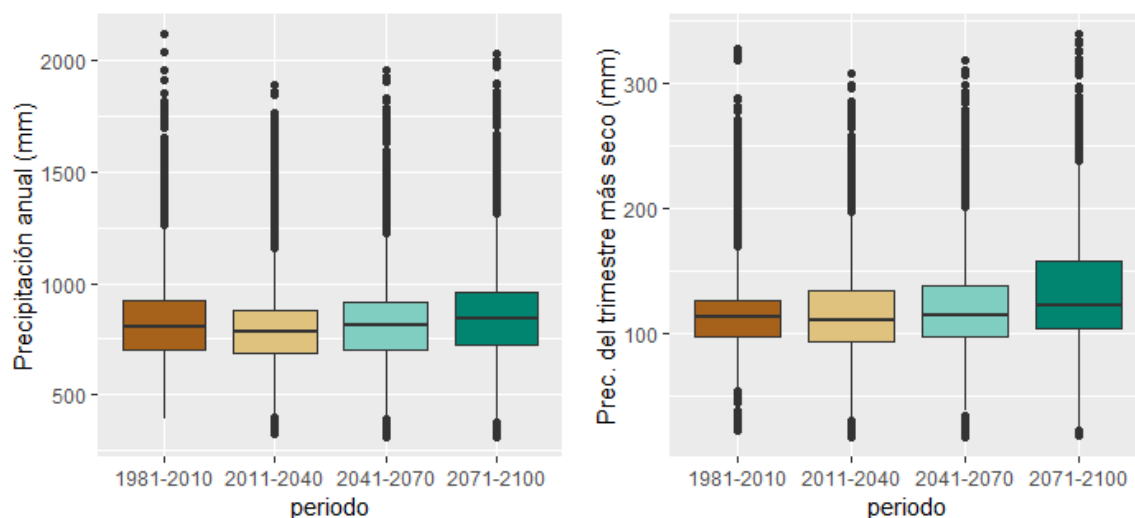


Figura 3.2.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Pinus sylvestris* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.2.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Pinus sylvestris* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza < 5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para el pino albar. Como se observa en la figura 3.2.5, las variables están correlacionadas por grupos.

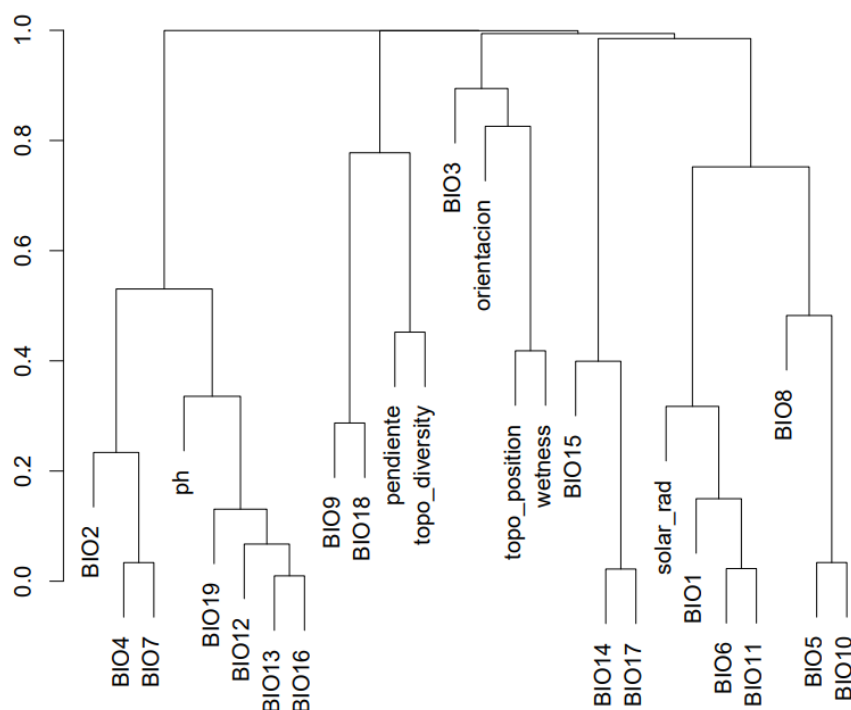


Figura 3.2.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Pinus sylvestris*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Pinus sylvestris* fueron: Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, solar_rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.2.1: Variables usadas en los modelos de *Pinus sylvestris*.

3.2.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Pinus sylvestris* se han dividido las 4611 presencias en 3689 para training (80%) y 922 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.92 lo que indica que el modelo generado tiene capacidad predictiva muy alta.

La variable más importante (Fig. 3.2.6) es Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. Las variables ambientales que hacen que disminuya más la ganancia cuando se omiten son Bio 5 y Bio 6 (Temperatura mínima del mes más frío), las cuales parecen tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

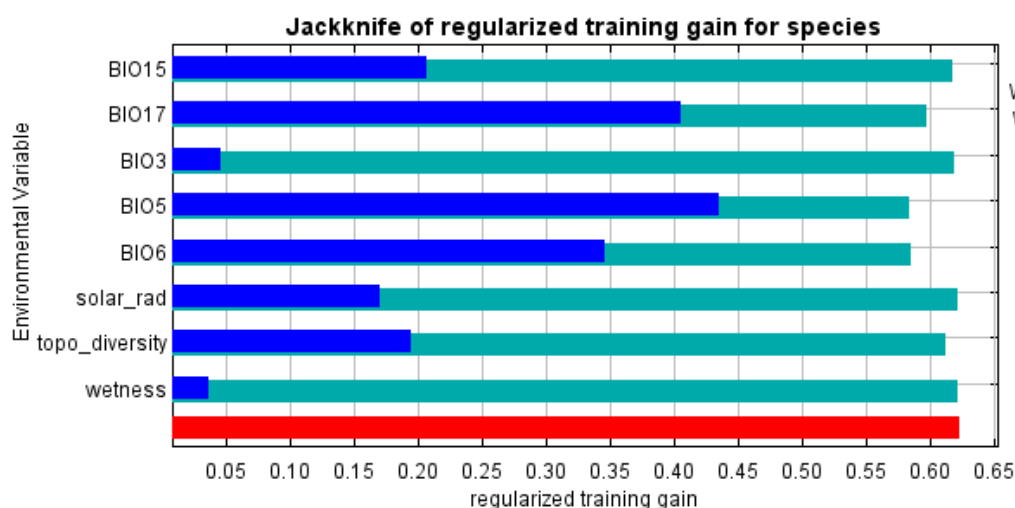


Figura 3.2.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Pinus sylvestris*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

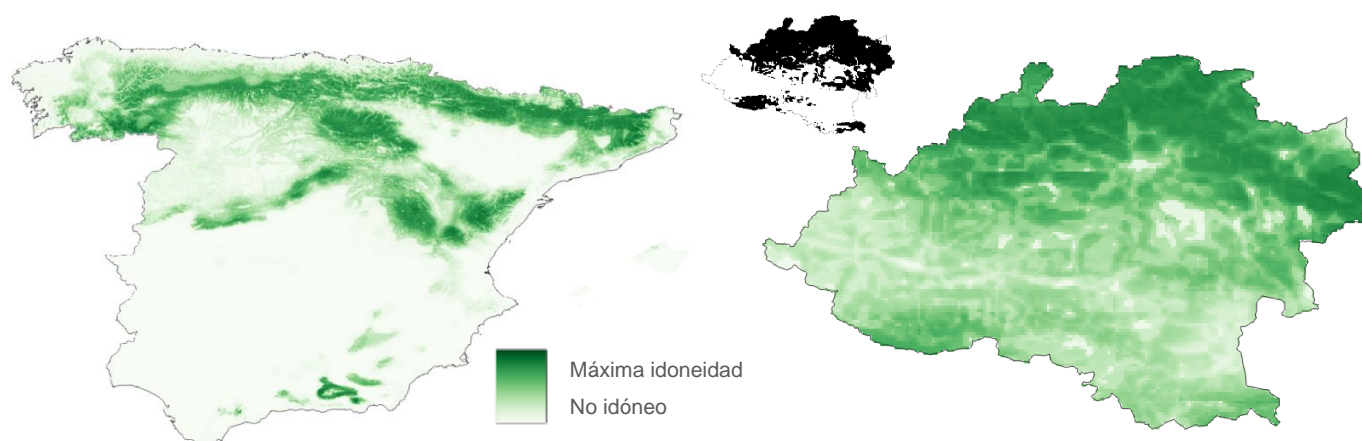


Figura 3.2.7: Distribución potencial de *Pinus sylvestris* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.2.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (Benito-Garzón et al., 2006; 2008; 2011; Felicísimo et al., 2011), con un rango de distribución más amplio que a la distribución actual de la especie, expandiéndose ampliamente por los Sistemas Ibérico y Central, Cordillera Cantábrica, Cordilleras Penibéticas y Pirineos. Se aprecia que las zonas con mayores valores de idoneidad coinciden con las zonas con mayor presencia actual de la especie (Pirineos y Sistemas Ibérico y Central). Asimismo, el modelo predice elevada idoneidad potencial en las Sierras Béticas coincidiendo con Benito-Garzón et al. (2006) a diferencia de los modelos de Felicísimo et al., (2011).

La provincia de Soria tiene una idoneidad potencial alta para este periodo en el norte de la provincia, cerca de las zonas que ocupa actualmente; Tierras Altas, Tierra de Pinares, en la sierra de Urbión y en el Moncayo. Este aumento de superficie idónea también ha sido observado en esta zona por otros autores (Ruiz-Labourdette et al., 2012), y puede responder a la recuperación del territorio que previamente había ocupado en la provincia en tiempos anteriores hasta el inicio del Holoceno (Antón et al., 1994). Asimismo, la inclusión de presencias de repoblaciones de la especie también puede favorecer el aumento de superficie idónea respecto a la ocupada por la especie en la actualidad.

3.2.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

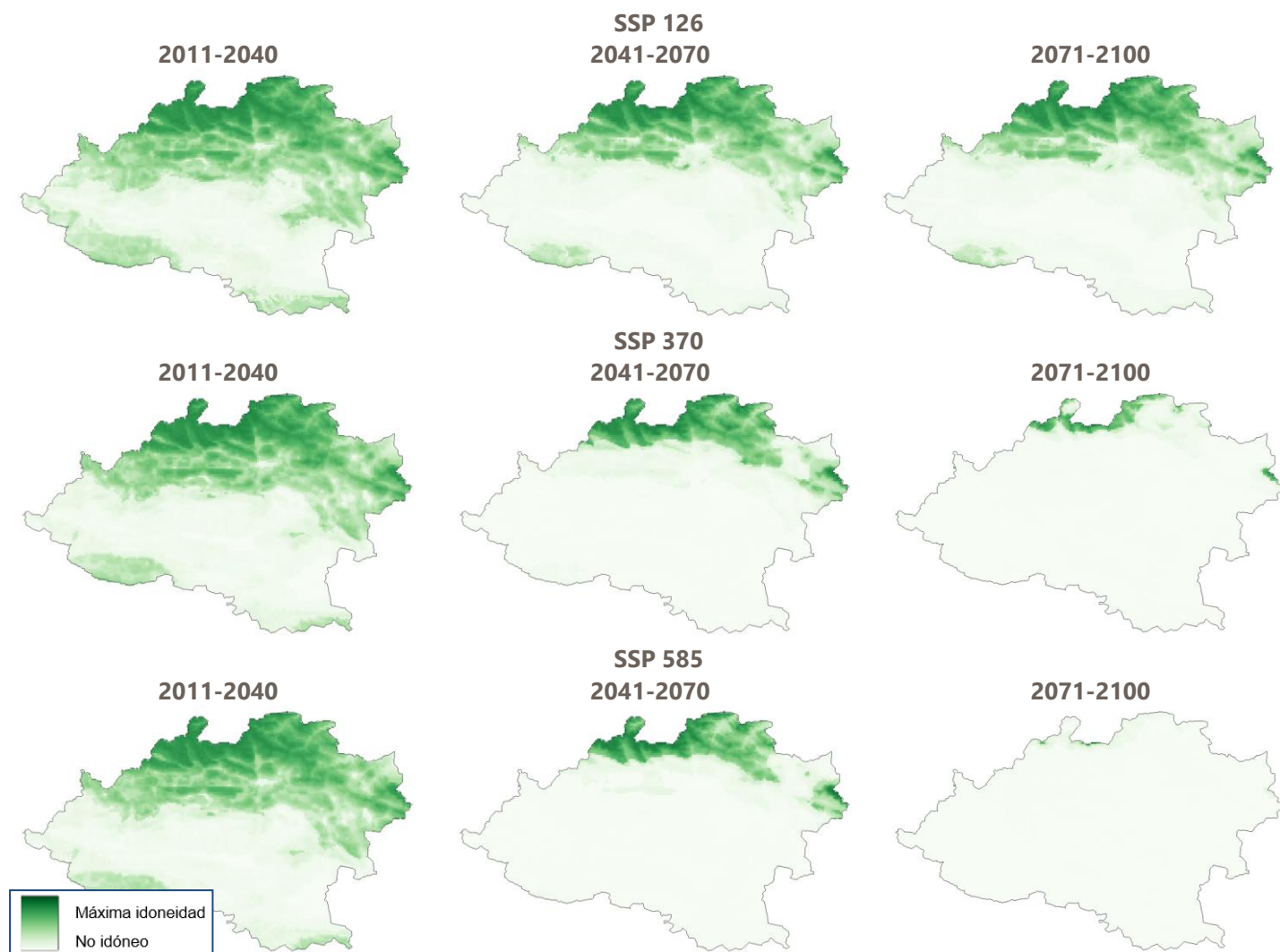


Figura 3.2.8: Distribución potencial de *Pinus sylvestris* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Para la provincia de Soria los valores de idoneidad futura reflejan reducción en la idoneidad predicha para el pino albar en todas las trayectorias SSP, perdiendo alrededor de un 50% de la superficie potencial de la especie en el periodo 2011-2040 para todas las trayectorias SSP. La disminución se incrementa notablemente para los periodos 2041-2070 y 2071-2100, quedando el pino albar relegado a las montañas del norte (Sierras de Urbión, Cebollera y Moncayo), especialmente en las trayectorias SSP370 y desapareciendo en la SSP585, resistiendo con gran superficie potencial en la trayectoria SSP126.

Estos patrones se pueden observar nítidamente en los siguientes modelos de cambio de áreas potencialmente idóneas para *Pinus sylvestris* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros, respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia (Fig. 3.2.9).

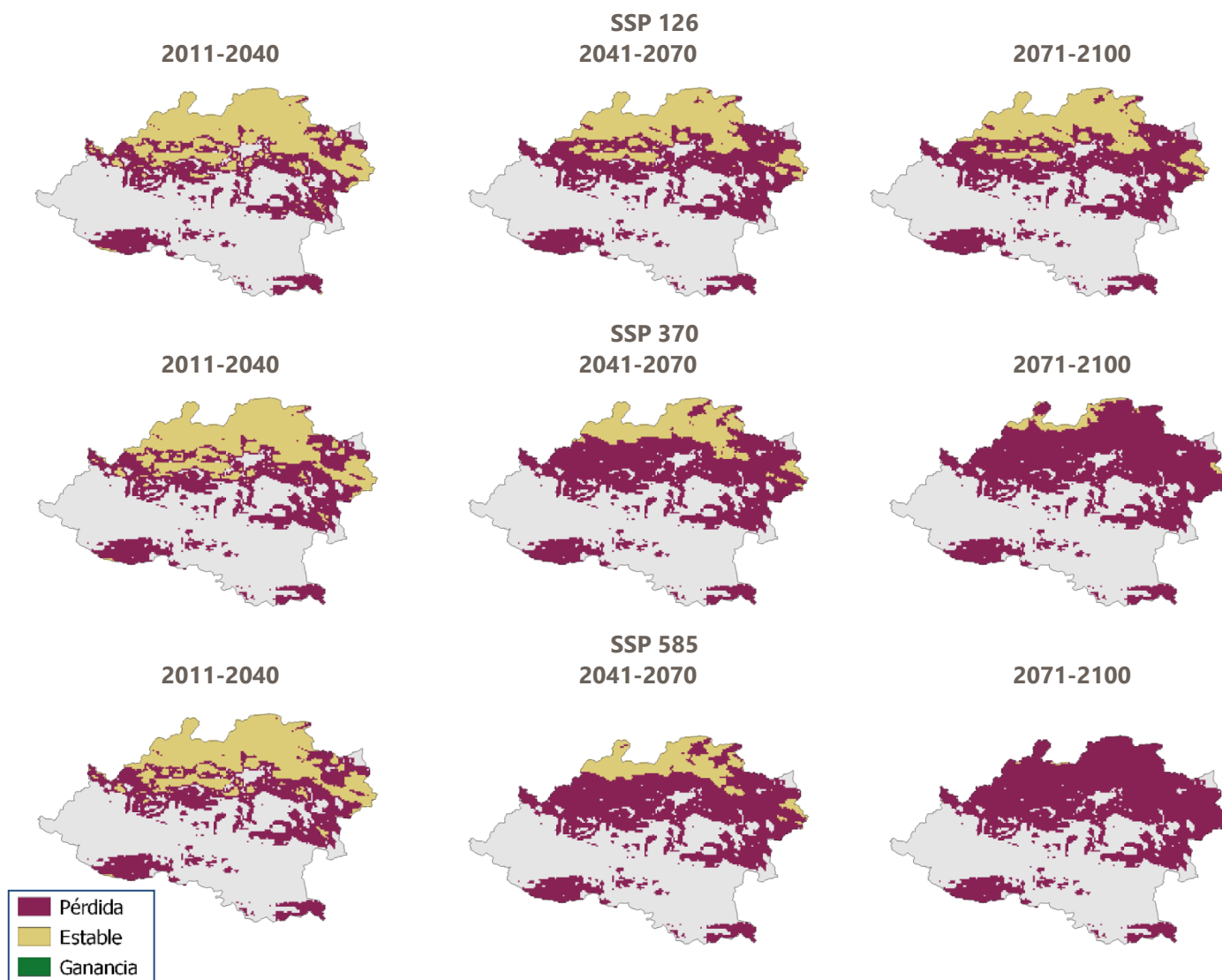


Figura 3.2.9: Mapas de cambio para *Pinus sylvestris*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (granate): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (amarillo): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (verde): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

En las zonas más elevadas de la provincia el pino silvestre mantiene su idoneidad en todas trayectorias SSP para el periodo 2011-2040. Cuanto más alejado es el periodo temporal y menos optimista es la trayectoria SSP, mayor es la pérdida de hábitat para la especie. Es reseñable que la especie no presenta zonas con ganancia de idoneidad en ningún periodo temporal ni trayectoria SSP, sugiriendo que existe poco margen para el ascenso altitudinal. La pérdida de idoneidad afecta a las zonas de menor altitud (y mayor xericidad), en un proceso que en la trayectoria SSP 370 dejaría a la especie relegada a las zonas altas de las Sierras de Urbión y Cebollera y a la cima del Moncayo para el periodo temporal 2071-2100, desapareciendo en la SSP585 para final de siglo.



La dramática pérdida de área potencial futura respecto al periodo de referencia observada en este estudio para *Pinus sylvestris* ha sido observada en otros trabajos (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011; López-Tirado et al., 2014; 2018; Ruiz-Labourdette et al., 2012). Se espera que *P. sylvestris* además de una importante reducción de la superficie potencial idónea, sufra un importante desplazamiento altitudinal hacia cotas más altas, en un proceso semejante al que se espera de otras especies. Sin embargo, en el territorio de Soria dicho proceso de ascensión altitudinal está limitado por la ausencia de cotas elevadas para su establecimiento (López-Tirado et al., 2018).

El pino silvestre será menos competitivo (López-Tirado et al., 2018) frente a otras especies como *Pinus nigra* en los bosques mixtos de las Sierras Béticas por el aumento de las temperaturas y la disminución de precipitaciones. Los modelos de pino silvestre y pino negral sugieren una dinámica parecida en el norte de la provincia de Soria. El aumento de las temperaturas y la disminución de precipitaciones observadas a finales del siglo XX ya han provocado el aumento de defoliación y reducciones en el crecimiento del área basimétrica del *P. sylvestris*, con valores mayores que para otras especies de pino mejor adaptadas a las condiciones xéricas como *P. halepensis* (Sánchez-Salguero et al., 2012). Esto indica que las poblaciones sorianas de pino albar ubicadas en zonas más bajas sean las más sensibles al aumento de temperatura y de las sequías, aunque las adaptaciones locales y la plasticidad de la especie (Benito-Garzón et al., 2011), podrían matizar estos impactos, atenuando la reducción futura de la superficie de la especie.

<i>Pinus sylvestris</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	8217	4056	-4161	51.2%	25.3%	-50.6%	49.4%
	2041-2070	8217	2951	-5266	51.2%	18.4%	-64.1%	35.9%
	2071-2100	8217	2782	-5435	51.2%	17.3%	-66.1%	33.9%
SSP 370	2011-2040	8217	3727	-4490	51.2%	23.2%	-54.6%	45.4%
	2041-2070	8217	1852	-6365	51.2%	11.5%	-77.5%	22.5%
	2071-2100	8217	376	-7841	51.2%	2.3%	-95.4%	4.6%
SSP 585	2011-2040	8217	3707	-4510	51.2%	23.1%	-54.9%	45.1%
	2041-2070	8217	1523	-6694	51.2%	9.5%	-81.5%	18.5%
	2071-2100	8217	13	-8204	51.2%	0.1%	-99.8%	0.2%

Tabla 3.2.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.6.9 para *Pinus sylvestris* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

El pino silvestre encuentra condiciones idóneas en un 51.2% de la provincia de Soria (Tabla 3.2.2) para el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie se reduce para todos los periodos temporales y trayectorias SSP, siendo la reducción mínima de esta superficie de un 50.6% hasta ocupar un 25.3% de la superficie de la provincia en el periodo 2011-2040 y la trayectoria SSP126 y la reducción máxima un 99.8% en el periodo temporal 2071-2100 de la trayectoria SSP585 hasta ocupar potencialmente únicamente un 0.1% de superficie de la provincia. El escenario SSP 126 es el más favorable de todos y supondría el mantenimiento de cerca del 49% de superficie actual, prácticamente toda ella se correspondería con zonas que el pino albar puede ocupar en la actualidad.

La tasa de estabilidad espacial (Tabla 3.2.2) del pino albar es medio-alta (alrededor de 45-50% en el periodo 2011-2040 para todas las trayectorias SSP), ya que esta especie no dispone apenas de zonas con potencial para colonizar en un contexto climático más cálido, por lo que la práctica totalidad de los lugares en que

persistirá el pino albar en el futuro se corresponde con zonas que ya está ocupando o que puede ocupar potencialmente, siempre en las cotas más altas y húmedas.

3.3 PINO SALGAREÑO: *PINUS NIGRA* J.F. ARNOLD

3.3.1 RESUMEN EJECUTIVO

*Las condiciones climáticas actuales permitirían que *Pinus nigra* ocupase casi el 75% de la provincia. Su superficie va a verse reducida notablemente, con pérdidas en las zonas más bajas y secas, y un desplazamiento a zonas de mayor altitud, pero con una fuerte pérdida neta de superficie potencial.*

La provincia de Soria tiene una idoneidad climática potencial muy alta para el pino salgareño en el periodo de referencia (1981-2010), pudiendo ocupar hasta un 74% de la provincia.

Los modelos de la especie obtenidos para los escenarios de clima futuro a corto y medio plazo indican un descenso paulatino de la superficie con idoneidad, que ya es dramático en el período 2041-2070 para todos los modelos, y que se acrecientan en los diferentes escenarios, especialmente para las trayectorias menos

optimistas. En general las pérdidas de idoneidad se inician en la zona central de la provincia, quedando zonas potenciales en la cara norte de la Sierra de Pela y en las montañas del norte de la provincia y Moncayo.

Además, se espera que *P. nigra* sufra una migración altitudinal hacia cotas más altas, remplazando parte de su hábitat en cotas más bajas debido a la mayor sequía por el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones.

Los resultados del pino salgareño se han realizado utilizando todas las presencias de la especie, esto implica que también se han tenido en cuenta repoblaciones, lo que incluye también otras subespecies, lo que puede justificar el amplio rango potencial de la especie en el periodo de referencia.

3.3.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

El pino salgareño es una especie taxonómicamente compleja, con diferentes subespecies en el ámbito circummediterráneo (Blanco et al., 1997). Esta especie tiene una importante presencia en España, tanto en masas naturales como repobladas (Alía et al., 2009a). En España se encuentra de forma natural la subespecie *salzmannii*, centrada en las montañas orientales de la Península Ibérica, con tres grandes áreas geográficas: Pirineos, Sistema Ibérico y Sierras Béticas. Además, aparecen pequeñas poblaciones relictas en otros lugares, como la Sierra de Gredos, Meseta Norte (río Cega) o Sierra de los Filabres. Esta subespecie también está presente en el sudeste de Francia y algunos autores consideran que las poblaciones de *P. nigra* del norte de África (Marruecos y Argelia) pertenecen a la subespecie *salzmannii* (Blanco et al., 1997). Junto a estas poblaciones naturales se han realizado plantaciones de la subespecie oriental, *Pinus nigra* subsp. *nigra* de un modo muy intenso, tanto en su rango natural de distribución, como fuera de él.



Figura 3.3.1. Izquierda: Distribución natural de *Pinus nigra*. Fuente: EUFORGEN. <https://www.euforgen.org/> Derecha: Pinar en el Cañón del Río Lobos. Fuente: Banco de imágenes de Cesefor.

Es una especie frugal y resistente, adaptada a suelos rocosos, calizos, si bien en ocasiones puede aparecer sobre suelos silíceos, característica de las montañas de clima mediterráneo y submediterráneo, en condiciones de elevada continentalidad con sequía estival (hasta dos meses y medio) y fríos invernales rigurosos, con hasta cuatro meses de periodo de helada segura en Soria. El pino salgareño presenta una gran amplitud climática, ocupando ambientes diversos, aunque con predominio de los climas frescos y húmedos de media montaña (Alía et al., 2009a).

En la Península Ibérica esta especie se distribuye desde los 500 en Pirineos y Sistema Ibérico hasta los 2200 m.s.n.m en su límite meridional en las montañas bético-orientales. Asimismo, es una especie muy longeva, llegando a alcanzar los 900 años en algunos individuos de las montañas béticas (Blanco et al., 1997).

Esta especie de pino coincide en su área de distribución con especies caducifolias marcescentes como *Quercus pyrenaica* o *Quercus faginea* o esclerófilas como *Quercus ilex*. También contacta con otras especies de pino como *Pinus sylvestris* al que supera en xericidad o *Pinus pinaster* (Blanco et al., 1997). En ambientes mediterráneos más térmicos, al descender las disponibilidades hídricas, la presencia de la especie disminuye, necesitando al menos 500 mm de precipitación (Alía et al., 2009a). En las parameras ibéricas alejadas de los macizos montañosos, con un periodo de sequía estival muy pronunciado y un volumen hídrico anual reducido, *Pinus nigra* se ve sustituido por *Juniperus thurifera* (Blanco et al., 1997).

En la provincia de Soria se puede encontrar a esta especie en terrenos calizos como silíceos, siendo abundante en la zona del Cañón del Río Lobos, Herrera de Soria y Muriel Viejo, ocupando zonas de mayor sequedad que las habitadas por el pino albar.

En Soria las formaciones naturales de pino laricio están representadas por una única masa, importante por constituir un área marginal en el área de distribución de la especie (Cañón del Río Lobos), constituyendo una región de procedencia propia (Alía et al., 2009a). La mayor parte de las masas actuales en la provincia son repoblaciones recientes sobre antiguos eriales, en ocasiones con la subespecie austriaca (subsp. *nigra*) originaria del centro y sur de Europa (Segura et al., 2000).

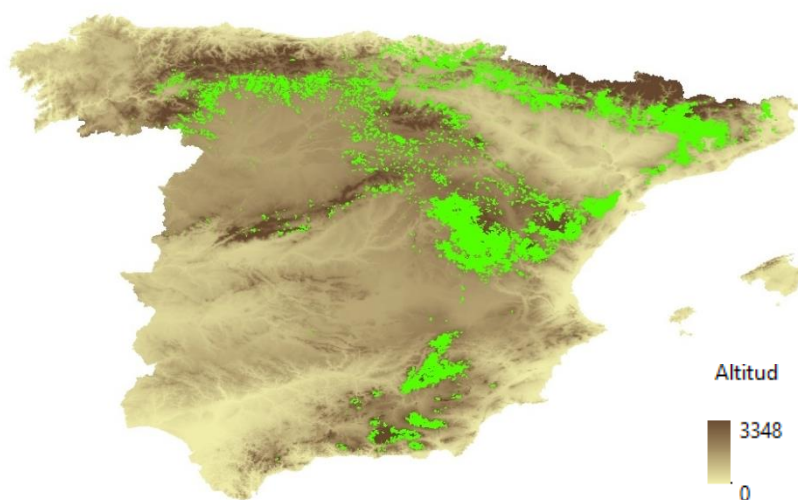


Figura 3.3.2: Distribución de *Pinus nigra* en España.
Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

3.3.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Pinus nigra* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.3.3).

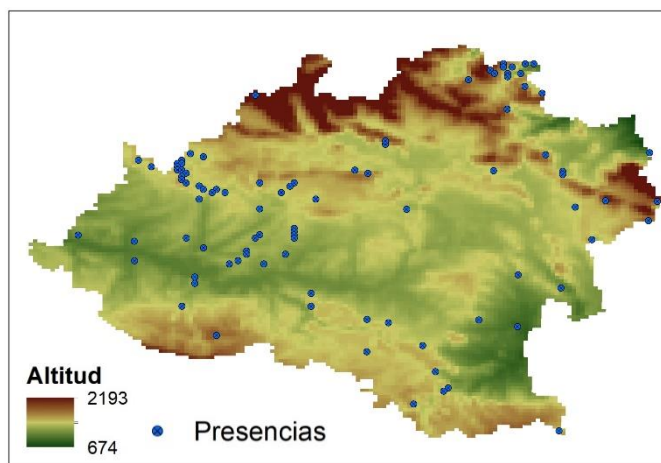
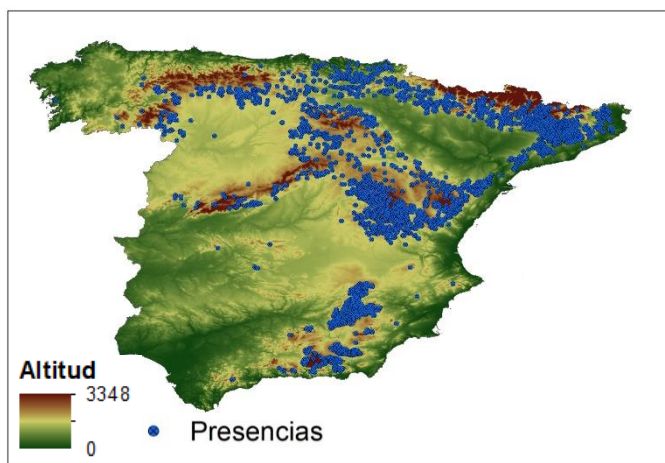
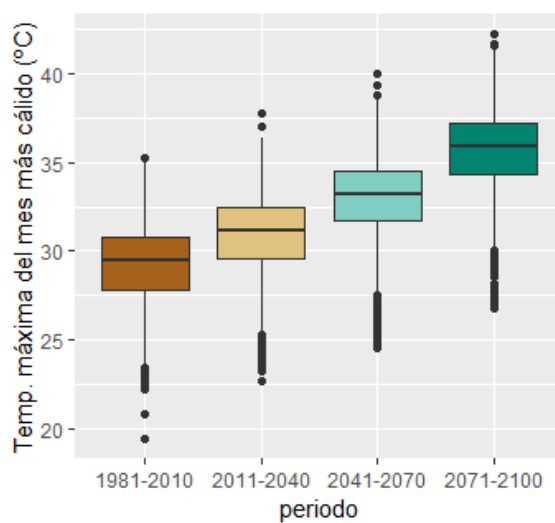
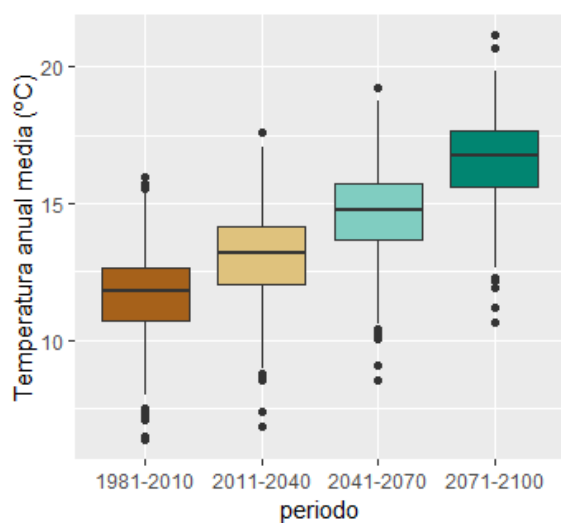


Figura 3.3.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Pinus nigra* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

El pino salgareño habita en lugares con temperatura media anual de 11 a 12.5°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 27.5 y 31°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 500-750(2000) mm anuales con 60-100 (300) mm en verano (Fig. 3.3.4). las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones continúen estables en sus valores.



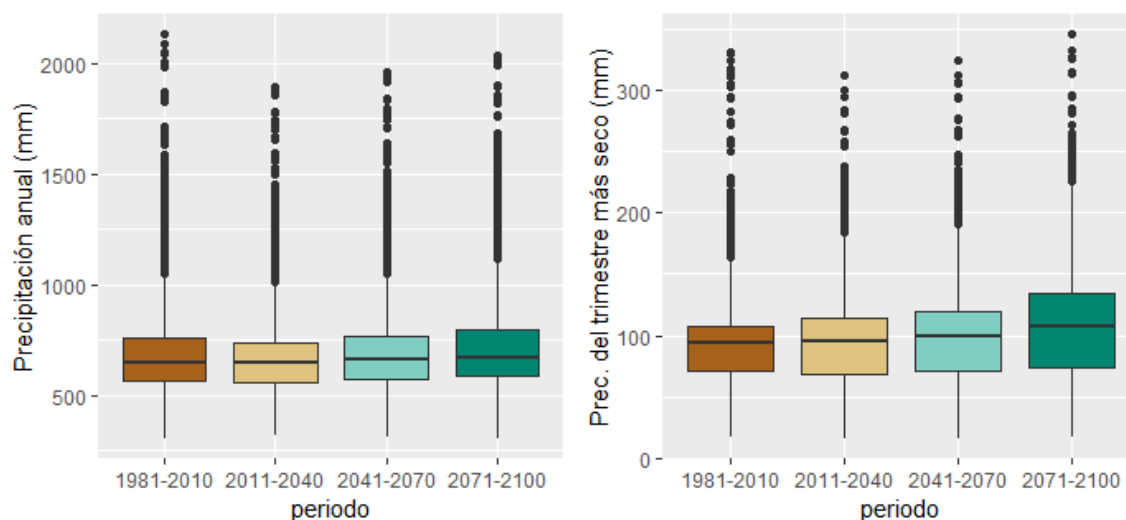


Figura 3.3.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Pinus nigra* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.3.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Pinus nigra* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza <5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para el pino salgareño. Como se observa en la figura 3.3.5, las variables están correlacionadas por grupos.

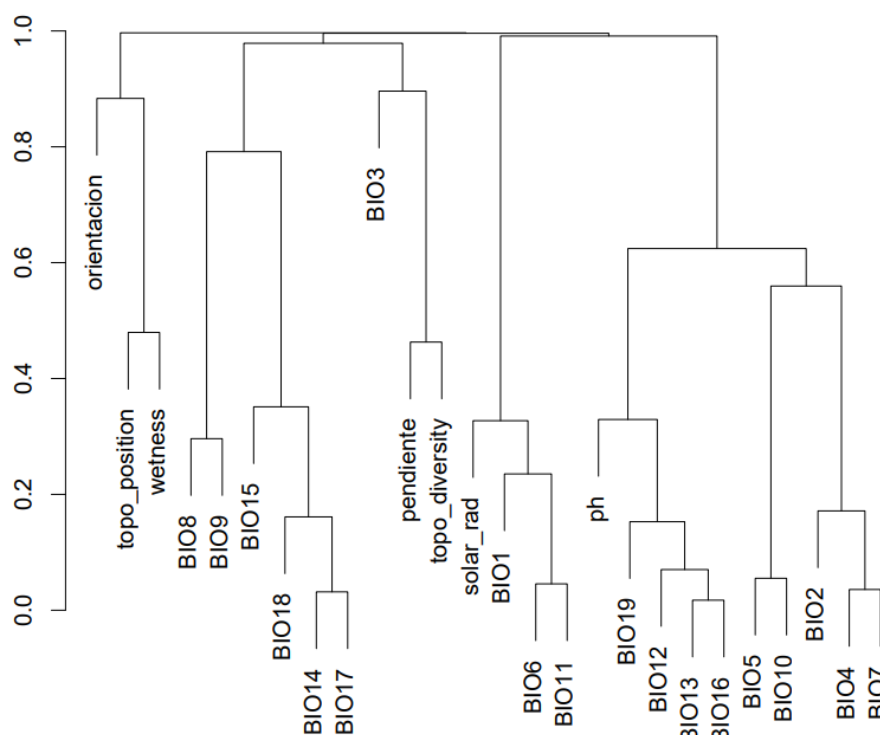


Figura 3.3.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Pinus nigra*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Pinus nigra* fueron: Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, solar rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.3.1: Variables usadas en los modelos de *Pinus nigra*.

3.3.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Pinus nigra* se han dividido las 3372 presencias en 2698 para training (80%) y 674 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.9 lo que indica que el modelo generado tiene capacidad predictiva muy alta.

La variable más importante (Fig. 3.3.6) es Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es también Bio 5, que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

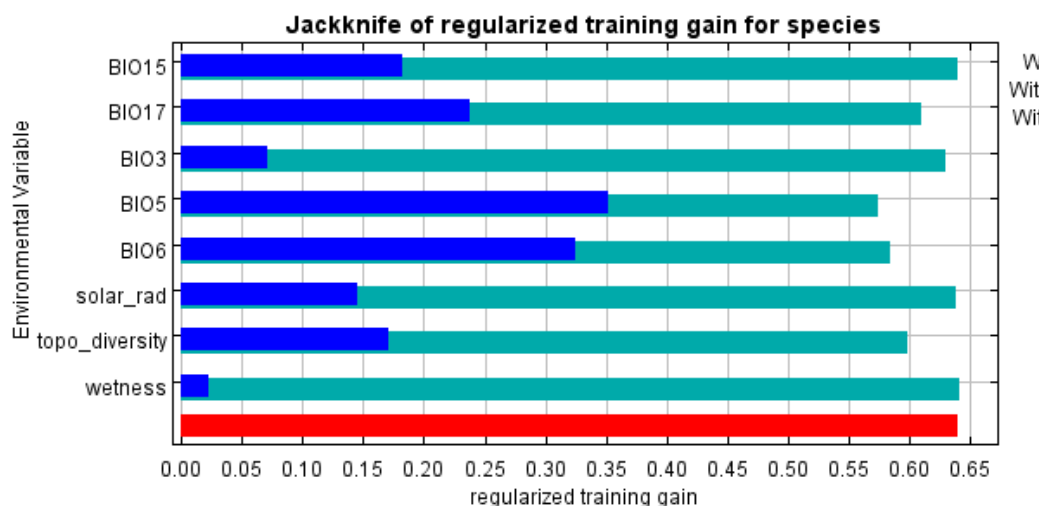


Figura 3.3.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Pinus nigra*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

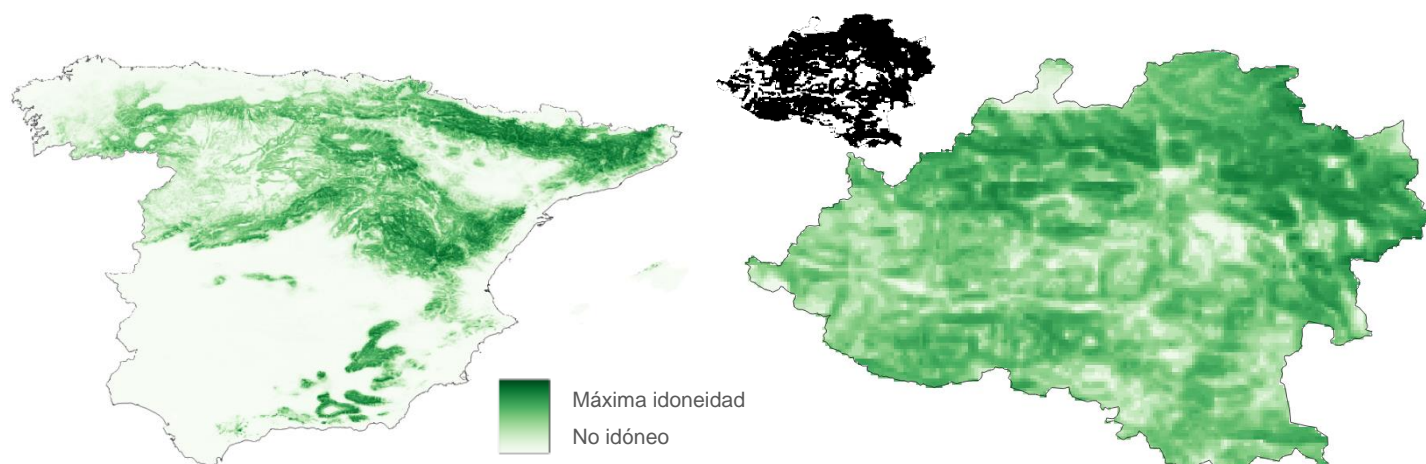


Figura 3.3.7: Distribución potencial de *Pinus nigra* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.3.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011), con un rango de distribución más amplio que a la distribución actual de la especie, expandiéndose ampliamente por el Sistema Central, cara sur de la Cordillera Cantábrica, submeseta norte, Sierras Béticas y Pirineos.

Se aprecia que las zonas con mayores valores de idoneidad coinciden con las zonas con mayor presencia actual de la especie (Sistema Ibérico y Sierras Béticas). Se observa que el modelo actual refleja idoneidad para la especie en zonas donde actualmente tiene presencia residual como los montes de Toledo. Asimismo, el modelo predice elevada idoneidad al sur de la Cordillera Cantábrica donde los modelos de Felicísimo et al., (2011) no reflejan idoneidad potencial, quizá debido a que no incluyeron las presencias de esta zona en el modelo al tratarse de repoblaciones.

En la provincia de Soria, se observa una idoneidad potencial alta para este periodo en toda la provincia menos en las zonas cercana al tramo bajo del Duero y las zonas más elevadas de la Sierra de Urbión. Este aumento de superficie idónea también ha sido observado en esta zona por otros autores (Ruiz-Labourdette et al., 2012), y puede responder a la recuperación del territorio que previamente había ocupado en tiempos anteriores (Morales-Molino et al., 2017), así como al hecho de que se incluyan también las repoblaciones de la subespecie *nigra*.

3.3.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

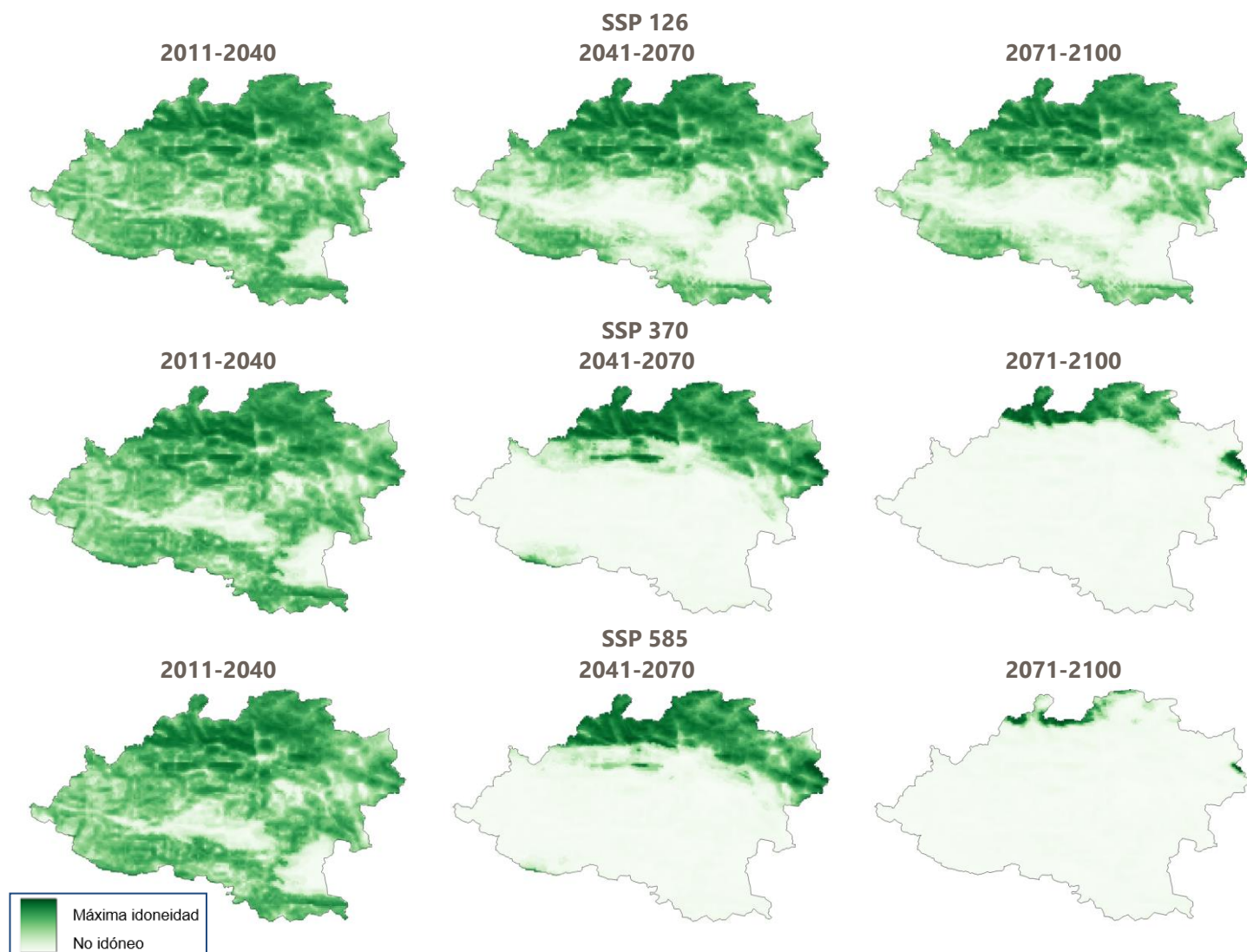


Figura 3.3.8: Distribución potencial de *Pinus nigra* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Los valores de idoneidad futura de la especie en la provincia de Soria reflejan idoneidad alta para el pino salgareño para el periodo 2011-2040 en todas las trayectorias SSP, pero disminuyen notablemente para el periodo 2041-2070 en las trayectorias SSP 370 y 585 (menos acusado en la SSP 126) en la mitad sur de la provincia y en el tramo bajo del Duero para las trayectorias SSP 370 y 585 (y de un modo un poco menos acusado en la SSP 126), perdiéndose grandes superficies potenciales en la mitad sur de la provincia y en el tramo bajo del Duero. Para el periodo 2071-2100, la disminución se incrementa notablemente en las trayectorias SSP 370 y 585 quedando relegada a las montañas del norte (Sierras de Urbión y Moncayo), mientras que para el escenario SSP 126, la especie resiste mucho mejor.

Estos patrones se reflejan de modo nítido en los modelos de cambio de áreas potencialmente idóneas para *Pinus nigra* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros, respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia (Fig.3.3.9).

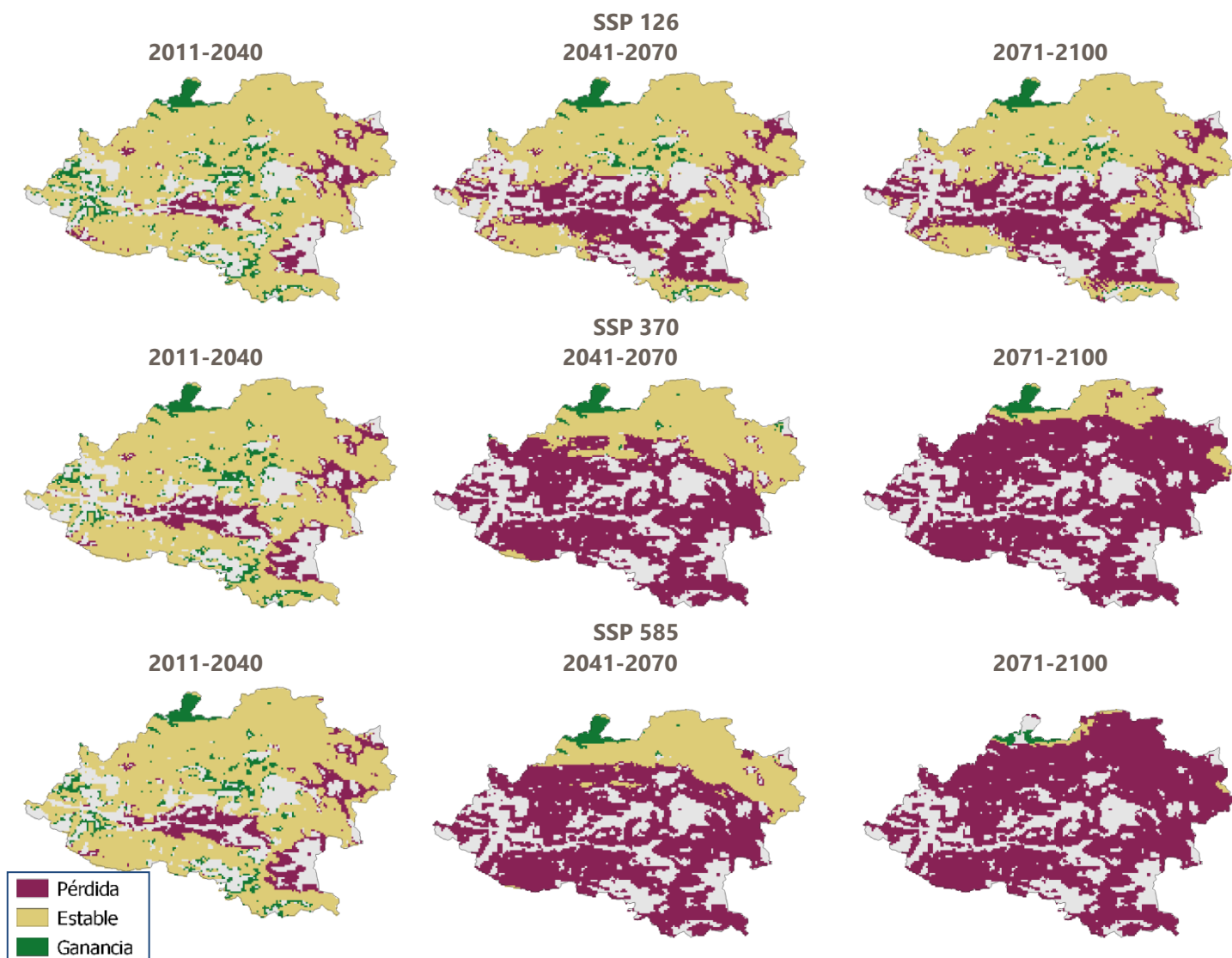


Figura 3.3.9: Mapas de cambio para *Pinus nigra*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (granate): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (amarillo): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (verde): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

El sur y la mitad norte de la provincia reflejan estabilidad para la especie en todas trayectorias SSP para el periodo 2011-2041, mientras que en el centro la especie pierde idoneidad. Cuanto más alejado es el periodo temporal y menos optimista es la trayectoria SSP, mayor es la pérdida de hábitat para la especie, restringiéndose en las zonas más bajas y secas, y aumentando en las zonas más elevadas y húmedas incluso en el periodo 2071-2100 en la trayectoria menos optimista (SSP 585). Las zonas de pérdida de idoneidad para el pino salgareño aparecen en las zonas cercanas al tramo bajo del Duero para el periodo 2011-2040 y se extienden hacia el norte y sur para el periodo 2041-2070 en las trayectorias SSP 370 y 585 dejando a la especie relegada al tercio norte de la provincia para esas mismas trayectorias en el periodo temporal 2071-2100.

La importante pérdida de área potencial futura respecto al periodo de referencia observada en este estudio para *Pinus nigra* ha sido observada en otros trabajos (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011; López-Tirado et al., 2014; Ruiz-Labourdette et al., 2012).

Se espera que *P. nigra* sufra un desplazamiento altitudinal hacia cotas más altas, en un proceso semejante al que se espera de otras especies como *Quercus pyrenaica* (López-Tirado et al., 2018a). Sin embargo, en cotas más bajas el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones aumentarían el estrés de las poblaciones debido a la sequía y la disminución del crecimiento (Candel-Perez et al., 2012) lo que provocaría que otras especies fueran más competitivas como *Quercus ilex* o *Pinus pinaster*. Este efecto podría verse suavizado por las adaptaciones locales al clima observadas para esta especie (Vizcaíno-Palomar et al., 2016), que podrían disminuir la posible reducción futura de la superficie ocupada por la especie.

<i>Pinus nigra</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	11875	12000	125	74.1%	74.8%	1.1%	89.6%
	2041-2070	11875	8390	-3485	74.1%	52.3%	-29.3%	66.2%
	2071-2100	11875	7687	-4188	74.1%	47.9%	-35.3%	61.0%
SSP 370	2011-2040	11875	11181	-694	74.1%	69.7%	-5.8%	85.7%
	2041-2070	11875	4392	-7483	74.1%	27.4%	-63.0%	34.6%
	2071-2100	11875	1502	-10373	74.1%	9.4%	-87.4%	10.7%
SSP 585	2011-2040	11875	11247	-628	74.1%	70.1%	-5.3%	85.9%
	2041-2070	11875	3598	-8277	74.1%	22.4%	-69.7%	28.2%
	2071-2100	11875	295	-11580	74.1%	1.8%	-97.5%	1.5%

Tabla 3.3.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.3.9 para *Pinus nigra* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

Como se puede observar en la tabla 3.3.2, un 74.1% de la superficie de la provincia de Soria se considera habitable o idónea para la especie en el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie se reduce para todos los periodos temporales y trayectorias SSP excepto para la SSP126 del periodo 2011-2040, en que se estima un aumento del 1.1% de la superficie. La reducción mínima de la superficie prevista para la especie es de un 5.3% hasta ocupar un 70.1% de la superficie de la provincia en el periodo 2011-2040 y la trayectoria SSP585 y la reducción máxima de un 97.5% hasta ocupar un 1.8% de superficie en el periodo temporal 2071-2100 de la trayectoria SSP585.

La tasa de estabilidad espacial nos indica si las zonas que ocupa el pino laricio en diferentes escenarios son las mismas que potencialmente ocupa en el periodo de referencia, o bien se produce un cambio en las zonas adecuadas para la especie (Tabla 3.3.2). En el caso del pino laricio, el solape espacial entre el área potencial futura y el área potencial del periodo de referencia es alto en todas las trayectorias SSP del periodo 2011-2040 (85.9%-89.6%) y disminuye para el resto de periodos temporales y trayectorias SSP. Por tanto, a corto plazo la especie se mantendrá en la vecindad de áreas potenciales del periodo de referencia, pero a medio y largo plazo las poblaciones futuras no estarán en las zonas más cercanas a las áreas potenciales del periodo de referencia, lo que podría impedir que la especie alcance espacialmente las nuevas zonas de idoneidad por dispersión o colonización natural.

3.4 PINO NEGRAL: *PINUS PINASTER* AITON.

3.4.1 RESUMEN EJECUTIVO

A corto plazo el pino negral se verá favorecido por el cambio climático con pocas pérdidas y un progresivo aumento de superficie por ascenso altitudinal. A medio y largo plazo los escenarios dan resultados más variables, con sus poblaciones de Pinares Llanos y El Burgo muy comprometidas.

Alrededor del 60% de la provincia de Soria es climáticamente idónea para el pino negral para el periodo de referencia (1981-2010). Inicialmente (2011-2040) esta especie se ve favorecida por el cambio climático con un aumento notable de su superficie idónea por un aumento altitudinal y una pérdida reducida. Sin embargo, en horizontes temporales más lejanos los modelos no son tan optimistas, con algunos escenarios que predicen la pérdida total o casi total de idoneidad en las poblaciones de Pinares Llanos y el Burgo de Osma y con la especie expandiéndose hacia las cotas más

elevadas de la provincia. Solo el modelo más conservador SSP126 predice una baja reducción de la superficie idónea de la especie a largo plazo.

A corto plazo se observa estabilidad en las zonas ocupadas actualmente por la especie en Berlanga, tierras de Almazán, Burgo de Osma y zonas bajas de Tierra de Pinares con un aumento de la superficie potencialmente idónea en Tierra de Pinares y zonas elevadas del este de la provincia. A medio y largo plazo se produce una disminución de idoneidad en las zonas de Pinares Llanos y El Burgo, mientras que hay ganancia de superficie hacia cotas más elevadas de las Tierras Altas, el Valle y Campo de Gómara hacia la comarca del Moncayo.

3.4.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

El pino negral o pino resinero es una especie natural del oeste de la región mediterránea, con presencia en España, Francia, Portugal, Italia, Marruecos, Argelia y Túnez. En la Península Ibérica es el pino con mayor superficie natural, apareciendo de forma natural en el sistema Central, sistema Ibérico, sierras béticas y sierras costeras del Mediterráneo. Se ha usado ampliamente en repoblaciones forestales, siendo en muchos casos discutida la diferenciación entre masas autóctonas y no autóctonas (Alía et al., 2009b).

Su rango altitudinal varía desde el nivel del mar hasta 1.700 m.s.n.m. en Sierra Almijara (cordillera Penibética) y se encuentra en sustratos ácidos sobre suelos silíceos, dolomíticos (Sierras Tejeda y Almijara), peridotíticos (Sierra Bermeja), suelos descalcificados y también en suelos arenosos y pobres (do Amaral Franco, 1986a; Blanco et al., 1997).



Figura 3.4.1. Izquierda: Distribución natural de *Pinus pinaster*. Fuente: EUFORGEN. <https://www.euforgen.org>. Derecha: Pinar resinado en Muriel Viejo. Fuente: Banco de imágenes de Cesefor.

Es una especie que presenta gran plasticidad ecológica, adaptada al clima mediterráneo-submediterráneo, pero también capaz de habitar en zonas de influencia atlántica con climas templados de influencia oceánica. Soporta rigurosos fríos invernales y precipitaciones altas o bajas más o menos repartidas anualmente, pero soporta mal una sequía estival muy prolongada (Blanco et al., 1997; Alía et al., 2009a) y su crecimiento se ve afectado negativamente por el incremento en las temperaturas (González-Muñoz et al., 2014). Se puede encontrar formando masas puras o mixtas, con otras especies de pino (*P. pinea*, *P. sylvestris*) y de quercíneas (*Q. ilex*, *Q. pyrenaica*, *Q. faginea* o *Q. suber*).

En Soria esta especie se encuentra en zonas de elevación media (900-1000 m.s.n.m) en los llamados pinares de llanura en el centro de la provincia de Soria donde forma grandes extensiones, en torno a la cuenca del Duero, Berlanga, Tierras de Almazán y Burgo de Osma, ocupando sobre todo sustratos arenosos. También aparece en zonas de sierra en torno a los 1400-1800 m.s.n.m formando masas que en las zonas más elevadas de su margen son mixtas con *Pinus sylvestris* en Tierra de Pinares y en el Valle, al sur de las Sierras de Urbión y Cebollera.

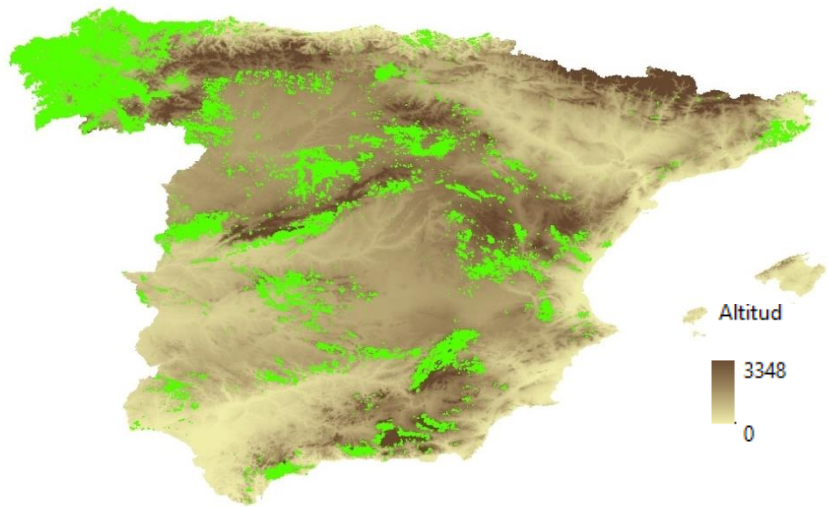


Figura 3.4.2: Distribución de *Pinus pinaster* en España.
Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

3.4.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Pinus pinaster* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.4.3).

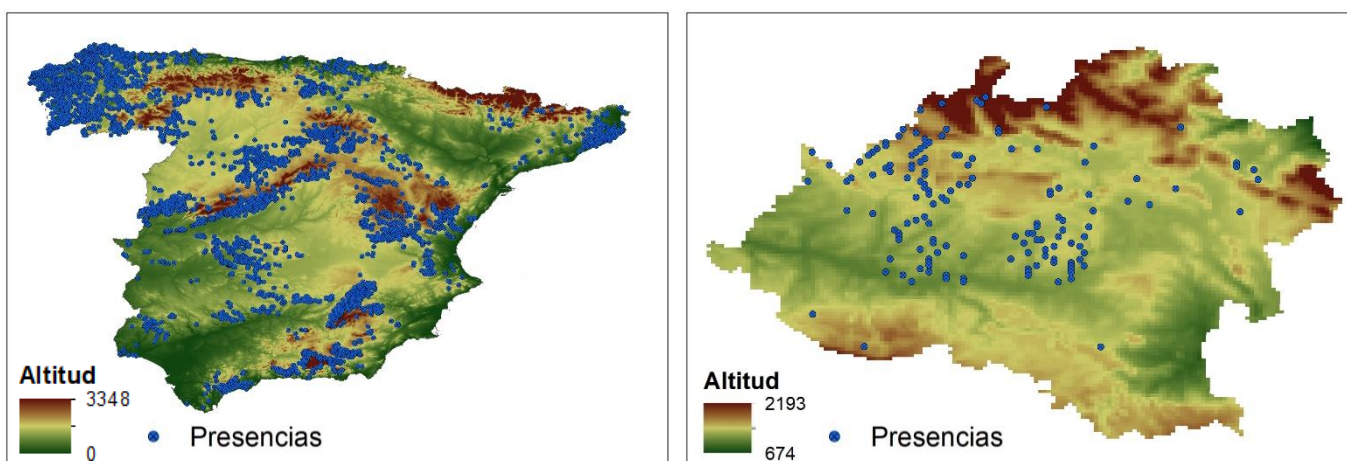


Figura 3.4.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Pinus pinaster* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

El pino negral habita en lugares con temperatura media anual de 12 a 14.5°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 27.5 y 32°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se

desarrolla actualmente está situado entre 550-1000(2000) mm anuales con 50-100 (300) mm en verano (Fig. 3.4.4). Las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones continúen estables en sus valores.

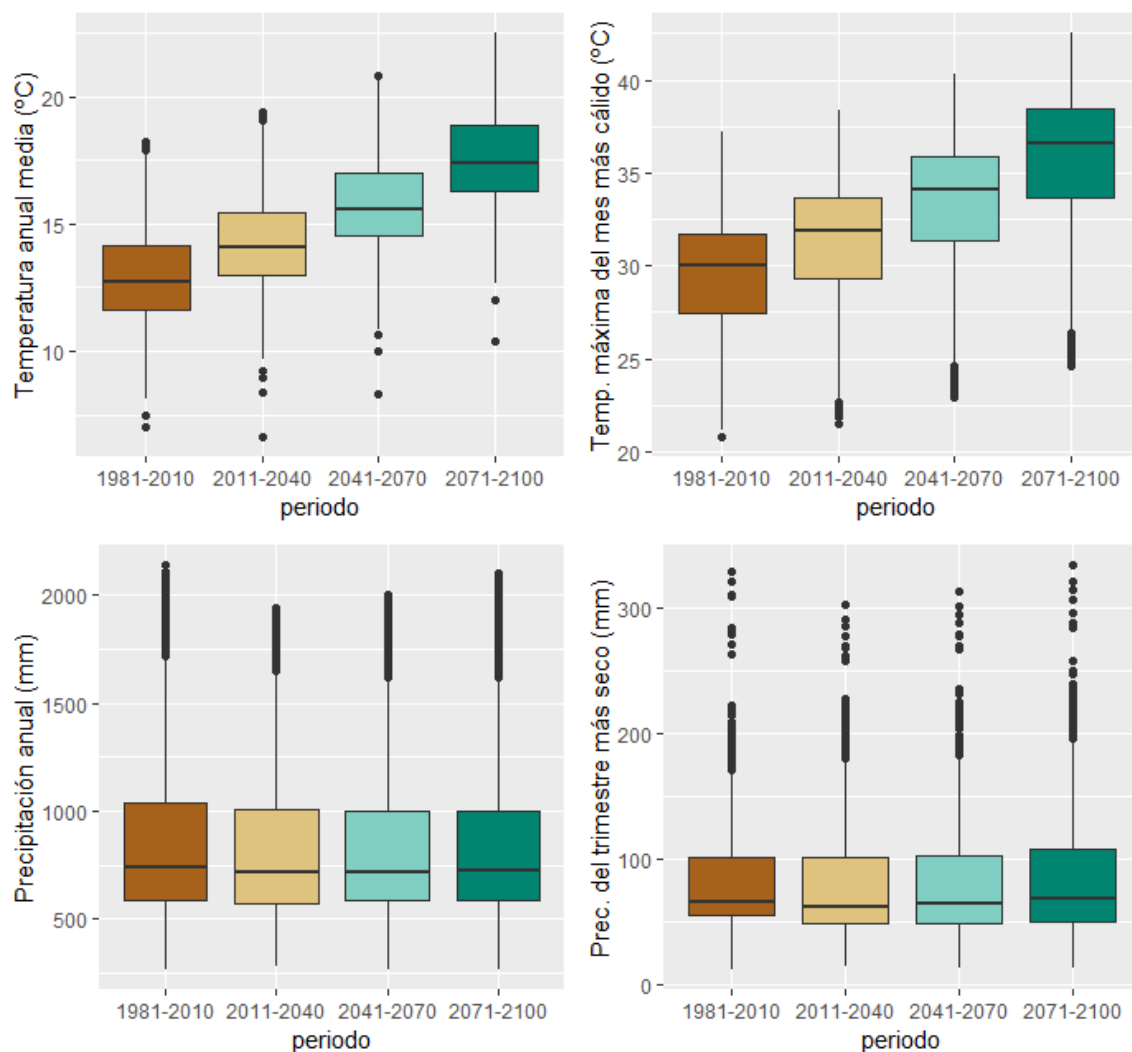


Figura 3.4.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Pinus pinaster* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.4.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Pinus pinaster* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza <5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para el pino resinero. Como se observa en la figura 3.4.5, las variables están correlacionadas por grupos.

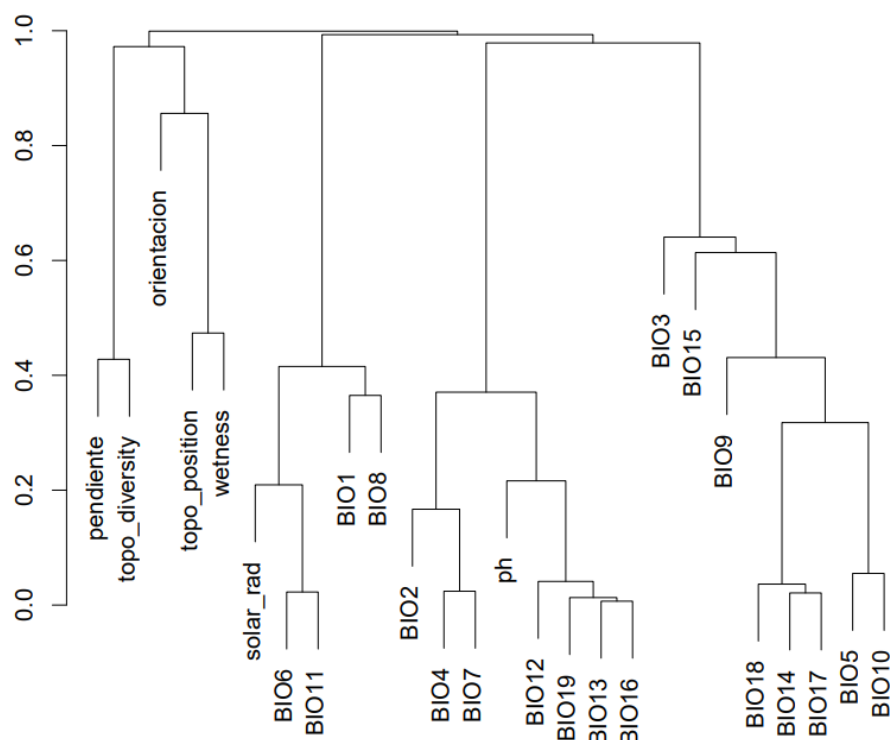


Figura 3.4.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Pinus pinaster*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Pinus pinaster* fueron: Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, solar_rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.4.1: Variables usadas en los modelos de *Pinus pinaster*.

3.4.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Pinus pinaster* se han dividido las 5311 presencias en 4249 para training (80%) y 1062 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.83 lo que indica que el modelo generado tiene alta capacidad predictiva.

La variable más importante (Fig. 3.4.6) es Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es Bio 17 (Precipitación trimestre más seco), que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

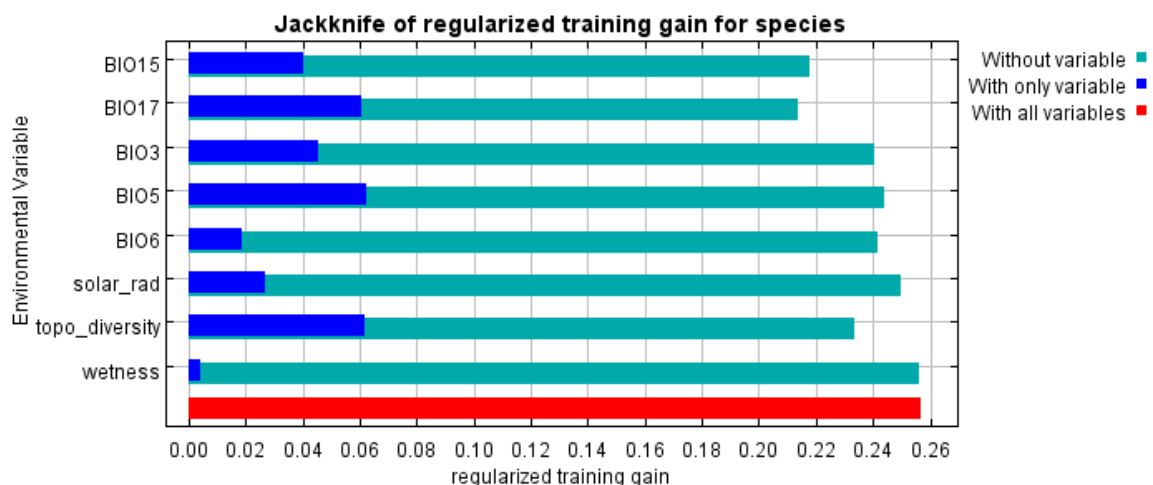


Figura 3.4.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Pinus pinaster*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

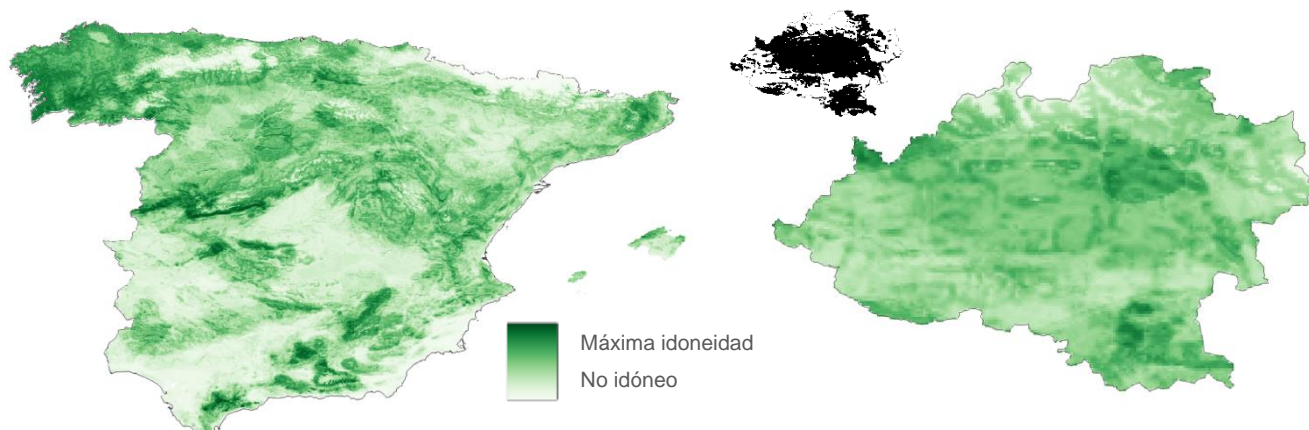


Figura 3.4.7: Distribución potencial de *Pinus pinaster* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.5.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011), con un rango de distribución más amplio que a la distribución actual de la especie, expandiéndose ampliamente por el Sistema Central, Galicia, la parte occidental y sur de la submeseta norte, Sierras Béticas y Montes de Toledo.

Se aprecia que las zonas con mayores valores de idoneidad son aquellas zonas con mayor presencia actual de la especie (Sistema Ibérico y Sierras Béticas). Se observa que el modelo actual refleja idoneidad para la especie en zonas donde actualmente tiene presencia residual como los montes de Toledo. Asimismo, el modelo predice elevada idoneidad en zonas interiores de la submeseta norte, Sierra Morena y en las zonas costeras de Galicia donde los modelos de Felicísimo et al., (2011) no reflejan idoneidad potencial, quizá debido a que no incluyeron las presencias de esta zona en el modelo al tratarse de repoblaciones.

En la provincia de Soria, se observa una idoneidad potencial alta para este periodo en la cercanía de las zonas que ocupa actualmente, Berlanga, Tierra de Almazán, Burgo de Osma y zonas de menor altitud de Tierra de Pinares (Vinuesa y San Leonardo de Yagüe). La existencia de una mayor superficie idónea que la superficie actual también ha sido observado para la especie en esta zona por otros autores (Ruiz-Labourdette et al., 2012).

3.4.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

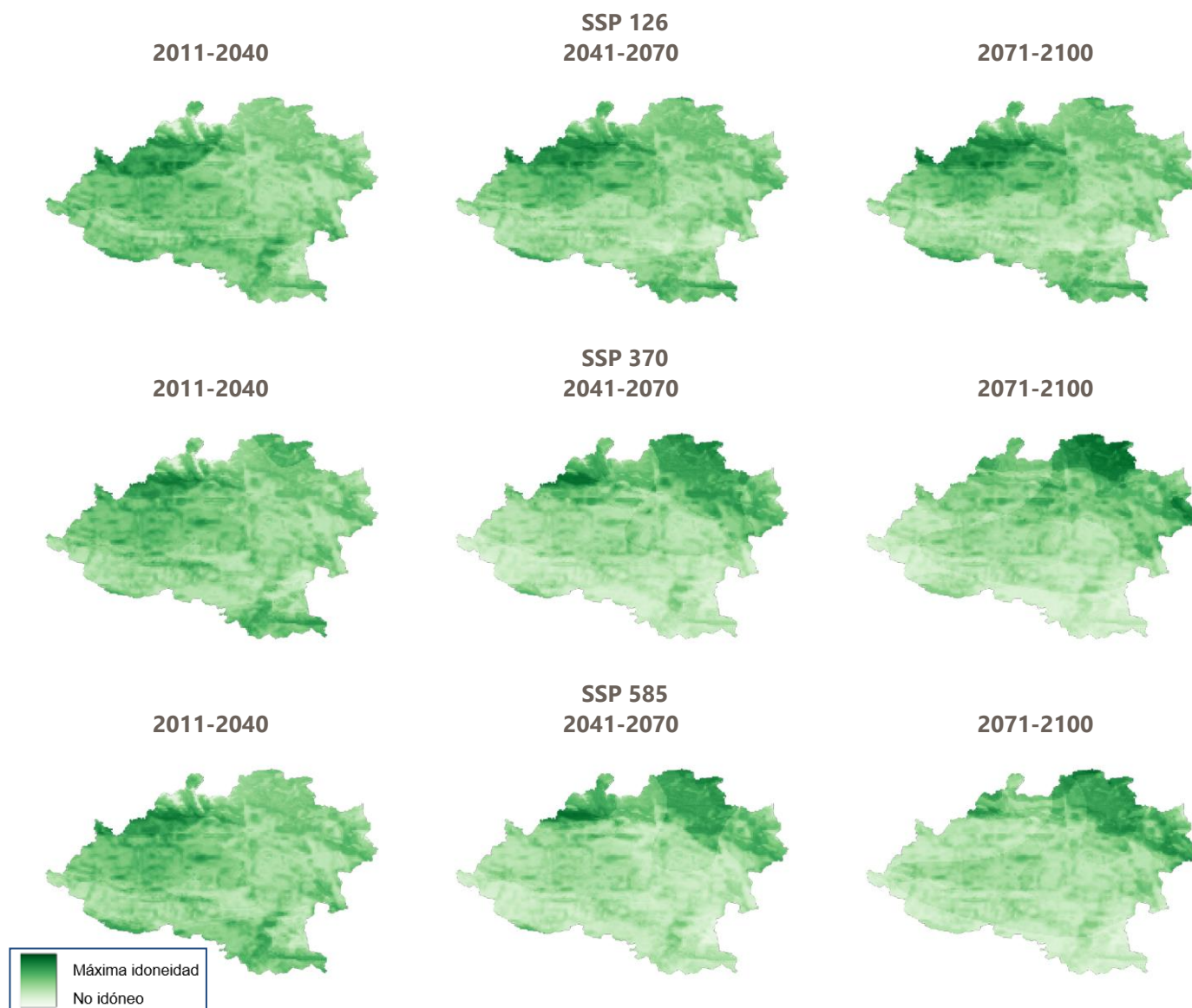


Figura 3.4.8: Distribución potencial de *Pinus pinaster* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Los valores de idoneidad para el primer periodo temporal futuro 2011-2040 reflejan un aumento de la idoneidad predicha para el pino resinero en todas las trayectorias SSP. Las ganancias se manifiestan en el centro-oeste de la provincia, Tierra de Almazán, Arcos de Jalón, Burgo de Osma y zonas bajas de Tierra de Pinares (Vinuesa y San Leonardo de Yagüe). Para el siguiente periodo temporal 2041-2070 se observa que la

idoneidad de la especie disminuye en el centro de la provincia (Pinares Llanos y alrededor de Soria), aumentando hacia zonas elevadas de Tierras Altas y sur del Moncayo.

Para el periodo 2071-2100 y especialmente en las trayectorias SSP 370 y 585, se observa una disminución de la idoneidad en zonas de menor elevación de tierras de Almazán, Burgo de Osma y Tierra de Pinares y un aumento de la idoneidad en zonas de mayor elevación del Valle, Tierras Altas y hacia la comarca del Moncayo.

Los cambios en la idoneidad de la especie se aprecian más fácilmente en los mapas de cambio para *Pinus pinaster* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia (Fig.3.4.9).

Seguidamente se presentan los mapas de cambio de áreas predichas como potencialmente idóneas para *Pinus pinaster* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia.

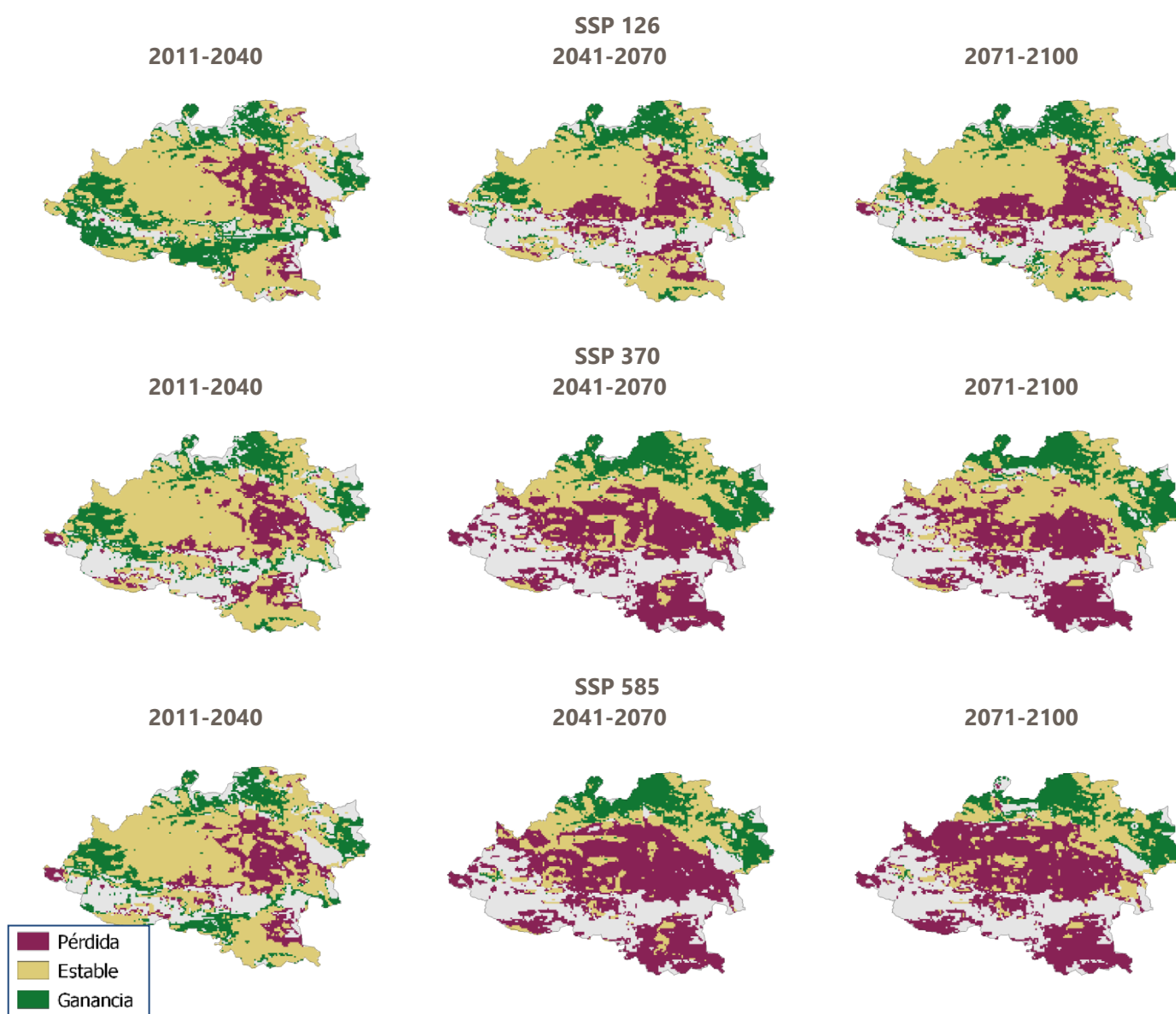




Figura 3.4.9: Mapas de cambio para *Pinus pinaster*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (granate): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (amarillo): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (verde): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

Todas las trayectorias SSP reflejan estabilidad y aumento de superficie para el período 2011-2040. en la mayor parte de la predicción del pino negral, con ganancia de idoneidad hacia el norte de la provincia en Tierra de Pinares y en sierras del noreste de la provincia, y la pérdida de idoneidad en las zonas centrales y del sur de la provincia, en los márgenes de las superficies de Pinares Llanos.

Durante el período 2041-2070, los escenarios muestran un notable cambio de tendencia con reducciones en la superficie total que se concentran principalmente en Pinares Llanos y el Burgo, con ganancias notables en Tierra de Pinares, en Tierras Altas y noreste de la provincia. Finalmente, para el periodo 2071-2100, se observa una disminución de la idoneidad en las trayectorias SSP 370 y 585, con pérdida de las zonas más bajas, estabilidad en las zonas centrales y desplazamiento altitudinal, ganando superficie hacia el norte y este de la provincia. El escenario SSP 126 es muy optimista con una expansión de la especie manteniendo el 60% de la superficie de la provincia como idónea para la especie para final de siglo.

Las predicciones futuras para esta especie varían en función de la escala espacial del estudio. Los trabajos realizados para España predicen un aumento de la distribución potencial actual y aumento de la distribución bajo algunos escenarios climáticos, pero coinciden en predecir una reducción de la superficie potencial de la especie a largo plazo (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011). Sin embargo, los trabajos realizados a escala local en el centro de su distribución predicen un aumento de la distribución de la especie para todos los escenarios climáticos, incluso los de mayor aumento de CO₂ (Sistema Ibérico y Central en Ruiz-Labourdette et al., 2012) o una marcada reducción de la idoneidad futura hasta su casi desaparición en las poblaciones sur de su distribución (Andalucía en López-Tirado et al., 2016a).

Las temperaturas más altas en primavera y verano podrían aumentar el estrés hídrico y tener un impacto negativo en esta especie (Nabais et al., 2014). Las predicciones futuras indican que *Pinus pinaster* se desplazará altitudinal y latitudinalmente, como ha sido observado por otros autores (Benito-Garzón et al., 2008; López-Tirado et al., 2016a; Ruiz-Labourdette et al., 2012), ocupando sitios de mayor altitud actualmente con condiciones submediterráneas (Benito-Garzón et al., 2008) mientras que las poblaciones situadas en zonas de baja elevación disminuirán. En Soria se observa un aumento de la idoneidad futura respecto al periodo de referencia de las presencias de la especie situadas a mayor altitud.

<i>Pinus pinaster</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	9838	11967	2129	61.3%	74.6%	21.6%	66.7%
	2041-2070	9838	9735	-103	61.3%	60.7%	-1.0%	73.7%
	2071-2100	9838	9636	-202	61.3%	60.1%	-2.1%	72.3%
SSP 370	2011-2040	9838	10548	710	61.3%	65.8%	7.2%	73.3%
	2041-2070	9838	6558	-3280	61.3%	40.9%	-33.3%	42.4%
	2071-2100	9838	7097	-2741	61.3%	44.3%	-27.9%	49.2%
SSP 585	2011-2040	9838	10629	791	61.3%	66.3%	8.0%	72.2%
	2041-2070	9838	5344	-4494	61.3%	33.3%	-45.7%	32.6%
	2071-2100	9838	4998	-4840	61.3%	31.2%	-49.2%	30.1%

Tabla 3.4.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.4.9 para *Pinus pinaster* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie

de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

Cerca de un 61.3% de la superficie de la provincia de Soria es habitable o idónea para la especie (Tabla 3.4.2) en el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie aumenta en todos los escenarios para el periodo 2011-2040 entre un 7.2% y un 21.6%, lo que implica un aumento de la superficie de zonas idóneas hasta un 74.6% para el pino negral en la provincia a corto plazo. A medio plazo, para el periodo 2041-2070, la superficie idónea se reduce frente al período anterior, y a final de siglo se produce un importante descenso de la superficie idónea cercano al 45%-49% en las trayectorias más pesimistas SSP370 y SSP585.

La tasa de estabilidad espacial del pino negral (Tabla 3.4.2) indica un solape medio-alto para el período 2011-2040, pero más debido al aumento de la superficie potencial que a su pérdida. Esto se trastoca en el siguiente período (2041-2070) por la pérdida de amplias zonas de Pinares Llanos y Burgo sobre todo en los escenarios menos optimistas (SSP370 y SSP585), si bien se mantiene próximo al 73.7% en SSP126. El período más lejano (2071-2100) es el que mayor discrepancias plantea en función del escenario, con valores del 72.3% en SSP126, lo que en un contexto de aumento notable de la superficie potencial, indica que la mayor parte de los pinares negrales se mantendrían, mientras que los otros dos escenarios indican que la superficie potencial del pinar a final de siglo reduciría su solape con la actual.

3.5 PINO CARRASCO: *PINUS HALEPENSIS* MILL.

3.5.1 RESUMEN EJECUTIVO

El área climáticamente idónea para el pino carrasco va a aumentar notablemente en Soria. La mayor parte de los escenarios prevén un aumento de la superficie por las zonas del norte y sur de la provincia (Pinares, Soria, Tierra de Ágreda, Tierras Altas y El Burgo), si bien a largo plazo la especie estará restringida al norte de la provincia.

A pesar de ser una especie muy poco abundante en la provincia de Soria, los modelos indican una idoneidad potencial en cerca del 7% de la superficie provincial para el periodo de referencia (1981-2010). Las zonas más adecuadas se sitúan por las zonas en que se ha plantado: el tramo bajo del río Duero en San Esteban de Gormaz, en las proximidades a Aragón a lo largo del eje Deza-Arcos de Jalón y Tierra de Ágreda.

Debido a su carácter termófilo y xerófilo, los modelos predicen un aumento de la idoneidad de la especie en la provincia de Soria en

todos los escenarios futuros, del 7% de superficie idónea en el periodo de referencia hasta alcanzar casi la mitad de la provincia a medio y largo plazo en la trayectoria SSP126.

A corto plazo se observa idoneidad del pino carrasco en las zonas de Berlanga, tierras de Almazán, Burgo de Osma, zonas bajas de Tierra de Pinares y Medinaceli con un aumento de la superficie potencialmente idónea en Tierra de Pinares y zonas elevadas del este de la provincia. A medio y largo plazo se produce una disminución de idoneidad en el eje Deza-Arcos de Jalón y algo más lenta en el tramo bajo del Duero, mientras que en el núcleo de Tierra de Ágreda se producen cambios expandiendo hacia Tierras Altas e incluso en los escenarios más lejanos en la zona de Montenegro de Cameros sobre materiales básicos. Es interesante remarcar que el pino carrasco no aparece como idóneo en amplias zonas básicas del centro y oeste de la provincia en ninguno de los escenarios. Por lo que su papel futuro en el sur de la provincia va a ser menor del inicialmente esperado.

3.5.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

El pino carrasco (Fig. 3.5.1) es una especie natural de la región mediterránea, más abundante en la parte occidental, especialmente en la Península Ibérica, y norte de África, en Marruecos y Argelia. También aparece, aunque, menos abundantemente desde el sur de Francia e Italia hasta Grecia. En cuanto al rango altitudinal de la especie, puede encontrarse desde el nivel del mar hasta los 1600 m en el Atlas y en la sierra de las Nieves en Málaga (Blanco et al., 1997).

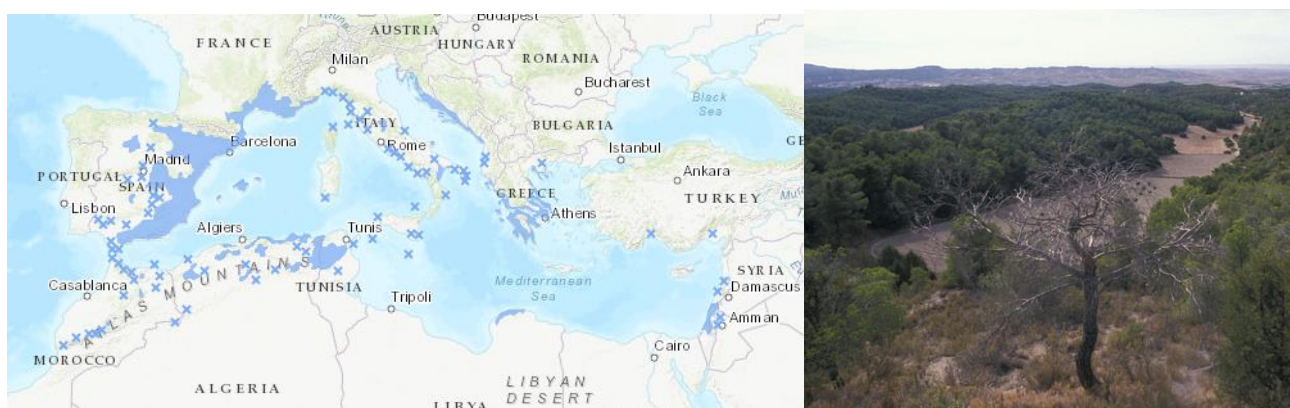


Figura 3.5.1. Izquierda: Distribución natural de *Pinus halepensis*. Fuente: EUFORGEN. <https://www.euforgen.org/species/>. Derecha: Pinar en Leciñena (Zaragoza). Fuente: Banco de imágenes de Cesefor.

En la Península Ibérica (Fig. 3.5.2) crece de modo natural en las mitades este y sur, siendo especialmente abundante en Cataluña y Levante. Las principales masas se encuentran en el Sistema Costero Catalán, el

Ibérico Meridional y las sierras Prebéticas y Subbéticas de la Cordillera Bética. Entra hacia el interior de la península a través de la Depresión del Ebro y de las sierras ibéricas de Cuenca (Alía et al., 2009a).

Este pino presenta en la Península Ibérica la mayor amplitud climática de toda su área de distribución, ocupando desde ambientes semiáridos hasta submediterráneos de media montaña (Blanco et al., 1997). La especie es termófila y xerófila, se distribuye por los sistemas montañosos cercanos al Mediterráneo, zonas bajas y valles poco afectados por inversiones térmicas que produzcan fuertes heladas y en regiones de temperaturas invernales suaves, con heladas leves o sin ellas, aunque puede soportar fríos (hasta -3°C) como los del centro del valle del Ebro o la comarca de Baza (Granada). Asimismo, es muy resistente a la escasez de precipitaciones, soportando periodos de sequía de 1.5 a 4.5 meses (Alía et al., 2009a).

Aparece con más frecuencia en suelos calizos y está considerada una especie calcícola (Alía et al., 2009a); pero también se encuentra en silíceos y yesosos, pudiendo vivir en los sustratos pobres, someros y pedregosos. Donde no se encuentra es en terrenos altamente salinizados (Blanco et al., 1997). *Pinus halepensis* aparece formando masas mixtas con *Pinus nigra* en las zonas más elevadas y húmedas y con *Quercus ilex* y *Quercus coccifera* en las más xéricas.

En la provincia de Soria, el pino carrasco se ha utilizado en repoblaciones en zonas de margas y calizas como la comarca de Arcos de Jalón, San Esteban de Gormaz y Santa María de Huerta, siempre en las partes más bajas de la provincia en sus extremos nororiental y suroccidental (Segura et al., 2000).

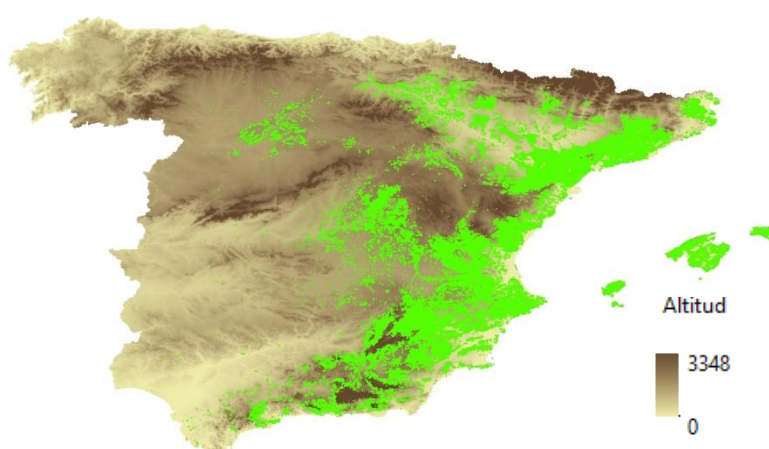


Figura 3.5.2: Distribución de *Pinus halepensis* en España.
Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

3.5.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Pinus halepensis* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.5.3).

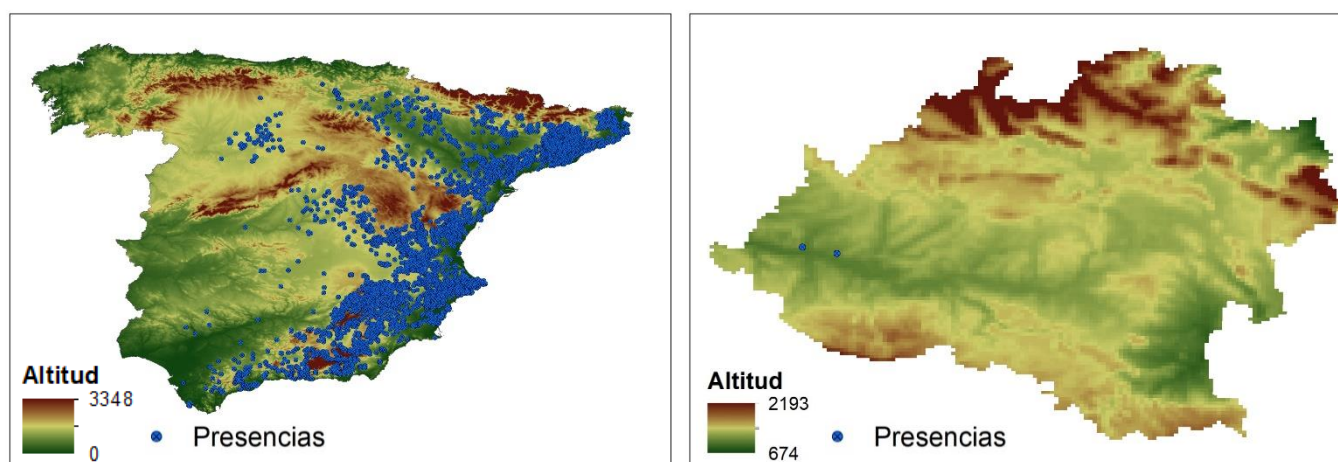


Figura 3.5.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Pinus halepensis* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

El pino carrasco habita en lugares con temperatura media anual de 13 a 15°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 30 y 32.5°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 3000-600(1250) mm anuales con 50-100 (200) mm en verano (Fig. 3.5.4). las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones continúen estables en sus valores.

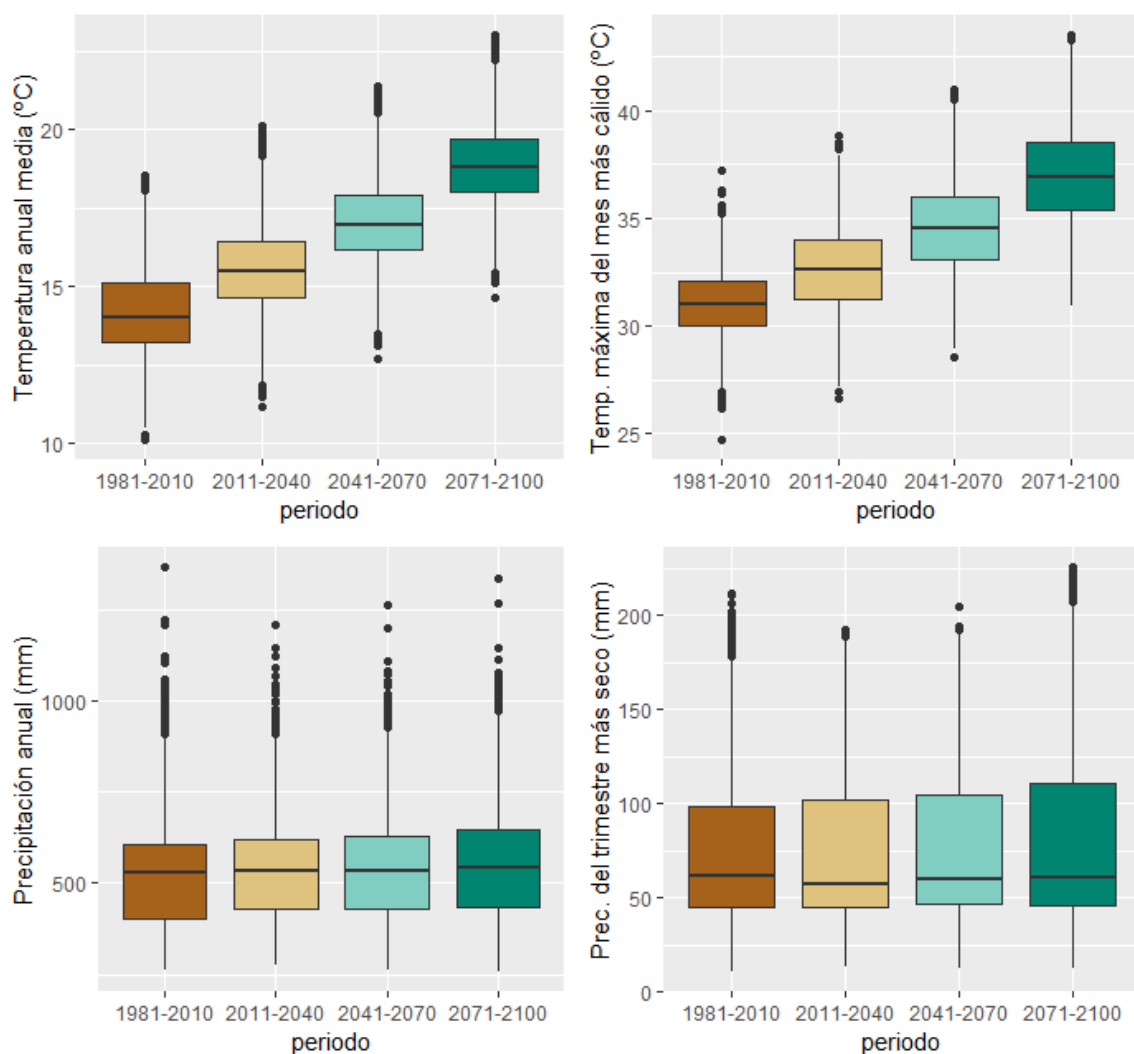


Figura 3.5.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Pinus halepensis* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.5.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Pinus halepensis* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza < 5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para el pino carrasco. Como se observa en la figura 3.7.5, las variables están correlacionadas por grupos.

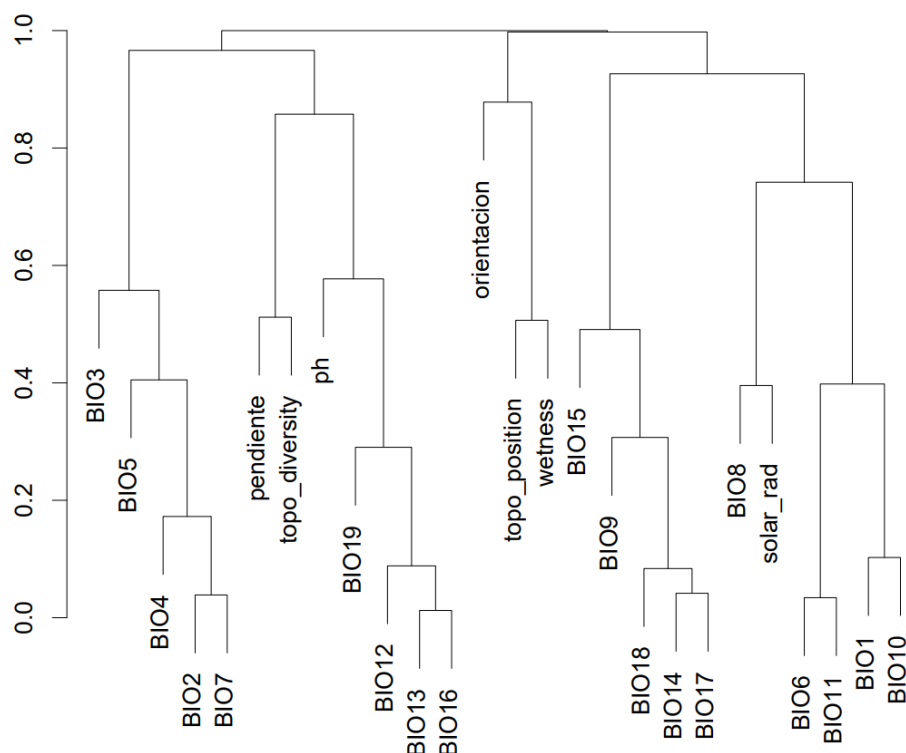


Figura 3.5.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Pinus halepensis*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Pinus halepensis* fueron: Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, solar_rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.5.1: Variables usadas en los modelos de *Pinus halepensis*.

3.5.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Pinus halepensis* se han dividido las 6000 presencias en 4800 para training (80%) y 1200 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.9 lo que indica que el modelo generado tiene capacidad predictiva muy alta.

La variable más importante (Fig. 3.5.6) es Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma

aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es *topo_diversity*, que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

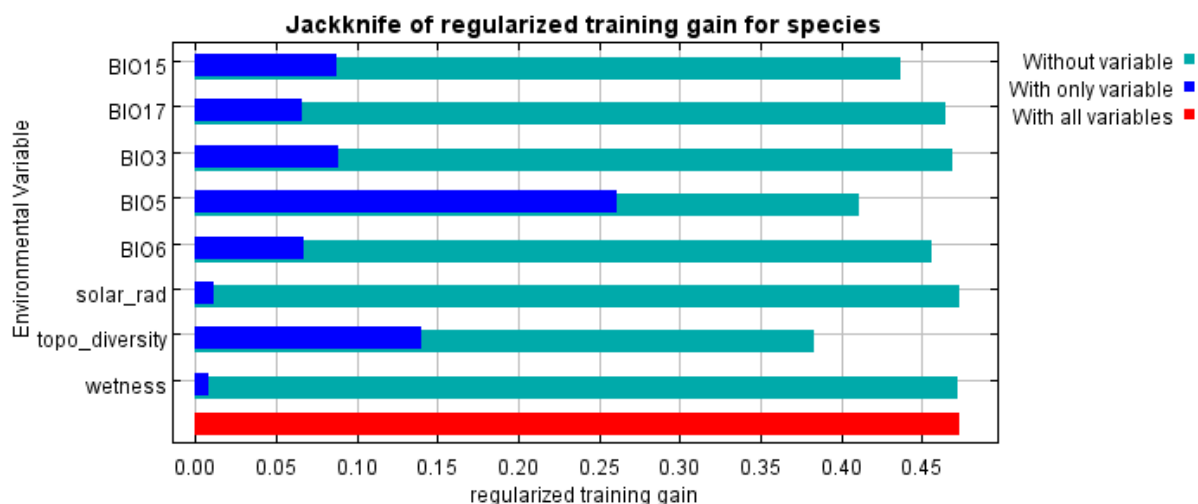


Figura 3.5.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Pinus halepensis*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

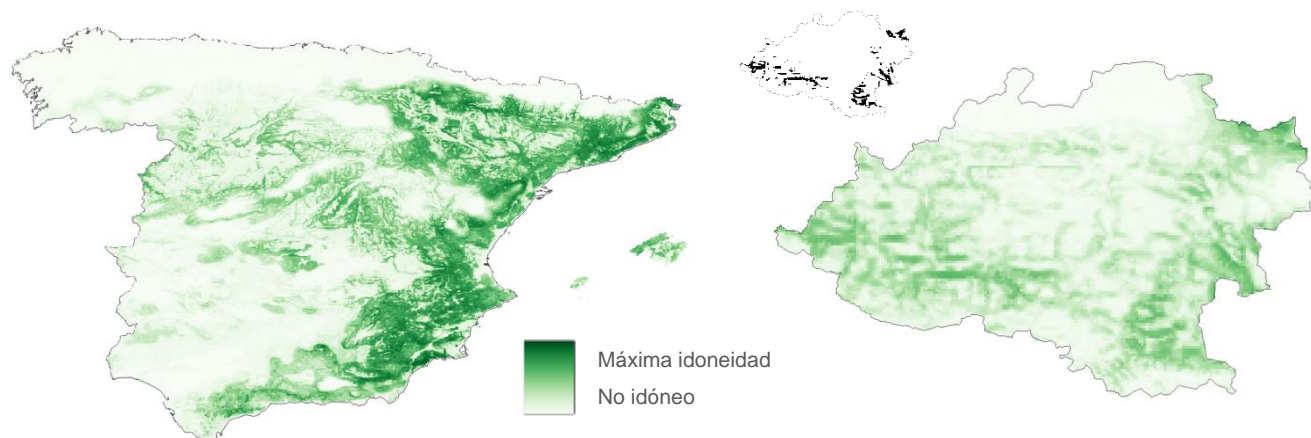


Figura 3.5.7: Distribución potencial de *Pinus halepensis* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia reflejan gran coincidencia con la distribución de presencias actuales de la especie en la España peninsular según el Mapa Forestal de España (MFE, 2018) observado en la figura 3.5.2 con valores de idoneidad elevados en las áreas que presentan abundantes ocurrencias, como el levante y Cataluña y las regiones montañosas cercanas al Mediterráneo. El modelo actual refleja elevada idoneidad para la especie en zonas interiores de la península (susceptibles de sufrir periodos de heladas) como las zonas bajas del centro de la submeseta norte y las zonas bajas del valle del Ebro (Fig. 3.5.7). Las predicciones de la especie para la España peninsular indican que la superficie predicha para la especie es mayor que la ocupada actualmente, lo que ha sido confirmado también por otros autores (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011; Serra-Díaz et al., 2013). Sin embargo, la distribución

predicha para la especie varía según los diferentes trabajos; las predicciones de este estudio son muy semejantes a las de Serra-Díaz et al. (2013) pero difieren considerablemente de las de Felicísimo et al. (2011), que no predice idoneidad para la especie en zonas como el valle del Ebro, levante y en zonas montañosas de Alicante, Murcia y Almería.

En la provincia de Soria, se observa una idoneidad potencial alta para la especie en este periodo, especialmente en la cercanía de las zonas que ocupa actualmente, como el tramo bajo del río Duero en San Esteban de Gormaz y en zonas cercanas a Aragón entre Deza y Arcos de Jalón, y la zona nororiental en las caídas hacia La Rioja de los diferentes valles, entrando con fuerza en Tierra de Ágreda. Otros trabajos desarrollados en la misma área de estudio no indican idoneidad para este periodo en la provincia (Ruiz-Labourdette et al., 2012).

3.5.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

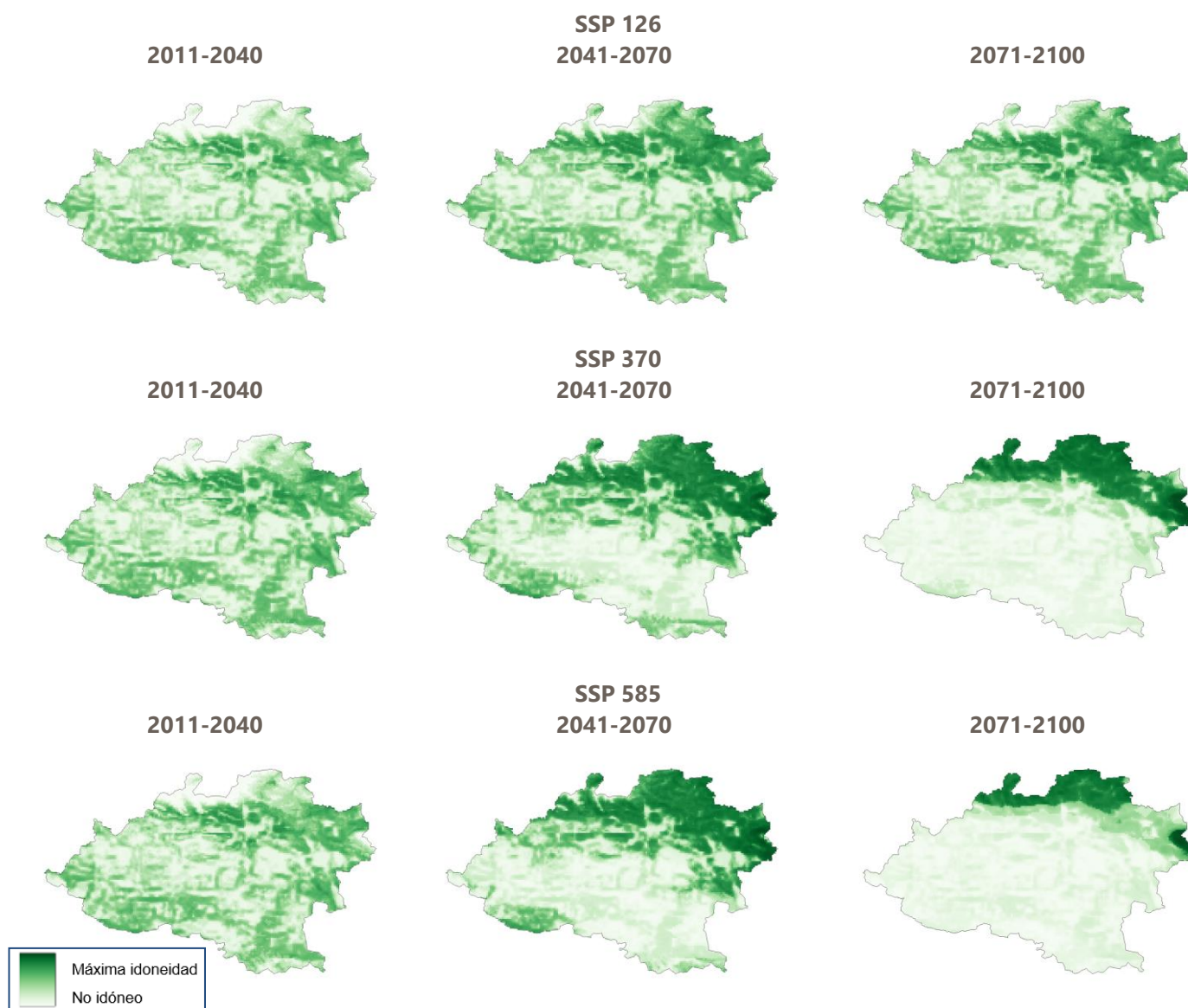
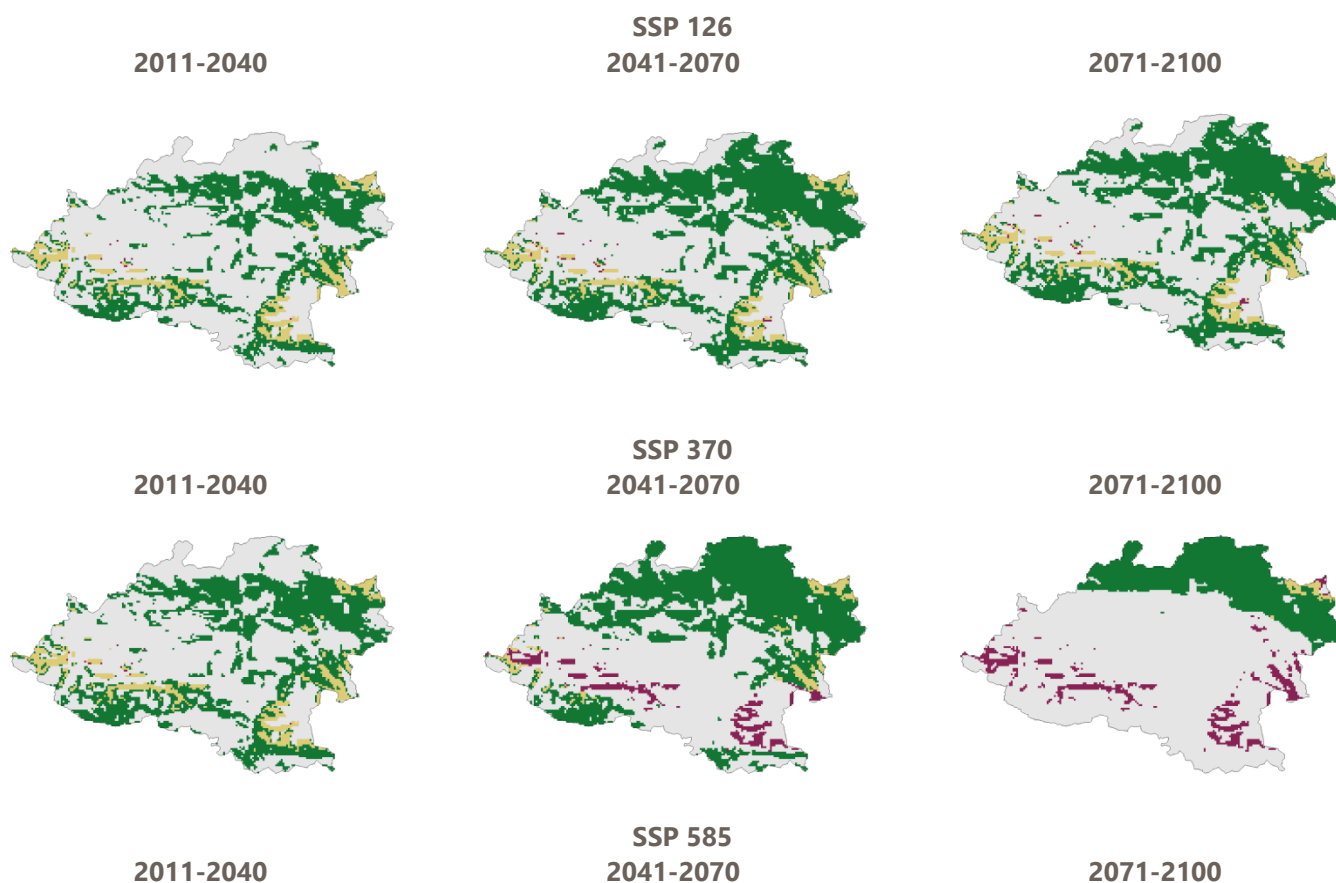


Figura 3.5.8: Distribución potencial de *Pinus halepensis* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Los valores de idoneidad futura para la provincia de Soria reflejan idoneidad alta para el pino carrasco para el periodo 2011-2040 en todas las trayectorias SSP

Para el periodo 2041-2070, la idoneidad aumenta de forma importante en todas las trayectorias en la mitad nororiental de la provincia, especialmente en la zona del Moncayo y Tierras Altas. Si bien en este periodo la idoneidad disminuye ligeramente para la zona del tramo bajo del Duero y de forma importante en el eje Deza-Arcos de Jalón. Para el periodo 2071-2100, se observa una disminución de la idoneidad del pino carrasco en la zona central y sur de la provincia, quedando la especie relegada a las zonas bajas del norte de la provincia (Moncayo, Tierras Altas y Montenegro de Cameros en Tierra de Pinares) para las trayectorias SSP 370 y 585. Es reseñable resaltar el aumento de idoneidad de esta especie en la zona de Montenegro de Cameros, aprovechando la presencia de materiales básicos, cercano a la sierra Cebollera para los periodos 2041-2070 y 2071-2100 y las trayectorias SSP370 y 585.

Seguidamente se presentan los mapas de cambio de áreas predichas como potencialmente idóneas para *Pinus halepensis* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia.



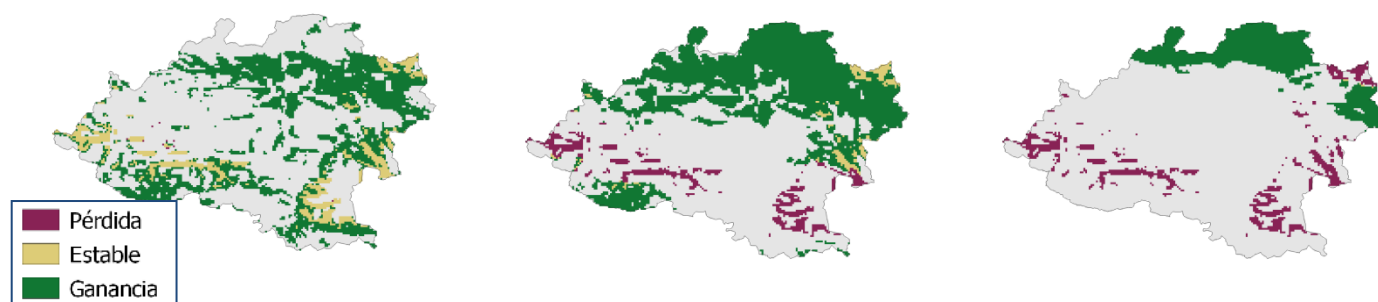


Figura 3.5.10: Mapas de cambio para *Pinus halepensis*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en ese píxel con los siguientes casos: 1) pérdida (**granate**): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (**amarillo**): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (**verde**): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

Para el primer periodo temporal futuro 2011-2040, todas las trayectorias SSP reflejan ganancia y estabilidad en la mayor parte de la predicción del pino carrasco, con ganancia de idoneidad hacia las zonas bajas de la zona de Tierra de Ágreda y Tierras Altas y con estabilidad en el pinar de El Burgo y en el eje Deza-Arcos de Jalón.

Para los tres periodos temporales, la tendencia que se observa en las predicciones es de estabilidad o ganancia de idoneidad en las zonas de baja elevación situadas al norte de la provincia (Tierra de Ágreda, Tierras Altas y Montenegro de Cameros) y estabilidad y posterior pérdida de idoneidad en las poblaciones ubicadas al sur de la provincia (El Burgo, Deza-Arcos de Jalón). Las primeras zonas en aparecer en zonas con pérdida de idoneidad son las ubicadas en Deza-Arcos de Jalón y El Burgo.

Para el periodo 2071-2100 en las trayectorias SSP 370 y 585, se observa una pérdida de la idoneidad de Gómara, ganando la especie idoneidad en las zonas de menor elevación de Tierras Altas, Montenegro de Cameros en Pinares y el Moncayo, aunque con fragmentación de las poblaciones del Moncayo y Tierras Altas por la zona de Ágreda en la trayectoria SSP585.

Es llamativo que la ganancia en superficie potencial predicha para una esta especie tan xerófila y termófila sea hacia el norte de la provincia con pérdida a largo plazo de idoneidad en zonas del sur de la provincia que son actualmente potenciales. Otras predicciones futuras realizadas para esta especie en la Península Ibérica varían en función de la escala espacial del estudio, pero en general coinciden en predecir un aumento de la distribución potencial bajo algunos escenarios climáticos a corto plazo, con una reducción de la superficie potencial a medio y largo plazo (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011). Estos resultados coexisten con trabajos a escala local que predicen un aumento de la distribución de la especie para todos los escenarios climáticos en el Sistema Ibérico y Central en Ruiz-Labourdette et al., (2012), y en poblaciones sur de su distribución en Andalucía en Hidalgo-Triana et al. (2023) y López-Tirado et al. (2018). Asimismo, se ha pronosticado un aumento de la competitividad del pino carrasco (o de su codominancia con *Q. ilex*) frente a otras especies las Sierras Béticas como *P. nigra* and *P. pinaster* por el aumento de las temperaturas y la disminución de precipitaciones (López-Tirado et al., 2018), que harían más competitivo a *P. halepensis* al ser más termófilo y estar mejor adaptado a las condiciones xéricas que otras especies (Sánchez-Salguero et al., 2012).



<i>Pinus halepensis</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	1171	5596	4425	7.3%	34.9%	377.9%	20.7%
	2041-2070	1171	7420	6249	7.3%	46.3%	533.6%	15.3%
	2071-2100	1171	7362	6191	7.3%	45.9%	528.7%	15.3%
SSP 370	2011-2040	1171	6444	5273	7.3%	40.2%	450.3%	18.0%
	2041-2070	1171	6812	5641	7.3%	42.5%	481.7%	6.7%
	2071-2100	1171	3391	2220	7.3%	21.1%	189.6%	3.4%
SSP 585	2011-2040	1171	6005	4834	7.3%	37.4%	412.8%	19.3%
	2041-2070	1171	6155	4984	7.3%	38.4%	425.6%	5.2%
	2071-2100	1171	2083	912	7.3%	13.0%	77.9%	0.3%

Tabla 3.5.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.7.9 para *Pinus halepensis* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

El 7.3% de la provincia de Soria es habitable o idóneo para el pino carrasco (Tabla 3.5.2) en el periodo de referencia (1981-2010). Todos los modelos predicen un aumento de dicha superficie en el futuro. Los escenarios futuros predicen aumentos notables de la superficie, de más del 500% de la superficie potencial en el periodo de referencia, ocupando casi el 50% de la provincia en la trayectoria SSP126 a corto y medio plazo.

La tasa de estabilidad espacial sugiere que la superficie potencial futura del pino carrasco va a desplazarse notablemente (Tabla 3.5.2). Solo el 20% del área potencial del pino carrasco va a seguir teniendo esa aptitud en el período 2011-2040, lo que supone un cambio bastante rápido, que va a mantenerse en un futuro, con predicciones de estabilidad para 2071-2100 de entre 0.3% y 15.3% según la trayectoria SSP (Tabla 3.5.2). La distribución espacial de la especie, se mantendrá en la vecindad de su área potencial en el periodo de referencia. Si bien a medio y largo plazo, se reducirá el solape entre el área potencial futura y el área potencial del periodo de referencia. Esto puede ser un problema para el mantenimiento de las masas actuales y la colonización natural a partir de ellas. Sin embargo, dado que el pino carrasco actualmente ocupa una pequeña parte de su área potencial en Soria, y siendo estas poblaciones procedentes de repoblación, esta falta de solape no supone un problema y deberá considerarse la evolución futura de la especie para planificar sus zonas de repoblación.

3.6 SABINA ALBAR: *JUNIPERUS THURIFERA* L.

3.6.1 RESUMEN EJECUTIVO

Los resultados del estudio indican que el cambio climático no tendrá impactos importantes a corto-medio plazo en los sabinars sorianos, pero sí a largo plazo, y en concreto en las poblaciones de Sierra de Cabrejas y Arcos de Jalón. El comportamiento de esta especie podría ser más resiliente, porque las poblaciones más xerófilas del Valle del Ebro están muy infrarrepresentadas.

La provincia de Soria presenta una idoneidad potencial muy alta para la sabina albar en el periodo de referencia pudiendo ocupar hasta el 80% de la provincia (1981-2010). La zona adecuada es muy superior a la ocupada en la actualidad pudiendo estar presente en toda la provincia menos en cotas elevadas de las sierras de Urbión y Moncayo. Este resultado es concordante con el proceso colonizador de la sabina asociado al abandono de las tierras de cultivo, pero también por su entrada en otras formaciones arbóreas, lo que nos indica que la expansión de la especie en la provincia no estaba limitada por las condiciones

climáticas, si no por las pautas de gestión de los bosques.

Los modelos de la especie obtenidos para los diferentes escenarios de clima futuro indican que la idoneidad de la sabina permanecerá estable (o incluso con ganancia de idoneidad en algunas zonas) en la mayor parte de la provincia para el primer periodo temporal 2011-2040 para las tres trayectorias SSP. Luego a corto y medio plazo la capacidad de mantenimiento de las zonas idóneas para la especie es alta. Sin embargo, los escenarios menos optimistas predicen una importante reducción hacia final de siglo, mientras que el más optimista predice un mantenimiento de la idoneidad para la especie en la mayor parte de la provincia.

Los resultados del estudio indican que el cambio climático no tendrá impactos importantes a corto-medio plazo en los sabinars sorianos, pero sí a largo plazo. En el caso de la sabina albar los modelos tienen cierta incertidumbre sobre su comportamiento en los contextos más áridos, ya que las poblaciones de las zonas más secas del Valle del Ebro soportan condiciones extremadamente cálidas y áridas, por lo que la especie podría tener más tolerancia, al menos en los ambientes más secos.

3.6.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

La sabina albar es una conífera perennifolia que forma bosques abiertos. Se trata de un endemismo mediterráneo occidental con presencia en Europa, sobre todo España, pero puntualmente en los Pirineos, Alpes franceses e italianos y Córcega, así como en el Magreb (Alto y Medio Atlas en Marruecos y montañas Aures en Argelia) (Gastón et al., 2016). En estos territorios ocupa un gran rango altitudinal, desde los 140 m.s.n.m. (Sierra del Monegrillo, Zaragoza) hasta los por encima de los 3.000 m.s.n.m. en Marruecos (Atlas) (Blanco et al., 1997).

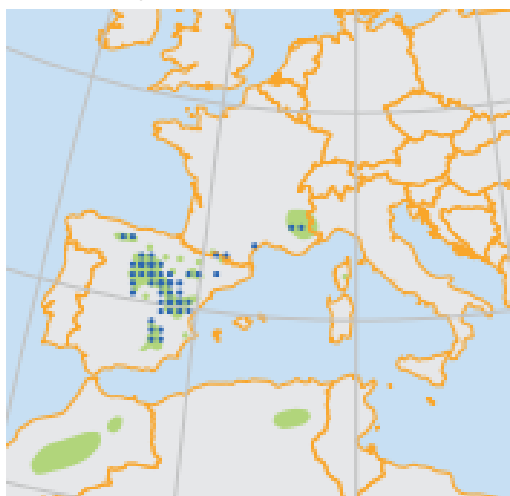


Figura 3.6.1. Izquierda: Distribución natural de *Juniperus thurifera*. Fuente: European Atlas of Forest Tree Species. Gastón González et al. 2016. Derecha: Sabinar en Laguna de Judes.

En términos de superficie, España alberga la mayor extensión de sabinar, situándose principalmente en la parte oriental de la Meseta Norte y el Sistema Ibérico (parameras de Burgos, Soria, Guadalajara, Cuenca y Teruel) y el valle del Ebro, en ambientes con climas fuertemente continentales. Su presencia se extiende más allá de este núcleo con poblaciones dispersas, destacando las de Cordillera Cantábrica (cuenca del río Luna, en León, y Peña Lampa en Palencia) y de la Cordillera Bética, con pequeños enclaves en las provincias de Jaén, Almería y Granada.

La sabina habita en parameras y valles de clima continental, siendo más frecuente en sustratos calizos, pero también puede vivir en terrenos silíceos y tolera los yesos (do Amaral Franco, 1986b), siendo capaz de vivir tanto en suelos esqueléticos como en suelos bien desarrollados. Estas características también le confieren una gran amplitud ecológica que se aplica también a las condiciones climáticas ocupando ambientes con inviernos fríos y veranos calurosos y tolerante a periodos de aridez muy intensos, especialmente en el valle del Ebro. La elevada resistencia a la continentalidad se manifiesta por su capacidad de aguantando temperaturas de hasta -25°C en invierno y de 40°C en verano (Blanco et al., 1997).

La sabina es uno de los árboles nativos más representativos de la flora soriana, extendiéndose por una gran parte de la de la provincia, con un foco principal en el centro-sudoeste (Sierra de Cabrejas, Cañón del Río Lobos, Gormaz, Ayllón, Andaluz...), otra población importante se halla en la Comarca de Arcos de Jalón, donde destacan los sabinares de Chaorna e Iruecha. Finalmente, aparecen sabinares en zonas al sur del Moncayo, alrededor del pueblo de Ciria. En Soria, las sabinas constituyen formaciones arbóreas abiertas monoespecíficas mezcladas con *Juniperus communis* de porte arbustivo. Este carácter monoespecífico está cambiando notablemente por el cese de la ganadería (Olano et al. 2012) y cada vez es más común la formación de masas mixtas con quercíneas (*Quercus ilex*, *Q. faginea*) y diferentes especies de pinos (Segura et al., 2000).

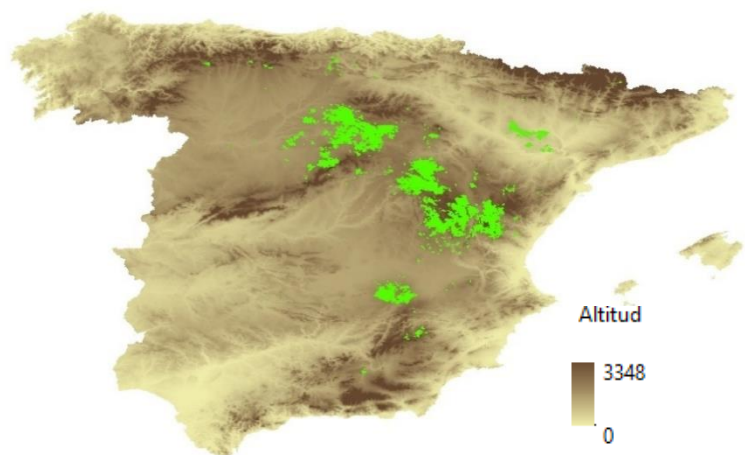


Figura 3.6.2: Distribución de *Juniperus thurifera* en España. Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

3.6.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Juniperus thurifera* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.6.3).

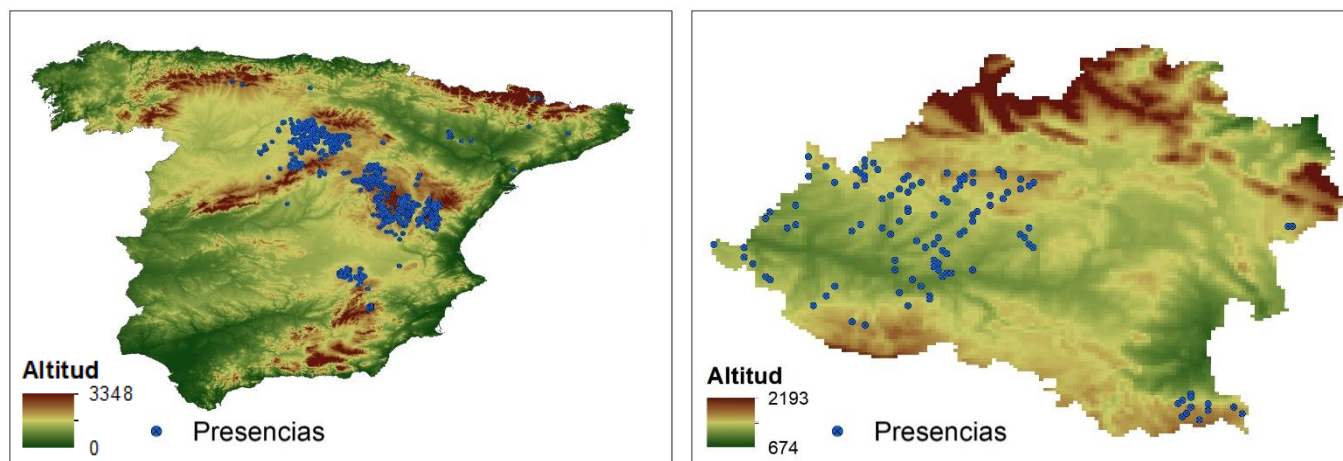
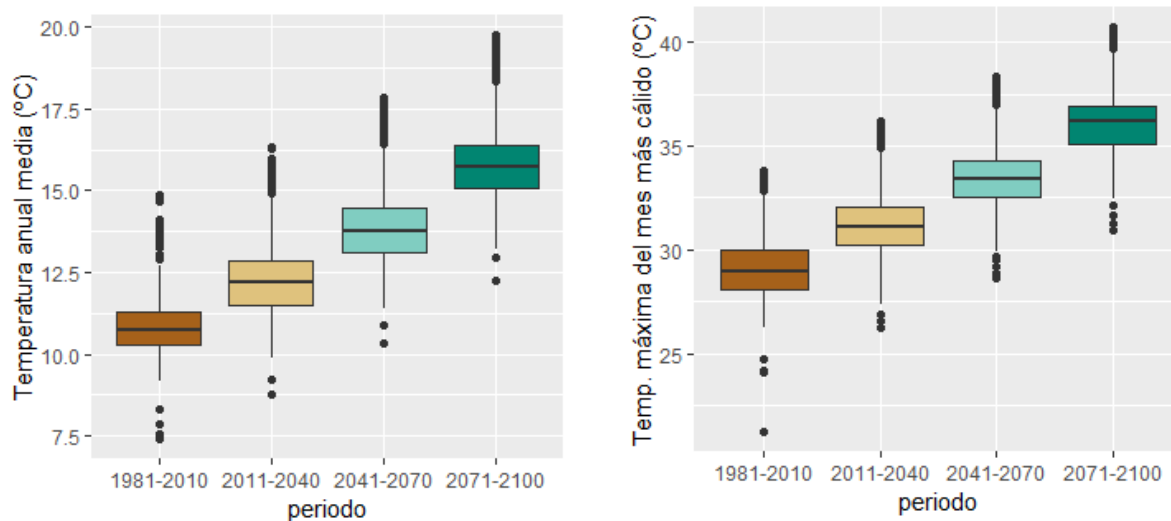


Figura 3.6.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Juniperus thurifera* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

La sabina albar habita en lugares con temperatura media anual de 10 a 11.5°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 27.5 y 30°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 500-625(1250) mm anuales con 70-90 (180) mm en verano (Fig. 3.6.4). las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones continúen estables en sus valores.



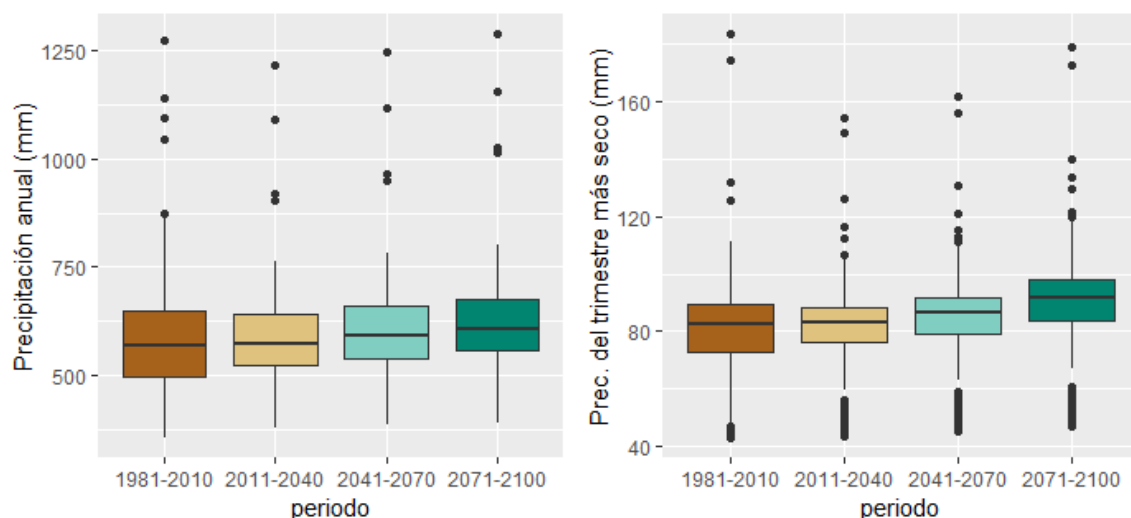


Figura 3.6.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Juniperus thurifera* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.6.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Juniperus thurifera* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza < 5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para la sabina albar. Como se observa en la figura 3.6.5, las variables están correlacionadas por grupos.

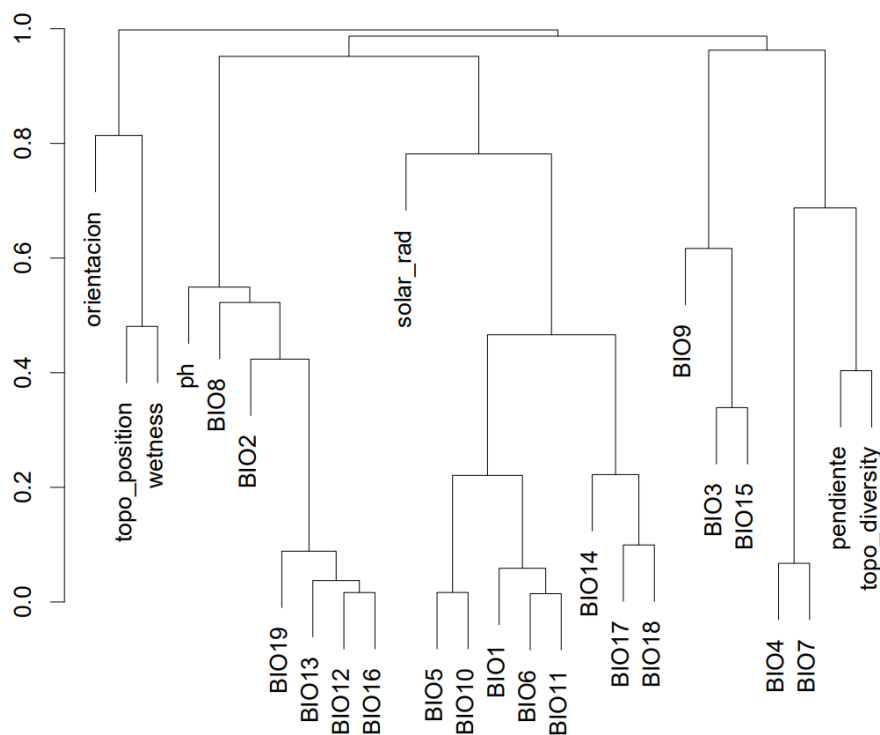


Figura 3.6.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Juniperus thurifera*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Juniperus thurifera* fueron: Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, orientación, pH, solar rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.6.1: Variables usadas en los modelos de *Juniperus thurifera*.

3.6.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Juniperus thurifera* se han dividido las 920 presencias en 736 para training (80%) y 184 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.95 lo que indica que el modelo generado tiene muy alta capacidad predictiva.

La variable más importante (Fig. 3.6.6) es Bio 6 (Temperatura mínima del mes más frío). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido), que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

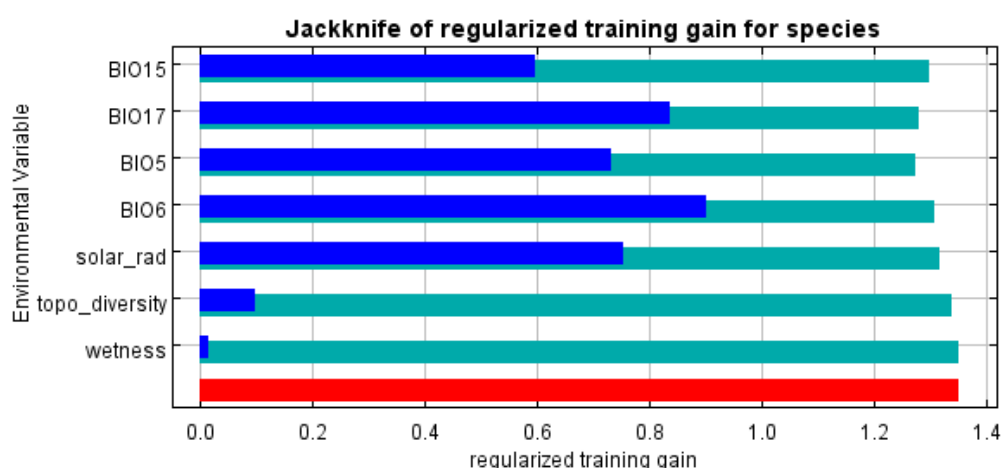


Figura 3.6.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Juniperus thurifera*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

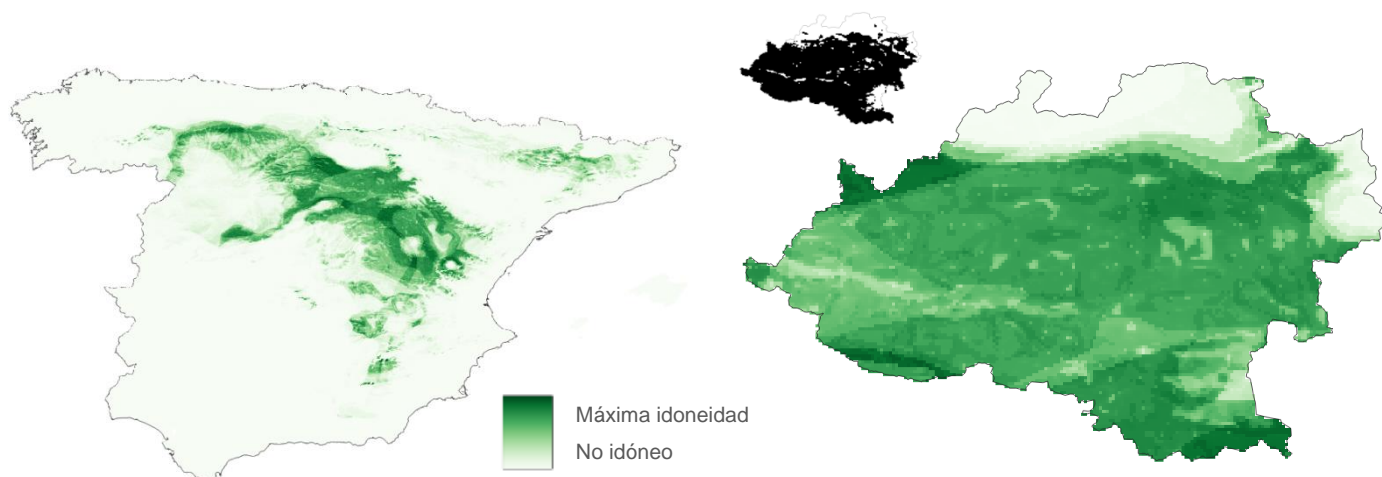


Figura 3.6.7: Distribución potencial de *Juniperus thurifera* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.6.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (Felicísimo et al., 2011), con un rango de distribución mucho más amplio que a la distribución actual de la especie, expandiéndose a la Cordillera Cantábrica, centro-oeste de la submeseta norte, Sistema Central, Sistema Ibérico, Sierras Béticas y valle del Ebro. Se aprecia que las zonas con mayores valores de idoneidad son aquellas zonas con mayor presencia actual de la especie (Sistema Ibérico y Central), además de la parte oriental de la submeseta norte, donde los modelos de Felicísimo et al., (2011) dan menor idoneidad potencial. Se observa que el modelo actual refleja idoneidad actual para la especie en zonas donde no se encuentra, como en la cordillera Penibética. En la provincia de Soria, se observa una idoneidad potencial muy alta para este periodo en toda la provincia, menos en las zonas elevadas y húmedas de las sierras Cebollera, Urbión y Moncayo. Esta discrepancia sugiere que el área potencial de la sabina albar es mucho más amplia que su área actual, donde se ha mantenido gracias a un manejo silvopastoral específico que le ha favorecido (DeSoto et al., 2010) frente a otras especies más competitivas. Por otra parte, el carácter pionero de la especie le está permitiendo colonizar tanto espacios abiertos (Escribano-Ávila et al., 2012), como otras formaciones forestales (Olano et al. 2012). Incluso la distribución potencial podría ser mucho mayor, porque estos modelos infrarrepresentan las poblaciones más xéricas del Valle del Ebro de las que en la actualidad solo quedan pequeños retazos, pero que en el pasado tuvieron distribuciones muchos más extensos (Blanco et al. 1997).

3.6.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

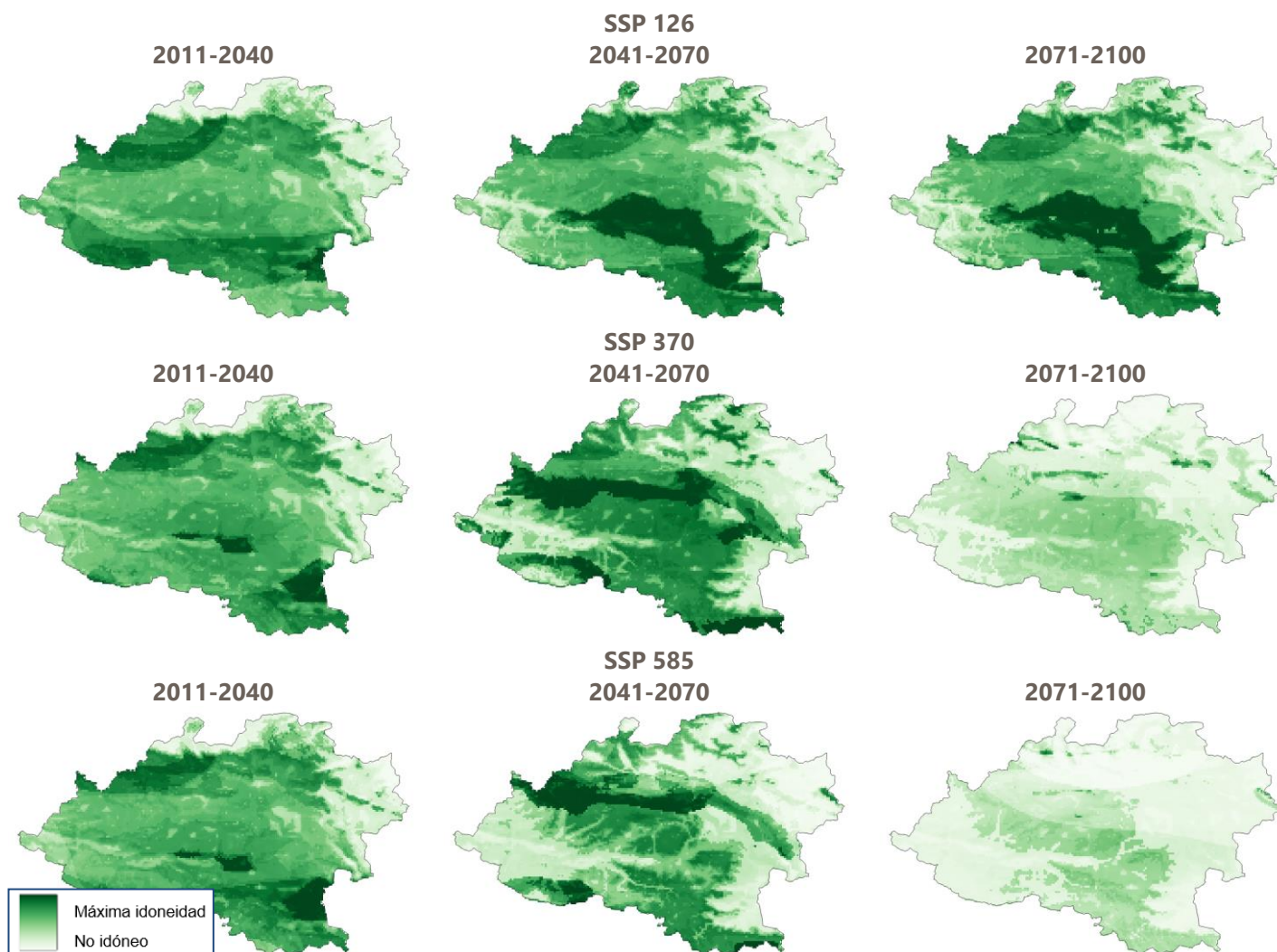


Figura 3.6.8: Distribución potencial de *Juniperus thurifera* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Los valores de idoneidad futura para la provincia de Soria reflejan idoneidad muy alta para la sabina albar para el periodo 2011-2040 en todas las trayectorias SSP, que disminuye para el periodo 2041-2070 en las trayectorias SSP 370 y 585, pero prácticamente estable en la SSP 126). Las zonas en que la especie puede experimentar un retroceso se localizan en las zonas más secas del extremo suroriental de la provincia (Arcos de Jalón) y toda la provincia menos el tramo bajo del Duero para las trayectorias SSP 370 y 585. Para el periodo 2071-2100, se observa una disminución importante de la idoneidad de la sabina en la zona central de la provincia, quedando la especie relegada al sur de la provincia por la ribera del Duero, Tierras de Berlanga, Almazán y Medinaceli y al noreste de la provincia en el Moncayo y pequeñas zonas de Pinares para las trayectorias SSP 370 y 585.

Seguidamente se presentan los mapas de cambio de áreas predichas como potencialmente idóneas para *Juniperus thurifera* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia (Fig.3.6.9).

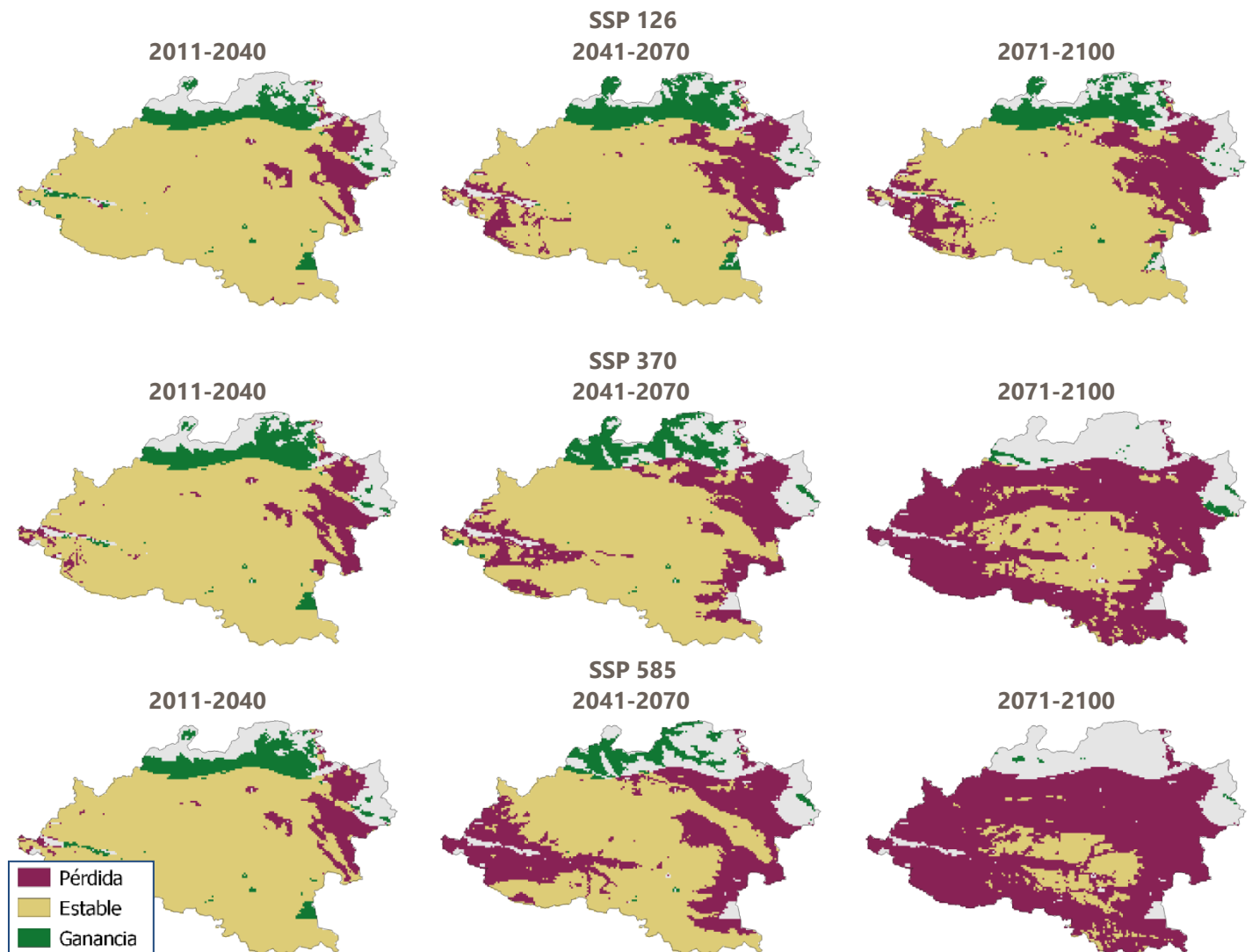


Figura 3.6.9: Mapas de cambio para *Juniperus thurifera*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (granate): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (amarillo): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (verde): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

Los mapas de cambio reflejan ganancia en el norte de la provincia en Tierras Altas, Pinares y por la zona de Moncayo en todos los periodos temporales y trayectorias SSP (muy pequeñas en la trayectoria SSP585 del periodo 2071-2100). Además, en el periodo temporal 2011-2040 se ve ganancia de superficie idónea para la especie en la zona de Santa María de Huerta y al sur del Moncayo.

La mayor parte de la provincia refleja estabilidad para la especie en todas trayectorias SSP para el periodo 2011-2040. Cuanto más alejado es el periodo temporal y menos optimista es la trayectoria SSP, en los dos escenarios más pesimistas (SSP370, SSP585) mayor es la pérdida de hábitat para la especie, siendo especialmente negativo en el escenario SSP585 y el período 2071-2100. Las zonas de pérdida de idoneidad para la sabina aparecen en las zonas cercanas al tramo bajo del Duero en El Burgo para el periodo 2041-2070



en las trayectorias SSP 370 y 585 y se extienden, quedando solo estable la zona central de la provincia para esas mismas trayectorias en el periodo temporal 2071-2100. Para las trayectorias SSP370 y SSP585 y periodo temporal 2071-2100, se observa ganancia de idoneidad en las zonas de Tierras Altas y Moncayo y una gran zona estable en centro de la provincia en Berlanga, Almazán y una pequeña parte de Medinaceli.

Estos patrones con una significativa reducción del área potencial respecto al periodo de referencia, ya se han mencionado en otros trabajos de modelización para la misma especie (Felícísimo et al., 2011 y Ruiz-Labourdette et al., 2012). Una incertidumbre importante en la sabina albar es la presencia de poblaciones en ambientes muy áridos, en el centro del valle del Ebro, con buenos crecimientos (Olano et al., 2017) en condiciones de una fuerte aridez, por lo que es posible que la especie tenga mayor capacidad de tolerancia a la sequía que la sugerida por estos modelos, al menos sobre suelos profundos como los que ocupa en el centro del Valle del Ebro. En este sentido su capacidad de ajustar su crecimiento a cambios en la disponibilidad de agua de modo muy oportunista, sugiere que al menos algunas poblaciones podrían crecer en condiciones más adversas (Camarero et al., 2010; Olano et al., 2015).

<i>Juniperus thurifera</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	13173	13362	189	82.1%	83.3%	1.4%	90.4%
	2041-2070	13173	12267	-906	82.1%	76.5%	-6.9%	80.8%
	2071-2100	13173	11306	-1867	82.1%	70.5%	-14.2%	75.2%
SSP 370	2011-2040	13173	13119	-54	82.1%	81.8%	-0.4%	88.5%
	2041-2070	13173	11179	-1994	82.1%	69.7%	-15.1%	75.2%
	2071-2100	13173	3769	-9404	82.1%	23.5%	-71.4%	27.3%
SSP 585	2011-2040	13173	13305	132	82.1%	83.0%	1.0%	89.5%
	2041-2070	13173	8947	-4226	82.1%	55.8%	-32.1%	61.2%
	2071-2100	13173	1952	-11221	82.1%	12.2%	-85.2%	14.5%

Tabla 3.6.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.1.9 para *Juniperus thurifera* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles que mantienen estable su condición de idoneidad entre el periodo de referencia y el futuro (son idóneos en el periodo de referencia e idóneos en el periodo futuro).

Como se puede observar en la tabla 3.6.2, la provincia de Soria presenta un 82.1% de la superficie como habitable o idónea para la especie en el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie aumenta para el periodo 2011-2040 en las trayectorias SSP126 y 585 hasta un 83.3% y 83.0% lo que indica un aumento de la superficie de zonas idóneas cercano al 1% para la especie en la provincia a corto plazo. Sin embargo, la superficie idónea para la especie se reduce para el resto de periodos temporales (2041-2070 y 2071-2100) entre un 6.9% en el SSP126 y un 85.2% en el SSP585, hasta ocupar potencialmente un 76.5% (en el SSP126) y un 12.2% (del SSP585) de la provincia.

La tasa de estabilidad espacial nos indica si las zonas que ocupa la sabina en diferentes escenarios son las mismas que potencialmente ocupa en el periodo de referencia, o bien se produce un cambio en las zonas adecuadas para la especie (Tabla 3.6.2). En el caso de la sabina, el solape espacial entre el área potencial futura y el área potencial del periodo de referencia es muy elevado especialmente en todas las trayectorias SSP del periodo 2011-2040 (cercano al 90%) y elevado (superior al 60%) en las trayectorias SSP370 y 585 del periodo temporal 2041-2070. Por tanto, a corto y medio plazo la especie se mantendrá cerca de las áreas potenciales del periodo de referencia, cercanas a una parte de su área de distribución actual en la provincia.

3.7 HAYA: *FAGUS SYLVATICA* L.

3.7.1 RESUMEN EJECUTIVO

Los resultados del estudio indican que el cambio climático tendrá un impacto muy severo en la futura distribución del haya y en concreto en las poblaciones situadas en la provincia de Soria, particularmente en las poblaciones de la sierra del Moncayo.

El área potencial para el haya en la provincia de Soria en el periodo de referencia (1981-2010) es muy superior a la superficie ocupada en la actualidad, lo que refleja cambios de uso en muchas de las zonas históricas del hayedo. El haya se localiza en las Sierras más altas del noroeste de la provincia (alineación Urbión-Piqueras) y en el macizo del Moncayo. Esta zona idónea se reduce de modo drástico en todos los modelos,

pronosticando una desaparición superior al 90% de zonas idóneas para el haya ya en el período 2011-2040.

Estos impactos en la distribución predicha del haya se deben principalmente a la sequía y al aumento de temperaturas, lo que aumentaría la evapotranspiración y el estrés hídrico, reduciendo su competitividad en áreas que actualmente ocupa. No obstante, estos resultados no recogen factores que pueden suavizar los efectos del cambio climático en estas poblaciones. Estos factores son, por ejemplo, las diferencias genéticas de las poblaciones de la especie debidas a las adaptaciones locales que permiten una respuesta diferente frente a la sequía o la influencia que las nieblas tienen en el aporte hídrico para la especie, especialmente determinante en los meses de verano.

Los resultados del estudio indican que el cambio climático tendrá impactos importantes en la futura distribución del haya en la provincia de Soria. Estos resultados indican que la gestión de esos bosques debe ser prioritaria para aumentar su resiliencia al cambio climático.

3.7.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

El haya es una especie caducifolia ampliamente distribuida por los bosques del centro-oeste de Europa, constituyendo una de las especies caducifolias de mayor interés económico. De norte a sur está naturalmente distribuida desde el sur de Escandinavia hasta Sicilia y desde España donde se sitúan sus poblaciones más occidentales hasta el noroeste de Turquía donde se sitúan las poblaciones más orientales (von Wuehlisch, 2008). En cuanto a su rango altitudinal, en el Norte de Europa aparece a nivel del mar mientras que en la parte meridional de su distribución suele ser una especie de montaña, llegando a alcanzar 2350 m.s.n.m. en su límite sur absoluto en Sicilia.



Figura 3.7.1. Izquierda: Distribución natural de *Fagus sylvatica*. Fuente: EUFORGEN. <https://www.euforgen.org/> Derecha: Hayedo mezclado con pinar de *P. sylvestris* en el Puerto de Santa Inés. Fuente: Banco de imágenes de Cesefor.

En la Península Ibérica ocupa buena parte del tercio septentrional orlando los sistemas pirenaico y cantábrico, con masas en el Sistema Ibérico y las cordilleras catalanas, y hacia el centro en manifestaciones

aisladas en el Sistema Central (Rocha Afonso, 1990). Estas poblaciones, junto con las de los Puertos de Beceite en Tarragona, constituyen las más meridionales de la especie en la Península Ibérica, ocupando espacios aislados en Somosierra y Sierra de Ayllón (límites de Madrid, Guadalajara y Segovia) y Sierra de la Peña de Francia, en Salamanca, bajo macroclimas más xéricos (Blanco et al., 1997), pero ocupando zonas con condiciones más húmedas y en las que ha ocurrido una expansión del haya en tiempos recientes (Sánchez de Dios et al., 2016).

En la Península Ibérica se comporta como una especie de montaña, en laderas y fondos de valle en climas frescos y húmedos, ocupando un amplio rango de altitudes, desde los 50 m.s.n.m. (Asturias) hasta 1950 m.s.n.m. en la sierra de Ayllón (Blanco et al., 1997). Su carácter fuertemente competitivo y el manejo hacen que generalmente forme bosques densos monoespecíficos si bien puede aparecer en bosques mixtos con robles, abetos, acebos y pinos. Es indiferente a la naturaleza del sustrato, pero suele preferir suelos frescos, profundos, siendo muy sensible al encharcamiento, lo que limita su capacidad de compensación edáfico en ombroclimas más secos.

En Soria, se circunscribe a las zonas más húmedas del tercio septentrional, ligado a las sierras más elevadas (sierra Cebollera, la sierra de Urbión) desde los 1200 m, formando masas relativamente extensas, que se continúan en las provincias limítrofes. Destaca también la población de la Sierra de Moncayo, que junto con la población aragonesa constituyen un bosque aislado (Segura et al., 2000).

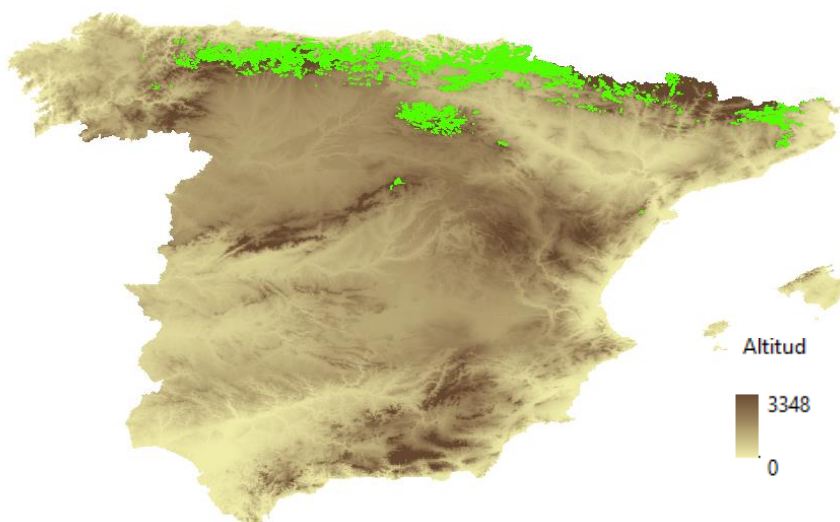


Figura 3.7.2: Distribución de *Fagus sylvatica* en España.
Fuente: Mapa Forestal de España, 2018

El haya se ve limitada por las temperaturas estivales elevadas, tolera bien el frío invernal, pero es sensible a las heladas primaverales (Olano et al., 2021; Sangüesa-Barreda et al., 2021) lo que constituye uno de los principales factores limitantes para su expansión en el centro peninsular. En cuanto a las precipitaciones, esta especie no tolera la sequía estival, necesitando al menos 150 mm en los meses de verano y compensando esta sequedad con una elevada humedad ambiental debida a la persistencia de las nieblas (Blanco et al., 1997). Sin embargo, su crecimiento parece más dependiente de las condiciones en años anteriores (Olano et al., 2022; 2023).

3.7.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Fagus sylvatica* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.7.3).

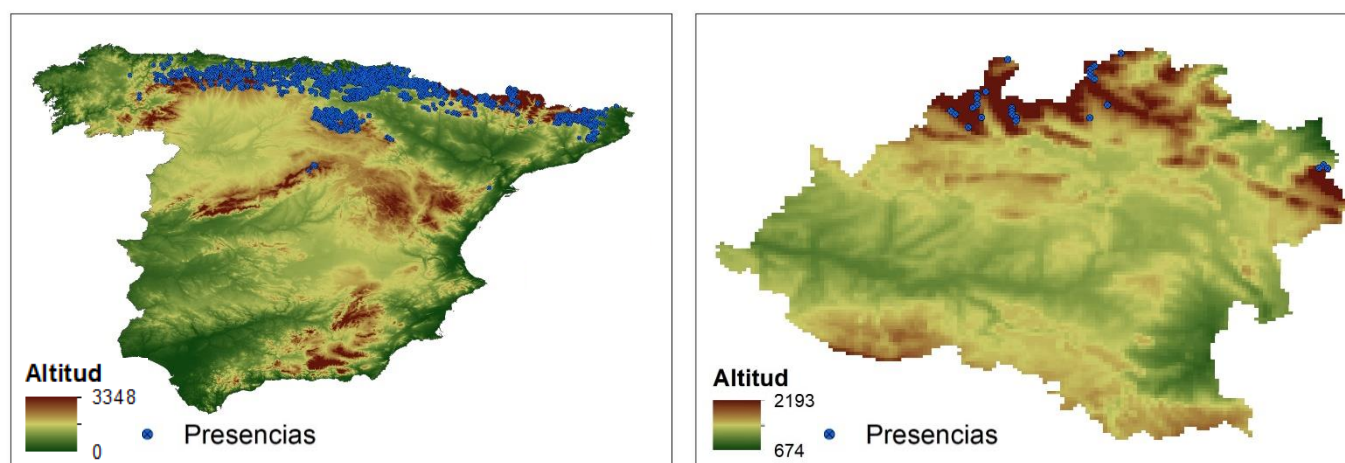
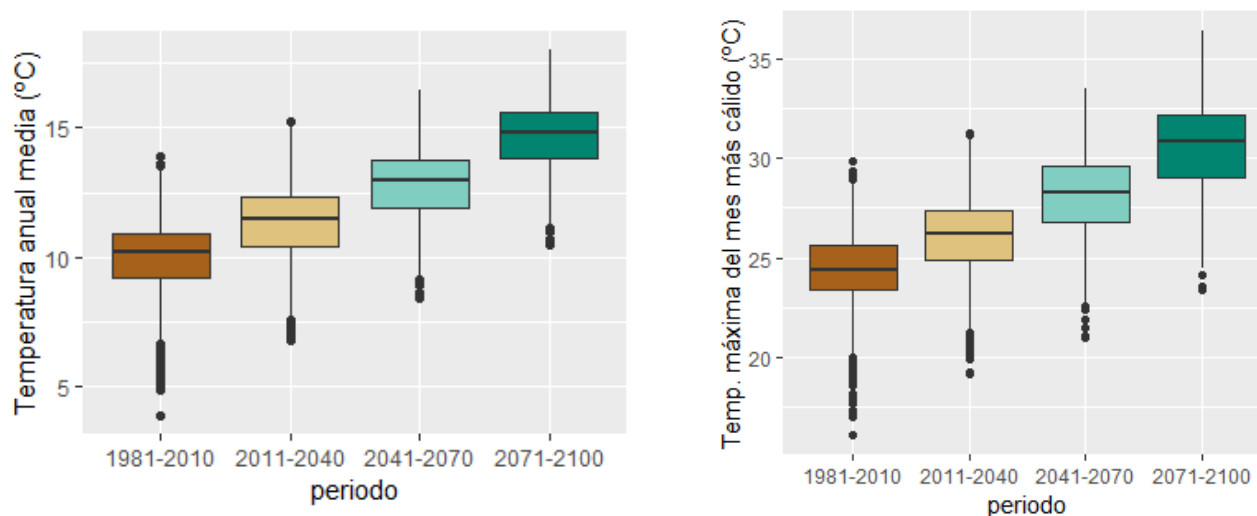


Figura 3.7.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Fagus sylvatica* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

El haya habita en lugares con temperatura media anual de 9 a 11°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 23 y 26°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 750-1300(2000) mm anuales con 100-190(350) mm en verano (Fig. 3.7.4). Las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones desciendan ligeramente a corto plazo y aumenten a largo plazo.



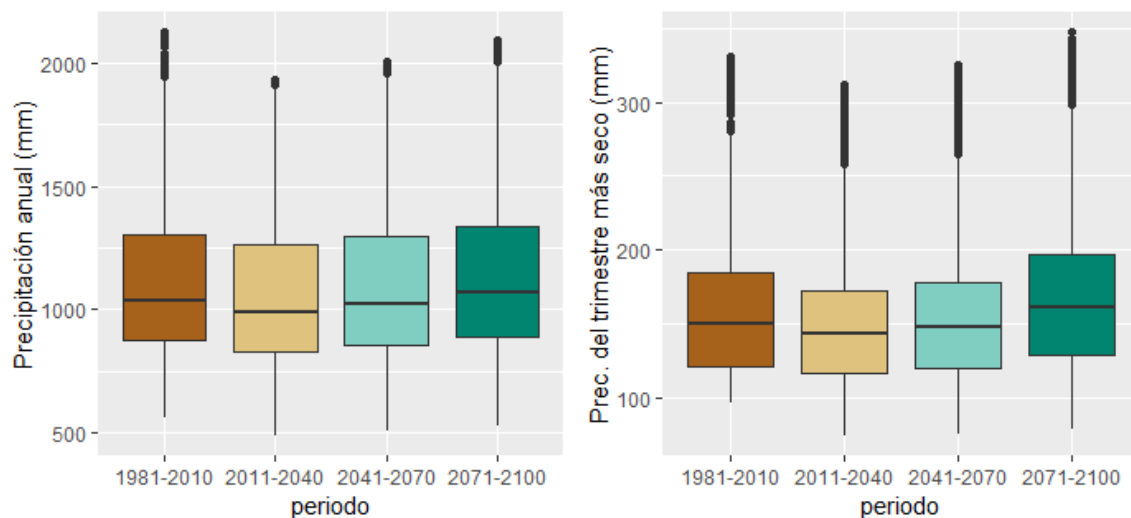


Figura 3.7.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Fagus sylvatica* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.7.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Fagus sylvatica* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza < 6).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para el haya. Como se observa en la figura 3.7.5, las variables están correlacionadas por grupos.

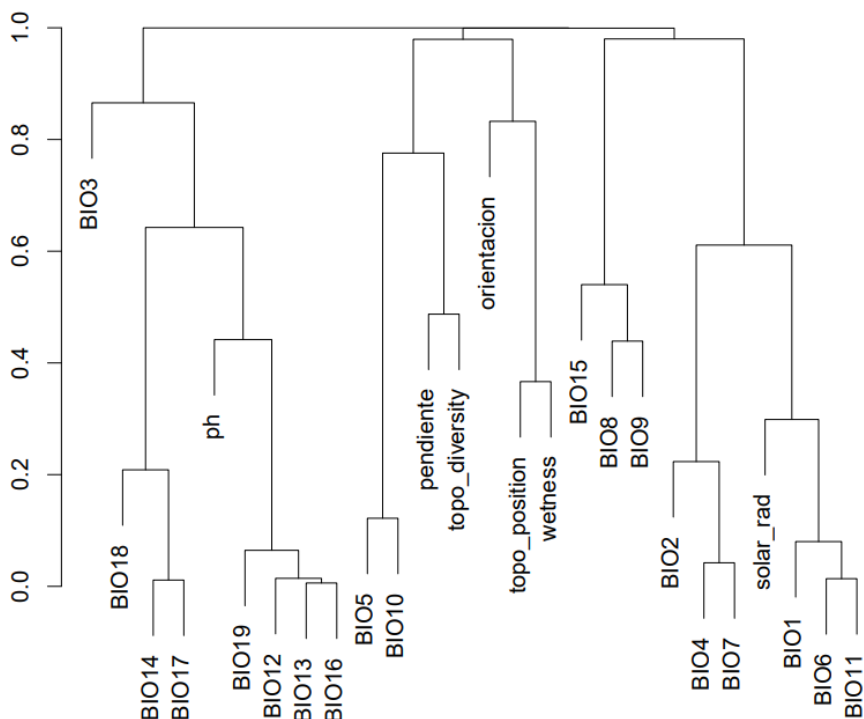


Figura 3.7.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Fagus sylvatica*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Fagus sylvatica* fueron (tabla 3.7.1): Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, orientación, pH, solar rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.7.1: Variables usadas en los modelos de *Fagus sylvatica*.

3.7.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Fagus sylvatica* se han dividido las 2009 presencias en 1607 para training (80%) y 402 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.97 lo que indica que el modelo generado tiene muy alta capacidad predictiva.

La variable más importante (Fig. 3.7.6) es Bio 17 (precipitación trimestre más seco). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es Bio 15 (Estacionalidad en la precipitación), que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

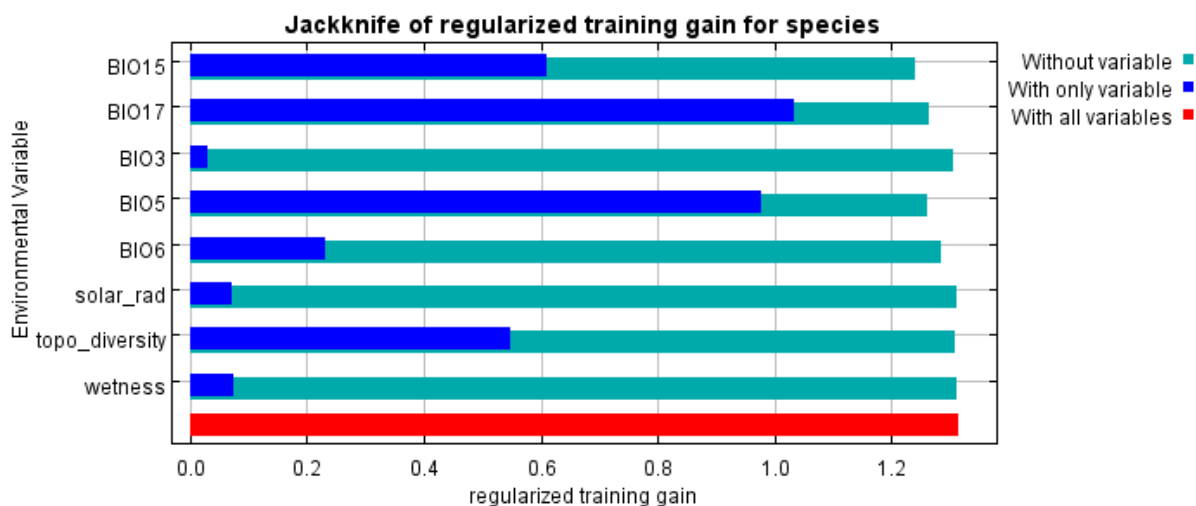


Figura 3.7.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Fagus sylvatica*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

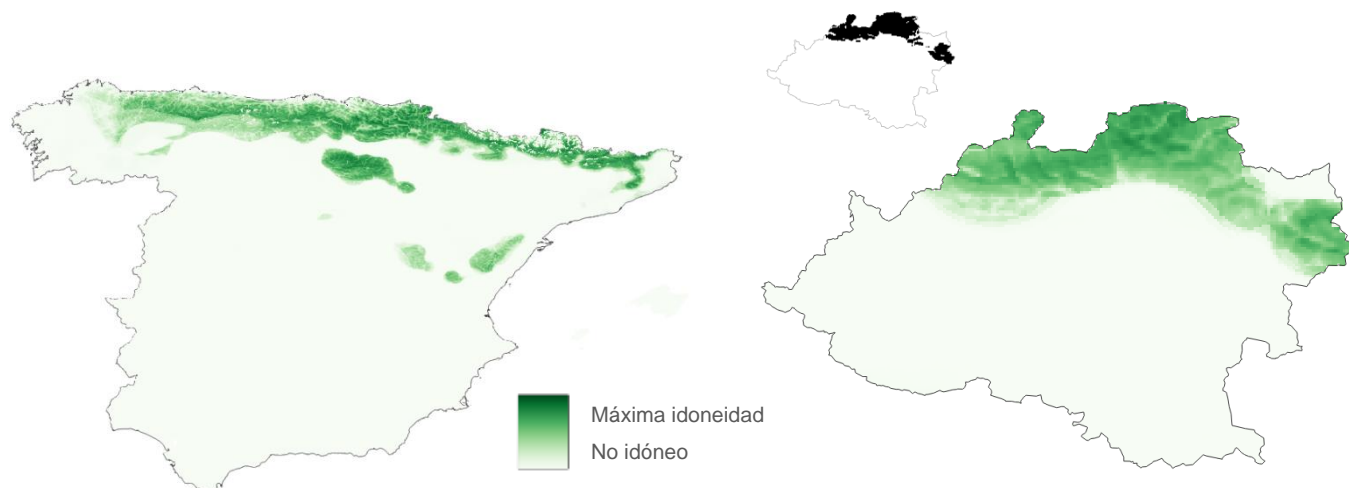


Figura 3.7.7: Distribución potencial de *Fagus sylvatica* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.7.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (del Río et al., 2018; Felicísimo et al., 2011), reflejando una gran coincidencia con la distribución de presencias actuales de la especie en la España peninsular (cordillera Cantábrica, montes vascos, Sistema Ibérico y Pirineos), pues las zonas con mayores valores son áreas que presentan abundantes ocurrencias. Se observa que el modelo actual refleja idoneidad actual para la especie en zonas donde actualmente no se encuentra, como en la sierra de Guadarrama, Serranía de Cuenca y sierra de Javalambre. También amplía su potencialidad respecto a su distribución presente desde Asturias hacia las sierras costeras de Lugo coincidiendo con del Río et al., (2018) y Felicísimo et al., (2011). En la provincia de Soria, se observa una idoneidad potencial alta para este periodo en la cercanía de las zonas que ocupa actualmente, en las sierras de Urbión y Cebollera hasta Tierras Altas y en la sierra del Moncayo.

Es de destacar que el área potencial de los hayedos es más extensa que la actual, lo que se debe a patrones de manejo histórico que han reducido su superficie transformando los bosques de haya principalmente en pastizales y pinares de pino silvestre, pero también en acebedas. Hay que destacar que una parte significativa de los pinares de silvestre sitúan sobre ambiente potencial de hayedo. En algunas zonas donde en la actualidad no hay resto de hayas, como por ejemplo al sur del Moncayo en la zona de Borobia, sí que hay referencias históricas de existencia de un hayedo. En general, en ausencia de un manejo el hayedo se expandiría en muchas zonas, como está ocurriendo en su límite sur (Sánchez de Dios et al., 2016).

3.7.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

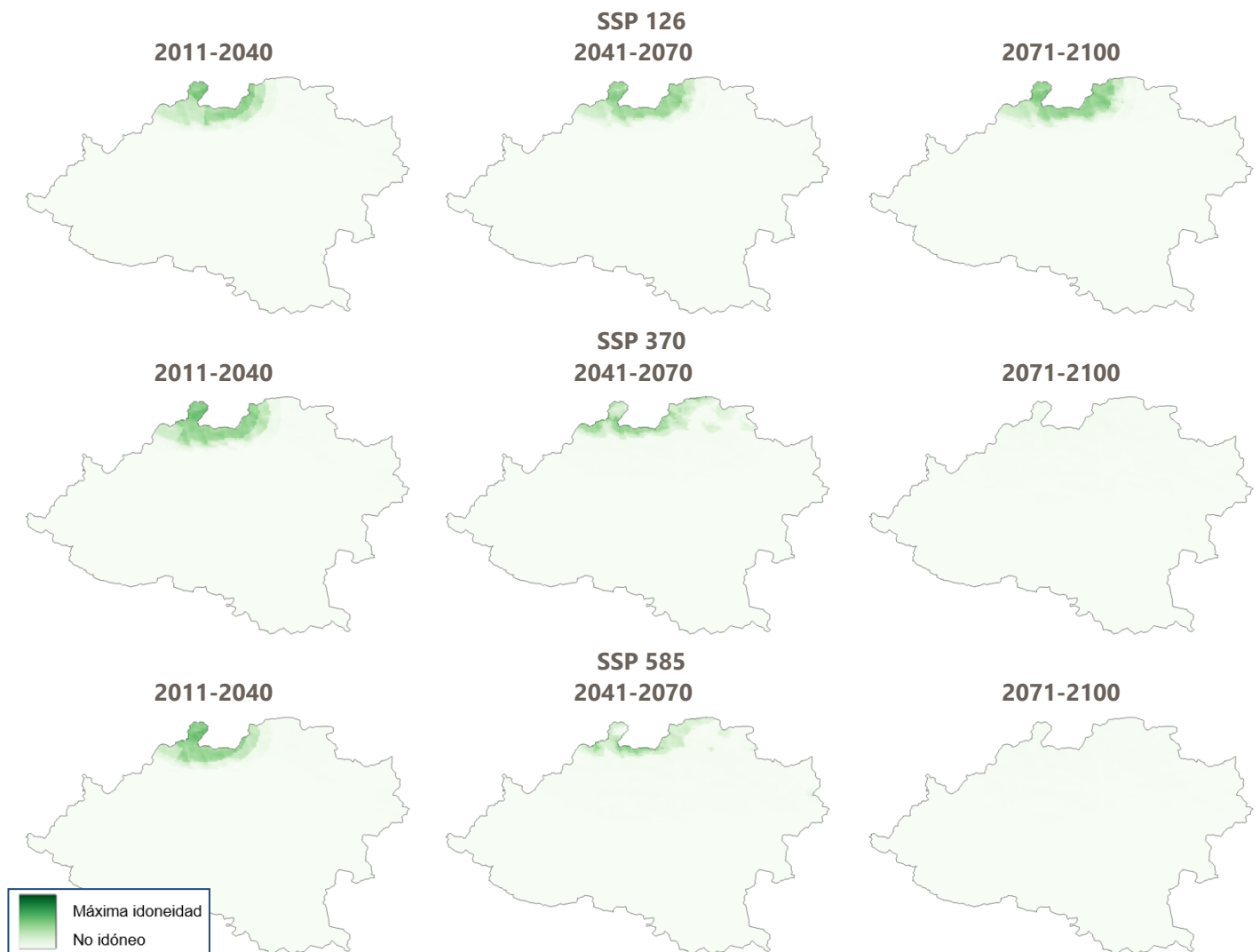


Figura 3.7.8: Distribución potencial de *Fagus sylvatica* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Para la provincia de Soria los valores de idoneidad futura para el haya (Fig. 3.7.8) reflejan una fuerte disminución en todas las trayectorias SSP. La magnitud de esta disminución es muy elevada para el periodo 2011-2040 pero según se aprecia más el efecto del calentamiento global su área va reduciéndose de modo importante en el periodo 2041-2070, especialmente en los escenarios de mayores emisiones. De hecho, en las trayectorias SSP 370 y 585 los hayedos no estarían presentes en el periodo temporal 2071-2100, donde las predicciones indican que el haya tendría un papel testimonial o directamente no encontraría áreas idóneas en la provincia.

Esta situación se aprecia con nitidez en los mapas de cambio de áreas predichas como potencialmente idóneas para *Fagus sylvatica* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia (Fig.3.7.9).

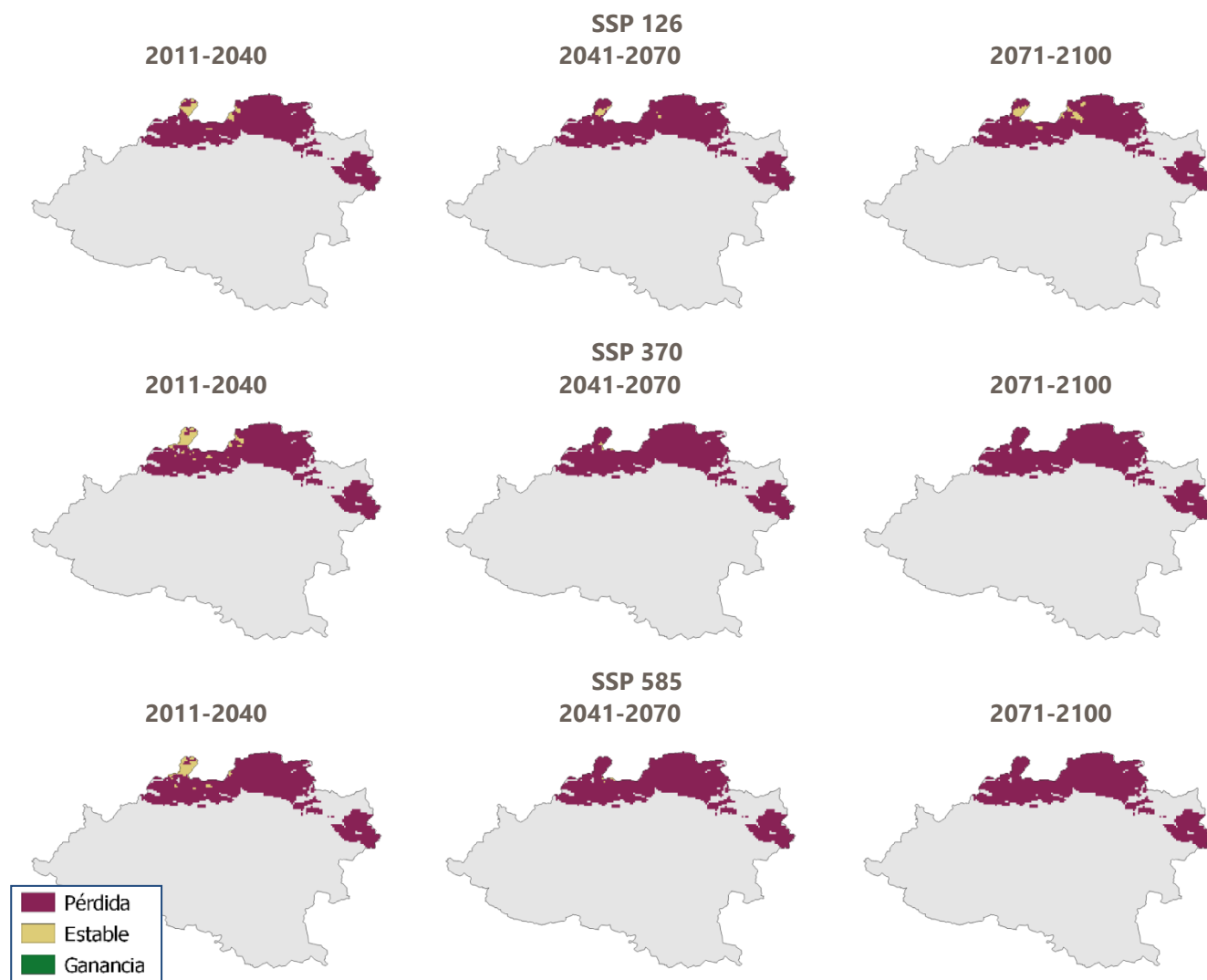


Figura 3.7.9: Mapas de cambio para *Fagus sylvatica*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (granate): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (amarillo): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (verde): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

En los mapas de cambio futuros (Fig. 3.7.9) se observa que los modelos predicen una significativa reducción del área potencial del periodo de referencia, en consonancia con otros trabajos de modelización para la misma especie (del Río et al., 2018; Felcísimo et al., 2011 y Ruiz-Labourdette et al., 2012).

Dada la elevada altitud a la que se encuentran la mayor parte de los hayedos, los mapas de cambio solo reflejan estabilidad en zonas muy puntuales de Pinares y Tierras Altas en la trayectoria SSP126 y periodo temporal 2011-2040, o en las cotas más altas de la Sierra de Urbión en algunos de los escenarios. Las trayectorias SSP370 y SSP585 de los periodos temporales 2041-2070 y 2071-2100 reflejan pérdida para la especie casi en la totalidad de la superficie. Estos resultados también están en la línea de los obtenidos por Ruiz-Labourdette et al. (2012) en el que se observa que el haya puede sufrir un claro desplazamiento latitudinal hacia el norte y una gran reducción de su área de distribución y muestran lo que se parece observarse en otras zonas de Europa (Pavlovic et al., 2019). Las poblaciones aisladas del Moncayo parecen



sufrir un mayor riesgo que las del noroeste de la provincia, por tratarse de un clima algo más seco, y por carecer apenas de superficie a mayor altitud, lo que explicaría su mayor declive, al ser las primeras en aparecer en zonas de pérdida de idoneidad. Sin embargo, hay que considerar la posibilidad de que haya condiciones microclimáticas (p.ej. nieblas), no contempladas por los modelos y que son críticos para el crecimiento de la especie (Rozas et al., 2015), así como las posibles adaptaciones locales (García-Plazaola y Becerril, 2000).

<i>Fagus sylvatica</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	2443	78	-2365	15.2%	0.5%	-96.8%	3.2%
	2041-2070	2443	30	-2413	15.2%	0.2%	-98.8%	1.2%
	2071-2100	2443	93	-2350	15.2%	0.6%	-96.2%	3.8%
SSP 370	2011-2040	2443	124	-2319	15.2%	0.8%	-94.9%	5.1%
	2041-2070	2443	8	-2435	15.2%	0.0%	-99.7%	0.3%
	2071-2100	2443	0	-2443	15.2%	0.0%	-100.0%	-
SSP 585	2011-2040	2443	103	-2340	15.2%	0.6%	-95.8%	4.2%
	2041-2070	2443	5	-2438	15.2%	0.0%	-99.8%	0.2%
	2071-2100	2443	0	-2443	15.2%	0.0%	-100.0%	-

Tabla 3.7.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.7.9 para *Fagus sylvatica* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

Como se puede observar en la tabla 3.7.2, la provincia de Soria presenta un 15.2% de la superficie como habitable o idónea para el haya en el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie se reduce para todos los periodos temporales y trayectorias SSP siendo la reducción mínima de esta superficie de un 94.9% hasta ocupar un 0.8% de la superficie de la provincia en el periodo 2011-2040 y la trayectoria SSP370 y la reducción máxima un 100% en el periodo temporal 2071-2100 de las trayectorias SSP 370 y 585. Esta importante reducción de superficie potencialmente habitable por el haya en los escenarios futuros también ha sido observada en otros trabajos (Felicísimo et al., 2011; Ruiz-Labourdette et al., 2012). En este sentido, se ha observado ya un declive en el crecimiento de los hayedos en ambientes más próximos al clima mediterráneo (Serra-Maluquer et al. 2016).

La tasa de estabilidad espacial nos indica si las zonas que ocupa el haya en diferentes escenarios son las mismas que potencialmente ocupa en el periodo de referencia, o bien se produce un cambio en las zonas adecuadas para la especie (Tabla 3.7.2). En el caso del haya, esta especie no dispone apenas de zonas con potencial para colonizar en un contexto climático más cálido, ya que no existen muchas zonas por encima de su límite altitudinal de distribución. Los valores de la tasa de estabilidad cercanos al 4% en todas las trayectorias SSP para el primer periodo temporal indican que el solape es muy pequeño, ya que el área potencial futura del haya se reduce drásticamente.

3.8 ENCINA: *QUERCUS ILEX* L.

3.8.1 RESUMEN EJECUTIVO

La encina tiene capacidad de ocupar dos tercios de la provincia. Los modelos predicen un aumento de su superficie a corto y medio plazo, si bien a largo plazo su superficie se podría ver reducida con pérdidas en las zonas centrales y sur de la provincia, según los escenarios más pesimistas.

La provincia de Soria tiene una idoneidad potencial alta para la encina en el periodo de referencia (1981-2010), pudiendo ocupar hasta un 66.4% de la provincia.

A corto y medio plazo esta especie se verá favorecida por el cambio climático con estabilidad en la zona central de la provincia y un aumento notable de su superficie idónea hacia las zonas agrícolas cercanas a Soria y Tierra de Almazán y hacia el norte en Pinares, Tierras Altas y el Valle. Sin embargo, en horizontes temporales más

lejanos (2071-2100) los modelos no son tan optimistas, con algunos escenarios que predicen la pérdida de hasta el 50% de superficie potencial, disminuyendo de forma importante la idoneidad de las poblaciones del centro y sur de la provincia (Soria, Almazán, Burgo de Osma, Medinaceli). Solo el modelo más conservador SSP126 predice un aumento de la superficie idónea de la especie a largo plazo.

Los resultados de la encina se han realizado filtrando las presencias de la especie para representar solo el rango ecológico de la subespecie *Q. ilex* ssp. *ballota*.

3.8.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

La encina es una especie del centro-oeste de la cuenca mediterránea, presente en todos los países ribereños del mar Mediterráneo. Se distribuye desde Portugal y Marruecos en el oeste hasta las islas del mar Egeo y Turquía occidental en el este, expandiéndose hacia el norte por Francia y el norte de Italia. Su rango altitudinal varía desde el nivel del mar hasta los 2900 m.s.n.m en la cordillera del Atlas en Marruecos (de Rigo et al., 2016), en España se encuentra más frecuentemente entre los 300 y 1200 m.s.n.m.



Figura 3.8.1. Izquierda: Distribución natural de *Quercus ilex*. Fuente: EUFORGEN. <https://www.euforgen.org/> Derecha: Encinar en el río Duero en las proximidades de Soria (Santa Ana).

En España, se extiende por todas las regiones a excepción de Canarias, siendo una de las especies arbóreas más comunes en la Península Ibérica (Alía et al., 2009a). Algunos autores distinguen dos subespecies; *Quercus ilex* subsp. *ballota* y *Quercus ilex* subsp. *ilex*. La primera, *Quercus ilex* subsp. *ballota* es la subespecie de carácter marcadamente mediterráneo, continental y xerófilo, distribuida en la mayor parte de la Península Ibérica excepto en las regiones de clima atlántico del norte y noroeste, en el sureste árido y zonas costeras de Cataluña (do Amaral Franco, 1990). La segunda, *Quercus ilex* subsp. *ilex* es más higrófila que la subespecie anterior y no habita zonas con climas muy contrastados, se extiende por las áreas costeras y zonas

montañas interiores de la mitad septentrional catalana, Cordillera Cantábrica, montañas Baleares y puntos aislados del interior de la Península Ibérica (Blanco et al., 1997).

Se considera la especie más característica del monte mediterráneo, con una amplia distribución por diferentes ambientes climáticos y litológicos que le permiten constituirse como la especie dominante o secundaria en la mayor parte del territorio peninsular. Las precipitaciones anuales de su área de distribución oscilan entre los 450-900 mm con un periodo de sequía de uno a cuatro meses. Habita en zonas con temperatura media anual 10,7°C-16,5°C con un periodo de helada segura que puede durar hasta tres meses, siendo capaz de sobrellevar grandes contrastes de temperatura como los observados en los encinares de la submeseta norte, con mínimas de -10°C y máximas por encima de los 34°C (Blanco et al., 1997). Es una especie indiferente al sustrato, aunque no prospera bien en los suelos encharcados, muy salinos, yesosos o los muy compactados (Alía et al., 2009a).

En ambientes muy secos y suelos pobres, la encina cede terreno a otras especies como a la coscoja, al pino carrasco, a la sabina albar (estas dos últimas se imponen a la encina en las zonas más xerófilas del valle del Ebro, entre otras zonas), al acebuche o a la sabina mora. En zonas más húmedas o con suelos más desarrollados, el encinar se mezcla o queda sustituido por alcornoques, quejigos, rebollos o pinares de pino negral y salgareño (Alía et al., 2009a).

Las poblaciones sorianas pertenecen a la región de procedencia Cuenca Central del Duero, definidas por una fuerte continentalidad, un destacado periodo de sequía estival que alcanza 2-3 meses y los periodos de helada segura más prolongados que soporta la especie (3 meses al año) (Alía et al., 2009a). El encinar aprovecha las zonas más cálidas y xéricas de la geografía soriana y contacta con *Juniperus thurifera* y *Juniperus communis* con mayor tolerancia al frío invernal y mayor xericidad. Se pueden encontrar encinares en toda la provincia exceptuando las cotas más elevadas de la Sierra de Urbión, Cebollera y Moncayo.

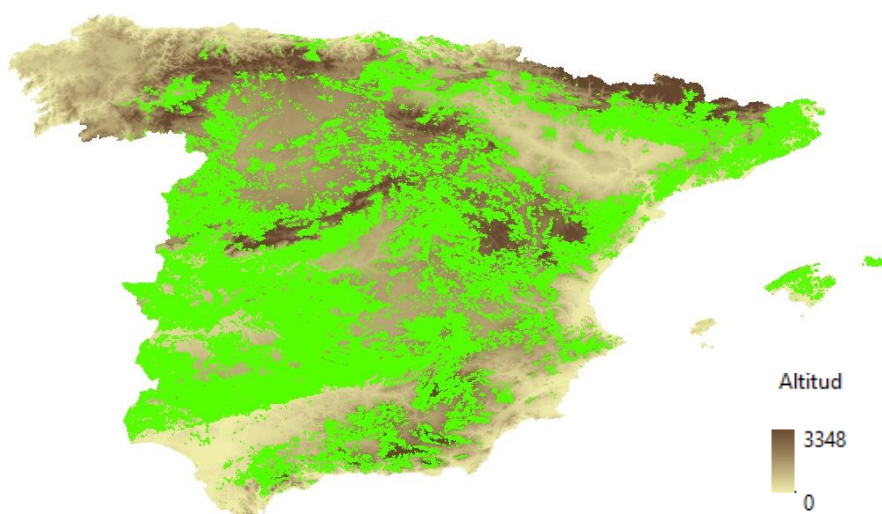


Figura 3.8.2: Distribución de *Quercus ilex* en España.
Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

3.8.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Quercus ilex* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.8.3).

Las presencias del IFN3 usadas en este estudio no discriminan a nivel de subespecie, por lo que la ecología de los modelos recogería las dos subespecies. No obstante, se han eliminado las presencias que cumplían simultáneamente las condiciones BIO12 > 1200mm y BIO17 > 200mm para eliminar las presencias de *Quercus ilex* subsp. *ilex* o reducir su peso estadístico en el modelo.

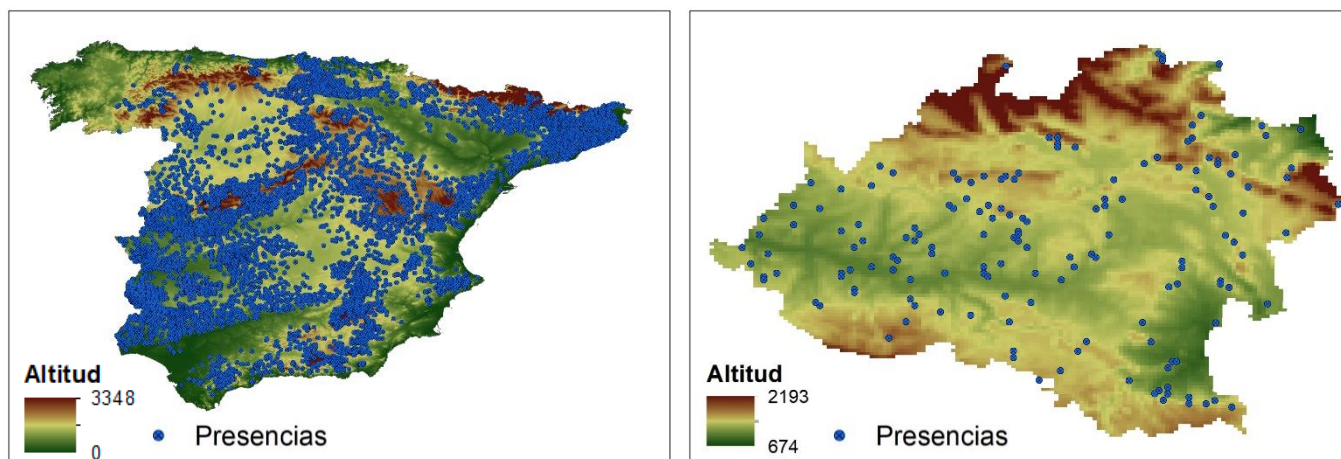
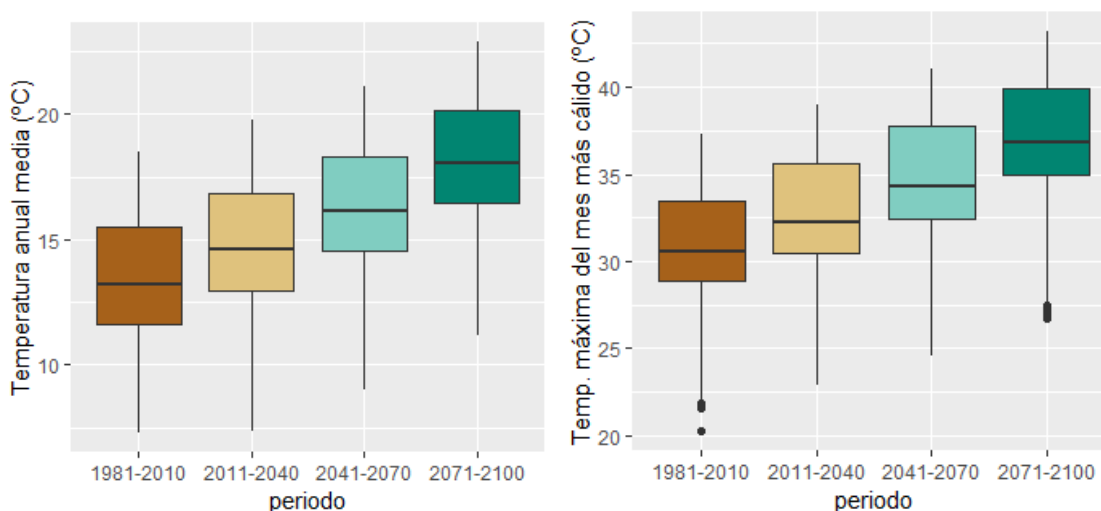


Figura 3.8.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Quercus ilex* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

La encina habita en lugares con temperatura media anual de 11 a 16°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 28 y 34°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 500-750(1400) mm anuales con 50-100 (200) mm en verano (Fig. 3.8.4). las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones continúen estables en sus valores.



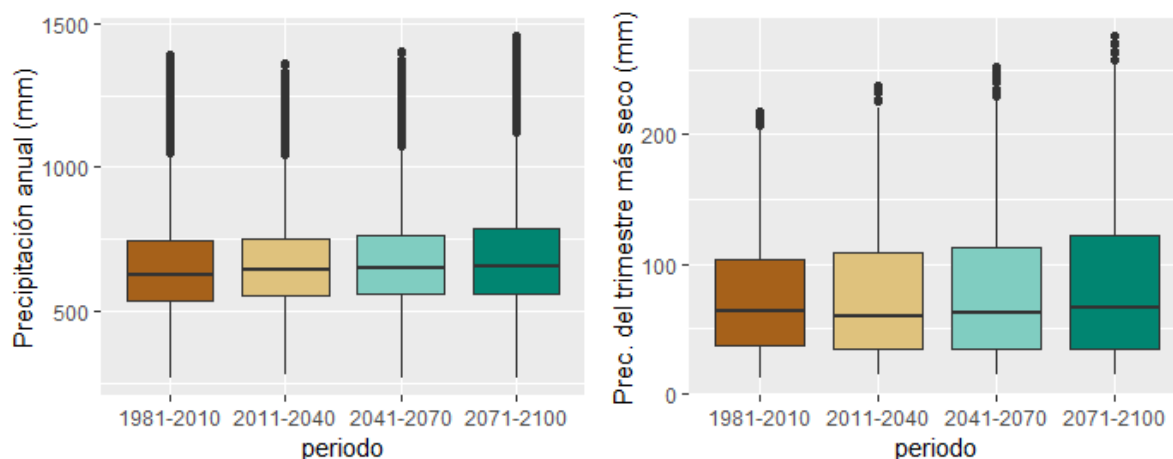


Figura 3.8.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Quercus ilex* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.8.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Quercus ilex* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza < 5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para la encina. Como se observa en la figura 3.8.5, las variables están correlacionadas por grupos.

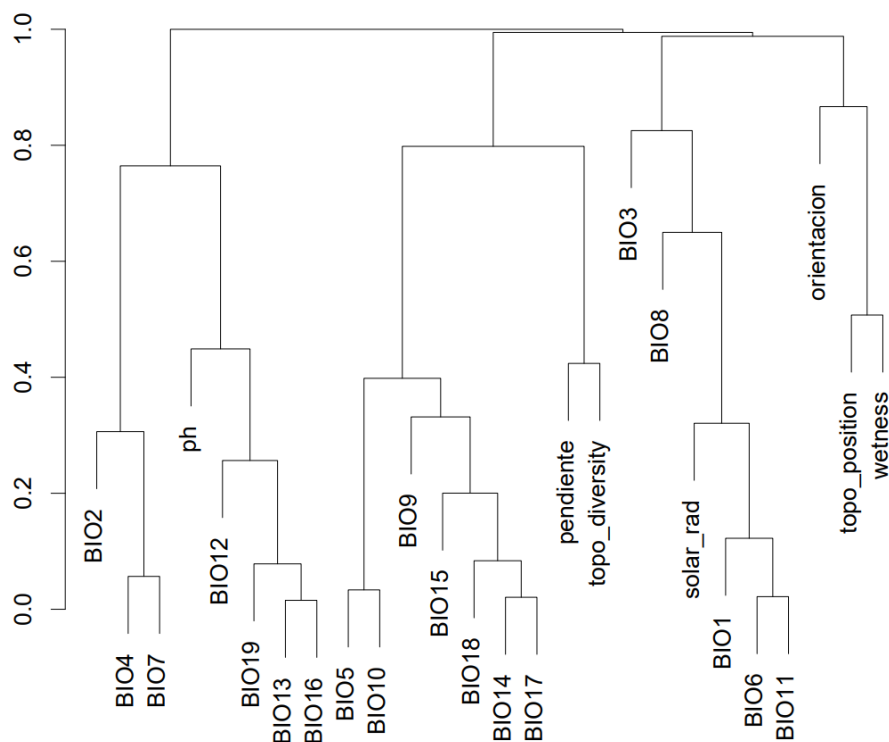


Figura 3.8.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Quercus ilex*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Quercus ilex* fueron: Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, orientación, pH, solar_rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 12	Precipitación anual
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.8.1: Variables usadas en los modelos de *Quercus ilex*.

3.8.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Quercus ilex* se han dividido las 12110 presencias en 9688 para training (80%) y 2422 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.79 lo que indica que el modelo generado tiene buena capacidad predictiva.

La variable más importante (Fig. 3.8.6) es Bio 12 (precipitación anual). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es también Bio 12, que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

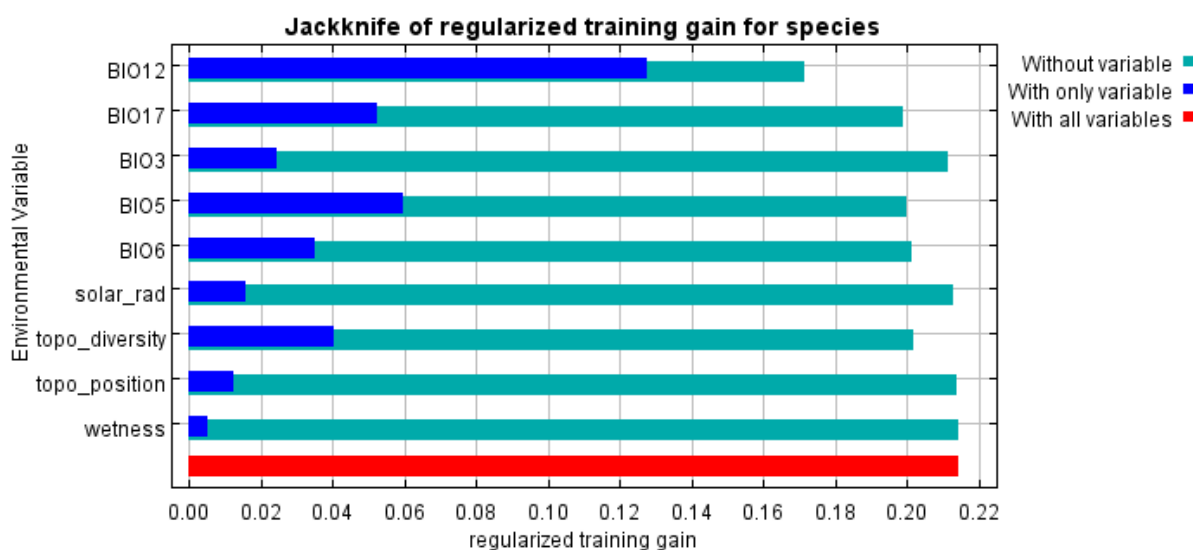


Figura 3.8.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Quercus ilex*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

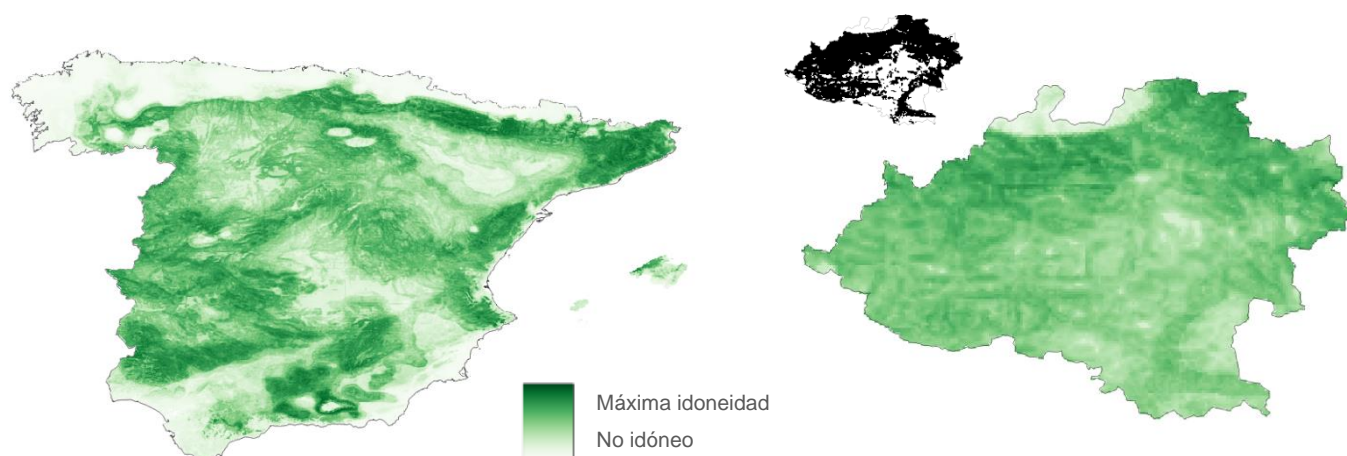


Figura 3.8.7: Distribución potencial de *Quercus ilex* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.8.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (Benito-Garzón et al., 2003; 2008; Felicísimo et al., 2011; Serra-Díaz et al., 2013), con la superficie predicha para la especie mayor que la superficie ocupada por la especie actualmente, expandiéndose ampliamente por las submesetas norte y sur, Extremadura, cordilleras Penibéticas y litoral y montañas catalanas. El modelo predice muy baja idoneidad potencial en el valle del Ebro, Galicia y la depresión del Guadalquivir, coincidiendo con Benito-Garzón et al. (2003). Las predicciones también coinciden con Felicísimo et al. (2011) aunque en este trabajo la idoneidad en la submeseta norte es mucho menor que la del presente estudio.

La encina presenta una idoneidad potencial medio-alta en la provincia, con baja idoneidad en las zonas de mayor altitud y en la zona central de la provincia. Las zonas con mayor potencialidad para la especie están en la parte norte de la provincia y concretamente, en zonas del Burgo situadas en el límite de la provincia, Bayubas, en el piedemonte del Valle, Arcos de Jalón, Tierras Altas, y la cercanía de la Sierra del Moncayo.

3.8.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

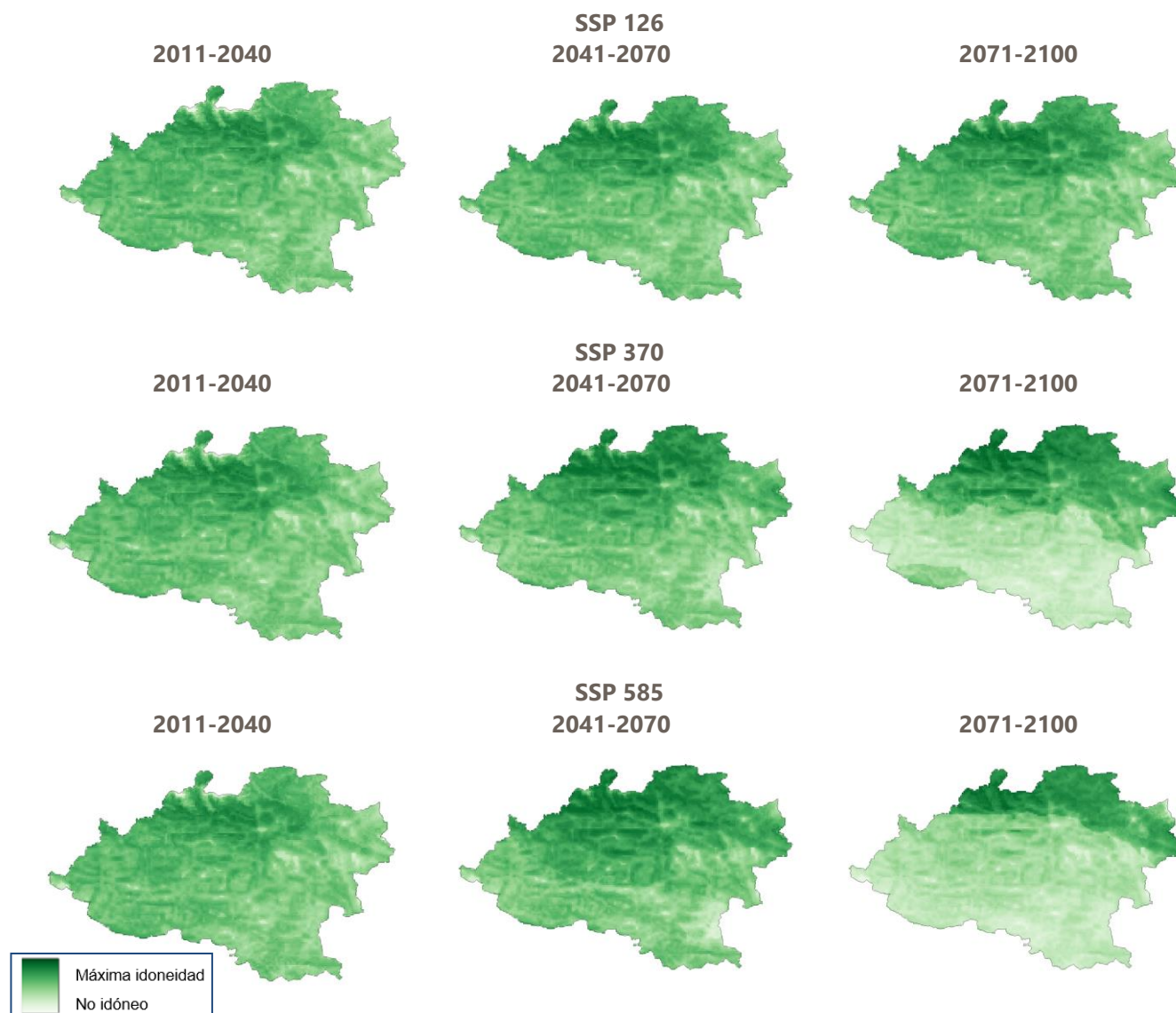


Figura 3.8.8: Distribución potencial de *Quercus ilex* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Los valores de idoneidad futura de la encina (Fig. 3.8.8) reflejan un patrón de aumento de idoneidad en todas las trayectorias SSP excepto en el periodo 2071-2100 para las trayectorias SSP370 y 585. Este aumento de idoneidad se aprecia en el centro de la provincia, quedando la especie relegada al tercio norte de la provincia a final de siglo en las trayectorias SSP370 y SSP585.

Esta situación se aprecia visiblemente en los mapas de cambio de áreas potencialmente idóneas para *Quercus ilex* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia (Fig.3.8.9).

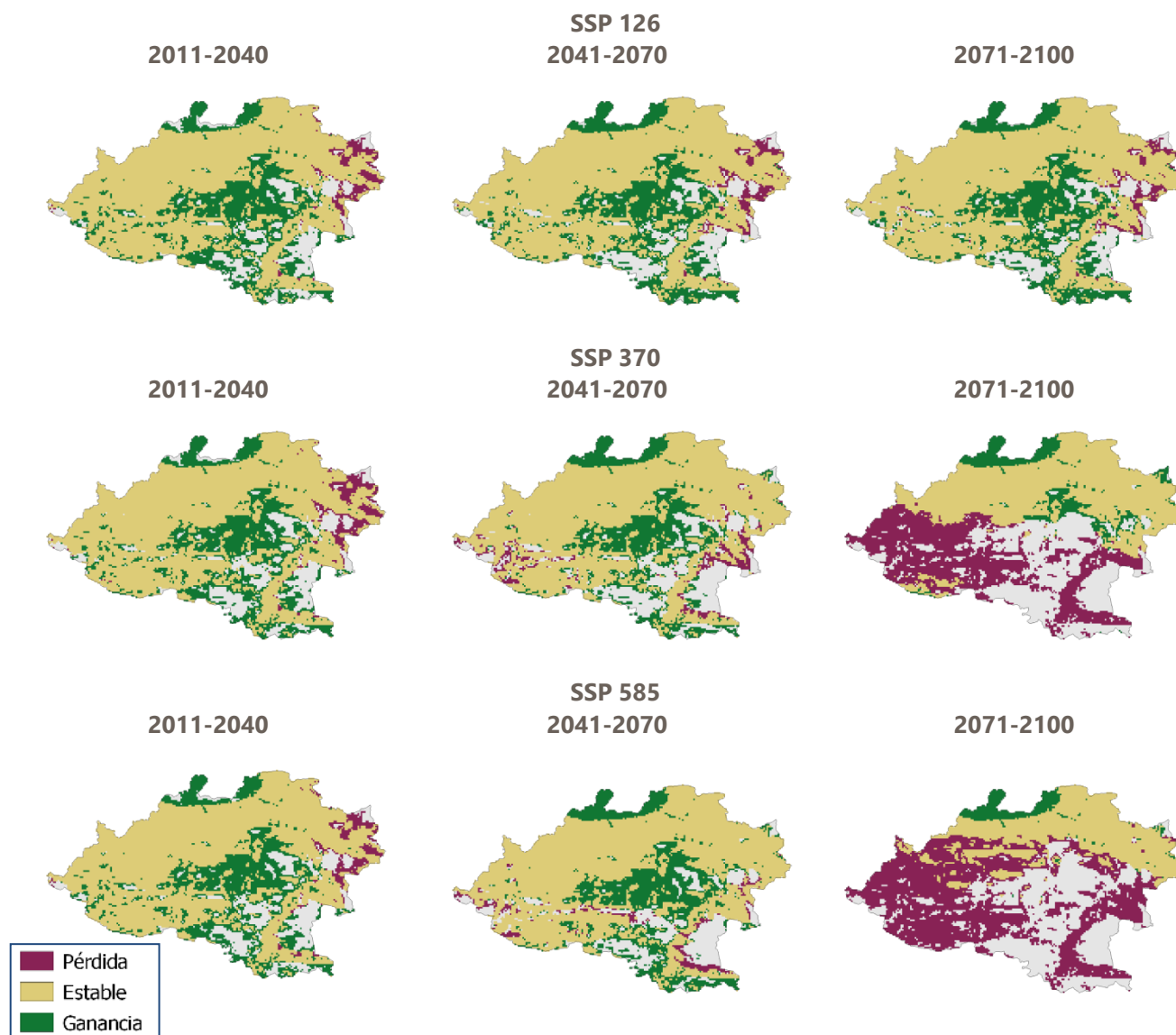


Figura 3.8.9: Mapas de cambio para *Quercus ilex*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (**granate**): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (**amarillo**): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (**verde**): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

Para la encina los modelos predicen un significativo aumento del área potencial del periodo de referencia, en consonancia con otros trabajos de modelización para la misma especie (del Río et al., 2018; Felicísimo et al., 2011 y Ruiz-Labourdette et al., 2012). Esta especie, adaptada a las altas temperaturas y a la sequía, está situada en zonas cuyo crecimiento está limitado por la disponibilidad hídrica (Sabaté et al., 2002), se verá favorecida por el cambio climático, por lo menos a corto y medio plazo y a largo plazo en el escenario más optimista SSP126. La disminución de superficie idónea prevista en las trayectorias SSP370 y SSP585 para final de siglo pueden deberse a las reducciones en las precipitaciones y aumentos de temperatura, que provocarían que la especie fuera menos eficiente en esas zonas, con menores crecimientos y posibles



eventos de mortalidad como respuesta a condiciones secas a largo plazo que reducirán en gran medida el balance hídrico (Pasho et al., 2012).

La magnitud del aumento de superficie es importante para el periodo 2011-2040 y el 2041-2070, pasando del 66% de la superficie potencial en el periodo de referencia hasta un 86% en los escenarios futuros. Sin embargo, para final de siglo las trayectorias SSP370 y SSP585 predicen una disminución de entre el 31%-56% de la superficie ocupada por la especie, principalmente en el sur de la provincia, con estabilidad en gran parte del tercio norte y ganancia hacia cotas elevadas de las comarcas de Vinuesa y Covaleda.

Las predicciones futuras para esta especie varían en función de la escala espacial del estudio. Los trabajos realizados para España predicen un aumento de la distribución potencial actual y aumento de la distribución bajo algunos escenarios climáticos, pero coinciden en predecir una reducción de la superficie potencial de la especie a largo plazo (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011). Sin embargo, los trabajos realizados a escala local predicen un aumento de la distribución de la especie para todos los escenarios climáticos, incluso los de mayor aumento de CO₂ tanto en el centro de su distribución (Sistema Ibérico y Central en Ruiz-Labourdette et al., 2012) como en las poblaciones situadas en el sur de su distribución Ibérica (Andalucía en López-Tirado et al., 2016b).

Quercus ilex	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	10645	13862	3217	66.4%	86.4%	30.2%	73.4%
	2041-2070	10645	13726	3081	66.4%	85.6%	28.9%	74.0%
	2071-2100	10645	13822	3177	66.4%	86.2%	29.8%	73.7%
SSP 370	2011-2040	10645	13497	2852	66.4%	84.2%	26.8%	74.5%
	2041-2070	10645	13052	2407	66.4%	81.4%	22.6%	76.9%
	2071-2100	10645	7296	-3349	66.4%	45.5%	-31.5%	57.4%
SSP 585	2011-2040	10645	13630	2985	66.4%	85.0%	28.0%	74.3%
	2041-2070	10645	13560	2915	66.4%	84.6%	27.4%	75.0%
	2071-2100	10645	4672	-5973	66.4%	29.1%	-56.1%	38.2%

Tabla 3.8.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.8.9 para *Quercus ilex* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

Como se puede observar en la tabla 3.8.2, la provincia de Soria presenta un 66.4% de la superficie como habitable o idónea para la encina en el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie aumenta para todas las trayectorias SSP a corto y largo plazo siendo el aumento mínimo de esta superficie de un 22.6% hasta ocupar un 81.4% de la superficie de la provincia en el periodo 2041-2070 y la trayectoria SSP370 y el aumento máximo de un 30.2% en el periodo temporal 2011-2040 de la trayectoria SSP126.

Para final de siglo las trayectorias SSP370 y SSP585 predicen una disminución de entre el 31%-56% de la superficie ocupada por la especie hasta ocupar un 45%-29% de la provincia.

En el caso de la encina, el solape espacial entre el área potencial futura y el área potencial del periodo de referencia es alto en todas las trayectorias SSP del periodo 2011-2040 y 2041-2070 (73.4%-76.9%). A corto plazo la especie se mantendrá en la vecindad de áreas potenciales del periodo de referencia. A largo plazo gran parte de los encinares, entre el 38-57% de distribución de las poblaciones futuras estarán en las zonas potenciales del periodo de referencia para las trayectorias SSP370 y 585 pero con aumento de fragmentación debida a la pérdida de idoneidad en las zonas centrales de la provincia.

3.9 QUEJIGO: *QUERCUS FAGINEA* LAM.

3.9.1 RESUMEN EJECUTIVO

Las condiciones climáticas permitirían a Quercus faginea ocupar más del 80% de la provincia. Su superficie va a mantenerse, aumentando en el centro, sur y norte de la provincia, con pérdidas locales de idoneidad en zonas situadas al este de la provincia, en Moncayo y Campo de Gómara.

La provincia de Soria tiene una idoneidad potencial alta para el quejigo en el periodo de referencia (1981-2010), pudiendo ocupar hasta un 87.1% de la provincia.

Los modelos de la especie obtenidos para los escenarios de clima futuro a corto y medio plazo indican un aumento gradual de la superficie idónea hasta ocupar alrededor del 93% de superficie para la trayectoria SSP126.

A corto y medio plazo esta especie se verá favorecida por el cambio climático con estabilidad en la zona central de la provincia y un aumento de su superficie idónea hacia el sur en Tierra de Almazán y Medinaceli y hacia el norte en Pinares, y el Valle. En el horizonte temporal más lejano (2071-2100) y para el escenario menos optimista SSP585, los modelos predicen ligeras pérdidas de superficie, cercanas al 7% de superficie potencial, disminuyendo de la idoneidad de las poblaciones del centro y este de la provincia en Moncayo y Campo de Gómara pero conservando el 81% de la superficie de la provincia como idónea para la especie.

Además, se espera que *Q.faginea* sufra una ligera migración altitudinal hacia cotas más altas, siendo sustituida en la parte de su hábitat situado en cotas más bajas por la encina y el pino negral debido a la mayor sequía por el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones.

Los resultados del quejigo se han realizado utilizando todas las presencias de la especie, esto implica que se han tenido en cuenta las dos subespecies, lo que puede justificar el amplio rango potencial de la especie en el periodo de referencia.

3.9.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

El quejigo se distribuye por el Mediterráneo Occidental, en la Península Ibérica y noroeste de África (Marruecos, Argelia y Túnez) con una pequeña presencia en Francia (Fig 3.9.1) (Blanco et al., 1997). En España está distribuida en casi todas las provincias, excepto en el noroeste (Galicia y cordillera cantábrica), valle del Ebro y del Guadalquivir y litoral mediterráneo (Fig. 3.9.2).



Figura 3.9.1. Izquierda: Distribución natural de *Quercus faginea*. Fuente: Caudullo et al. 2017. Derecha: Quejigar cerca de Abejar.

A nivel de especie, su carácter de especie xerófila e indiferente al tipo de sustrato le permite una distribución abundante en laderas de media montaña, pie de montes y páramos, en condiciones térmicas adecuadas. Las áreas donde se distribuye la especie tienen unas temperaturas medias anuales que oscilan entre 9.8-14.6°C,

con un importante grado de continentalidad en algunas áreas, donde el período de heladas seguras se puede alargar hasta cuatro meses. En cuanto al régimen de precipitaciones, las precipitaciones anuales medias se sitúan alrededor de 500-1000 mm con un período de sequía frecuente de dos meses, pudiendo superar los 3 meses y medio (Alía et al., 2009a). En las poblaciones límite de esta especie se ha observado que el patrón de precipitaciones anual y, en concreto, las precipitaciones de otoño-invierno afectan en gran medida al crecimiento de la especie (Corcuera et al., 2004; Olano et al., en revisión), lo que a largo plazo podría provocar la sustitución de esta especie por otras más resistentes a la sequía, como la encina.

Esta especie se subdivide en dos subespecies; *faginea* y *broteroi* (do Amaral Franco, 1990). La subespecie *faginea*, prefiere suelos calizos y se encuentra en ambas mesetas y en zonas submediterráneas calizas, en el piso de media montaña de todas las cordilleras calizas de la mitad oriental peninsular, con altitudes entre 500-1500 m.s.n.m, alcanzando los 1900 m.s.n.m en las sierras Béticas. La subespecie *broteroi* se encuentra sobre sustratos silíceos o neutros, en las cuencas fluviales y vertientes húmedas del sudoeste de la Península Ibérica, en Extremadura y Portugal desde el nivel del mar hasta los 700(1000) m.s.n.m (Blanco et al., 1997).

Las formaciones actuales de la especie están muy alteradas por el ser humano, especialmente desde la Edad Media, quien desplazó al quejigo y al rebollo fuera de sus áreas naturales en favor de la encina, por el mayor aprovechamiento de su fruto (Alía et al., 2009a; Blanco et al., 1997). Además, la competencia entre actividades agrarias y ganaderas ha relegado la especie hacia terrenos de peor calidad o laderas pedregosas, con masas o bien adehesadas con individuos añosos o masas de alta densidad, con pies de diámetros bajos, de fuste tortuoso y nacidos de cepa que, en general, presentan bajos crecimientos medios y problemas de regeneración (Pérez-Ramos et al., 2009).

Según las condiciones climáticas y edáficas de la zona, es frecuente hallar al quejigo mezclado con rebollo o encina, o también en contacto con pinares de laricio o silvestre. Sobre materiales básicos (calizas, dolomías y margas) el quejigo tiene mayor presencia que el rebollo, compitiendo en ventaja sobre la encina en zonas de mayor humedad (Alía et al., 2009a). En terrenos ácidos, el quejigo suele verse desplazado por el rebollo (Blanco et al., 1997).

Las poblaciones sorianas de esta especie pertenecen a la región de procedencia Páramos Castellanos, con una climatología definida por el acentuado efecto de la continentalidad, especialmente en cuanto al régimen de temperaturas. Las temperaturas medias anuales se sitúan sobre los 10-12°C con periodos de helada segura de hasta 3 meses y medio. Las precipitaciones anuales no son de las más escasas que soporta la especie en su distribución ibérica, tolerando un pronunciado descenso estival, con hasta tres meses de sequía (Alía et al., 2009a).

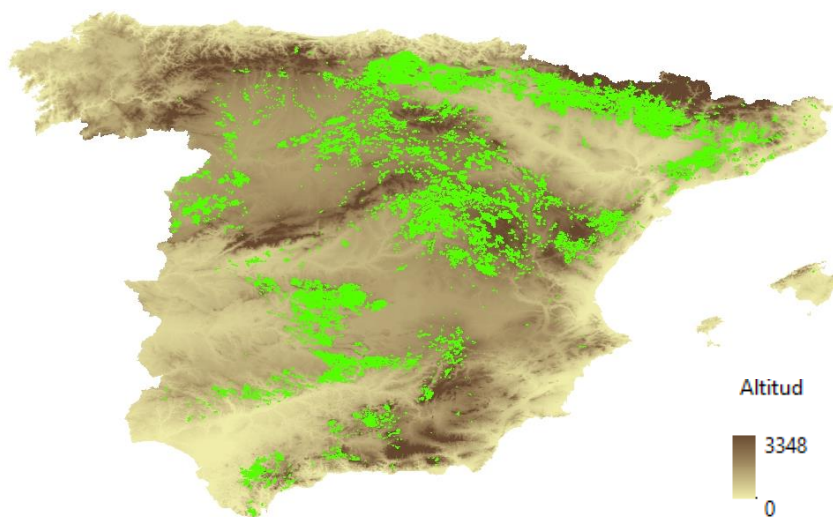


Figura 3.9.2: Distribución de *Quercus faginea* en España.
Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

El quejigo es una especie ampliamente extendida por la provincia de Soria, aunque sus poblaciones actuales se encuentran fuertemente reducidas por la acción humana y por la erosión seguida al proceso de deforestación (Blanco et al., 1997). Estas poblaciones están generalmente ubicadas en sustratos calizos de áreas supramediterráneas y en laderas no demasiado soleadas (Segura et al., 2000). Se encuentran poblaciones de la especie en la Sierra del Madero, Abejar, Andaluz, Valdemaluque, Sierra de Cabrejas, Quintana Redonda y comarca del Nágima. También en tierras de Berlanga de Duero, Tiernes, Arcos de Jalón, Romanillos de Medinaceli y Mezquetillas.

3.9.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Quercus faginea* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.9.3).

Las presencias del IFN3 usadas en este estudio no discriminan a nivel de subespecie, por lo que la ecología de los modelos recogería las dos subespecies. No obstante, se espera que la ecología de *Q.faginea* subsp. *faginea* tenga mucho más peso estadístico en el modelo, ya que el rango de distribución de *Q.faginea* subsp. *faginea* es bastante superior al de *Q.faginea* subsp. *broteroi*.

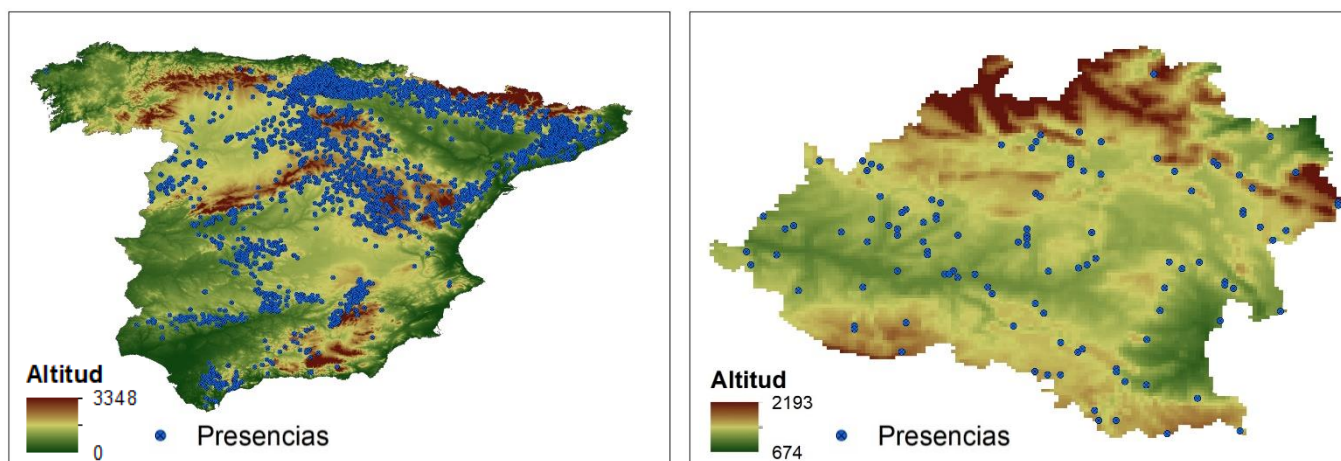


Figura 3.9.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Quercus faginea* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

El quejigo habita en lugares con temperatura media anual de 11 a 13°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 25.5 y 31°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 550-800(1500) mm anuales con 75-120 (250) mm en verano (Fig. 3.9.4). las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones sufran un ligero ascenso en sus valores para 2071-2100.

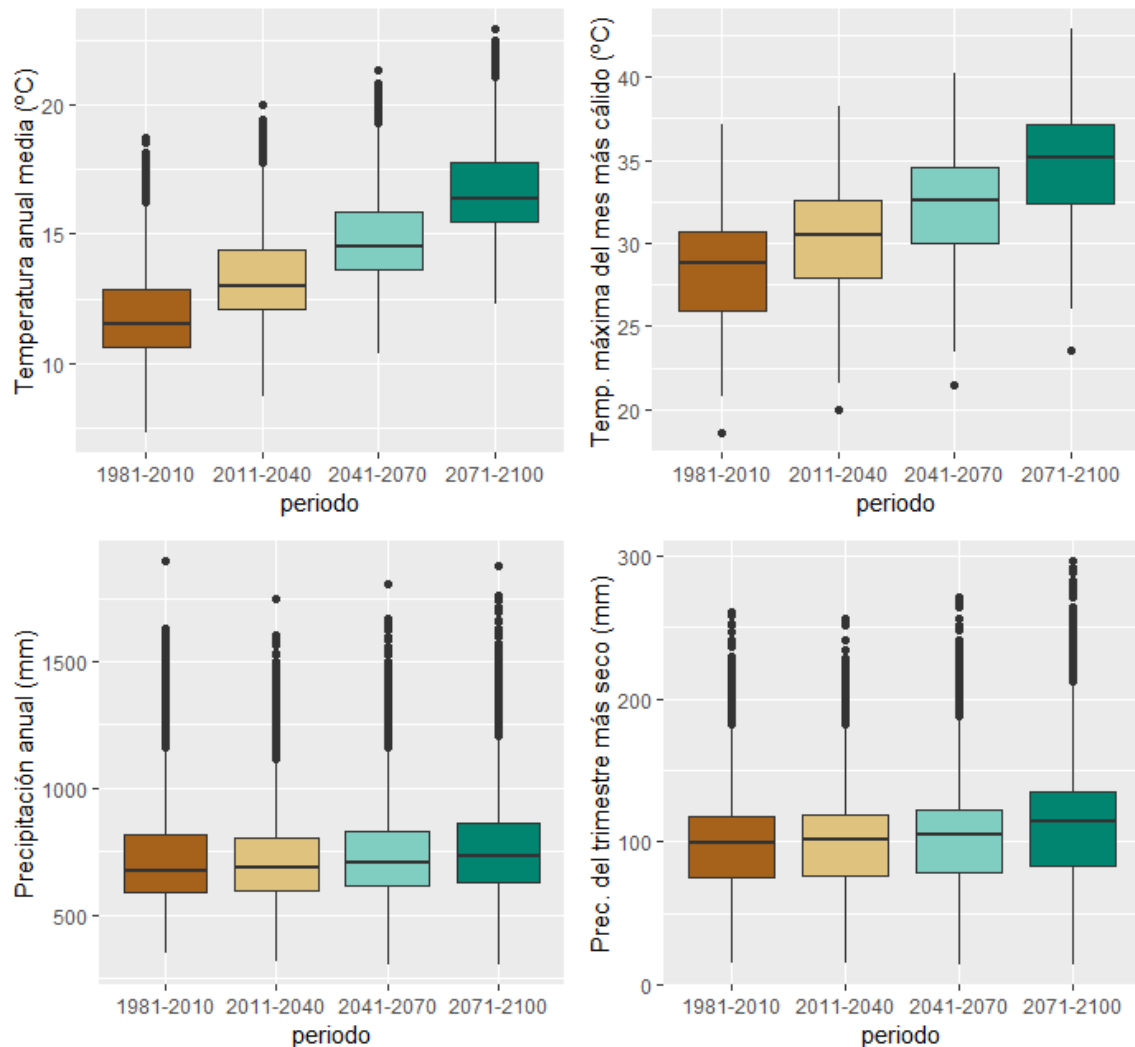


Figura 3.9.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Quercus faginea* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.9.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Quercus faginea* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza < 5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para el quejigo. Como se observa en la figura 3.9.5, las variables están correlacionadas por grupos.

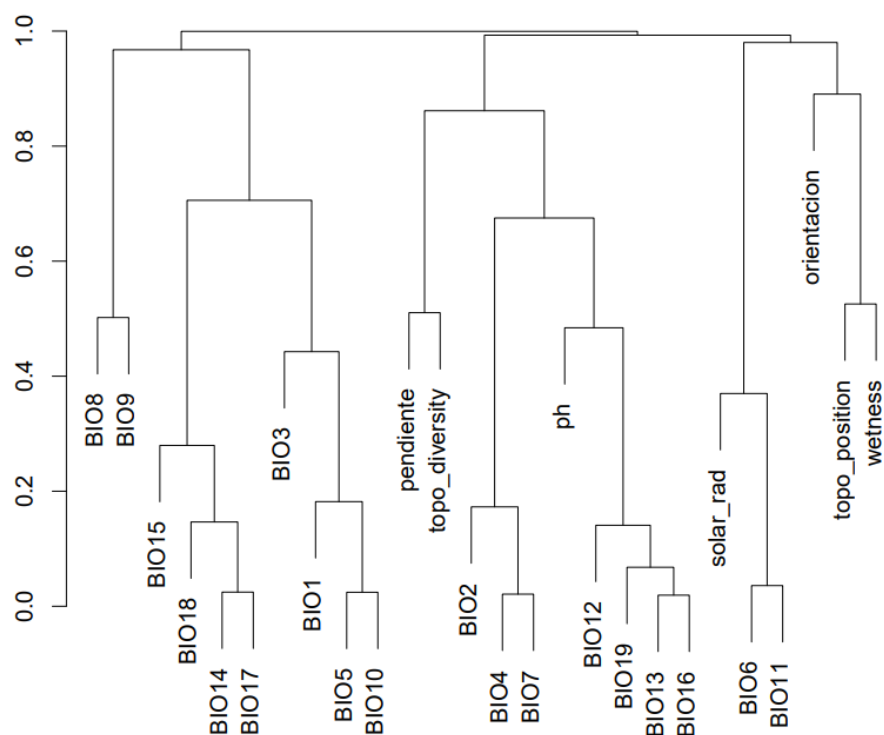


Figura 3.9.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Quercus faginea*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Quercus faginea* fueron: Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 12, Bio 17, solar_rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 12	Precipitación anual
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.9.1: Variables usadas en los modelos de *Quercus faginea*.

3.9.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Quercus faginea* se han dividido las 4415 presencias en 3532 para training (80%) y 883 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.86 lo que indica que el modelo generado tiene capacidad predictiva alta.

La variable más importante (Fig. 3.9.6) es Bio 12 (precipitación anual). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es también Bio 12, que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

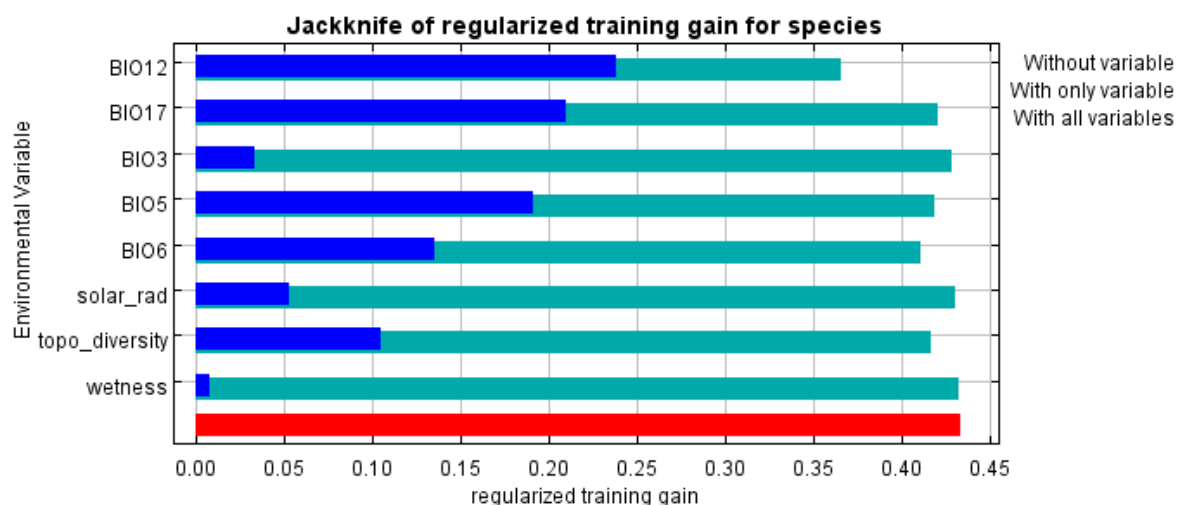


Figura 3.9.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Quercus faginea*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

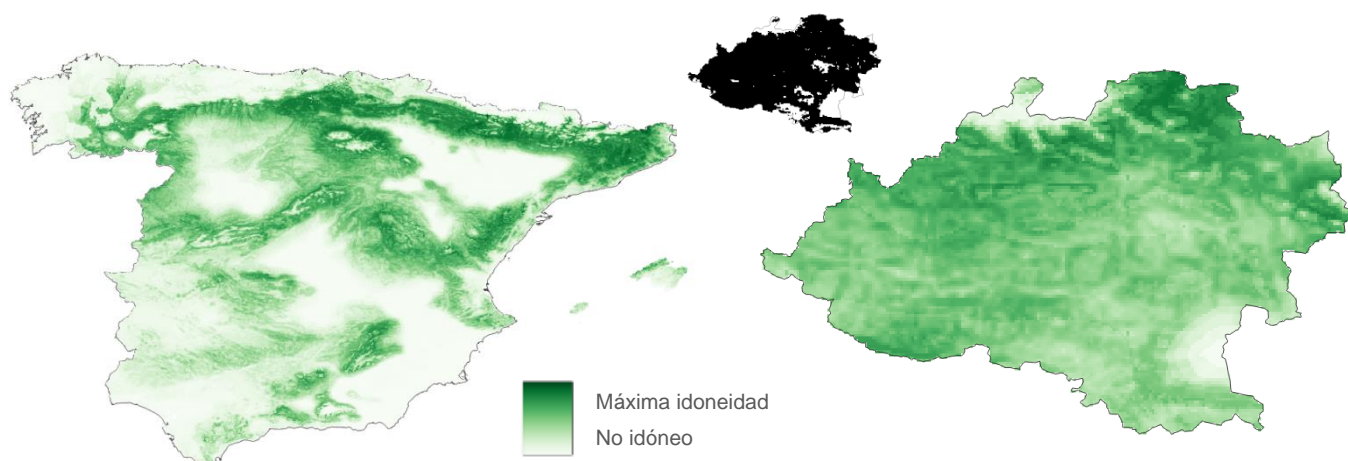


Figura 3.9.7: Distribución potencial de *Quercus faginea* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.9.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (Felicísimo et al., 2011; García-Valdés et al., 2013; Vila-Viçosa et al., 2020) con una expansión de su distribución por la periferia de la submeseta norte, cordillera Cantábrica y sierras Béticas. Los patrones de distribución potencial obtenidos coinciden más con los patrones propuestos por García-Valdés et al. (2013) y Vila-Viçosa et al. (2020), aunque éste último autor modelizaba las subespecies de *Q. faginea* por separado y, por tanto, los resultados no son comparables sin una interpretación cuidadosa. El modelo predice baja idoneidad potencial en Extremadura, coincidiendo con García-Valdés et al. (2013) y a diferencia de los modelos de Felicísimo et al., (2011) a pesar de que en estos trabajos se ha modelizado también a nivel de especie.

Asimismo, se predice un aumento de superficie potencialmente habitable por la especie respecto a la distribución actual de la especie (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011) lo que muestra según algunos autores que la especie no está equilibrio con las condiciones climáticas actuales (García-Valdés et al., 2013).

En la provincia de Soria, se observa una idoneidad potencial alta para este periodo en la cercanía de las zonas que ocupa actualmente, en las zonas de altitud media de las Tierras Altas, Ágreda, El Burgo y en la zona de San Leonardo de Yagüe de Pinares. Este aumento de superficie idónea también ha sido observado en esta zona por otros autores (Ruiz-Labourdette et al., 2012) y puede responder a que la especie no está equilibrio con las condiciones climáticas actuales (García-Valdés et al., 2013) y que ha sido ampliamente desplazada en beneficio de otras especies, como la encina (Blanco et al., 1997). El abandono del uso agrícola y la reducción de la presión ganadera ha producido un incremento general de la superficie forestal, incluidos los quejigares (Pérez-Ramos et al., 2009).

3.9.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

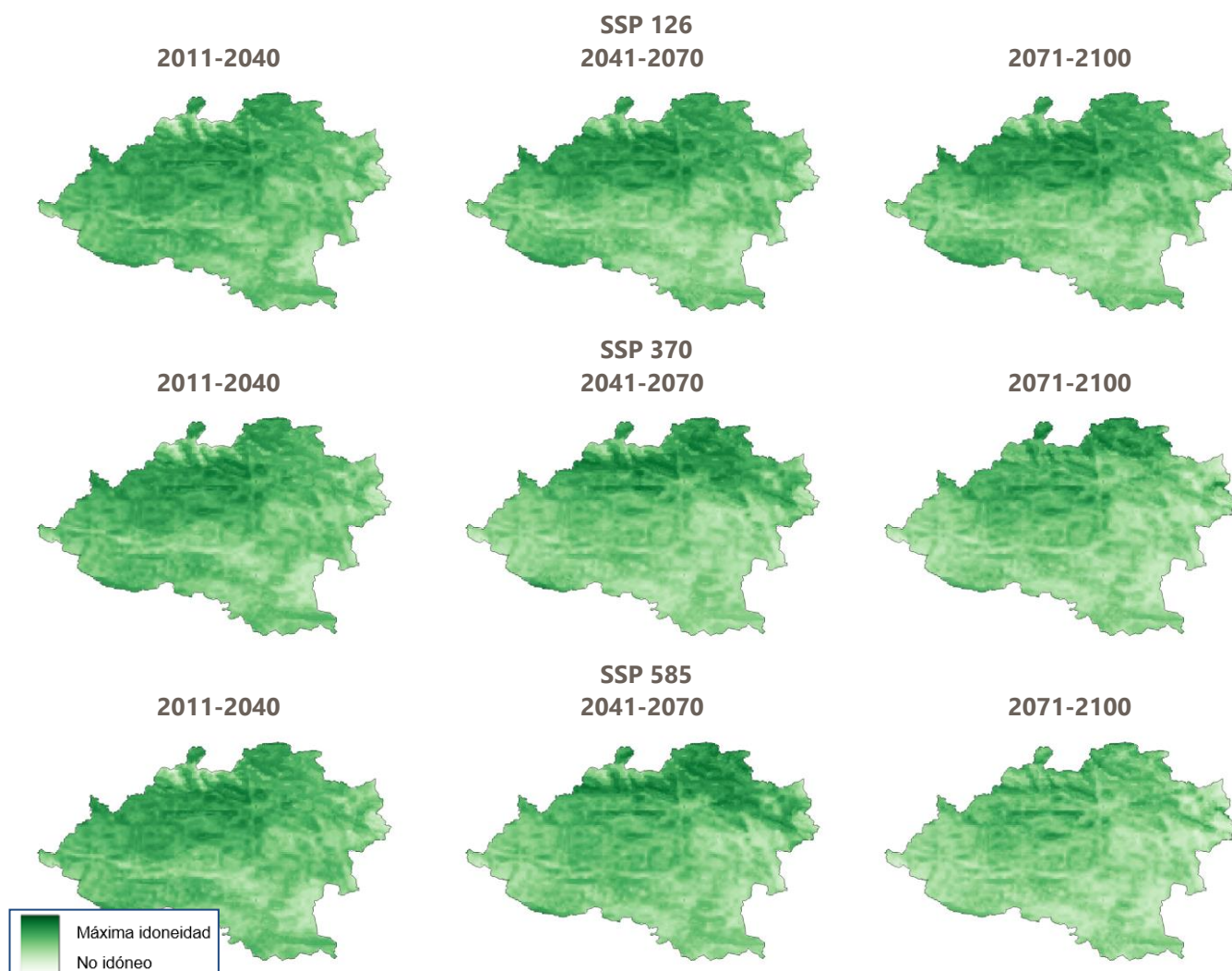


Figura 3.9.8: Distribución potencial de *Quercus faginea* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Los valores de idoneidad futura para la provincia de Soria reflejan un aumento de idoneidad en todas las trayectorias SSP (Fig. 3.9.8). Este aumento de idoneidad se aprecia más en el centro y norte de provincia, observándose una disminución de la idoneidad de la especie en el sur y este de la provincia a final de siglo, especialmente en las trayectorias SSP370 y SSP585.

Los patrones descritos se observan mejor en los mapas de cambio para *Quercus faginea* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia.

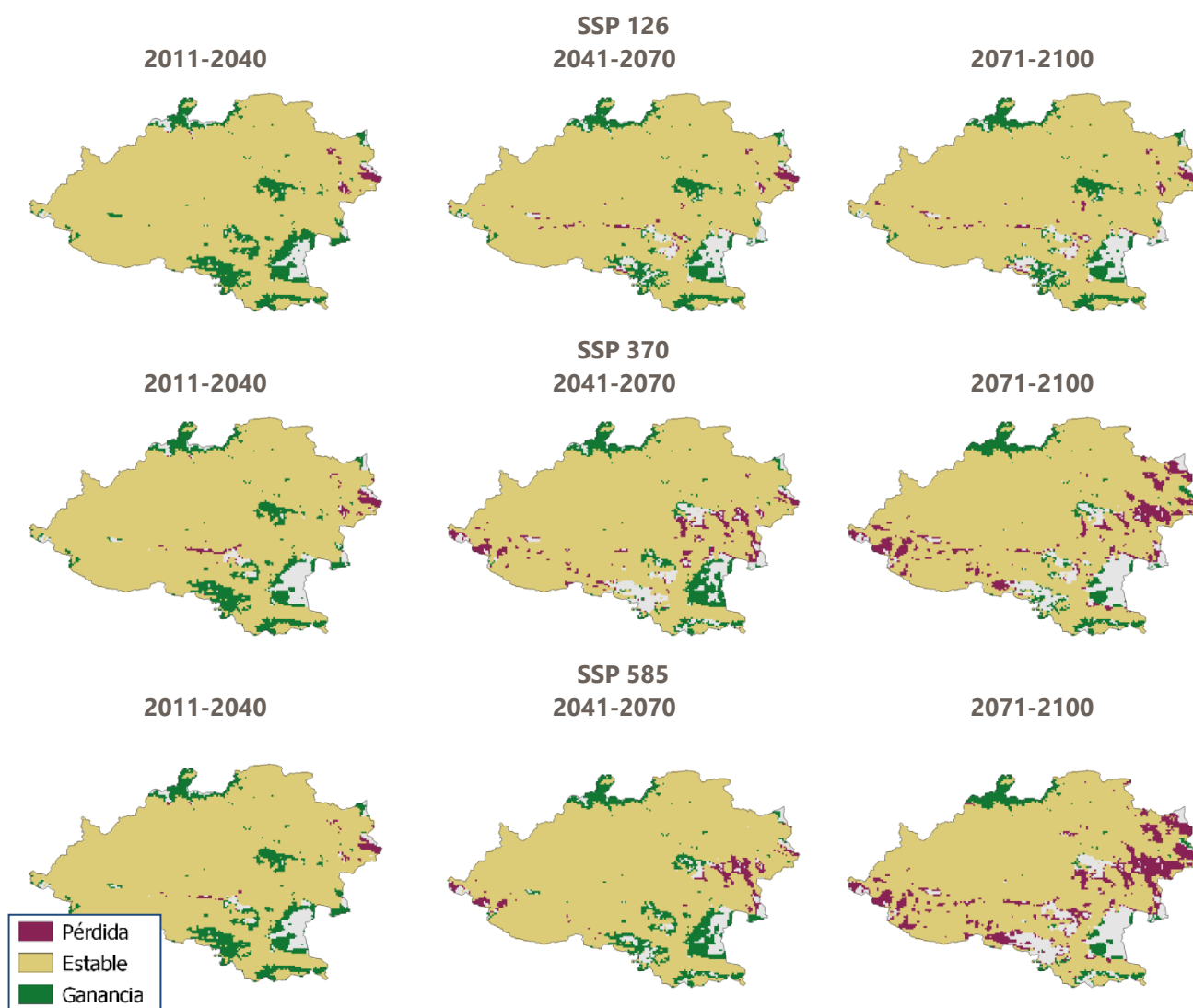


Figura 3.9.9: Mapas de cambio para *Quercus faginea*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (granate): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (amarillo): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (verde): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

Para el primer periodo temporal futuro 2011-2040, todas las trayectorias SSP reflejan estabilidad en la mayor parte de la predicción del quejigo, con ganancia de idoneidad hacia la zona central, norte (Pinares y El Valle) y sur (Medinaceli) de la provincia y con ligera pérdida de idoneidad en el este en la zona del Moncayo. Es reseñable que la única zona de la provincia sin idoneidad para la especie en este periodo es la zona cercana a Santa María de la Huerta. Los modelos de la especie obtenidos para los escenarios de clima futuro a corto y medio plazo indican un aumento gradual de la superficie idónea hasta ocupar alrededor del 93% de superficie para la trayectoria SSP126.

A corto y medio plazo esta especie se verá favorecida por el cambio climático con estabilidad en la zona central de la provincia y un aumento de su superficie idónea hacia el sur en Tierra de Almazán y Medinaceli y hacia el norte en Pinares, y el Valle. En el horizonte temporal más lejano (2071-2100) y para el escenario menos optimista SSP585, los modelos predicen ligeras pérdidas de superficie, cercanas al 7% de superficie potencial, disminuyendo de la idoneidad de las poblaciones del centro y este de la provincia en Moncayo y Campo de Gómara, pero conservando el 81% de la superficie de la provincia como idónea para la especie.

En los mapas de cambio del quejigo (Fig. 3.9.9) se observa que los modelos predicen el mantenimiento de las poblaciones con una ligera reducción del área potencial de la especie a largo plazo respecto al periodo de referencia, aunque otros trabajos sugieren mayores tasas de pérdida de idoneidad para la especie (Benito-Garzón et al., 2008; del Río et al., 2006; Felicísimo et al., 2011; López-Tirado et al., 2016b y Ruiz-Labourdette et al., 2012), de acuerdo con los diversos escenarios del cambio climático.

Las predicciones futuras para el quejigo varían en función de la escala espacial del estudio y de si se modeliza con *Quercus faginea* sensu lato o con los datos a nivel de subespecie. Los trabajos realizados para España predicen un aumento de la distribución potencial actual de la especie y aumento de la distribución bajo algunos escenarios climáticos, pero coinciden en predecir una reducción de la superficie potencial de la especie a largo plazo (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011). Aunque algunos autores clasifican a esta especie como poco vulnerable al cambio climático, con mayor ganancia que pérdida de superficie potencial futura (García-Valdés et al., 2013).

Los estudios realizados a escala local también pronostican una mayor distribución potencial respecto a la superficie ocupada por la especie en el presente (López-Tirado et al., 2018; Ruiz-Labourdette et al., 2012). Sin embargo, bajo los escenarios de cambio climático predicen para el quejigo; la desaparición de las poblaciones andaluzas tanto en masas monoespecíficas como en codominancia con otras especies (Hidalgo-Triana et al., 2023, López-Tirado et al., 2018), la reducción de superficie en Castilla y León (del Río et al., 2006) y la desaparición de las poblaciones más occidentales del Sistema Central e Ibérico con reducciones de superficie entre el 5 y el 44% (Ruiz-Labourdette et al., 2012).

Para el quejigo se predice un ligero ascenso altitudinal de entre 25 y 230 m para compensar el aumento de temperaturas y déficit hídrico (Ruiz-Labourdette et al., 2012). En escenarios futuros, otras especies más resistentes a la sequía como *Quercus ilex* ocuparían las zonas previamente ocupadas por el quejigo en diversas partes de la Península Ibérica; en las poblaciones andaluzas (López-Tirado et al., 2016b) y en el noroeste de España (Corcuera et al., 2004). Incluso algunos autores revelan que esta sustitución ya se está produciendo (López-Tirado et al., 2018).

Esta sustitución del quejigo por especies como la encina vendría explicada por su mayor capacidad adaptativa a condiciones de sequía frente a las especies marcescentes *Q. faginea* y *Q. pyrenaica* (San-Eufasio et al. 2020). Asimismo, las diferencias en el crecimiento estacional de la encina (a finales de verano y otoño) frente al quejigo (en primavera) permiten que la encina pueda crecer en periodos menos favorables que el quejigo al ser menos exigente en agua (Albuixech et al., 2012).



No obstante, los resultados obtenidos en este trabajo indican que, para la provincia de Soria, las predicciones para quejigo son más optimistas que para la encina, con mayor superficie potencial idónea en los escenarios futuros.

<i>Quercus faginea</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	13971	15490	1519	87.1%	96.6%	10.9%	89.4%
	2041-2070	13971	15054	1083	87.1%	93.9%	7.8%	98.5%
	2071-2100	13971	14969	998	87.1%	93.3%	7.1%	98.4%
SSP 370	2011-2040	13971	15192	1221	87.1%	94.7%	8.7%	98.7%
	2041-2070	13971	14371	400	87.1%	89.6%	2.9%	95.5%
	2071-2100	13971	13779	-192	87.1%	85.9%	-1.4%	92.2%
SSP 585	2011-2040	13971	15344	1373	87.1%	95.7%	9.8%	99.1%
	2041-2070	13971	14986	1015	87.1%	93.5%	7.3%	97.3%
	2071-2100	13971	12995	-976	87.1%	81.0%	-7.0%	88.1%

Tabla 3.9.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.9.9 para *Quercus faginea* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

Como se puede observar en la tabla 3.9.2, la provincia de Soria presenta un 87.1% de la superficie como habitable o idónea para la especie en el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie aumenta en la mayoría de periodos temporales y trayectorias SSP, hasta ocupar casi la totalidad de la superficie de la provincia para todas las trayectorias en el periodo 2011-2040. En las trayectorias SSP370 y SSP585 para el periodo 2071-2100 se produce una reducción de la superficie 1.4%-7% hasta ocupar un 85.9% y un 81% de la superficie de la provincia en el periodo 2071-2100.

En el caso del quejigo, el solape espacial entre el área potencial futura y el área potencial del periodo de referencia es muy alto en todas las trayectorias SSP y periodos temporales variando entre 88.1% y 99.1% en función del escenario climático considerado. Por tanto, a corto, medio y largo plazo se mantendrá en la vecindad de áreas potenciales del periodo de referencia para la especie, lo que sí podría permitir que la especie alcance espacialmente las nuevas zonas de ganancia de idoneidad por dispersión o colonización natural.

3.10 REBOLLO: *QUERCUS PYRENAICA* WILLD.

3.10.1 RESUMEN EJECUTIVO

Quercus pyrenaica se verá fuertemente afectado por el cambio climático en sus poblaciones sorianas. Su superficie se va a ver reducida notablemente a largo plazo, con fuertes pérdidas netas de superficie potencial, especialmente en las zonas situadas en el centro y sur de la provincia.

La provincia de Soria tiene una idoneidad potencial media-alta para el rebollo en el periodo de referencia (1981-2010), pudiendo ocupar hasta un 63.4% de la provincia.

Los modelos de la especie obtenidos para los escenarios de clima futuro a corto y medio plazo indican un descenso importante de la superficie idónea hasta reducirse drásticamente y no encontrar apenas zonas idóneas a finales de siglo en la provincia, en los escenarios climáticos menos optimistas.

En general las pérdidas de idoneidad se inician en la zona central y sur de la provincia, quedando zonas potenciales en la parte norte de la provincia, en Pinares, El Valle, Tierras Altas y unas pequeñas manchas en la zona del Moncayo.

Además, se espera que *Q. pyrenaica* sufra una migración altitudinal hacia cotas más elevadas, siendo sustituido en la parte de su hábitat situado en cotas más bajas por la encina y el pino negral debido a la mayor sequía por el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones.

3.10.2 DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA DE LA ESPECIE

El rebollo se distribuye por la Península Ibérica, donde se encuentra la mayor superficie de la especie, el suroeste de Francia y el norte de Marruecos (Fig 3.10.1). En España (Fig. 3.10.2) aparece en gran parte de las regiones, principalmente en el cuadrante noroccidental bordeando perimetralmente la cuenca del Duero, el arco Hercínico, sur de la cordillera Cantábrica y Sistema Ibérico. Se hace más rara su presencia hacia el sur y el este, con presencia dispersa en Sierra Morena, Sierras Béticas y hacia el oriente peninsular, en el Sistema Ibérico sur y en el sur de Cataluña (Alía et al., 2009a; Blanco et al., 1997).

Su rango altitudinal medio varía desde los 400 hasta los 1600 o 1700 m.s.n.m en el Sistema Central (Sierra de Estrela, Guadarrama) aunque pueden verse individuos salpicados desde el nivel del mar (costa cantábrica o gallega) hasta 2000 m.s.n.m. en el Rif (Blanco et al., 1997).

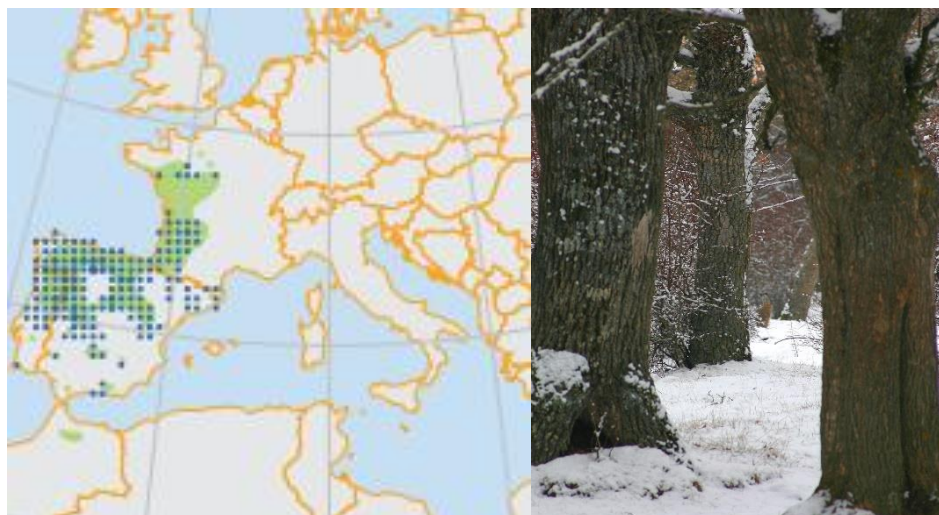


Figura 3.10.1. Izquierda: Distribución natural de *Quercus pyrenaica*. Fuente: Nieto et al., 2016. Derecha: Rebollar en Gallinero.

Es una especie que ocupa zonas de media montaña en España en zonas de carácter transicional entre el clima atlántico y mediterráneo. Las áreas donde se distribuye la especie tienen unas temperaturas medias entre de 8.4°C-13.4°C con oscilaciones anuales entre -5°C de media en invierno y los 22°C de media en verano, soportando bien la continentalidad. El periodo de heladas seguras que esta especie puede enfrentar es variable y puede extenderse durante más de cuatro meses y medio. En cuanto al régimen de precipitaciones, las precipitaciones anuales medias se sitúan alrededor de 650-1200 mm, necesitando un mínimo de 100-200 mm en verano (Alía et al., 2009a; Blanco et al., 1997). *Quercus pyrenaica* se sitúa en zonas de mayor altitud que otras especies arbóreas mediterráneas más térmicas, como la encina, con la que compite mejor en zonas con largos periodos de heladas y contacta con el piso superior de vegetación formado por especies más criófilas como el pino silvestre, el haya y otros robles caducifolios (Alía et al., 2009a).

El rebollo es una especie marcadamente acidófila, lo que limita su expansión en zonas submediterráneas o mediterráneas con cierta humedad de la parte caliza de la Península Ibérica, donde es sustituido por *Quercus faginea* subsp. *faginea*. Aunque puede vivir en zonas calizas donde las fuertes lluvias limiten el pH a valores cercanos a la neutralidad (Blanco et al., 1997; García et al., 2009).

Las poblaciones sorianas de esta especie pertenecen a la región de procedencia Sistema Ibérico Septentrional, con una climatología definida por el marcado efecto de la continentalidad. Las temperaturas medias anuales se sitúan sobre los 10°C con periodos de helada segura de más de cuatro meses (los más extensos de su área de distribución española). Las precipitaciones anuales se sitúan sobre los 600-900 mm con un descenso en verano, con dos meses de sequía (Alía et al., 2009a). En esta región se considera al rebollo la especie climática de del piso de vegetación pedemontano, siendo la transición entre especies de ambientes mediterráneos como la encina, y las especies de montaña, como el haya y el pino silvestre (Alía et al., 2009a).

El rebollo es una especie extendida por las áreas de la provincia con afloramiento de sustratos silíceos de la mitad norte y extremo sur, donde convive con pinos, en áreas de media montaña con cierta humedad (Segura et al., 2000). Estas poblaciones se encuentran influidas desde antiguo por la acción humana para su aprovechamiento como leña (Alcalde-Olivares, 2018), siendo habitual su transformación a monte bajo para aprovechar los rebrotes como alimento del ganado (Alía et al., 2009a) por su gran capacidad de rebrote. Su distribución se ha visto reducida en favor de otras especies como la encina, por el menor aprovechamiento de su fruto, proceso también observado en el quejigo (Blanco et al., 1997).

Se encuentran poblaciones de la especie al norte del Duero en el centro de la provincia en el Burgo, y zona central de Soria, y en el norte de la provincia en Pinares, el Valle y Tierras Altas y en Ólvega y Sierra del Moncayo. Al sur del Duero se encuentran poblaciones en la Sierra de la Pela y Medinaceli, en el límite de la provincia con Guadalajara.

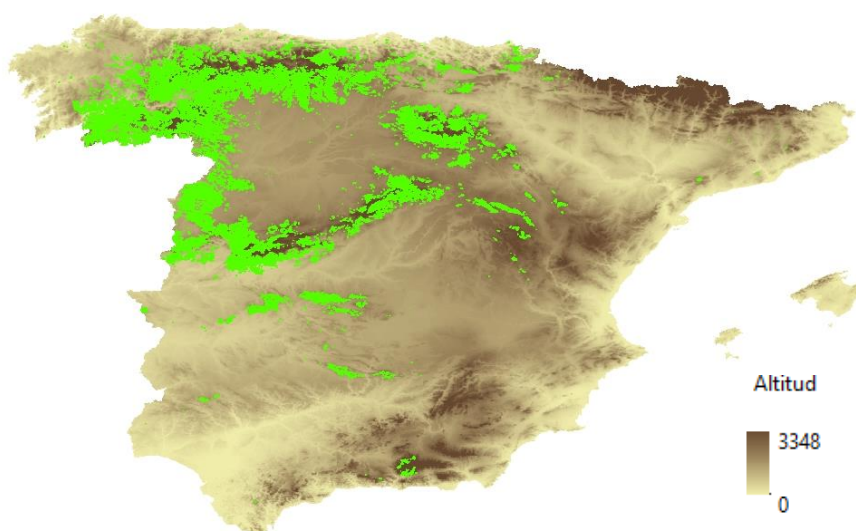


Figura 3.10.2: Distribución de *Quercus pyrenaica* en España.
 Fuente: Mapa Forestal de España, 2018.

3.10.3 DATOS DE PRESENCIA DE LA ESPECIE

A continuación, se presenta la distribución actual de *Quercus pyrenaica* en España y en la provincia de Soria con datos obtenidos del tercer Inventario Forestal Nacional (Fig. 3.10.3).

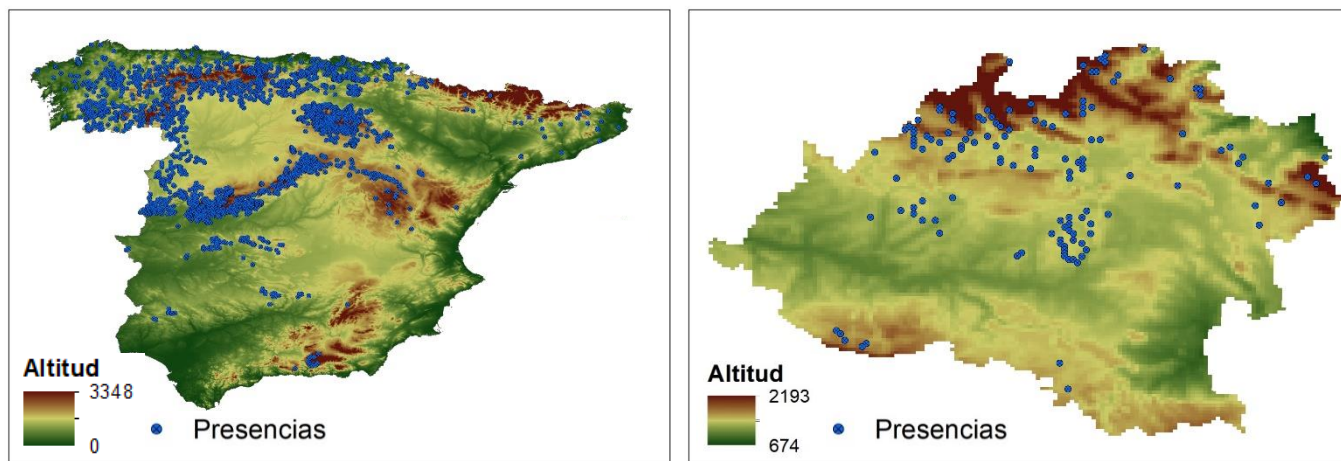
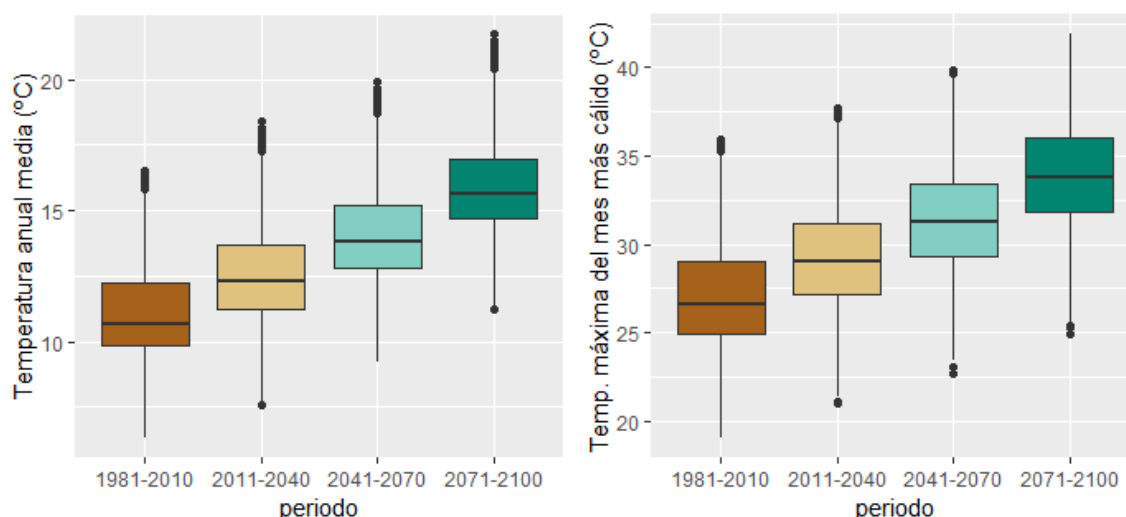


Figura 3.10.3: Parcelas del IFN3 con presencia de *Quercus pyrenaica* en la España peninsular (izquierda) y en la provincia de Soria (derecha).

El rebollo habita en lugares con temperatura media anual de 10 a 12.5°C y en un rango de temperaturas máximas de verano de entre 25 y 28°C. En cuanto a precipitaciones, el rango en el que la especie se desarrolla actualmente está situado entre 750-1100(2000) mm anuales con 50-120 (300) mm en verano (Fig. 3.10.4). las predicciones para la trayectoria SSP370 a finales de siglo indican que las presencias de la especie se verán expuestas a unas condiciones de aumento de temperatura hasta 5°C para la temperatura anual media y 6°C para la temperatura máxima del mes más cálido, y se prevé que las precipitaciones disminuyan ligeramente a corto plazo, recuperando los valores de referencia en el periodo 2071-2100.



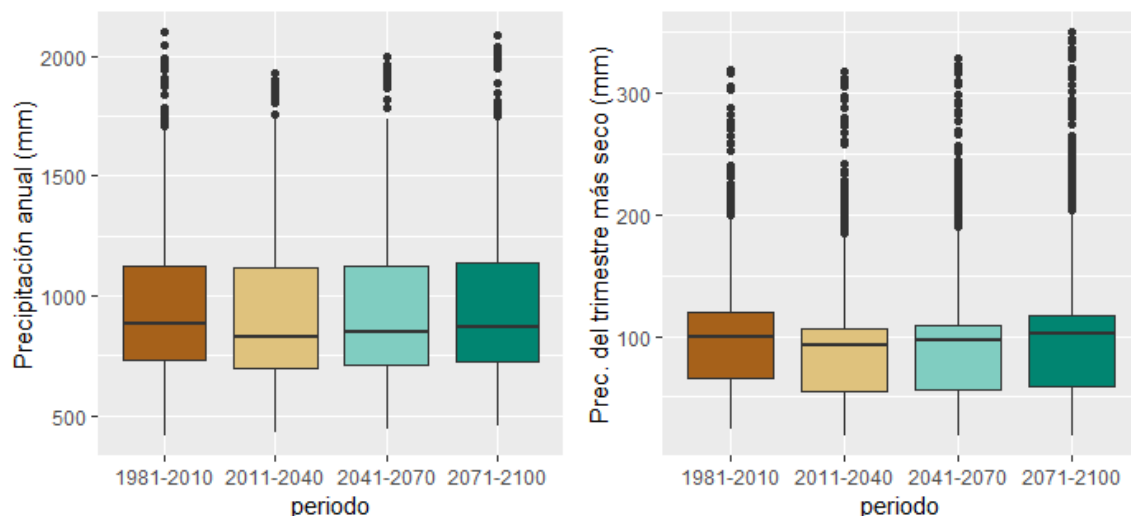


Figura 3.10.4: Gráficos de cajas y bigotes de las presencias ibéricas de *Quercus pyrenaica* con datos del IFN3. Se muestra la distribución de los valores de las variables Bio1, Bio5, Bio12 y Bio 17 en las presencias de la especie, mostrando la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos si los hubiera. Además, se muestra la evolución de los valores de las variables en los diferentes periodos temporales de la trayectoria SSP370.

3.10.4 VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables seleccionadas para modelizar *Quercus pyrenaica* fueron elegidas a través de un proceso de selección basado en la ecología de la especie (Prentice et al., 1992), correlación (Pearson $r \leq 0.75$) y colinealidad (factor de inflación de varianza < 5).

A continuación, se muestra la correlación presentada por las variables en el presente para el rebollo. Como se observa en la figura 3.10.5, las variables están correlacionadas por grupos.

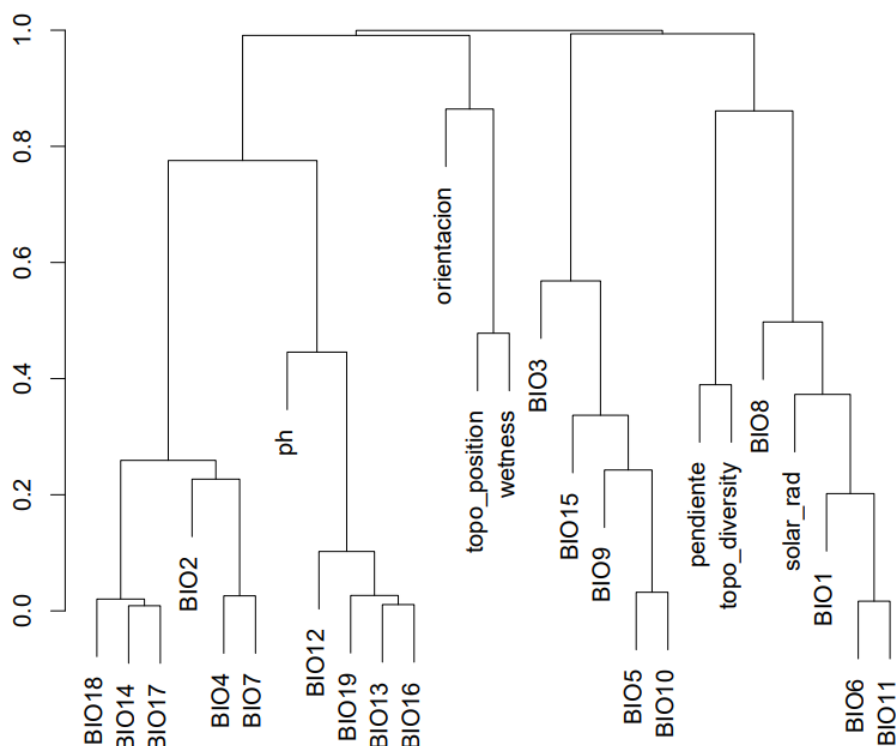


Figura 3.10.5: Correlograma de las variables para las presencias de *Quercus pyrenaica*.

Las variables elegidas para la generación de los modelos de *Quercus pyrenaica* fueron: Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 15, Bio 17, solar_rad, wetness y topo diversity.

Código	Descripción
BIO 3	Isotermalidad: Relación entre el rango de temperaturas entre el día y la noche y entre el verano e invierno (BIO02/BIO07) (* 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
solar_rad	Insolación
wetness	Índice de humedad del terreno
Topo_diversity	Índice de diversidad topográfica

Tabla 3.10.1: Variables usadas en los modelos de *Quercus pyrenaica*.

3.10.5 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010):

Para generar los modelos de *Quercus pyrenaica* se han dividido las 3190 presencias en 2552 para training (80%) y 638 para test (20%), y el estadístico AUC de validación nos da un valor de 0.78 lo que indica que el modelo generado tiene buena capacidad predictiva.

La variable más importante (Fig. 3.10.6) es Bio 5 (temperatura máxima del mes más cálido). Esta variable es la que más información aporta al modelo por sí misma, ya que es la de mayor ganancia cuando se usa de forma aislada. La variable ambiental que hace que disminuya más la ganancia cuando se omite es Bio 15 (estacionalidad en la precipitación), que parece tener la mayor cantidad de información no presente en el resto de variables.

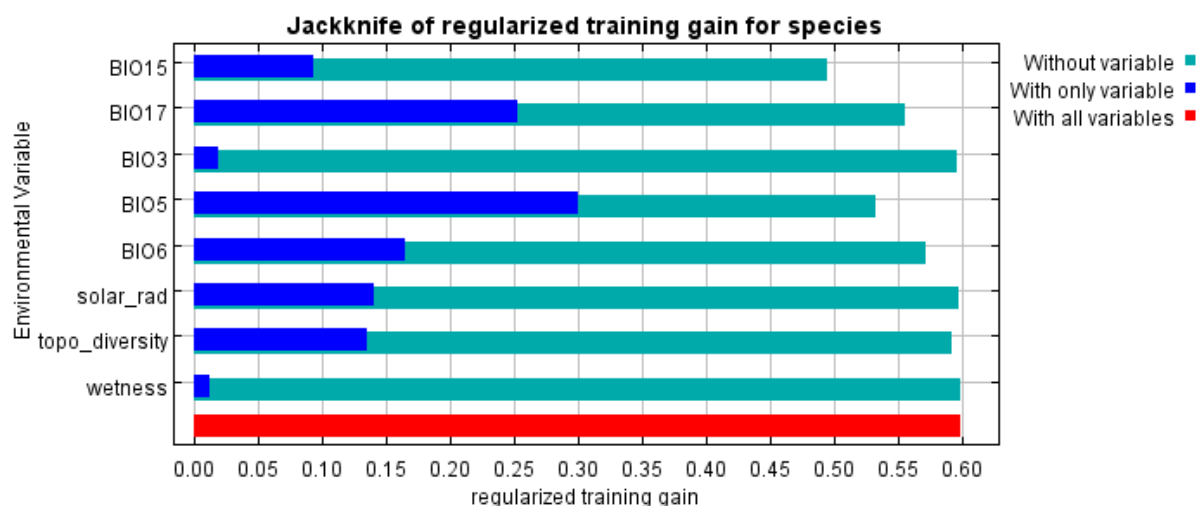


Figura 3.10.6: Gráfico de importancia de las variables en el modelo actual de *Quercus pyrenaica*. Este gráfico indica la importancia de cada variable en la estimación del modelo por sí mismas y cuando se omiten del modelo.

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010).

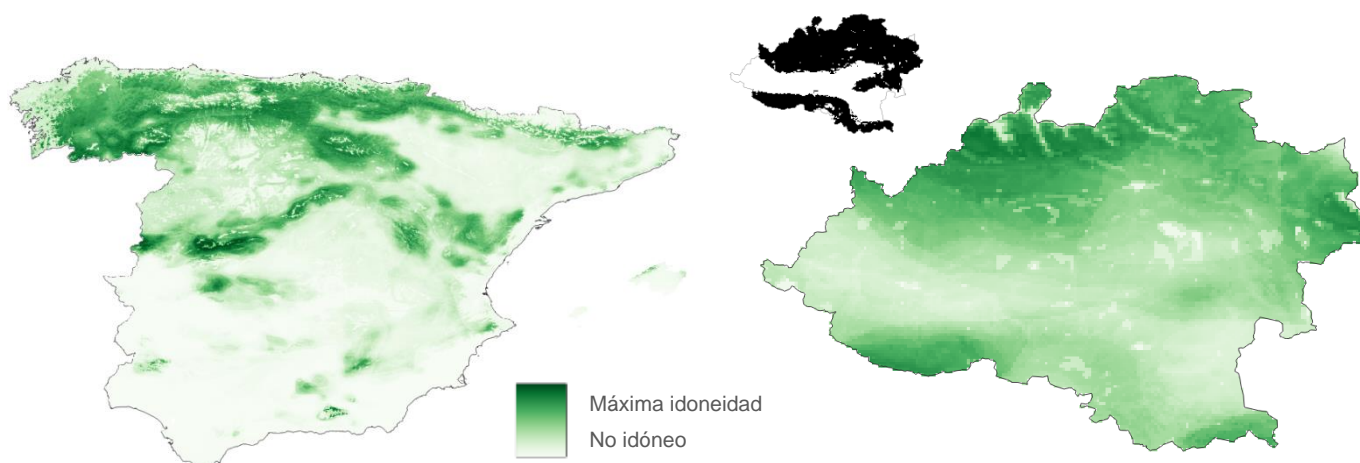


Figura 3.10.7: Distribución potencial de *Quercus pyrenaica* para el periodo de referencia. Izquierda: Península Ibérica y derecha: provincia de Soria. En grande se observa la idoneidad de la especie en la provincia según un gradiente de color verde y en pequeño la conversión del mapa de idoneidad continuo a uno binario de presencia/ ausencia de la especie (presencia-negro/ausencia-blanco).

Los valores de idoneidad del periodo de referencia (Fig. 3.10.7) coinciden con las predicciones realizadas por otros autores para esta especie (Felicísimo et al., 2011; García-Valdés et al., 2013; Vila-Viçosa et al., 2020) con una ligera expansión de su distribución por la periferia de la submeseta norte y siguiendo el patrón de su distribución natural. Los patrones de distribución potencial obtenidos coinciden más con los patrones propuestos por García-Valdés et al. (2013) y Vila-Viçosa et al. (2020), que con Felicísimo et al., (2011) que predice una idoneidad más alta que los anteriores en las poblaciones meridionales de la Península Ibérica (Sierra Morena y Sierras Béticas).

Asimismo, se predice un aumento de superficie potencialmente habitable por la especie respecto a la distribución actual de la especie (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011) lo que muestra según algunos autores que la especie no está equilibrio con las condiciones climáticas actuales (García-Valdés et al., 2013).

En la provincia de Soria, se observa una idoneidad potencial alta para este periodo en las zonas de altitud media de El Burgo, Pinares, Tierras Altas, Soria y la zona del Moncayo y las zonas situadas al sur en el límite de la provincia en El Burgo, Berlanga y Medinaceli. Este aumento de superficie idónea también ha sido observado en esta zona por otros autores (Ruiz-Labourdette et al., 2012) y puede responder a que la especie no está equilibrio con las condiciones climáticas actuales (García-Valdés et al., 2013) y que ha sido previamente desplazada en beneficio de otras especies, como la encina (Blanco et al., 1997).

3.10.6 MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA:

A continuación, se presenta el modelo proyectado bajo las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

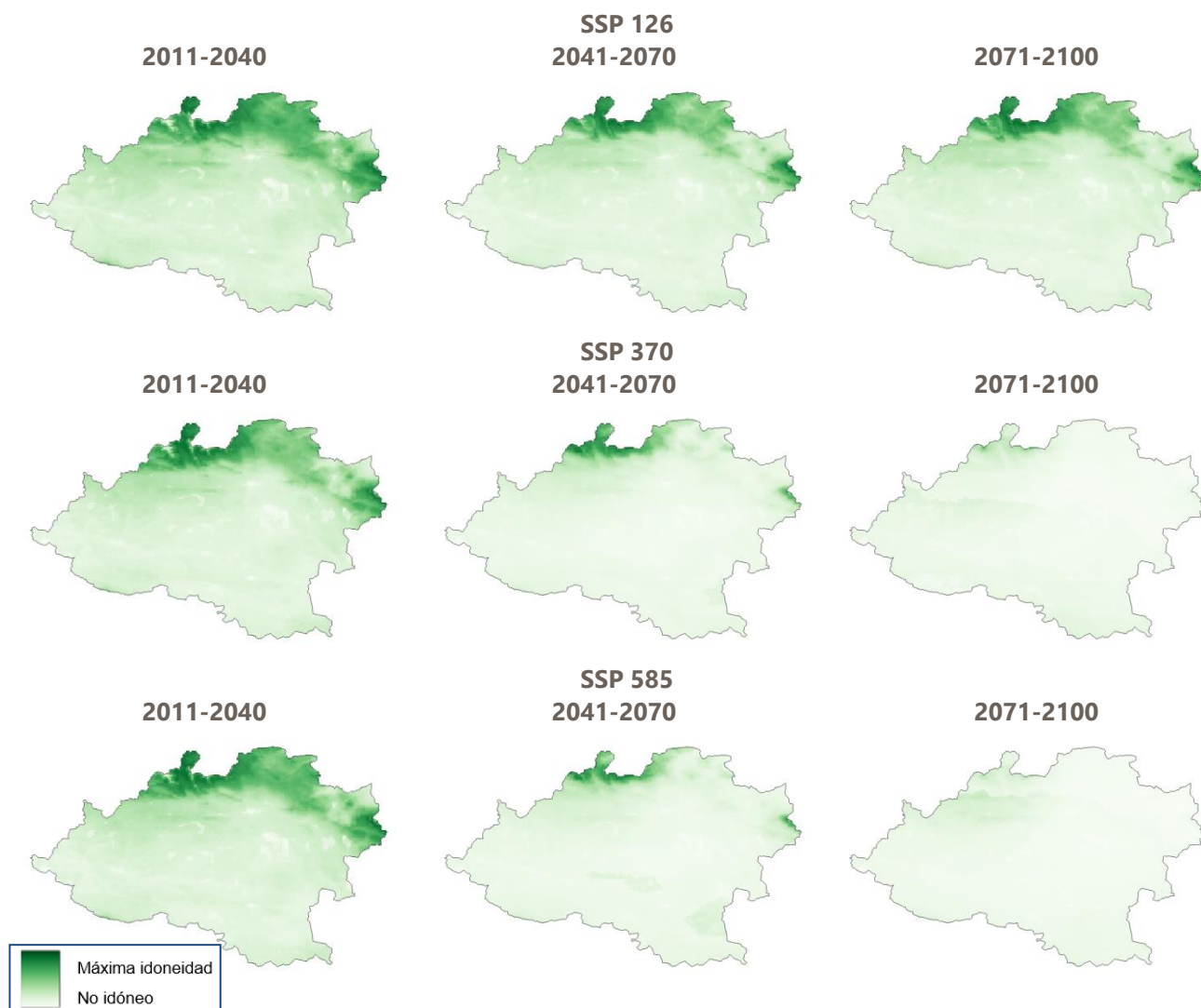


Figura 3.10.8: Distribución potencial de *Quercus pyrenaica* para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

Los valores de idoneidad futura para la provincia de Soria reflejan una importante disminución de idoneidad en todas las trayectorias SSP, perdiendo más de la mitad de la superficie idónea para la especie en el periodo 2011-2040 y perdiendo idoneidad en las poblaciones situadas en el centro y sur de la provincia (Fig. 3.10.8). A partir del periodo 2041-2070 la idoneidad de la especie se reduce drásticamente, perdiéndose grandes superficies potenciales en el centro y norte de la provincia en Pinares y Tierras Altas, con pequeñas islas de idoneidad en Tierras Altas para la trayectoria SSP126. Para el periodo 2071-2100, la disminución se incrementa notablemente en las trayectorias SSP 370 y 585 quedando solo el 0.2% de superficie como habitable en la trayectoria SSP370 en la zona de Pinares y sin superficie idónea en la trayectoria SSP585. A final de siglo para la trayectoria SSP126 las predicciones indican que se mantendría idónea y con zonas de idoneidad en Pinares y en el Moncayo.

Los patrones descritos se observan mejor en los mapas de cambio para *Quercus pyrenaica* en los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros respecto a la idoneidad potencial del periodo de referencia.

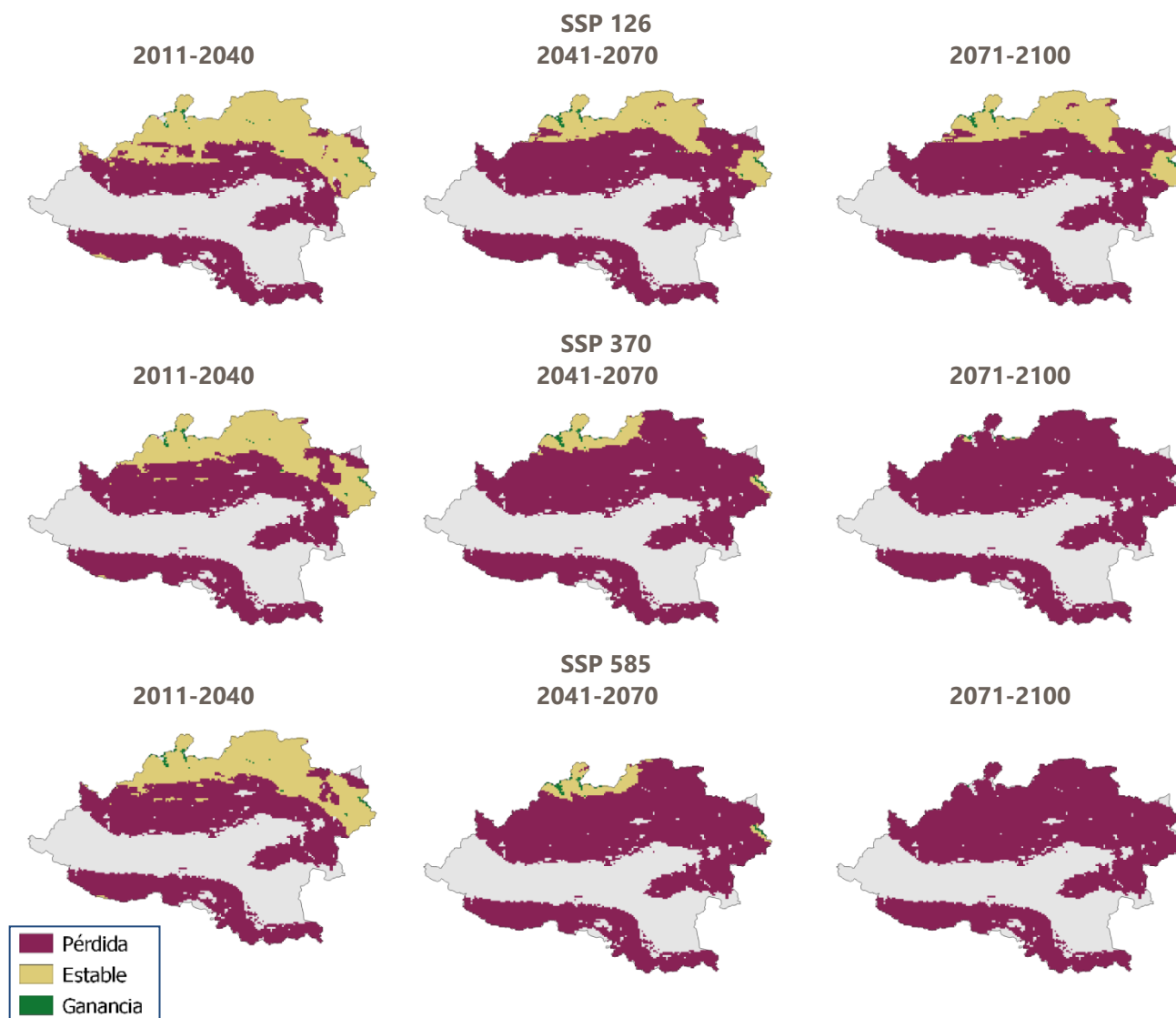


Figura 3.10.9: Mapas de cambio para *Quercus pyrenaica*. Cada mapa es el resultado de la comparación entre la idoneidad potencial del futuro (para un SSP y periodo temporal estudiado) y el periodo de referencia (1981-2010). Los colores de la leyenda (granate, amarillo y verde) hacen referencia al cambio ocurrido en esa celda con los siguientes casos: 1) pérdida (granate): la especie es idónea en el periodo de referencia pero no es idónea en el periodo futuro, 2) estable (amarillo): la especie es idónea tanto en el periodo de referencia como en el periodo futuro, 3) ganancia (verde): la especie no era idónea en el periodo de referencia y sí lo es en el periodo futuro y 4) en gris se aprecian las zonas que no son idóneas ni en el periodo de referencia ni en el periodo futuro.

Para el primer periodo temporal futuro 2011-2040, todas las trayectorias SSP reflejan estabilidad en el tercio norte de la provincia, con las principales zonas estables en Pinares, El Valle, Tierras Altas y en el Moncayo. En este periodo hay una pequeña ganancia de idoneidad en la zona de Pinares y Moncayo, con una pérdida de la mitad de la superficie habitable para la especie con respecto al periodo de referencia. Esta pérdida es más acusada en la zona central y sur de la provincia, en El Burgo, Berlanga y Medinaceli.

Para el periodo 2041-2070 las zonas norte de la provincia experimentan una notable pérdida de superficie idónea (menos las poblaciones de Tierras Altas y Moncayo en la trayectoria SSP126) y se extienden hacia el norte y este para el periodo 2071-2100 en las trayectorias SSP 370 y 585 dejando a la especie restringida al 0.2% de la superficie de la provincia en Pinares en la trayectoria SSP370 y sin superficie idónea en la

trayectoria SSP585. A final de siglo para la trayectoria SSP126 las predicciones indican que se mantendría idónea y con cierta ganancia de superficie las zonas situadas más al norte de Pinares, El Valle, Tierras Altas y Moncayo.

En los mapas de cambio del rebollo (Fig. 3.9.9) se observa que los modelos a medio y largo plazo predicen una severa reducción del área potencial de la especie respecto al periodo de referencia, como ha sido observado para esta especie en otros trabajos (Benito-Garzón et al., 2008; del Río et al., 2006; Felícísimo et al., 2011; López-Tirado et al., 2016b y Ruiz-Labourdette et al., 2012), de acuerdo con los diversos escenarios del cambio climático.

Las predicciones futuras para el rebollo varían en función de la escala espacial del estudio. Los trabajos realizados para España predicen un aumento de la distribución potencial actual de la especie pero coinciden en predecir una importante reducción de la superficie potencial de la especie a largo plazo (Benito-Garzón et al., 2008; Felícísimo et al., 2011; García-Valdés et al., 2013).

Los estudios realizados a escala local también pronostican una mayor distribución potencial respecto a la superficie ocupada por la especie en el presente (López-Tirado et al., 2018; Ruiz-Labourdette et al., 2012). Sin embargo, bajo los escenarios de cambio climático predicen para el rebollo; la reducción de superficie ocupada por las poblaciones andaluzas tanto en masas monoespecíficas como en codominancia con otras especies (Hidalgo-Triana et al., 2023, López-Tirado et al., 2018), la reducción de superficie de la especie en zonas submediterráneas aunque con aumento de presencia en zonas mediterráneas de Castilla y León (del Río et al., 2006) y la desaparición de las poblaciones más occidentales del Sistema Central e Ibérico con reducciones de superficie entre el 50 y el 70% (Ruiz-Labourdette et al., 2012).

El rebollo está considerado como una especie de alta vulnerabilidad al cambio climático (Hidalgo-Triana et al., 2023; García-Valdés et al., 2013). Algunos autores indican que la especie ya está reduciendo su presencia en el centro de la Península Ibérica (Hernández-Santana et al., 2008 y Ruiz-Labourdette et al., 2013) como resultado del incremento en la duración y recurrencia de las sequías.

Para el rebollo se predice un ascenso altitudinal de entre 25 y 230 m para compensar el aumento de temperaturas y déficit hídrico (Ruiz-Labourdette et al., 2012). Sin embargo, la capacidad de supervivencia de estas poblaciones mediante el ascenso en altitud es limitada por estar situadas en zonas de montaña (García-Valdés et al., 2013) y dada la gran sensibilidad del melojo a las heladas tardías (González-González et al., 2013). En escenarios futuros, otras especies más resistentes a la sequía como *Quercus ilex* ocuparían las zonas previamente ocupadas por el rebollo en diversas partes de la Península Ibérica como en las poblaciones andaluzas (López-Tirado et al., 2016b). Esta sustitución del rebollo por especies como la encina vendría explicada por su mayor capacidad adaptativa a condiciones de sequía frente a las especies marcescentes *Q. faginea* y *Q. pyrenaica* (San-Eufrasio et al. 2020).

<i>Quercus pyrenaica</i>	Periodo temporal	(i) Nº píxeles idóneos periodo referencia	(ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro	(iii) Diferencia (ii)-(i)	(iv) Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia)	(v) % Superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro)	(vi) Variación superficie idoneidad (%)	(vii) Tasa estabilidad espacial (%)
SSP 126	2011-2040	10170	4127	-6043	63.4%	25.7%	-59.4%	40.1%
	2041-2070	10170	2278	-7892	63.4%	14.2%	-77.6%	21.7%
	2071-2100	10170	2273	-7897	63.4%	14.2%	-77.6%	21.7%
SSP 370	2011-2040	10170	3003	-7167	63.4%	18.7%	-70.5%	28.9%
	2041-2070	10170	714	-9456	63.4%	4.5%	-93.0%	6.4%
	2071-2100	10170	34	-10136	63.4%	0.2%	-99.7%	0.2%
SSP 585	2011-2040	10170	3297	-6873	63.4%	20.6%	-67.6%	31.8%
	2041-2070	10170	607	-9563	63.4%	3.8%	-94.0%	5.3%
	2071-2100	10170	1	-10169	63.4%	0.0%	-100.0%	-

Tabla 3.10.2: Evolución de los valores de los mapas de la figura 3.10.9 para *Quercus pyrenaica* según los diferentes periodos temporales y trayectorias SSP. (i) Nº píxeles idóneos periodo referencia: suma de píxeles pérdida (granate) y estable (amarillo), (ii) Nº píxeles idóneos periodo futuro: suma de píxeles estable (amarillo), y ganancia (verde), (iii) Diferencia (ii)-

(i): Diferencia entre el número de píxeles idóneos en el periodo futuro y el periodo de referencia, (iv) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo de referencia), (v) Porcentaje de superficie de la provincia con idoneidad para la especie (periodo futuro). (vi) Variación superficie idoneidad: Porcentaje de variación de la idoneidad entre el periodo futuro y el periodo de referencia, (vii) Tasa estabilidad espacial: Porcentaje de píxeles idóneos estables en el periodo de referencia que continúan siendo idóneos en el periodo futuro (sin incorporar los píxeles de ganancia).

Como se puede observar en la tabla 3.10.2, la provincia de Soria presenta un 63.4% de la superficie como habitable o idónea para la especie en el periodo de referencia (1981-2010). Esta superficie disminuye para todos los periodos temporales y trayectorias SSP, siendo la reducción mínima de esta superficie de un 59.4% hasta ocupar un 25.7% de la superficie de la provincia en el periodo 2011-2040 y la trayectoria SSP126 y una reducción máxima de un 100% en el periodo temporal 2071-2100 de la trayectoria SSP585.

En el caso del rebollo, el solape espacial entre el área potencial futura y el área potencial del periodo de referencia es medio en todas las trayectorias SSP del periodo 2011-2040 (28.9%-40.1%) y disminuye para el resto de periodos temporales y trayectorias SSP. Por tanto, a corto plazo la especie se mantendrá en zonas cercanas a áreas potenciales del periodo de referencia. A medio plazo, aunque las poblaciones futuras estarán en áreas cercanas a las áreas potenciales del periodo de referencia (en Tierra de Pinares y el Valle), el solape es bajo alrededor del 6% en las trayectorias SSP370 y 585 ya que el área potencial futura habitable para la especie es muy reducida.

3.11 ANÁLISIS CONJUNTO DE LA SENSIBILIDAD DE LAS ESPECIES DEL PROYECTO AL CAMBIO CLIMÁTICO

En este apartado se combinan los mapas de idoneidad potencial de todas las especies del estudio para determinar las comarcas de la provincia con mayor presencia potencial de especies o mayor pérdida potencial, proporcionando información sobre la idoneidad futura de estas especies en el territorio para ayudar en la gestión de sus masas. Los mapas de riqueza de especies obtenidos no son mapas de biodiversidad si no mapas que indican cuántas de las especies modelizadas tienen un valor de idoneidad alto en cada punto de la provincia. Se han obtenido para sintetizar la información proporcionada por los modelos de distribución de especies ya que permiten ver la evolución de la idoneidad de las especies en un territorio en el tiempo, y también han sido usados en otros trabajos (Benito-Garzón et al., 2008; Felicísimo et al., 2011).

3.11.1 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2010)

A continuación, se presenta el mapa de riqueza de especies para el periodo de referencia.

1981-2010

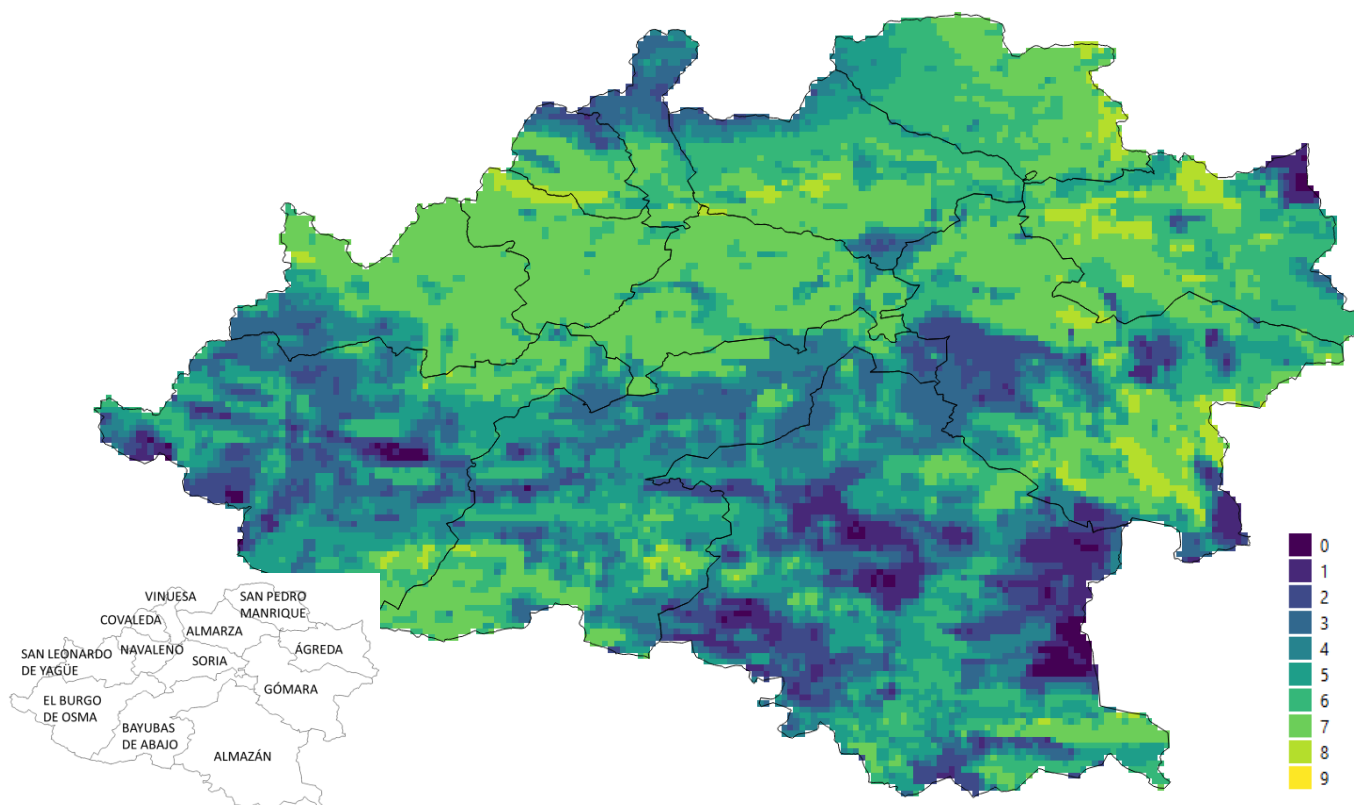


Figura 3.11.1: Mapa de riqueza de especies para las condiciones climáticas del periodo de referencia (1981-2010) en la provincia de Soria. La riqueza de especies indica en cada pixel la suma del número de especies idóneas en ese punto para ese periodo temporal siendo 0 el valor mínimo y 9 el valor máximo.

En el periodo de referencia la riqueza de especies es mayor en la mitad norte de la provincia, especialmente en Pinares, el Valle y Tierras Altas, y en el sur de la provincia en la zona sur de El Burgo limitando con Bayubas de Abajo, y Medinaceli-Arcos de Jalón (Fig. 3.11.1). El modelo predice que el 46% de la superficie de la provincia presenta idoneidad para el rango de 4 - 6 especies (Tabla 3.11.1).

3.11.2 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA

Seguidamente se presentan los mapas de riqueza de especies para los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros.

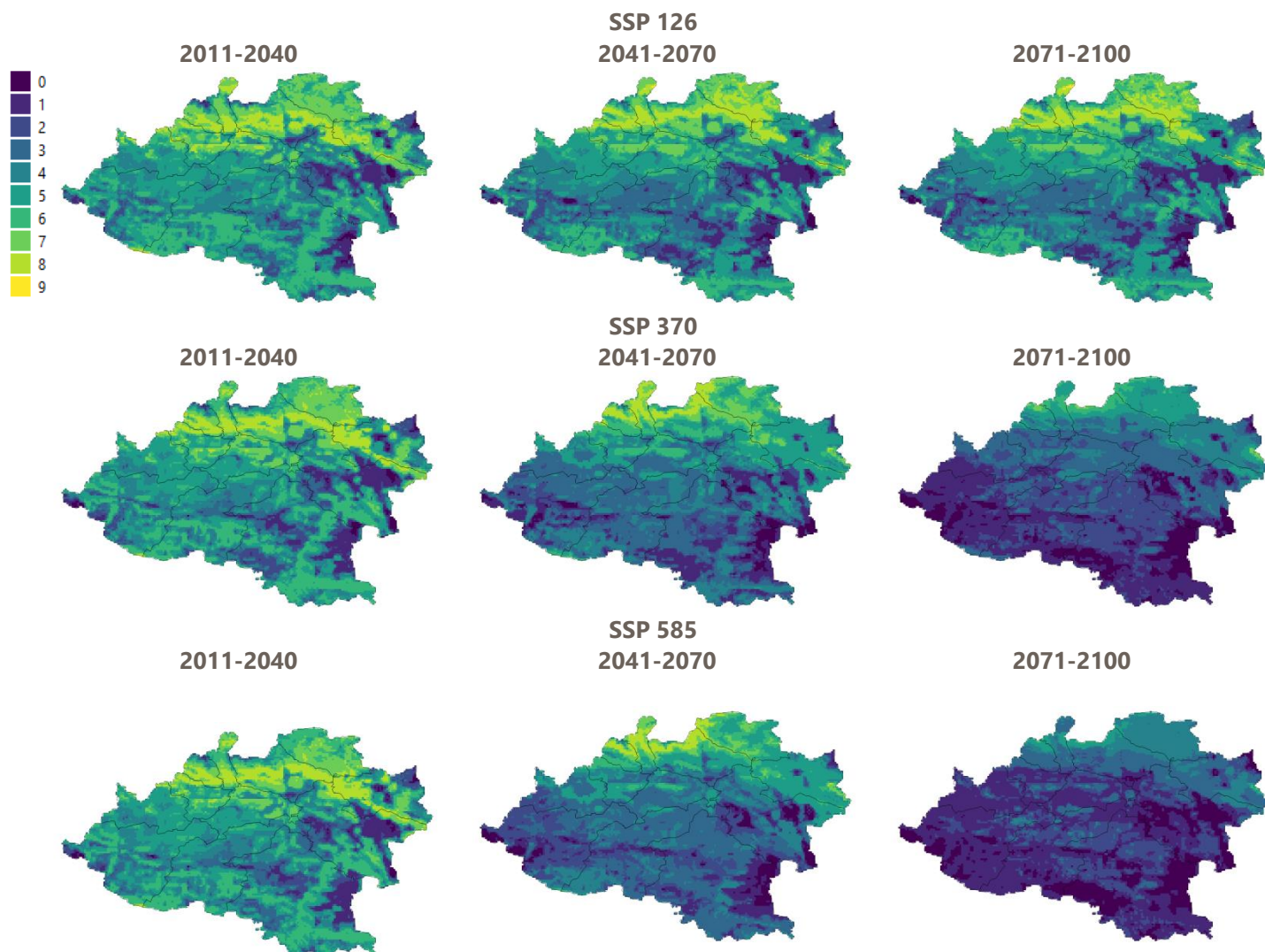


Figura 3.11.2: Mapa de riqueza de especies para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria.

En el periodo 2011-2040 la riqueza de especies es más alta en el norte de la provincia, en Pinares, el Valle y Tierras Altas y a medio plazo, 2041-2070, se desplaza hacia altitudes más elevadas de esas zonas (Fig. 3.11.2). Para el periodo 2041-2070 la riqueza del sur de la provincia disminuye, y este patrón continúa en el periodo 2071-2100 donde la mayor riqueza de especies se aprecia en el norte de la provincia en Pinares, el Valle y Tierras Altas en la trayectoria SSP126, disminuyendo de forma importante el número de especies por pixel en estas zonas en las trayectorias SSP370 y SSP585 (Tabla 3.11.1).

A corto plazo predomina en la provincia las zonas con 4-6 y 7-9 especies idóneas. Sin embargo, a medio y largo plazo la tendencia se invierte disminuyendo la riqueza de especies en las distintas zonas de la provincia, incluso en el norte, aumentando la superficie de zonas con 0-3 especies (Tabla 3.11.1).

Riqueza de especies		0-3 especies	% Superficie de la provincia con 0-3 especies	4-6 especies	% Superficie de la provincia con 4-6 especies	7-9 especies	% Superficie de la provincia con 7-9 especies
Periodo de referencia	1981-2010	3603	22%	7757	48%	4676	29%
SSP 126	2011-2040	2794	17%	10362	65%	2880	18%
	2041-2070	4800	30%	8775	55%	2461	15%
	2071-2100	5252	33%	8535	53%	2249	14%
SSP 370	2011-2040	3289	21%	10120	63%	2627	16%
	2041-2070	8439	53%	6397	40%	1200	7%
	2071-2100	12575	78%	3408	21%	53	0%
SSP 585	2011-2040	3229	20%	10320	64%	2487	16%
	2041-2070	9681	60%	5502	34%	853	5%
	2071-2100	14207	89%	1828	11%	1	0%

Tabla 3.11.1: Tabla resumen de resultados de riqueza de especies para las condiciones climáticas de los diferentes escenarios SSPs y periodos temporales futuros en la provincia de Soria. Se muestra el número de píxeles con número de especies 0-3.

Es importante mencionar que, a causa de las limitaciones de los modelos, la cartografía de las zonas potencialmente idóneas para las especies puede presentar inexactitudes a nivel local. Asimismo, dado que los datos en el ámbito agrícola y urbano se extrapolan a partir de las observaciones realizadas en el inventario forestal, cabe la posibilidad de errores de infrarrepresentación de las especies en zonas agrícolas (como es el caso de la posible infrarrepresentación de especies xéricas en sitios áridos como Valverde de Ágreda y Santa María de Huerta). Esto es debido a que el modelo presenta falta de datos de entrenamiento en esas áreas. Por ello, es necesario entender la metodología y las limitaciones de uso de los modelos para llevar a cabo una interpretación efectiva de los resultados obtenidos. Asimismo, las adaptaciones locales al clima y la plasticidad ecológica de las poblaciones de las especies pueden suavizar la posible reducción futura de la superficie ocupada por las mismas (Benito-Garzón et al., 2011).

Es importante destacar que ningún escenario de cambio climático para un sitio o área es probable que sea definitivo, con lo que otros patrones de clima futuro o diferentes patrones estacionales de distribución de las lluvias pueden tener una importancia crucial en el clima, especialmente en el clima mediterráneo. Si las lluvias aumentan en el futuro, es muy probable que tenga un efecto positivo en el crecimiento pero, aunque la cantidad total anual de lluvia sea mayor, si esta se concentra en episodios puntuales fuera de la estación seca, se traducirá en un peor balance hídrico de las masas durante el verano.

Por tanto, pese a que muchas comarcas sorianas, especialmente las situadas en el sur y centro-este de la provincia, quedarán con bajo número de especies idóneas en los escenarios climáticos más adversos, la gestión forestal adaptativa jugará un papel clave, ya que una gestión adaptada al cambio climático puede permitir a algunas especies soportar contextos climáticos más adversos, e incluso persistir fuera de su óptimo climático.



4. BIBLIOGRAFÍA

- Albuixech, J., Camarero, J.J., Montserrat-Martí, G. 2012. Dinámica estacional del crecimiento secundario y anatomía del xilema en dos *Quercus* mediterráneos que coexisten. *Forest Syst* 21(1):9–22.
- Alcalde-Olivares, C. 2018. Las podas de roble (*Quercus pyrenaica*) en la Comarca de Almarza (Soria): Documentación de la experiencia, situación actual y perspectivas de futuro. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (44), 1-8.
- Alía, R., García del Barrio, J., Iglesias, S., Mancha, J., de Miguel, J., Peragón, J., Pérez, F., Sánchez del Ron, D. 2009a. Regiones de procedencia de especies forestales en España. CIFOR-INIA. Dpto. Sistemas y Recursos Forestales. Madrid, España. 363 p.
- Alía, R. y S. Martín. 2009b. Guía técnica para la conservación genética y utilización del pino negral (*Pinus pinaster*). Foresta. Madrid. España. 6 páginas.
- Antón, M.G., Múgica, F.F., Ollero, H.S., Juaristi, C.M., Ruiz, J.M. 1994. Una secuencia polínica en Quintana Redonda (Soria). Evolución holocena del tapiz vegetal en el Sistema Ibérico septentrional. In *Anales del Jardín Botánico de Madrid* (Vol. 52, No. 2, pp. 187-195). Real Jardín Botánico.
- García, I. Jiménez, P., 2009. 9230 Robledales de *Quercus pyrenaica* y robledales de *Quercus robur* y *Quercus pyrenaica* del Noroeste ibérico. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 66 p.
- Garzón, M.B., Ruiz, J.M., de Dios, R.S., Ollero, H.S. 2003. Predicción de la potencialidad de los bosques esclerófilos españoles mediante redes neuronales artificiales. *Graellsia*, 59(2-3), 345-358.
- Benito Garzon, M., Blazek, R., Neteler, M., De Dios, R.S., Ollero, H.S., Furlanello, C. 2006. Predicting habitat suitability with machine learning models: the potential area of *Pinus sylvestris* L. in the Iberian Peninsula. *Ecological modelling*, 197(3-4), 383-393.
- Benito Garzón, M., Sánchez de Dios, R., Sainz Ollero, H. 2008. Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Applied vegetation science*, 11(2), 169-178.
- Benito Garzón, M., Alía, R., Robson, T.M., Zavala, M.A. 2011. Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 20(5), 766-778.
- Benito, B., Lorite, J., Peñas, J., 2011. Simulating potential effects of climatic warming on altitudinal patterns of key species in Mediterranean-alpine ecosystems. *Clim. Chang.* 108, 471-483.
- Benito, B.M., Svenning, J.C., Kellberg-Nielsen, T., Riede, F., Gil-Romera, G., Mailund, T., Kjaergaard, P.C., Sandel, B.S., 2016. The ecological niche and distribution of Neanderthals during the Last Interglacial. *J. Biogeogr.*
- Blanco, E., Casado, M.A., Costa, M., Escribano, R., García, M., Génova, M., ... Sanz, H. 1997. Los Bosques Ibéricos. Una interpretación geobotánica.
- Camarero, J.J., Olano, J.M., Parras, A. 2010. Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *New Phytologist*, 185(2), 471-480.



- Candel-Perez, D., Linares, J.C., Vinegla, B., Lucas-Borja, M.E. 2012. Assessing climate-growth relationships under contrasting stands of co-occurring Iberian pines along an altitudinal gradient. *For. Ecol. Manage.*, 274, pp. 48-57.
- Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species. *Data in Brief* 12, 662-666.
- Corcuera, L., Camarero, J.J., Gil-Pelegrín, E. 2004. Effects of a severe drought on growth and wood anatomical properties of *Quercus faginea*. *Iawa Journal*, 25(2), 185-204.
- de Rigo, D., Caudullo, G., 2016. *Quercus ilex* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.) *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp.
- del Río, S., Penas, A. 2006. Potential distribution of semi-deciduous forests in Castile and Leon (Spain) in relation to climatic variations. *Plant Ecology*, 185, 269-282.
- del Río, S., Álvarez-Esteban, R., Cano, E., Pinto-Gomes, C., Penas, A. 2018. Potential impacts of climate change on habitat suitability of *Fagus sylvatica* L. forests in Spain, *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*.
- DeSoto, L., Olano, J.M., Rozas, V., De la Cruz, M. 2010. Release of *Juniperus thurifera* woodlands from herbivore-mediated arrested succession in Spain. *Applied Vegetation Science*, 13(1), 15-25.
- do Amaral-Franco J. 1986b. *Juniperus* L. In: Castroviejo S (ed) *Flora Ibérica*. Real Jardín Botánico de Madrid, CSIC, Madrid, pp 181-188.
- do Amaral-Franco J. 1986a. *Pinus* L. In: Castroviejo S (ed) *Flora Ibérica*. Real Jardín Botánico de Madrid, CSIC, Madrid, pp 168-174.
- do Amaral-Franco J. 1990. *Quercus* L. In: Castroviejo S (ed) *Flora Ibérica*. Real Jardín Botánico de Madrid, CSIC, Madrid, pp 15-36.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, J.R., Lehmann, A., et al., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. 29, 129-151.
- Elith, J., Leathwick, J.R., 2009. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40, 677-697.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers. Distrib.* 17,43-57.
- Escribano-Avila, G., Sanz-Pérez, V., Pías, B., Virgós, E., Escudero A, Valladares F. 2012. Colonization of Abandoned Land by *Juniperus thurifera* Is Mediated by the Interaction of a Diverse Dispersal Assemblage and Environmental Heterogeneity. *PLoS ONE* 7(10): e46993.
- Feliciísimo, A.M., Muñoz, J., Villalba, C.J., Mateo, R.G. 2011. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española. 1. Flora y vegetación. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.

- Franklin, J., 2010. Mapping species distribution: spatial inference and prediction. Cambridge University Press, Cambridge.
- García-Plazaola, J.I., Becerril, J.M. 2000. Effects of drought on photoprotective mechanisms in European beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from different provenances. *Trees*, 14, 485-490.
- García-Valdés, R., Zavala, M.A., Araujo, M.B., Purves, D.W. 2013. Chasing a moving target: Projecting climate change-induced shifts in non-equilibrium tree species distributions. *Journal of Ecology*, 101(2), 441-453.
- Gastón González, A., García-Viñas, J. I., Saura, S., Caudullo, G., de Rigo, D., 2016. *Juniperus thurifera* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayán, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp.
- González-González, B.D., García-González, I., Vázquez-Ruiz, R.A. 2013. Comparative cambial dynamics and phenology of *Quercus robur* L. and *Q. pyrenaica* Willd. in an Atlantic forest of the northwestern Iberian Peninsula. *Trees*, 27, 1571-1585.
- González-Muñoz, N., Linares, J.C., Castro-Díez, P., Sass-Klaassen, U. 2014. Predicting climate change impacts on native and invasive tree species using radial growth and twenty-first century climate scenarios. *Eur J For Res* 133:1073–1086.
- Gray, L.K., Hamann, A. 2011. Strategies for reforestation under uncertain future climates: guidelines for Alberta, Canada. *PloS one*, 6(8), e22977.
- Hällfors, M.H., Aikio, S., Fronzek, S., Hellmann, J.J., Rytteri, T., Heikkinen, R.K. 2016. Assessing the need and potential of assisted migration using species distribution models. *Biological Conservation*, 196, 60-68.
- Hällfors, M.H., Aikio, S., Schulman, L.E. 2017. Quantifying the need and potential of assisted migration. *Biological Conservation*, 205, 34-41.
- Hengl, T. et al. 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one* 12.2. e0169748.
- Hernández-Santana, V., Martínez-Fernández, J., Morán, C., Cano, A. 2008. Response of *Quercus pyrenaica* (melojo oak) to soil water deficit: a case study in Spain. *Eur. J. For. Res.* 127, 369–378.
- Hidalgo-Triana, N., Solakis, A., Casimiro-Soriguer, F., Choe, H., Navarro, T., Pérez-Latorre, A.V., Thorne, J.H. 2023. The high climate vulnerability of western Mediterranean forests. *Science of The Total Environment*, 895, 164983.
- Hijmans, R.J., Elith, J., 2013. Species distribution modeling with R. R CRAN Project. URL: <http://cran.r-project.org/web/packages/dismo/vignettes/sdm.pdf>
- Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J., 2015. dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=dismo>
- Houston Durrant, T., de Rigo, D., Caudullo, G., 2016. *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayán, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp.

- Hutchinson, M.F., 1991. The application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation. Data Assimilation Systems, J. D. Jasper, Ed., BMRC Research Report No. 27, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia, 104–113.
- IFN3, 2008. Tercer inventario Nacional Forestal. 1997-2007. Ministerio de Medio Ambiente.
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, P., Kessler, M. (2017): Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas. Scientific Data. 4 170122.
- López-Tirado, J., Hidalgo, P.J. 2014. A high resolution predictive model for relict trees in the Mediterranean-mountain forests (*Pinus sylvestris* L., *P. nigra* Arnold and *Abies pinsapo* Boiss.) from the south of Spain: A reliable management tool for reforestation. *Forest Ecology and Management*, 330, 105-114.
- López-Tirado, J., Hidalgo, P.J. 2016a. Ecological niche modelling of three Mediterranean pine species in the south of Spain: a tool for afforestation/reforestation programs in the twenty-first century. *New Forests* 47, 411–429.
- López-Tirado, J., Hidalgo, P.J. 2016b. Predictive modelling of climax oak trees in southern Spain: insights in a scenario of global change. *Plant Ecology*, 217, 451-463.
- López-Tirado, J., Hidalgo, P.J. 2018a. Predicting suitability of forest dynamics to future climatic conditions: the likely dominance of Holm oak [*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.] and Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.). *Annals of forest science*, 75(1), 1-11.
- López-Tirado, J., Vessella, F., Schirone, B., Hidalgo, P.J. 2018b. Trends in evergreen oak suitability from assembled species distribution models: assessing climate change in south-western Europe. *New Forests*, 49, 471-487.
- MacKenzie, W.H., Mahony, C.R. 2021. An ecological approach to climate change-informed tree species selection for reforestation. *Forest Ecology and Management*, 481, 118705.
- Miller, J., 2010. Species distribution modeling. *Geogr. Compass*. 4, 490-509.
- Morales-Molino, C., Tinner, W., García-Antón, M., Colombaroli, D. 2017. The historical demise of *Pinus nigra* forests in the Northern Iberian Plateau (south-western Europe). *Journal of Ecology*, 105(3), 634-646.
- Nabais, C., Campelo, F., Vieira, J., Cherubini P. 2014 Climatic signals of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinaster* and *Pinus pinea* along a latitudinal gradient in Portugal. *Forestry* 87:598–605.
- Nenzén, H.K., Araújo, M.B., 2011. Choice of threshold alters projections of species range shifts under climate change. *Ecol. Model.* 222, 3346-3354.
- Nieto Quintano, P., Caudullo, G., de Rigo, D., 2016. *Quercus pyrenaica* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp.



- Olano, J.M., Zavala, M.A., Rozas, V. 2012. Disruption of *Juniperus thurifera* woodland structure in its northwestern geographical range: potential drivers and limiting factors. *Eur J Forest Res* 131, 563–570.
- Olano, J.M., García-Cervigón, A.I., Arzac, A., Rozas, V. 2015. Intra-annual wood density fluctuations and tree-ring width patterns are sex-and site-dependent in the dioecious conifer *Juniperus thurifera* L. *Trees*, 29, 1341–1353.
- Olano, J.M., González-Muñoz, N., Arzac, A., Rozas, V., von Arx, G., Delzon, S., García-Cervigón, A.I. 2017. Sex determines xylem anatomy in a dioecious conifer: hydraulic consequences in a drier world. *Tree Physiology*, 37(11), 1493–1502.
- Olano, J.M., García-Cervigón, A.I., Sangüesa-Barreda, G., Rozas, V., Muñoz-Garachana, D., García-Hidalgo, M., García-Pedrero, A. 2021. Satellite data and machine learning reveal the incidence of late frost defoliations on Iberian beech forests. *Ecological Applications*, 31(3), e02288.
- Olano, J.M., Hernández-Alonso, H., Sangüesa-Barreda, G., Rozas, V., García-Cervigón, A.I., García-Hidalgo, M. 2022. Disparate response to water limitation for vessel area and secondary growth along *Fagus sylvatica* southwestern distribution range. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109082.
- Olano, J.M., Sangüesa-Barreda, G., García-López, M.A., García-Hidalgo, M., Rozas, V., García-Cervigón, A.I., Hernández-Alonso, H. 2023. Water use efficiency and climate legacies dominate beech growth at its rear edge. *Journal of Ecology*.
- Pavlović, L., Stojanović, D., Mladenović, E., Lakićević, M., Orlović, S. 2019. Potential elevation shift of the European beech stands (*Fagus sylvatica* L.) in Serbia. *Frontiers in plant science*, 10, 849.
- Pérez-Ramos, I.M., Marañón, T., 2009. 9240 Robledales ibéricos de *Quercus faginea* y *Quercus canariensis*. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 56 p.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190, 231–259.
- Phillips, S.J., Dudík, M., 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.
- Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A., Solomon A.M. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J. Biogeogr.* 19, 117–134.
- Rocha Afonso, M.L. 1990: *Fagus* L. In: Castroviejo S (ed) *Flora Ibérica*. Real Jardín Botánico de Madrid, CSIC, Madrid, pp 10–11.
- Rozas Ortiz, V.F., Camarero, J.J., Sangüesa-Barreda, G., Souto, M., García-González, I. 2015. Summer drought and ENSO-related cloudiness distinctly drive *Fagus sylvatica* growth near the species rear-edge in northern Spain.
- Ruiz-Labourdette, D., Nogués-Bravo, D., Ollero, H.S., Schmitz, M.F., Pineda, F.D. 2012. Forest composition in Mediterranean mountains is projected to shift along the entire elevational gradient under climate change. *Journal of biogeography*, 39(1), 162–176.



LIFE SORIA

ForestAdapt

- San-Eufrasio, B., Sánchez-Lucas, R., López-Hidalgo, C., Guerrero-Sánchez, V.M., Castillejo, M. Á., Maldonado-Alconada, A.M., Jorrín-Novó, J.V., Rey, M.D. 2020. Responses and differences in tolerance to water shortage under climatic dryness conditions in seedlings from *Quercus* spp. and Andalusian *Q. ilex* Populations. *Forests* 11, 707.
- Sánchez de Dios, R., Hernández, L., Montes, F., Sainz-Ollero, H., Cañellas, I. 2016. Tracking the leading edge of *Fagus sylvatica* in North-Western Iberia: Holocene migration inertia, forest succession and recent global change. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 20, 11-21.
- Sangüesa-Barreda, G., Di Filippo, A., Piovesan, G., Rozas, V., Di Fiore, L., García-Hidalgo, M., Ana I. García-Cervigón, A.I., Muñoz-Garachana, D., Baliva, M., Olano, J.M. 2021. Warmer springs have increased the frequency and extension of late-frost defoliations in southern European beech forests. *Science of the Total Environment*, 775, 145860.
- Segura, A., Mateo, G., Benito, J.L. 2000. Catálogo florístico de la provincia de Soria (2ª edición corregida). 377 pp. Excma. Diputación Provincial de Soria. Soria.
- Serra-Díaz, J.M., Keenan, T.F., Ninyerola, M., Sabaté, S., Gracia, C., & Lloret, F. 2013. Geographical patterns of congruence and incongruence between correlative species distribution models and a process-based ecophysiological growth model. *Journal of Biogeography*, 40(10), 1928-1938.
- Serra-Maluquer, X., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Sánchez-Salguero, R., Rozas, V., Colangelo, M., Gutiérrez, E., Camarero, J.J. 2019. Geographically structured growth decline of rear-edge Iberian *Fagus sylvatica* forests after the 1980s shift toward a warmer climate. *Ecosystems*, 22, 1325-1337.
- USGS, 2004. Shuttle Radar Topography Mission, 3 Arc Second scene. Global Land Cover Facility, URL: www.landcover.org.
- Vale, C.G., Tarroso, P., Brito, J.C., 2014. Predicting species distribution at range margins: testing the effects of study area extent, resolution and threshold selection in the Sahara-Sahel transition zone. *Divers. Distrib.* 20, 20–33
- Vila-Viçosa, C., Arenas-Castro, S., Marcos, B., Honrado, J., García, C., Vázquez, F.M., Almeida, R., Gonçalves, J. 2020. Combining satellite remote sensing and climate data in species distribution models to improve the conservation of iberian white oaks (*Quercus* L.). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 735.
- Vizcaíno-Palomar, N., Ibáñez, I., González-Martínez, S.C., Zavala, M.A., Alía, R. 2016. Adaptation and plasticity in aboveground allometry variation of four pine species along environmental gradients. *Ecol Evol* 6(21):7561–7573.
- von Wuehlisch G. 2008. EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for European beech (*Fagus sylvatica*). Bioversity International, Rome, Italy. 6 pages.



LIFE SORIA

ForestAdapt

www.soriaforestadapt.es
info@soriaforestadapt.es



CON LA CONTRIBUCIÓN DEL INSTRUMENTO FINANCIERO LIFE DE LA UNIÓN EUROPEA



Con el apoyo de:



VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

