



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-085

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Estimación y proyección de la idoneidad climática y del crecimiento potencial de las principales especies arbóreas forestales de Cataluña

GIL-TENA, A.¹, CANELLES, Q.¹, DUANE, A.¹, AQUILUÉ, N.^{1,2}, MORÁN-ORDÓÑEZ, A.¹, COMAS, L.^{3,4}, BELTRÁN, M.⁵, VERICAT, P.⁵, RETANA, J.^{3,4}, VAYREDA, J.^{3,4}, PIQUÉ M.⁵ y BROTONS, L.^{1,3,6}

¹ CEMFOR – CTFC, InForest Joint Research Unit, CSIC-CTFC-CREAF, Solsona, 25280. España

² Centre for Forest Research, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, succ. Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3P8, Canadá

³ CREAM, Cerdanyola del Vallés, 08193, España

⁴ Univ Autònoma Barcelona, Cerdanyola del Vallés 08193, España

⁵ Área de Gestión Forestal Sostenible, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC), Solsona, España

⁶ CSIC, Cerdanyola del Vallés, 08193, España

Resumen

La identificación de los posibles impactos futuros del cambio climático en los bosques y los servicios ecosistémicos asociados es útil para su planificación espacio-temporal. En este estudio hemos estimado y proyectado a corto-medio plazo la idoneidad climática y el crecimiento potencial (hipotética calidad de estación alta) de las principales especies arbóreas forestales de Cataluña.

Primero, hemos ajustado modelos de distribución de especies en función del clima actual. La probabilidad de crecimiento potencial se ha determinado posteriormente en función del clima y la topografía. Para ello hemos seguido los criterios utilizados para definir la calidad de estación en las Orientaciones de Gestión Forestal Sostenible de Cataluña y utilizado el Inventario Forestal Nacional, el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica y el Modelo Digital de Elevaciones. La idoneidad climática y el crecimiento potencial se han estimado para el periodo 2011-2040 según las proyecciones climáticas promedio de los Escenarios de Emisiones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (A2 y B2).

Los cambios sustanciales observados en la idoneidad climática y el crecimiento potencial para la mayoría de las especies, indican la necesidad de integrar este tipo de ejercicios en la planificación forestal, especialmente a medio plazo.

Palabras clave

Cambio climático, calidad de estación, modelos de distribución de especies, Orientaciones de Gestión Forestal Sostenible (ORGEST), topografía.

1. Introducción

En la Europa Mediterránea, los ecosistemas forestales han sido modificados por la acción del hombre durante siglos y su composición, configuración y biodiversidad asociada están estrechamente relacionadas con la actividad humana (DOBLAS-MIRANDA et al., 2014). Desde mediados del siglo XX se están generando una serie de nuevas dinámicas forestales a diferentes escalas espaciales y temporales relacionadas con el abandono de los usos y aprovechamientos tradicionales en el bosque, el calentamiento global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y a cambios en los regímenes de perturbaciones como podrían ser los incendios forestales (DOBLAS-MIRANDA et al. 2014). Los escenarios futuros de cambio climático en el horizonte temporal de 2100 proyectan una contracción de la distribución de la mayoría de las especies arbóreas forestales, particularmente para las especies menos tolerantes a la sequía (e.g. BENITO GARZÓN et al., 2009; RUIZ-LABOURDETTE et al., 2012; LLORET et al., 2013; pero véase KEENAN et al., 2011). La planificación y gestión forestal actuales deben incorporar en sus esquemas la incertidumbre asociada al cambio global y en concreto al cambio climático ya que numerosas especies pueden ver comprometida su adaptación al mismo y por lo tanto su viabilidad. En consecuencia se pueden producir cambios acelerados en la composición

de los bosques mediterráneos y, por lo tanto, en los servicios ecosistémicos que proveen a la sociedad.

Actualmente hay numerosas herramientas de modelización que pueden ser utilizadas para evaluar los diferentes riesgos asociados al cambio global a los que los bosques pueden estar sometidos. Entre otros, los modelos de distribución de especies pueden ayudar a estimar de manera relativamente sencilla cuales pueden ser los bosques más vulnerables al cambio climático a una escala espacial amplia (LLORET et al., 2013) aunque no permiten considerar interacciones con otros componentes del cambio climático que pueden afectar también la respuesta de las especies al cambio climático (e.g. incremento de CO₂; véase KEENAN et al., 2011). Los modelos de distribución de especies han sido ampliamente utilizados para relacionar la distribución de la especie con el clima actual y para, posteriormente, proyectar la distribución de las especies según escenarios climáticos futuros como los desarrollados en el marco del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (siglas IPCC en inglés). Menos atención ha recibido la modelización del crecimiento a escala regional según el clima debido a la dificultad para caracterizar a una escala fina su variabilidad (e.g. calidades de estación). En este sentido, el enfoque seguido en la determinación de las calidades de estación en el marco de las Orientaciones de Gestión Forestal Sostenible de Cataluña (ORGEST; PIQUÉ et al. 2011) puede ser de gran utilidad para proyectar el riesgo de cambio climático asociado al crecimiento potencial de las especies forestales arbóreas. En las ORGEST, la tipificación de la calidad de estación en dos o tres clases permite, para cada especie, asociar esas clases de calidad de estación a un número reducido de factores ecológicos como la altitud, la pluviometría, la orientación, la fisiografía (posición en la vertiente y pendiente), el tipo de suelo, la vegetación indicadora, etc.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es estimar a corto-medio plazo la vulnerabilidad al cambio climático de las principales especies arbóreas forestales de Cataluña. Para ello, hemos obtenido estimas actuales y proyecciones hasta el horizonte 2040 de su idoneidad climática y del crecimiento potencial. Primero, hemos modelizado la distribución actual de las especies arbóreas y el crecimiento potencial en función del clima actual y de la topografía en el segundo caso. Después hemos estimado la respuesta de las especies según las proyecciones climáticas promedio para el periodo 2011-2040 en el marco de los escenarios de emisiones A2 y B2 del IPCC (siglas SERES-IPCC en inglés).

3. Metodología

3.1. Área de estudio y datos utilizados

Cataluña es una región con una orografía contrastada y una elevada heterogeneidad climática. Así, el ajuste de los modelos de idoneidad climática y de crecimiento potencial se ha realizado considerando un ámbito bioclimático que abarca las provincias limítrofes de Aragón y Castellón. Además, se han considerado tres subregiones climáticas en la interpretación posterior de los resultados de la modelización de la idoneidad climática a nivel de la distribución de la especie. Estas subregiones bioclimáticas se basan en MORÉ et al. (2005) y definen una subregión seca (temperaturas altas/muy altas y baja precipitación en verano), húmeda (temperaturas medias/altas y precipitación media/alta en verano) y montañosa (temperaturas bajas y precipitación media/alta en verano) (Figura 1). En el caso de la interpretación de los resultados referentes a la modelización del crecimiento potencial, cuando proceda, se han utilizado las zonificaciones definidas en el marco de las ORGEST según la distribución de las especies (franja litoral alrededor de la costa de 30 km o zona continental; ámbito pirenaico, pirenaico y central o zona meridional; véase PIQUÉ et al., 2011).

3.2. Ajuste de Modelos de Distribución de Especies (Idoneidad climática)

Se han ajustado los modelos para el *Pinus halepensis*, *P. nigra*, *P. sylvestris*, *P. uncinata*, *P. pinea*, *P. pinaster*, *Abies alba*, *Quercus ilex*, *Q. suber*, *Q. pubescens*, *Q. faginea* y *Fagus sylvatica*. La

calibración del modelo se ha realizado utilizando un ámbito geográfico más amplio que Cataluña (Cataluña y provincias limítrofes) para así recoger un envolvente bioclimático más amplio que el de la zona de estudio.

Para ello, se han utilizado los datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3; VILLANUEVA, 2005) y se ha considerado que una especie estaba presente a partir del estadio desarrollo de pies menores (diámetro medio a altura normal (1.30 m) superior a 2.5 cm). Se han descartado los datos de las parcelas que son plantaciones y que presentaban ausencia de regenerado natural. Para las parcelas que fueron gestionadas o se incendiaron entre los dos ciclos del Inventario Forestal Nacional, se han utilizado los datos del Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2) siempre y cuando no constase en el IFN2 que habían sido gestionadas o se habían incendiado anteriormente. Se ha utilizado un conjunto de 13073 parcelas IFN en la zona de calibración de los modelos (Cataluña, Aragón y Castellón). En el caso del *Pinus uncinata* se han añadido ausencias en el nivel supraforestal (>2600 m; AMEZTEGUI et al., 2016) ya que por encima de este nivel no hay monitoreo de parcelas en el marco del IFN. Las variables climáticas utilizadas como predictoras de los modelos se han obtenido a partir del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (ACDPI; NINYEROLA et al., 2005), y corresponden a la temperatura media, máxima o mínima (décimas de °C), precipitación (décimas de mm) y radiación solar (10 kJ/(m²·día·µm)) con una resolución temporal mensual y espacial de 200 m.

Para ajustar el modelo de regresión logística de cada especie se han escogido 3 variables climáticas poco correlacionadas (rho de Spearman < 0.65 a nivel de Cataluña). La selección de las tres variables más explicativas se basó en el ajuste de modelos aditivos generalizados que permiten ajustar relaciones no lineales (HASTIE & TIBSHIRANI, 1990). Para ello se utilizó la muestra dentro del área de calibración del modelo. De manera que una vez se determinaba la variable más explicativa (e.g. temperatura), se escogía la siguiente variable climática mensual más explicativa (e.g. precipitación) que tuviera un bajo grado de correlación con la variable anterior (rho de Spearman < 0.65) y, por último, se escogía una tercera variable de radiación solar mensual más explicativa (baja correlación con las variables de temperatura y precipitación). Para cada especie se han ajustado modelos de regresión logística en los cuales se ha permitido un ajuste no lineal (términos cuadráticos) para las variables climáticas siguiendo las curvas de respuesta ajustadas en los modelos aditivos generalizados univariantes anteriormente detallados. La bondad del ajuste se ha evaluado mediante el área bajo la curva (AUC en inglés) del gráfico ROC (*Receiver Operating Characteristic*) (TABACHNICK & FIDELL, 1996). Para validar los modelos, calculamos un AUC medio a partir de 10 submuestras con un 30% de los datos (SWETS, 1988).

3.3. Ajuste de Modelos de Crecimiento potencial (Calidad de Estación Alta)

Para cada especie, hemos establecido un umbral de crecimiento potencial y asumido que este corresponde al de una calidad de estación alta. El crecimiento potencial se ha obtenido a partir de la distribución del incremento anual en volumen con corteza (IAVC) extraído de las bases de datos del IFN disponibles en la web del MAGRAMA (bases de datos “Sig” para cada provincia). Para cada parcela y especie se ha sumado el IAVC de las clases diamétricas que se diferencian en dicha base de datos. Siguiendo los criterios utilizados para estimar la productividad forestal de las clases de calidad de estación en el marco de las ORGEST, se han considerado aquellas parcelas monoespecíficas (>80% de área basimétrica total corresponde a una especie) que no han sido gestionadas entre inventarios y con un área basimétrica a nivel de parcela superior a 10 m²/ha (8 m²/ha en el caso de *Pinus halepensis*) y con una fracción de cabida cubierta (FCC) superior al 50%. A partir del conjunto de parcelas por especie que dispone de datos de crecimiento de masa se ha establecido el crecimiento potencial como aquel que se sitúa por encima del percentil 75 de la distribución. De manera que se ha obtenido una variable binomial que recoge las parcelas que tienen un IAVC por encima del percentil 75 (presencia) e inferior (ausencia).

A continuación se ha ajustado un modelo que predice la probabilidad de ocurrencia de calidad de estación alta en función de variables climáticas y topográficas. Debido a la falta de información

espacialmente continua a una resolución fina, no se han considerado otro tipo de factores que también son determinantes para definir las calidades de estación como el tipo de suelo o su profundidad. Las variables climáticas consideradas han sido extraídas del ACDPI (NINYEROLA et al., 2005) a una resolución espacial de 200 m. Se ha considerado la temperatura mínima anual (décimas de °C) y la precipitación media anual (décimas de mm). Cabe destacar que la precipitación es la única variable climática que se utiliza en las ORGEST para definir umbrales que diferencian calidades de estación para una misma especie. De manera indirecta también se utilizan en las ORGEST la altitud y el ámbito geográfico como criterios climáticos a gran escala. En este sentido, se considera que la temperatura mínima anual puede ser un buen predictor climático por su estrecha vinculación con diferentes procesos relacionados con la fenología de la especie como el inicio del período de crecimiento o la mortalidad por heladas. Por otro lado, no se han considerado más variables climáticas en la modelización del crecimiento potencial debido a la alta correlación entre ellas. Las variables topográficas se han obtenido del Modelo Digital de Elevaciones del Instituto Geográfico Nacional a una resolución de 100 m. Se ha calculado la pendiente (grados) y la orientación (norte-este-sur-oeste-plano).

En el análisis estadístico para cada especie, se han evaluado cuatro modelos de regresión logística considerando el efecto no lineal de las variables climáticas. El modelo más sencillo sería aquel que considera que el efecto de las variables climáticas y topográficas es lineal. La selección de los modelos se ha basado en el criterio de información de Akaike (AIC; BURNHAM & ANDERSON, 2000) corregido para muestras reducidas. AIC nos da una estima de la relación entre la bondad de ajuste del modelo y la complejidad del modelo y permite comparar los modelos y por lo tanto el efecto de los factores. Los modelos se han ajustado a nivel de Cataluña, de Aragón y Castellón. La bondad del ajuste se ha evaluado mediante el área bajo la curva y también se ha utilizado R^2 de Nagelkerke debido al tamaño reducido de la muestra para algunas especies.

3.4. Proyección de la probabilidad de ocurrencia de las especies y del crecimiento potencial

Se han utilizado los datos promedio para el periodo 2011-2040 de las proyecciones climáticas de los escenarios SERES-IPCC (A2 y B2). Las narrativas de los escenarios A2 y B2 del IPCC describen un desarrollo económico orientado a nivel regional con tendencias de aumento continuo de la población a diferentes velocidades (siendo menores en el escenario B2) y con diferentes niveles de sostenibilidad y de protección medioambiental (siendo mayores en el escenario B2) (IPCC, 2000). Las proyecciones climáticas se obtuvieron a partir del Modelo de Circulación General CGCM2 y fueron proporcionadas por la AEMET a una resolución espacial de 1 km² y temporal de un mes.

El cambio en idoneidad climática se ha evaluado calculando la diferencia entre la probabilidad inicial de ocurrencia de la especie y la proyectada para las parcelas monoespecíficas (80% del área basimétrica total de la parcela IFN3 corresponde a la especie). Este valor se ha normalizado según el valor máximo de la probabilidad de ocurrencia actual de la especie. Este cálculo se ha realizado a la escala espacial más fina que corresponde a los datos del ACDPI (200 m). Se ha procedido de la misma forma en el caso de la proyección del crecimiento potencial. La exposición de los resultados de riesgo de cambio climático se presentan considerando tres regiones climáticas en el caso de la idoneidad climática y las calidades de estación y el ámbito geográfico de validez en el caso del crecimiento potencial. Además, se ha evaluado mediante análisis de la varianza (ANOVA) si había diferencias en el riesgo climático según las subregiones climáticas en el caso de la idoneidad climática o según el ámbito regional en el crecimiento potencial.

4. Resultados

4.1. Estima de la idoneidad climática

Los modelos de idoneidad climática ajustados tienen un AUC aceptable (>0.7) y muchas veces bueno (>0.8) (Tabla 1). En el caso de especies como el pino salgareño (*Pinus nigra*) o la encina (*Quercus ilex* spp.) el valor de AUC es relativamente bajo respecto al área de distribución de ambas

especies. Sin embargo, para el pino carrasco (*P. halepensis*) o el pino albar (*P. sylvestris*) el ajuste mejora considerablemente en términos de AUC respecto a las anteriores especies. En el caso de especies con una distribución más reducida y/o localizada como el pino negro (*P. uncinata*), el abeto (*Abies alba*), el alcornoque (*Q. suber*) o el haya (*Fagus sylvatica*), el valor de AUC se sitúa por encima de 0.9, indicando un ajuste muy bueno del modelo.

En general se puede observar una correspondencia en la idoneidad climática de las especies y las tres subregiones climáticas consideradas según la distribución de las especies y su tolerancia a la sequía (Figura 2). Por ejemplo, especies como el pino albar presentan una mejor adecuación en la subregión climática montañosa y una peor en la región seca. Esto también sucede en el caso del pino salgareño, aunque hay una menor diferencia entre la idoneidad climática en la subregión climática montañosa y húmeda. En cambio, para especies como el pino carrasco o el quejigo común (*Q. faginea*), estas presentan una mejor adecuación en las subregiones climáticas secas en contraposición con la subregión húmeda o montañosa. Especies como la encina o el pino piñonero presentan una respuesta menos clara según las subregiones climáticas consideradas.

4.2. Estima de la probabilidad de crecimiento potencial

El ejercicio de modelización de la probabilidad de crecimiento potencial ha obtenido ajustes menos precisos que en el caso de la modelización de la idoneidad climática a juzgar por los valores de AUC alcanzados, la mayoría de ellos con un valor de AUC por debajo de 0.8, y especialmente en el caso del pino albar, el pino negro y el pino carrasco (Tabla 2). Para la mayoría de las especies los modelos de probabilidad de crecimiento potencial más verosímiles según el criterio AICc indican una respuesta positiva a la precipitación (exceptuando *A. alba*) y también positiva a la temperatura mínima anual (exceptuando *P. nigra*, *P. sylvestris*, *Q. suber* y *Q. faginea*). En el caso del pino salgareño y el pino albar, la precipitación tiene un efecto mucho mayor en la variable respuesta a juzgar por los valores de los coeficientes de regresión estandarizados, mientras que lo contrario ocurre para el abeto. En general las variables topográficas obtuvieron un efecto más débil y contrastado que las variables climáticas en los modelos ajustados.

4.3. Proyección de la idoneidad climática y del crecimiento potencial

Las coníferas más adaptadas a ambientes xéricos como el pino carrasco o el pino piñonero (*P. pinea*) son las que presentaron un menor riesgo de cambio climático en el horizonte 2040, en contraposición con el pino albar y el pino salgareño (Figura 2). En el caso del pino marítimo (*P. pinaster*), sorprende el bajo riesgo de cambio climático observado debido a que estas masas boscosas corresponden a plantaciones de la variedad ligurica - poco adaptada a ambientes xéricos - localizadas en zonas con una buena calidad de estación. El abeto y el pino negro presentan valores de riesgo de cambio climático intermedios. Todas las especies de fagáceas, exceptuando el alcornoque, mostraron un riesgo de cambio climático considerable en al menos alguna de las subregiones climáticas. Exceptuando el pino salgareño, el haya y el roble marcescente (*Q. pubescens*), el riesgo de cambio climático presentó marcadas diferencias según subregiones climáticas para aquellas especies que están presentes en más de una subregión climática ($p < 0.05$). En el caso del pino negro, las diferencias entre subregiones dependen del escenario considerado, no siendo diferentes significativamente en el escenario B2. Por otro lado cabe destacar el elevado riesgo del pino albar en clima húmedo y por otro el menor riesgo para la encina en clima montañoso.

El riesgo de cambio climático según el escenario A2 en el crecimiento potencial fue tenue para las especies de coníferas consideradas, y especialmente para el pino piñonero y el abeto. Por el contrario, en el caso del haya y el alcornoque el riesgo de cambio climático fue más acentuado. Cabe destacar que para *Q. ilex* spp. se observaron diferencias en función de si se trataba de la encina (subsp. *ilex*) o la carrasca (subsp. *ballota*), con mayor riesgo de cambio climático para la encina. En general, también se observó un mayor riesgo de cambio climático en el crecimiento potencial en el caso de los ámbitos regionales más secos ($p < 0.05$). La mayoría de las especies no presentan diferencias significativas en el riesgo de cambio climático para el crecimiento potencial según

calidades de estación, exceptuando la encina, el pino carrasco en ámbito litoral y el pino negro. Estas comparaciones concuerdan en buen grado para los dos escenarios testados.

5. Discusión

5.1. Riesgo de cambio climático en la idoneidad climática y del crecimiento potencial

Como era de esperar tras realizar el ajuste de los modelos de distribución de las especies, las especies menos adaptadas a la sequía como el pino albar, el pino salgareño, los robles marcescentes o el haya son las que han obtenido un mayor riesgo de pérdida de idoneidad climática frente a las especies con una distribución amplia en la cuenca Mediterránea, lo que concuerda con otros estudios previos (BENITO GARZÓN et al., 2009; RUIZ-LABOURDETTE et al., 2012; LLORET et al., 2013). Aunque el grado de ajuste de los modelos de idoneidad climática (AUC) ha sido bueno, la variación observada entre especies puede obedecer a diferencias en la plasticidad de las mismas según las condiciones ambientales consideradas en el área de estudio, alcanzándose en general valores de AUC más bajos cuanto mayor es la plasticidad de las especies (e.g. *Q. ilex*).

A corto-medio plazo, nuestros resultados muestran que el impacto del cambio climático en las principales especies arbóreas forestales de Cataluña puede no ser homogéneo en la región y que puede depender, entre otros, de la localización en la que se encuentren las especies. Además, el riesgo de cambio climático puede variar para una misma especie según se considere su idoneidad climática o su crecimiento potencial. Así, nuestros resultados predicen en general un mayor impacto del cambio climático en la idoneidad climática de las especies que en el crecimiento potencial. Sin embargo, en el caso del pino carrasco se prevé una peor respuesta al cambio climático en el crecimiento potencial y lo contrario sucede con el roble marcescente. Mientras que el haya aparece amenazada tanto por lo que respecta a su idoneidad climática como al crecimiento potencial, el abeto parece menos susceptible al cambio climático, en especial por lo que respecta al crecimiento potencial. Por otro lado, la encina presenta un riesgo de cambio climático elevado en cuanto a idoneidad climática y crecimiento potencial, pero la carrasca no tanto. En este sentido, cabe destacar que LLORET et al., (2013) obtuvieron una relación positiva entre las tasa de crecimiento relativo actual y el incremento en idoneidad climática futura (horizonte temporal 2100, escenario A1 SRES-IPCC) para la mayoría de las especies arbóreas de España, exceptuando el pino albar y el pino salgareño que mostraron una mayor reducción en la idoneidad climática respecto a lo que cabría esperar según su tasa de crecimiento relativo actual, mientras que lo contrario fue observado para la encina y el alcornoque. Por lo tanto, el cambio climático no solamente puede ser una amenaza para la viabilidad de las especies más intolerantes a la sequía sino que también puede comprometer en buena medida la disponibilidad de los servicios ecosistémicos asociados a algunas de las especies que tienen una distribución amplia en la cuenca mediterránea (e.g. *Q. ilex*, *Q. suber*).

5.2. Limitaciones del estudio

Aunque hemos querido minimizar la influencia de la gestión forestal y de la actividad humana en los modelos ajustados tanto de idoneidad climática como de crecimiento potencial mediante la consideración de un rango bioclimático ampliado (provincias limítrofes a Cataluña), no podemos descartar que algunas de las relaciones ajustadas reflejen todavía el hecho de que ciertas especies están presentes en la actualidad en zonas sub-óptimas respecto a su distribución potencial y/o a que las zonas más productivas han quedado concentradas para algunas especies en determinadas zonas en función de factores socioeconómicos (e.g. accesibilidad) (véase también LLORET et al., 2013). Por otro lado, también queremos destacar que el ajuste de los modelos de crecimiento potencial es limitado y que por lo tanto tienen que tomarse con especial cautela los resultados que se obtienen a este respecto. En este estudio hemos querido recoger la variabilidad ambiental a una escala fina mediante la consideración de variables topográficas, no obstante VERICAT et al. (2013) concluyeron que la disponibilidad de agua en el suelo (i.e. capacidad de retención de agua disponible) juega un papel clave en el crecimiento de las pináceas en Cataluña y en particular para el pino laricio. Por lo

tanto, se hace necesario considerar explícitamente la estructura del suelo para mejorar así el ajuste de la modelización del crecimiento potencial de las especies.

En este estudio nos hemos centrado en un marco temporal corto ya que consideramos que estos resultados pueden ser útiles en la planificación forestal a medio plazo a pesar de la incertidumbre asociada a la modelización y a las proyecciones climáticas. La reducción de la incertidumbre debido a la modelización en escalas espaciales finas (e.g. a escala de monte o macizo) puede resolverse mediante el uso de modelos basados en procesos tanto a nivel de predicción de idoneidad climática como de crecimiento potencial. A nivel de escala de comarca forestal (e.g. Planes de Ordenación de los Recursos Forestales o PORF), la consideración de escenarios en horizontes temporales más lejanos también sería adecuada, aunque la incertidumbre asociada sería mucho mayor debido a la ampliación del marco temporal.

6. Conclusiones

El ejercicio llevado a cabo ha permitido comparar de manera cualitativa para una misma especie el posible impacto del cambio climático en la idoneidad climática y en el crecimiento potencial considerando la heterogeneidad climática y de las calidades de estación dentro de la región de estudio. Nuestros resultados muestran que las especies Mediterráneas pueden verse menos afectadas a corto-medio plazo por el cambio climático en cuanto a su prevalencia en el paisaje que las especies más méxicas, mientras que el impacto en el crecimiento potencial muestra menos diferencias entre ambos tipos de especies y puede comprometer la disponibilidad de servicios ambientales derivados de los bosques en un futuro. En conclusión, se hace necesario incorporar la incertidumbre asociada al cambio climático en la planificación forestal a diferentes escalas espaciales y temporales para poder tener mayores garantías de adaptación y resistencia al mismo.

7. Agradecimientos

Este estudio forma parte de los proyectos FORESTCAST (CGL2014-59742-C2-2-R), ERA-NET FORESTERRA INFORMED (29183) y del programa CERCA de la Generalitat de Catalunya. M. N. y M. B. (UAB) generaron las proyecciones climáticas a partir de los datos proporcionados por la AEMET y del MARMM en el marco del proyecto MONTES-Consolider. A. Gil-Tena disfrutó de un contrato postdoctoral del Ministerio de Economía y Competitividad (JCI-2012-12089), A. Duane tiene un contrato predoctoral Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (FPU13/00108) y N. Aquilué (miembro del *Forest Complexity Modelling*) recibió soporte del *Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada*.

8. Bibliografía

AMEZTEGUI, A.; COLL, L.; BROTONS, L.; NINOT, J.M.; 2016. Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain tree line in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography* 25 263–273.

BENITO, GARZÓN, M.; SÁNCHEZ DE DIOS, R.; SAINZ OLLERO, H.; 2009. Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Applied Vegetation Science* 11 169–178.

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R.; 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretical Approach*. Springer-Verlag, New York.

DOBLAS-MIRANDA, E.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; LLORET, F.; ÁLVAREZ, A.; ÁVILA, A.; BONET, F.J.; BROTONS, L.; CASTRO, J.; CURIEL YUSTE, J.; DÍAZ, M.; FERRANDIS, P.; GARCÍA-HURTADO, E.; IRIONDO, J.M.; KEENAN, T.F.; LATRON, J.; LLUSIÀ, J.; LOEPFE, L.; MAYOL, M.; MORÉ, G.; MOYA,

D.; PEÑUELAS, J.; PONS, X.; POYATOS, R.; SARDANS, J.; SUS, O.; VALLEJO, V.R.; VAYREDA, J.; RETANA, J.; 2014. Reassessing global change research priorities in Mediterranean terrestrial ecosystems: how far have we come and where do we go from here? *Global Ecology and Biogeography* 24 25-43.

HASTIE, T.J.; TIBSHIRANI, R.J.; 1990. *Generalized additive models*, Chapman and Hall, London, UK.

IPCC; 2000. *Summary for Policymakers: Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

KEENAN, T.; SERRA, J.M.; LLORET, F.; NINYEROLA, M.; SABATE, S.; 2011. Predicting the future of forests in the Mediterranean under climate change, with niche and process-based models: CO2 matters! *Global Change Biology* 17 565–579.

LLORET, F.; MARTINEZ-VILALTA, J.; SERRA-DIAZ, J.M.; NINYEROLA, M.; 2013. Relationship between projected changes in future climatic suitability and demographic and functional traits of forest tree species in Spain. *Climatic Change* 120 449–462.

MORÉ, G.; PONS, X.; BURRIEL, J.A.; CASTELLS, R.; IBÀÑEZ, J.J.; ROIJALS, X.; 2005. Generación de cartografía detallada de vegetación mediante procesamiento digital de imágenes Landsat, variables orográficas y climáticas. *6 Geomatic week*, Barcelona.

NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J.M.; 2005. *Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica.* UAB, Bellaterra.

PIQUÉ, M.; VERICAT, P.; CERVERA, T.; BAIGES, T.; FARRIOL, R.; 2011. Tipologies forestals arbrades. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.

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* 39 162–176.

SWETS, J.A.; 1988. Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems. *Science* 240 1285–1293.

TABACHNICK, B.G.; FIDELL, L.S.; 1996. *Using multivariate statistics*, HarperCollins College Publishers, New York, USA.

VERICAT, P.; PIQUÉ, M.; TRASOBARES, A.; 2013. Factores ambientales que afectan al crecimiento de las cuatro principales especies de coníferas en Cataluña. 6º Congreso Forestal Español, SECF [6CFE01-025].

VILLANUEVA, J.A. (editor); 2005. *Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2007)*. Ed. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

1 *Tabla 1. Modelización de la probabilidad de ocurrencia de las principales especies arbóreas forestales en Cataluña. Se*
 2 *muestran los coeficientes estandarizados y el valor AUC promedio para cada modelo [10 subconjuntos diferentes de*
 3 *calibración (70% de la muestra) y de evaluación (30% de la muestra)]. Temp es temperatura media mensual, MxTemp es*
 4 *temperatura máxima mensual, Precip es precipitación promedio mensual, Rad es radiación mensual. Los sufijos de los*
 5 *predictores indican el mes (1-12). *El modelo se ajustó con ausencias extra por encima del límite supraforestal (2600 m).*

Especie	Modelo ajustado	AUC medio
<i>Pinus halepensis</i>	$-1.963 + 2.022 \cdot Temp_{09} - 0.636 \cdot Precip_{04}$	0.88
<i>Pinus nigra</i>	$-0.483 - 0.573 \cdot Temp_{06} - 1.835 \cdot Temp_{06}^2 - 0.413 \cdot Precip_{04} - 0.332 \cdot Rad_{06} - 0.039 \cdot Rad_{06}^2$	0.76
<i>Pinus sylvestris</i>	$-0.679 - 2.734 \cdot Temp_{08} - 1.130 \cdot Temp_{08}^2 + 0.497 \cdot Precip_{04} - 0.158 \cdot Precip_{04}^2 + 0.086 \cdot Rad_{06}$	0.87
<i>Pinus pinea</i>	$-4.674 + 3.435 \cdot MxTemp_{01} - 0.828 \cdot MxTemp_{01}^2 + 0.670 \cdot Precip_{08} + 0.791 \cdot Rad_{06}$	0.89
<i>Pinus uncinata</i> *	$-4.303 - 1.448 \cdot Temp_{09} + 0.401 \cdot Precip_{04} - 0.183 \cdot Precip_{04}^2 - 0.692 \cdot Rad_{06} - 0.081 \cdot Rad_{06}^2$	0.98
<i>Pinus pinaster</i>	$-3.805 + 0.809 \cdot MxTemp_{12} - 0.204 \cdot Precip_{06} - 0.201 \cdot Rad_{12}$	0.72
<i>Abies alba</i>	$-9.314 - 5.166 \cdot Temp_{07} - 1.031 \cdot Temp_{07}^2 + 1.081 \cdot Precip_{11} - 0.210 \cdot Precip_{11}^2 - 0.396 \cdot Rad_{06}$	0.96
<i>Quercus ilex</i>	$0.184 + 0.510 \cdot Temp_{06} - 1.165 \cdot Temp_{06}^2 + 0.478 \cdot Precip_{04} - 0.321 \cdot Precip_{04}^2 + 0.219 \cdot Rad_{05} + 0.052 \cdot Rad_{05}^2$	0.75
<i>Quercus suber</i>	$-5.662 + 1.711 \cdot MxTemp_{12} + 1.766 \cdot Precip_{10} + 0.064 \cdot Rad_{06} - 0.184 \cdot Rad_{06}^2$	0.96
<i>Quercus pubescens</i>	$-2.117 + 0.484 \cdot MxTemp_{03} - 0.296 \cdot MxTemp_{03}^2 + 2.462 \cdot Precip_{08} - 0.873 \cdot Precip_{08}^2 + 0.199 \cdot Rad_{12}$	0.83
<i>Quercus fagínea</i>	$-1.142 - 0.859 \cdot Temp_{11} - 2.201 \cdot Temp_{11}^2 - 0.603 \cdot Precip_{07} - 0.161 \cdot Rad_{03}$	0.79
<i>Fagus sylvatica</i>	$-5.444 - 1.486 \cdot Temp_{01} - 0.950 \cdot Temp_{01}^2 + 3.572 \cdot Precip_{05} - 0.615 \cdot Precip_{05}^2 + 0.166 \cdot Rad_{06} + 0.040 \cdot Rad_{06}^2$	0.94

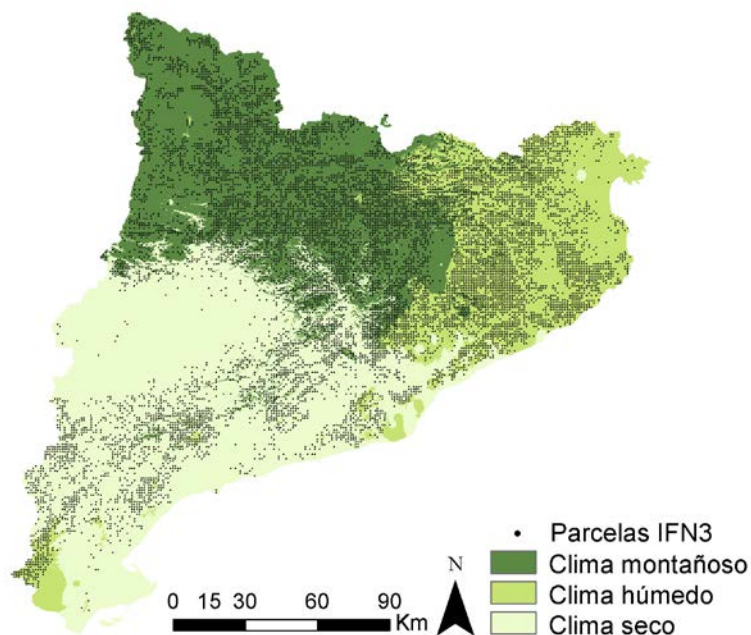
6

7
8
9
10

Tabla 2. Modelización de la probabilidad de ocurrencia de crecimiento potencial (IAVCC>Q3) para las principales especies arbóreas forestales en Cataluña. El área de calibración del modelo considera las provincias limítrofes (Aragón y Castellón). Se muestran los coeficientes estandarizados y el ajuste de los modelos según R^2 (Nagerkelke). Temp mínima es temperatura mínima anual (media de las mínimas), Precip anual es precipitación anual, Pend es pendiente y Ori es orientación. En todas las especies los modelos candidatos más verosímiles contienen la variable orientación (+).

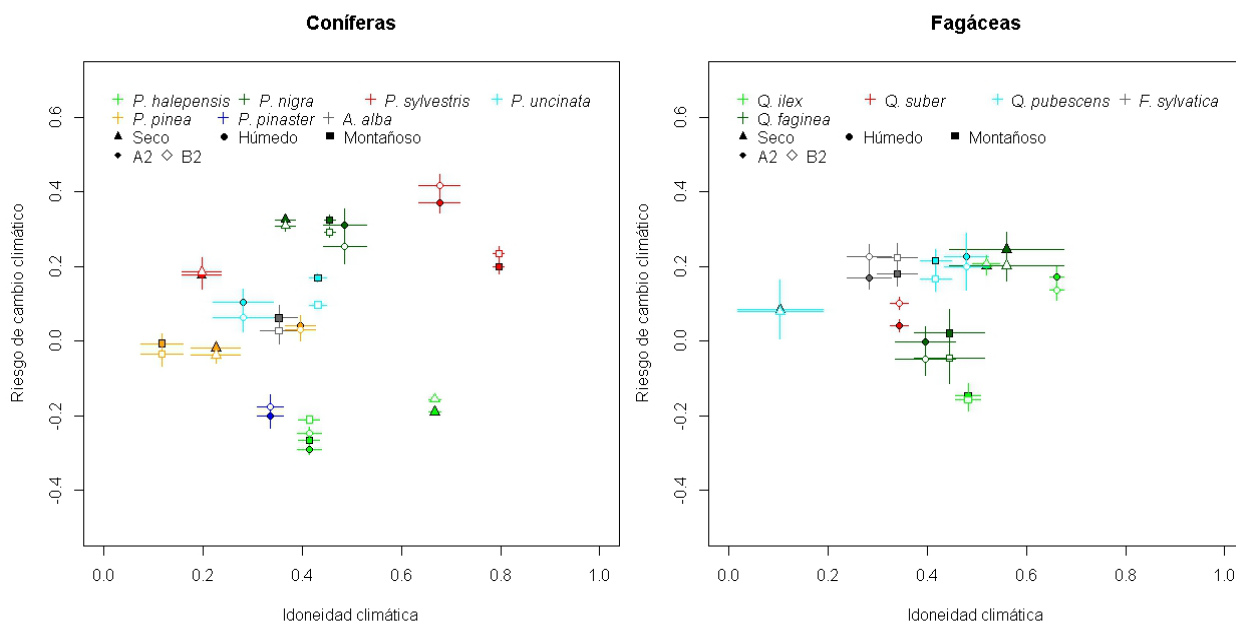
Especie	Tamaño muestra	Intercept	Temp mínima	Temp mínima ²	Precip anual	Precip anual ²	Pend	Ori	AUC	R^2 (Nagerkelke)
<i>P. halepensis</i>	1007	-1.62	0.17		0.55	0.15	-0.09	+	0.67	0.13
<i>P. nigra</i>	561	-2.14	-0.06		0.89	-0.16	-0.18	+	0.70	0.14
<i>P. sylvestris</i>	1372	-1.10	-0.10		0.39		0.01	+	0.62	0.05
<i>P. pinea</i>	48	-2.31	1.12		0.07		0.10	+	0.76	0.25
<i>P. uncinata</i>	276	-15.48	0.17		0.34		-0.51	+	0.66	0.11
<i>P. pinaster</i>	100	-4.10	0.93		0.87		-0.86	+	0.88	0.52
<i>A. alba</i>	51	-0.69	0.84		-0.11		0.15	+	0.74	0.22
<i>Q. ilex</i>	487	-0.61	0.35	-0.46	0.66		0.12	+	0.73	0.19
<i>Q. suber</i>	135	-16.33	-0.14		0.20		0.17	+	0.70	0.13
<i>Q. pubescens</i>	125	16.29	0.27		0.62		0.09	+	0.73	0.18
<i>Q. faginea</i>	74	-15.19	-0.20		0.09		0.63	+	0.76	0.22
<i>F. sylvatica</i>	103	0.20	0.32		0.82	-0.52	-0.33	+	0.76	0.22

11



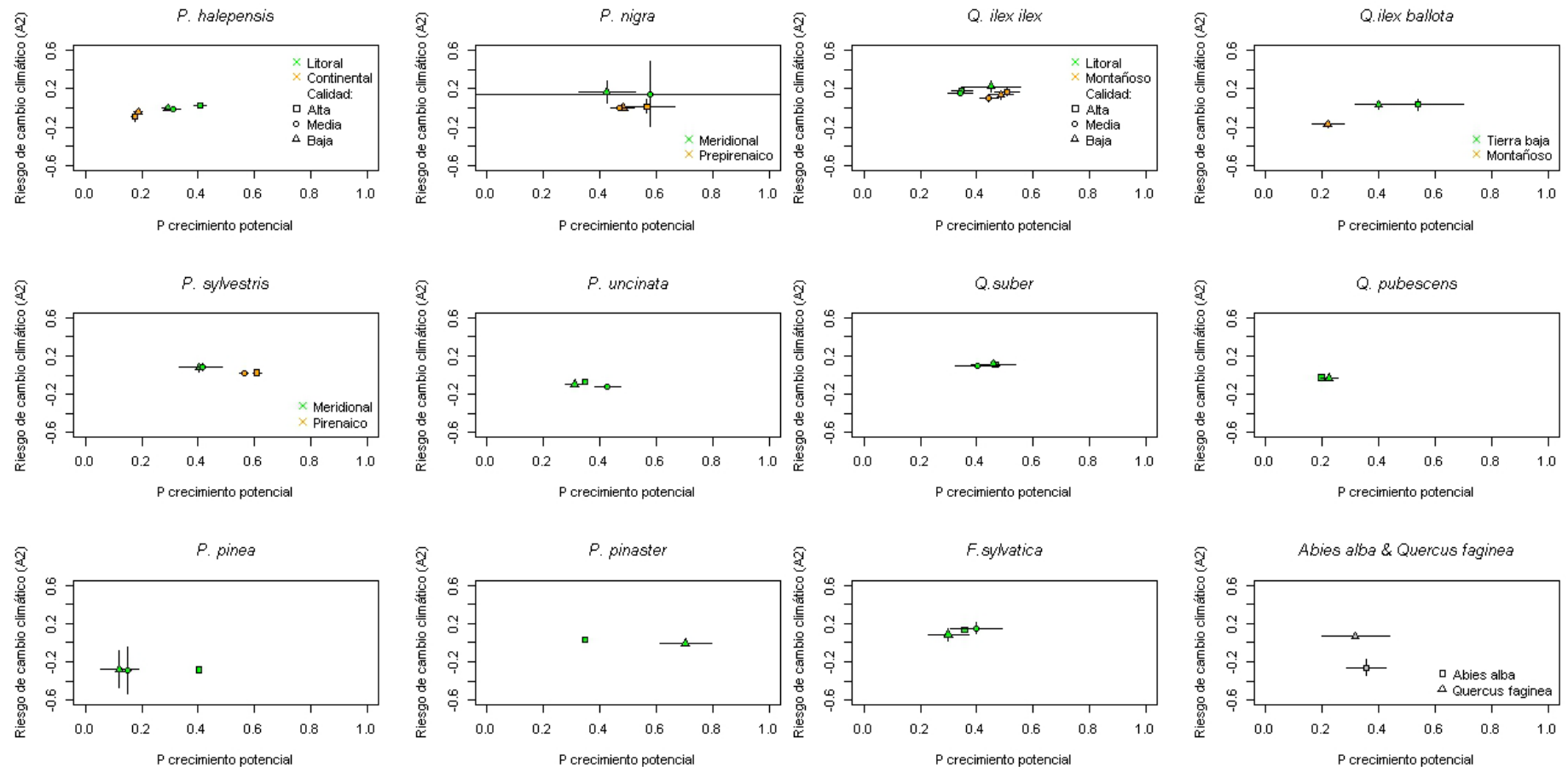
12
 13
 14
 15

Figura 1. Detalle de las parcelas del IFN3 utilizadas para la determinación de la idoneidad climática en la región de Cataluña y de las tres subregiones climáticas (clima seco, clima húmedo y montañoso) siguiendo Moré et al. (2005).



16
 17
 18
 19
 20

Figura 2. Representación de la idoneidad climática actual de las especies arbóreas forestales según el riesgo de cambio climático proyectado. Se muestran los resultados promedio obtenidos para los escenarios A2 y B2 (símbolos rellenos y vacíos, respectivamente). Los valores promedio según subregiones climáticas se diferencian mediante símbolos (Montañoso, Húmedo y Seco). Las barras indican los intervalos de confianza para cada grupo y variable.



21

22

23

24

25

26

Figura 3. Representación de la probabilidad de crecimiento potencial según el clima actual y la variación de la probabilidad según las proyecciones climáticas del escenario A2 (probabilidad actual menos probabilidad futura). Los resultados se presentan normalizados por la probabilidad actual máxima según cada especie y se muestra la media e intervalos de confianza agrupados según las calidades de estación y ámbito geográfico cuando proceda según la especie (información extraída de las ORGEST). Las especies con un intervalo de confianza amplio suelen presentar un número reducido de parcelas (e.g. *P. nigra* en calidad de estación media y ámbito meridional). En el caso de *A. alba* y *Q. faginea* no se dispone cartografía de calidades de estación en el marco de las ORGEST.