

ATLES CLIMÀTIC DIGITAL DE LA PENÍNSULA IBÈRICA I IDONEÏTAT D'ESPÈCIES ARBÒRIES: ANÀLISI DELS EFECTES D'UN POSSIBLE CANVI CLIMÀTIC

Miquel Ninyerola¹, Xavier Pons² i Joan Maria Roure¹

¹ Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia (Unitat de Botànica), Universitat Autònoma de Barcelona.

² Departament de Geografia i Centre d'Investigació Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) de la Universitat Autònoma de Barcelona.

DIGITAL CLIMATIC ATLAS OF THE IBERIAN PENINSULA AND SUITABILITY OF ARBORESCENT SPECIES: ANALYSIS OF THE EFFECTS OF A POSSIBLE CLIMATIC CHANGE. In this study, we applied cartographic GIS modeling techniques with the purpose of delimiting and analyzing the effects of climatic change on the distribution of vegetation in the Iberian Peninsula. First, the methodology used to develop the climatic cartography is briefly described. These climatic maps, together with current distribution of vegetation, were an input to define the ecological niche of the vegetal species. This cartography was also used to map this information into vegetation suitability surfaces at the current climate scenario. We applied soil information and objective knowledge to refine these suitability maps. Secondly, we elaborated a new scenario of climatic change by means of modifying the current climatic cartography using the IPCC predictions. Previously defined ecological niche was mapped on this simulated climatic situation to determine the effects of climate on the species distribution. Objective knowledge of the ecological niche of the species was applied to this scenario of climatic change. Finally, we analyzed the potential effects of the simulated climatic change on the distribution of different Quercus oaks (Quercus humilis and Quercus petraea-Quercus robur complex) in the Park of the Montnegre and the Corredor (NE Spain) from a spatial point of view.

Introducció

Els Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) permeten aprofitar els avantatges propis dels sistemes digitals per generar cartografia de qualitat. Més enllà, però, faciliten la integració de tècniques estadístiques amb eines d'anàlisi espacial *sensu lato* per tal d'obtenir informació espacial dins el marc del que hom anomena modelització cartogràfica.

En el present estudi es mostra com a partir de l'Atlas Climàtic Digital de la Península Ibèrica, elaborat mitjançant models que incorporen mètodes estadístics i tècniques d'interpolació espacial, podem, al seu torn, aplicar tècniques de modelització cartogràfica per tal d'obtenir superfícies d'idoneïtat de la distribució d'espècies vegetals.

L'objectiu últim de l'estudi, però, és analitzar de quina manera aquesta idoneïtat queda afectada en el marc d'un escenari de canvi climàtic obtingut mitjançant la modificació de l'Atlas Climàtic Digital a partir de les prediccions realitzades per l'IPCC (Intergovernmen-

tal Panel on Climate Change).

Si bé existeixen interessants referències sobre la modelització cartogràfica del clima (Lennon i Turner, 1995), les metodologies per a l'obtenció de superfícies d'idoneïtat vegetal (Guisan i Zimmermann, 2000) i l'aplicació dels efectes del canvi climàtic en un entorn SIG (Araújo et al., 2004; Araújo et al., 2005), hi ha pocs treballs que culminin en una representació cartogràfica exhaustiva especialment en àmbits geogràfics extensos. En el nostre cas hem desenvolupat aquestes cartografies per a l'àmbit de la península Ibèrica tot i que l'anàlisi d'aquest estudi se centra en l'àmbit del Parc Natural del Montnegre i el Corredor.

Atlas Climàtic Digital de la Península Ibèrica

No entrarem en detalls sobre els aspectes relacionats amb l'elaboració de l'Atlas ja que han estat descrits en diversos treballs (Ninyerola et al., en premsa^a; Ninyerola et al., en premsa^b).



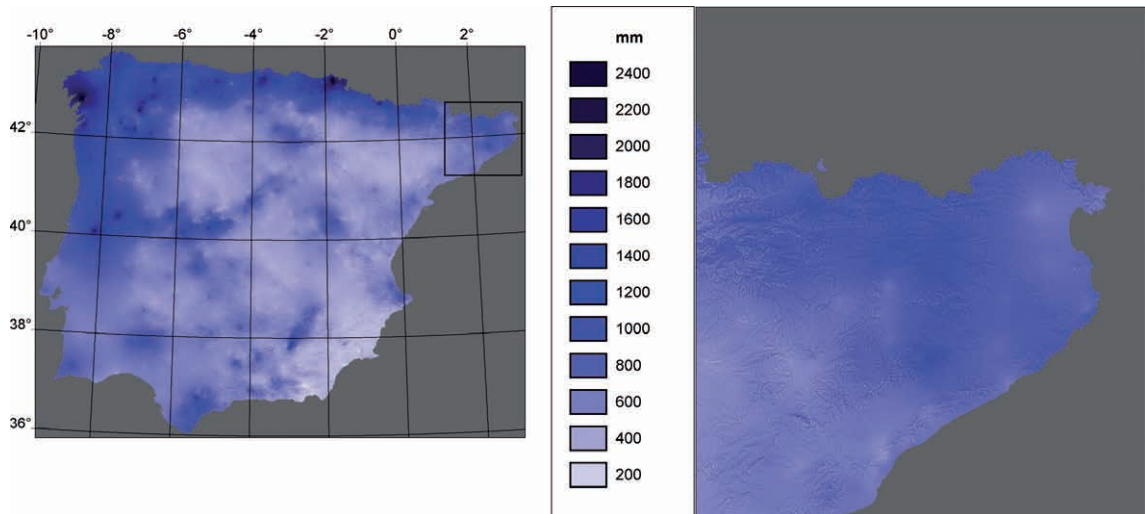


Figura 1. Precipitació anual de la península Ibèrica. L'àrea enquadrada del NE peninsular ha estat augmentada al costat dret de la figura.

Només farem una breu síntesi per tal que el lector pugui fer-se una idea global sense recórrer a altres fonts d'informació.

Per a l'elaboració de les capes climàtiques de l'Atlas s'ha utilitzat d'informació geogràfica (relleu, latitud, continentalitat, radiació solar i curvatura del terreny) i dades de les estacions meteorològiques per desenvolupar un model d'interpolació espacial. Aquest model està basat en tècniques estadístiques (anàlisis de regressió múltiple) i geoestadístiques implementades en un entorn SIG. L'Atlas Climàtic Digital de la Península Ibèrica (Ninyerola et al., 2005) consta de mapes mensuals i anuals corresponents a cinc variables (temperatures mitjanes de les mínimes, temperatures mitjanes, temperatures mitjanes de les màximes, precipitació i radiació solar) cartografiats amb una resolució espacial de 200 m.

A les figures 1 i 2 podem veure dos exemples d'aquesta cartografia climàtica: el cas de la precipitació anual i la temperatura mitjana de les mínimes respectivament.

Posteriorment, amb l'objectiu d'utilitzar aquesta informació climàtica per analitzar la vegetació, hem desenvolupat algunes variables derivades com l'evapotranspiració potencial i la disponibilitat hídrica. Per obtenir aquestes variables hem aplicat la metodologia de Turc mitjançant àlgebra de mapes (combinant temperatura mitjana, radiació solar i precipitació). També hem millorat les superfícies climàtiques de l'Atlas incloent informació de teledetecció en la interpolació així com introduint noves variables derivades del MDE (costos de fricció, rugositat del terreny, etc).

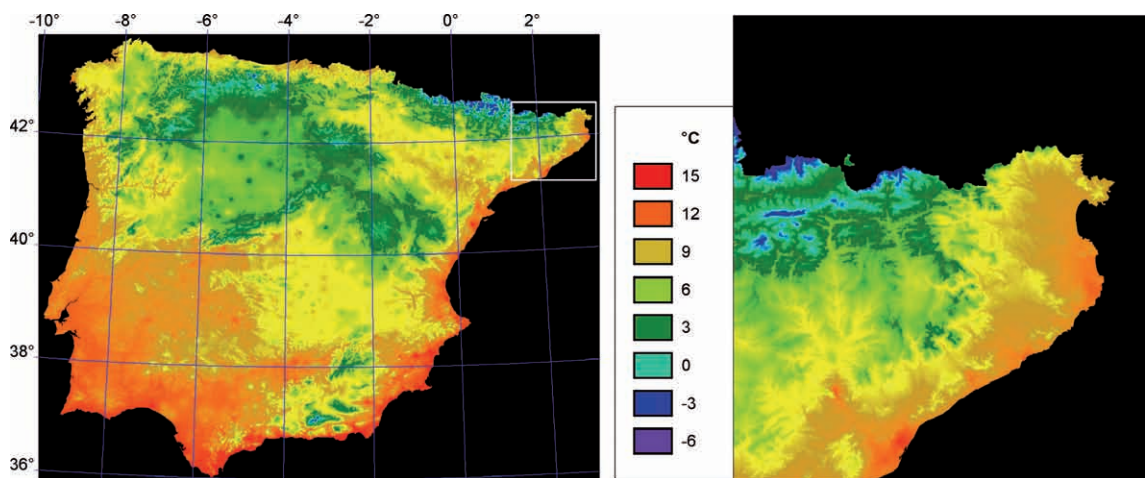


Figura 2. Temperatura mínima de les mitjanes de la península Ibèrica. L'àrea enquadrada del NE peninsular ha estat augmentada al costat dret de la figura.



Idoneïtat de les espècies arbòries

Introducció

El terme de vegetació idònia és similar al concepte de vegetació potencial però sense fer cap mena d'assumpció respecte a la vegetació climàtica esperada. Precisament l'ús d'aquest terme s'ha fet popular per evitar conflictes amb les implicacions que té el concepte de vegetació potencial. En el cas de la vegetació idònia definim el nínxol ecològic hutchinsonià mitjançant un tractament estadístic multivariant (existeixen actualment diverses possibilitats ja siguin basades en mètodes paramètrics com en mètodes no paramètrics). El paper del SIG consisteix a gestionar la informació per tal d'associar la vegetació amb els paràmetres que hom suposa que modelen o influeixen la seva distribució. Un cop realitzat el tractament numèric mitjançant un paquet estadístic, tornem a entrar en l'entorn SIG per tal d'aplicar els paràmetres obtinguts i poder, d'aquesta manera, reproduir espacialment el model estadístic. D'aquesta manera es podran obtenir les superfícies d'idoneïtat i finalment donar-los format cartogràfic adequat.

Aquesta idoneïtat s'ha obtingut a partir de la utilització de mètodes estadístics de classificació (en el nostre cas hem utilitzat els models linears generalitzats) que requereixen de la distribució de les espècies (obtinguda a partir de les dades del segon Inventari Forestal Nacional) i la informació climàtica (Atlas Climàtic i variables derivades). D'aquesta manera generem un mapa d'idoneïtat que ens indica la probabilitat que una determinada espècie trobi les condicions ambientals adequades per prosperar tot definint el seu nínxol ecològic. La figura 3 mostra un exemple a escala peninsular per al cas de *Fagus sylvatica*.

Val a dir que també hem considerat informació edàfica i coneixement expert per a refinar aquesta cartografia que a l'igual que la climàtica té una resolució espacial de 200 m.

De la informació o mapes resultants s'entreuu fàcilment una utilitat en la gestió forestal, un interès purament científic i una aplicació a l'impacte que pugui tenir el canvi climàtic.

Inventaris forestals o florístics?

Evidentment, existeix una controvèrsia entre la conveniència d'utilitzar un tipus d'informació o un altre. Sovint, l'elecció dependrà de la informació disponible en l'àmbit d'estudi que es vol abastar però hi ha alguns elements de reflexió. D'una banda, les parcel·les de l'inventari forestal estan georeferenciades amb una precisió submètrica que permet la combinació de les capes amb errors planimètrics de subpixel. No obstant això, per altra banda, la qualitat de la identificació de l'espècie no és comparable amb l'obtinguda mitjançant els inventaris florístics. Per contra, els inventaris florístics ens proveeixen generalment de dades temàtiques de qualitat, però amb una georeferenciació espacial pobra i generalment sense un disseny estadístic del mostreig. Per aquests motius i per l'extensió de l'àmbit cartografiat (actualment és difícil d'obtenir la informació florística completa d'una espècie per a la península Ibèrica sencera). Ens hem decantat per la utilització d'informació forestal. Lògicament, des d'un punt de vista botànic i pel fet que les espècies herbàcies són segurament més sensibles al clima, fora desitjable en un futur poder incorporar informació d'aquest tipus.

Aspectes metodològics

Prèviament hem realitzat una prospectiva per analitzar la correlació entre les variables

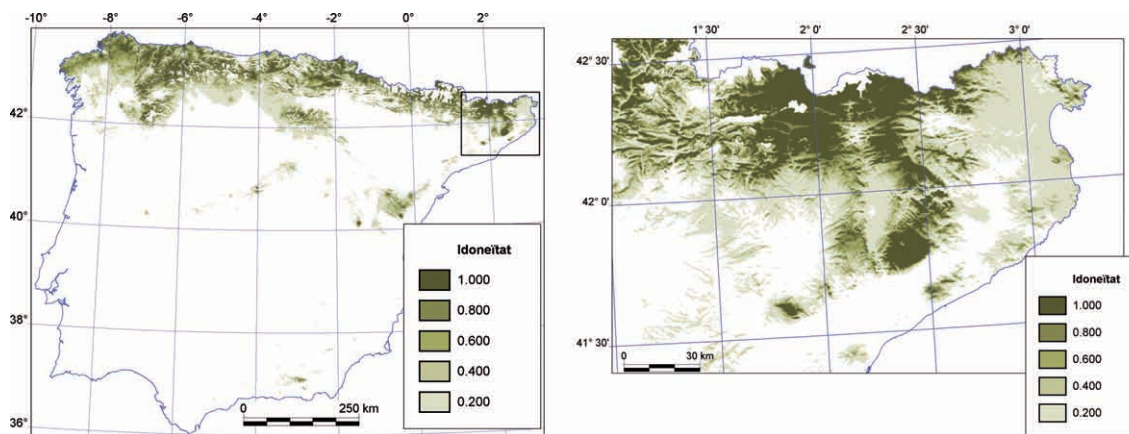


Figura 3. Idoneïtat topoclimàtica de *Fagus sylvatica* a la península Ibèrica. L'àrea enquadrada del NE peninsular ha estat augmentada al costat dret de la figura.



abiòtiques predictores i seleccionar d'aquesta manera les que finalment han estat incloses en el model estadístic. Les variables abiòtiques finalment utilitzades són: altitud, radiació solar anual, pendent, temperatura mitjana anual de les mínimes, temperatura mitjana anual de les màximes, disponibilitat hídrica de primavera, disponibilitat hídrica d'hivern, disponibilitat hídrica d'estiu, disponibilitat hídrica anual i amplitud tèrmica anual.

El mètode estadístic de classificació usat per a combinar la informació biòtica i abiòtica ha estat un GLM (*General Linear Model*) amb un *link* logístic (regressió logística). Aquest és un mètode que necessita tant definir l'espai multidimensional o nínxol de les presències d'una determinada espècie com l'espai de les absències. Hem optat per utilitzar un nombre igual de les dades de presència i d'absència. Els punts d'absència s'han generat aleatòriament amb només una limitació: han d'estar ubicats 2 km més enllà dels punts on hi ha presència. El mostreig de les absències no és un problema trivial ja que hi ha distints factors que poden complicar aquesta tasca. Podem pensar en efectes de la influència humana o de la manca d'equilibri entre la vegetació i el clima en determinats indrets.

La influència del sòl (índex de favorabilitat) s'ha introduït usant les tècniques dels perfils ponderats (basades en la probabilitat Bayessiana) i no dins la regressió logística perquè el mapa edàfic disponible (Comissió de les Comunitats Europees 1:1000000) presenta una escala general i hem preferit tractar la informació derivada amb una certa prudència.

Avaluació del model

S'ha aplicat un procediment de la validació creuada que ha usat el 60% de les estacions per a ajustar el model i el 40% per a avaluar-lo. La corba ROC s'ha utilitzat per seleccionar el punt de tall (0.3) i determinar d'aquesta

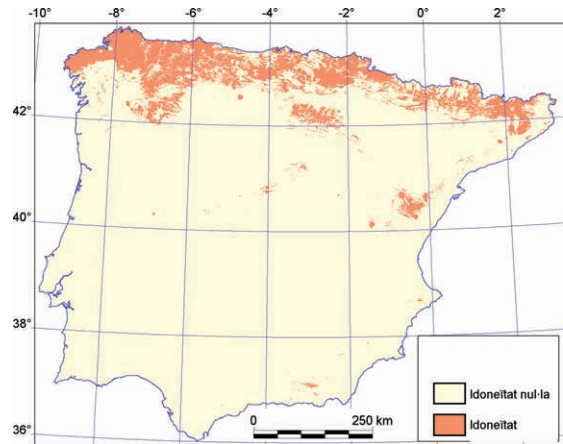


Figura 4. Mapa de presència-absència de *Fagus sylvatica* a la península Ibèrica. Aquest mapa ha estat obtingut a partir de reclassificar la figura 3 amb el valor obtingut a partir de la corba ROC.

manera quin és el nivell d'ideoneïtat a partir del qual es considera com a presència o absència (figura 4).

Representació cartogràfica

Finalment, s'ha aplicat coneixement expert botànic per tal de depurar els mapes obtinguts mitjançant els mètodes numèrics objectius. La figura 5 mostra el cas de *Fagus sylvatica* abans i després d'introduir aquests criteris experts. Es pot visualitzar com s'ha introduït la importància de les boires estivals en la seva distribució o bé la incompatibilitat amb determinats tipus de sòl, factors que no han estat inclosos en el model estadístic.

Aprofitant la possibilitat d'utilitzar la visualització i consulta multicapa de l'entorn SIG, els mapes resultants han estat expressats en tres capes ràster. La capa visible superior és un mapa binari (presència/absència) obtingut en reclassificar la capa de la probabilitat usant el punt del tall. La capa de sota és la superfície de probabilitat o idoneïtat (amb valors con-

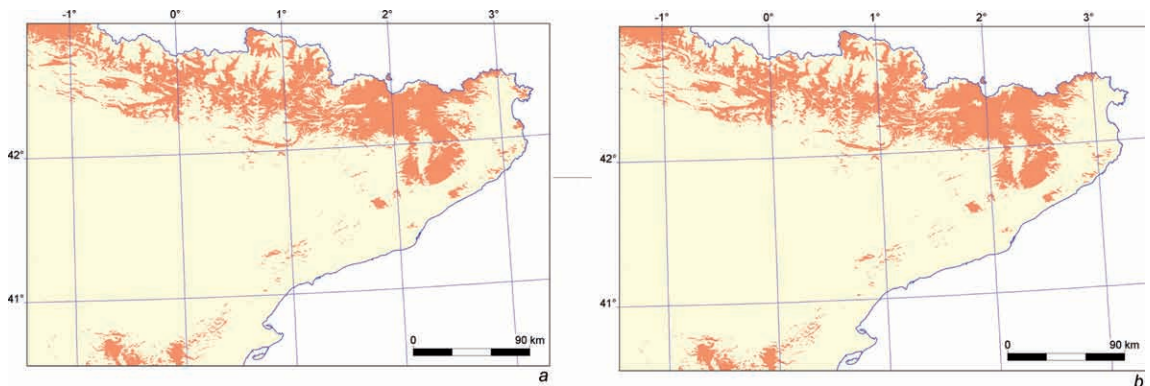


Figura 5. Comparació entre els mapes de presència-absència obtinguts a partir del model objectiu (a) i la introducció de coneixement expert (b) per al cas de *Fagus sylvatica*.



tinus entre 0 i 1) i la capa inferior informa sobre l'índex de favorabilitat del sòl.

Les línies futures que creiem interessant desenvolupar són: calcular la propagació d'errors en el càlcul de la superfície d'idoneïtat, refinar els mètodes estadístics introduint elements GAM (*General Additive Models*), comprovar la robustesa del model (analitzant diversos subconjunts d'ajust i test, comparant el comportament del model en àrees geogràfiques distintes, etc.), millorar les variables abiòtiques (introduir informació de teledetecció com l'evapotranspiració real, la radiació neta o la coberta nival) i introduir refinaments experts per millorar el mostreig de les absències o introduir aquella informació que a causa de la natura de les dades o del model aplicat no hagi estat incorporada de forma explícita en la cartografia final.

Escenari de canvi climàtic: Parc Natural del Montnegre i el Corredor

En aquest apartat utilitzem la informació desenvolupada (mapes climàtics i de idoneïtat vegetal) per a l'anàlisi dels efectes d'un possible canvi climàtic en la vegetació del Parc Natural del Montnegre i el Corredor seguint la línia d'anteriors treballs (Ninyerola et al., 2004). La figura 6 en mostra un exemple de dues de les variables climàtiques utilitzades en l'àmbit del parc. D'entre les principals espècies forestals de la Península ens hem centrat amb *Quercus humilis* i el complex *Quercus petraea-Quercus robur* pel significat ecològic que tenen aquestes espècies de

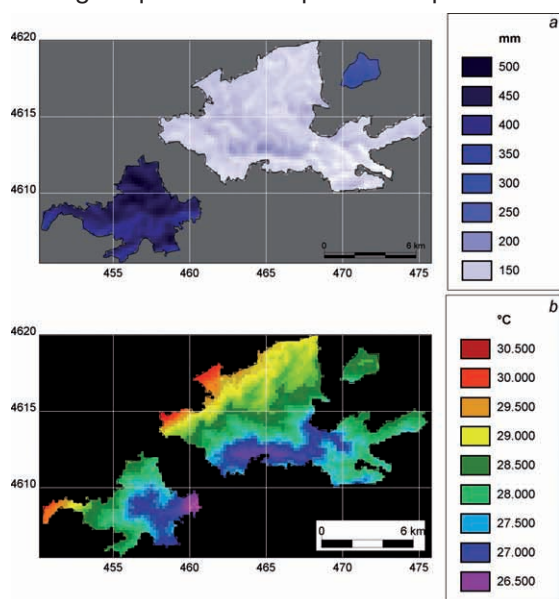


Figura 6. Mapes de precipitació estival (a) i temperatura màxima del mes més càlid (b). Aquestes variables (derivades a partir de les capes de l'Atlas Climàtic Digital Península Ibèrica) s'han utilitzat en el model d'idoneïtat pel cas de *Quercus humilis* i el complex *Quercus petraea-Quercus robur*.

component submediterrani i eurosiberià dins l'àmbit d'aquest parc natural.

Elaboració de l'escenari de canvi climàtic

En aquest punt, hem elaborat un nou escenari climàtic modificant l'Atlas mitjançant l'aplicació de les prediccions de canvi climàtic realitzades per l'IPCC (IPCC, 2001). Aquestes prediccions són:

- increment de la temperatura mitjana anual de 3 °C.
- decrement de la precipitació estival actual en un 5%.
- increment de la precipitació anual actual en un 5 %.

En aquest cas, hem optat per realitzar una transformació lineal de l'espai climàtic present introduint mitjançant àlgebra de mapes els increments i decrements de temperatura i precipitació proposats per l'IPCC per l'any 2050. Cal tenir en compte que l'elaboració d'aquest nou escenari és una simplificació que ja assumeix que l'efecte serà constant per tot el territori tot i que en un àmbit restringit puguem suposar que s'ajusti millor.

Actualment estem treballant (Esteban et al., 2006) en aspectes relacionats amb tècniques de *downscaling* que permeten relacionar el models de circulació general (GCM) a partir dels quals l'IPCC realitza les seves prediccions amb el nivell de topoescala (que inclou els efectes del relleu, la continentalitat, els vessants, etc.) que tenim a través de l'Atlas.

Finalment, en aquest nou marc climàtic hem cartografiat el nínxol ecològic de les espècies prèviament obtingut a partir de la informació actual.

Resultats

A banda dels resultats cartogràfics (figura 7) hem analitzat numèricament les repercussions, des del punt de vista espacial, que aquest escenari pot comportar en el marc del Parc Natural del Montnegre i el Corredor en la distribució de diverses espècies de roures (*Quercus humilis*, *Quercus suber* i el complex *Quercus petraea-Quercus robur*).

Actualment la idoneïtat (6.694 hectàrees) de les tres espècies de roure ocupen aproximadament un 60% de la superfície del Parc Natural del Montnegre i el Corredor (que té una superfície total de 11.158 hectàrees).

Després d'introduir els efectes del canvi climàtic la idoneïtat (1.552 hectàrees) de les tres espècies de roure es veuria reduïda a un 15% de la superfície del Parc.

També s'han calculat les coincidències de les zones de màxima idoneïtat per tal que els gestors puguin detectar quines són les zones més interessants a protegir.



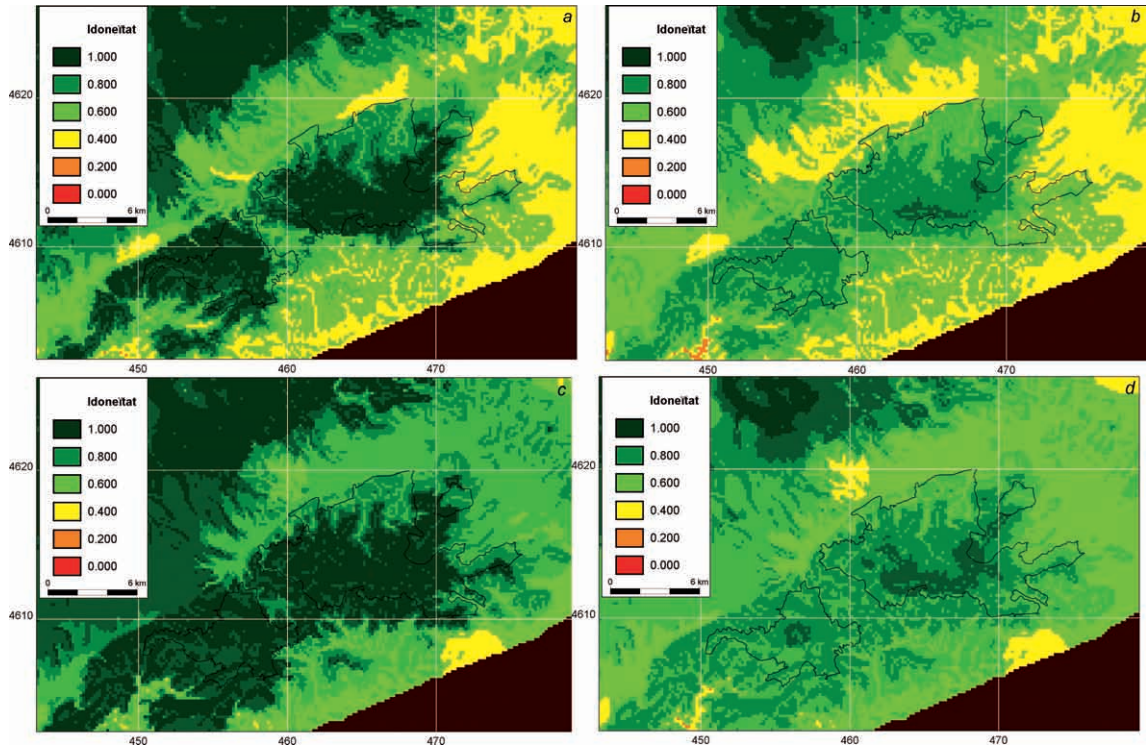


Figura 7. Comparació entre la idoneïtat del complex *Quercus petraea-Quercus robur* en l'escenari de clima actual (a) i un escenari de canvi climàtic predit per l'IPCC (b). A sota, hi ha la comparativa pel cas de *Quercus humilis*: idoneïtat en l'escenari climàtic actual (c) i de canvi climàtic (d).

Bibliografia

- ARAÚJO, M.B., CABEZA, M., THUILLER, W., HANNAH, L. i WILLIAMS, P.H. (2004). Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve selection methods. *Global Change Biology*, 10: 1618-1626.
- ARAÚJO, M.B., WHITTAKER, R.J., LADLE, R.J. i ERHARD, M. (2005). Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 14: 529-534.
- GUISAN, A. i ZIMMERMANN, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135: 147-186.
- IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I. In: Houghton JT i col., *Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- LENNON, J.J. i TURNER, J.R.G. (1995). Predicting the spatial distribution of climate temperature in Great Britain. *Journal of Animal Ecology*, 64: 370-392.
- NINYEROLA, M., PONS, X. i ROURE, J.M. (2004). Efectes del canvi climàtic sobre el paisatge del Parc del Montnegre i el Corredor. *IV Trobada d'Estudiosos del Montnegre i el Corredor. Monografies*, 38. Diputació de Barcelona, Llinars del Vallès.
- NINYEROLA, M., PONS, X. i ROURE, J.M. (2005). Atlas Climàtic Digital de la Península Ibèrica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. UAB, Bellaterra. [URL] <http://opengis.uab.es/WMS/iberia/index.htm>.
- NINYEROLA, M., PONS, X. i ROURE, J.M. (en premsa^a). Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System. *Theoretical and applied climatology*.
- NINYEROLA, M., PONS, X. i ROURE, J.M. (en premsa^b). Mapping monthly and annual air temperature (mean minimum, mean and mean maximum) in the Iberian Peninsula using interpolation tools and GIS techniques. *International Journal of Climatology*.

