

Què en fan de l'aigua els boscos, i com els pot afectar el canvi climàtic

Santi Sabaté i Carles Gracia

Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona, Barcelona
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), Cerdanyola del Vallès

WHAT FORESTS DO WITH WATER, AND HOW CLIMATE CHANGE CAN AFFECT THEM. – Forests play an important role in water fluxes in terrestrial ecosystems. Here we show how water availability is the main driving force for growth and the proper functioning of Mediterranean forest ecosystems. We describe the relationship between both water and energy availability with the mobilization of water fluxes, and in particular we discuss the importance of evapotranspiration compared to other fluxes and water uses by forests. For instance, about 80-90% of precipitation could be evapotranspired by Mediterranean forest ecosystems such as Holm oak forests. This is possible because the energy available for evapotranspiration could double the amount of water input that occurs via precipitation. In the context of climate change, Mediterranean forests would lose productivity, and might even face important survival challenges. Water availability is already an important constraint at present and climate change projections (IPCC, 2007) show conditions to be worsening. There is a clear trend of rising mean annual temperature values (which in a worst case scenario could result in an increase of up to 6.5°C above the current mean annual value by the end of this century). In addition, most climate projections show reduced precipitation, trending down to 20-30% of current values by the end of this century. This clearly points suggests a future fraught by severe water stress periods. In addition to many ecological sustainability challenges, forest management could also be endangered if forests continue to lose their economic value, which is already low at present.

Introducció

L'aigua, sens dubte, té un paper fonamental per a la vida al planeta, i n'explica moltes de les seves propietats. Els humans no en som aliens i amb les nostres activitats generem transformacions dels fluxos d'aigua i una petjada que convé quantificar (Hoekstra i Mekonen, 2012). En aquest context, també els boscos participen activament en la dinàmica de l'aigua. A més, la gestió forestal que els humans fem també pot alterar l'aigua que circula per aquests ecosistemes terrestres (Biro et al., 2011). En aquest treball, basat en el material presentat al seminari "Una mirada al bosc", organitzat per la Secció de Ciències Naturals del Museu de Mataró, presentem diferents aspectes sobre el paper que té l'aigua en els boscos i les implicacions que tenen, tant la seva escassetat com disponibilitat. Aquesta anàlisi la desenvolupem en diferents apartats. Primer mostrem amb alguns exemples com la disponibilitat d'aigua determina el funcionament dels nostres ecosistemes forestals il·lustrant la seva importància. Després expliquem com circula l'aigua pels boscos, quanta aigua poden contenir i com la fan servir. A continuació, a partir de resultats experimentals, presentem en quina mesura la gestió forestal pot modificar l'ús que els boscos fan de l'aigua, i finalment, comentem alguns

dels efectes que el canvi climàtic pot tenir en els nostres boscos mediterranis, a partir de resultats de l'aplicació del model de creixement forestal GOTILWA+, i el seu mòdul d'optimització (Gracia et al., 2003).

Com la disponibilitat d'aigua determina el funcionament dels nostres ecosistemes forestals

La disponibilitat d'aigua governa molts aspectes del funcionament dels boscos. El concepte de disponibilitat però, no només té a veure amb la quantitat d'aigua que entra a l'ecosistema. Aquí hem d'incorporar a més de l'aigua, l'energia disponible per mobilitzar-la. L'aigua es mobilitza en l'eix del seu moviment vertical en dos sentits, per una banda tenim l'actuació de la força de la gravetat que fa que l'aigua es desplaci de dalt a cap a baix dissipant l'energia associada al camp gravitatori terrestre, i per l'altre, de baix cap a dalt impulsada per l'energia que aporta la radiació solar. Aquesta energia, a partir dels canvis d'estat de l'aigua i de densitat de les masses d'aire quan són escalfades, mobilitza l'aigua cap a l'atmosfera en contra del gradient gravitatori. També és important remarcar que l'energia de la radiació emprada en l'evaporació de l'aigua (calor latent) no es dissipa augmentant la temperatura de la superfície d'on parteix l'eva-



poració, i per tant pot tenir un paper molt important en el balanç tèrmic de les superfícies on s'evapora l'aigua en general, i en la de les fulles de les plantes quan transpiren en particular.

Si tornem a la idea de disponibilitat d'aigua, haurem d'acoblar l'entrada d'aigua amb la pluja (actuant a favor de la gravetat) amb la disponibilitat d'energia per retornar-la cap a l'atmosfera. Aquesta disponibilitat d'energia s'associa a la demanda evaporativa de l'atmosfera que envolta les superfícies on es produeix l'evaporació, i augmenta a raó d'un 7% per cada grau d'augment de temperatura (seguint la relació de Clausius-Clapeyron). Per tant, si ens fixem en aquest balanç, la disponibilitat d'aigua dels ecosistemes terrestres s'ha de relativitzar a la disponibilitat d'energia per evaporar-la. Així doncs, ens podem preguntar si la demanda evaporativa de l'atmosfera queda satisfeta o no amb les entrades d'aigua que ens dona la precipitació. Amb aquestes dissipacions d'energia es fa un treball, com per exemple, en contra de la gravetat, la puja dels nutrients i l'aigua (saba bruta) de les arrels a les fulles, seguint el camí de la transpiració. La producció primària dels boscos va molt lligada a aquest treball. Per entendre-la ens haurem de fixar en quina quantitat i com, la demanda evaporativa és satisfeta per la disponibilitat d'aigua que aporta la pluja. Si hi ha molta demanda evaporativa i molta pluja esperarem un ecosistema més productiu que si tenim poca demanda evaporativa encara que quedi compensada per la pluja. També podem trobar la situació en que la pluja superi la demanda evaporativa, en aquests casos veurem un flux important d'escolament d'aigua cap a les rieres, i l'altre situació seria que la demanda evaporativa superi les entrades d'aigua. Serà en aquest cas, quan la disponibilitat d'aigua limitarà la producció. Per tant tenim ecosistemes limitats per la disponibilitat d'aigua i ecosistemes limitats per la disponibilitat d'energia. Aquests dos tipus de comportament queden ben il·lustrats per Piñol *et al.* (1992, 1999) on es recull el comportament de la circulació de l'aigua a conques. En el cas de L'Avic (Prades, Tarragona) la circulació està limitada per la disponibilitat d'aigua, ja que la demanda evaporativa pot quasi doblar la precipitació. Alhora, quan es compara amb ecosistemes temperats com el de les conques de Hubbard Brook (USA) el comportament és ben diferent. En aquest cas la demanda evaporativa queda satisfeta de llarg per les entrades d'aigua en ser doblades per la precipitació, essent la disponibilitat d'energia la més limitant. El resultat és que en el sistema Mediterrani com el cas de L'Avic, a més precipitació hi haurà més evapotranspiració (i més producció), amb una escorrentia relativament baixa, mentre que en el cas de Hubbard Brook a més precipitació

Taula 1. Producció de fulles ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$) a la conca de l'Avic (Prades) en dos anys contrastats pel que fa a la disponibilitat d'aigua (adaptat de Sabaté *et al.*, 1999).

Zona de la conca	1988	1989
Part alta	2,9±0,3	1,6±0,6
Vall	3,4±0,1	2,5±0,1
Precipitació (mm) (període setembre-juny)	734	328

no augmentarà l'evapotranspiració (ja que la demanda evaporativa està saturada), però en canvi, augmentarà l'escorrentia i el cabal de les rieres. La producció en el nostre ecosistema mediterrani de L'Avic està clarament limitat per l'aigua.

Aquestes limitacions es traslladen als diferents components de l'ecosistema com per exemple la producció foliar. El component foliar a part de ser fonamental per explicar la producció primària, és molt sensible a la disponibilitat d'aigua, llum i nutrients. Depenent de les condicions ambientals poden pesar més uns o d'altres recursos, però clarament, en el cas mediterrani, l'aigua juga el paper central. Això es pot veure a la taula 1, on es mostra la producció de fulles a la mateixa conca de L'Avic esmentada abans. La producció de fulles es molt inferior els anys on la precipitació acumulada en el període d'abans i durant la producció i expansió foliar (setembre-juny) és inferior; com va passar en comparar l'any 1988 (plujós durant el període esmentat) amb l'any 1989 (molt sec durant el mateix període, al voltant de la meitat de precipitació de l'any anterior). La profunditat del sòl també queda reflectida en aquesta producció. La zona alta de la conca, amb menys capacitat de retenció d'aigua pels sòls poc profunds (al voltant d'uns 0,30-0,40 m) té ambdós anys menys producció que la que es dona a la part baixa de la conca, amb sòls més profunds (més d'1 metre de fondària). Aquestes zones reben entrades laterals d'aigua que els arriba dels vessants, i per la major fondària, tenen molta més capacitat de retenció d'aigua que es reflecteix en el patró de producció foliar: més producció a més capacitat de contingut d'aigua al sòl.

Si bé queda clara la relació de la producció foliar amb la disponibilitat d'aigua, a una altra escala, a partir del mostreig extensiu dels boscos de Catalunya, realitzada per l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya (Gracia *et al.*, 2000-2004), també la producció de fusta va lligada a les condicions ambientals de disponibilitat d'aquest recurs. Així, si mirem la producció de fusta de les principals espècies forestals catalanes (figura 1), en termes generals, quedà palès que les que viuen en condicions mediterrànies, amb el típic eixut estival i altes temperatures, són les que presenten les produccions de fusta menors. Per altra banda, tan en el cas



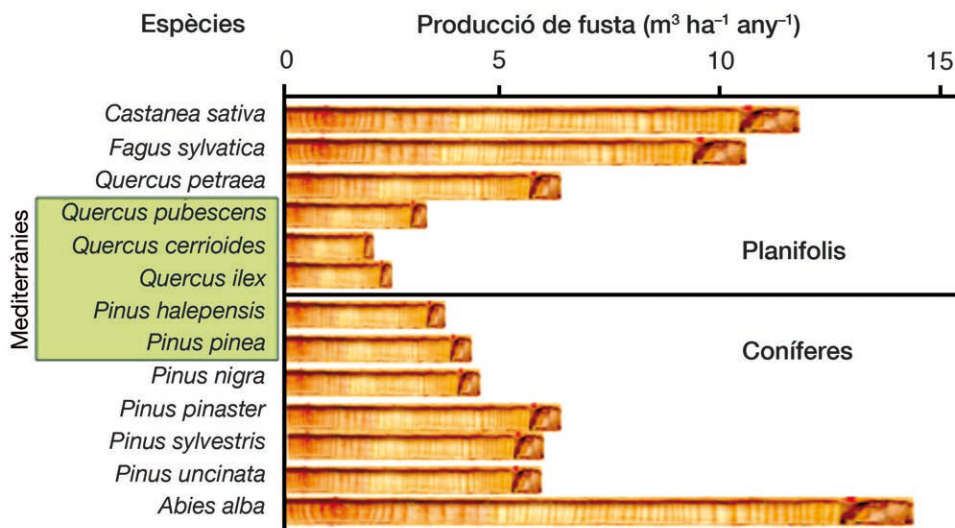


Figura 1. Producció de fusta de les espècies forestals més importants a Catalunya. Adaptat a partir de dades facilitades per Jordi Vayreda de l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya (Gracia et al., 2000-2004).

de les coníferes com dels planifolis, les espècies d'alta muntanya o de muntanya mitjana, amb condicions més humides, són les que presenten les produccions més grans.

Hi ha altres recursos que poden afectar la producció terrestre. Un d'ells és la disponibilitat de CO₂ atmosfèric necessari per a la fotosíntesi. Aquest recurs no ha parat d'augmentar a causa de l'activitat humana amb la crema sobretot de combustibles fòssils, però també amb la desforestació (IPCC, 2007). Hom podria a priori pensar que la producció anés augmentant amb l'increment d'aquest recurs. Per avaluar-ne els seus efectes en el creixement podem fer experiments, com el que es mostra a la figura 2, amb plàntules d'alzina (López et al., 1997). A més d'avaluar els efectes del CO₂, en aquest experiment volíem veure com

la disponibilitat d'aigua afectava la resposta, és a dir quina era la interacció entre l'un i l'altre recurs. Així doncs, vàrem sotmetre les plàntules d'alzina a la combinació de dos factors (disponibilitat d'aigua i disponibilitat de CO₂) donant la seva combinació de quatre condicions diferents. A la figura 2 es representa el creixement en alçada, però el patró era el mateix per altres indicadors de creixement, com el del diàmetre, i el d'àrea foliar. Efectivament, concentracions més altes de CO₂ (500 ppm en front de 350 ppm) donaven un creixement superior, quan el règim de reg era el mateix que el de la precipitació que es dona a la mateixa conca de l'Avic. Les condicions de 350 ppm i la mateixa aigua, varen resultar en un creixement entremig. Ara bé, quan la disponibilitat d'aigua es va reduir a la meitat, l'efecte

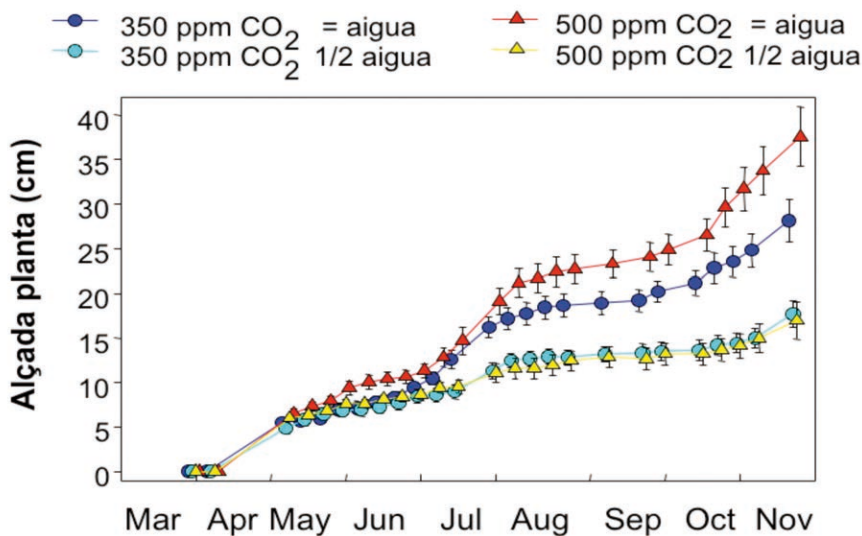


Figura 2. Creixement en alçada de plàntules d'alzina sotmeses dins de cambres d'ambient controlat, a diferents tractaments de disponibilitat hídrica (igual al règim hídric de Prades o reducció a la meitat de disponibilitat) i de CO₂ (350 ppm de referència o 500 ppm). (Adaptat de López et al., 1997)



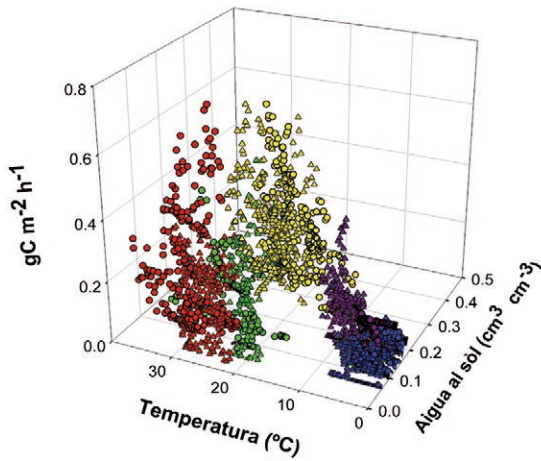


Figura 3. Evolució estacional de la respiració del sòl ($\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) en relació a l'aigua, al sòl i a la temperatura. En blau: condicions d'hivern; verd: primavera; vermell: inici d'estiu; groc: a la fi d'estiu; violeta: tardor. Lloc: Castelltallat, bosc mixt d'alzines i roures.

positiu de l'increment de CO_2 va desaparèixer completament. És a dir, no hi havia diferències entre 500 ppm i 350 ppm de CO_2 . L'aigua era la que limitava el creixement.

La disponibilitat d'aigua no només afecta processos com la fotosíntesi. La respiració del sòl amb dos components: respiració de les arrels i descomposició de la matèria orgànica, també es veu clarament afectada. La respiració de les arrels és un indicador de la seva activitat, i la descomposició de la matèria orgànica, o respiració heterotròfica, és necessària per al reciclat dels nutrients a l'ecosistema. Si pensem en com conservar la matèria orgànica, així com el menjar, podem optar per posar-ho a la nevera (fred) o assecat-ho (deshidratat). Si la temperatura és baixa, tindrem poca activitat metabòlica, i si el material està sec, dificultarem l'activitat de fongs i bacteris en el procés de descomposició. A la figura 3,

es mostra la respiració del sòl a boscos mixtos d'alzines i roures a Castelltallat (Bages), en diferents moments de l'any, on es combinen de manera diferent el contingut d'aigua al sòl i la temperatura. Els resultats mostren que els moments de més activitat es donen quan coincideixen les altes temperatures amb el sòl més humit. A l'hivern, encara que el sòl estigui humit, la respiració és baixa. A l'estiu, quan no hi ha aigua, també és baixa, però quan es dona alguna pluja, tant al principi de l'estiu, com a la fi d'estiu, és quan tenim l'activitat de respiració del sòl més alta. Vegem doncs, que l'aigua, torna a jugar un paper important.

Com circula l'aigua pels boscos, quanta aigua poden contenir i com la fan servir

Hem comentat al punt anterior la importància que també té la disponibilitat d'energia combinada amb la de l'aigua. A la figura 4 es mostren els camins que pot seguir l'aigua quan entra a l'ecosistema a partir de la precipitació. No tota la precipitació arriba al sòl. Hi ha una part que mulla les superfícies que l'intercepten, i que després pot eixugar-se quan aquesta aigua que mulla s'evapora. Aquesta via de sortida és l'evaporació, no arriba a penetrar al sòl, i per tant tampoc pot ser captada per les arrels. L'aigua que pot continuar el seu camí cap al sòl, ho pot fer per dues vies quan és interceptada per les capçades. Tenim el trascol, que travessa les capçades fins arribar al sòl, i l'escolament cortical (Llorens i Domingo, 2007). Segons les formes de les capçades se'n pot afavorir més una o l'altra. Quan les branques tenen un angle més vertical que l'horitzontal, actuen com si fossin un embut, canalitzen l'aigua cap al tronc. Si tenen inclinacions per sota l'horitzontal, la circulació alimenta més el camí del trascol. Un cop l'aigua arriba al sòl, segons la seva fondària,

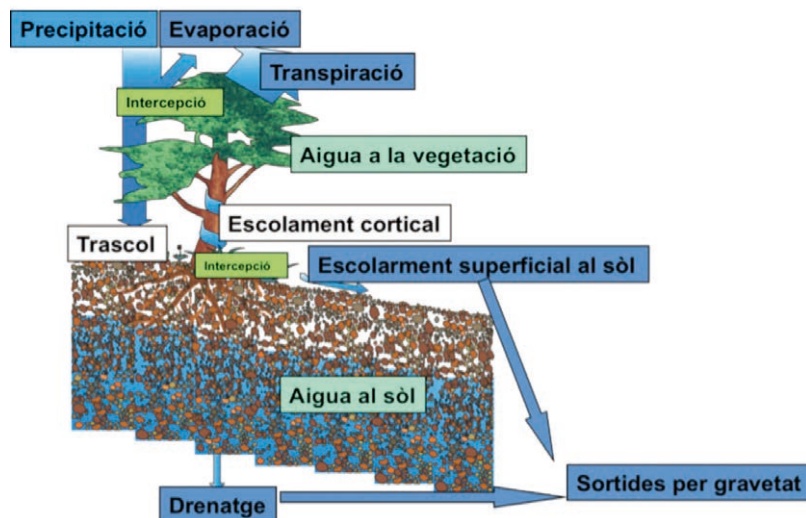


Figura 4. Esquema de la circulació de l'aigua al bosc a partir de les entrades i les sortides.



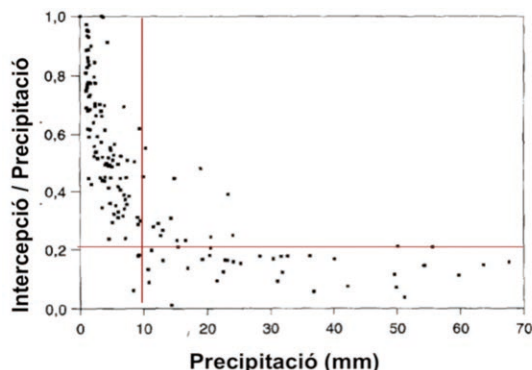


Figura 5. Relació entre la precipitació i la proporció d'aquesta precipitació que és interceptada en un bosc de pi roig (*Pinus sylvestris*). Els punts representats a la figura són els valors corresponents a cada esdeveniment de pluja. (de Llorens *et al.*, 1997). En línia vermella s'emmarquen les zones amb més dominància dels valors de la relació. Pluges de menys de 10 mm es troben amb intercepcions superiors al 20%, i les pluges que superen els 10 mm, tendeixen a trobar-se amb valors relatius d'intercepció per sota al 20%.

textura i contingut de matèria orgànica, podrà contenir més o menys aigua, fins a un màxim quan queda saturat. L'efecte de la gravetat actua tan superficialment (escolament superficial) com en fondària (drenatge). De l'aigua que conté el sòl, una part pot ser captada per les arrels, i gràcies a la tensió generada per l'evaporació de l'aigua interna de la planta, a la superfície de les fulles, es genera un diferencial de potencial hídric, que xucla l'aigua del sòl cap a les fulles on s'evapora.

Aquest camí de l'aigua de les arrels fins a les fulles, i que acaba sortint pels estomes és la transpiració. L'evapotranspiració és la suma d'aquestes sortides cap a l'atmosfera. En els casos de disponibilitat d'energia, com hem comentat abans, la via que pot predominar és aquesta evapotranspiració, que en el cas de la conca de l'Avic pot arribar a ser d'entre el 80 i el 90 per cent de la precipitació (vegeu Piñol *et al.*, 1992, 1999).

En tots aquests camins de l'aigua quan entra al bosc, és important, especialment en els ecosistemes on l'aigua és un recurs limitant, saber quanta aigua ha estat interceptada. La diferència entre la precipitació i aquesta aigua interceptada s'anomena pluja efectiva. La intercepció de l'aigua depèn de la quantitat de

superfícies mullables i es pot representar en relacions potencials de dimensió fractal, on la intercepció és una fracció de la precipitació elevada a una potència inferior a 1 (Bellot *et al.*, 1999). Si es relativitza a la precipitació, com es mostra a la figura 5, el patró és que si plou poc una fracció important de la pluja no arriba al sòl, en el cas extrem de poca intensitat, la pluja només mulla (valor del quocient 1), a mesura que l'esdeveniment es fa més intens, quan se superen els 10 mm de precipitació, la proporció de pluja interceptada disminueix per sota del 20 per cent, però es manté, independentment de la intensitat de la pluja, en una proporció d'entre el 10 i el 20 per cent de la precipitació. Valors d'intercepció d'entre un 10 i un 20 per cent de la precipitació per precipitacions de més de 10 mm sembla comú en el cas del bosc de pi roig a Vallcebre. En el cas de l'alzinar de Prades a la conca de l'Avic, el valor mitjà interceptat de la precipitació anual se situa al voltant del 13 per cent de la precipitació, i en el cas de l'alzinar del Montseny, al voltant del 20 per cent. (Bellot *et al.*, 1999). La pluja efectiva inevitablement sempre serà inferior a la precipitació perquè sempre es mullaran superfícies que es poden eixugar sense que l'aigua arribi al sòl.

També és important saber de quanta aigua estem parlant quan ens referim a la que pot contenir el sòl. Aquest contingut d'aigua serà variable segons la fondària, que en determinarà la capacitat, de la seva pedregositat, que fixarà el volum de sòl efectiu, i de la matèria orgànica i textura, que decidirà la facilitat d'infiltració i de retenció d'aigua. A aquests aspectes estructurals del sòl s'hi ha d'afegir la vegetació que s'emportarà part de l'aigua amb la transpiració, i que si se n'emporta més de la que entra amb la precipitació efectiva, també determinarà el seu buidat. A la taula 2, es presenten dades mitjanes diàries de contingut d'aigua al sòl, així com el seu rang de variació (dades obtingudes a partir de simulacions del balanç hidrològic del sòl obtingut amb el model GOTILWA+, aplicat a l'alzinar de l'Avic). Es pot veure clarament el patró a partir de la fondària, que indica la menor disponibilitat i capacitat de contenir aigua en sòls poc profunds. Aquests valors poden anar, entre sòls de fondària d'1 m i 0,2 m dels 96 mm als 25 mm quan els sòls estan plens d'aigua, a

Taula 2. Contingut diari d'aigua en sòls de diferents fondàries i amb característiques similars a les de l'alzinar de l'Avic, a partir de simulacions de 100 anys amb el model de creixement forestal GOTILWA+. La màxima precipitació anual al llarg de la sèrie meteorològica és de 944 mm any⁻¹ i la mínima de 341 mm any⁻¹, amb una mitjana anual de 580 mm any⁻². El contingut de matèria orgànica al sòl és de 500 g m⁻².

Sòls amb fondària (m)	Contingut d'aigua al sòl (n=36500)		
	Max (mm)	Min (mm)	Mitjana diària (mm)
1	96	5	25
0.5	53	1	13
0.3	35	0.4	7
0.2	24	0.2	5



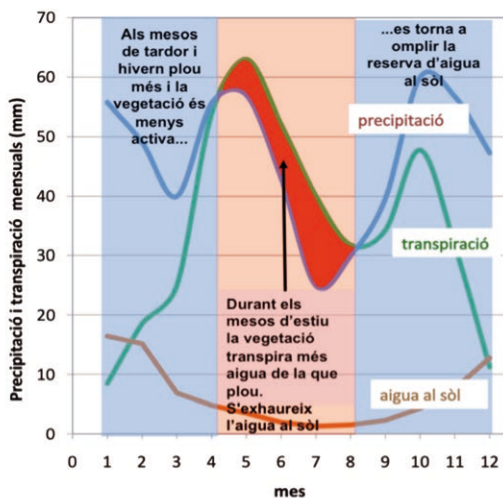


Figura 6. Esquema de l'evolució temporal de la precipitació, la transpiració i el contingut d'aigua al sòl, en un sistema de clima típicament Mediterrani. (1= gener, 6=juny, 12= desembre a l'hemisferi nord, i 1= agost, 6= gener, 12=juliol, a l'hemisferi sud).

continguts de 5 mm a 0.2 mm quan estan més secs. Els sòls més profunds necessiten precipitacions més grans per arribar als seus valors màxims i poden emmagatzemar més quantitat d'aigua, fet que permetrà superar períodes d'eixut amb més possibilitat d'èxit per a la vegetació.

La importància de la dinàmica estacional i el paper de l'aigua al sòl es representa a l'esquema de la figura 6, on s'il·lustren dues situacions que comparen la disponibilitat d'aigua amb la disponibilitat d'energia. Tenim el període de tardor i hivern, així com les primaveres humides, en què la precipitació supera la transpiració. En aquest cas, la transpiració queda satisfeta per la disponibilitat d'aigua, i és més la disponibilitat d'energia que no la d'aigua, la que governa la producció. L'altre període el tenim quan la precipitació no compensa la transpiració. En aquest cas, el reservori d'aigua al sòl es veu reduït, i és la disponibilitat d'aigua, no d'energia, la que governa la producció. Això és el que sol passar als ecosistemes mediterranis. Vegem altre cop el binomi aigua-energia, però en aquest cas com es relacionen en un mateix ecosistema a partir dels canvis de disponibilitat estacional.

A part de l'aigua que conté el sòl, també cal saber quanta aigua lliure contenen els teixits vegetals. És molta o poca en relació a la

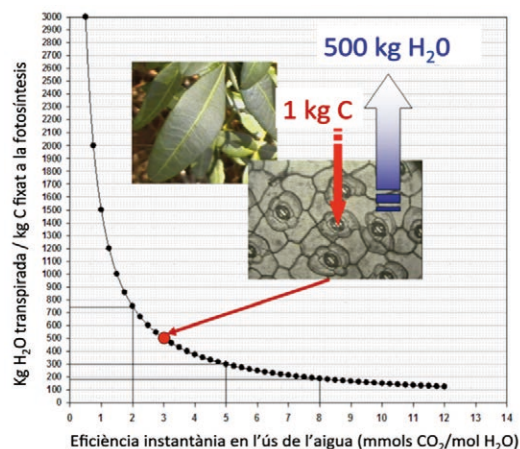


Figura 7. Relació entre l'aigua transpirada per unitat de carboni fixat a la fotosíntesi i l'eficiència instantània en l'ús de l'aigua.

que tenim al sòl? El contingut d'aigua als teixits vius depèn de les condicions ambientals, i les plantes admeten un cert rang de variació abans de morir per dessecació. L'estat d'hidratació, també influencia altres aspectes de la dinàmica del bosc com el risc d'incendi en els períodes d'eixut, ja que la combustió es veu frenada perquè abans de la combustió, s'ha d'evaporar l'aigua que contenen els teixits, i aquesta energia emprada en l'evaporació de l'aigua (assecament de la biomassa) no s'inverteix en augmentar la temperatura dels teixits, necessari per continuar la combustió. Per il·lustrar el contingut d'aigua, a la taula 3 mostrem el rang de valors de contingut d'aigua a l'alzinar, en els diferents components dels arbres. Sabent la biomassa (g/m² en pes sec) que tenim al bosc, podem calcular el mm (litres/m²) que tenim a cada component. Els valors totals d'aigua obtinguts oscil·len entre els 11 mm (mesurats a l'estiu) i els 17 mm (mesurats a l'hivern). Teixits com les arrels fines i les fulles contenen en termes relatius més aigua que els troncs i arrels gruixudes, però en termes quantitius, per la gran quantitat de biomassa als troncs i arrels gruixudes, és on clarament hi tenim més quantitat d'aigua.

El lligam entre l'ús de l'aigua i la producció comença amb l'intercanvi de gasos als estomes de les fulles. L'aigua que surt és l'anomenada transpiració i el carboni que entra en forma de CO₂ és el que es podrà fixar amb la fotosíntesi als cloroplasts. La relació entre el

Taula 3. Estimes del contingut d'aigua a diferents components de la biomassa de l'alzinar de Prades a partir de mesures de biomassa i relacions de pes sec/pes fresc obtinguts pels diferents components de l'alzinar en diferents estacions de l'any. (Pes sec a l'estufa a 70°C, mínim de 48h).

Fracció de la biomassa	Biomassa (g m ⁻²)	Pes sec /pes fresc (mm)	Contingut d'aigua
Fulles	600	0.6 a 0.4	0.4 a 0.9
Troncs i arrels gruixudes	23220	0.7 a 0.6	10 a 15.5
Arrels fines	71	0.1	0.6
Total			11 a 17 mm



Taula 4. Estimes de transpiració, contingut d'aigua als teixits, ús de l'aigua a la fotosíntesi i generació d'aigua a partir de la respiració, a l'alzinar de l'Àvic a les muntanyes de Prades (Tarragona), en un alzinar amb precipitació mitjana de 580 mm any⁻¹, una eficiència instantània.

Transpiració (mm any ⁻¹)	463
Aigua lliure als teixits (mm)	11 a 17
Aigua per la fotosíntesi (mm any ⁻¹)	2.3
Aigua generada per la respiració de les plantes (mm any ⁻¹)	1.2

carboni que entra a la fulla i el que surt d'aigua és una mesura de l'eficiència instantània de les plantes en l'ús de l'aigua. Els valors trobats d'aquesta eficiència a les plantes és interessant, perquè posen en evidència la quantitat d'aigua que es transpira en relació al carboni que es fixa, essent dos ordres de magnitud més gran la sortida d'aigua per transpiració. A la figura 7, es representa aquesta relació per mostrar les equivalències en quilos d'aigua i carboni. Valors d'eficiència instantània en l'ús de l'aigua que hem mesurat en fulles d'alzina els trobem entre 3 i 5 mmols de CO₂ per mol d'aigua. Si agafem de referència el valor de 3, per cada kg de carboni fixat, significa que se n'hauran transpirat 500 kg (litres) d'aigua, i si el valor és de 5 se n'hauran transpirat 300 kg. Veient aquests valors ja ens posa sobre la pista que una quantitat important de l'aigua que fan servir les plantes és transpirada, i que fixar carboni té associat un important consum d'aigua. Estimes d'aquesta importància relativa es mostren a la taula 4, obtingudes per l'alzinar de L'Àvic. En aquest cas, la major part de l'aigua que fan servir les alzines, circulen per la via de la transpiració, 463 mm/any en aquest exemple, mentre que la destinada a hidratar els teixits hem vist que es troba entre 11 i 17 mm. La quantitat d'aigua que intervé a la fotosíntesi és molt inferior, al voltant dels 2 mm any⁻¹. El retorn d'aigua mitjançant la respiració té valors semblants als de la fotosíntesi, essent els de la respiració superiors als de la fotosíntesi si l'ecosistema acumula biomassa (com en el cas de la taula 4).

La gestió pot modificar l'ús que els boscos fan de l'aigua?

Com hem vist, la major part de l'aigua que circula pels nostres alzinars mediterranis es retorna a l'atmosfera per la via de la transpiració. En ecosistemes limitats per l'aigua, com els nostres mediterranis, i sabent l'estreta relació que hi ha entre transpiració i producció, podem plantejar-nos si amb la gestió forestal podem reduir la seva limitació per l'aigua, o fins i tot ajudar el bosc a superar períodes d'eixut extrem. Amb l'objectiu d'avaluar els efectes de convertir un alzinar, de bosc baix de rebrot, amb alta densitat de rebrots per

soca, a bosc alt, amb un o dos peus per soca; l'any 1992 vàrem realitzar un experiment al barranc dels Torners situat al bosc de poblet de les muntanyes de Prades (Gracia *et al.*, 1996, 1999). Aquest alzinar de rebrot, tenia una altíssima densitat de peus com a resultat del carboneig que s'hi va aplicar fins a la fi dels anys cinquanta, amb el posterior abandonament de la gestió. Un dels aspectes que ens va interessar investigar va ser com la gestió (selecció de tanys) modificava l'ús de l'aigua. A partir de dades estructurals i mesures de transpiració en fulles de sol, ombra i de nous rebrots, vàrem estimar la transpiració del bosc l'any després de la gestió, com es mostra a la figura 8. La gestió consistí en diferents intensitats d'intervenció, i a la figura se'n mostren tres: control (sense selecció), aclarida mínima (extracció d'un 40% de l'àrea basal, deixant els dos peus més grans per soca) i aclarida màxima (extracció d'un 80% d'àrea basal, deixant el segon peu més gran per soca). Com a resultat de la gestió, es mostra a la figura 8, es va reduir la superfície de fulles de l'alzinar. Hom podria pensar que si es reduïa la superfície de fulles, també es podria reduir la transpiració i per tant, l'ús de l'aigua que en fa el bosc. Però els resultats no ens indiquen això. Atès que aquest bosc, com ja hem explicat abans, té una forta limitació d'aigua (amb una demanda evaporativa que pot arribar a doblar la precipitació), el que es va trobar va ser que la transpiració per unitat de terreny era semblant en tots els casos. El que augmentava era la transpiració per metre quadrat de fulla. És a dir, que certament els peus deixats tenien més disponibilitat d'aigua, però aquesta disponibilitat d'aigua la feien servir. Tenir més àrea foliar, no vol dir sempre més transpiració per unitat de terreny. Si els arbres no tenen prou aigua, tanquen els estomes i així controlen l'ús d'un

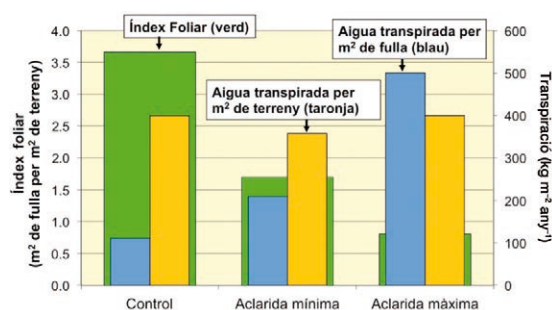


Figura 8. Valors d'índex d'àrea foliar (en verd) i transpiració, per unitat de superfície de fulla (en blau) i per unitat de superfície de terreny (en taronja) a un experiment de gestió de l'alzinar de les muntanyes de Prades (al barranc dels Torners) amb diferents intensitats de selecció de tanys: control (sense selecció), aclarida mínima (extracció d'un 40% de l'àrea basal, deixant els dos peus més grans per soca) i aclarida màxima (extracció d'un 80% d'àrea basal, deixant el segon peu més gran per soca). Informació de l'experiment a Gracia *et al.* (1996, 1999).



recurs escàs com l'aigua, però alhora, tancant estomes, no poden fixar carboni, i en aquests períodes, han de funcionar amb carbohidrats de reserva. L'any 1994, va ser especialment sec a Catalunya, i el que vàrem constatar a la zona experimental, és que si bé la zona aclarida se'n va sortir prou bé, tot i tenir limitacions d'aigua, les zones control varen quedar altament defoliades ja que no vam poder compensar la respiració amb els carbohidrats de reserva, atesos els llargs períodes de tancament estomàtic (sense nova fotosíntesi). Per tant, si bé amb la gestió es pot ajudar a la superació de períodes de sequera, això no implica que els sòls augmentin el contingut d'aigua, ja que la vegetació en fa servir tanta com pot, atesa la seva limitació. Això sí, els peus deixats a la màxima aclarida van créixer fins a 13 vegades més que els que estaven creixent al tractament control.

Efectes que el canvi climàtic pot tenir sobre el valor dels boscos mediterranis

A la figura 6, hem presentat el patró estacional de distribució de la disponibilitat d'aigua als climes mediterranis en relació a la disponibilitat d'energia per mobilitzar-la. El clima mediterrani presenta un típic eixut estival atesa la coincidència de les altes temperatures (més disponibilitat d'energia per evaporar aigua) amb la baixa precipitació. Un altre tret d'aquest clima és la gran variabilitat, és a dir, que si bé el clima representa determinats patrons ambientals de condicions mitjanes, principalment de precipitació i temperatura, la zona mediterrània pot presentar anys en què l'eixut sigui molt important, fins i tot no només a l'estiu, i anys en què la precipitació, fins i tot a l'estiu, no generi massa problemes d'eixut.

Els boscos mediterranis presenten característiques que els permeten modular aquestes limitacions amb èxit, i fins i tot compensar anys "dolents" amb els anys "bons" a partir de l'acumulació de reserves i bones condicions per a la regeneració en aquests anys bons. Quan es parla de canvi climàtic, es fa referència a una tendència de modificació dels patrons mitjans i a la seva variabilitat. Els canvis d'aquests patrons poden ser positius o negatius segons si les condicions de limitació pel creixement s'accentuen o s'atenuen (vegeu Sabaté *et al.*, 2002).

Malauradament pels nostres ecosistemes, la tendència de canvi observada fins ara a la nostra zona, és a dir, ja experimentada pels nostres ecosistemes, va cap a condicions de més limitació (IPCC, 2007). Per una banda, hi ha una tendència inequívoca de l'augment de la temperatura, i una tendència a la disminució de la precipitació, encara que amb més incerteses a causa de la gran variabilitat de la precipitació. Tot i això, només amb l'augment de

temperatura, atès que es genera més demanda evaporativa, encara que ploués el mateix ja es provoca més eixut.

Les projeccions de futur, a part de l'augment de la temperatura (que dependrà de com ens comportem els humans amb la gestió de les emissions de gasos amb efecte hivernal), també apunten a la nostra zona mediterrània, cap a una disminució de la precipitació que podria arribar a reduir-se entre un 15 i un 30% menys a la fi d'aquest segle. Això són "males notícies" per als nostres ecosistemes, ja que es veuran sotmesos a més pressió ambiental, pel que fa a la disponibilitat d'aigua, de la que ja estan sotmesos en l'actualitat. Per tant, seguint el raonament presentat en el primer punt d'aquest document, l'afectació del canvi climàtic sobre els ecosistemes mediterranis serà fonamentalment negativa, i probablement molts dels nostres boscos deixaran de ser viables en les condicions més extremes. També hi ha altres aspectes del canvi climàtic, a més de la disponibilitat d'aigua, que poden provocar múltiples desacoblaments en el seu funcionament, com per exemple canvis en la fenologia, on s'inclou el període vegetatiu, en la producció, en la dinàmica de les perturbacions com els incendis forestals, en el reciclat i disponibilitat de nutrients. Molts d'aquests aspectes varen quedar recollits en el segon Informe del Canvi Climàtic a Catalunya (Llebot, 2010).

Un aspecte, en general encara poc tractat, és la pèrdua de valor dels nostres boscos, que pot accentuar encara més la tendència al seu abandonament. Per explorar-ho, estem avaluant amb el model de creixement forestal GOTILWA+ i les estimes del seu mòdul d'optimització, quina pot ser la pèrdua de valor dels boscos mediterranis davant diferents escenaris de canvi climàtic i escenaris de gestió forestal. Un exemple d'aquesta avaluació, pels boscos de pi roig a les muntanyes de Prades, la presentem a la taula 5, on es mostren alguns dels resultats. A la taula 5 mostrem diferents indicadors: el valor esperat del sòl (SEV) (on es té en compte el valor de l'estoc de fusta del bosc i les repercussions anuals de despeses i guanys derivades de la gestió), la producció de fusta (WDP) i el volum d'aigua evapotranspirada per volum de fusta produïda (WUE). Es presenten resultats de dues condicions climàtiques, una sense canvi climàtic, i una altra amb canvi climàtic; on s'assumeix una evolució del clima de Prades que comportarà un augment de 2,1 ppm de CO₂ atmosfèric/any, un augment de la temperatura mitjana a la fi de segle de 6.5°C i una disminució de la precipitació del 30% a la fi de segle. També s'han avaluat dues condicions de sòl: un sòl de 50 cm i un de 150 cm de fondària. Si ens fixem en les condicions actuals, sense que canviés el clima, a



Taula 5. Possibles efectes del canvi climàtic en els boscos de *Pinus sylvestris* a Prades sobre el valor esperat del sòl (SEV), la producció de fusta (WDP) i el volum d'aigua evapotranspirada per volum de fusta produïda (WUE). Canvi climàtic assumint respecte al clima mitjà actual de la zona, un augment de 2,1 ppm de CO₂ atmosfèric/ any, un augment gradual de la temperatura mitjana fins a la fi de segle de 6,5°C i una disminució gradual de la precipitació del 30%.

Profunditat del sòl	Sense canvi climàtic			Amb canvi climàtic		
	SEV € ha ⁻¹	WDP Mg ha ⁻¹ a ⁻¹	WUE m ³ m ⁻³	SEV € ha ⁻¹	WDP Mg ha ⁻¹ a ⁻¹	WUE m ³ m ⁻³
(50 cm)	490	1.6	829	212	1.1	1115
(150 cm)	853	2.3	750	598	2.0	802

més fondària tenim més valor esperat del sòl, més producció i menys despesa d'aigua per unitat de volum de fusta produïda. Si el canvi climàtic esmentat s'acaba donant, s'estima que comportarà una pèrdua substancial del valor del sòl, menys producció de fusta i més evapotranspiració d'aigua per unitat de fusta produïda. Aquests canvis es donaran de forma més accentuada en els sòls menys profunds, on el valor d'una hectàrea de bosc es pot veure reduït a menys de la meitat del seu valor actual.

En aquest exemple, es posa en evidència, no tan sols el possible impacte ecològic del canvi climàtic reflectit en la producció i en l'ús de l'aigua que en fan els boscos mediterranis de la nostra zona, sinó també les repercussions econòmiques que pot comportar, amb una clara pèrdua del seu valor.

Conclusions

Hem presentat en aquest treball, com l'aigua marca la pauta de molts processos relacionats amb el creixement i el funcionament dels boscos mediterranis. Tanmateix, també volem ressaltar que no es pot separar la disponibilitat d'aigua de la disponibilitat d'energia per entendre el seu funcionament. En els ecosistemes forestals no limitats per l'energia, (quan l'evapotranspiració potencial supera a la precipitació), la major part de l'aigua és evapotranspirada, essent només una petita quantitat la que roman hidratant els teixits, i molta menys la que s'utilitza a la fotosíntesi. Aquesta situació és la que preval als ecosistemes forestals mediterranis. En els ecosistemes limitats per l'energia, disponibilitat més alta d'aigua amb la precipitació resulta en una escorrentia més gran cap a les rieres. En el context del canvi climàtic, tot apunta que els boscos mediterranis perdran capacitat productiva, i fins i tot poden no superar les condicions d'altres temperatures i d'aridesa que podrien experimentar. Un dels efectes del canvi climàtic sobre els nostres boscos, a més de les dificultats de supervivència de les espècies presents, és la pèrdua de valor econòmic, sobretot en els sòls menys profunds. Això pot determinar més abandonament de la gestió d'aquests ecosistemes.

Bibliografia

- Bellot, J., Àvila, A. i Rodrigo, A. (1999). Throughfall and Stemflow. *In*: Rodà, F., Retana, J., Gracia, C. i Bellot, J. (eds.), *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Ecological Studies Vol. 137. Springer-Verlag, Berlin, pp. 209-222.
- Birou, Y., Gracia, C. i Palahí, M. (eds.) (2011). *Water for forests and people in the Mediterranean region – A challenging balance*. What Science Can Tell Us 1 pp. 72-75.
- Gracia, C.A., Bellot, J., Sabaté, S., Albeza, E., Djema, A., León, B., López, B., Martínez, J.M., Ruíz, I. i Tello, E. (1996). Anàlisi de la resposta de *Quercus ilex* L. a tractaments de aclareo selectiu. *In*: *Restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana*. Fundación CEAM. pp. 547-601.
- Gracia, C.A., Sabaté, S., Martínez, J.M. i Albeza, E. (1999). Functional responses to thinning. *In*: Rodà, F., Retana, J., Gracia, C. i Bellot, J. (eds.), *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Ecological Studies Vol. 137. Springer-Verlag. Heidelberg, pp. 329-338.
- Gracia, C., Sabaté, S., Sánchez, A. (2003). GOTILWA+ an integrated model of forest growth. Model documentation and User's guide. Updated March 2003, UB, CREAM, Barcelona. <http://www.cream.uab.es/gotilwa+>
- Gracia, C.A., Burriel, J.A., Mata, T., Ibàñez, J.J. i Vayreda, J. (2000-2004). *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya*. 10 volums. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, Bellaterra.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hoekstra, A.Y. i Mekonen, M.M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(9): 3232-3237.
- López, B., Sabaté, S., Ruíz, I. i Gracia, C. (1997). Effects of elevated CO₂ and decreased water availability on holm oak



- seedlings in controlled environment chambers. In: Mohren, G.M.J., Kramer, K. i Sabaté, S. (eds.), *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 125-133.
- Llorens, P. i Domingo, F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335: 37-54.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J. i Gallart, F. (1997). Rainfall interception by *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results to event scale. *Journal of Hydrology*, 199: 331-345.
- Llebot, J.E. (ed.) (2010). *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Institut d'Estudis Catalans i Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Piñol, J., Avila, A., Escarré, A., Lledó, M.J. i Rodà, F. (1992) Comparison of the hydrological characteristics of three small experimental holm oak forested catchments in NE Spain in relation to larger areas. *Vegetatio*, 99/100: 169-178.
- Piñol, J., Avila, A., i Escarré, A. (1999) Water balance in catchments. In: Rodà, F., Retana, J., Gracia, C. i Bellot, J. (eds.), *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Ecological Studies Vol. 137. Springer-Verlag, Berlin, pp. 273-282.
- Sabaté, S., Sala, A. i Gracia, C.A. (1999). Leaf traits and canopy organisation. In: Rodà, F., Retana, J., Gracia, C. i Bellot, J. (eds.), *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Ecological Studies Vol. 137. Springer-Verlag, Berlin, pp. 121-133
- Sabaté, S., Gracia, C.A. i Sánchez, A. (2002). Likely effects of climate changes on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the mediterranean region. *Forest Ecology and Management*, 162(1): 23-37.

