IV JORNADES SOBRE EL BOSC DE POBLET I LES MUNTANYES DE PRADES

CONEIXEMENTS I EXPERIÈNCIES DAVANT ELS REPTES DEL CANVI CLIMÀTIC

MONESTIR DE POBLET
14 I 15 DE NOVEMBRE

Paratge Natural d'Interès Nacional de Poblet

Generalitat de Catalunya
Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural

30 anys PARATGE NATURAL DE POBLET

Monestir de Poblet

Centre d'Història Natural de la Conca de Barberà

CENTRE D'ESTUDIS DE LA CONCA DE BARBERÀ

BY NC ND

Generalitat de Catalunya
L'Espluga de Francolí, 2015.
"Quartes jornades sobre el bosc de Poblet i les Muntanyes de Prades.
Coneixements i experiències davant els reptes del canvi climàtic". Diversos autors.

Coordinació acadèmica de les Jornades:
• Paratge Natural de Poblet (Anton Vallvey Sanromà)
• Centre d'Història Natural de la Conca de Barberà (Joan Cartanyà)
• Centre d'Estudis de la Conca de Barberà (Josep Maria Grau)
• Monestir de Santa Maria de Poblet (Pare Lluc M. Torcal)

Coordinació tècnica i administrativa de les Jornades:
• Paratge Natural de Poblet (Anton Vallvey, Xavi Buqueras, Montserrat Sancho, Txell Fontova)

Disseny: Aprodisca (e.s.a.l. declarada d'utilitat pública)
Portada: Alex Rull (PXL)

Producció: Paratge Natural d'Interès Nacional de Poblet.
Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural
Maquetació: Aprodisca (e.s.a.l. declarada d'utilitat pública)
Portada: PXL. www.pxl.cat
Enllaç des d'on es pot descarregar: www.gencat.cat/parcs/poblet

Per citar aquesta obra, utilitzeu l'exemple següent:

Marimon, E.. 2014. "Peculiaritats meteorològiques de les Muntanyes de Prades" ". A: Vallvey, A.; Buqueras, X.; Sancho, M., Fontova, M. (Coords.): *"Actes de les quartes jornades sobre el bosc de Poblet i les Muntanyes de Prades. Coneixements i experiències davants els reptes del canvi climàtic".* pp: 39-42. Paratge Natural d'Interès Nacional de Poblet. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya. L'Espluga de Francolí.

D.L. B 4007-2015

Les dades de satèl·lits com a eines de seguiment del desenvolupament i el decaïment forestal

Romà Ogaya, Adrià Barbeta,
Corina Başnou, Josep Peñuelas

Resum

El canvi climàtic està comportant una disminució del creixement dels arbres i un augment de la seva mortalitat en gran part dels boscos d'arreu del món i, en particular, als boscos mediterranis. A l'alzinar de Prades, hem mesurat l'increment de biomassa aèria i la mortalitat dels arbres durant dotze anys, i ho hem relacionat amb dades meteorològiques i amb índexs de reflectància del sensor satel·lital MODIS. La mortalitat i l'increment de biomassa dels arbres estan ben correlacionats amb la precipitació anual i els índexs estandarditzats de precipitació i evaporació (SPEI) de setembre. Estan també ben correlacionats amb diversos índexs de reflectància obtinguts per MODIS com el NDVI i l'EVI. En canvi, altres productes del sistema MODIS com la producció primària bruta (GPP) i la taxa fotosintètica neta, que són productes específicament calculats per estimar la productivitat de la vegetació, han mostrat (com a mínim en aquest bosc mediterrani) una correlació molt baixa amb el creixement real mesurat als arbres.

Introducció

Els ecosistemes forestals distribuïts en zones de clima semiàrid i mediterrani estan estacionalment exposats a condicions de dèficit hídric, i poden ser particularment vulnerables a disminucions fins i tot petites de disponibilitat d'aigua, cosa que pot reduir el creixement dels arbres (Barbeta et al. 2013), i augmentar-ne la defoliació i la mortalitat. Es preveu un increment de les temperatures en les pròximes dècades arreu del món, i una major evapotranspiració induïda per aquest augment de temperatura i una lleugera disminució en les precipitacions està prevista en diverses zones, com la conca mediterrània, sotmesa a períodes estacionals de sequera (IPCC 2013). En aquestes zones mediterrànies, diversos models de circulació general preveuen una disminució aproximada del 15% d'humitat del sòl d'aquí a 50 anys, i una recurrència de períodes extrems de sequera 10 vegades més elevat que durant el segle XX (Bates et al. 2008). A més, a molts llocs s'han observat unes correlacions molt elevades entre dèficits de precipitació i els subseqüents esdeveniments de calor extrem, i també s'espera per a les regions mediterrànies unes majors freqüències d'onades de calor coincidint amb l'eixut de l'estiu, major evapotranspiració i la subseqüent disminució de disponibilitat d'aigua (Fischer and Schar, 2010).

L'alzina (*Quercus ilex* L.) és un arbre àmpliament distribuït a molts boscos d'àrees subhumides de la conca mediterrània, sovint convivint amb espècies arbustives de gran port i menors taxes de creixement però més resistents a la sequera. En unes condicions futures més seques i càlides, cal esperar un increment en la mortalitat i una disminució de la producció de llavors i la supervivència de plàntules d'alzina, fins a tal punt que aquestes altres espècies més resistents a la sequera podrien anar desplaçant l'alzina.

El seguiment dels efectes del canvi climàtic, en concret de la sequera, en el creixement i la mortalitat de la vegetació a diverses regions i al llarg del temps requereix l'ús de tècniques de teledetecció, les quals són àmpliament utilitzades per avaluar l'estructura i el funcionament dels ecosistemes terrestres (Peñuelas i Filella 1998). El *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), l'índex de teledetecció

més utilitzat, ha estat emprat per estimar la fracció de la radiació fotosintèticament activa (FPAR) absorbida per les capçades. L'*Enhanced Vegetation Index* (EVI) ha estat desenvolupat per reduir el soroll produït pel sòl i els aerosols atmosfèrics, i per reduir la saturació del senyal de reflectància a nivells creixents de biomassa verda, que són sovint associats al NDVI. Les dades de teledetecció poden quantificar la variació espacial en l'estructura del bosc i el seu creixement i el volum dels troncs. Ambdós, NDVI i EVI, poden proporcionar unes bones estimacions de la productivitat dels boscos, però també poden proporcionar una estimació pobra quant a l'adquisició de carboni en boscos perennifolis densos com els de la regió mediterrània, perquè aquests índexs són molt insensibles als ràpids canvis d'adquisició de CO_2 causats pel dèficit hídric (Garbulsky et al. 2013).

Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és testar l'ús de diferents productes MODIS com a eines de detecció i seguiment de l'increment de biomassa, el decaïment forestal i la mortalitat d'arbres en un bosc mediterrani típic, i determinar si l'ús de les dades de teledetecció a partir de satèl·lits són bons indicadors de la productivitat i el decaïment forestal.

Metodologia

Zona d'estudi

La zona d'estudi està localitzada a la vall dels Torners, a l'alzinar de Prades (41º 21' N, 1º 2' E), a una altitud entre 750 – 1.050 m (figura 1). El sòl és un Dystric Cambisol sobre esquist paleozoic, amb una profunditat entre 35 - 100 cm. La temperatura mitjana anual és d'11,8º C, i la pluviositat anual de 659 mm (dades des de 1975 fins a 2012). La sequera de l'estiu és pronunciada i dura uns tres mesos. La vegetació és un bosc molt dens (16.616 troncs ha^{-1}) dominat per l'alzina (*Quercus ilex* L.) (8.633 troncs ha^{-1}), el fals aladern (*Phillyrea latifolia* L.) (3.600 troncs ha^{-1}) i l'arboç (*Arbutus unedo* L.) (2.200 troncs ha^{-1}), amb una presència important d'altres espècies perennifòlies ben adaptades a la sequera (*Erica arborea* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Cistus albidus* L., etc.) i ocasionalment altres espècies caducifòlies (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz i *Acer monspessulanum* L.). Vegeu la figura 1.

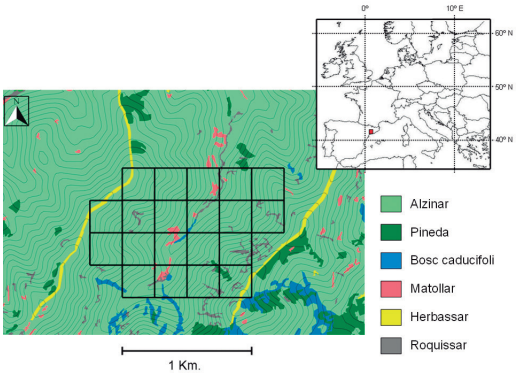

Fig. 1. Mapa de cobertes de vegetació de la zona d'estudi. Els 20 píxels seleccionats per treballar amb els índexs NDVI i EVI estan assenyalats amb el contorn negre. Els altres índexs han estat mesurats en un píxel d'1 x 1 km centrat al mig d'aquests píxels.

Aquest bosc no ha estat pertorbat des de fa 65 anys. L'alçada màxima dels arbres se situa entre 6-10 m. L'increment de biomassa aèria i la taxa de mortalitat d'aquestes espècies ha estat calculada anualment tal com descriu el treball de Barbeta et al. (2013) des de l'any 1999 fins a l'any 2012.

Dades climàtiques

Una estació meteorològica automàtica instal·lada a la zona d'estudi ha recollit les dades de temperatura, humitat i precipitació des de 1998. Les dades anteriors a 1998 han estat estimades a partir d'una altra estació meteorològica instal·lada al monestir de Poblet, 5,6 km al nord-est de la zona d'estudi i a una altitud de 510 m. L'estació de Poblet va recollir dades des de finals de 1974 fins a mitjan 2002; per tant, tenim dades de les dues estacions meteorològiques des d'agost de 1998 fins a juliol de 2002. Les relacions linears entre les temperatures (R^2=0,97) i les pluges (R^2=0,75) de totes dues estacions durant aquest període han servit per estimar el clima de la zona d'estudi des de 1975. Per tant, tenim dades climàtiques contínues des de 1975 fins a 2012.

Defoliació i mortalitat

La defoliació i mortalitat dels arbres ha estat mesurada durant l'any 2011. Arbres dominants d'alzina, fals aladern i arboç (40 de cada espècie) han estat seleccionats aleatòriament a principis de primavera de 2011. La intensitat de la defoliació per herbívors ha estat mesurada a finals de juliol de 2011, a partir dels pecíols romanents de les fulles consumides. La defoliació produïda per la sequera de l'estiu ha estat mesurada, als mateixos arbres, a partir del color marró de les fulles a finals d'octubre de 2011 (figura 2). En ambdós casos, hem determinat visualment el percentatge de fulles consumides o assecades a cada arbre, i després hem calculat el valor mitjà per a les capçades de tots els arbres. S'han establert 11 categories per caracteritzar el percentatge de defoliació a cada arbre: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% i 100% (mortalitat), tal com està descrit a Ogaya i Peñuelas (2004).

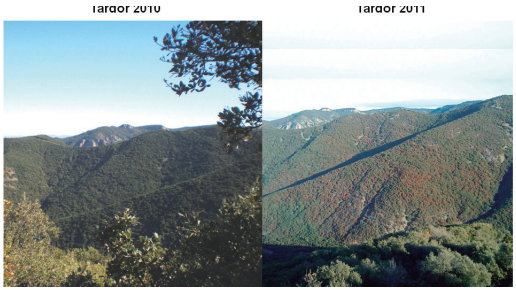

Figura 2. Fotografies que mostren la mortalitat d'arbres que va tenir lloc la tardor de 2011.

Dades de teledetecció

Les dades de teledetecció des de 2000 fins a 2012 han estat obtingudes a partir del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bord dels satèl·lits Terra i Aqua. Hem utilitzat el *Normalized Differen-*

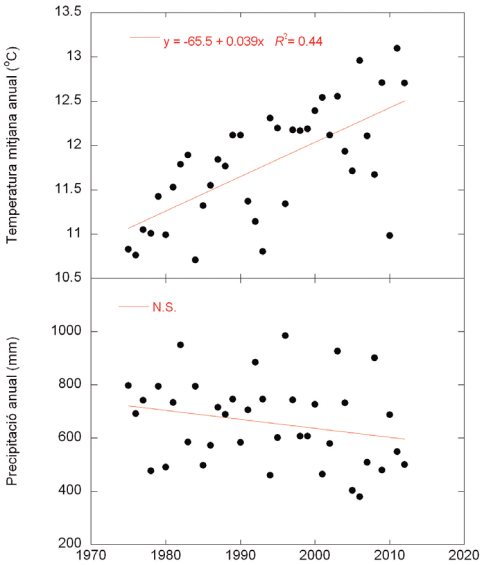

Figura 3. Temperatura mitjana i precipitació anuals a la zona d'estudi. Les línies rectes representen les relacions linears d'increment de temperatures i disminució de les pluges al llarg dels 36 anys de dades meteorològiques. N.S. indica que no hi ha una tendència significativa.

ce Vegetation Index (NDVI) i l'*Enhanced Vegetation Index* (EVI), obtinguts a partir dels productes de 16 dies de Terra (MOD13Q1) i Aqua (MYD13Q1), combinats en sèries de 8 dies i basats en 20 píxels seleccionats de 250 x 250 m. Hem seleccionat els píxels al llarg de la distribució de l'alzinar dins la vall estudiada (figura 1). Després, hem calculat el valor mitjà dels 20 píxels seleccionats per estimar el valor mitjà d'aquests índexs per a l'alzinar sencer.

També hem utilitzat dades de producció primària bruta (GPP) i fotosíntesi neta (PsnNet) obtingudes a partir dels productes de 8 dies de Terra MOD17A2, producció primària neta (NPP) a partir del producte anual de Terra MOD17A3, índex d'àrea foliar (LAI) i FPAR a partir del producte de 8 dies d'Aqua MYD15A2 i el quocient (R_{858}/R_{1240}) entre les reflectàncies a 858 nm (referència) i 1.240 nm (absorció d'aigua) a partir del producte de 8 dies de Terra MOD09A1. Tots els productes de MODIS van des de l'any 2000 fins a l'any 2010 a partir d'un píxel d'1 x 1 km de costat (màxima resolució possible en la majoria de variables estudiades) centrat al mig de l'àrea d'estudi, excepte les dades de NDVI i EVI que corresponen als 20 píxels de 250 m de costat (màxima resolució possible en aquestes dues variables). Els valors mitjans de les dades dels diversos índexs han estat calculats com a integracions anuals cobertes per les dades de NDVI, EVI, GPP, PsnNet, LAI, FPAR i R858/R1240; en canvi, les dades de NPP han estat directament dades anuals.

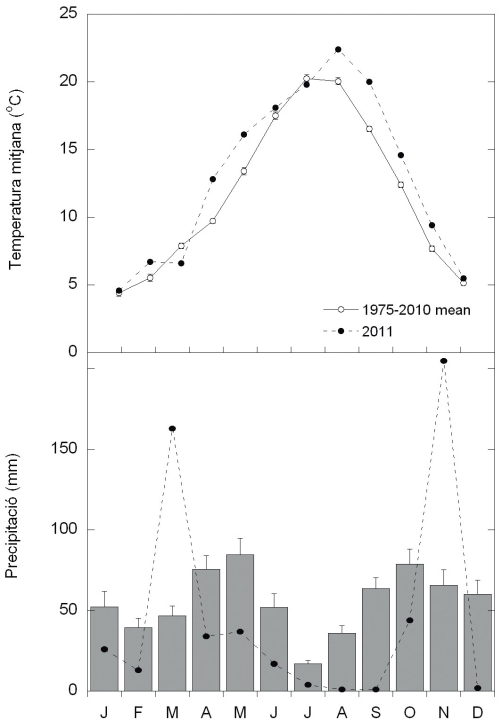

Figura 4. Dades mensuals de temperatura i precipitació durant l'any 2011 (punts negres) comparades amb els valors mitjans durant 1975-2010 (punts blancs i barres grises).

Anàlisis de les dades

Les dades climàtiques (1975-2912) han servit per calcular l'índex estandarditzat de precipitació i evapotranspiració (SPEI) (Vicente-Serrano et al. 2010), un índex basat en la diferència entre precipitació i evapotranspiració potencial. L'evapotranspiració pot ser molt important per determinar la variabilitat en la humitat del sòl, un factor clau en les relacions sòl-planta. Hem seleccionat els índexs SPEI de setembre (perquè han estat els que millor es correlacionaven amb les altres variables) per comparar la sequera de l'estiu de 2011 amb les dels anys anteriors, ja que eren els que millor ho reflectien; hem utilitzat índexs SPEI 3 i SPEI 6 (amb dades de 3 i 6 mesos abans de setembre, respectivament). Per a les altres variables, també hem utilitzat els índexs SPEI 6 i SPEI 12 a l'hora de fer anàlisis estadístiques.

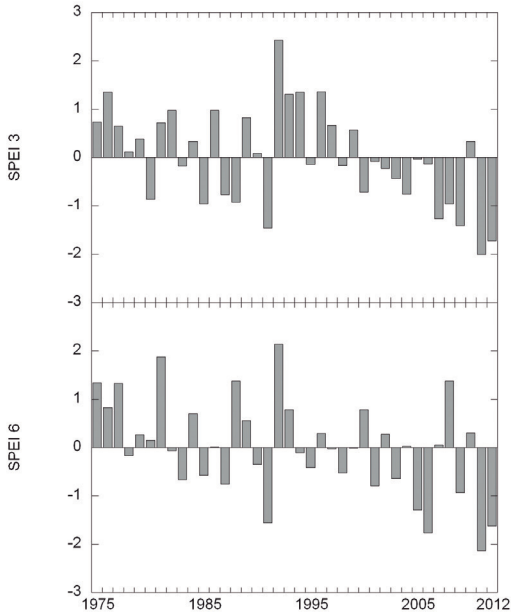

Figura 5. Valors dels índexs SPEI 3 i SPEI 6 de setembre per al període 1975-2012.

Per estudiar les relacions entre la mortalitat i l'increment de biomassa amb els canvis de temperatura, la 1pluja i els índexs SPEI 6 i SPEI 12 durant tot el període estudiat (1975-2012), hem emprat models linears generals. Hem utilitzat uns altres models linears generals per estudiar les relacions entre la taxa de mortalitat i el increment de biomassa amb les dades mitjanes anuals de NDVI, EVI, GPP, PsnNet i NPP. Hem mostrat les regressions linears perquè son les que millor correlacionaven les variables estudiades. Tots els models linears han estat realitzats amb el paquet informàtic Statview (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA).

Dues anàlisis de redundància (RDA) han estat realitzades per estudiar les relacions de les dades físiques i l'increment de biomassa i la taxa de mortalitat. Les variables físiques han estat utilitzades com a *species* (*sensu* Canoco) i han estat centrades i estandarditzades, perquè les dades diferien en la seva escala. La significació del primer eix ha estat testat 499 vegades. Els gràfics mostren els primers dos eixos i han estat obtinguts amb CanoDraw. L'ordinació ha estat realitzada amb Canoco per a Windows 4.5.

Taula 1. Coeficients de determinació (R^2) de les relacions linears entre l'increment de biomassa i la mortalitat amb els valors dels índexs espectrals i de les variables meteorològiques.

	Increment de biomassa	Mortalitat
NDVI	0,64	0,43
EVI	0,55	0,35
GPP	N.S.	N.S.
PsnNet	N.S.	N.S.
Pluja anual	0,53	0,24
Pluja de primavera	0,44	0,31
Pluja de primavera i estiu	0,41	0,34
Temperatura mitjana anual	N.S.	0,33
Temperatura de primavera i tardor	0,16	0,38
Setembre SPEI 6	0,30	0,31
Desembre SPEI 12	0,45	0,27

Resultats i discussió

Dades climàtiques, creixement i mortalitat

La temperatura mitjana anual ha variat entre 10,7° C l'any 1984 i 13,1° C l'any 2011, i el total de pluja anual entre 376 mm l'any 2006 i 984 mm l'any 1996 (figura 3). Durant aquest període (1975-2012), la temperatura mitjana anual ha augmentat 1,5°

C (R^2=0,42, P<0,001) (figura 3). Aquest increment ha estat produït pel fort increment de 2,9º C a la primavera i de 2,2º C a l'estiu (R^2=0,58, P<0,001; i R^2=0,40, P<0,001, respectivament), mentre que les temperatures de tardor i hivern no han variat significativament. La precipitació anual ha estat molt variable i solament hem detectat una lleugera disminució no significativa des de 1975 fins a 2012 (figura 4). Els índexs SPEI calculats al setembre solien ser negatius durant els darrers anys, amb un decreixement clar i continu d'ambdós índexs SPEI 3 i SPEI 6 des de 1990 (figura 5). Ambdós índexs de setembre SPEI 3 i SPEI 6 van assolir els valors més baixos l'any 2011, quan les elevades temperatures van coincidir amb el màxim nombre de dies sense pluja (133 dies amb una precipitació per sota dels 10 mm) durant tot el període mostrejat. Va ser aleshores que va ocórrer l'esdeveniment més important de mortalitat d'arbres.

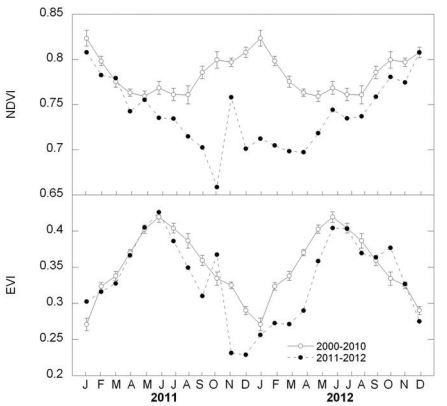

Figura 6. Valors mensuals dels índexs NDVI i EVI els anys 2011 i 2012 (punts negres), comparats amb els valors mitjans del període 2000-2010 (punts blancs).

Les condicions de sequera han comportat una disminució de l'increment de biomassa i un augment de la mortalitat dels troncs (Barbeta et al. 2013). L'increment constant de les temperatures de primavera i estiu ha comportat un augment del dèficit de pressió de vapor, i per això els índexs SPEI 3 i SPEI 6 de setembre han anat disminuint els darrers anys, especialment al setembre de 2011. La demanda atmosfèrica d'humitat és el primer mecanisme pel qual les elevades temperatures influeixen en la sensibilitat a la sequera dels arbres (Liu et al. 2013), i això és consistent amb la nostra correlació negativa entre la temperatura mitjana anual i l'increment de biomassa, i amb la nostra correlació positiva entre la temperatura mitjana anual i les taxes de mortalitat dels troncs (taula 1). Com calia esperar, elevades precipitacions han comportat majors increments de biomassa i menors mortalitats (taula 1), excepte la pluja de l'estiu, però cal considerar-ho lligat a altres circumstàncies que afecten més el creixement dels arbres com la pluja anual o els índexs SPEI, ja que la pluja a l'estiu sempre ha estat molt baixa.

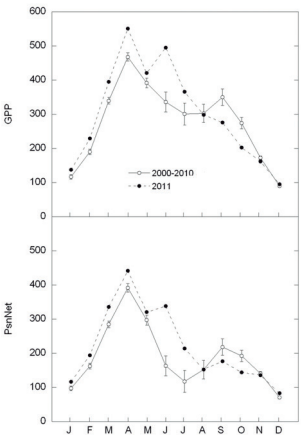

Figura 7. Valors mensuals dels índexs GPP i PsnNet l'any 2011 (punts negres) comparats amb els del període 2000-2010 (punts blancs).

La mortalitat de la tardor de 2011 ha coincidit amb una infestació prèvia molt forta d'erugues de l'arna *Catocala nymphagoga* (Esp.) a finals de la primavera de 2011 que ha consumit una proporció molt elevada de les fulles brotades recentment. Després de sequeres extremes recents a Catalunya (particularment la de 1994, on en alguns boscos fins al 80% dels individus d'alzina van perdre totes les fulles), un alt percentatge d'alzines van rebrotar des de la base del tronc i de dalt les branques (Espelta et al. 1999). El percentatge de rebrotada després de la tardor de 2011 en el bosc estudiat ha estat negligible. El deteriorament de les capçades just després de la tardor de 2011 ha estat clarament associat a una disminució de les reserves de carboni de les alzines, i els arbres defoliats generalment tenen emmagatzemats menys carbohidrats no estructurals que els arbres sans (Rosas et al. 2013). Per totes aquestes raons, l'esgotament de reserves de carboni induït per un augment continu de la temperatura durant els períodes de sequera sembla ser un factor clau per al decaïment forestal a la nostra zona d'estudi.

Defoliació

L'alzina ha estat l'única espècie que va patir defoliació per erugues de l'arna *C. nymphagoga* a finals de la primavera de 2011, les quals van consumir el 15% de les fulles de les capçades d'alzina, totes recentment brotades un o dos mesos abans. A finals d'octubre de 2011, just després d'un llarg període sec i calorós, les alzines van perdre un altre 14% addicional de les fulles, aquest cop a causa de la sequera, i alguns arbres van acabar totalment defoliats. En total, les alzines van perdre un 29% de les seves fulles per l'efecte sumat de l'herbivorisme i la sequera. Les altres espècies dominants van patir una defoliació menor, i només causada per la sequera: els arboços van perdre aproximadament el 6% de les fulles, i els falsos aladerns només un 1%.

Dades de teledetecció

Els valors de NDVI han mostrat un patró anual amb valors elevats a principis d'hivern, una disminució durant la primavera, uns valors mínims a finals de primavera i principis d'estiu i un augment durant la tardor (figura 6). En canvi, les dades d'EVI han mostrat un patró anual invers, amb valors màxims a finals de primavera i principis d'estiu, i valors mínims a principis d'hivern (figura 6).

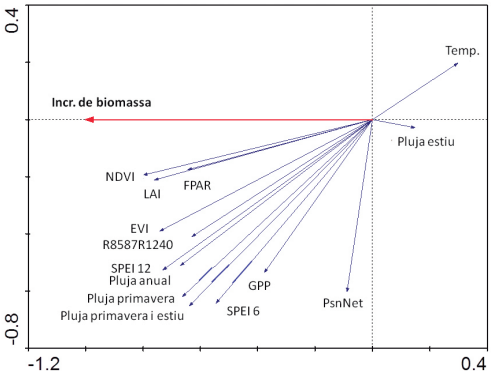

Figura 8. RDA que representa les relacions entre les dades físiques i l'increment de la biomassa.

El màxim valor mitjà anual de NDVI (0,80) ha estat el de 2003, i el més elevat d'EVI el de 2008 (0,38), coincidint amb les precipitacions anuals més elevades (926 mm l'any 2003 i 837 mm l'any 2008). Els mínims valors mitjans anuals de NDVI i EVI (0,74 i 0,33, respectivament) han estat els de 2011, l'any en què ha tingut lloc l'esdeveniment de mortalitat d'arbres. Les dades de NDVI s'han mantingut baixes a

finals de 2011 i començaments de 2012, sense mostrar el típic patró d'augment de valors a l'hivern. Solament han començat a augmentar lleugerament a la primavera de 2012 i no s'han assolits valors normals fins a finals de 2012 (figura 6). Els valors d'EVI han estat anormalment baixos a finals de 2011 i començaments de 2012, però a la primavera de 2012 ja s'han assolit valors normals d'EVI (figura 6). Les dades mitjanes anuals de NDVI i EVI s'han correlacionat molt bé amb les d'increment de biomassa aèria (taula 1), tal com s'ha descrit en altres treballs (Garbulsky et al. 2013). Malgrat la seva variabilitat estacional, els valors més baixos de NDVI i EVI s'han assolit a finals de la tardor de 2011 (quan va tenir lloc la mortalitat d'arbres) i no han recobrat valors normals fins a la primavera de 2012 (just després de la brotada de noves fulles), cosa que demostra una altra vegada que els índexs NDVI i EVI són bons indicadors de l'estat de les capçades i el decaïment forestal.

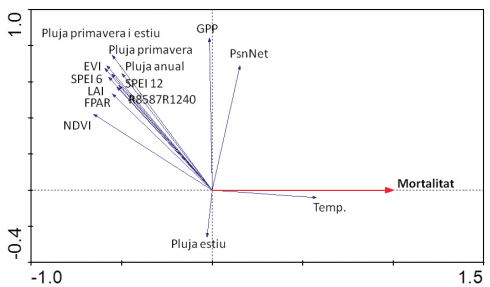

Figura 9. RDA que representa les relacions entre les dades físiques i la mortalitat d'arbres.

Les dades de GPP i PsnNet tenen un patró anual diferent, amb valors baixos a l'hivern, màxims a la primavera, un petit decreixement a l'estiu, un petit creixement a la tardor (sense assolir els valors de primavera) i una disminució a finals de tardor i a l'hivern (figura 7). Els valors de GPP i PsnNet l'any 2011 van ser superiors als valors mitjans durant el període 2000-2010, excepte durant la sequera extrema de setembre i octubre, però els valors normals de GPP i PsnNet van recuperar-se a finals de tardor (figura 7). Contràriament al cas de NDVI i EVI, els valors de GPP i PsnNet han estat molt poc correlacionats amb els d'increment de biomassa aèria o taxes de mortalitat dels arbres (taula 1), i tampoc no han mostrat una disminució significativa durant el període de mortalitat d'arbres i els mesos subsegüents (figura 7). Aquest resultat ha estat inesperat, ja que aquests algoritmes (GPP i PsnNet) han estat específicament dissenyats per estimar directament la productivitat dels ecosistemes, tot i que força altres treballs han descrit resultats similars.

L'eix canònic (RDA eix 1) ens ha explicat el 46,4% de la variància total de l'anàlisi d'increment de biomassa, i el model ha estat significatiu (*P*=0,01) (figura 8). L'eix canònic (RDA eix 1) ens ha explicat el 25,1% de la variància total de l'anàlisi de les taxes de mortalitat d'arbres, i el model ha estat significatiu (*P*=0,01) (figura 9). Tal com mostren les figures 8 i 9, un grup de variables (NDVI, EVI, LAI, FPAR, R_{850}/R_{1240}, la pluja anual, la de primavera i la suma de les pluges de primavera i estiu, i els índexs SPEI 6 de setembre i SPEI 12 de desembre) han estat molt correlacionades amb els increments de biomassa aèria i les taxes de mortalitat d'arbres. En canvi, altres variables (GPP, PsnNet i pluja d'estiu) no han estat clarament correlacionades amb l'increment de biomassa o les taxes de mortalitat. La temperatura mitjana anual ha estat negativament correlacionada amb l'increment de biomassa i positivament

correlacionada amb les taxes de mortalitat (figures 8 i 9).

Aquests resultats posen de manifest les possibilitats d'utilitzar la gran varietat d'índexs del sistema MODIS per determinar l'activitat de les plantes i la producció dels ecosistemes (Peñuelas i Filella 1998). En el nostre bosc estudiat, la correlació entre el quocient R_{850}/R_{1240} i l'increment de biomassa i la relació negativa amb les taxes de mortalitat deriven de la importància de la disponibilitat d'aigua sobre el creixement dels arbres en aquest ecosistema mediterrani. Altres índexs com el LAI o FPAR també han estat positivament correlacionats amb l'increment de biomassa i negativament correlacionats amb la mortalitat perquè depenen del total de fulles que hi ha a les capçades, i una disminució de la quantitat de fulles a les capçades d'alzina ha estat observada en aquest mateix bosc sota condicions de sequera (Ogaya i Peñuelas 2006). Pel que fa a les altres variables, els resultats d'aquestes anàlisis de redundància són plenament coincidents amb els dels models linears, i reforcen els arguments que mostraven que un augment de la temperatura disminueix l'increment de biomassa i augmenta la mortalitat dels arbres; que la pluja fa augmentar l'increment de biomassa i disminuir la mortalitat, i que els índexs NDVI i EVI són bons estimadors de l'increment de biomassa i la mortalitat, i en canvi els índexs GPP i PsnNet no guarden una relació clara amb el creixement i supervivència de les alzines.

Conclusions

En el bosc estudiat, la disponibilitat d'aigua és el factor climàtic més limitant pel que fa al creixement dels arbres, tot i que un increment de temperatura agreuja les conseqüències de la sequera. És per això que els índexs com el SPEI, que tenen en compte tant la precipitació com l'evapotranspiració produïda per les elevades temperatures, són uns bons estimadors del creixement dels arbres i la seva mortalitat.

Tanmateix, aquests resultats posen de manifest que un futur increment de temperatures comportarà una disminució del creixement i un augment de la mortalitat dels arbres, i probablement una progressiva substitució de l'alzina (actual espècie dominant d'aquest bosc) per altres espècies (generalment arbustives de port elevat) més resistents a la sequera.

Els productes de MODIS calculats específicament per estimar la productivitat de la vegetació: producció primària bruta (GPP) i taxa fotosintètica neta, estan molt poc correlacionats amb el creixement real dels arbres del bosc mediterrani estudiat. En canvi, altres productes com NDVI i EVI han mostrat ser uns bons estimadors del creixement i el decaïment d'aquest alzinar.

Bibliografia

Barbeta, A., Ogaya, R., Peñuelas, J. (2013) *Dampening effects of long-term experimental drought on growth and mortality rates of a Holm oak forest*. Global Change Biol. 19: 3133-3144.

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J. P. (2008) *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 210.

Espelta, J. M., Sabaté, S., Retana, J. (1999) "Resprouting dynamics". In: Rodà, F., Retana, J., Gracia, C., Bellot, J. (eds) *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer, Berlin, pp. 61-73.

Fischer, E. M., Schar, C. (2010) "Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves". Nature Geosc 3: 398-403.

Garbulsky, M., Peñuelas, J., Ogaya, R., Filella (2013) "Leaf and stand-level carbon uptake of a Mediterranean estimated using the satellite-derived reflectance indices EVI and PRI". Int. J Remote Sens 34:1282-1296.

IPCC (2013) *Climate change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 986.

Ogaya, R., Peñuelas, J. (2004) "Phenological patterns of *Quercus ilex*, *Phyllirea latifolia*, and *Arbutus unedo* growing under a field experimental drought". Écoscience 11: 263-270.

Ogaya, R., Peñuelas, J. (2006) "Contrasting foliar responses to drought in *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia"*. Biol. Plantarum 50: 373-382.

Peñuelas, J., Filella, I. (1998) "Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status". Trends Plant Sci 3: 151-156.

Rosas, T., Galiano, L., Ogaya, R., Peñuelas, J., Martínez-Vilalta, J. (2013) "Non-structural carbohydrates in three Mediterranean woody species are unaffected by long-term experimental drought". Front. Plant Sci. 4: 400. Doi:10.3389/fpls.2013.00400.

Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S., López-Moreno, J. I. (2010) "A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index". J Climate 23: 1696-1718.