

Efectes de l'estassada en un alzinar amb baixa disponibilitat d'aigua

Romà Ogaya^{1, 2}

Anna Escolà^{1, 2}

Daijun Liu^{1, 2}

Adrià Barbeta^{1, 2, 3}

Josep Peñuelas^{1, 2}

¹CREAF, 08193, Cerdanyola del Vallès, Barcelona.

²CSIC, Unitat d'Ecologia Global CREA-CEAB-CSIC, UAB, 08193, Cerdanyola del Vallès, Barcelona.

³INRA, UMR ISPA, F-33140, Villenave d'Ornon, França.

Resum

En un alzinar natural s'ha realitzat una estassada selectiva per a estudiar-ne l'ús com a eina per a reduir la mortalitat d'arbres, l'augment de la productivitat forestal i invertir la regressió recent que està patint l'espècie dominant (l'alzina, *Quercus ilex*) degut al canvi climàtic. Durant els 4 anys estudiats, l'estassada ha comportat un augment de la productivitat i una disminució de la mortalitat de troncs en aquest alzinar, la qual cosa ha contribuït al manteniment del funcionament de l'ecosistema sota les condicions climàtiques canviants. El *Q. ilex* ha estat l'única espècie que ha experimentat un creixement més gran dels troncs, independentment de la seva mida, i una disminució de la mortalitat degut a l'estassada selectiva. En canvi, el creixement i la mortalitat de troncs no ha variat significativament en les altres espècies arbustives, més resistents a la sequera que el *Q. ilex*. Els nostres resultats posen de manifest la utilitat de l'estassada selectiva com a eina per a augmentar la productivitat forestal i contribuir a la conservació d'aquest bosc mediterrani. Altres beneficis de l'aclarida selectiva, com la disminució del risc d'incendi forestal i l'increment de la disponibilitat d'aigua per a la població, també han estat discutits en aquest treball.

Introducció

La temperatura de l'aire ha augmentat arreu del món i està previst que continuï augmentant durant les properes dècades. Unes taxes d'evaporació més elevades degudes a un increment de la temperatura, junt amb un augment en la freqüència

d'episodis de sequera extrema, estan previstes per a la conca mediterrània, la qual ja està actualment sotmesa a episodis de sequera (IPCC, 2013). Un augment de la temperatura i de la sequera pot comportar importants canvis en la funció dels boscos com a embornals de carboni (Reichstein *et al.*, 2013). A més, una forta relació entre dèficit de precipitació i episodis de sequera extrema han estat observats arreu del món, i per les regions mediterrànies s'espera un increment en la freqüència d'onades de calor coincidint amb l'estiu, que comportaran una evapotranspiració més elevada i, per tant, una disponibilitat d'aigua cada cop més baixa (Fischer i Schar, 2010). Diversos ecosistemes forestals semiàrids i mediterranis estan estacionalment exposats a la sequera i poden ser particularment vulnerables fins i tot a petits increments de dèficit hídric, cosa que pot reduir el creixement (Ogaya i Peñuelas, 2007; Barbeta *et al.*, 2013) i incrementar la mortalitat dels arbres (Williams *et al.*, 2013).

Els ecosistemes forestals contenen grans estocs de carboni (C) i representen un important embornal potencial de C (Pan *et al.*, 2011). Els ecosistemes forestals poden esmortir el canvi climàtic segrestant C. Per tant, cal avaluar els efectes de la gestió forestal sobre la seva funció com a embornals de C. L'estassada selectiva és una pràctica comuna per millorar la salut dels boscos, la seva productivitat i accelerar la successió forestal. Els arbres romanents després de l'aclarida generalment reben més radiació solar, humitat del terra, matèria orgànica i nutrients del sòl, que n'augmenten la capacitat fotosintètica (Chang *et al.*, 2016). L'estassada selectiva és una gestió estratègica comuna a zones mediterrànies per a incrementar el creixement dels arbres i la productivitat forestal, però l'estassada pot,

a més, incrementar la capacitat dels arbres mediterranis de tolerar condicions de sequera i reduir la densitat de troncs amb el conseqüent increment de disponibilitat d'aigua per tronc (Chang *et al.*, 2016). Diversos boscos mediterranis són boscos menuts amb una elevada densitat de troncs degut a gestions ancestrals adreçades a obtenir fusta i carbó, seguit d'un elevat nombre de rebrots per tronc tallat.

L'alzina (*Quercus ilex* L.) és una espècie d'arbre dominant molt abundant en boscos subhumits de la conca mediterrània. Vàries espècies de port arbustiu alt, amb menys taxes de creixement, però més resistents a la sequera que l'alzina, també estan presents en aquests boscos (Ogaya i Peñuelas, 2007). Una mortalitat més gran d'arbres, junt amb menys germinació de llavors i una supervivència de les plàntules més baixa en *Q. ilex*, pot comportar una disminució progressiva d'aquesta espècie dominant en favor d'altres espècies associades a aquest bosc, que són més resistents a condicions de dèficit de disponibilitat d'aigua (Barbeta *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015). En una estassada convencional, tots els troncs petits són tallats i només romanen els troncs més grans, de manera que sovint pràcticament tots els troncs romanents són de *Q. ilex*, en canvi tots els troncs d'altres espècies de menor mida són pràcticament eliminats. Així doncs, una estassada convencional confereix un avantatge addicional per a *Q. ilex*, més enllà de la disminució de la densitat de troncs.

El principal objectiu d'aquest treball és estudiar l'ús de l'estassada selectiva com a eina per a compensar el decaïment forestal i la mortalitat d'arbres en un bosc mediterrani i investigar la interacció entre els factors que contribueixen al canvi climàtic i les pràctiques recents de gestió forestal

(Doblas-Miranda *et al.*, 2015). També hem comparat les respostes de *Q. ilex* i les altres espècies coexistents (més resistents a condicions de sequera) a l'aclarida selectiva experimental. Hem estudiat aquestes respostes en diverses espècies tallant els troncs més petits de cada individu, de manera que els troncs més grans de totes les espècies han romàs després de l'estassada selectiva.

Material i mètodes

Zona d'estudi

La zona d'estudi està situada en un vessant sud (25% de pendent) de les muntanyes de Prades (41°21' N, 1°2' E), a una altitud de 950 m. El sòl és un *Dystric Cambisol* sobre esquist paleozoic, la seva profunditat varia entre 35 i 100 cm. La temperatura mitjana anual és de 12,3 °C, i la pluja anual és de 603 mm (dades del període 1998-2015). El període eixut durant l'estiu és pronunciat i dura uns tres mesos. La vegetació és un bosc molt dens (16.616 troncs ha⁻¹) dominat per *Q. ilex* (8.633 troncs ha⁻¹), *Phillyrea latifolia* L. (3.600 troncs ha⁻¹) i *Arbutus unedo* L. (2.200 troncs ha⁻¹), amb una abundància d'altres espècies ben adaptades a la sequera i, ocasionalment, espècies de fulla caduca. Aquest bosc no ha estat pertorbat durant els darrers 80 anys i l'alçària màxima dels arbres dominants és d'uns 6-10 m. Una estació meteorològica automàtica instal·lada a la zona d'estudi ha registrat la temperatura de l'aire, la humitat i la pluja des de finals del 1998.

Disseny experimental i creixement dels arbres

Tres parcel·les de 15 × 10 m han estat delimitades a la mateixa altitud al llarg del vessant, en les quals es va realitzar l'estassada a finals del 2011 i es va extreure un 20% de l'àrea basal (BA) (taula 1). Unes altres quatre parcel·les de 15 × 10 m utilit-

Parcel·la	Espècie	BA abans estassada (m ² ha ⁻¹)	BA després estassada (m ² ha ⁻¹)	BA eliminada (%)
1	<i>Q. ilex</i>	43.57	38.41	11.84
	<i>P. latifolia</i>	2.64	1.10	58.39
	<i>A. unedo</i>	10.06	5.80	42.37
	Totes	56.27	45.31	19.48
2	<i>Q. ilex</i>	29.31	24.59	16.09
	<i>P. latifolia</i>	2.57	1.77	31.04
	<i>A. unedo</i>	9.75	6.43	34.02
	Totes	41.83	33.00	21.11
3	<i>Q. ilex</i>	42.14	33.86	19.64
	<i>P. latifolia</i>	4.94	1.45	70.53
	<i>A. unedo</i>	5.15	3.59	30.36
	Totes	53.71	39.53	26.39

Taula 1. Àrea basal (BA) de les espècies dominants a cada parcel·la aclarida immediatament abans i després de l'estassada.

zades en un altre experiment situades a la mateixa zona no han estat estassades i han estat considerades parcel·les de control (Liu *et al.*, 2015).

El diàmetre dels troncs ha estat mesurat els hiverns del 2012 i del 2016 a totes les parcel·les (estassades i de control), i també a finals de tardor del 2011 a les parcel·les estassades (just abans de l'estassada) per tal de calcular-ne el percentatge de BA eliminat. El diàmetre dels troncs ha estat calculat segons el perímetre mesurat a 50 cm d'alçària amb una cinta mètrica, a tots els troncs de qualsevol espècie més grans de 2 cm de diàmetre. La BA ha estat calculada a cada tronc d'acord amb el seu perí-

metre a 50 cm d'alçària, assumint que la secció del tronc equival a una circumferència. La mida dels troncs ha estat classificada en tres categories: troncs petits (2-6 cm de diàmetre), troncs mitjans (6-10 cm de diàmetre) i troncs grans (>10 cm de diàmetre). La taxa de mortalitat anual (*m*) ha estat calculada tal com es descriu a Sheil *et al.* (1995): $m = 1 - (1 - (No - Nt) / No) / t$, on «No» és el nombre de troncs a l'inici de l'experiment, «Nt» és el nombre de troncs al final de l'experiment i «t» és el nombre d'anys transcorreguts durant l'experiment.

La biomassa aèria ha estat estimada d'acord amb equacions al·lomètriques entre la biomassa aèria (AB) i el diàmetre del tronc mesurat a 50 cm d'alçària (D50). Arbres de *Q. ilex* i *P. latifolia* han estat tallats fora de les parcel·les per a mesurar-ne el diàmetre a 50 cm d'alçada i pesar-ne tota la biomassa aèria després d'assecar-la en una estufa a 105 °C fins a assolir-ne un pes constant. La biomassa aèria de *Q. ilex* i *P. latifolia* a cada parcel·la ha estat estimada a partir de les següents equacions al·lomètriques: $\ln AB = 4,9 + 2,3 \ln D50$, $R^2 = 0,98$, $n = 12$, $P < 0,001$ per a *Q. ilex* i $\ln AB = 4,3 + 2,5 \ln D50$, $R^2 = 0,97$, $n = 13$, $P < 0,001$ per a *P. latifolia*. La biomassa aèria d'*A. unedo* a cada parcel·la ha estat estimada a partir d'una equació al·lomètrica calculada prèviament a la mateixa zona d'estudi per Lleó (1990): $\ln AB = 3,8 + 2,6 \ln D50$, $R^2 = 0,99$, $n = 10$, $P < 0,001$. Per a les altres espècies, l'AB ha estat estimada segons les equacions al·lomètriques de *Q. ilex* per a les altres espècies arbòries, i a partir de les equacions al·lomètriques de *P. latifolia* per a les altres espècies arbustives.

Dades d'índex d'àrea foliar

La biomassa de les fulles també ha estat

Parcel·la	Espècie	LAI abans estassada (m ² de fulles per m ² de superfície de parcel·la)	LAI després estassada (m ² de fulles per m ² de superfície de parcel·la)	LAI eliminat (%)
1	<i>Q. ilex</i>	4.52	3.86	14.54
	<i>P. latifolia</i>	0.16	0.07	59.49
	<i>A. unedo</i>	0.77	0.44	43.25
	Totes	5.45	4.36	19.95
2	<i>Q. ilex</i>	3.13	2.52	19.49
	<i>P. latifolia</i>	0.18	0.13	28.74
	<i>A. unedo</i>	0.75	0.48	36.55
	Totes	4.07	3.14	22.98
3	<i>Q. ilex</i>	4.69	3.54	24.54
	<i>P. latifolia</i>	0.44	0.10	77.54
	<i>A. unedo</i>	0.39	0.30	29.22
	Totes	5.64	3.97	29.61

Taula 2. Índex d'àrea foliar (LAI) de les espècies dominants a cada parcel·la aclarida immediatament abans i després de l'estassada.

estimada segons equacions al·lomètriques entre la biomassa foliar a cada arbre (BL) i el seu diàmetre a una alçària de 50 cm (D50), mesurades en arbres de *Q. ilex* i *P. latifolia* fora de les parcel·les en els quals, a part de mesurar el perímetre a 50 cm, també s'ha mesurat la biomassa de totes les fulles després d'assecar-les en una estufa a 105 °C fins a assolir un pes constant. La biomassa de les fulles de *Q. ilex* i *P. latifolia* han estat estimades segons les següents equacions al·lomètriques: $\ln BL = 3,5 + 1,7 \ln D50$, $R^2 = 0,91$, $n = 12$, $P < 0,001$ per a *Q. ilex* i $\ln BL = 1,4 + 2,4 \ln D50$, $R^2 = 0,81$, $n = 13$, $P < 0,001$ per a *P. latifolia*. La biomassa de les fulles d'*A. unedo* ha estat estimada segons una equació al·lomètrica calculada prèviament a la mateixa zona d'estudi per Lledó (1990): $\ln BL = 1,9 + 2,2 \ln D50$, $R^2 = 0,95$, $n = 10$, $P < 0,001$. Per les altres espècies, la biomassa foliar ha estat estimada segons les equacions al·lomètriques de *Q. ilex* per a les altres espècies arbòries, i segons les equacions al·lomètriques de *P. latifolia* per

a les altres espècies arbustives.

La superfície de totes les fulles ha estat estimada assumint una relació entre la massa i l'àrea foliar de 20 mg cm⁻² per a *Q. ilex* i de 15 mg cm⁻² per a *P. latifolia* i totes les altres espècies, tal com ha estat observat en un altre estudi realitzat a la mateixa zona (Ogaya i Peñuelas, 2006). L'índex d'àrea foliar (LAI) ha estat calculat d'acord amb la biomassa de les fulles i de la seva superfície, per a cada espècie (*Q. ilex*, *P. latifolia* i *A. unedo*), i un LAI total per a cada parcel·la (taula 2).

Anàlisi de les dades

L'efecte de l'estassada en l'increment de BA durant tot el període estudiat (2012-2015) ha estat testat amb un model lineal

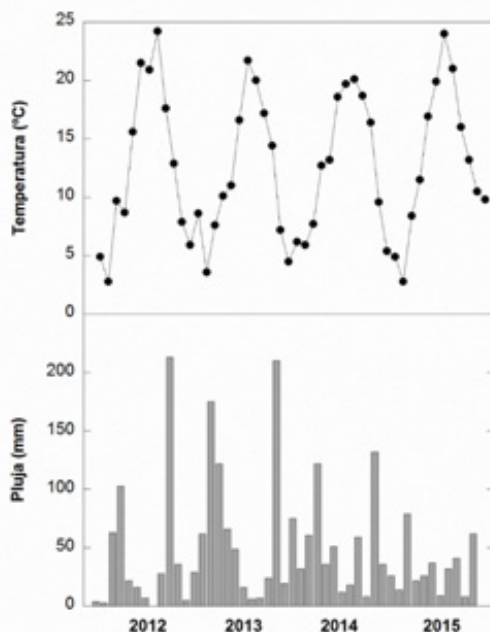


Figura 1. Temperatura mitjana anual i pluja anual de la zona d'estudi durant tot el període estudiat.

general, amb el tractament d'estassada, la categoria de mida de tronc i l'espècie com a factors independents, i amb el percentatge d'increment de BA a cada parcel·la com a variable dependent. Tests *post hoc* han servit per comparar els efectes de l'estassada en els increments de BA per a cada espècie i categoria de mida de tronc. Anàlisis de variança (ANOVA) han estat realitzats per testar l'efecte de l'estassada en la mortalitat dels troncs i l'increment de biomassa aèria, amb el tractament d'estassada i l'espècie com a factors independents, i la taxa de mortalitat anual i el percentatge d'increment de biomassa aèria com a variables dependents. Les dades d'increment de BA i biomassa aèria (p) i la taxa de mortalitat anual (m) han estat transformades: arcsin (p)1/2 i arcsin (m)1/2 per tal d'assolir les assumpcions d'una distribució normal. Finalment, un altre ANOVA ha estat realitzat amb les dades de LAI per parcel·la com a variable dependent, i l'espècie i el tractament d'estassada com a factors independents. Totes les anàlisis han estat realitzades amb el paquet estadístic Statistica10 (StatSoft Inc., Palo Alto, CA, EUA).

Resultats

Dades climàtiques

En general, les condicions climàtiques durant el període estudiat (2012-2015) han estat les típiques de zones mediterrànies, amb estius secs i càlids i hiverns moderadament freds. L'any 2015 va ser especialment sec i calorós (13,3 °C de temperatura mitjana i 355 mm de pluja anuals), l'any 2013 especialment plujós i fred (11,9 °C de temperatura mitjana i 783 mm de pluja anuals), i les condicions durant els anys 2012 i 2014 van ser més semblants a les habituals

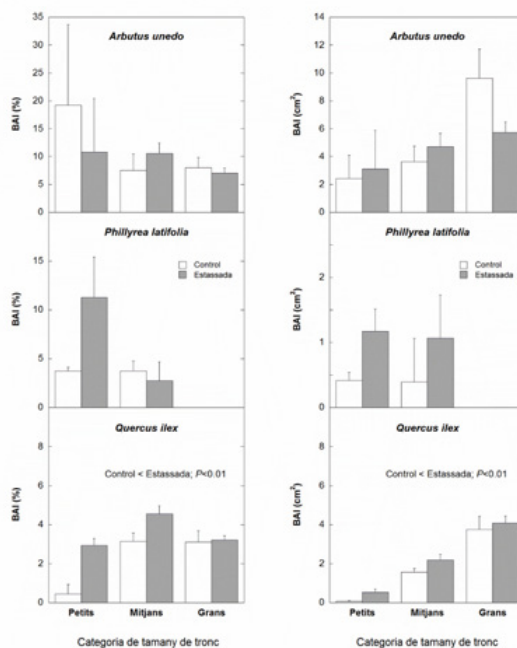


Figura 2. Increment d'àrea basal (BAI) a les parcel·les aclarides i de control (3 i 4 parcel·les, respectivament) per a cada espècie i categoria de mida de tronc, durant tot el període estudiat. Les barres d'error corresponen a l'error estàndard de la mitjana.

en aquesta zona (fig. 1).

Àrea basal i mortalitat

L'estassada ha fet augmentar significativament l'increment de BA en *Q. ilex* ($P < 0,01$). En canvi, no ha fet augmentar significativament l'increment de BA en *A. unedo* i només ha comportat un augment de l'increment de BA en els troncs més petits de *P. latifolia* ($P = 0,09$) (fig. 2). El BA ha augmentat més en els troncs més petits d'*A. unedo* i *P. latifolia*, però ha augmentat més en els arbres mitjans i grans de *Q. ilex*. El BA ha augmentat més en *A. unedo* que en les altres dues espècies, però l'estassa-

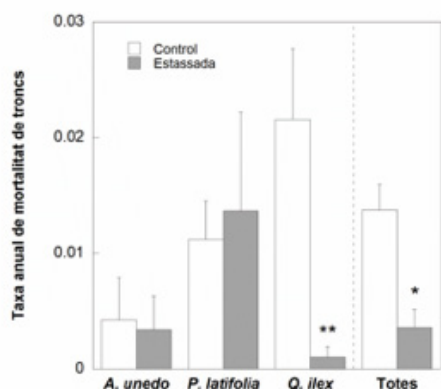


Figura 3. Taxes anuals de mortalitat de tronc a les parcel·les aclarides i de control (3 i 4 parcel·les, respectivament) per a cada espècie. Les barres d'error corresponen a l'error estàndard de la mitja. *, $P < 0,05$; **, $P < 0,01$.

da experimental no ha fet augmentar l'increment de BA d'aquesta espècie en cap categoria de mida de tronc. L'increment de BA ha estat més elevat en *P. latifolia* que en *Q. ilex* en els tronc més petits (que també han experimentat un gran creixement degut a l'estassada), en canvi el creixement de tronc mitjans va ser similar en *P. latifolia* i *Q. ilex*, però només en *Q. ilex* hi ha un augment del creixement degut a l'estassada experimental.

La taxa anual de mortalitat de tronc ha estat més elevada en *Q. ilex* que en *P. latifolia*, i en *P. latifolia* que en *A. unedo* a les parcel·les de control, però l'estassada ha reduït dràsticament la mortalitat en *Q. ilex*, mentre que en les altres dues espècies no hi ha hagut una reducció significativa de la mortalitat de tronc, de manera que a les parcel·les estassades, la mortalitat de tronc en *Q. ilex* ha estat fins i tot inferior a la de les altres dues espècies (fig. 3). L'estassada també ha comportat una reducció

de la mortalitat de tronc quan analitzem totes les espècies alhora.

Biomassa aèria i índex d'àrea foliar

La biomassa aèria ha augmentat més a les parcel·les estassades que a les de control ($P=0,02$) (fig. 4), i a les parcel·les de control, el percentatge d'increment de biomassa aèria ha estat més elevat en *A. unedo* que en les altres dues espècies. Tanmateix, a les parcel·les estassades, el percentatge d'increment de biomassa aèria és semblant en *A. unedo* i *P. latifolia*, i la diferència entre *A. unedo* i *Q. ilex* ha estat més petita que a

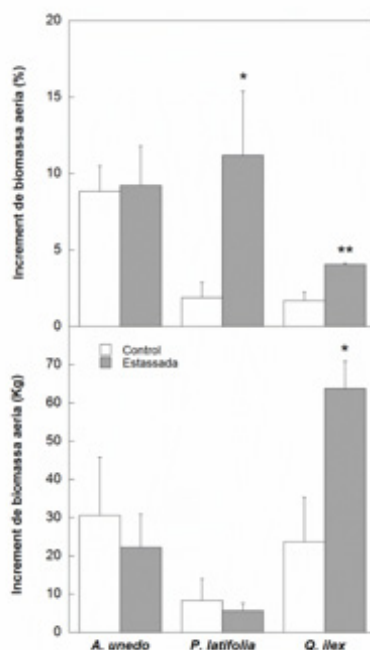


Figura 4. Increments de biomassa aèria (en percentatge i valors absoluts) a les parcel·les aclarides i de control (3 i 4 parcel·les, respectivament) per a cada espècie, durant tot el període estudiat. Les barres d'error corresponen a l'error estàndard de la mitjana. *, $P < 0,05$; **, $P < 0,01$.

les parcel·les de control, ja que l'estassada ha fet incrementar l'augment de biomassa en *Q. ilex* ($P<0,01$) i *P. latifolia* ($P<0,05$), però no en *A. unedo* (fig. 4). En valors absoluts, l'estassada ha duplicat l'augment de biomassa aèria en *Q. ilex*, mentre que no hi ha hagut cap augment significatiu (en valors absoluts) en les altres dues espècies (fig. 4). Degut a això, a les parcel·les estassades l'increment de biomassa aèria ha estat més elevat en *Q. ilex* que en les altres dues espècies, mentre que aquesta diferència no ha estat observada a les parcel·les de control.

L'estassada experimental ha comportat un augment en el percentatge d'increment de LAI ($P<0,05$), tant en *Q. ilex* ($P<0,01$) com en *P. latifolia* ($P<0,05$), però no en *A. unedo* (fig. 5). Per altra banda, el percentatge d'increment de LAI en *Q. ilex* no ha estat significativament diferent del de *P. latifolia* i *A. unedo* tant a les parcel·les de control com a les estassades.

Discussió

Diversos estudis han mostrat un augment del creixement dels troncs i del segrest de C induïts per una estassada selectiva, cosa que concorda amb els nostres resultats d'un augment de creixement dels troncs i biomassa aèria a les parcel·les estassades, però aquesta resposta a l'estassada ha variat entre les diferents espècies estudiades. A la mateixa zona d'estudi, s'ha observat que algunes espècies arbustives com *P. latifolia* tenen una habilitat per fer front a les condicions de sequera que les dota d'un avantatge competitiu respecte de *Q. ilex* (Barbeta *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015). També s'ha observat que sota condicions de sequera experimental, hi ha hagut una forta

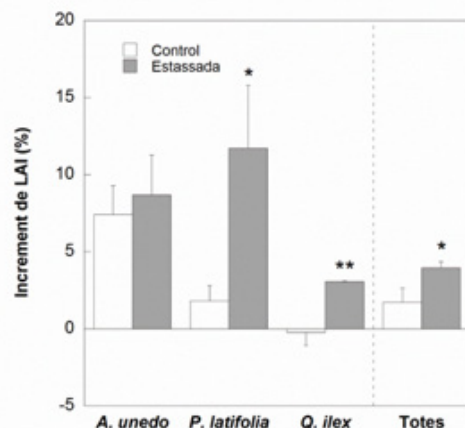


Figura 5. Percentatge d'increment d'índex d'àrea foliar (LAI) a les parcel·les aclarides i de control (3 i 4 parcel·les, respectivament) per a cada espècie, durant tot el període estudiat. Les barres d'error corresponen a l'error estàndard de la mitja. *, $P<0,05$; **, $P<0,01$.

disminució del creixement i un augment de la mortalitat dels arbres en *Q. ilex*, però no en les altres espècies arbustives (Ogaya i Peñuelas, 2007; Liu *et al.*, 2015). La disminució de disponibilitat d'aigua deguda al canvi climàtic (IPCC, 2013) està comportant una progressiva substitució de *Q. ilex* per altres espècies arbustives més resistents a la sequera (Liu *et al.*, 2018). L'estassada selectiva ha fet augmentar el creixement de troncs de qualsevol mida en *Q. ilex*, però en *P. latifolia* només en els troncs més petits i en cap mida de tronc en el cas d'*A. unedo*, i l'estassada també ha fet disminuir la mortalitat de troncs en *Q. ilex*, però no en les altres espècies estudiades. Per tant, l'estassada selectiva es perfila com a una bona eina de gestió per tal de promoure el creixement de *Q. ilex* i per a retardar la progressiva substitució d'aquesta espècie dominant per altres espècies arbustives més resistents a la sequera.

La disponibilitat d'aigua és molt important en aquests ambients en què la humitat del sòl ja és un factor limitant i l'estassada selectiva comporta un augment en la disponibilitat de recursos cap als tronc romanents i una disminució de la superfície de transpiració (LAI) del bosc. Malgrat l'increment més gran de LAI a les parcel·les estassades, al final de l'experiment els valors de LAI han seguit sent inferiors a les parcel·les estassades que a les de control. Per tant, l'augment de disponibilitat d'aigua per tronc degut a l'estassada actua a llarg terme. Unes taxes fotosintètiques més elevades degut a l'estassada han estat observades en ecosistemes semiàrids degut a un increment de la disponibilitat hídrica i de la conductància estomàtica. Aquestes respostes també s'han observat en boscos temperats però només en anys inusualment secs. Aquest increment en la taxa fotosintètica ha estat associat amb un increment del creixement dels arbres, però també amb un augment de la capacitat per esmorteir el canvi climàtic mitjançant l'increment del segrest de CO₂ atmosfèric dels boscos. Un augment de la temperatura i la sequera, per tant, alterarà la capacitat dels boscos mediterranis per absorbir CO₂, així que la gestió forestal pot ser un punt clau a l'hora de determinar la resposta del balanç de C en els boscos i de fer front al canvi climàtic (Vayreda *et al.*, 2012). Les plantes mediterrànies acostumen a tancar els estomes de les fulles quan estan sotmeses a condicions de sequera severa; així aconseguen evitar una pèrdua excessiva d'aigua a través de la transpiració (Mooney *et al.*, 1975). Malgrat això, l'emissió de compostos orgànics volàtils (VOC), que són gasos amb efecte d'hivernacle i contribueixen a exacerbar el canvi climàtic, no disminueix sota condicions de sequera (Llusà i

Peñuelas, 2000; Peñuelas *et al.*, 2013). En conseqüència, la vegetació mediterrània pot perdre la capacitat d'esmoreir el canvi climàtic sota condicions de sequera severes, fins i tot exacerbar el canvi climàtic quan l'efecte de la respiració junt amb el de l'emissió de VOC superi el de l'adquisició de CO₂ atmosfèric mitjançant la fotosíntesi (Doblas-Miranda *et al.*, 2015; Peñuelas *et al.*, 2013).

Els ecosistemes mediterranis estan habitualment limitats per la disponibilitat d'aigua, així que petites intervencions de mitigació poden ajudar a preservar la seva funció sota els impactes derivats de l'augment de l'estrès hídric (Gracia *et al.*, 2011) i el funcionament d'altres ecosistemes que hi estan interconnectats. Una elevada densitat de tronc també pot comportar una disminució de la disponibilitat d'aigua per al consum humà, atès l'elevat ús de l'aigua de la pluja que realitzen els arbres (Biot *et al.*, 2011). Per altra banda, una elevada densitat de tronc també pot afavorir la dispersió d'incendis forestals degut a l'abundància de branques i tronc morts com a conseqüència de l'elevada competència per l'aigua i nutrients (Ogaya i Peñuelas, 2007).

Conclusions

El nostre estudi posa de manifest la idoneïtat de l'estassada selectiva com a eina per millorar el creixement i la conservació dels boscos mediterranis, per poder afrontar millor les condicions imposades pel canvi climàtic i augmentant la seva capacitat per esmorteir-lo. L'estassada selectiva també pot esmorteir altres problemes ambientals típics d'àrees mediterrànies, com la disminució del risc de propagació d'incendis forestals i l'augment d'aigua dispo-

nible per al consum humà.

Agraïments

Agraïments al DARP (Generalitat de Catalunya), Xavier Buqueras i Toni Mestres pel seu permís i el seu ajut en la realització d'aquest treball al bosc de Poblet a través del projecte ORGEST de La Caixa. Aquest treball també ha estat finançat per la Generalitat de Catalunya (projecte SGR2017-1005), pel Govern espanyol (projecte CGL2016-79835-P) i per l'European Research Council Synergy grant (projecte ERC-2013-SyG-2013-610028 IMBALANCE-P).

Referències

BARBETA, A.; OGAYA, R.; PEÑUELAS, J. (2013): «Dampening effects of long-term experimental drought on growth and mortality rates of a Holm oak forest». *Glob. Change Biol.* 19, 3133-3144.

BIROT, Y.; GRACIA, C.; PALAHÍ, M. (2011): «Water for forests and people in the Mediterranean region». European Forest Institute (ed.).

CHANG, C. T.; SPERLICH, D.; SABATÉ, S.; SÁNCHEZ-COSTA, E.; COTILLAS, M.; ESPELTA, J. M.; GRACIA, C. (2016): «Mitigating the stress of drought on soil respiration by selective thinning: contrasting effects of drought on soil respiration of two oak species in a Mediterranean forest», *Forests* 7, 263; <doi:10.3390/f7110263>

DOBLAS-MIRANDA, E. *et al.* (2015): «Reassessing global change research priorities in Mediterranean terrestrial ecosystems: how far have we come and where do we go from here?», *Glob. Biol. Biogeogr.* 24, 25-43.

FISCHER, E. M.; SCHAR, C. (2010): Consis-

tent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves», *Nat. Geosci.* 3, 398-403.

GRACIA, C.; VANCLAY, J.; DALY, H.; SABATÉ, S.; GYENGÉ, J. (2011): «Garantizar el agua para los árboles y para las personas: posibles escenarios». A: BIROT, Y.; GRACIA, C.; PALAHÍ M. (ed.): *Agua para los bosques y la sociedad en el mediterráneo - Un difícil equilibrio*. Barcelona: European Forest Institute.

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». A: 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. (ed.): Cambridge, Regne Unit, i Nova York, EUA: Cambridge University Press, p. 986.

KEYSER, T. L. (2010): «Thinning and site quality influence aboveground tree carbon stocks in yellow-poplar forests of the southern Appalachians», *Can. J. For. Res.* 40, 659-667.

LIU, D.; OGAYA, R.; BARBETA, A.; YANG, X.; PEÑUELAS, J. (2015): «Contrasting impacts of continuous moderate drought and episodic severe droughts on the aboveground-biomass increase and litterfall of three coexistent Mediterranean Woody species», *Glob. Change Biol.* 21, 4196-4209.

LIU, D.; OGAYA, R.; BARBETA, A.; YANG, X.; PEÑUELAS, J. (2018): «Long-term experimental drought combined with natural extremes accelerate vegetation shift in a Mediterranean holm oak forest», *Environmental and Experimental Botany*, 151, 1-11.

LLEDÓ, M. J. (1990): «Compartimentos y flujos biogeoquímicos en una cuenca de encinar del Monte de Poblet». PhD Thesis. Universitat d'Alacant, Espanya.

LLUSIÀ, J.; PEÑUELAS, J. (2000): «Seasonal

patterns of terpene content and emission from seven Mediterranean woody species in field conditions», *Am. J. Bot.* 87, 133-140.

MOONEY, H. A.; HARRISON, A.; MORROW, P. (1975): «Environmental limitations of photosynthesis on a California evergreen shrub», *Oecologia* 19, 293-301.

MORENO-GUTIÉRREZ, C.; BARBERÀ, G. G.; NICOLÁS, E.; DE LUÍS, M.; CASTILLO, V. M.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, F.; QUEREJETA, J. I. (2011): «Leaf $\alpha^{18}\text{O}$ of remaining trees is affected by thinning intensity in a semiarid pine forest», *Plant Cell Environ.* 34, 1009-1019.

OGAYA, R.; PEÑUELAS, J. (2006): «Contrasting foliar responses to drought in *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*», *Biol. Plant.* 50, 373-382.

OGAYA, R.; PEÑUELAS, J. (2007): «Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought», *Plant Ecol.* 189, 291-299.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, O. L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S. L.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; PACALA, S. W.; MCGUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. (2011): «A large and persistent carbon sink in the world's forests», *Science* 333, 988-993.

PEÑUELAS, J. *et al.* (2013): «Intensive measurements of gas, water, and energy exchange between vegetation and troposphere during the MONTES campaign in a vegetation gradient from short semi-desertic shrublands to tall wet temperate forests in the NW Mediterranean Basin», *Atmospheric Environ.* 75, 348-364.

REICHSTEIN, M.; BAHN, M.; CIAIS, P.; FRANK, D.; MAHECHA, M. D.; SENEVIRATNE, S. I.; ZSCHEISCHLER, J.; BEER, C.; BUCHMANN, N.; FRANK, D. C.; PAPALE, D.; RAMMIG, A.; SMITH,

P.; THONICKE, K.; VAN DER VELDE, M.; VICCA, S.; WALZ, A.; WATTENBACH, M. (2013): «Climate extremes and the carbon cycle», *Nature* 500, 287-295.

SHEIL, D.; BURSLEM, D. F. R. P.; ALDER, D. (1995): «The interpretation and misinterpretation of mortality rate measurements», *J. Ecol.* 83, 331-333.

VAYREDA, J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; GRACIA, M.; RETANA, J. (2012): «Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests», *Glob. Change Biol.* 18, 1028-1041.

WILLIAMS, A. P.; ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; GRIFFIN, D.; WOODHOUSE, C. A.; MEKO, D. M.; SWETNAM, T. W.; RAUSCHER, S. A.; SEAGER, R.; GRISSINO-MAYER, H. D.; DEAN, J. S.; COOK, E. R.; GANGODAGAMAGE, C.; CAI, M.; McDOWELL, N. G. (2013): «Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality», *Nat. Clim. Change* 3, 292-297.