

Ondate di siccità e calore, spunti per una selvicoltura adattativa

Marco Borghetti⁽¹⁾,
Michele Colangelo⁽²⁾,
Francesco Ripullone⁽¹⁾,
Angelo Rita⁽³⁾

Drought and heat waves, cues for an adaptive silviculture

We propose some ideas for an adaptive silviculture in the Mediterranean biogeographic region that could assist in shaping forests which are less vulnerable to extreme climatic events, such as those drought and heat waves that are expected to be more intense and frequent in the future. We discuss about silvicultural approaches that would aim to: regulate competition and density-dependent effects; enhance functional diversity; increase the complexity of forest communities. These approaches are especially advisable in the Mediterranean region, which is a hotspot for climate change and where forests have been exploited for many centuries and are only recently taking advantage of a recovery phase.

Keywords: Forest, Tree, Drought, Decline, Management, Functional Diversity, Mediterranean

Introduzione

Le foreste ospitano gran parte della biodiversità e del carbonio degli ecosistemi terrestri, svolgono una parte importante nella mitigazione climatica e procurano alla società un ampio ventaglio di benefici ambientali ed economici. Alcune di queste funzioni potrebbero essere messe a rischio dal cambiamento climatico antropogenico: il riscaldamento globale e le variazioni nei regimi pluviometrici determinano più intense e frequenti ondate di siccità e calore (OSC), che stanno innescando fenomeni di declino e mortalità nelle foreste di diversi biomi e in diversi continenti (Anderegg et al. 2020, Brodribb et al. 2020, Senf et al. 2020). Un effetto OSC in Italia meridionale è documentato in Fig. 1 e Fig. 2; una ricognizione delle crisi da siccità osservate nei querceti mediterranei è reperibile in Gentilesca et al. (2017).

La risposta degli alberi al fenomeno OSC coinvolge numerosi aspetti morfo-funzionali, tuttavia c'è accordo su un fatto: il fattore che innesca il declino fisiologico è rappresentato, anzitutto, dal collasso del sistema di trasporto idraulico (Adams et al. 2017 – vedi Box 1).

Negli anni a venire sono previste OSC più frequenti e intense (IPCC 2014). Ciò desta interrogativi circa la possibilità che nelle zone maggiormente esposte al fenomeno, come la regione biogeografica mediterranea, le foreste siano in grado di mantenere le loro caratteristiche e la piena funzionalità. OSC frequenti sono in grado di ridurre l'assorbimento del carbonio, la produttività primaria

come quella strettamente legnosa, di accelerare i cambiamenti nella composizione e nella struttura della comunità, di modificare le componenti del bilancio idrologico, ecc. (Brodribb et al. 2020, McDowell et al. 2020).

In una rassegna a scala globale (Batllori et al. 2020) è stato messo in evidenza che la mortalità provocata da OSC è spesso seguita da modificazioni della composizione e della struttura della comunità forestale con accelerazione dei processi di successione ecologica, che spesso assumono connotazione regressiva. Frequentemente, è stato osservato, la specie arborea dominante viene sostituita da altre specie e in un significativo numero di situazioni la foresta evolve verso comunità a prevalenza di arbusti, con perdita di biodiversità e di funzioni. Estesi eventi di questo tipo potrebbero imporre scelte gestionali che facilitino i processi di successione, con riconsiderazione dei benefici, produttivi e ambientali, che si attendevano in precedenza. Esempi di modificazioni della comunità forestale e di successioni ecologiche accelerate da OSC sono documentate in Fig. 3 e Fig. 4. Le traiettorie ecologiche post-OSC variano, come direzione e velocità, a seconda degli ambienti, delle caratteristiche della comunità, e della gestione forestale, che non è quindi neutra rispetto agli effetti OSC: sono riportate situazioni in cui gli effetti ne risultano inaspriti, così come situazioni in cui appaiono attenuati (Batllori et al. 2020).

L'idea qui svolta è che una selvicoltura adattativa, impostata su basi ecosistemiche, potrebbe aumentare la possibilità delle foreste di fronteggiare lo stress OSC. Sulla base di recenti risultati sperimentali in campo, di studi ecofisiologici e di ecologia di comunità, proponiamo qualche spunto di riflessione sul tema, facendo soprattutto riferimento ai boschi (semi-naturali, di origine artificiale, in corso di rinaturalizzazione) della regione biogeografica mediterranea. Ragioniamo, in particolare, sulla prospettiva di metodi colturali volti a: (i) regolare la competizione e gli effetti densità-dipendenti; (ii) agevolare la diversità funzionale della comunità forestale; (iii) promuoverne la complessità.

Regolazione della competizione e degli effetti densità-dipendenti

È un argomento centrale della selvicoltura, nella sua assenza di ecologia applicata ai popolamenti forestali: dira-

□ (1) Scuola di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari e Ambientali - SAFE, Università della Basilicata, viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza (Italy); (2) Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Avda. Montañana 1005, 50192, Zaragoza (Spain); (3) Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Napoli "Federico II", via Università 96, 80055 Portici, NA (Italy)

@ Marco Borghetti (marco.borghetti@unibas.it)

Citazione: Borghetti M, Colangelo M, Ripullone F, Rita A (2021). Ondate di siccità e calore, spunti per una selvicoltura adattativa. *Forest@* 18: 49-57. - doi: [10.3832/efor0054-018](https://doi.org/10.3832/efor0054-018) [online 2021-07-09]



Fig. 1 - Danni alle chiome in un bosco a prevalenza di roverella (in alto) e in una formazione a prevalenza di leccio (in basso) (Basilicata, Parco Regionale di Gallipoli Cognato - Piccole Dolomiti Lucane, agosto 2017). L'effetto è imputabile a una OSC, documentata da Rita et al. (2020).

dare, cioè ridurre il numero di alberi che crescono su una determinata superficie, è lo strumento di cui il selvicoltore dispone per regolare la competizione per le risorse nel popolamento e per distribuire la crescita fra gli individui in funzione degli obiettivi produttivi (de Philippis 1949). È quindi naturale che ai diradamenti si guardi come metodo per migliorare l'uso della risorsa idrica, al fine di ridurre la vulnerabilità del popolamento al fenomeno OSC e di conferirgli resistenza di lunga durata.

Un lavoro recente (Castagneri et al. 2021) definisce i limiti di questa prospettiva. La riduzione della competizione con il diradamento, viene mostrato, non influenza in modo univoco la risposta (valutata in termini di accrescimento) degli alberi alla siccità; si mette in evidenza l'effetto di alleviamento dello stress idrico nei popolamenti diradati, ma anche l'ampia variabilità di risposta in funzione di fattori locali, da considerare quindi nella definizione dei metodi culturali e della strategia gestionale. La risposta in termini di accrescimento non è, peraltro, l'unico metro di valutazione della reazione della foresta di fronte a un fattore di perturbazione; sono descritti, ad esempio, effetti positivi dei diradamenti sulla resistenza all'attacco di agenti biotici che intervengano successivamente al disturbo abiotico (Calama & García-Güemes 2015).

La mancanza di una regola di carattere generale non toglie comunque interesse al tentativo di mettere ordine nella casistica, valutando i risultati della ricerca per categorie entro le quali chi ha pratica di selvicoltura può orientarsi. Così, una valutazione delle evidenze sperimentali più recenti ci porta a individuare alcune tipologie di risposta che potrebbero avere validità al di là del singolo caso; e che potrebbero rappresentare un riferimento sul piano culturale per alleviare gli effetti OSC attraverso una regolazione della competizione e degli effetti densità-dipendenti. Le appuntiamo, qui di seguito, con i riferimenti bibliografici necessari per gli approfondimenti applicativi:

(i) in popolamenti di conifere a comportamento isoidrico (specie che chiudono gli stomi e riducono la traspirazione ai primi segnali di stress idrico, in modo da evitare un eccessivo aumento della tensione idrica xilematica – vedi Box 1) i diradamenti limitano spesso gli effetti negativi durante il periodo di stress e riducono i tempi richie-



Fig. 2 - Seccumi apicali dovuti a crisi del sistema di trasporto idraulico in condizioni di forte stress idrico. A sinistra: alberi di roverella nel bosco del Comune di Gorgoglione (Matera), colpiti da OSC. A destra, alberi di farnia del Parco del Ticino (Milano). In questo caso la causa dello stress idrico è rappresentata, probabilmente, da un abbassamento della falda freatica (Colangelo et al. 2018). Nel parco del Ticino sono in corso ricerche per esplorare il ruolo della diversità genetica e della plasticità fenotipica nel determinare la risposta delle piante di farnia alla carenza idrica.

Box 1 - Una vita in tensione, gli alberi fra necessità e vulnerabilità.

Gli alberi, come tutte le piante terrestri, hanno la necessità di sollevare l'acqua dal suolo alle foglie, dove questa viene utilizzata per la fotosintesi e le altre funzioni vitali. Questo trasporto è assolto dal sistema xilematico: una matrice di elementi porosi (i condotti xilematici), finemente interconnessi, attraverso i quali l'acqua risale, suddivisa in innumerevoli filetti, verso la chioma. Assolvere a questa necessità implica però una condizione di vulnerabilità, proprio a carico del sistema xilematico: si tratta, a conti fatti, del prezzo che le piante devono pagare per la colonizzazione degli ambienti terrestri. Negli alberi, a causa delle grandi dimensioni, questa vulnerabilità è accentuata e quando si trovano esposti a prolungate e intense siccità il sistema xilematico può subire dei danni, che insorgono a causa del fenomeno della cavitazione xilematica, che qui descriviamo per sommi capi.

La risalita dell'acqua avviene grazie alla forza traente della traspirazione: una forza che "tira" verso l'alto i filetti di acqua che scorrono nei condotti xilematici. Come elastici tirati, questi filetti sono sottoposti a una tensione, che aumenta col crescere del deficit idrico del suolo e con il potere evaporante dell'atmosfera. Raggiunto un certo livello, la tensione diventa una forza in grado di aspirare, attraverso le interruzioni (punteggiature) della parete xilematica, l'aria presente negli spazi esterni, che entra così nel condotto in forma di minuscole bolle. Per via dell'instabile equilibrio fisico dell'acqua quando è sotto tensione, queste bolle si aggregano rapidamente fra di loro e formano delle cavità occupate da emboli gassosi. Gli emboli bloccano il flusso idrico nel condotto xilematico e sono in grado di diffondersi a cascata da un condotto all'altro con il medesimo meccanismo, estendendo l'area xilematica inattiva sul piano della funzionalità idraulica. Questi fenomeni sono stati descritti e interpretati fin dagli anni '80 del secolo scorso (v. Zimmermann 1983, Tyree & Sperry 1988). Alla lunga, si può innescare un circolo vizioso in cui cavitazione e tensione xilematica si alimentano a vicenda, così da causare condizioni di embolia sempre più estese, che possono dar luogo a un vero e proprio collasso del trasporto idraulico. In condizioni estreme, si può arrivare alla completa recisione della continuità idraulica e del rifornimento idrico alla chioma, che entra così in sofferenza, iniziando dai rametti apicali dove più alta è la tensione xilematica (Fig. 2). Per approfondimenti: Tyree & Ewers (1991), Borghetti et al. (1993), Tyree & Zimmermann (2002), Choat et al. (2018).

sti per il ripristino della crescita dopo il periodo di crisi (Aldea et al. 2017, Bottero et al. 2017, Van Mantgem et al. 2020). Nella prospettiva di OSC a breve tempo di ritorno, la riduzione dei tempi di ripristino assume maggior rilievo;

- (ii) l'effetto del diradamento ha una durata che può dipendere dall'intensità con cui viene effettuato. In boschi di conifere dell'ambiente mediterraneo, effetti duraturi (fino a 20 anni dall'intervento) sono stati osservati in caso di diradamenti forti con prelievo di oltre la metà dell'area basimetrica (Navarro-Cerrillo et al. 2019, Manrique-Alba et al. 2020). In querceti di leccio un diradamento con asportazione del 30% dell'area basimetrica ha ridotto, anche sul lungo periodo, la mortalità e gli effetti negativi della siccità sperimentalmente imposta con l'esclusione delle precipitazioni (Gavinet et al. 2019); sempre nella lecceta, è stato visto che la riduzione della densità prolunga la crescita in condizioni di stress idrico (Cabon et al. 2018);
- (iii) il tipo di diradamento (definito in base alle classi arboree sulle quali si interviene) può avere un effetto significativo. Il diradamento di tipo alto, con il quale si interviene sulla classe delle piante dominanti e co-dominanti, favorisce una maggior differenziazione strutturale, la quale può avere un effetto benefico sulla risposta allo stress e sui tempi di ripristino, soprattutto in boschi misti (Jones et al. 2019);
- (iv) i diradamenti d'intensità moderata e di tipo basso, con i quali si interviene sulla classe delle piante dominate, potrebbero risultare di effetto modesto nel caso di boschi in cui la resistenza allo stress idrico e il mantenimento del vigore sono la conseguenza di un comportamento anisodrico, cioè di evasione dallo stress, legata ad esempio allo sviluppo di radici profonde che consentono l'accesso alle zone più umide del suolo. Casi di questo genere sono stati messi in evidenza in querceti della fascia sub-mediterranea caratterizzati da segni di declino e mortalità per OSC (Colangelo et al. 2017, Ripullone et al. 2020 - Fig. 5);
- (v) la durata dell'effetto del diradamento sull'alleviamento dello stress idrico dipende in buona parte dal periodo necessario per la ricostituzione dell'indice di area fogliare (LAI) della copertura arborea, e dall'equilibrio fra LAI arboreo e LAI del sottobosco, il cui sviluppo e la cui tra-



Fig. 3 - Aragona nord-orientale, Spagna. Effetti OCS su evoluzione e struttura della comunità forestale. In un bosco con pino marittimo dominante si notano evidenti effetti dovuti a OSC: a partire dal 2017 i pini manifestano sintomi di ingiallimento e trasparenza della chioma e forti segni di declino. La rarefazione della copertura del pino determina un'accelerazione della successione ecologica, con evoluzione verso una comunità a prevalenza di leccio, visibile nel piano inferiore.



Fig. 4 - Pirenei aragonesi, Spagna. Nell'immagine a sinistra, abetine di abete bianco con faggio: l'abete bianco appare più OCS-sensibile del faggio, anche se conserva buone capacità di rinnovarsi. Si tratta di boschi in evoluzione controllata, in cui non sono previsti interventi colturali. Nell'immagine a destra, boschi misti di abete bianco e pino silvestre: l'abete bianco mostra segni di declino per stress climatico, a differenza del pino silvestre. Nelle foto si notano chiome spezzate di abete che originano dei *gap* nella copertura di dimensioni considerevoli. Il declino causato dalla siccità sta esponendo l'abete agli agenti del marciume radicale.

spirazione possono aumentare in rapporto al maggiore afflusso di radiazione luminosa (Box 2). Vi sono casi che dimostrano come una riduzione del sottobosco possa determinare un miglioramento dello stato idrico degli alberi dopo il diradamento (Giuggiola et al. 2018). In ambiente mediterraneo il controllo del sottobosco, che può essere ottenuto con un esercizio regolato del pascolo,

viene ad assumere significato anche in relazione alla prevenzione degli incendi boschivi (Mancilla Leytón & Martín Vicente 2012).

Esistono quindi possibilità, da valutare caso per caso con esperta professionalità, per applicare interventi di regolazione della competizione che possano mitigare gli effetti OSC. Nella bioregione mediterranea, questa appare una



Fig. 5 - Pannelli in alto: bosco di cerro nel Comune di Gorgoglione (Matera); pannello in basso: bosco di farnetto nel Comune di San Paolo Albanese (Potenza). In entrambi i boschi, con sintomi di declino da siccità, sono stati effettuati diradamenti per ridurre la competizione e gli effetti densità-dipendenti; i risultati sono in corso di valutazione.

prospettiva con ampi ambiti applicativi: pinete mediterranee, naturali o derivanti da piantagione, rimboschimenti puri o misti, in corso o meno di rinaturalizzazione, pinete oro-mediterranee, popolamenti transitori derivanti da tagli di avviamento all'alto fusto, fustaie monoplane di querce e faggio, ecc.

Agevolazione della diversità funzionale

Le specie arboree mettono in atto un numero elevato di soluzioni, in termini di tratti morfo-funzionali, per adattarsi alle condizioni di siccità (Box 3). L'elevata variabilità che si osserva in campo è un effetto sia della diversità genetica (fra le specie e gli individui al loro interno) che della plasticità fenotipica, cioè della capacità degli alberi di modificare le proprie caratteristiche somatiche a seconda delle specifiche condizioni ambientali.

Spesso si osserva variabilità anche all'interno di comunità forestali adattate a difficili condizioni ambientali, ad esempio di comunità che colonizzano gli habitat siccitosi nell'ambiente schiettamente mediterraneo, come se l'ambiente lasciasse passare fra le sue maglie selettive diverse possibili soluzioni di adattamento; ciò può trovare spiegazione nel fatto che le strategie di tolleranza o evasione dallo stress idrico possono essere molto diverse fra le specie, e più o meno efficaci a seconda di come la siccità si sviluppa (Blackman et al. 2012). Si osserva pure che specie apparentemente simili, si differenziano nel modo con cui affrontano i periodi post-siccità: vi sono specie che, dopo la reidratazione del suolo, procedono a una rapida sostituzione dello xilema danneggiato con nuovo tessuto legnoso, in un processo che può comunque portare alla deplezione delle riserve di carbonio e a una situazione di debolezza, ad esempio nei confronti di attacchi da parte di agenti biotici; come vi sono specie che reagiscono investendo prevalentemente in area fogliare invece che nella crescita legnosa, esponendosi a maggiori rischi di fronte alle siccità successive, per il sotto-dimensionamento del sistema di trasporto (vedi Brodrribb et al. 2020).

In rapporto a questa variabilità ecofisiologica e alle differenti strategie di risposta, una selvicoltura adattativa OCS può essere pensata come quella che cerchi di integrare, fra i criteri di scelta culturale, la dimensione della diversità funzionale. In particolare, proponendosi: (i) d'interpretare e dare un peso alla diversità dei tratti adattativi delle specie arboree sulla base della variabilità micro-ambientale, tenendo anche conto della prospettiva del cambiamento climatico; (ii) di procedere con scelte culturali che promuovano la diversità funzionale nella data situazione stagionale e nelle specifiche condizioni del popolamento (Aquilué et al. 2021).

Vi sono strumenti e procedure che possono essere d'aiuto in questo ap-

Box 2 - I fattori di controllo dell'evapotraspirazione nell'ecosistema forestale.

I fattori di controllo dell'evapotraspirazione degli ecosistemi forestali sono: (A) l'umidità dell'aria; (B) l'indice di area fogliare (LAI) e il grado di apertura degli stomi; (C) l'energia a disposizione sotto forma di radiazione netta. Senza entrare in dettagli (si rimanda a Jarvis & McNaughton 1986 come lavoro fondamentale, e a Iovino et al. 2009 per una trattazione tecnico-divulgativa), a causa del diverso grado di turbolenza dell'atmosfera al di sopra e al di sotto delle chiome degli alberi, la traspirazione del piano arboreo dominante è prevalentemente guidata dai fattori A e B, quella del sottobosco dal fattore C. Secondo un'ipotesi avanzata quasi quarant'anni fa da Roberts (1983), l'evapotraspirazione degli ecosistemi forestali è un processo abbastanza conservato, grazie al diverso tipo di controllo ambientale cui sono assoggettate la traspirazione del piano dominante e quella del sottobosco, e ad altri processi di compensazione fra le varie componenti dell'ecosistema. Quando, eseguendo un diradamento, si determina una riduzione del LAI del piano dominante, questo provoca una diminuzione della traspirazione arborea e quindi un miglioramento dello stato idrico del suolo e delle piante. Tuttavia, l'effetto può essere vanificato dall'aumento della traspirazione del sottobosco, che beneficia dell'aumento dell'energia radiativa a disposizione per la diminuzione del LAI arboreo (Bréda et al. 1995, Lechuga et al. 2017). Il controllo del sottobosco può quindi assumere un ruolo importante per mantenere gli effetti benefici del diradamento sullo stato idrico del suolo.

proccio culturale, rendendolo realistico nell'ambito di procedure di gestione forestale; ad esempio:

- la disponibilità di banche dati, ormai molto estese e in continuo aggiornamento, sui tratti funzionali delle specie arboree. Citiamo, come esempio, la banca dati TRY: <http://www.try-db.org/TryWeb/Home.php> (Kattge et al. 2011). In analogia ai metodi della *precision forestry* (Corona et al. 2017), queste informazioni possono essere incrociate con dati di composizione specifica per area,

Box 3 - Tratti morfo-funzionali arborei per l'adattamento alla siccità.

Come visto nel Box 1, la tensione xilematica rappresenta per gli alberi una condizione di rischio: sul suo controllo s'impenna la strategia di adattamento degli alberi alla siccità. La soglia critica di tensione in grado di innescare il fenomeno della cavitazione xilematica varia da specie a specie. Questa variabilità è legata a differenze nella struttura anatomica dello xilema: dimensioni dei condotti e loro interconnessione, porosità delle pareti cellulari, caratteristiche della membrana delle punteggiature, ecc. Una valutazione del ruolo delle caratteristiche xilematiche nel mantenimento del vigore arboreo in ambiente mediterraneo è stata svolta recentemente da Borghetti et al. (2020). Oltre all'anatomia funzionale dello xilema, molto variabile in funzione dell'ambiente (Borghetti et al. 2016), vi sono numerosi tratti della pianta collegati all'adattamento alla siccità, che variano in modo coordinato così da bilanciare il controllo della tensione xilematica con l'assimilazione del carbonio per via fotosintetica (Mencuccini et al. 2015). In più, nel corso del loro lungo ciclo vitale, gli alberi sono in grado di "aggiustare" la loro struttura, in particolare di modificare il rapporto fra l'area delle foglie e l'area dei tessuti di conduzione, in un processo di acclimatazione strutturale (Magnani et al. 2002). In Tab. 1 si riportano alcuni dei più importanti caratteri morfologici, strutturali e fisiologici dell'albero coinvolti nell'adattamento alla siccità (molti di questi caratteri sono riportati, per le diverse specie, in banche dati di pubblico dominio). Alcuni caratteri strutturali possono essere visti sia come fattori che determinano, sul breve periodo, lo stato idrico della pianta sia come conseguenza dei processi di acclimatazione che l'albero mette in atto, sul lungo periodo, per mantenere uno stato idrico che garantisca la sicurezza del trasporto idraulico. Ad esempio, l'altezza degli alberi, che nella foresta determina fortemente i dinamismi di comunità, può essere vista come la conseguenza della necessità di mantenere la tensione xilematica nella chioma entro le soglie di sicurezza per scongiurare la cavitazione. In questo senso, a parità di altri fattori, si può fare la previsione di una diminuzione dell'altezza degli alberi se il cambiamento climatico porterà a un inasprimento del deficit idrico del suolo. Una rassegna recente dei cambiamenti strutturali della foresta di fronte al riscaldamento globale e all'inasprimento della siccità si trova in McDowell et al. (2020).

Tab. 1 - Alcuni dei più importanti caratteri morfologici, strutturali e fisiologici dell'albero coinvolti nell'adattamento alla siccità.

Caratteri morfologici e strutturali	Caratteri fisiologici
<ul style="list-style-type: none"> • Densità e dimensioni dei condotti xilematici • Densità del legno e connettività xilematica • Porosità della membrana delle punteggiature • Segmentazione idraulica • Altezza della pianta • Area fogliare totale e specifica • Rapporto area fogliare/area di conduzione xilematica • Rapporto area fogliare/ biomassa delle radici fini • Profondità delle radici • Rigenerazione vegetativa • Fenologia 	<ul style="list-style-type: none"> • Soglie di tensione per la cavitazione xilematica • Conduttanza idraulica del fusto e della radice • Regolazione stomatica • Tensione xilematica a chiusura stomatica • Tasso traspirativo per unità di area fogliare • Traspirazione cuticolare • Efficienza d'uso dell'acqua • Elasticità del parenchima • Permeabilità e canali della membrana cellulare • Conduttanza idraulica suolo-radice • Turnover dell'alburno e delle radici fini

classi dimensionali e sociali, ricavabili da indagini inventariali o da ricognizioni da remoto, le cui potenzialità interpretative e facilità d'uso aumentano quasi giornalmente (Chirici 2020, Francini et al. 2020). Si possono produrre, in questo modo, cartografie funzionali da utilizzare come guida operativa negli approcci colturali a scala di popolamento/comunità, e di indirizzo nelle decisioni gestionali a scala aziendale e territoriale; si rimanda a Lavorel et al. (2011) per un'applicazione della diversità funzionale a scala di paesaggio e a Borghetti et al. (2020) per un esercizio in cui la foresta mediterranea è stata descritta, ad ampia scala geografica, in termini di diversità funzionale basandosi sui caratteri dello xilema delle diverse specie che edificavano la comunità forestale;

- la disponibilità di modelli di simulazione che forniscano previsioni di supporto per le decisioni colturali e gestionali. Sono in corso progressi, nella modellistica empirica e di processo, affinché possano essere oggetto di simulazione: la probabilità di crisi nelle diverse classi dimensionali e sociali del popolamento arboreo; le probabilità di ripresa post-siccità a seconda delle strategie adottate dalle specie che edificano la comunità e dell'insorgenza di condizioni di debolezza che favoriscano attacchi parassitari; le risposte funzionali modulate da variazioni topo-climatiche a scala geografica fine; a scala territoriale, le risposte di comunità forestali funzionalmente simili in ambienti eterogenei, ecc. (Collalti et al. 2014, Ameztegui et al. 2017, Rita et al. 2021, Venturas et al. 2021).

È ragionevole pensare che il rapido sviluppo dei database di pubblico dominio, dei sistemi di monitoraggio, delle piattaforme *hardware* e del *software* renderanno questi strumenti utilizzabili anche in ambito professionale.

Promozione della complessità

Connesso all'aspetto trattato nel precedente paragrafo, è questo uno dei punti più importanti: una comunità forestale complessa, a elevata biodiversità funzionale e strutturale, si candida come quella maggiormente in grado di conservare la funzionalità in ambienti sottoposti a forti stress ambientali.

È tutt'ora argomento di studio il peso relativo dei filtri competitivi, della complementarità di nicchia e delle interazioni facilitanti sul dinamismo delle comunità nelle diverse situazioni ambientali (Michalet et al. 2021). Tuttavia, sono numerose le ricerche che mettono in evidenza una relazione positiva fra biodiversità, funzionalità e produttività degli ecosistemi forestali (vedi Liang et al. 2016 per una valutazione a scala globale). Le interazioni facilitanti appaiono frequenti in condizioni ambientali difficili e que-

sto può spiegare le più strette relazioni fra ricchezza specifica e produttività che si osservano nel bioclimate mediterraneo rispetto a quello temperato (Rita & Borghetti 2019).

Di fronte ai fenomeni OCS, si tratta peraltro di passare dalla prospettiva di una foresta ad alta ricchezza specifica, che potrebbe rivelarsi funzionalmente debole e incapace di fronteggiare il disturbo, ad una foresta, come proposto nel paragrafo precedente, che sia ad alta ricchezza funzionale (Aquilué et al. 2021). In questo senso, una selvicoltura adattativa va configurata come una selvicoltura di sistema e di copertura che miri a: un alto grado di diversità strutturale e d'integrazione funzionale; alla promozione dei processi di rinnovazione gamica e al sostegno dei processi di autorganizzazione; al rispetto di livelli minimi di consistenza in termini di biomassa; a valorizzare gli effetti "lascito e ritenzione", ecc. (v. Ciancio & Nocentini 1996, Gustafsson et al. 2020, Puettmann & Messier 2020).

Appaiono vasti gli ambiti applicativi per questa prospettiva selvicolturale nella regione biogeografica mediterranea in cui nel corso del tempo le foreste (dalla fascia schiettamente mediterranea a quella oro-mediterranea: leccete meso-termofile, querceti xerofili e mesofili, puri o misti, faggete termofile, montane e alto-montane, boschi con conifere montane, ecc.) hanno subito cospicui impoverimenti in termini di consistenza e biodiversità compositiva, strutturale e funzionale.

Conclusioni

Nella regione biogeografica mediterranea, al pari di altre zone del nostro paese, da qualche decennio i boschi mostrano, in seguito alla rivoluzione nell'approvvigionamento energetico avvenuta nell'ultimo dopoguerra e alle mutate condizioni socio-economiche, una fase di ripresa (Marchetti et al. 2018). La quale, per ora, si è tradotta in apprezzabili aumenti di superficie e di incremento, meno nel recupero della biodiversità compositiva, strutturale e funzionale, che pure si avverte in qualche caso. Questi boschi si trovano ora ad affrontare il cambiamento del clima e, come abbiamo visto, rischiose ondate di siccità e di calore.

In questa situazione non si ravvisa di certo la necessità di una gestione frettolosa che, dando per garantite dinamiche di crescita e accumulo di carbonio che scontate invece non sono (Brienen et al. 2020), riproponesse vecchi schemi di utilizzazione: nell'illusione che questo possa essere motore di una valorizzazione territoriale e progresso economico e sociale; o che tollerasse raccolte di biomassa legnosa per usi energetici non compatibili con gli obiettivi della mitigazione climatica e di conservazione della biodiversità (WCRC 2021). Auspichiamo, invece, una selvicoltura che applichi i suoi fondamenti ecologici nella gestio-

ne dei popolamenti che possono svolgere una funzione produttiva; che sappia assecondare i dinamismi della foresta, promuovere la rinnovazione naturale e l'evoluzione a fustaia, valorizzare la diversità funzionale, interpretare e rispettare una foresta semi-naturale che in molti casi deve ancora recuperare dal passato sfruttamento, e deve poterlo fare nel quadro di una gestione impostata in una prospettiva di sistema e di regolare controllo dei risultati (Nocentini et al. 2020); e che talvolta sappia anche percorrere la strada della prudenza e dell'attesa.

L'aumento della diversità biologica e la capacità di fronteggiare gli eventi climatici estremi sono obiettivi qualificanti della Strategia Forestale Nazionale (SFN). In questa nota abbiamo ragionato su approcci di selvicoltura adattativa, nell'idea che interventi di regolazione della competizione e approcci culturali volti incentivare la diversità funzionale in una rete di accresciute connessioni strutturali, siano un modo per favorire la capacità della foresta di fronteggiare fenomeni estremi come le ondate di siccità e calore. Si parla spesso, nei documenti di indirizzo, delle foreste come "capitale naturale" da difendere e valorizzare. Per noi questo implica, anzitutto, investimenti sul "capitale umano" che ruota intorno alla foresta, nelle sue varie componenti: formazione, professionalità, proprietà e imprenditorialità. La sfida è infatti quella di coniugare, in una strategia "win-win" la gestione forestale adattativa, per sua natura spesso non finanziariamente redditizia nel breve periodo, con il diritto dei proprietari boschivi (pubblici e privati) di trarre beneficio dai loro beni e di fare impresa fruttuosa anche nelle ricadute ambientali e sociali.

Ringraziamenti

Lavoro svolto con il contributo del progetto: "Advanced EO Technologies for studying Climate Change impacts on the environment - OT4CLIMA" finanziato dal MIUR, D.D. 2261del 6.9.2018, PON R&I 2014-2020 & FSC.

Bibliografia

Adams HD, Zeppel MJ, Anderegg WR, Hartmann H, Landhäusser SM, Tissue DT, Huxman TE, Hudson PJ, Franz TE, Allen CD, Anderegg LD, Barron-Gafford GA, Beerling DJ, Breshears DD, Brodrribb TJ, Bugmann H, Cobb RC, Collins AD, Dickman LT, Duan H, Ewers BE, Galiano L, Galvez DA, Garcia-Forner N, Gaylord ML, Germino MJ, Gessler A, Hacke UG, Hakamada R, Hector A, Jenkins MW, Kane JM, Kolb TE, Law DJ, Lewis JD, Limousin JM, Love DM, Macalady AK, Martínez-Vilalta J, Mencuccini M, Mitchell PJ, Muss JD, Pangle RE, Pinkard EA, Piper FI, Plaut JA, Pockman WT, Quirk J, Reinhardt K, Ripullone F, Ryan MG, Sala A, Sevanto S, Sperry JS, Vargas R, Vennetier M, Way DA, Xu C, Yopez EA, McDowell NG (2017). A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology and Evolution* 1 (9): 1285-1291. - doi: [10.1038/s41559-017-0248-x](https://doi.org/10.1038/s41559-017-0248-x)

Aldea J, Bravo F, Bravo-Oviedo A, Ruiz-Peinado R, Rodríguez F, Del Río M (2017). Thinning enhances the species-specific radial increment response to drought in Mediterranean pine-oak stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 237-238: 371-383. - doi: [10.1016/j.agrformet.2017.02.009](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.009)

Ameztegui A, Cabon A, De Cáceres M, Coll L (2017). Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change: a modelling approach. *Ecological Modelling* 356: 141-150. org. - doi: [10.1016/j.ecolmodel.2017.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.04.006)

Anderegg WR, Trugman AT, Badgley G, Konings AG, Shaw J (2020). Divergent forest sensitivity to repeated extreme droughts. *Nature Climate Change* 10 (12): 1091-1095. - doi: [10.1038/s41558-020-00919-1](https://doi.org/10.1038/s41558-020-00919-1)

Aquilué N, Messier C, Martins KT, Dumais-Lalonde V, Mina M (2021). A simple-to-use management approach to boost adaptive capacity of forests to global uncertainty. *Forest Ecology and Management* 481: 118692. - doi: [10.1016/j.foreco.2020.118692](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118692)

Batllore E, Lloret F, Aakala T, Anderegg WR, Aynekulu E, Bendixsen DP, Bentouati A, Bigler C, Burk CJ, Camarero JJ, Colangelo M, Coop JD, Fensham R, Floyd ML, Galiano L, Ganey JL, Gonzalez P, Jacobsen AL, Kane JM, Kitzberger T, Linares JC, Marchetti SB, Matusick G, Michaelian M, Navarro-Cerrillo RM, Pratt RB, Redmond MD, Rigling A, Ripullone F, Sangüesa-Barreda G, Sasal Y, Saura-Mas S, Suarez ML, Veblen TT, Vilà-Cabrera A, Vincke C, Zeeman B (2020). Forest and woodland replacement patterns following drought-related mortality. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 117 (47): 29720-29729. - doi: [10.1073/pnas.2002314117](https://doi.org/10.1073/pnas.2002314117)

Blackman CJ, Brodrribb TJ, Jordan GJ (2012). Leaf hydraulic vulnerability influences species' bioclimatic limits in a diverse group of woody angiosperms. *Oecologia* 168: 1-10. - doi: [10.1007/s00442-011-2064-3](https://doi.org/10.1007/s00442-011-2064-3)

Borghetti M, Gentilesca T, Colangelo M, Ripullone F, Rita A (2020). Xylem functional traits as indicators of health in Mediterranean forests. *Current Forestry Reports* 6: 220-236. - doi: [10.1007/s40725-020-00124-5](https://doi.org/10.1007/s40725-020-00124-5)

Borghetti M, Gentilesca T, Leonardi S, Van Noije T, Rita A (2016). Long-term temporal relationships between environmental conditions and xylem functional traits: a meta-analysis across a range of woody species along climatic and nitrogen deposition gradients. *Tree Physiology* 37: 4-17. - doi: [10.1093/treephys/tpw087](https://doi.org/10.1093/treephys/tpw087)

Borghetti M, Grace J, Raschi A (1993). Water transport in plants under climatic stress. Cambridge University Press, Cambridge, UK. - doi: [10.1017/CBO9780511753305](https://doi.org/10.1017/CBO9780511753305)

Bottero A, D'Amato AW, Palik B, Bradford JB, Fraver S, Battaglia MA, Asherin LA (2017). Density-dependent vulnerability of forest ecosystems to drought. *Journal of Applied Ecology* 54: 1605-1614. - doi: [10.1111/1365-2664.12847](https://doi.org/10.1111/1365-2664.12847)

Bréda N, Granier A, Aussenac G (1995). Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.). *Tree Physiology* 15: 295-306. - doi: [10.1093/treephys/15.5.295](https://doi.org/10.1093/treephys/15.5.295)

Brienen RJW, Caldwell L, Duchesne L, Voelker S, Barichivich J, Baliva M, Ceccantini G, Di Filippo A, Helama S, Locosselli GM, Lopez L, Piovesan G, Schöngart J, Villalba R, Gloor E (2020). Forest carbon sink neutralized by pervasive growth-lifespan trade-offs. *Nature Communications* 11: 4241. - doi: [10.1038/s41467-020-17966-z](https://doi.org/10.1038/s41467-020-17966-z)

Brodrribb TJ, Powers J, Cochard H, Choat B (2020). Hanging by a thread? Forests and drought. *Science* 368: 261-266. - doi: [10.1126/science.aat7631](https://doi.org/10.1126/science.aat7631)

Cabon A, Mouillot F, Lempereur M, Ourcival J-M, Simioni G, Limousin J-M (2018). Thinning increases tree growth by delaying drought-induced growth cessation in a Mediterranean evergreen oak coppice. *Forest Ecology and Management* 409: 333-342. - doi: [10.1016/j.foreco.2017.11.030](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.030)

Calama R, García-Güemes C (2015). La práctica de la selvicoltura para la adaptación al cambio climático. In: "Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático. impactos, vulnerabilidad y adaptación en España" (Herrero A, Zavala MA eds.), Centro de Publicaciones del MAGRAMA 46, pp. 501-512. [online] URL: http://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/im pactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/informe-completo-contra-dilla2_tcm30-70199.pdf

Castagneri D, Vacchiano G, Hackett-Pain A, DeRose RJ, Klein T, Bottero A (2021). Meta-analysis reveals different competition effects on tree growth resistance and resilience to drought. *Ecosystems*. - doi: [10.1007/s10021-021-00638-4](https://doi.org/10.1007/s10021-021-00638-4)

Chirici G (2020). Una nuova era nell'uso del telerilevamento a supporto della pianificazione sostenibile del territorio Big Data e intelligenza artificiale a portata di mano. *Contesti* 1: 14-35. - doi: [10.13128/contest-11988](https://doi.org/10.13128/contest-11988)

Choat B, Brodrribb TJ, Brodersen CR, Duursma RA, López R, Medlyn BE (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature* 558: 531-9. - doi: [10.1038/s41586-018-0240-x](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0240-x)

Ciancio O, Nocentini S (1996). Il bosco e l'uomo: l'evoluzione del pensiero forestale dall'umanesimo moderno alla cultura della

- complessità. La selvicoltura sistemica e la gestione su basi naturali. In: "Il bosco e l'uomo" (Ciancio O ed). Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, pp. 21-115.
- Colangelo M, Camarero JJ, Borghetti M, Gazol A, Gentilescia T, Ripullone F (2017). Size matters a lot: drought-affected Italian oaks are smaller and show lower growth prior to tree death. *Frontiers in Plant Science* 8 (135): 1-14. - doi: [10.3389/fpls.2017.00135](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00135)
- Colangelo M, Camarero JJ, Ripullone F, Gazol A, Sánchez-Salguero OJ, Redondo M (2018). Drought decreases growth and increases mortality of coexisting native and introduced tree species in a temperate floodplain forest. *Forests* 9: 205. org. - doi: [10.3390/f9040205](https://doi.org/10.3390/f9040205)
- Collalti A, Perugini L, Santini M, Chiti T, Nolè A, Matteucci G, Valentini R (2014). A process-based model to simulate growth in forests with complex structure: evaluation and use of 3D-CMCC forest ecosystem model in a deciduous forest in Central Italy. *Ecological Modelling* 272: 362-378. - doi: [10.1016/j.ecolmodel.2013.09.016](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.016)
- Corona P, Chianucci F, Quatrini V, Civitarese V, Clementel F, Costa C, Floris A, Menesatti P, Puletti N, Sperandio G, Verani S, Turco R, Bernardini V, Plutino M, Scrinzi G (2017). Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia. *Forest@* 14: 1-12. - doi: [10.3832/efor2285-014](https://doi.org/10.3832/efor2285-014)
- De Philippis A (1949). I diradamenti boschivi. Nella scienza, nella sperimentazione, nell'arte colturale. Universitaria Editrice, Firenze, pp. 340.
- Francini S, McRoberts RE, Giannetti F, Mencucci M, Marchetti M, Scarascia Mugnozza G, Chirici G (2020). Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery. *European Journal of Remote Sensing* 53 (1): 233-244. - doi: [10.1080/22797254.2020.1806734](https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1806734)
- Gavinet J, Ourcival J-M, Limousin J-M (2019). Rainfall exclusion and thinning can alter the relationships between forest functioning and drought. *New Phytologist* 223: 1267-1279. - doi: [10.1111/nph.15860](https://doi.org/10.1111/nph.15860)
- Gentilescia T, Camarero JJ, Colangelo M, Nolè A, Ripullone F (2017). Drought-induced oak decline in the western Mediterranean region: an overview on current evidences, mechanisms and management options to improve forest resilience. *iForest* 10: 796-806. - doi: [10.3832/ifor2317-010](https://doi.org/10.3832/ifor2317-010)
- Giuggiola A, Zweifel R, Feichtinger LM, Vollenweider P, Bugmann H, Haeni M, Rigling A (2018). Competition for water in a xeric forest ecosystem - Effects of understory removal on soil micro-climate, growth and physiology of dominant Scots pine trees. *Forest Ecology and Management* 409: 241-249. - doi: [10.1016/j.foreco.2017.10.017](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.017)
- Gustafsson L, Bauhus J, Asbeck T, Augustynczyk AL, Basile M, Frey J, Gutzat F, Hanewinkel M, Helbach J, Jonker M, Knuff A, Messier C, Penner J, Pyttel P, Reif A, Storch F, Winiger N, Winkel G, Yousefpour R, Storch I (2020). Retention as an integrated biodiversity conservation approach for continuous-cover forestry in Europe. *Ambio* 49 (1): 85-97. - doi: [10.1007/s13280-019-01190-1](https://doi.org/10.1007/s13280-019-01190-1)
- Iovino F, Borghetti M, Veltri A (2009). Foreste e ciclo dell'acqua. *Forest@* 6: 256-273. - doi: [10.3832/efor0583-006](https://doi.org/10.3832/efor0583-006)
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. In: Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Yohe GV eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, pp. 1132. [online] URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- Jarvis PG, McNaughton KG (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research* 15: 1-49. - doi: [10.1016/S0065-2504\(08\)60119-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60119-1)
- Jones SM, Bottero A, Kastendick DN, Palik BJ (2019). Managing red pine stand structure to mitigate drought impacts. *Dendrochronologia* 57. - doi: [10.1016/j.dendro.2019.125623](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125623)
- Kattge J, Iaz D S, Lavorel S, Prentice IC, Leadley P, Onisch B G, Garnier E, Westoby M, Reich PB, Wright IJ, Cornelissen JH, Violle C, Harrison SP, Van Bodegom PM, Reichstein M, Enquist BJ, Soudzilovskaia NA, Ackerly DD, Anand M, Atkin O, Bahn M, Baker TR, Baldocchi D, Bekker R, Blanco CC, Blonder B, Bond WJ, Bradstock R, Bunker DE, Casanoves F, Cavender-Bares J, Chambers JQ, Chapin III FS, Chave J, Coomes D, Cornwell WK, Craine JM, Dobrin BH, Duarte L, Durka W, Elser J, Esser G, Estiarte M, Fagan WF, Fang J, FernAndez-Endez M F, Fidelis A, Finegan B, Flores O, Ford H, Frank D, Freschet GT, Fyllas NM, Gallagher RV, Green WA, Gutierrez AG, Hickler T, Higgins SI, Hodgson JG, Jalili A, Jansen S, Joly CA, Kerkhoff AJ, Kirkup D, Kitajima K, Kleyer M, Klotz S, Knops JM, Kramer K, Uhn K I, Kurokawa H, Laughlin D, Lee TD, Leishman M, Lens F, Lenz T, Lewis SL, Lloyd J, Llusià AJ, Louault F, Ma S, Mahecha MD, Manning P, Massad T, Medlyn BE, Messier J, Moles AT, Uller M SC, Nadrowski K, Naeem S, Niinemets U, Ollert N S, Uske N A, Ogaya R, Oleksyn J, Onipchenko VG, Onoda Y, Ordoñez J, Overbeck G, Ozinga WA, Patiño S, Paula S, Pausas JG, Peñuelas J, Phillips OL, Pillar V, Poorter H, Poorter L, Poschlod P, Prinzing A, Proulx R, Rammig A, Reinsch S, Reu B, Sack L, Salgado-Negret B, Sardans J, Shiodera S, Shipley B, Siefert A, Sosinski E, Soussana JF, Swaine E, Swenson N, Thompson K, Thornton P, Waldram M, Weiher E, White M, White S, Wright SJ, Yguel B, Zaehle S, Zanne AE, Wirth C (2011). TRY - a global database of plant traits. *Global Change Biology* 17 (9): 2905-2935. - doi: [10.1111/gcb.v17.9](https://doi.org/10.1111/gcb.v17.9)
- Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, Colace M-P, Garden D, Girel J, Pellet G, Douzet R (2011). Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology* 99: 135-147. - doi: [10.1111/j.1365-2745.2010.01753.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01753.x)
- Lechuga V, Carraro V, Viñepla B, Carreira JA, Linares JC (2017). Managing drought-sensitive forests under global change. Low competition enhances long-term growth and water uptake in Abies pinsapo. *Forest Ecology and Management* 406: 72-82. - doi: [10.1016/j.foreco.2017.10.017](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.017)
- Liang J, Crowther TW, Picard N (2016). Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* 354 (aaf8957). - doi: [10.1126/science.aaf8957](https://doi.org/10.1126/science.aaf8957)
- Magnani F, Grace J, Borghetti M (2002). Adjustment of tree structure in response to the environment under hydraulic constraints. *Functional Ecology* 16: 385-393. - doi: [10.1046/j.1365-2435.2002.00630.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00630.x)
- Mancilla Leytón JM, Martín Vicente A (2012). Biological fire prevention method: Evaluating the effects of goat grazing on the fire-prone mediterranean scrub. *Forest Systems* 21: 199-204. - doi: [10.5424/fs/2012212-02289](https://doi.org/10.5424/fs/2012212-02289)
- Manrique-Alba A, Beguería S, Molina AJ, González-Sanchis M, Tomàs-Burguera M, Del Campo AD, Colangelo M, Camarero JJ (2020). Long-term thinning effects on tree growth, drought response and water use efficiency at two Aleppo pine plantations in Spain. *Science of the Total Environment* 7281. - doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.138536](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138536)
- Marchetti M, Motta R, Pettenella D, Sallustio L, Vacchiano G (2018). Le foreste e il sistema foresta-legno in Italia: verso una nuova strategia per rispondere alle sfide interne e globali. *Forest@* 15: 41-50. - doi: [10.3832/efor2796-015](https://doi.org/10.3832/efor2796-015)
- McDowell NG, Allen CD, Anderson-Teixeira K, Aukema BH, Bond-Lamberty B, Chini L, Clark JS, Dietze M, Grossiord C, Hanbury-Brown A, Hurtt GC, Jackson RB, Johnson DJ, Kueppers L, Lichstein JW, Ogle K, Poulter B, Pugh TA, Seidl R, Turner MG, Uriarte M, Walker AP, Xu C (2020). Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science* 368 (6494): eaaz9463. - doi: [10.1126/science.aaz9463](https://doi.org/10.1126/science.aaz9463)
- Mencuccini M, Minunno F, Salmon Y, Martínez-Vilalta J, Hölttä T (2015). Coordination of physiological traits involved in drought-induced mortality of woody plants. *New Phytologist* 208: 396-409. - doi: [10.1111/nph.13461](https://doi.org/10.1111/nph.13461)
- Michalet R, Delerue F, Liancourt P, Pugnaire FI (2021). Are complementarity effects of species richness on productivity the strongest in species-rich communities? *Journal of Ecology* 109:

2038-2046. - doi: [10.1111/1365-2745.13658](https://doi.org/10.1111/1365-2745.13658)

Navarro-Cerrillo RM, Sánchez-Salguero R, Rodriguez C, Duque Lazo J, Moreno-Rojas JM, Palacios-Rodriguez G, Camarero JJ (2019). Is thinning an alternative when trees could die in response to drought? The case of planted *Pinus nigra* and *P. sylvestris* stands in southern Spain. *Forest Ecology and Management* 433: 313-324. - doi: [10.1016/j.foreco.2018.11.006](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.006)

Nocentini S, Ciancio O, Portoghesi L, Corona P (2020). Historical roots and the evolving science of forest management under a systemic perspective. *Canadian Journal of Forest Research* 5: 163-171. - doi: [10.1139/cjfr-2020-0293](https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0293)

Puettmann KJ, Messier C (2020). Simple guidelines to prepare forests for global change: the dog and the frisbee. *Northwest Science* 93: 209-225. - doi: [10.3955/046.093.0305](https://doi.org/10.3955/046.093.0305)

Ripullone F, Camarero JJ, Colangelo M, Voltas J (2020). Variation in the access to deep soil water pools explains tree-to-tree differences in drought-triggered dieback of Mediterranean oaks. *Tree Physiology* 40: 591-604. - doi: [10.1093/treephys/tpaa026](https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa026)

Rita A, Borghetti M (2019). Linkage of forest productivity to tree diversity under two different bioclimatic regimes in Italy. *Science of the Total Environment* 687: 1065-1072. - doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.06.194](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.194)

Rita A, Camarero JJ, Nolè A, Borghetti M, Brunetti M, Pergola N, Serio C, Vicente-Serrano SM, Tramutoli V, Ripullone F (2020). The impact of drought spells on forests depends on site conditions: the case of 2017 summer heat wave in southern Europe. *Global Change Biology* 26: 851-863. - doi: [10.1111/gcb.v26.2](https://doi.org/10.1111/gcb.v26.2)

Rita A, Bonanomi G, Allevato E, Borghetti M, Cesarano G, Moga-vero V, Rossi S, Saulino L, Zotti M, Saracino A (2021). Topography modulates near-ground microclimate in the Mediterranean *Fagus sylvatica* treeline. *Scientific Reports* 11: 812. - doi: [10.1038/s41598-021-87661-6](https://doi.org/10.1038/s41598-021-87661-6)

Roberts J (1983). Forest transpiration: a conservative hydrologi-

cal process? *Journal of Hydrology* 66: 133-141. - doi: [10.1016/0022-1694\(83\)90181-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90181-6)

Senf C, Buras A, Zang CS, Ramming A, Seidl R (2020). Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications* 11: 6200. - doi: [10.1038/s41467-020-19924-1](https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1)

Tyree MT, Ewers FW (1991). The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist* 119: 345-360. - doi: [10.1111/j.1469-8137.1991.tb00035.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00035.x)

Tyree MT, Sperry JS (1988). Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress? *Plant Physiology* 88: 574-80. - doi: [10.1104/pp.88.3.574](https://doi.org/10.1104/pp.88.3.574)

Tyree MT, Zimmermann MH (2002). *Xylem structure and the ascent of sap* (2nd edn). Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany. - doi: [10.1007/978-3-662-04931-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04931-0)

Van Mantgem PJ, Kerhoulas L, Sherriff RL, Wenderott ZJ (2020). Tree-ring evidence of forest management moderating drought responses: implications for dry, coniferous forests in the Southwestern United States. *Frontiers in Forests and Global Change* 3: 41. - doi: [10.3389/ffgc.2020.00041](https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00041)

Venturas MD, Todd HN, Trugman AT, Anderegg WRL (2021). Understanding and predicting forest mortality in the western United States using long-term forest inventory data and modeled hydraulic damage. *New Phytologist* 230: 1896-1910. - doi: [10.1111/nph.17043](https://doi.org/10.1111/nph.17043)

WCRC (2021). Letter regarding use of forests for bioenergy. Woodwell Climate Research Center, MS, USA. [online] URL: <http://www.woodwellclimate.org/letter-regarding-use-of-forests-for-bioenergy/>

Zimmermann MT (1983). *Xylem structure and the ascent of sap*. Springer-Verlag, New York, USA. - doi: [10.1007/978-3-662-22627-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-22627-8)