

# Modele dendroclimatice pentru molid, brad și fag în Carpații Orientali

I. Popa, A. Popa, M. Balabașciuc

**Popa I., Popa A., Balabașciuc M., 2024.** Dendroclimatic models for Norway spruce, silver fir and European beech in the Eastern Carpathians. *Bucov. For.* 24(2): 107-118

**Abstract.** The study of climate-growth relationships on regional dendrochronological networks developed along altitudinal or climatic gradients allows to capture the general patterns as well as inherent variability. This study analyzes the variability of the climate-growth relationships for Norway spruce, silver fir, and European beech along an altitudinal gradient in a recently developed network of dendrochronological series from the Eastern Carpathians. The dendrochronological network includes 158 Norway spruce stands, 83 silver fir stands, and 79 European beech stands, distributed along an altitudinal gradient ranging from 475 m to 1670 m. The quantification of the relationship between growth indices and mean temperature, as well as precipitation, was carried out using the Spearman non-parametric correlation coefficient over cumulative periods of varying lengths (20 to 120 days) from July of the year preceding the formation of the annual ring to September of the current growing season. The dendroclimatic patterns for each species and elevational class are expressed through the mean value of statistically significant correlation coefficients and the percentage of plots with statistically significant correlations. In the northern Eastern Carpathians, at elevations below 1100 m, summer water deficit is the main limiting factor for the growth of Norway spruce, silver fir, and European beech, whereas the autumn precipitation from the previous year is also a limiting factor for conifers. Warm winters and springs favor the growth processes of silver fir and Norway spruce. Summer temperature positively correlates with growth indices for Norway spruce in high-elevation stands and negatively with radial growth of silver fir, regardless of altitude. The implementation of adaptive forest management measures specific to climate-smart forestry must consider the variability of the tree response to the variation of climatic factors, both at the species level and with the climatic gradients.

**Keywords:** *Picea abies*, *Abies alba*, *Fagus sylvatica*, daily climate data, tree ring width

**Authors.** Ionel Popa - “Marin Drăcea” National Research-Development Institute in Forestry, Station Câmpulung Moldovenesc, 73bis, Calea Bucovinei, 725100 Câmpulung Moldovenesc, Romania; Mountain Economy Center, Petreni Street 49, 725700, Vatra Dornei, România; Andrei Popa - “Marin Drăcea” National Research-Development Institute in Forestry, Station Câmpulung Moldovenesc; Faculty of Silviculture and Forest Engineering, Transilvania University of Brașov; Mihai Balabașciuc - “Marin Drăcea” National Research-Development Institute in Forestry, Station Câmpulung Moldovenesc.

**Manuscript** received August 29, 2024; revised September 25, 2024; accepted September 26, 2024; online first October 29, 2024.

## Introducere

Durata și intensitatea proceselor fiziologice ale arborilor sunt rezultatul interacțiunii dintre disponibilitatea resurselor de mediu (lumină, apă, temperatură, substanțe nutritive etc.) și structura genetică a speciei, respectiv a individului (Fritts 1976). Un indicator direct al dinamicii proceselor fiziologice este reprezentat de cantitatea de biomasă acumulată într-un interval de timp (Poorter et al. 2012). În cazul speciilor lemnoase creșterea anuală, în diametru sau în înălțime, respectiv valori derivate ale acestora (creșterea în suprafață de bază sau volum), constituie parametrii dendrometrici cei mai utilizați pentru estimarea indirectă a intensității proceselor fiziologice de acumulare de biomasă (Biondi și Qeadan 2008, Bosela et al. 2023, Pretzsch 2021).

Variabilitatea factorilor climatici, prin influența directă asupra duratei și intensității proceselor fiziologice, contribuie semnificativ la dinamica proceselor de creștere (Kozłowski și Pallardy 1996). Direcția și intensitatea relației dintre factorii climatici și procesele de creștere radială variază spațial și temporal, cu particularități la nivel de specie (Babst et al. 2019). Informațiile și cunoștințele derivate din studiile dendroclimatologice, la nivel punctual sau pe rețele dendrocronologice permit înțelegerea reacției arborilor, respectiv a capacității lor de reziliență și adaptare la schimbările climatice (Aldea et al. 2022, Popa et al. 2024b, Vitali et al. 2017), oferind în același timp un suport științific esențial pentru adaptarea măsurilor de management forestier (Bowditch et al. 2020).

Cercetările dendroclimatologice realizate pe rețele dendrocronologice la scară continentală sau globală permit evidențierea unor tendințe generale privind tiparele de răspuns dendroclimatic și variabilitatea temporală a acestora (Babst et al. 2019, 2013, Bose et al. 2021), însă fără a reflecta specificul regional sau local (Jevšenak et al. 2021; Popa et al. 2022, 2021). Rețele dendrocronologice la nivel regional, distribuite spațial pe gradienti altitudinali sau climatici (Popa et al. 2024a, Sidor et al. 2015),

permit surprinderea mult mai precisă a particularităților regionale și sunt utile în implementarea măsurilor silviculturale inteligente climatice și adaptate specificului local și regional (Bowditch et al. 2020, Tognetti et al. 2022).

Molidul, bradul și fagul constituie principalele specii forestiere din Carpați cu rol determinant în furnizarea serviciilor ecosistemice și a menținerii stabilității ecologice pe termen lung (Stanescu et al. 1997). Având în vedere importanța economică, ecologică și socială, aceste specii forestiere au făcut obiectul a numeroase studii și cercetări dendroclimatologice atât la nivel regional (printre altele, pentru molid (Levanič et al. 2009; Ponocná et al. 2018, Sidor et al. 2015), pentru brad (García-García et al. 2023; Semeniuc Fecioru et al. 2024, Vějpustková et al. 2023), pentru fag (Roibu et al. 2022, Van Der Maaten et al. 2024) cât și în cadrul unor rețele cu extindere continentală sau globală (Babst et al. 2019, Bosela et al. 2021, Martínez Del Castillo et al. 2022, Schurman et al. 2019). Ritmul alert al schimbărilor climatice din ultimele decenii impun actualizarea rezultatelor cercetărilor dendroclimatologice anterioare și reviziunea concluziilor și recomandărilor dacă se impune.

În acest context al necesității obținerii de informații dendroclimatice actualizate, relevante la nivel regional, obiectivul prezentului studiu este reprezentat de analiza variabilității relației dintre creșterea radială și factorii climatici pentru molid, brad și fag, de-a lungul unui gradient altitudinal, pe o rețea de serii dendrocronologice actualizată din Carpații Orientali.

## Material și metode

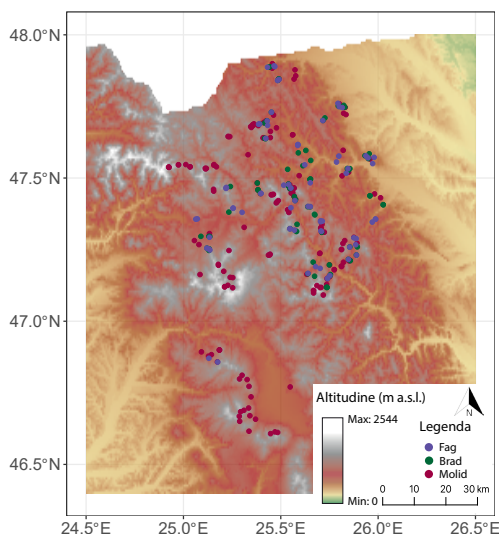
Rețeaua dendrocronologică pentru molid, brad și fag a fost amplasată în arborete supuse managementului forestier activ din nordul Carpaților Orientali (46°36'27"N - 47°53'57"N, 24°55'26"E - 26°01'34"E) acoperind un gradient altitudinal cuprins între 475 m și 1670 m (Figura 1). Cercetările s-au derulat într-un număr total de 320 arborete (158 pentru molid, 83 pentru

brad și 79 pentru fag), cu vârste medii cuprinse între 40 ani și 233 ani la molid, 41 ani și 185 ani la brad, respectiv 39 ani și 257 ani la fag.

În fiecare suprafață de cercetare s-au ales, în mod aleatoriu, un număr de 20-22 arbori dominanți și co-domanți, fără defecte vizibile, cu o stare de vegetație bună. Din fiecare arbore selectat s-a extras o singură carotă de creștere, de la înălțimea de 1,30 m, perpendicular pe linia de cea mai mare pantă, pentru a evita zonele cu lemn de reacție (Popa 2004). Probele de creștere au fost păstrate în suporturi de polycarbonat pe timpul transportului din teren și pe durata perioadei de uscare. După uscarea naturală timp de 2-3 săptămâni, carotele de creștere au fost montate pe suporturi de lemn speciali și șlefuite cu benzi abrazive cu granulații diferite în vederea evidențierii limitei dintre inelele anuale. Lățimea inelelor anuale a fost măsurată cu o precizie de 0,01 mm, pe imagini digitale obținute prin scanarea la o rezoluție optică de 2400 dpi, în programul informatic CooRecorder (Cybis Elektronik & Data AB, Sweden). Măsurătorile individuale au fost verificate și interdate prin comparație grafică cu seria medie la nivel de suprafață de cercetare coroborată cu analiza corelației pe perioade succesive de 50 de ani cu intervale comune de 25 de ani cu programul COFECHA (Grissino-Mayer 2001).

Seriile de creștere radială individuale au fost standardizate cu o funcție teoretică de tip spline cubică cu lungime de 30 de ani în vederea limitării influenței vârstei și a altor factori perturbatori (Cook & Kairiukstis 1990). Indicii de creștere s-au calculat drept raport între valorile măsurate și cele estimate prin modelul matematic teoretic. În vederea eliminării autocorelației reziduale s-a aplicat un model autoregresiv la seria de indici de creștere medie obținută pe baza mediei bponderate a seriilor de indici de creștere individuali (Cook 1985).

Pentru evidențierea variabilității la nivel de serie dendrocronologică s-a calculat abaterea standard a indicilor de creștere reziduali, pentru perioada 1951-2022. Testarea semnificației diferențelor între specii, respectiv clase de altitudine, a abaterilor standard a indicilor de



**Figura 1** Rețeaua de suprafețe de cercetare dendrocronologică pentru molid, brad și fag din nordul Carpaților Orientali

*The network of dendrochronological plots for Norway spruce, silver fir, and European beech in the north of the Eastern Carpathians*

creștere reziduali s-a realizat cu testul non-parametric Kruskal–Wallis (McKight & Najab 2010) și testul rangurilor Wilcoxon cu corecția Bonferroni (Feltovich 2003).

Pentru a se asigura o reprezentativitate maximă a datelor climatice zilnice (temperatură medie și precipitații) la nivelul rețelei dendrocronologice s-a utilizat baza de date easyclimate cu o rezoluție spațială de 1x1 km, pentru perioada 1951-2022 (Cruz-Alonso et al. 2023).

La nivelul fiecărei suprafețe de cercetare din cadrul rețelei dendrocronologice s-a calculat corelația neparametrică Spearman dintre indicii de creștere radială reziduali și parametrii climatici (temperatură și precipitații) pentru perioade cu lungime cuprinsă între 20 și 120 de zile, în intervalul de timp dintre luna iulie anul precedent formării inelului anual și luna septembrie din sezonul de vegetație curent (Jevšena 2020, Jevšenak și Levanič 2018). Testarea semnificației statistice a coeficienților de corelație neparametrică Spearman s-a realizat prin metoda bootstrap cu 1000 de repetiții (Efron și Tibshirani 1986).

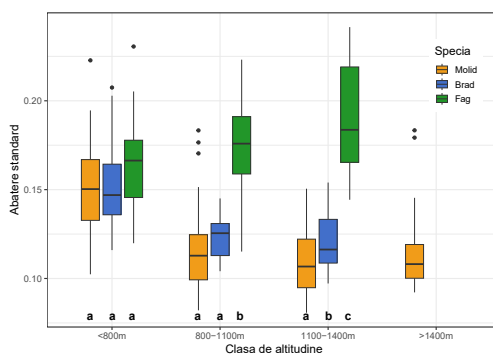
Pentru evidențierea tiparelor specifice pentru fiecare specie și a variabilității în raport cu gradientul altitudinal, suprafețele de cercetare au fost grupate în patru clase altitudinale: <800 m (molid – 30 arborete, brad – 30 arborete, fag – 25 arborete), 801-1100 m (molid – 40 arborete, brad – 35 arborete, fag – 34 arborete), 1101 – 1400 m (molid – 46 arborete, brad – 18 arborete, fag – 20 arborete) și >1400 m (molid – 42 arborete). Modelul dendroclimatic specific pentru fiecare clasă altitudinală este caracterizat prin procentul sondajelor cu coeficienți de corelație semnificativi din punct de vedere statistic și media coeficienților de corelație semnificativi statistic. Variabilitatea modelului dendroclimatic între seriile dendrocronologice s-a cuantificat prin intermediul coeficientului de variație a coeficienților de corelație (CV). În prezentarea grafică a rezultatelor s-a impus un prag minim de 25% a proporției suprafețelor experimentate cu valori semnificative ale coeficienților de corelație.

## Rezultate

### Variabilitatea abaterii standard a indicilor de creștere radială

La altitudini joase (<800 m) nu sunt diferențe semnificative statistic între specii în ceea ce privește valorile abaterilor standard a indicilor de creștere reziduali (Figura 2), fagul înregistrând totuși valori mai mari comparativ cu rășinoasele. La molid și brad variabilitatea indicilor de creștere radială scade odată cu creșterea altitudinii, iar la fag se observă o creștere a valorilor abaterii standard în raport cu altitudinea. Fagul se diferențiază semnificativ statistic de rășinoasele celelalte clase altitudinale, iar molidul față de brad numai în cazul clasei de altitudine 1101-1400 m. Variabilitatea abaterii standard a indicilor de creștere între suprafețele de cercetare este mai mare la fag comparativ cu rășinoasele.

În cazul seriilor dendrocronologice pentru brad și molid de la altitudini joase abaterea



**Figura 2** Variația abaterii standard a indicilor de creștere radială în raport cu specia și clasele de altitudine. Literele indică diferențe semnificative în baza testului Wilcoxon ( $p < 0,05$ )

*Variation of standard deviation of radial growth indices in relation to species and elevational classes. Letters indicate significant differences based on the Wilcoxon test ( $p < 0.05$ )*

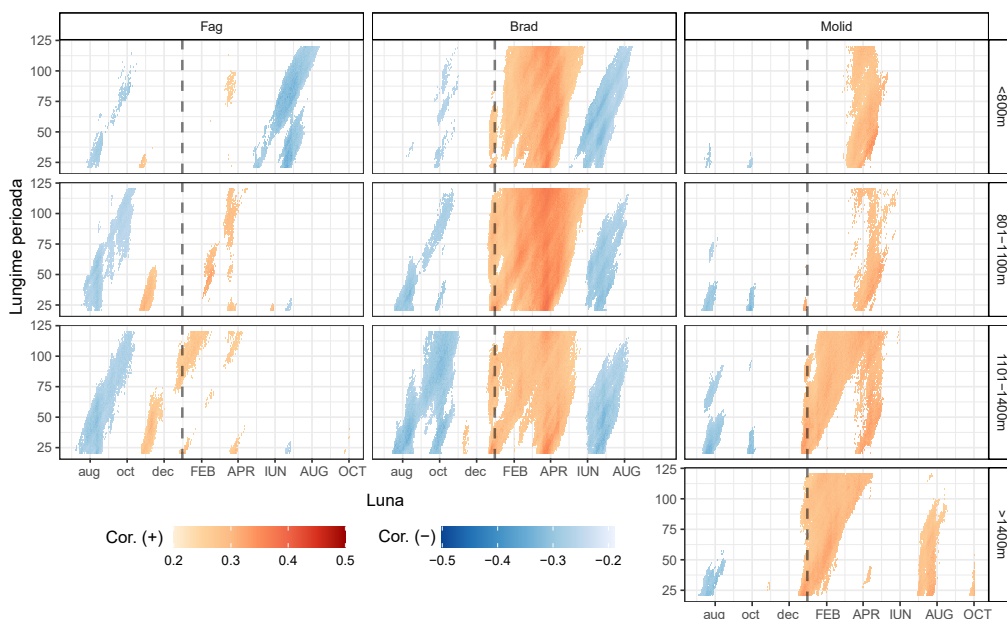
standard a indicilor de creștere este semnificativ mai mare comparativ cu valorile înregistrate în cazul celorlalte clase de altitudine. La fag s-au observat diferențe semnificative numai între clasele altitudinale extreme.

### Modele dendroclimatic pentru molid, brad și fag în raport cu clasele de altitudine

Atât regimul termic cât și cantitatea de precipitații reprezintă factori de mediu cu influență semnificativă asupra proceselor de creștere pentru speciile forestiere analizate din Carpații Orientali. Se remarcă o variabilitate a tiparelor dendroclimatic în raport cu specia și clasa de altitudine.

Temperatura din vara și toamna precedentă se corelează negativ și semnificativ statistic în cazul bradului și fagulului, mai ales la altitudini de peste 800 m (Figura 3). Corelațiile medii maxime dintre indicii de creștere și regimul termic din anul precedent variază între  $r = -0,322$  (CV – 13,3%) (20 iunie – 11 august) la fag (65% din suprafețele de cercetare) și  $r = -0,345$  (CV – 16,9%) (8 iulie – 11 august) la brad (88% din suprafețele de cercetare), în ambele cazuri aferente clasei de altitudine 1101 – 1400 m.

În cazul molidului se remarcă două tipare



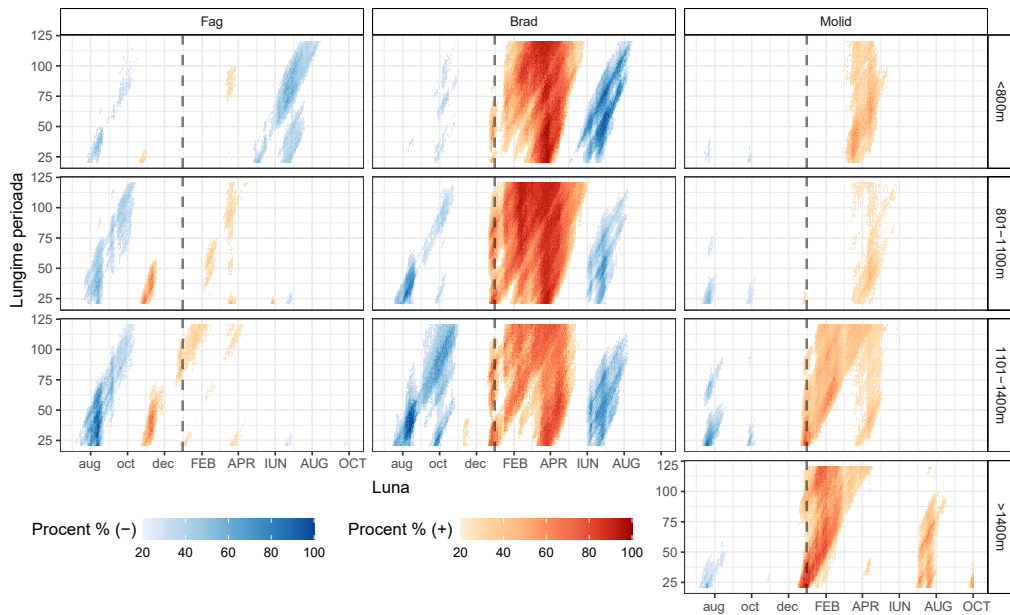
**Figura 3** Corelația neparametrică Spearman periodică medie dintre indicii de creștere și temperatura medie. Linia gri verticală reprezintă limita între anul anterior (litere mici) și anul curent (litere mari)  
*Mean Spearman nonparametric correlation between growth indices and mean temperature. The vertical gray line represents the boundary between the previous year (in lowercase) and the current year (in uppercase)*

dendroclimatice diferite în raport cu temperatura din anul curent formării inelului anual. Un prim model dendroclimatic este caracterizat de o corelație pozitivă a temperaturilor din primăvară cu indici de creștere, specific arborilor de la altitudini mai mici de 1100 m, cu o corelație maximă de  $r = 0,354$  (CV – 20%) (5 martie și 13 aprilie). Creșterea radială a molidului de la altitudini mai mari de 1100 m se corelează pozitiv și semnificativ statistic cu temperatura din timpul sezonului rece, proporția suprafețelor de cercetare cu valori semnificative ale coeficientului de corelație fiind mai mare cu creșterea altitudinii (Figura 4). Valoarea maximă a corelației medii specifice sezonului rece este  $r = 0,331$  (CV – 16,7%) (10 decembrie – 28 ianuarie), cu valori semnificative statistic în 74% din seriile dendrocronologice pentru molid. În plus la altitudini mari (>1400 m) se observă o corelație pozitivă și semnificativă statistic a indicilor de creștere cu regimul termic din timpul verii, cu valori maxime între 1 iulie – 24 iulie ( $r = 0,331$ , CV – 17,9%).

La brad modelul dendroclimatic din anul formării inelului anual este similar pentru toate clasele de altitudine și este dominat de o corelație pozitivă cu temperatura din sezonul rece și primăvară (peste 80% din suprafețele de cercetare au valori semnificative statistic), respectiv o corelație negativă cu regimul termic din timpul verii (Fig. 3). Cele mai mari corelații medii se constată pentru perioada 3 martie – 24 martie ( $r = 0,387$ , CV – 17,7%, 91% din seriile dendrocronologice) și 10 mai – 27 iunie ( $r = -0,340$ , CV – 13,9%, 66% din sondaje).

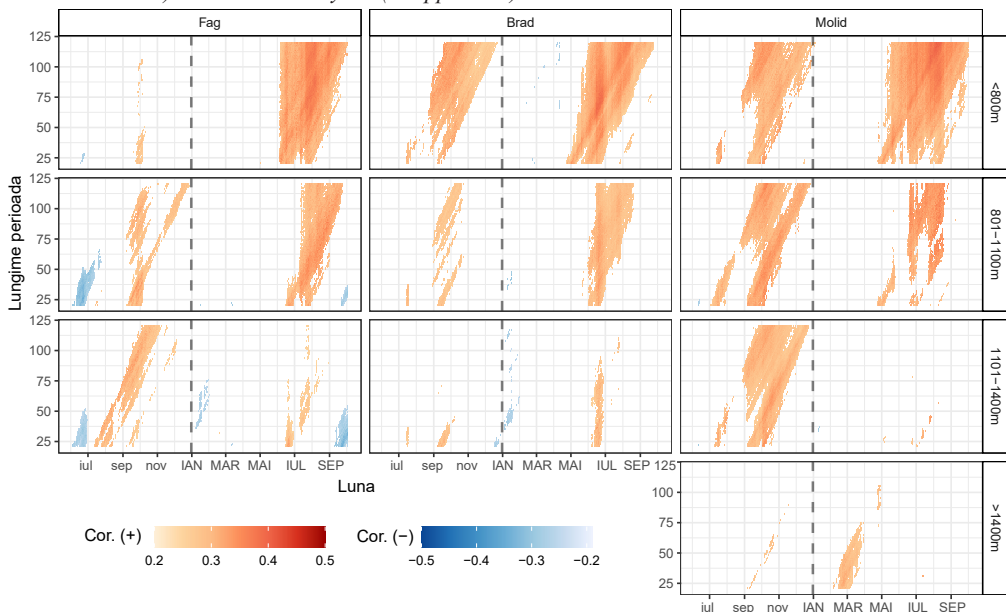
Temperatura medie din timpul verii se corelează negativ cu creșterea radială a fagului numai pentru suprafețele de cercetare de la altitudini joase (<800 m), cu valori maxime pentru perioada 31 mai – 22 iunie ( $r = -0,353$ , CV – 15,1%, 44% din seriile dendrocronologice).

Deficitul de precipitații din vara și toamna precedentă reprezintă un factor limitativ evident pentru creșterea radială la molid pentru altitudini mai mici de 1400 m, respectiv



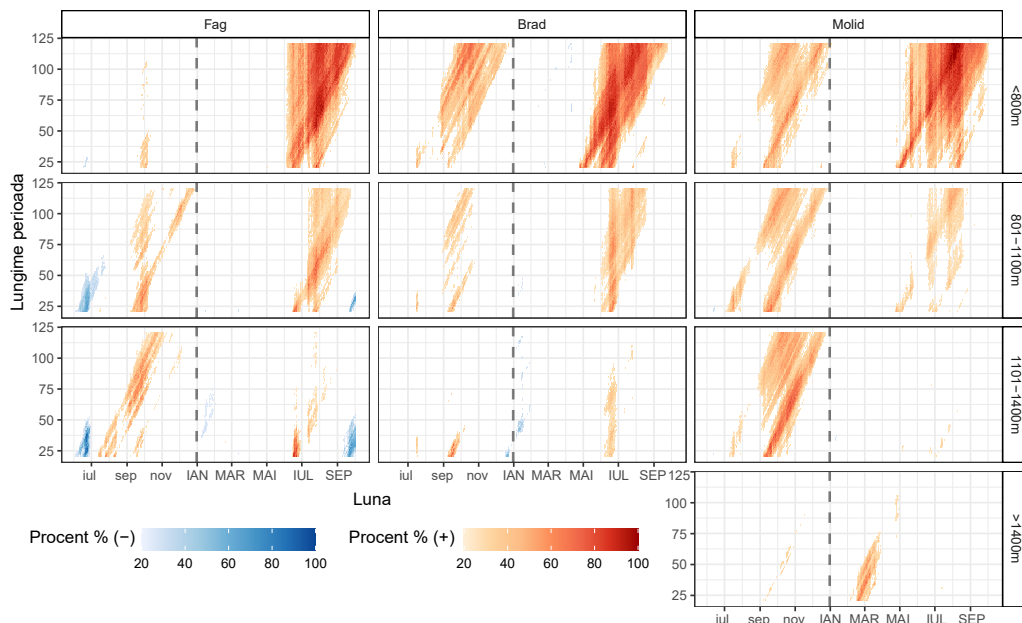
**Figura 4** Procentul suprafețelor de cercetare cu corelații periodice între indicii de creștere radială și temperatura medie semnificative statistic. Linia gri verticală reprezintă limita între anul anterior (litere mici) și anul curent (litere mari)

*Percentage of plots with statistically significant correlations between radial growth indices and mean temperature. The vertical gray line represents the boundary between the previous year (in lowercase) and the current year (in uppercase)*



**Figura 5** Corelația neparametrică Spearman periodică medie dintre indicii de creștere și precipitații. Linia gri verticală reprezintă limita între anul anterior (litere mici) și anul curent (litere mari)

*Mean Spearman nonparametric correlation between growth indices and precipitation. The vertical gray line represents the boundary between the previous year (in lowercase) and the current year (in uppercase)*



**Figura 6** Procentul suprafețelor de cercetare cu corelații periodice între indicii de creștere radială și precipitații semnificative statistic. Linia gri verticală reprezintă limita între anul anterior (litere mici) și anul curent (litere mari)

*Percentage of plots with statistically significant correlations between radial growth indices and precipitation. The vertical gray line represents the boundary between the previous year (in lowercase) and the current year (in uppercase)*

brad la altitudini sub 800 m (Figura 5). Valorile maxime ale coeficientului de corelație dintre indicii de creștere și nivelul precipitațiilor din anul precedent este de  $r = 0,355$  (CV – 20,2%) (22 iunie – 18 octombrie) la brad, respectiv  $r = 0,366$  (CV – 21,6%) (2 septembrie – 7 octombrie) pentru molid.

Pentru toate cele trei specii forestiere analizate precipitațiile din timpul verii se corelează pozitiv și semnificativ statistic cu procesele de creștere radială numai la altitudini sub 1100 m. Corelația maximă variază între  $r = 0,406$  (CV – 19,4%) (10 aprilie – 6 august, 93% din sondaje) la molid,  $r = 0,400$  (CV – 16,2%) (11 aprilie – 22 iunie, 90% din seriile dendrocronologice) pentru brad și  $r = 0,385$  (CV – 20,8%) (12 mai – 5 august, 84% din sondaje) pentru fag. Frecvența corelațiilor pozitive cu precipitațiile din timpul verii în cadrul rețelei dendrocronologice analizate este maximă la altitudini joase, pentru toate speciile analizate (peste 80% din suprafețele

de cercetare au valori semnificative statistice) (Figura 6). La altitudini peste acest prag (1100 m) regimul precipitațiilor din timpul sezonului de vegetație curent nu mai reprezintă un factor de creștere limitativ. În cazul molidului de la altitudini mari (peste 1400 m) precipitațiile din perioada februarie-martie se corelează pozitiv și semnificativ statistic cu indicii de creștere radială, cu valori medii maxime de  $r = 0,325$  (CV – 17,1%) (30 ianuarie – 24 februarie).

### Discuții

Evaluarea relației dintre procesele de creștere radială (indici de creștere) și factorii climatici se bazează, în mod frecvent, pe cuantificarea corelației liniare de tip Pearson, calculată la nivel lunar sau sezonier (Fritts 1976). Utilizarea unor intervale de timp mai flexibile este adeseori limitată de disponibilitatea datelor climatice cu rezoluție temporală ridicată (zilnice

sau orare). Combinarea intervalelor de timp cu lungime variabilă (între 20 de zile și 120 de zile în studiu de față) cu o deplasare temporală continuă a acestor intervale, cu un pas zilnic, în timpul anului curent și precedent, creează premisa unei evidențieri mai clare a perioadelor de timp cu influență semnificativă asupra proceselor de creștere. În acest fel sunt depășite barierele subiective impuse de împărțirea anului calendaristic în luni, concomitent cu explorarea efectului cumulativ al factorilor climatici asupra proceselor fiziologice (Beck et al. 2013, Jevšenak 2019, Jevšenak et al. 2024).

Formularea de concluzii și recomandări în baza unor studii dendroclimatologice punctuale, derivate dintr-un număr redus de suprafețe de cercetare, au aplicabilitate numai la nivelul arboretelor analizate și nu permit generalizări la nivel regional sau național. Aceste studii punctuale nu surprind variabilitatea inerentă indusă de gradientii altitudinali, climatici sau variabilitatea condițiilor staționale. Cercetările dendroclimatologice realizate pe rețele de serii dendrocronologice, cu densitate variabilă în raport cu extinderea spațială a acestora, permit obținerea de informații cu posibilități de generalizare la nivel regional, național sau continental. Surprinderea particularităților locale și regionale existente în relația dintre procesele de creștere radială și factorii de mediu este posibilă numai prin implementarea unor rețele dendrocronologice care integrează gradientii climatici (altitudinali).

Utilizarea seriilor dendrocronologice medii pentru un anumit interval altitudinal sau regiune, procedură comună în cadrul studiilor dendroclimatologice realizate pe rețele dendrocronologice (Ponocná et al. 2016), oferă informații limitate privind tiparul dendroclimatic, respectiv nu oferă nici un indiciu referitor la variabilitatea între seriile dendrocronologice. Definirea tiparelor dendroclimatice prin valoarea medie a corelațiilor semnificative coroborate cu procentul suprafețelor de cercetare care înregistrează valori semnificative pentru un anumit interval de timp, respectiv coeficientul

de variație al coeficienților de corelație, ține cont de variabilitatea la nivelul rețelei și creează cadrul unei interpretări corecte a relevanței relației statistice dintre creștere și factorii climatici.

Privite în ansamblu, modelele dendroclimatice pentru molid și brad sunt dominate de un răspuns pozitiv la temperaturile din perioada de iarnă – primăvară fără a se evidenția variații semnificative în raport cu altitudinea. Deficitul de precipitații din sezonul de vegetație curent, respectiv cel din toamna precedentă pentru brad și molid, este principalul factor limitativ al proceselor de creștere radială pentru speciile analizate la altitudini mai mici de 1100 m. În raport cu specia se disting unele particularități atât în ceea ce privește corelația medie dintre indici de creștere radială și principalii factori climatici (temperatură și precipitații), dar mai ales sub raportul variabilității la nivel de rețea dendrocronologică a intensității acestei relații statistice.

La altitudini și latitudini mari temperatura și lungimea sezonului de vegetație reprezintă principalii factori limitativi ai proceselor de bioacumulare (Camarero et al. 2021), fapt evidențiat de rezultatele noastre numai în cazul molidului de la altitudini mai mari de 1400 m. Contrar, în cazul bradului temperaturile ridicate din timpul verii sunt asociate cu lățimi mai reduse ale inelelor anuale. Intensificarea proceselor de transpirație și evapotranspirație, determinate de temperaturile ridicate, pe fondul unei compensări limitate de rezervele de apă din sol, poate avea efecte negative asupra proceselor auxologice prin intensificarea fenomenelor de secetă (Rennenberg et al. 2006). În cazul bradului această asociere a efectului negativ al temperaturilor și pozitiv al precipitațiilor din timpul verii pare să fie un fenomen frecvent la nivel european (Gazol et al. 2015, Lebourgeois et al. 2010, Šimůnek et al. 2023). Același tip de corelație negativă cu temperatura din timpul sezonului de vegetație curent se observă în cazul fagului de la altitudini mai mici de 800 m.

Temperaturile ridicate din timpul primăverii determină un debut mai rapid al proceselor fiziologice și de creștere, conducând la un sezon

de vegetație mai lung și implicit având efecte pozitive asupra proceselor de bioacumulare, respectiv a lățimii inelului anual (Hu et al. 2010). Acest efect pozitiv al temperaturilor din primăvară asupra creșterii radiale este evident la molid și brad la altitudini mai mici de 1400 m, fiind confirmat și de alte studii similare (Bosela et al. 2016, Sidor et al. 2015, Valeriano et al. 2023).

Temperatura din timpul iernii joacă un rol important în procesele de creștere radială la brad, indiferent de altitudine, respectiv la molid la altitudini mai mari de 1100 m. Tiparul dendroclimatic este caracterizat de corelații pozitive, relativ puternice, prezente în majoritatea suprafețelor de cercetare analizate. Rezultatele similare au fost raportate în Carpați (Adamič et al. 2023, Popa et al. 2022) și alte zone muntoase din Europa (Begović et al. 2020, Carrer et al. 2012). Temperaturile pozitive din timpul ierni, mai ales la altitudini joase, pot fi asociate cu o activitate microbiologică activă în sol și la nivelul microrizelor. Gerurile puternice din timpul iernii, coroborate cu perioade lungi de temperaturi negative pe tot parcursul zilei determină o creștere a incidenței proceselor de deshidratare de iarnă și modificări în dinamica hormonilor (Lens et al. 2013, Mayr et al. 2020). Pe de altă parte, efectul negativ al temperaturilor ridicate din vara precedentă poate fi legat de formarea mugurilor (începând cu luna iulie) și alocarea resurselor în anii cu fructificație (Hacket-Pain et al. 2019, 2015).

Procesele de creștere radială sunt puternic dependente de disponibilitatea apei din sol, influența pozitivă a precipitațiilor, mai ales la altitudini joase, este foarte bine documentată în literatura de specialitate atât pentru molid (Svobodová et al. 2019, Vitali et al. 2018), brad (Bouriaud și Popa, 2009; Vejpastková et al., 2023) și fag (Roibu et al. 2022, 2017). În nordul Carpaților Orientali s-a constatat o corelație pozitivă dintre regimul precipitațiilor și indicii de creștere radială cu un tipar similar pentru toate cele trei specii analizate la altitudini mai mici de 1100 m. Din punct de vedere al variabilității la nivel de rețea dendrocronologică

procentul maxim de suprafețe de cercetare cu corelație semnificativă statistic este la altitudini mai mici de 800 m. Un plus de precipitații în timpul toamnei precedente, cu influență pozitivă asupra stocului de carbohidrați disponibil pentru startul creșterii din primăvară, se transpune într-un inel anual mai lat în cazul molidului (altitudini sub 1400 m), bradului (altitudini sub 1100 m) și fagului (altitudini între 800 și 1400 m) (Begović et al. 2020).

## Concluzii

În nordul Carpații Orientali la altitudini mai mici de 1100 m deficitul de apă din timpul verii este principalul factor limitativ al proceselor de creștere la molid, brad și fag, la care se adaugă regimul precipitațiilor din toamna precedentă în cazul rășinoaselor. Iernile și primăverile calde favorizează procesele auxologice la brad și molid. Temperatura din timpul verii se corelează pozitiv cu indicii de creștere la molidul de la altitudini mari, respectiv negativ cu creșterea radială la brad, indiferent de altitudine. În contextul schimbărilor climatice actuale și prognoza derivată din scenariile climatice pentru Carpații Orientali, caracterizate de o creștere a temperaturii și o variabilitate relativ constantă a regimului precipitațiilor, estimăm o reducere a creșterii radiale la molid și brad la altitudini joase, respectiv o accelerare a proceselor auxologice mai ales la brad, în contextul iernilor cu temperaturi ridicate.

## Mulțumiri

Cercetările s-au efectuat în cadrul proiectelor PN-III-P4-PCE-2021-1002 - „Adaptare și reziliență la schimbări climatice în pădurile din Carpați. Abordare interspecifică și la diferite nivele temporale” și PN23090201 - „Fundamente științifice noi pentru dezvoltarea soluțiilor, modelelor și metodelor integrate specifice unui management forestier inteligent climatic, sustenabil și adaptat sistemului socio-economic” finanțate de Ministerul Cercetării, Inovării și Digitalizării.

## Bibliografie

- Adamič P.C., Levanič T., Hanzu M., Čater M., 2023. Growth Response of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) and Silver Fir (*Abies alba* Mill.) to Climate Factors along the Carpathian Massive. *Forests* 14, 1318. <https://doi.org/10.3390/f14071318>
- Aldea J., Ruiz-Peinado R., Del Río M., Pretzsch H., Heym M., Brazaitis G., Jansons A., Metslaid M., Barbeito I., Bielak K., Hysten G., Holm S., Nothdurft A., Sitko R., Löf M., 2022. Timing and duration of drought modulate tree growth response in pure and mixed stands of Scots pine and Norway spruce. *Journal of Ecology* 110, 2673–2683. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13978>
- Babst F., Bouriaud O., Poulter B., Trouet V., Girardin M.P., Frank D.C., 2019. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances* 5, eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Babst F., Poulter B., Trouet V., Tan K., Neuwirth B., Wilson R., Carrer M., Grabner M., Tegel W., Levanič T., Panayotov M., Urbinati C., Bouriaud O., Ciais P., Frank, D., 2013. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography* 22, 706–717. <https://doi.org/10.1111/geb.12023>
- Beck W., Sanders T.G.M., Pofahl U., 2013. CLIMTREG: Detecting temporal changes in climate–growth reactions – A computer program using intra-annual daily and yearly moving time intervals of variable width. *Dendrochronologia* 31, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.02.003>
- Begović K., Rydval M., Mikac S., Čupić S., Svobodova K., Mikoláš M., Kozák D., Kameniar O., Frankovič M., Pavlin J., Langbehn T., Svoboda M., 2020. Climate-growth relationships of Norway Spruce and silver fir in primary forests of the Croatian Dinaric mountains. *Agricultural and Forest Meteorology* 288–289, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108000>
- Biondi F., Qeadan F., 2008. A Theory-Driven Approach to Tree-Ring Standardization: Defining the Biological Trend from Expected Basal Area Increment. *Tree-Ring Research* 64, 81–96. <https://doi.org/10.3959/2008-6.1>
- Bose A.K., Scherrer D., Camarero J.J., Ziche D., Babst F., Bigler C., Bolte A., Dorado-Liñán I., Etzold S., Fonti P., Forrester D.I., Gavinet J., Gazol A., De Andrés E.G., Karger D.N., Lebourgeois F., Lévesque M., Martínez-Sancho E., Menzel A., Neuwirth B., Nicolas M., Sanders T.G.M., Scharnweber T., Schröder J., Zweifel R., Gessler A., Rigling A., 2021. Climate sensitivity and drought seasonality determine post-drought growth recovery of *Quercus petraea* and *Quercus robur* in Europe. *Science of The Total Environment* 784, 147222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147222>
- Bosela M., Popa I., Gömöry D., Longauer R., Tobin B., Kyncl J., Kyncl T., Nechita C., Petráš R., Sidor C.G., Šebeh V., Büntgen U., 2016. Effects of post-glacial phylogeny and genetic diversity on the growth variability and climate sensitivity of European silver fir. *Journal of Ecology* 104, 716–724. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12561>
- Bosela M., Rubio-Cuadrado Á., Marcis P., Merganičová K., Fleischer P., Forrester D.I., Uhl E., Avdagić A., Bellan M., Bielak K., Bravo F., Coll L., Cseke K., Del Rio M., Dinca L., Dobor L., Drozdowski S., Giammarchi F., Gömöryová E., Ibrahimpahić A., Kašanin-Grubin M., Klopčič M., Kurylyak V., Montes F., Pach M., Ruiz-Peinado R., Skrzyszewski J., Stajic B., Stojanovic D., Svoboda M., Tonon G., Versace S., Mitrovic S., Zlatanov T., Pretzsch H., Tognetti R., 2023. Empirical and process-based models predict enhanced beech growth in European mountains under climate change scenarios: A multimodel approach. *Science of The Total Environment* 888, 164123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164123>
- Bosela M., Tumajer J., Cienciala E., Dobor L., Kulla L., Marčič P., Popa I., Sedmák R., Sedmáková D., Sitko, R., Šebeh V., Štěpánek P., Büntgen U., 2021. Climate warming induced synchronous growth decline in Norway spruce populations across biogeographical gradients since 2000. *Science of The Total Environment* 752, 141794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141794>
- Bouriaud O., Popa I., 2009. Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees* 23, 95–106. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0258-z>
- Bowditch E., Santopuoli G., Binder F., Del Río M., La Porta N., Kluvankova T., Lesinski J., Motta R., Pach M., Panzacchi P., Pretzsch H., Temperli C., Tonon G., Smith M., Velikova V., Weatherall A., Tognetti R., 2020. What is Climate-Smart Forestry? A definition from a multinational collaborative process focused on mountain regions of Europe. *Ecosystem Services* 43, 101113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101113>
- Camarero J.J., Gazol A., Sánchez-Salguero R., Fajardo A., McIntire E.J.B., Gutiérrez E., Batllori E., Boudreau S., Carrer M., Diez J., Dufour-Tremblay G., Gaire N.P., Hofgaard A., Jomelli V., Kirilyanov A.V., Lévesque E., Liang E., Linares J.C., Mathisen I.E., Moiseev P.A., Sangüesa-Barreda G., Shrestha K.B., Toivonen J.M., Tutubalina O.V., Wilmking M., 2021. Global fading of the temperature–growth coupling at alpine and polar treelines. *Glob. Change Biol.* 27, 1879–1889. <https://doi.org/10.1111/gcb.15530>
- Carrer M., Motta R., Nola P., 2012. Significant Mean and Extreme Climate Sensitivity of Norway Spruce and Silver Fir at Mid-Elevation Mesic Sites in the Alps. *PLoS ONE* 7, e50755. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050755>
- Cook E.R., 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization, The University of Arizona, pp.185.
- Cook E.R., Kairiukstis L.A., 1990. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences.* Springer Science & Business Media, pp. 394, <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-0841-1>

- doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0
- Cruz-Alonso V., Pucher C., Ratcliffe S., Ruiz-Benito P., Astigarraga J., Neumann M., Hasenauer H., Rodríguez-Sánchez F., 2023. The easyclimate R package: Easy access to high-resolution daily climate data for Europe. *Environmental Modelling & Software* 161, 105627. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105627>
- Efron B., Tibshirani R., 1986. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Statistical science* 54–75.
- Feltoovich N., 2003. Nonparametric tests of differences in medians: comparison of the Wilcoxon–Mann–Whitney and robust rank-order tests. *Experimental Economics* 6, 273–297.
- Fritts H., 1976. *Tree rings and climate*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>
- García-García I., Méndez-Cea B., González De Andrés E., Gazol A., Sánchez-Salguero R., Manso-Martínez D., Horreo J.L., Camarero J.J., Linares J.C., Gallego F.J., 2023. Climate and Soil Microsite Conditions Determine Local Adaptation in Declining Silver Fir Forests. *Plants* 12, 2607. <https://doi.org/10.3390/plants12142607>
- Gazol A., Camarero J.J., Gutiérrez E., Popa I., Andreu-Hayles L., Motta R., Nola P., Ribas M., Sangüesa-Barreda G., Urbinati C., Carrer M., 2015. Distinct effects of climate warming on populations of silver fir (*Abies alba*) across Europe. *Journal of Biogeography* 42, 1150–1162. <https://doi.org/10.1111/jbi.12512>
- Grissino-Mayer H.D., 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57, 205–221.
- Hacket-Pain A., Ascoli D., Berretti R., Mencuccini M., Motta R., Nola P., Piussi P., Ruffinatto F., Vacchiano G., 2019. Temperature and masting control Norway spruce growth, but with high individual tree variability. *Forest Ecology and Management* 438, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.014>
- Hacket-Pain A.J., Friend A.D., Lageard J.G.A., Thomas P.A., 2015. The influence of masting phenomenon on growth-climate relationships in trees: explaining the influence of previous summers' climate on ring width. *Tree Physiology* 35, 319–330. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv007>
- Hu J., Moore D.J.P., Burns S.P., Monson R.K., 2010. Longer growing seasons lead to less carbon sequestration by a subalpine forest. *Global Change Biology* 16, 771–783. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01967.x>
- Jevšenak J., 2020. New features in the dendroTools R package: Bootstrapped and partial correlation coefficients for monthly and daily climate data. *Dendrochronologia* 63, 125753. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125753>
- Jevšenak J., 2019. Daily climate data reveal stronger climate-growth relationships for an extended European tree-ring network. *Quaternary Science Reviews* 221, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105868>
- Jevšenak J., Buras A., Babst F., 2024. Shifting potential for high-resolution climate reconstructions under global warming. *Quaternary Science Reviews* 325, 108486. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108486>
- Jevšenak J., Levanič T., 2018. dendroTools: R package for studying linear and nonlinear responses between tree-rings and daily environmental data. *Dendrochronologia* 48, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.01.005>
- Jevšenak J., Tychkov I., Gričar J., Levanič T., Tumajer J., Prislán P., Arnič D., Popkova M., Shishov V.V., 2021. Growth-limiting factors and climate response variability in Norway spruce (*Picea abies* L.) along an elevation and precipitation gradients in Slovenia. *International Journal of Biometeorology* 65, 311–324. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02033-5>
- Kozłowski T.T., Pallardy S.G., 1996. *Physiology of woody plants*. Elsevier, pp. 411.
- Lebourgeois F., Rathgeber C.B.K., Ulrich E., 2010. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science* 21, 364–376. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01148.x>
- Lens F., Tixier A., Cochard H., Sperry J.S., Jansen S., Herbette, S., 2013. Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. *Current Opinion in Plant Biology* 16, 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.02.005>
- Levanič T., Gričar J., Gagen M., Jalkanen R., Loader N.J., McCarroll D., Oven P., Robertson I., 2009. The climate sensitivity of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in the southeastern European Alps. *Trees* 23, 169–180. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0265-0>
- Martínez Del Castillo E. et al., 2022. Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications Biology* 5, 163. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03107-3>
- Mayr S., Schmid P., Beikircher B., Feng F., Badel E., 2020. Die hard: timberline conifers survive annual winter embolism. *New Phytologist* 226, 13–20. <https://doi.org/10.1111/nph.16304>
- McKight P.E., Najab J., 2010. Kruskal-wallis test. *The corsini encyclopedia of psychology* 1–1. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491>
- Ponocná T., Chuman T., Rydval M., Urban G., Migała K., Tremł V., 2018. Deviations of treeline Norway spruce radial growth from summer temperatures in East-Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 253–254, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.001>
- Ponocná T., Spyt B., Kaczka R., Büntgen U., Tremł V., 2016. Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe. *Trees* 30, 1633–1646. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1396-3>
- Poorter H., Niklas K.J., Reich P.B., Oleksyn J., Poot P., Mommer, L., 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and

- environmental control. *New Phytologist* 193, 30–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Popa A., Popa I., Badea O., Bosela M., 2024a. Non-linear response of Norway spruce to climate variation along elevational and age gradients in the Carpathians. *Environmental Research* 119073. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119073>
- Popa A., Popa I., Horvath A., Balabașciuc M., 2021. Răspunsul dendroclimatic al molidului din Depresiunea Gheorgheni. *Revista de Silvicultură și Cinegetică* nr. 49: 26-30.
- Popa A., Popa I., Roibu C.-C., Badea O.N., 2022. Do Different Tree-Ring Proxies Contain Different Temperature Signals? A Case Study of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in the Eastern Carpathians. *Plants* 11, 2428. <https://doi.org/10.3390/plants11182428>
- Popa A., Van Der Maaten-Theunissen M., Popa I., Badea O., Van Der Maaten, E., 2024b. Spruce suffers most from drought at low elevations in the Carpathians, though shows high resilience. *Forest Ecology and Management* 571, 122201. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122201>
- Popa I., 2004. Fundamente metodologice și aplicații de dendrocronologie. Editura Tehnică Silvică, pp. 194.
- Pretzsch H., 2021. Trees grow modulated by the ecological memory of their past growth. Consequences for monitoring, modelling, and silvicultural treatment. *Forest Ecology and Management* 487, 118982. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118982>
- Rennenberg H., Loreto F., Polle A., Brilli F., Fares S., Beniwal R.S., Gessler A., 2006. Physiological Responses of Forest Trees to Heat and Drought. *Plant Biology* 8, 556–571. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924084>
- Roibu C.-C., Palaghianu C., Nagavciuc V., Ionita M., Sfecla V., Mursa A., Crivellaro A., Stirbu M.-I., Cotos M.-G., Popa A., Sfecla I., Popa I., 2022. The Response of Beech (*Fagus sylvatica* L.) Populations to Climate in the Easternmost Sites of Its European Distribution. *Plants* 11, 3310. <https://doi.org/10.3390/plants11233310>
- Roibu C.-C., Popa I., Kirchhefer A.J., Palaghianu C., 2017. Growth responses to climate in a tree-ring network of European beech (*Fagus sylvatica* L.) from the eastern limit of its natural distribution area. *Dendrochronologia* 42, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.02.003>
- Schurman J.S., Babst F., Björklund J., Rydval M., Bače, R., Čada V., Janda P., Míkolás M., Saulnier M., Trotsiuk V., Svoboda M., 2019. The climatic drivers of primary Picea forest growth along the Carpathian arc are changing under rising temperatures. *Global Change Biology* 25, 3136–3150. <https://doi.org/10.1111/gcb.14721>
- Semeniuc Fecioru A., Teodosiu M., Botezatu A., 2024. Climate triggers and growth effects of cold damage in silver fir (*Abies alba* Mill.) populations from Eastern Carpathians. *Trees* 38, 667–679. <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02505-w>
- Sidor C.G., Popa I., Vlad R., Cherubini P., 2015. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania). *Trees* 29, 985–997. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1178-3>
- Šimůnek V., Prokůpková A., Vacek Z., Vacek S., Cukor J., Remeš J., Hájek V., D'Andrea G., Šálek M., Nola P., Pericolo O., Holzbachová Š., Ripullone F., 2023. Silver fir tree-ring fluctuations decrease from north to south latitude—total solar irradiance and NAO are indicated as the main influencing factors. *Forest Ecosystems* 10, 100150. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100150>
- Stanescu V., Sofletea N., Popescu O., 1997. Flora forestiera lemnoasa a Romaniei Editura Ceres, Bucuresti, Romania, pp. 451.
- Svobodová K., Langbehn T., Björklund J., Rydval M., Trotsiuk V., Morrissey R.C., Čada V., Janda P., Begović K., Ágh-Lábusová J., Schurman J.S., Nováková M., Kozák D., Kameniar O., Synek M., Míkolás M., Svoboda M., 2019. Increased sensitivity to drought across successional stages in natural Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forests of the Calimani Mountains, Romania. *Trees* 33, 1345–1359. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01862-1>
- Tognetti R., Smith M., Panzacchi P. (Eds.), 2022. Climate-Smart Forestry in Mountain Regions, Managing Forest Ecosystems. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80767-2>
- Valeriano C., Tumajer J., Gazol A., González De Andrés E., Sánchez-Salguero R., Colangelo M., Linares J.C., Valor T., Sangüesa-Barreda G., Julio Camarero J., 2023. Delineating vulnerability to drought using a process-based growth model in Pyrenean silver fir forests. *Forest Ecology and Management* 541, 121069. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121069>
- Van Der Maaten E., Stolz J., Thurm E.A., Schröder J., Henkel A., Leinemann L., Profft I., Voth W., Van Der Maaten-Theunissen M., 2024. Long-term growth decline is not reflected in crown condition of European beech after a recent extreme drought. *Forest Ecology and Management* 551, 121516. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121516>
- Vejpustková M., Čihák T., Fišer, P., 2023. The increasing drought sensitivity of silver fir (*Abies alba* Mill.) is evident in the last two decades. *Journal of Forest Science* 69, 67–79. <https://doi.org/10.17221/172/2022-JFS>
- Vitali V., Büntgen U., Bauhus J., 2018. Seasonality matters—The effects of past and projected seasonal climate change on the growth of native and exotic conifer species in Central Europe. *Dendrochronologia* 48, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.01.001>
- Vitali V., Büntgen U., Bauhus J., 2017. Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology* 23, 5108–5119. <https://doi.org/10.1111/gcb.13774>