

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

*"Transferul semnalului climatic în parametrii fizici
și geochimici ai inelului anual. Suport pentru
reconstrucții paleoclimatice "*

Coordonator științific: CS I dr. ing. **Ionel Popa**

Doctorand: **Viorica Nagavciuc**

Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava
Facultatea de Silvicultură
Suceava, 2019

Cuprins

1. Introducere	3
1.1 Introducere	3
1.2 Stadiul actual al cunoștințelor în domeniul paleoclimatologiei	4
1.3 Scopul și obiectivele.....	6
1.4 Zona de studiu	7
1.5 Structura tezei de doctorat.....	9
1.5.1 Capitolul 2: Bazele teoretice	9
1.5.2 Capitolul 3: Răspunsul climatic a parametrilor fizici a inelelor anuale de <i>Pinus sylvestris</i> din Carpații Orientali, România.....	9
1.5.3 Capitolul 4: Influența descompunerii aeriene asupra compoziției izotopice de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale.....	10
1.5.4 Capitolul 5: Izotopii stabili de oxigen din inelele anuale de stejar din România înregistrează secetă de vară și circulația atmosferică la scară largă în Europa	10
1.5.5 Capitolul 6: Explorarea semnalelor climatice pe baza compoziției izotopilor stabili din inelele anuale ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) din Munții Călimani, România; calibrare pentru reconstituire paleoclimatică	11
1.5.6 Capitolul 7: Reconstituirea paleoclimatică a umidității relative și secetei din perioada verii din ultimii 760 de ani pe baza compoziției izotopice de oxigen din celuloza inelelor anuale de <i>Pinus cembra</i> din Munții Călimani, România.	12
1.5.7 Capitolul 8: Concluzii și contribuții personale	13
2. Bazele teoretice.....	14
2.1 Formarea inelelor anuale de creștere a arborilor	14
2.2 Parametri fizici ai inelului anual ca indicatori proxy pentru climă: baze teoretice...	14
2.2.1 Lățimea inelului anual.....	14
2.2.2 Densitatea maximă a inelului anual	14
2.2.3 Intensitatea în albastru	15
2.3 Parametrii geochimici ai inelului anual ca indicatori proxy pentru clima: baze teoretice	15
2.3.1 Izotopii stabili: bază teoretică	15
2.3.2 Izotopul stabil de carbon în plante	16
2.3.3 Izotopul stabil de oxigen în plante	16
3. Răspunsul climatic a parametrilor fizici a inelelor anuale de <i>Pinus sylvestris</i> din Carpații Orientali, România.....	17
4. Influența descompunerii aeriene asupra compoziției izotopice de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale.....	19
5. Izotopii stabili de oxigen din inelele anuale de stejar din România înregistrează secetă de vară și circulația atmosferică la scară mare în Europa.....	21
6. Explorarea semnalelor climatice pe baza izotopilor stabili în inelele anuale ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) din Munții Călimani, România; calibrare pentru reconstituire paleoclimatică.....	24
7. Reconstituirea paleoclimatică a umidității relative și secetei din perioada verii din ultimii 760 de ani pe baza compoziției izotopice de oxigen din celuloza inelelor anuale de <i>Pinus cembra</i> din Munții Călimani, România	29
8. Concluzii și contribuții personale	33
8.1. Concluzii	33
8.2 Contribuții personale.....	36
Bibliografie.....	38
Publicații.....	45

1. Introducere

1.1 Introducere

Încălzirea globală este deja documentată de creșterea anomaliilor de temperatură din ultimul secol (Figura 1.1) și exemplificată de numeroasele evenimente climatice extreme care au avut loc în ultimul deceniu, în multe părți ale lumii (Coumou and Rahmstorf, 2012). Europa, de exemplu, a fost afectată de numeroase evenimente extreme (Della-Marta et al., 2007; Gerald A. Meehl and Claudia Tebaldi, 2004; Twardosz and Kossowska-Cezak, 2013), în special de canicula și seceta din ultimii ani: canicula din vara anului 2003 a cauzat cea mai fierbinte vară din ultimele cinci secole și a afectat întreaga Europă (Beniston and Stephenson, 2004; Rebetez et al., 2006), canicula din 2006 a afectat partea centrală a Europei (Rebetez et al., 2008), canicula din 2007 a afectat partea centrală și sud-estică a Europei (Founda and Giannakopoulos, 2009), în 2010, canicula a provocat cea mai fierbinte vară în partea estică a Europei și a Rusiei de Vest din ultimele cinci secole (Barriopedro et al., 2011; Dole et al., 2011), în 2011 a fost cea mai fierbinte primăvară din Franța și cea mai umedă vară în Norvegia, anul 2012 a fost cel mai fierbinte an în România și cel mai umed în Marea Britanie (Bissolli et al., 2012; Carrington, 2012), vara anului 2015 a fost cea mai fierbinte și cea mai uscată vară din 1950 în Europa (Ionita et al., 2017), în vara anului 2018 a fost înregistrată una dintre cele mai severe secete din Europa (Ionita and Nagavciuc, 2019).

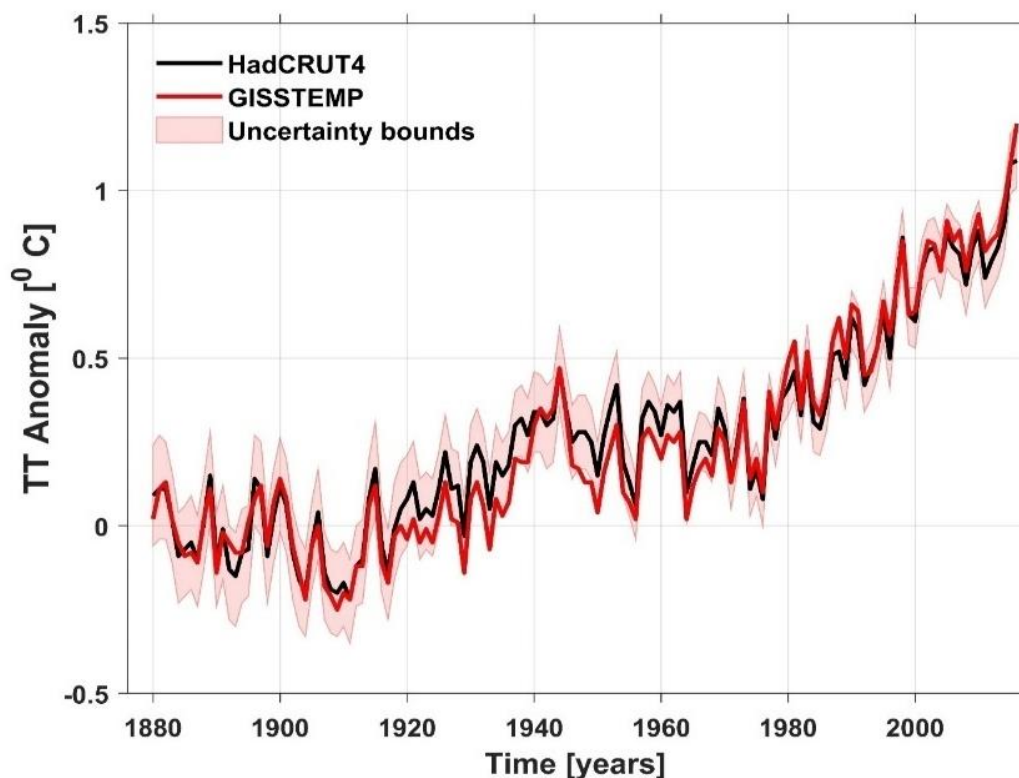


Figura 1.1. Anomaliile de temperatură la nivel global

În condițiile actuale, în concordanță cu emisiile de gaze cu efect de seră, modelele climatice prezic o creștere a temperaturii aerului cu 1,5 ° C în decursul următorilor 50 de ani (IPCC, 2018). Creșterea prognozată a temperaturii va amplifica riscurile evenimentelor climatice extreme care vor avea un impact major asupra sistemelor umane și naturale (IPCC, 2018). Modelele de prognoză arată că densitatea populației va crește, în special în regiunile vulnerabile, și va fi asociată cu o creștere a costurilor de viață și economice, generate în cea

mai mare parte de incapacitatea de a anticipa cu exactitate viitoarele evenimente extreme, pentru a putea lua măsurile de precauție în vederea atenuării sau evitării efectelor lor.

Din acest motiv, apare necesitatea unor prognoze climatice de înaltă precizie pentru o mai bună adaptare la efectele nefaste cauzate de evenimentele extreme. Cu toate acestea, relația complexă dintre modificările climatice actuale și viitoare poate fi descifrată mai bine, analizând variabilitatea climatică din trecut. Datorită faptului că tendințele climatice sunt foarte sensibile la datele de început și sfârșit a seriilor de timp și nu reflectă, în general, pe termen lung variabilitatea climatică, reiese necesitatea reconstituirilor de paleoclimă care să extindă în trecut datele climatice instrumentale (IPCC, 2014).

1.2 Stadiul actual al cunoștințelor în domeniul paleoclimatologiei

Nevoia de îmbunătățire a prognozelor pentru a anticipa viitoarele modificări climatice impune necesitatea unei mai bune înțelegeri a variației climatice atât din prezent, cât și din trecut (McCarroll, 2015). Datele climatice instrumentale sunt rareori mai lungi de 100 de ani și nu sunt suficiente pentru a capta variabilitatea climatică la scară largă. În acest sens, datele instrumentale pot fi prelungite înapoi în timp prin cuantificarea datelor proxy de înaltă rezoluție din arhivele naturale (de ex. carote de gheață, inele anuale, corali, sedimente lacustre), care au devenit un instrument important pentru suplimentarea datelor climatice instrumentale scurte. Un indicator proxy înregistrează și păstrează caracteristicile fizice ale datelor climatice instrumentale, cum ar fi variabilele climatice (de exemplu temperatura), și care pot fi ulterior măsurate direct în arhivele naturale. Proxy-ul ideal definit de Bradley (1985) trebuie să îndeplinească trei caracteristici principale: "i) să aibă o relație de corelație semnificativă cu variabila climatică care trebuie estimată; ii) să existe o relație coerentă cauză-efect; și iii) relația să fie stabilă în timp". Cele mai folosite și valoroase arhive naturale sunt inelele anuale de arbori, corali, carotele de gheață, polenul fosil, precum și sedimentele oceanice și lacustre. Fiecare dintre acestea au propriile avantaje privind: a) rezoluția temporală (extinderea în timp poate varia de la câteva decenii până la mai mult de 100 de milioane de ani), b) posibilitatea de cuantificare a semnalului climatic măsurat și c) localizarea geografică. Fiecare arhivă naturală, prin cuantificarea proxy-ilor, aduce informații paleoclimatice prețioase, contribuind la o mai bună înțelegere a variabilității climatice din trecut și prezent și, prin urmare și a schimbărilor climatice viitoare. Dintre toate arhivele naturale, inele anuale sunt cele mai prețioase arhive naturale.

Proxy-urile inelelor anuale de creștere ale arborilor sunt utilizate la scară largă în paleoclimatologie datorită proprietăților lor unice (Cook and Kairiukstis, 1990; Popa, 2004). Limitele dintre inelele anuale de creștere ale arborilor sunt clare și permit delimitarea și măsurarea exactă a lățimii inelului care variază suficient de mult de la an la an și permite datarea cu precizie a anului în care inelul anual s-a format (Schweingruber, 1996). Arborii sunt cea mai răspândită arhivă naturală de pe glob și există posibilitatea de a repeta măsurătorile pe baza unui eșantion numeros, care permite calcularea limitelor de încredere și a competențelor statistice pentru a reduce "zgomotul" din seriile individuale (Grubb et al., 2002). Durata de viață a unor specii de arbori poate depăși câteva sute de ani, iar cronologiile pot fi extinse în trecut până la mii de ani, folosind lemn mort (subfossil) păstrat în pereții clădirilor relict sau recuperat din pietriș, mlaștini sau sedimente lacustre (McCarroll et al., 2013). În timpul creșterii arborilor, aceștia stochează parametrii de mediu în proprietățile fizice și geochimice ale inelelor anuale de creștere ale arborilor, care pot fi cuantificate prin intermediul proxy-urilor inelelor anuale de creștere ale arborilor, cum ar fi lățimea inelului anual, densitatea maximă a inelului anual sau izotopii stabili în celuloza inelelor anuale de creștere ale arborilor (Speer, 2010).

Lățimea inelului anual a devenit o metodă clasică utilizată pentru a analiza relația dintre inelelor anuale de creștere ale arborilor și parametrii de mediu (Briffa and Jones, 1990;

Fritts, 1976; Popa, 2004; Schweingruber, 1988). Această abordare a fost aplicată cu succes pentru diferite specii de arbori din diferite părți ale lumii, în special în zona temperată, la altitudini și latitudini mari, unde clima are o influență puternică asupra creșterii inelelor anuale (McCarroll et al., 2013). Au fost realizate o multitudine de reconstituiri paleoclimatice pe baza lățimii inelului anual, reconstituind variațiile climatice din trecut la scară locală, regională și chiar emisferică (Büntgen and Tegel, 2011; Esper et al., 2002; Popa and Kern, 2009).

Deși densitatea maximă a inelelor anuale este net superioară ca indicator proxy lățimii inelului anual, totuși, izotopii stabili de carbon și oxigen în inelele anuale de creștere ale arborilor au și mai multe avantaje, dovedindu-se a fi un indicator proxy superior pentru reconstituirea climei. Variabilitatea izotopilor stabili de carbon și oxigen în inelele anuale de creștere ale arborilor înregistrează, prin procesele de fracționare, procese fiziologice specifice plantelor care includ variabile climatice și de mediu, și care sunt relativ simplu și ușor de înțeles în raport cu multiplii factorii care pot influența lățimea și densitatea inelelor anuale de creștere ale arborilor (Esper et al., 2018a). Cu acest potențial adăugat față de parametrii fizici, compoziția izotopică de carbon și oxigen în inelele anuale poate fi utilizată în zonele în care parametrii fizici ai inelelor anuale sunt puternic influențați de mulți parametri climatici, iar semnalul climatic este dificil de cuantificat (Hartl-Meier et al., 2015; Nagavciuc et al., 2019b; Young et al., 2015). Compoziția izotopică de oxigen, în general, nu prezintă nici un trend în perioada juvenilă, și prin urmare se pot folosi datele brute pentru cuantificarea semnalului climatic (Duffy et al., 2017; Rinne et al., 2013). În plus, pentru cuantificarea semnalului climatic pe baza compoziției izotopice de carbon și oxigen este nevoie de un număr mic de arbori (Gagen et al., 2008; Leavitt, 2010), iar lemnul care a început să se descompună și este afectat de către putregai are o influență limitată asupra compoziției izotopice de carbon și oxigen (Nagavciuc et al., 2018). Izotopii stabili din inelele de arbori pot furniza, astfel, informații prețioase, exacte și precise privind variabilitatea climatică din trecut, chiar și atunci când parametrii fizici ai inelelor anuale de creștere ale arborilor nu înregistrează semnalul climatic (Hartl-Meier et al., 2015; Konter et al., 2014; Kress et al., 2010).

Numeroase studii au demonstrat deja relația puternică dintre izotopii stabili în inelele anuale de creștere ale arborilor și parametrii climatici (Esper et al., 2010; Gagen et al., 2008; M. H. Gagen et al., 2011; McCarroll et al., 2013; McCarroll and Loader, 2004; Robertson et al., 2011; Saurer et al., 2008; Sidorova et al., 2012, 2008; Timofeeva et al., 2017; Treydte et al., 2007; Young et al., 2015, 2010) și au cuantificat această relație pentru a genera reconstituiri paleoclimatice de înaltă rezoluție. Compoziția izotopică de carbon și oxigen în inelele anuale de creștere ale arborilor au fost folosite pentru a reconstitui diferiți parametri climatici, inclusiv temperatura (Esper et al., 2015; Treydte et al., 2009), cantitățile de precipitații (Danis et al., 2006; Rinne et al., 2013; Young et al., 2015), secetă (Kress et al., 2010; Inga Labuhn et al., 2016; Xu et al., 2014), umiditatea relativă (Haupt et al., 2011), radiația solară (Young et al., 2010) precum și nebulozitatea (M. Gagen et al., 2011) în diferite părți ale lumii.

Baza internațională de date de paleoclimă include o colecție importantă de serii cronologice pe baza a diferiți proxy-uri. Totuși dintre toate reconstituirile, cele pe baza inelelor anuale sunt cele mai numeroase. În International Tree-Ring Data Bank (ITRDB), care este cea mai mare bază de date de inelele anuale de creștere ale arborilor, sunt incluse peste 4.000 de cronologii (reconstituiri) din diferite situri și continente. Reconstituirile se bazează pe lățimea inelului anual, densitatea maximă a inelului anual și compoziția izotopilor stabili de carbon și oxigen. În ansamblu, majoritatea cronologiilor se bazează pe lățimea inelului anual, urmată de densitatea maximă a inelului anual și doar câteva cronologii sunt pe baza izotopilor stabili. Pe lângă diferențele dintre numărul de cronologii pentru cele trei

proxy-uri diferite, există și o mare discrepanță între diferite regiuni pentru care s-au făcut reconstituiri paleoclimatice, inclusiv continentul european, unde cele mai multe reconstituiri, inclusiv pe baza izotopilor stabili, au fost realizate pentru Peninsula Scandinavă, Europa de Vest și în regiunea Mării Mediteraneene (Konter et al., 2014; Nagavciuc et al., 2019b; Treydte et al., 2007). Cu toate acestea, analiza spațială din Europa relevă o mare diferență climatică între partea nord-vestică și partea sud-estică a Europei (Ionita et al., 2017). Datorită caracteristicilor geografice și geomorfologice particulare Europei, impuse de diferite tipuri de circulație atmosferică (de exemplu cicloni sau anticicloni), variabilele climatice pot varia diferit în diferite părți ale Europei (secetă și inundații, de exemplu) (Ionita, 2015; Ionita et al., 2017). În acest context, datele disponibile din partea de nord-vest a Europei nu sunt suficiente pentru a explica variația climatică la scara europeană, astfel sunt necesare date paleoclimatice de înaltă rezoluție și de lungă durată din partea de est a Europei pentru o mai bună înțelegere a variabilității climatice la scară europeană.

Prin poziția sa strategică în partea central-estică a Europei, unde climatul Atlanticului și cel al Mediteranei converg, România joacă un rol important în analiza variabilității climatice spațiale în Europa. Mai mult decât atât, în România încă mai există păduri naturale unde se găsesc arbori foarte bătrâni și un depozit imens de lemn subfossil într-o stare excelentă de conservare, la care se adaugă lemn din clădirile istorice care pot acoperi peste 1000 de ani (Popa, 2016), și care reprezintă un potențial uriaș pentru cercetarea dendroclimatologică în această regiune. Din păcate, acest potențial a rămas neexploatat. Până în prezent, în această zonă, au fost obținute doar câteva reconstituiri paleoclimatice și numai pe baza lățimii inelului anual (Kern and Popa, 2007; Levanič et al., 2013; Nechita and Popa, 2012; Popa and Bouriaud, 2013; Popa and Cheval, 2007; Popa and Kern, 2009), în timp ce reconstituiri pe baza densității maxime a inelului anual și a izotopilor stabili lipsesc total. Pentru a exploata întregul potențial dendroclimatic al pădurilor românești, este necesar să se creeze noi reconstituiri paleoclimatice folosind proxy-urile moderne (cum ar fi densitatea maximă a inelului anual și izotopii stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale) pentru diferite situri și specii de arbori. Datorită avantajelor suplimentare ale izotopilor stabili din celuloza inelelor anuale, informația obținută prin reconstituirea climei cu acest proxy poate fi folosită pentru o mai bună înțelegere a variabilității climatice pe întregul continent.

1.3 Scopul și obiectivele

Această teză de doctorat prezintă o evaluare a transferului de semnal climatic în parametri fizici și geochimici ai inelelor anuale din diferite situri și specii de arbori din România și răspunsul lor la variabilitatea climatică locală și regională pentru a cuantifica potențialul lor dendroclimatic pentru reconstituiri paleoclimatice. Scopul principal al acestei teze de doctorat este de a investiga semnalul climatic al parametrilor fizici (lățimea inelului anual (TRW), densitatea maximă a inelului anual (MXD), intensitatea în albastru (BI)) și paramterii geochimici (compoziția izotopilor stabili de carbon ($\delta^{13}\text{C}$) și oxigen ($\delta^{18}\text{O}$)) și evaluarea potențialului fiecăruia dintre acești parametri pentru reconstituiri paleoclimatice. Pentru a putea reconstitui variațiile paleoclimatice, în România, înainte de datele climatice instrumentale, și a cuantifica variabilitatea parametrilor inelelor anuale cu modurile de circulație atmosferică la scară largă din Europa, este necesară mai întâi o analiză a modelului de calibrare și verificare a relației arbore-climă. Astfel că, obiectivele specifice tezei de doctorat sunt:

- Evaluarea potențialului dendroclimatologic al diferitelor proxy-uri din arbori, din România, pentru reconstituiri paleoclimatice (Capitolul 2)
- Analiza răspunsului climatic al parametrilor MXD, BI și TRW din *Pinus sylvestris*, utilizând date climatice zilnice și lunare pentru a găsi intervalul optim al fiecărui indicator proxy pentru reconstituirea paleoclimatică (Capitolul 3 - Articol I)

- Evaluarea gradului de influență al descompunerii parțiale a lemnului asupra izotopilor stabili de carbon și oxigen din celuloza de inelelor anuale de *Pinus Cembra* (Capitolul 4 - Articol II)
- Evaluarea potențialului paleoclimatic al $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale de *Quercus robur*, de la altitudine joasă, pentru reconstituirea secetelor de vară locale și legătura sa cu circulația atmosferică la scară largă în Europa (Capitolul 5 - Articol III)
- Calibrarea și validarea modelului de reconstituire a climei pe baza de izotopilor stabili de carbon și oxigen în *Pinus cembra L.* din Munții Călimani (Capitolul 6 - Articol IV)
- Cunatificarea relației dintre variabilele climatice locale și valorile $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{18}\text{O}$) în celuloza inelelor anuale de *Pinus cembra L.* din Munții Călimani și legătura lor cu circulația atmosferică la scară mare în Europa (Capitolul 6 – Articol IV).
- Reconstituirea variabilității climatice din trecut în România pe baza izotopilor stabili în celuloza inelelor anuale de *Pinus cembra L.* din Munții Călimani (Capitolul 7 - Articol V).

1.4 Zona de studiu

Situată în sud-estul Europei Centrale, România este o țară carpatică, dunăreană, pontică. România este situată în partea de nord a Peninsulei Balcanice, cuprinzând 50% din lanțul carpatic, 29% din zona bazinului Dunării, inclusiv cea mai mare parte a Deltei Dunării și țărmul vestic al Mării Negre (sud-estul României).

Inelele anuale de creștere ale arborilor utilizate în această teză de doctorat provin din trei situri și specii diferite (Figura 1.2, Tabelul 1.1). Probele de inele anuale au fost colectate din siturile Zugreni, Nușfalău și Călimani, în acord cu principiile dendrocronologice (Popa, 2004; Schweingruber, 1988).

Situl de prelevare a probelor din Zugreni este situată în Munții Carpați Orientali, România. În anul 2007, zona Zugreni (469 ha) a dobândit statutul de rezervație naturală ([http://mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/2015-10-16 PM Pietrosul Brostenilor Cheile Zugrenilor.pdf](http://mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/2015-10-16_PM_Pietrosul_Brostenilor_Cheile_Zugrenilor.pdf)). Din acest sit, 20 de carote (o rază per arbore) de *Pinus Sylvestris* au fost extrase din arbori cu vârste variind între 80 și 120 de ani, de la altitudine mare (aprox. 1000 m).

Situl de prelevare a probelor Nușfalău se află în depresiunea Șimleu, în nord-vestul României. Din acest sit, zece carote (o rază per arbore) de *Quercus robur L.* au fost extrase din arbori cu vârste variind între 80 și 120 de ani, de la altitudini joase (aprox. 270 m).

Situl de prelevare a probelor Călimani este situat în Munții Călimani, Munții Carpați Orientali, România. În 1975, Munții Călimani au dobândit statutul de rezervație naturală, cu un grad ridicat de protecție. Din acest sit au fost colectate probe de *Pinus cembra L.* de la altitudine mare (< 1400 m). În total au fost extrase și analizate 14 carote (o rază per arbore), patru arbori vii și 10 de arbori subfosili, cu vârste între 100 și 500 de ani.

Prin poziția globală și continentală a României, unde climatul atlantic și cel mediteranean converg, România se caracterizează printr-un climat temperat - continental, cu patru sezoane distincte (Posea, 2006; Sandu et al., 2008). La scară regională, influența majoră asupra climei României o are lanțul carpatic, care reprezintă o barieră naturală pentru masele de aer ce vin dinspre Atlantic (Ionita, 2015). Rolul principal al lanțului carpatic constă în i) influența maselor de aer oceanic asupra părții vest-centrale a țării, ii) influența maselor de aer mediteraneene în partea de sud-vest a României, iii) influența Mării Negre (și masele de aer africane) în partea de sud-est a României, iv) influența maselor de aer din Siberia în nord-estul României și v) etajarea climatului în zonele montane (Posea, 2006). În consecință, partea de vest a României se caracterizează prin ierni blânde cu o cantitate mai mare de precipitații, partea de est fiind caracterizată de ierni geroase și precipitații reduse, partea

sudică și sud-estică caracterizată prin secete frecvente, în timp ce regiunile muntoase sunt caracterizate prin ierni lungi și geroase, cu o cantitate mare de precipitații (Croitoru et al., 2016; Ionita, 2015; Sandu et al., 2008).

Tabelul 1.1. Siturile analizate

nr	Nume sit	Latitudine	Longitudine	Altitudine (m a.s.l.)	Indicator proxy	Specie	Capitol/ articol
1.	Zugreni	47° 23' N	25° 32'E	750 – 1200	TRW, MXD, BI	<i>Pinussylv estris</i>	Capitol III Articol I
2.	Nușfalău	47.19°N	22.66°E	270	$\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$	<i>Quercus robur</i> L.	Capitol IV Articol II
3.	Călimani	47.09°N	25.10°E	1450 -1850	$\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$	<i>PinusCembra</i>	Capitol V,VI Articol III, IV
4.	Călimani	47.09°N	25.10°E	1450 -1850	$\delta^{18}\text{O}$	<i>PinusCembra</i>	Capitol VII Articol V

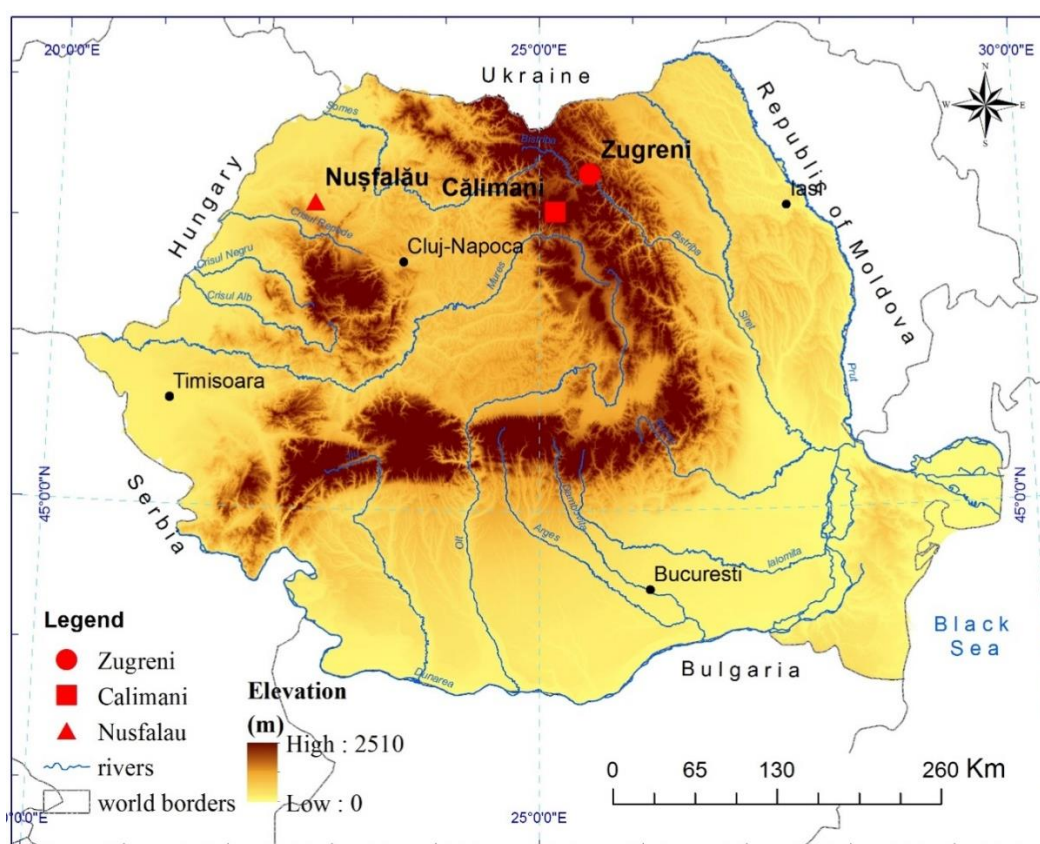


Figura 1.2. Zona de studiu în România

Distribuția spațio-temporală a cantităților de precipitații și a temperaturilor medii anuale în România arată diferențe mari între diferitele părți ale țării. Cantitățile medii anuale de precipitații din România variază între 350 mm în partea sud-estică și peste 1000 mm în zonele montane pentru perioada 1970-2000 (Fick and Hijmans, 2017). Precipitațiile medii anuale sunt de 870 mm la situl Zugreni, 600 mm la Nușfalău și 890 mm la situl Călimani. Cele mai mare cantități de precipitații se înregistrează în timpul verii și cele mai scăzute în timpul iernii.

Distribuția spațio-temporală a temperaturii medii anuale pe teritoriul României reflectă distribuția spațială a Munților Carpați. Cele mai mici temperaturi medii anuale (mai mici de 0 ° C) se înregistrează la altitudini înalte (> 2000 m), temperaturile medii anuale crescând o dată cu descreșterea altitudinii. Cele mai mari temperaturi medii anuale (> 11 ° C)

sunt înregistrate la altitudini mici, în partea de sud și sud-est a României. Temperatura medie anuală variază de la $-8,1^{\circ}\text{C}$ (în ianuarie) până la $+14,3^{\circ}\text{C}$ (în iulie) la Zugreni, de la $-3,6^{\circ}\text{C}$ (în ianuarie) până la $+18,6^{\circ}\text{C}$ (în iulie) la Nușfalău și de la $-8,2^{\circ}\text{C}$ (în ianuarie) până la $+14,3^{\circ}\text{C}$ (în iulie) la Călimani.

1.5 Structura tezei de doctorat

Această teză este organizată în cinci capitole de tip articole (capitolele 3-7), (pe lângă capitolele de introducere, bazele teoretice și capitolul de concluzii). Trei capitole (Capitolele 3-5) au fost publicate, unul este acceptat (Capitolul 6) și unul va fi trimis, spre publicare (Capitolul 7). Toate capitolele sunt sau vor fi publicate în jurnale internaționale cu factor de impact (lista roșie). Fiecare capitol este formatat ca un studiu independent după modelul structurii articolelor științifice (cu introducere, metode, rezultate, discuții și concluzii) și se adresează unuia sau mai multor obiective menționate mai sus. Informații despre jurnal, publicație, co/autori, etc. pot fi găsite la începutul fiecărui capitol.

1.5.1 Capitolul 2: Bazele teoretice

Acest capitol reprezintă un cadru teoretic privind parametrii fizici și geochemici ai inelului anual. Acesta include o prezentare generală a parametrilor fizici ai inelelor anuale (TRW, MXD, BI) și geochemici (compoziția izotopică de carbon și oxigen) și variația lor în inelele anuale prin prisma factorilor fiziologici și de mediu. De asemenea, descrie mecanismul detaliat prin care parametrii inelului anual înregistrează semnalul climatic. Scopul acestui capitol este de a introduce bazele teoretice pentru o mai bună interpretare și analiză a următoarelor capitole și, de asemenea, pentru a facilita o mai bună înțelegere a semnalului climatic în parametrii inelelor anuale de către comunitățile care nu sunt familiarizate cu acest domeniu de cercetare.

1.5.2 Capitolul 3: Răspunsul climatic a parametrilor fizici a inelelor anuale de *Pinus sylvestris* din Carpații Orientali, România

Parametrii fizici ai inelelor anuale (MXD, BI și TRW) au un potențial ridicat pentru reconstituiri paleoclimatice. Fiecare dintre acești parametri au avantaje specifice față de ceilalți parametri, cu propriile particularități și propriul mecanism prin care înregistrează semnalul climatic, care poate fi cuantificat prin diferite metode și cu ajutorul a diferite echipamente, cu rezoluție și costuri diferite. Scopul acestui studiu este de a testa inter-compararea parametrilor fizici ai inelului anual (MXD, BI și TRW) pentru identificarea parametrului climatic cu cea mai mare și semnificativă corelație, precum și a perioadei de timp în care semnalul climatic este stabil în timp. Pentru aceasta, toți cei trei parametri fizici (MXD, BI și TRW) au fost măsurați pe aceleași carote de *Pinus sylvestris* de la Zugreni, Munții Carpați Orientali (România) pentru perioada 1886-2015. Cronologiile MXD, BI și TRW obținute au fost comparate cu cinci variabile climatice lunare și zilnice (temperatura maximă (Tmax), temperatura minimă (Tmin), temperatura medie (Tmean), cantitatea de precipitație (PP) și nebulozitatea (CLD)) pentru a calcula coeficienții de corelație și a determina intervalul de timp pentru care coeficientul de corelație este cel mai mare. Cei mai mari coeficienți de corelație au fost obținuți pentru cronologia MXD cu date climatice zilnice. Cea mai mare corelație a fost obținută pentru MXD și Tmax zilnică ($r = 0,63$) și o corelație similară, dar negativă, cu CLD ($r = -0,62$) între sfârșitul lunii iulie și mijlocul lunii septembrie. Pentru cronologia BI, cea mai mare corelație a fost obținută cu Tmax zilnică ($r = 0,56$) în perioada 01 august - 26 august. Pentru cronologia TRW, cea mai mare corelație a fost observată cu Tmax zilnică ($r = 0,66$) în perioada de 15 noiembrie a anului precedent (py) - 17 martie an curent (cy). Coeficienții de corelație au fost mult mai mici cu datele climatice lunare în comparație cu datele climatice zilnice. Analiza hărții de stabilitate dintre MXD și

Tmax indică faptul că coeficienții de corelație sunt stabili în timp și sunt concentrați pe zona de studiu cu extensii în partea estică a Europei, în luna august și septembrie. Coeficienții de corelație pentru cronologiile BI și TRW cu Tmax nu au fost semnificativi și corelația fiind spațial mai locală. Rezultatele obținute sugerează că MXD are un potențial suplimentar de a reconstitui temperatura maximă în zona de studiu, având corelația cea mai mare și mai stabilă. BI înregistrează informații similare cu MXD, dar coeficientul de corelație și stabilitatea temporală este mai mică decât pentru MXD. TRW înregistrează un semnal complet climatic diferit față de MXD și BI.

1.5.3 Capitolul 4: Influența descompunerii aeriene asupra compoziției izotopice de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale

Compoziția izotopică a carbonului și a oxigenului în celuloza inelelor anuale a devenit unul dintre cei mai robuști indicatori proxy pentru reconstituirea paleoclimatului (M. H. Gagen et al., 2011). Din necesitatea de a extinde cronologiile înapoi în timp, de-a lungul secolelor și chiar mileniilor, cercetătorii au folosit pe lângă eșantioane provenite din arbori vii și lemn provenit de la arbori morți, arbori din clădiri relict, arbori fosili sau subfosili. Acestea din urmă, totuși, pot fi într-o bună stare de conservare sau pot fi în diferite stări de descompunere. Una dintre situațiile des întâlnite este descompunerea lemnului caracterizată printr-un proces de decolorare în roșu maroniu, despre care se știe că nu influențează măsurătorile TRW, având în același timp o influență mare asupra măsurătorilor MXD (Schweingruber, 2007, 1988). Cu toate acestea, nu este clar modul în care descompunerea lemnului influențează compoziția izotopilor stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale. Scopul acestui studiu este de a analiza impactul descompunerii lemnului asupra compoziției izotopilor stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale, în studii paleoclimatice. Pentru aceasta, am analizat compoziția izotopică de carbon și oxigen a celulozei inelelor anuale de *Pinus cembra L.*, din Munții Carpați Orientali, în România, în lemn parțial descompus și lemn nedescompus de pe circumferința aceluiași inel. Variabilitatea izotopilor stabili în cadrul circumferinței aceluiași inel variază între 0,1 și 0,5 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și între 0,5 și 1,6 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$ între lemnul parțial descompus și nedescompus. Rezultatele obținute pentru $\delta^{18}\text{O}$ sunt mai mici decât cele raportate în literatură (0,5-1,5 ‰), în timp ce rezultatele pentru $\delta^{13}\text{C}$ sunt un pic mai mari decât valorile raportate în literatura de specialitate (0,7-1,2 ‰). Variabilitatea izotopilor stabili de la un arbore la altul variază între 1,1 și 2,3 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și între 2 și 4,7 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$. Diferențele obținute de la arbore la arbore pentru $\delta^{18}\text{O}$ sunt similare cu cele raportate în literatură, în timp ce pentru $\delta^{13}\text{C}$ sunt mai mari (1-2 ‰ pentru oxigen și 1-3 ‰ pentru carbon). Pe baza rezultatelor obținute, pentru zona de studiu, putem să concluzionăm că procesul de descompunere a putregaiului maro are o influență limitată asupra compoziției izotopului stabil de oxigen și o influență un pic mai mare asupra compoziției izotopice de carbon. Diferențele obținute de la arbore la arbore sunt mai mici decât diferențele de pe circumferința aceluiași inel dintre valorile, între lemn parțial descompus și nedescompus, sugerând că compoziția izotopică a celulozei inelelor anuale din lemn parțial descompus poate fi utilizată în cercetări paleoclimatice.

1.5.4 Capitolul 5: Izotopii stabili de oxigen din inelele anuale de stejar din România înregistrează secetă de vară și circulația atmosferică la scară largă în Europa

Reconstituirea evenimentelor extreme precum secetele și canicula este necesară pentru o mai bună înțelegere a dinamicii acestora și pentru îmbunătățirea prognozelor viitoare privind evenimentele extreme. Lățimile inelelor anuale de stejar în regiunile în care arborii nu sunt supuși la un stres climatic au, în general, o corelație scăzută cu principalii parametrii

climatici, însă compoziția izotopilor stabili în celuloza inelelor anuale pot furniza informații suplimentare despre variabilitatea climatică din trecut. În acest studiu, prezentăm potențialul izotopilor stabili din lemnul târziu (*Quercus robur*) din situl Nușfalău, situat în partea de est a Europei, ca indicator proxy pentru umiditatea relativă și secetă, la scară locală și regională și legătura variabilității izotopice cu circulația atmosferică la scară mare din Europa. Astfel, în acest studiu, prezentăm prima cronologie $\delta^{18}\text{O}$ din România, pentru perioada 1900-2000, din celuloza lemnului târziu de stejar, de la altitudine joasă. Rezultatele obținute arată că cea mai puternică corelație este între $\delta^{18}\text{O}$ și umiditatea relativă în lunile de vară (iunie, iulie și august JJA) ($r = -0,67$) și indicele de severitate a secetei Palmer (PDSI, $r = -0,52$). Analiza corelației spațiale arată că $\delta^{18}\text{O}$ înregistrează nu doar climatul local, ci și condițiile de secetă la scară europeană. Corespondența spațială este caracterizată printr-o structură dipolară: valori ridicate ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu condițiile de secetă în timpul verii din Europa Centrală și de Est, în timp ce nordul Europei se caracterizează printr-un climat mai rece și umed. Circulația atmosferică la scară mare și temperatura de la suprafață mării din Oceanul Atlantic de Nord și a Mării Mediterane (SST) din timpul verii influențează variabilitatea inter-anuală a $\delta^{18}\text{O}$ în inelele anuale de stejar din nord-vestul României. Valorile ridicate ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu o circulație anticiclonală, caracterizându-se prin secetă și caniculă în partea centrală și estică a Europei. Rezultatele modelului de calibrare și verificare demonstrează că valorile $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale de stejar din România pot fi utilizate pentru a reconstitui variabilitatea climatică a evenimentelor extreme, precum seceta la scară locală, datorită potențialul ridicat de a produce cronologii lungi pe baza izotopilor stabili în inelele anuale de stejar din România, precum și la scară regională și variabilitatea la scară largă a circulației în Europa de Sud și Europa Centrală.

1.5.5 Capitolul 6: Explorarea semnalelor climatice pe baza compoziției izotopilor stabili din inelele anuale ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) din Munții Călimani, România; calibrare pentru reconstituire paleoclimatică

Compoziția izotopilor stabili de carbon și oxigen din celuloza inelelor anuale conține informații valoroase despre condițiile climatice în care arborele a crescut, informație înregistrată prin procese fiziologice specifice plantelor și care sunt relativ simplu și ușor de înțeles în raport cu mulțimea factorii care pot influența lățimea inelului anual (Esper et al., 2018b). În acest studiu, exploatăm semnal climatic înregistrat de variabilitatea interanuală a compoziției izotopilor stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale de *Pinul cembra* L. din Munții Călimani, România. Se analizează stabilitatea coeficienților de corelație între izotopii stabili de carbon (oxigen) în celuloza inelelor anuale și principalele variabile climatice, folosind date climatice locale din perioada 1961-2012 și date climatice Grid pe o perioadă mai lungă (1901-2012). Pentru a evidenția parametrul climatic cu cel mai mare coeficient de corelație, cel mai stabil în timp și cu potențialul cel mai mare pentru reconstituire paleoclimatică înregistrat de către compoziția izotopică de carbon (și oxigen), am analizat modele de calibrare și verificare. Pentru aceasta, am analizat compoziția izotopilor stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale de la patru arbori din Munții Călimani pentru perioada 1876-2012. Rezultatele arată o corelație semnificativă între $\delta^{13}\text{C}$ și cantitățile de precipitații din lunile de vară ($r = 0,49$) și indicele de secetă SPEI3 în iulie și august ($r = -0,45$ și $r = -0,52$). Cu toate acestea, modelul de calibrare și verificare arată ca modelul de regresie are abilități slabe pentru reconstituire. Analiza corelației spațiale între $\delta^{13}\text{C}$ și datele climatice arată corelații spațiale instabile și nesemnificative la nivel european, ceea ce indică faptul că relația dintre datele $\delta^{13}\text{C}$ și factorii climatici nu este staționară în timp și $\delta^{13}\text{C}$ nu poate fi utilizat pentru reconstituirea variațiilor climatice din trecut în studiul prezent și este nevoie de o replicare mai mare pentru a cuantifica semnalul climatic.

Valorile $\delta^{18}\text{O}$ se corelează semnificativ cu umiditatea relativă ($r=-0,64$), cu cantitatea de precipitație ($r = -0,55$), nebulozitatea ($r = -0,67$), temperatură maximă ($r = 0,60$), precum și cu condițiile de secetă (indice climatic (CI): $r = -0,69$). Spre deosebire de $\delta^{13}\text{C}$, corelația spațială între $\delta^{18}\text{O}$ și indicele de secetă indică corelații semnificative și stabile în timp, cu cel mai mare coeficient de corelație pentru indicele de secetă SPEI3 din luna august. Corelația spațială relevă o structură dipolară, valorile mari de $\delta^{18}\text{O}$ fiind asociate cu condiții de secetă și anomalii pozitive de temperatură în Europa centrală, sud-estică și de est și cu anomalii negative de temperatură și un climat umed în Europa nord-vestică. De asemenea, $\delta^{18}\text{O}$ reflectă modificări ale circulației atmosferice la scară largă și ale temperaturii la suprafața mării din Oceanul Atlantic de Nord și din Marea Mediterană. Valorile ridicate (scăzute) ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu un sistem de presiune înaltă (joasă) în partea centrală și estică a Europei și cu o temperatură la suprafața Mării Mediteraneene mai mare (mai mică). Aceste rezultate demonstrează că compoziția izotopilor stabili de oxigen în celuloza inelelor anuale din Munții Călimani (nord-estul României) reprezintă un mare potențial pentru reconstituirile paleoclimatice de secetă atât la scară locală, cât și la scară europeană, precum și a dinamicii circulației atmosferice la scară mai largă.

1.5.6 Capitolul 7: Reconstituirea paleoclimatică a umidității relative și secetei din perioada verii din ultimii 760 de ani pe baza compoziției izotopice de oxigen din celuloza inelelor anuale de *Pinus cembra* din Munții Călimani, România.

Creșterea frecvenței și a intensității perioadelor caniculare și a secetelor de vară determină necesitatea cunoașterii variabilității fenomenelor extreme din trecut pentru a îmbunătăți prognozele climatice. Necesitatea reconstituirilor paleoclimatice în România este evidențiată de faptul că în partea de est a Europei există doar câteva reconstituiri paleoclimatice de înaltă rezoluție. În acest context, este necesar să se facă o reconstituire paleoclimatică pe termen lung, folosind izotopii stabili de carbon și oxigen din inelele anuale, care reprezintă un instrument important pentru o mai bună înțelegere a variabilității climatului pentru întregul continent. Potențialul climatic al izotopilor stabili din celuloza inelelor anuale de *Pinus Cembra* din Munții Călimani a fost deja demonstrat de către Nagavciuc et al. (2019b). Scopul acestui studiu este de a crea două cronologii pe baza $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$ pentru a reconstitui variabilitatea climatică din ultimii 760 de ani în Munții Carpați Orientali (Munții Călimani), România. Pentru aceasta am folosit datele de $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale pentru a reconstitui variabilitatea umidității relative și a indicelui de secetă Palmer (scPDSI) din ultimii 760 de ani. Mai mult, am analizat reconstituirea dată cu date din arhivele istorice pentru a confirma rezoluția înaltă a evenimentelor extreme reconstituite, de asemenea am analizat corelațiile spațiale (cu date de observație și date reconstituite) la scară europeană pentru a confirma că rezultatele noastre reflectă variabilitatea secetei atât la nivel local, cât și la nivel european. Pentru aceasta au fost elaborate cronologiile $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$ pentru perioada 1252-2012. Conform rezultatelor raportate în Nagavciuc et al. (2019b) valorile $\delta^{18}\text{O}$ în inelele anuale de *Pinus Cembra* din Munții Călimani se corelează semnificativ cu umiditatea relativă la scară locală, și indicele de secetă scPDSI la scară europeană în perioada iunie-august. Prin urmare, acești doi parametri au fost utilizați pentru a reconstitui variabilitatea climatică din trecut din România și, respectiv, Europa. În studiul actual am folosit indicele de secetă scPDSI, în loc de indicele de secetă SPEI, pentru a putea să comparăm reconstituirea pe baza de $\delta^{18}\text{O}$ din Munții Călimani cu reconstituirea de PDSI pe termen lung (Cook et al., 2015). Modelul de calibrare și verificare pentru $\delta^{18}\text{O}$ și RH (scPDSI) a trecut toate testele de verificare convenționale pentru ambii parametri, indicând că modelul de regresie este robust și poate fi folosit pentru reconstituire. Aici prezentăm prima reconstituire a variabilității umidității relative (iunie-august) și a indicelui de secetă scPDSI

pe baza valorilor $\delta^{18}\text{O}$ în celulozei inelelor anuale din Carpații Orientali. Reconstituirea umidității relative de vară (și scPDSI) pentru Munții Călimani, Carpații Orientali se extinde până la 1252. Variația valorilor $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale înregistrează variabilitatea RH (și scPDSI) atât la frecvență înaltă, cât și la joasă frecvență. Distribuția temporală a evenimentelor extreme se suprapune foarte bine cu frecvența evenimentelor extreme din alte regiuni ale Europei. Frecvența ridicată a evenimentelor extreme pozitive din perioada 1500-1850 se suprapune foarte bine cu perioada Micii Ere Glaciare (LIA), caracterizată prin condiții climatice reci și umede (Bradley și Jonest, 1993; Esper et al., 2018a). Contrar, absența evenimentelor extreme pozitive și frecvența ridicată a evenimentelor extreme negative din ultimul secol ar putea fi legate de schimbările climatice globale. Prin poziția sitului în sud-estul Europei centrale, reconstituirea umidității relative și a indicelui de secetă scPDSI pe baza $\delta^{18}\text{O}$ în inelele anuale este semnificativ corelată cu variabilitatea condițiilor climatice uscate / umede din partea de est a României (și Europa de Est). Rezultatele obținute joacă un rol important în reconstituirea paleoclimatică la scară europeană pe baza $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale.

1.5.7 Capitolul 8: Concluzii și contribuții personale

În acest capitol, principalele rezultate obținute în capitolele 3 - 7 sunt rezumate și discutate în contextul obiectivelor principale propuse în această teză. Acest capitol prezintă o sinteză care se bazează mai mult pe contribuțiile personale, și pune în evidență importanța rezultatelor obținute în această teză de doctorat în domeniul dendrocronologiei și dendroclimatologiei prin utilizarea parametrilor fizici și geochimici ai inelului anual pentru reconstituiri paleoclimatice în viitoarele studii de paleoclimă.

2. Bazele teoretice

2.1 Formarea inelelor anuale de creștere a arborilor

În zonele temperate, datorită variațiilor climatice sezoniere (iarnă-vară), activitatea cambiumului este întreruptă în timpul iernii, arborii crescând doar în sezonul climatic favorabil creșterii (Fritts, 1976). Această întrerupere a sezonului de vegetație determină apariția delimitării clare a creșterii anuale a arborelui și, în același timp, apare delimitarea unui singur strat de lemn de creștere care a fost format în timpul sezonului de creștere (an): inelul anual de creștere a arborelui (Popa, 2004; Schweingruber, 1988). Creșterea în lățime a inelelor anuale reflectă ciclul anual de creștere a arborelui. De obicei, inelele anuale pot fi împărțite în lemn timpuriu și lemn târziu. Lemnul timpuriu se formează la începutul sezonului de creștere (de obicei în primăvara anului) și are o culoare mai deschisă, în timp ce lemnul târziu se formează la sfârșitul sezonului de creștere (de obicei în timpul verii și până la sfârșitul sezonului de creștere) și are o culoare mai închisă (Creber and Chaloner, 1984; Fritts, 1976; Popa, 2004). Variația creșterii inelului anual de la an la an este influențată de factorii de mediu (externi) și factorii fiziologici (interni), care condiționează variația nu numai a lățimii inelului anual, ci și a parametrilor fizici (de exemplu, densitatea maximă a inelului anual) precum și parametrii geochimici (de exemplu, compoziția izotopilor stabili de carbon și oxigen) (Fritts, 1976; Popa, 2004; Schweingruber, 1988). Pe lângă rezoluția anuală a inelului anual, semnalul climatic înregistrat și păstrat prin variațiile anuale ale parametrilor fizici și geochimici ai inelelor anuale pot fi măsurați și cuantificați prin intermediul proxy-urilor în vederea reconstituirii condițiilor de mediu în care s-a format inelul anual.

2.2 Parametri fizici ai inelului anual ca indicatori proxy pentru climă: baze teoretice

2.2.1 Lățimea inelului anual

Condițiile favorabile (nefavorabile) de mediu (cald și umed versus foarte cald și uscat) favorizează formarea inelelor anuale mai largi (mai înguste) (Popa and Popa, 2007; Popa and Sidor, 2010; Schweingruber, 1988; Schweingruber et al., 1978). Pe lângă factorii fiziologici și de mediu, creșterea inelului este de asemenea afectată de factorii biotici și antropici la diferite scări spațiale și temporale (Fritts, 1976; Fritts and Swetnam, 1989; Popa, 2004). Acești factori externi pot influența rata de fotosinteză și transpirație prin urmare și creșterea radială a arborilor (Kozlowski et al., 1991; Pasarkan and Danciu, 2001).

Semnalul combinat al tuturor acestor factori este înregistrat prin parametrul lățimii inelului anual, iar analiza unui singur factor este imposibilă de realizat fără a lua în considerare ceilalți factori. Din acest motiv, pentru cuantificarea semnalului climatic pe baza lățimii inelului este necesar un număr mare de arbori din diferite situri și specii pentru a minimiza zgomotul cauzat de alți factori non-climatici (Barbu and Popa, 2004; Fritts, 1976; Popa and Sidor, 2010; Schweingruber, 1988).

2.2.2 Densitatea maximă a inelului anual

Inelele anuale de creștere a arborilor de rășinoase prezintă o succesiune de benzi mai deschise și mai închise la culoare, reprezentând, lemnul timpuriu și lemnul târziu (Schweingruber, 2007). Lemnul timpuriu se caracterizată printr-o culoare deschisă, celule de dimensiune mai mare și pereți celulari mai subțiri, în timp ce lemnul târziu se caracterizează printr-o culoare mai închisă și pereți celulari mai groși (Bradley, 1999; Osborne and Jackson, 1989). În general, aceste modificări anatomice prezintă o structură progresivă tipică care descrie variația intra-anuală a densității inelului anual: de la densitatea scăzută în timpul

formării lemnului timpuriu la densitatea înaltă în timpul formării lemnului târziu (Cuny and Rathgeber, 2016; Schweingruber et al., 1978). Aceste variații ale densității inelului anual sunt rezultatul activității cambiumului și au un efect direct asupra parametrilor fizici ai inelului anual, cum ar fi lățimea sau densitatea maximă a inelului anual (Carteni et al., 2018; Cuny et al., 2014; Hartmann et al., 2017). Variațiile anuale ale densității inelului anual sunt date de durata și viteza de mărire a celulei și de durata și viteza de îngroșare a pereților celulari, care sunt influențate de factorii climatici (Cuny et al., 2014; Cuny and Rathgeber, 2016; Polge, 1973; Schweingruber, 1996; Schweingruber et al., 1978).

2.2.3 Intensitatea în albastru

Tehnica de bază a intensității în albastru este similară cu cea a tehnicii densității maxime și constă în măsurarea intensității canalului albastru al spectrului luminos vizibil care este reflectat de suprafața lemnului (Björklund et al., 2013; Kaczka et al., 2018). Canalul albastru, care se reflectă din suprafața lemnului, este înregistrat în imaginile în gri și poate fi măsurat cu diferite programe dendroclimatice (e.g. (Windendro or Coorecorder) (Björklund et al., 2013; Cox Analytical Systems, 2016).

Variația valorilor intensității în albastru în inelele anuale, este cauzată de caracteristicile optice ale lemnului, care este influențată de conținutul de lignină din pereții celulelor lemnului târziu (McCarroll et al., 2002; Österreicher et al., 2015), care este un absorbant sensibil al energiei cu lungime de undă scurtă (Björklund et al., 2014). Gradul conținutului de lignină din pereții celulari din lemnul târziu este influențat de factorii climatici (Gindl et al., 2000), astfel încât variațiile intensității în albastru din inelele anuale reflectă variabilitatea climatică (Campbell et al., 2007; McCarroll et al., 2002; Nagavciuc et al., 2019c).

2.3 Parametrii geochimici ai inelului anual ca indicatori proxy pentru clima: baze teoretice

2.3.1 Izotopii stabili: bază teoretică

Izotopii sunt atomi ai aceluiași element ale cărui nuclee sunt alcătuite din același număr de protoni, dar un număr diferit de neutroni, adică au încărcături electrice egale, dar mase diferite (Nagavciuc, 2015; Tiwari et al., 2015). Izotopii pot fi stabili (au un timp de înjumătățire foarte mare și nu poate fi măsurat cu tehnologiile actuale) și radioactivi (se dezintegrează spontan și formează alți izotopi într-un interval măsurabil de timp) (Nagavciuc, 2015; Tiwari et al., 2015; Văсарu, 1968).

Măsurătorile pentru compoziția izotopilor stabili se face ca un raport între izotopii cu masă mai mare și masă mai mică (de exemplu, $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ sau $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$) și sunt exprimați prin convenție în delta (δ), raportat în mil (‰) față de un standard internațional (1) (McCarroll and Loader, 2004; Nagavciuc, 2015; Nagavciuc et al., 2019a):

$$\delta^{xx}\text{E} = \left(\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 (\text{‰}) \quad (1)$$

unde E este elementul analizat (de exemplu, carbon, oxigen), xx este masa atomică a izotopului mai greu (de exemplu 13 pentru carbon sau 18 pentru oxigen), R_{sample} este raportul dintre elementul analizat (de exemplu $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ sau $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$), iar R_{standard} este raportul elementului standard. Standardul internațional pentru emisiile de carbon este Viena PeeDeeBelemnite (VPDB), iar pentru oxigen este Apă Oceanică Medie Etalon de la Viena (Vienna Standard Mean Ocean Water- VSMOW), furnizată de Agenția pentru Energie Atomică (IAEA), Viena, Austria (McCarroll and Loader, 2004).

2.3.2 Izotopul stabil de carbon în plante

Valorile $\delta^{13}\text{C}$ din celuloză a inelelor anuale reflectă factorii climatici printr-o funcție directă între influența climei asupra conductivității stomatale (controlată de umiditatea relativă și umiditatea solului) și rata de fotosinteză (controlată de radiația solară și temperatura la suprafața frunzei) (Young et al., 2015). Această funcție poate fi exprimată și ca o variație a eficienței utilizării apei (WUEi) și a $\delta^{13}\text{C}$, reflectând fracționarea în timpul fotosintezei care stă la baza variației $\delta^{13}\text{C}$, a celulozei în inelele anuale și folosită prin urmare pentru extragerea semnalului climatic (inclusiv legătura indirectă cu variabilele climatice cum ar fi temperatura aerului, precipitațiile, acoperirea norilor, umiditatea relativă etc.).

2.3.3 Izotopul stabil de oxigen în plante

Variația $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale nu înregistrează direct valorile $\delta^{18}\text{O}$ din precipitații, dar reflectă: 1) sursa primară de apă: apa provenită din precipitații și infiltrată în sol, care este absorbită de rădăcini; variațiile $\delta^{18}\text{O}$ în sursa primară este controlată în principal de circulația atmosferică la scară largă și 2) de gradul de îmbogățire datorat evapotranspirației, care este controlat de conductanța stomatală și de presiunea vaporilor de apă, ambele fiind influențate de umiditatea aerului. În acest fel, variația $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale păstrează semnalul climatic prin variația $\delta^{18}\text{O}$ în apa de precipitație și prin procesul de fracționare din timpul evapotranspirației, ambele fiind legate direct de principalii parametri climatici, care la rândul lor sunt controlate de circulația atmosferică la scară largă.

3. Răspunsul climatic a parametrilor fizici a inelelor anuale de *Pinus sylvestris* din Carpații Orientali, România

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în Revista Dendrochronologia (Nagavciuc, V., Roibu, C., Ionita, M., Mursa, A., Cotos, M., Popa, I., 2019. Different climate response of three tree ring proxies of *Pinus sylvestris* from the Eastern Carpathians, Romania. Dendrochronologia 54, 56–63. doi:10.1016/j.dendro.2019.02.007, Impact Factor: 2.281).

Puținele reconstituiri dendroclimatice existente în zona Carpaților românești s-au axat doar pe lățimea inelului anual (TRW). Potențialul densității maxime a inelului anual (MXD) și reflectanța în albastru (BI) nu a fost exploatat încă. Majoritatea studiilor s-au bazat pe reconstituirea temperaturii medii de vară (Kern et al., 2009; Popa and Bouriaud, 2013; Popa and Kern, 2009; Popa and Sidor, 2010) și a cantităților de precipitații (Kern et al., 2009; Levanič et al., 2013, 2008), în timp ce relația cu alte variabile climatice, cum ar fi nebulozitatea și temperatura minimă sau maximă, nu a fost analizată. Prin urmare, scopul acestui studiu este: i) compararea cronologiilor MXD, BI și TRW dezvoltate din același set de probe de *Pinus sylvestris* preluate din Munții Carpați Orientali; ii) utilizarea datelor climatice lunare și zilnice pentru a evalua potențialul fiecărui parametru al inelului anual pentru studiile dendroclimatice; și iii) determinarea intervalului optim de timp pentru care coeficientul de corelare este cel mai mare și care prezintă cel mai mare potențial pentru reconstituiri paleoclimatice.

Pentru acest studiu, 20 de carote de *Pinus sylvestris* care acoperă perioada 1886-2015 au fost extrase din arbori vii din Munții Carpați Orientali (România). Măsurătorile MXD, BI și TRW au fost efectuate pe același set de date.

Relația cu parametrii climatici a fost analizată utilizând cinci variabile climatice (zilnice și lunare): temperatura medie a aerului (Tmean), temperatura maximă a aerului (Tmax), temperatura minimă a aerului (Tmin), cantitatea de precipitație (PP) și nebulozitatea (CLD). Pentru a analiza caracterul staționar al relației pe termen lung al celor trei indicatori proxy am folosit hărțile de stabilitate, o metodă utilizată cu succes în prognoza sezonieră a râurilor din Europa și a gheții marine din Antarctica (Ionita et al., 2018, 2014, 2008). Conceptul așa numitelor *hărți de stabilitate* a fost introdus de către Lohmann et al. (2005). Pentru a detecta stabilitatea temporală și spațială, variabilitatea corelării dintre proxy-urile inelului anual și parametrii climatici au fost investigate cu ajutorul unei ferestre mobile de 31 de ani pentru perioada 1902-2015. Corelația este considerată stabilă pentru acele regiuni în care parametrul inelului anual și parametrul climatic sunt corelate semnificativ la nivelul de semnificație de 90% sau 80% pentru mai mult de 80% din fereastra mobilă. O descriere detaliată a metodologiei este prezentată în Ionita (2017).

Rezultatele noastre sugerează că proxy-urile MXD și BI înregistrează un semnal climatic similar, în timp ce TRW are un semnal climatic diferit. Cei mai mari coeficienți de corelație au fost obținuți pentru indicatorul MXD, iar cea mai mare corelație a fost obținută cu temperatura maximă în intervalul de timp care se extinde de la sfârșitul lunii iulie până la mijlocul lunii septembrie. De asemenea, s-a obținut o corelație semnificativă între cronologia BI și temperatura maximă din august.

Analiza cu date climatice zilnice indică coeficienți de corelație mai mari comparativ cu rezultatele obținute cu datele climatice lunare pentru toate cele trei serii și toate variabilele climatice. Intervalul optim pentru cronologia MXD, cu cel mai mare coeficient de corelație

este 30 iulie - 24 septembrie pentru temperatura maximă, 12 august - 02 octombrie pentru PP și 30 iulie - 24 septembrie pentru CLD. Pentru cronologia BI, intervalul optim este 30 iulie - 27 august pentru temperatura maximă, 25 iulie - 24 august pentru PP și 25 iulie - 30 septembrie pentru CLD. În cazul cronologiei TRW, intervalul optim este 18 noiembrie - 16 martie pentru temperatura maximă, 24 decembrie - 26 ianuarie pentru PP și 23 decembrie - 26 ianuarie și 18 martie - 16 iulie pentru CLD (Figura 3.1).

Coeficienții mari de corelație dintre MXD și BI și parametrii climatici, sugerează că indicatorul BI poate fi folosit ca un proxy surogat pentru MXD, dar numai pentru luna august. Parametrii MXD și BI pot fi de asemenea utilizați în paralel cu TRW, deoarece înregistrează semnale climatice din perioade diferite. Deși coeficienții de corelație dintre BI și variabilele climatice au fost semnificativi, aceste corelații nu au fost stabile în timp, sugerând că BI nu poate fi utilizat în reconstituirea climei, cel puțin în regiunea analizată. Rezultatele studiului de față demonstrează că relația dintre variabilele climatice și indicatorii proxy poate fi stabilă sau instabilă în timp în funcție de tipul de indicatorul proxy, ceea ce indică faptul că este necesară prudență în studiile de reconstituire paleoclimatică, deoarece stabilitatea semnalului climatic înregistrat de indicatorii proxy reprezintă baza reconstituirii paleoclimatice.

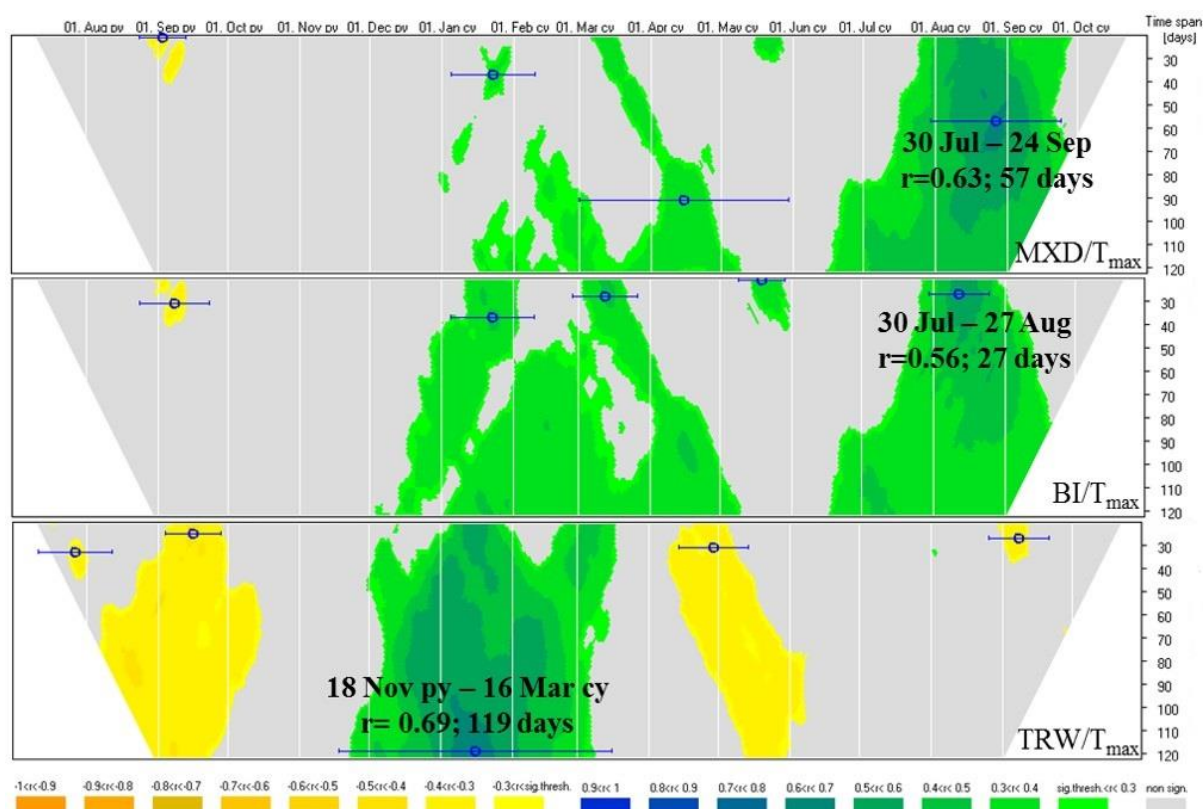


Figura 3.1. Rezultatele analizei coeficienților de corelației cu temperatura maximă (Tmax), date climatice zilnice și a) densitatea maximă (MXD) b) intensitatea în albastru (BI) și c) lățimea inelului anual (TRW) pentru perioada 1961-2013. Intervalele de timp care au cel mai mare coeficient de corelație sunt indicate de cercuri, iar începutul și sfârșitul intervalelor de timp corespunzătoare sunt indicate de barele orizontale. Codul de culoare pentru nivelul de semnificație al corelațiilor este raportat sub grafic. Liniile verticale albe evidențiază prima zi a fiecărei luni.

4. Influența descompunerii aeriene asupra compoziției izotopice de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în Revista Dendrochronologia (Nagavciuc, V., Kern, Z., Perşoiu, A., Kesjár, D., Popa, I., 2018. Aerial decay influence on the stable oxygen and carbon isotope ratios in tree ring cellulose. Dendrochronologia 49, 110–117. doi:10.1016/J.DENDRO.2018.03.007, Impact Factor: 2.281).

Compoziția izotopilor stabili de oxigen și carbon (denumite în continuare valori $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^{13}\text{C}$) în celuloza inelelor anuale a devenit unul dintre cei mai puternici indicatori proxy pentru reconstituirea variabilității climatice din trecut (M. Gagen et al., 2011). Cu toate acestea, lemnul este frecvent (parțial) degradat, ceea ce duce la incertitudine analitică. Lățimea inelului anual (TRW) nu este influențată de starea lemnului (adică procesul de descompunere), deoarece rezistența mecanică a lemnului rămâne neschimbată în timpul descompunerii (Schweingruber, 2007), în timp ce lemnul parțial descompus nu poate fi utilizat pentru măsurători de densitate și de intensitate în albastru deoarece pereții celulari descompuși (parțial) afectează rezultatele (Schweingruber et al., 1988). Studiile despre variabilitatea compoziției izotopice de oxigen și carbon în celuloza inelelor anuale în lemn parțial descompus sunt extrem de rare, chiar dacă este bine documentat faptul că lemnul parțial descompus și nedescompus a fost amestecat destul de frecvent (Becker et al., 1991; Boettger et al., 2003; Hunkeler et al., 2001; Mancini et al., 2003; Spiker and Hatcher, 1987).

Scopul acestui studiu este de a evalua gradul în care lemnul parțial descompus afectează reconstituirile paleoclimatice pe baza compoziției izotopilor stabili de oxigen și carbon, prin studierea și compararea compoziției izotopice de oxigen și carbon în inelele anuale de *Pinus cembra* din Munții Carpați Orientali, România, în lemn parțial descompus și nedescompus pe circumferința aceluiași nivel.

Diferențele variabilității compoziției izotopice pe circumferința aceluiași inel au fost între 0,1 și 0,5 ‰ pentru valorile $\delta^{18}\text{O}$ și între 0,5 și 1,6 ‰ pentru valorile $\delta^{13}\text{C}$ între lemn parțial descompus și lemn nedescompus (Tabelul 4.1). Diferențele variabilității compoziției izotopice pe circumferința aceluiași inel a fost mai mică decât cea raportată în literatură (0,5-1,5 ‰) pentru $\delta^{18}\text{O}$, și un pic mai mare pentru $\delta^{13}\text{C}$ decât valorile raportate (0,7-1,2 ‰). Diferențele variabilității compoziției izotopice între diferiți arbori variază între 1,1 și 2,3 ‰ pentru valorile $\delta^{18}\text{O}$ și între 2 și 4,7 ‰ pentru valorile $\delta^{13}\text{C}$. Diferențele dintre diferiți arbori pentru valorile $\delta^{18}\text{O}$ sunt similare cu cele raportate în literatură (1-2 ‰ pentru oxigen), dar sunt mai mari pentru valorile $\delta^{13}\text{C}$ (1-3 ‰ pentru carbon). Rezultatele obținute arată că diferențele pentru valorile $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^{13}\text{C}$ între lemnul parțial descompus și nedescompus sunt mai mici decât variația dintre arborii diferiți din același sit, sugerând că lemnul parțial descompus poate fi folosit pentru reconstituiri paleoclimatice pe baza compoziției izotopilor stabili de oxigen și carbon. Diferențele pe circumferința aceluiași inel (lemn parțial descompus și nedescompus) sunt mai mici decât variațiile de la arbore la arbore, dar setul de date obținut este mic, prin urmare concluzia este preliminară. O recomandare metodologică generală pentru viitoarele studii pe baza compoziției izotopilor stabili de oxigen și carbon în inelele anuale subfosile este de a specifica mai în detaliu starea de descompunere a lemnului observat în secțiunea analizată, deoarece poate contribui la o mai bună înțelegere a potențialelor efecte izotopice distincte care sunt afectate de diferitele procese de descompunere.

Table 4.1 Diferențe intra- și inter-arbori (pe circumferința aceluiași inel și între diferiți arbori) ale compoziției izotopice de oxigen și carbon, calculate ca diferențele dintre valorile izotopice măsurate. Diferențele pe circumferința aceluiași inel au fost măsurate între lemnul parțial descompus (D) și cel nedescompus (ND) a arborilor A și B. Variabilitatea dintre diferiți arbori a fost calculată numai pentru lemn nedescompus. Hașurarea culorii variază de la diferențele maxime (roșii) la cele minime (galbene).

	$\delta^{18}\text{O}$ differences					$\delta^{13}\text{C}$ differences					$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
	intra-tree	inter-tree				intra-tree	inter-tree				intra-tree	
	AND-D	F-I	F-AND	I-AND		AND-D	F-I	F-AND	I-AND		CD-ND	CD-ND
1740	-0.3	0.8	0.5	-0.3		-1.1	1.6	4.2	2.6	1135	0.3	0.3
1741	-0.1	1.0	0.7	-0.3		-1.5	1.7	4.3	2.7	1136	0.1	0.4
1742	0.1	1.2	0.1	-1.1		-1.5	2.0	4.3	2.3	1137	0.1	0.3
1743	-0.1	1.0	0.1	-1.0		-1.4	2.1	4.3	2.2	1138	0.0	0.2
1744	-0.1	0.9	0.5	-0.4		-1.6	2.4	4.7	2.2	1139	0.0	0.0
1745	-0.4	0.8	0.6	-0.2		-1.2	2.4	4.5	2.0	1140	0.1	0.1
1746	0.0	1.4	0.4	-1.0		-1.0	2.1	4.3	2.2	1141	-0.1	0.2
	BND-D	E-D	E-BND	D-BND		BND-D	E-D	E-BND	D-BND	1142		
1886	-0.3	-0.4	-0.1	0.4		0.2	1.3	-0.3	-1.6	1143	-0.1	0.0
1887	-0.4	1.3	0.6	-0.8		0.5	1.2	-0.6	-1.8	1144	-0.5	0.1
1888	-0.5	-0.5	0.7	1.3		0.3	1.0	-1.0	-2.0	1145	-0.1	0.5
1889	-0.5	-0.3	1.4	1.7		-0.2	1.1	-0.1	-1.2			

5. Izotopii stabili de oxigen din inelele anuale de stejar din România înregistrează secetă de vară și circulația atmosferică la scară mare în Europa

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în Revista *Climate Dynamics* (Nagavciuc, V., Ionita, M., Perșoiu, A., Popa, I., Loader, N.J., McCarroll, D., 2019. Stable oxygen isotopes in Romanian oak tree rings record summer droughts and associated large-scale circulation patterns over Europe. *Climate Dynamics* 52, 6557–6568. doi:doi.org/10.1007/s00382-018-4530-7, Impact Factor: 4.048).

România are un potențial ridicat de a dezvolta dendrocronologii de stejar, acoperind aproape tot holocenul, folosind lemnul din pădurile de stejar bine conservate, împreună cu lemnul fosil de stejar arheologic (Kern and Popa, 2016; Nechita et al., 2017; Rădoane et al., 2015). Situl de studiu Nușfalău se caracterizează printr-un potențial foarte mic pentru reconstituiri paleoclimatice pe baza lățimii inelului anual, deoarece acest indicator proxy prezintă o corelație foarte mică cu parametrii climatici (Nechita, 2014; Nechita and Popa, 2012).

Acest studiu își propune să evalueze potențialul izotopului stabil de oxigen din inele anuale de stejar din România pentru a produce reconstituiri de paleoclimă, inclusiv variabilitatea secetei din timpul verii și pentru a evalua dacă variațiile compoziției izotopice de oxigen sunt influențate de către circulația atmosferică la scară largă din Europa.

Acest studiu reprezintă prima înregistrare anuală a izotopilor stabili de oxigen (1900-2016) în celuloza lemnului târziu a inelelor anuale de stejar (*Quercus robur*) din nord-vestul României. Valorile $\delta^{18}\text{O}$ se corelează semnificativ (95% nivel de semnificație) pozitiv cu durata de strălucire a soarelui (iunie-iulie-august, JJA) ($r = 0,55$) și temperatura maximă ($r = 0,48$) și negativ cu nebulozitatea de vară ($r = -0,49$) și cantitatea de precipitații ($r = -0,51$). Cel mai mare coeficient de corelație a fost obținut cu umiditatea relativă de vară ($r = -0,67$), care are un efect direct asupra fracționării izotopilor de oxigen în frunză.

Rezultatele calibrării și verificării demonstrează că valorile $\delta^{18}\text{O}$, în lemnul târziu a inelelor anuale de stejar, din România, reprezintă un indicator foarte bun pentru condițiile de umiditate relativă și de secetă pe timpul sezonului de vară și ar putea fi utilizate pentru a furniza o reconstituire pe termen lung a secetelor de vară.

Analiza corelației spațiale între valorile $\delta^{18}\text{O}$ și indicele de secetă Palmer (scPDSI) se caracterizează printr-o structură dipolă: corelații negative cu condițiile de secetă din partea centrală și cea estică a Europei și corelații pozitive cu condițiile umede deasupra Peninsulei Scandinavia (Figura 5.1).

Variabilitatea interanuală a valorilor $\delta^{18}\text{O}$ este reflectată și în circulația atmosferică de vară la scară mare, cu valori mari ale $\delta^{18}\text{O}$ asociate cu o circulație de tip anticiclonic, asociate cu secetă și caniculă în partea centrală și estică a Europei. Rezultatele acestui studiu indică că există un potențial considerabil de a produce în România cronologii pe baza compoziției izotopilor stabili în inelele anuale, de lungă durată, care ar permite reconstituirea atât a secetei regionale, cât și a variabilității circulației pe scară largă în Europa de Sud și Europa Centrală.

Valorile scăzute ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu mișcarea undelor Rossby în câmpul de geopotential la nivelul de 500mb (Z500), caracterizat printr-un sistem de joasă presiune deasupra Groenlandei, un sistem de presiune înaltă deasupra Oceanul Atlantic, un sistem de

presiune joasă situat deasupra Europei centrale și un sistem de înaltă presiune deasupra Peninsulei Scandinave și a Rusiei de Vest (Figura 5.2a). Această structură a undelor Rossby (Z500) permite advecția umidității dinspre Atlantic spre partea centrală și estică a Europei (Figura 5.2b). Transportul de umiditate către Europa se caracterizează printr-un sistem de joasă presiune centrat pe Europa. Amplificarea intensivă a umidității conduce la cantități mai mari de precipitații în partea centrală și estică a Europei, ceea ce, la rândul său, va conduce la valori scăzute ale $\delta^{18}\text{O}$ (efectul de continentalitate, Dansgaard, 1964). Valorile pozitive $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu sistem de joasă presiune deasupra Oceanului Atlantic, un sistem de înaltă presiune în partea centrală a Europei și un sistem de joasă presiune deasupra Rusiei vestice (Figura 5.2a). Acest tip de circulație se caracterizează prin reducerea nebulozității și precipitații reduse (Figura 5.2b).

Prin urmare există un potențial considerabil de a produce cronologii lungi pe baza compoziției izotopilor stabili de oxigen în inelele anuale de stejar, ceea ce ar permite reconstituirii atât a secetei la scară regională, cât și a variabilității circulației atmosferice la scară largă deasupra Europei.

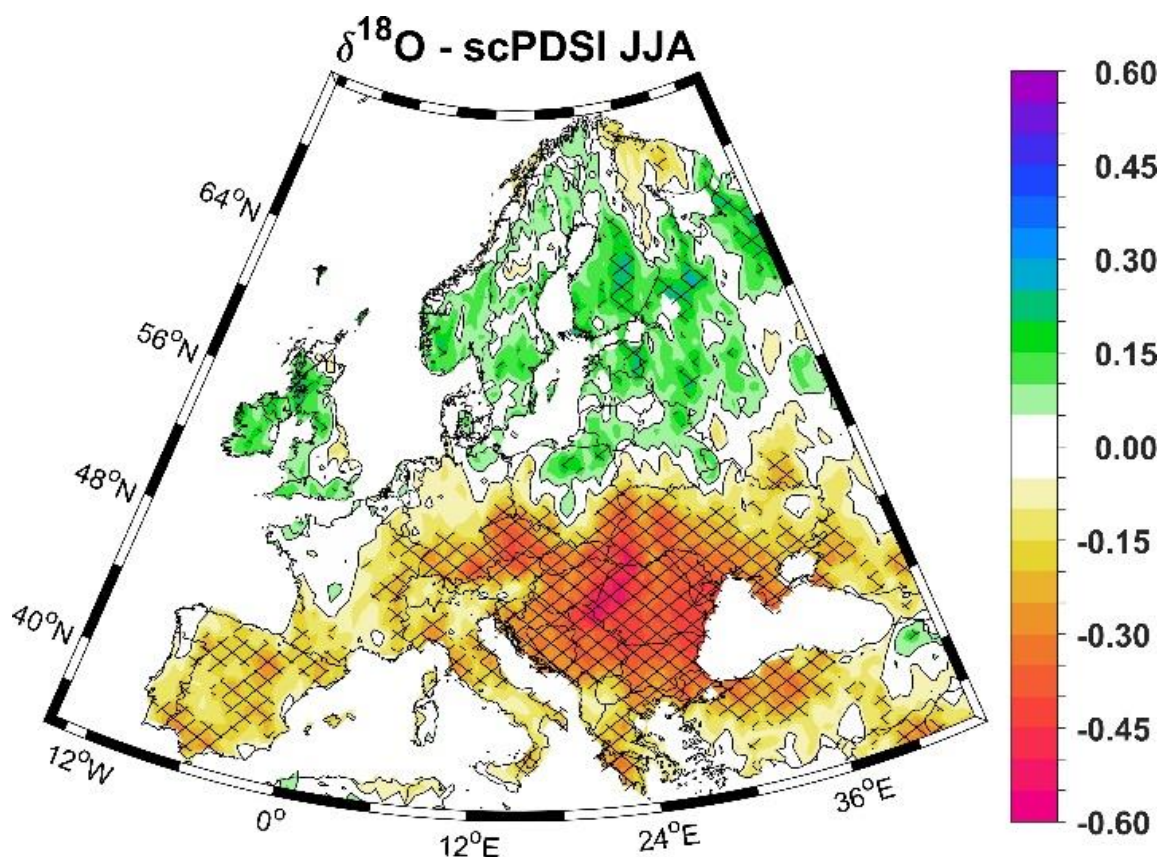
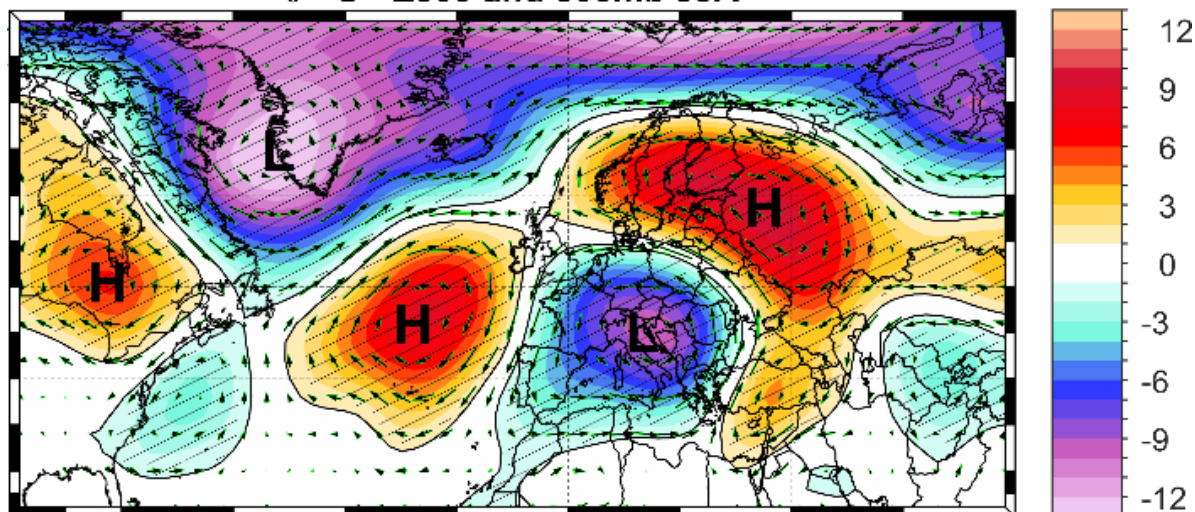


Figura 5.1. Harta de corelare spațială între indicele de secetă Palmer (scPDSI) de vară și valorile $\delta^{18}\text{O}$. Hașura evidențiază coeficienți de corelație semnificativi la un nivel de încredere de 95%. Perioada analizată: 1901 - 2014.

a)

LOW Composite Map
 $\delta^{18}\text{O}$ - Z500 and 500mb JJA



b)

HIGH Composite Map
 $\delta^{18}\text{O}$ - Z500 and 500mb Wind JJA

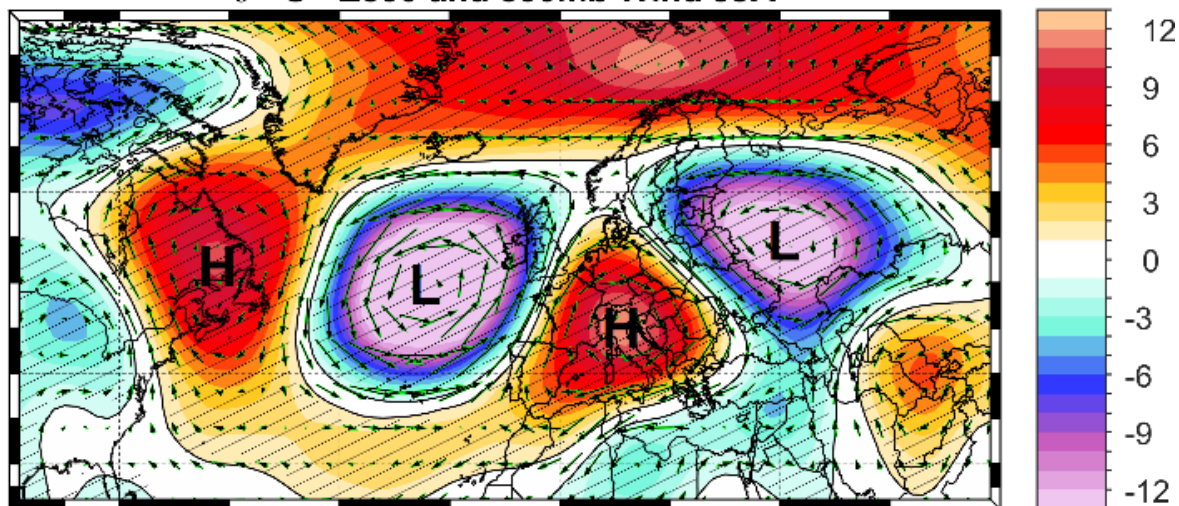


Figura 5.2 a) Harta compozită între anomaliile negative ale $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O} < -1$ deviație standard) și geopotențialul de vară la 500mb (Z500) și vectorii de vânt (săgeți); b) harta compozită între anomaliile pozitive ale $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O} > 1$ deviație standard) și geopotențialul de vară la 500mb (Z500) și vectorii de vânt (săgeți). Perioada analizată: 1901 - 2014.

6. Explorarea semnalelor climatice pe baza izotopilor stabili în inelele anuale ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) din Munții Călimani, România; calibrare pentru reconstituire paleoclimatică

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în Revista International Journal of Climatology (Nagavciuc, V., Kern Z., Ionita M., Hartl C., Konter O., Esper J., Popa I., Climate signals in carbon and oxygen isotope ratios of *Pinus cembra* tree-ring cellulose from the Călimani Mountains, Romania, accepted, Impact factor: 3.601).

Banca internațională de date cu inele anuale de arbori (ITRDB) conține mai mult de 4000 de cronologii, cu toate acestea, majoritatea se bazează pe lățimea inelului anual și doar câteva cronologii se bazează pe densitatea maximă a inelului anual și pe baza izotopilor stabili de carbon și oxigen (ITRDB, 2019). La nivel european, există un contrast puternic între partea estică a Europei și alte regiuni ale continentului, deoarece majoritatea reconstituirilor paleoclimatice bazate pe izotopii stabili de carbon și oxigen au fost realizate pentru Peninsula Scandinavă, Europa de Vest și în regiunea mediteraneeană (Konter et al., 2014; I. Labuhn et al., 2016; Treydte et al., 2007; Young et al., 2015).

Scopul acestui studiu este de a explora semnalul climatic înregistrat de variabilitatea interanuală a compoziție izotopice de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale de *Pinus cembra* L. din Munții Călimani, România (Figura 6.1). Pentru aceasta am analizat relația dintre valorile $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$ și variabilele climatice locale lunare din perioada 1961-2012, și cu date climatice grid pentru perioadă 1901-2012. De asemenea, am comparat datele obținute cu circulația atmosferică la scară largă, analizând potențial paleoclimatic pe baza modelelor de calibrare și verificare. Pentru aceasta am analizat compoziția izotopilor stabili de carbon și oxigen în inele anuale de *Pinus cembra* L. în România. Cronologiile acoperă perioada cuprinsă între 1876 și 2012 și integrează date de la patru arbori individuali din Munții Călimani, Carpații Orientali, unde observațiile climatice sunt rare și încep doar din 1961.

Compoziția izotopică de carbon se corelează semnificativ cu cantitatea de precipitație din iunie până în august (JJA) ($r = -0,49$, $p < 0,05$), cu umiditatea relativă (RH) din perioada martie și aprilie ($r = 0,43$ și respectiv $r = 0,45$, $p < 0,05$) și cu indicele de secetă SPEI3 în iulie și august ($r = -0,45$ și $r = -0,52$, respectiv, $p < 0,05$).

Compoziția izotopică de oxigen se corelează negativ cu cantitatea de precipitație ($r = -0,55$, $p < 0,05$), CLD ($r = -0,67$, $p < 0,05$), RH ($r = -0,64$, $p < 0,05$), $p < 0,05$; și pozitiv cu temperatura maximă ($r = 0,60$) în JJA (Table 3). Corelația mare cu CLD și RH poate fi explicată de corelația mare dintre acești doi parametri climatici ($r = 0,75$, $p < 0,05$). Umiditatea relativă are un efect direct asupra ratei de transpirație a frunzei și a conductivității stomatale prin raportul presiunii de vapori din interiorul și exteriorului frunzei (McCarroll and Loader, 2004).

Hărțile de stabilitate între $\delta^{13}\text{C}$ și indicele de secetă SPEI3 (Figura 6.2), arată ca semnalul climatic nu e stabil în timp, iar hărțile de stabilitate pentru $\delta^{18}\text{O}$ și datele climatice indică faptul că semnalul climatic este semnificativ și stabil în timp pentru perioada iunie - septembrie. Coeficientul de corelație cu indicele de secetă este semnificativ și negativ în

partea estică a Europei (de exemplu, România, Serbia, Bulgaria și Ucraina), în timp ce peste Peninsula Scandinavă (de exemplu, Norvegia, Suedia și partea de vest a Finlandei) se înregistrează corelații semnificative pozitive. Această structură dipolară a corelației spațiale cu datele SPEI3, este o caracteristică comună a distribuției spațiale a secetei la nivel european (Ionita, 2015). Cel mai bun rezultat pentru modelul de calibrare și verificare a fost obținut pentru indicele climatic (CI), indicând robustețea modelului de regresie. Acest lucru arată că modelul bazat pe relația dintre CI și $\delta^{18}\text{O}$ este semnificativ și reflectă variația reală a condițiilor climatice (uscat - cald / umed – rece) din partea estică a Europei, inclusiv zona de studiu (Figura 6.3).

Variabilitatea interanuală a valorilor $\delta^{18}\text{O}$ este direct influențată de circulația atmosferică la scară largă, și de temperaturile de la suprafață mării (SST) din Atlanticul de Nord și Marea Mediterană. Valorile ridicate de $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu un sistem de înaltă presiune deasupra Europei centrale și de sud și cu un sistem de presiune joasă deasupra Oceanului Atlantic de Nord, nordul Europei și a Rusiei. Acest tip de undă, în structura circulației atmosferice indică existența unei unde de tip Rossby (Ionita et al., 2017, 2012; Van Lanen et al., 2016) (Figure 6.4a), și favorizează advecția aerului uscat și cald din partea de nord a Africii deasupra Europei de sud-est (inclusiv deasupra sitului). Valorile scăzute ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu un centru de presiune joasă în partea centrală și estică a Europei și cu un sistem de înaltă presiune deasupra Atlanticului de nord, a Europei de Vest și de Nord.

Valorile mari ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu anomalii pozitive de SST deasupra Mării Mediterane și Oceanului Atlantic de Nord și anomalii negative ale SST deasupra Atlanticului de sud (Figura 6.4), în timp ce valori scăzute ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu anomalii negative de SST deasupra Mării Mediterane și a Mării Negre și anomalii pozitive de SST deasupra Oceanului Atlantic (Figura 6.4d).

Rezultatele prezentate în acest articol ne sugerează că compoziția izotopilor stabili de oxigen în celuloza inelelor anuale de *Pinus Cembra* din nord-estul României reprezintă un mare potențial pentru reconstituiri paleoclimatice. Aceste înregistrări oferă posibilitatea de a reconstitui atât seceta la scară regională, cât și variabilitatea pe scară largă a circulației atmosferice în sudul și centrul Europei, acoperind golul de informație din partea estică a Europei, lucru care va permite o mai bună înțelegere a variabilității climatice din trecut la scară continentală.

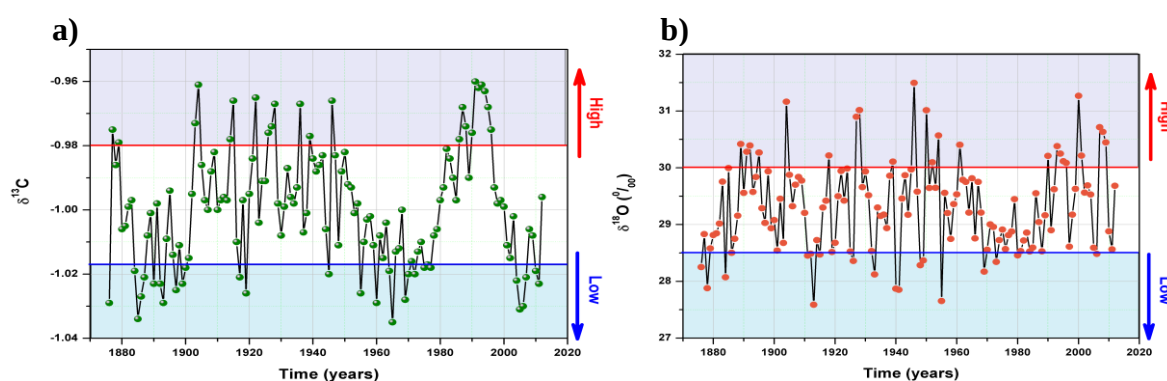


Figura 6.1. a) Evoluția temporală a $\delta^{13}\text{C}_{\text{res}}$ și b) $\delta^{18}\text{O}$ în perioada 1876 - 2012. Zonele umbrate indică anii utilizați pentru hărțile compozite din Figura 6.4

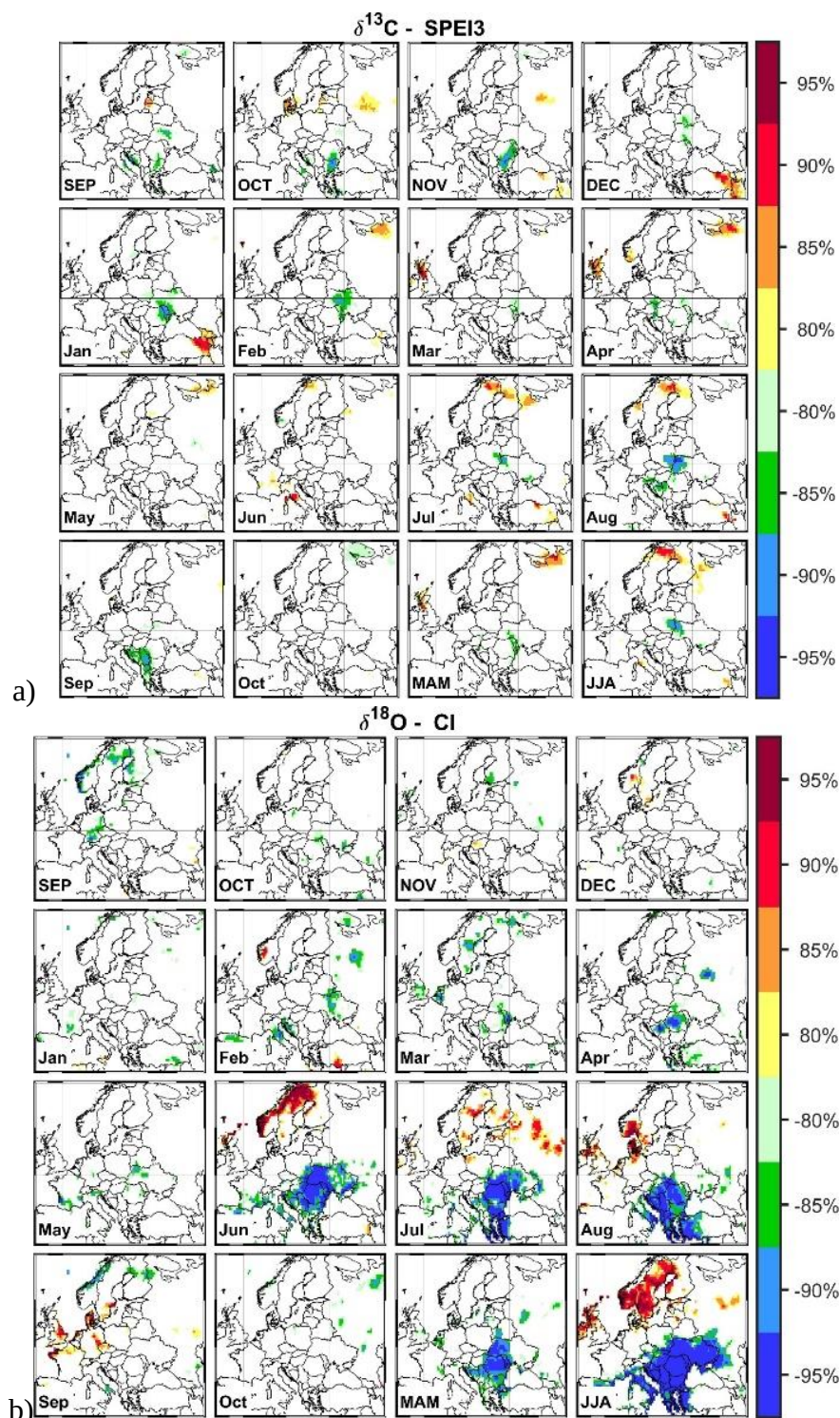
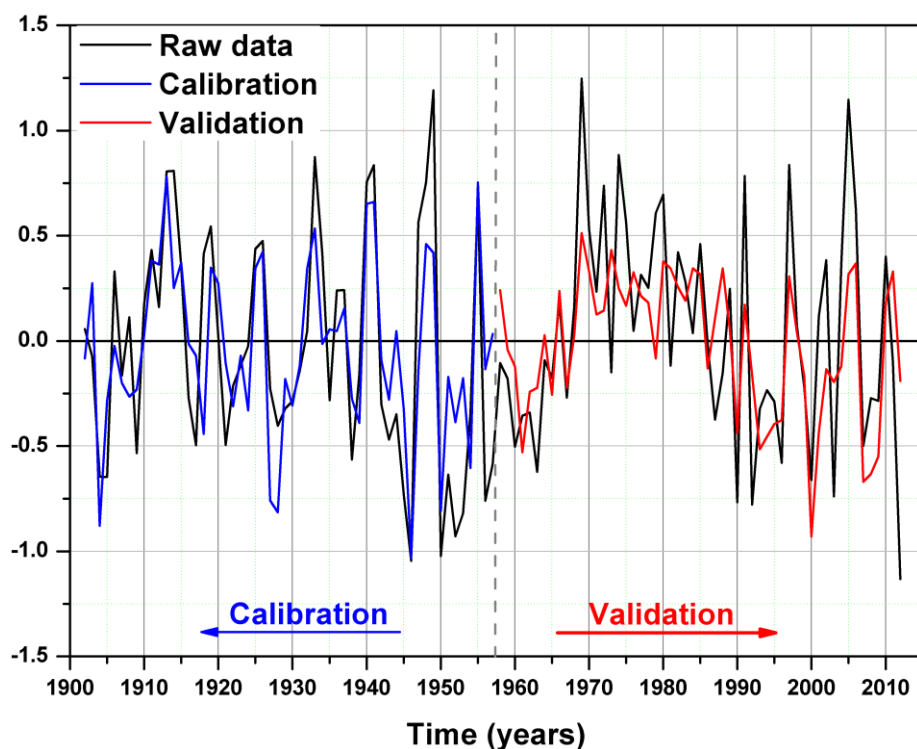


Figura 6.2. Hărțile de stabilitate pentru a) $\delta^{13}\text{C}$ și SPEI3 și b) $\delta^{18}\text{O}$ și CI, din septembrie anul precedent până în octombrie anul curent. Regiunile în care corelația este stabilă, pozitivă și semnificativă pentru cel puțin 80% ferestre sunt umbrite cu roșu închis (95%), roșu (90%), portocaliu (85%) și galben (80%). Regiunile corespunzătoare unde corelația este stabilă, dar negativă, sunt umbrite cu albastru închis (95%), albastru (90%), verde (85%) și verde deschis (80%). SEP - septembrie anul precedent, OCT - octombrie anul precedent, NOV - noiembrie anul precedent, DEC - decembrie anul precedent, Jan - ianuarie, Feb - februarie, Mar - martie, Apr - aprilie, May - mai, Jun - iunie, Jul - iulie, Aug - august, Sep - septembrie, Oct - octombrie, MAM - martie / aprilie / mai și JJA - iunie / iulie / august. Perioada analizată: 1902 - 2012.

a)



b)

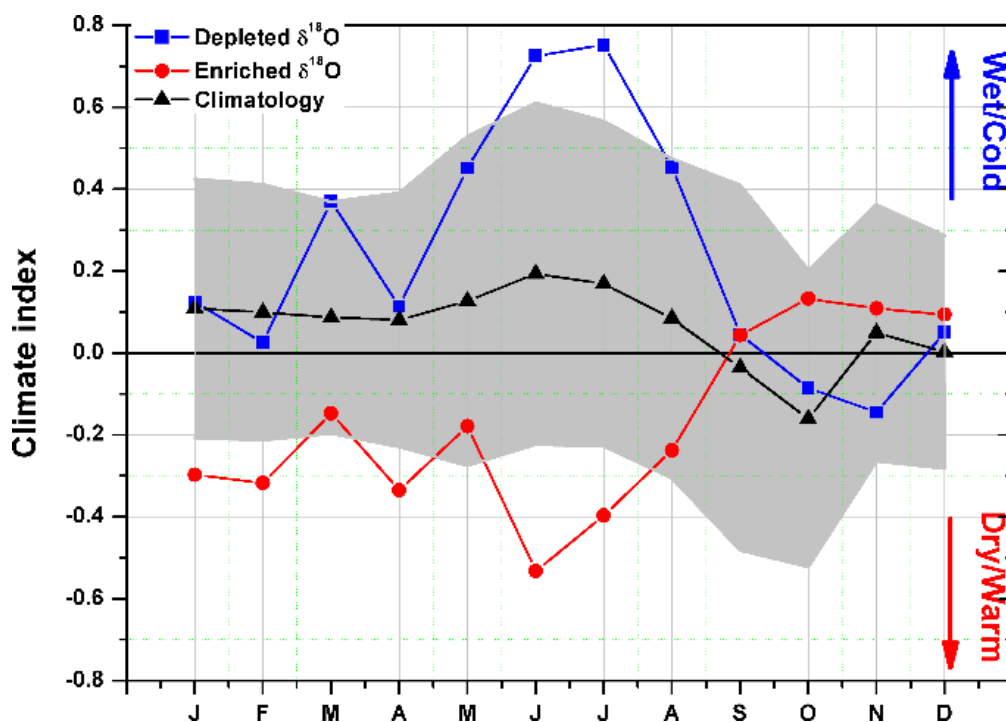


Figura 6.3. a) Modelul de calibrare-verificare pentru CI JJA; b) ciclul sezonier pentru CI JJA în anii cu valori extreme $\delta^{18}\text{O}$. În a) linia neagră indică datele observate; linia albastră indică CI reconstituit pentru perioada de calibrare, iar linia roșie indică CI reconstituit pentru perioada de verificare. În b) în cazul în care liniile colorate se află în afara umbrelor gri, apar deviații mai mari / mai mici de 1 abatere standard față de condițiile medii. Perioada analizată: 1902 - 2012.

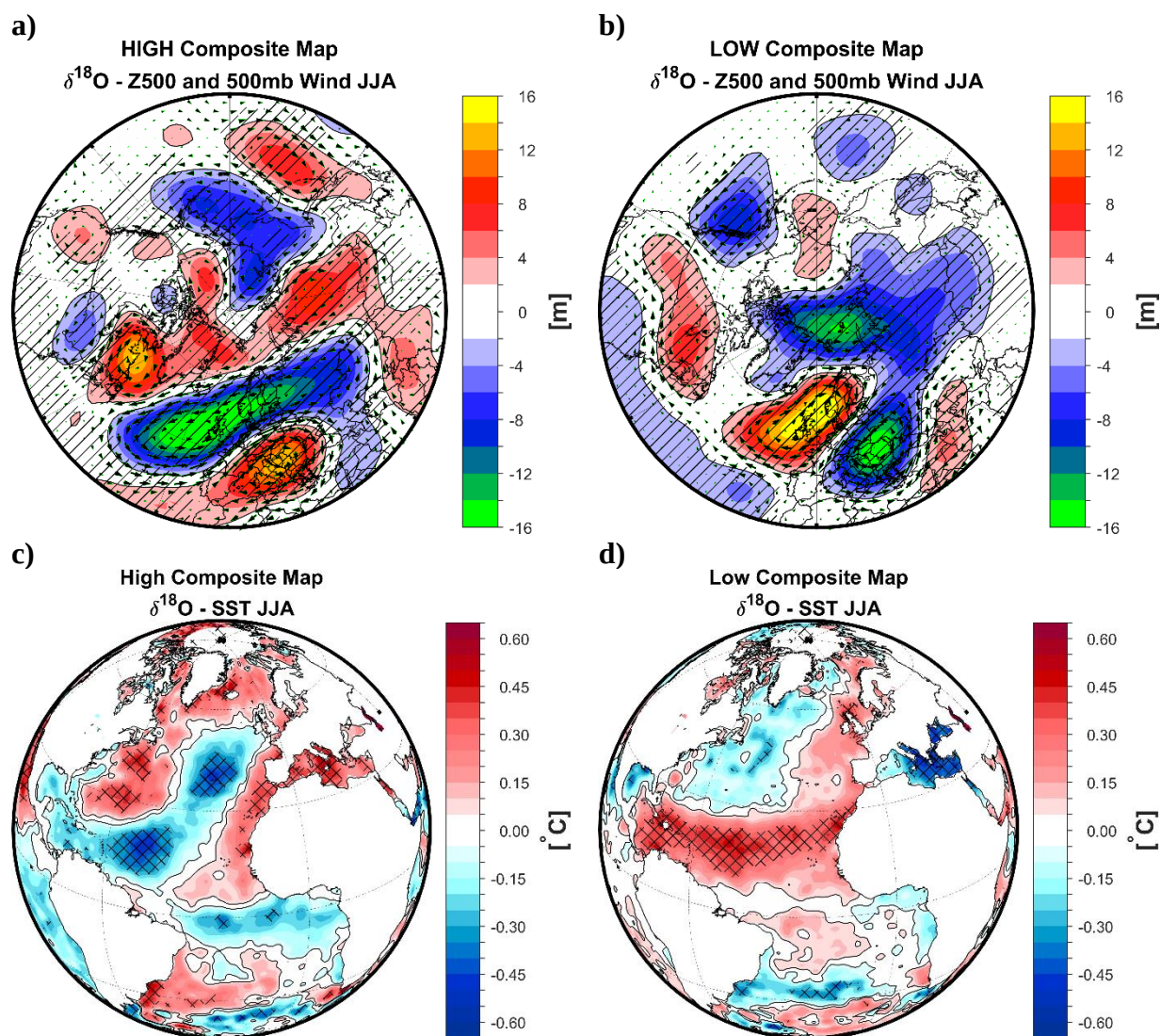


Figura 6.4. a) Hartă compozită între geopotential de vară la 500mb și anomaliile negative de $\delta^{18}\text{O}$ (< -1 std.dev.) și vectorii de vânt de vară (500 mb) de vară (săgeți negre); b) hartă compozită între geopotential de vară la 500 mb și anomaliile pozitive de $\delta^{18}\text{O}$ (> 1 std.dev.) și vectorii de vânt de vară (500 mb) de vară (săgeți negre) c) ca în a), dar pentru temperatura de suprafață a mării de vară (SST) și d) ca în b), dar pentru temperatura de suprafață a mării de vară (SST). Zonele hașurate evidențiază coeficienți corelați semnificativi la un nivel de încredere de 95%. Perioada analizată: 1876 - 2012.

7. Reconstituirea paleoclimatică a umidității relative și secetei din perioada verii din ultimii 760 de ani pe baza compoziției izotopice de oxigen din celuloza inelelor anuale de *Pinus cembra* din Munții Călimani, România

Rezultatele prezentate în acest capitol vor fi trimise spre publicare în Revista Nature Communications (Nagavciuc V., Ionita M, Kern Z., Popa I., 7.A 760 years of paleoclimatic reconstitution of summer relative humidity and droughts based on oxygen isotope ratios of *Pinus cembra* tree-ring cellulose from Călimani Mountains, Romania, in preparation).

Potențialul climatic al izotopilor stabili în celuloza inelelor anuale de *Pinus Cembra* din Munții Călimani a fost deja demonstrat în capitolul anterior (Nagavciuc et al. 2019) unde s-a analizat relația dintre $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale și parametrii climatici precum și legătura cu circulația atmosferică la scară largă, pentru a demonstra potențialul ridicat al compoziției izotopice de carbon și oxigen pentru reconstituiri paleoclimatice de înaltă rezoluție. Necesitatea reconstituirilor paleoclimatice în această zonă este evidențiată de faptul că în partea de est a Europei există doar câteva reconstituiri paleoclimatice de înaltă rezoluție. În acest context, este necesar să se realizeze o reconstituire paleoclimatică pe termen lung, utilizând izotopii stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale, care ar putea fi un cheia spre o mai bună înțelegere a variabilității climatului.

Scopul acestui studiu este de a crea câte o cronologie pe baza compoziției izotopice de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale de *Pinus Cembra* în Munții Călimani, Carpați Orientali, România, pentru a reconstitui variabilitatea paleoclimatică în ultimii 700 ani. Ca atare, am folosit compoziția izotopică de oxigen în celuloza inelelor anuale pentru a reconstitui variabilitatea umidității relative și a indicelui de secetă Palmer (scPDSI) în ultimii 700 de ani, pentru regiunea analizată. În plus, am comparat reconstituirea noastră cu date din arhivele istorice și cu seturi de date spațiale (observații și reconstituiri) la scară europeană pentru a confirma rezoluția evenimentelor extreme reconstituite, și a demonstra că rezultatele noastre reflectă variabilitatea secetei atât la nivel local cât și la nivel regional.

Ca atare, aici prezentăm prima reconstituire a variabilității umidității relative (iunie-august) și scPDSI pe baza valorilor $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale pentru Carpații Orientali, România. Pe baza modelului de calibrare și validare și a testelor statistice, putem concluziona ca modelul nostru de regresie pentru reconstituire a capturat semnalul de vară RH și scPDSI în valorile $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 7.1).

Hărțile de corelație spațială au fost utilizate pentru a investiga caracteristica spațială a indicelui de secetă în Europa, în perioada lunilor de vară. Analiza corelației spațiale arată că valorile $\delta^{18}\text{O}$ înregistrează variabilitate climatică atât la nivel local, cât și la nivel european (Figura 7.2). Harta de corelație dintre valorile $\delta^{18}\text{O}$ și scPDSI în ultimii 100 de ani arată o structură clară de tip dipol, cu corelații negative și semnificative în partea centrală, sud-estică și estică a Europei, și corelații pozitive și semnificative în partea de nord și nord-vest a Europei.

Pentru perioada reconstituită am găsit 39 de ani cu anomalii pozitive și 39 de ani cu anomalii negative pentru RH. Perioada 1252-1325 se caracterizează prin predominarea anilor extremi pozitivi (umiditate relativă ridicată / ani umezi extremi) și doi ani extremi de negativi (umiditate relativă foarte scăzută / ani extrem de secetoși). Perioada 1350-1500 se caracterizează prin predominarea anilor extremi de negativi și numai un an extrem pozitiv. Perioada 1500-1850 se caracterizează prin 32 de ani extremi negativi dintr-un total de 39 de ani și doar patru ani extremi pozitivi. Perioada de la 1850 până în 2012 se caracterizează prin absența anilor extremi pozitivi, în schimb predomină anii extremi negativi (24 de ani dintr-un total de 39, dintre care zece sunt în perioada 1990-2012). Analiza anilor extremi reconstituiți cu datele din arhive istorice a confirmat rezoluția ridicată a evenimentelor extreme reconstituite, aproape toate evenimente extreme reconstituite se regăsesc în datele climatice din arhive istorice ca evenimente catastrofale, care au afectat în mod direct sau indirect condițiile și calitatea vieții, cauzând numeroase daune materiale, foamete, răspândirea bolilor sau moartea.

Distribuția temporală a evenimentelor extreme înregistrate de $\delta^{18}\text{O}$ se suprapune foarte bine cu frecvența evenimentelor extreme din alte regiuni ale Europei. Frecvența ridicată a evenimentelor extreme pozitive din perioada 1500-1850 se suprapune foarte bine cu Mica Eră Glaciară (LIA), caracterizată prin condiții climatice reci și umede (Bradley and Jonest, 1993; Esper et al., 2018a). Contrar, absența evenimentelor extreme pozitive și frecvența ridicată a evenimentelor extreme negative din ultimul secol ar putea fi legate de schimbările climatice globale (Figura 7.3).

Analiza corelației dintre valorile $\delta^{18}\text{O}$ din celuloza inelelor anuale din Munții Călimani și un indice de secetă, în format grid, la nivel European, reconstituit pe bază de date proxy (Cook et al., 2015) arată o corelație semnificativă de până la 0,6 pentru perioada 1901-2012, în timp ce între valorile $\delta^{18}\text{O}$ și reconstituirea secetei (pentru perioada 1252-2012) există o corelație semnificativă de până la 0,4, sugerând că valorile $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale din Munții Călimani înregistrează variabilitatea secetei la nivel regional și este în concordanță cu restul reconstituirilor paleoclimatice din Europa.

Prin poziția sitului de studiu din sud-estul Europei centrale, reconstituirea umidității relative și scPDSI pe baza compoziției izotopice de oxigen ($\delta^{18}\text{O}$) în celuloza inelelor anuale este semnificativ legată de variația reală a condițiilor climatice (umed/uscă) în România și Europa de Est. Rezultatele noastre au implicații importante pentru reconstituirea climatică la scară europeană pe baza $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale, contribuind la o mai bună înțelegerea a variabilității climatului întregului continent.

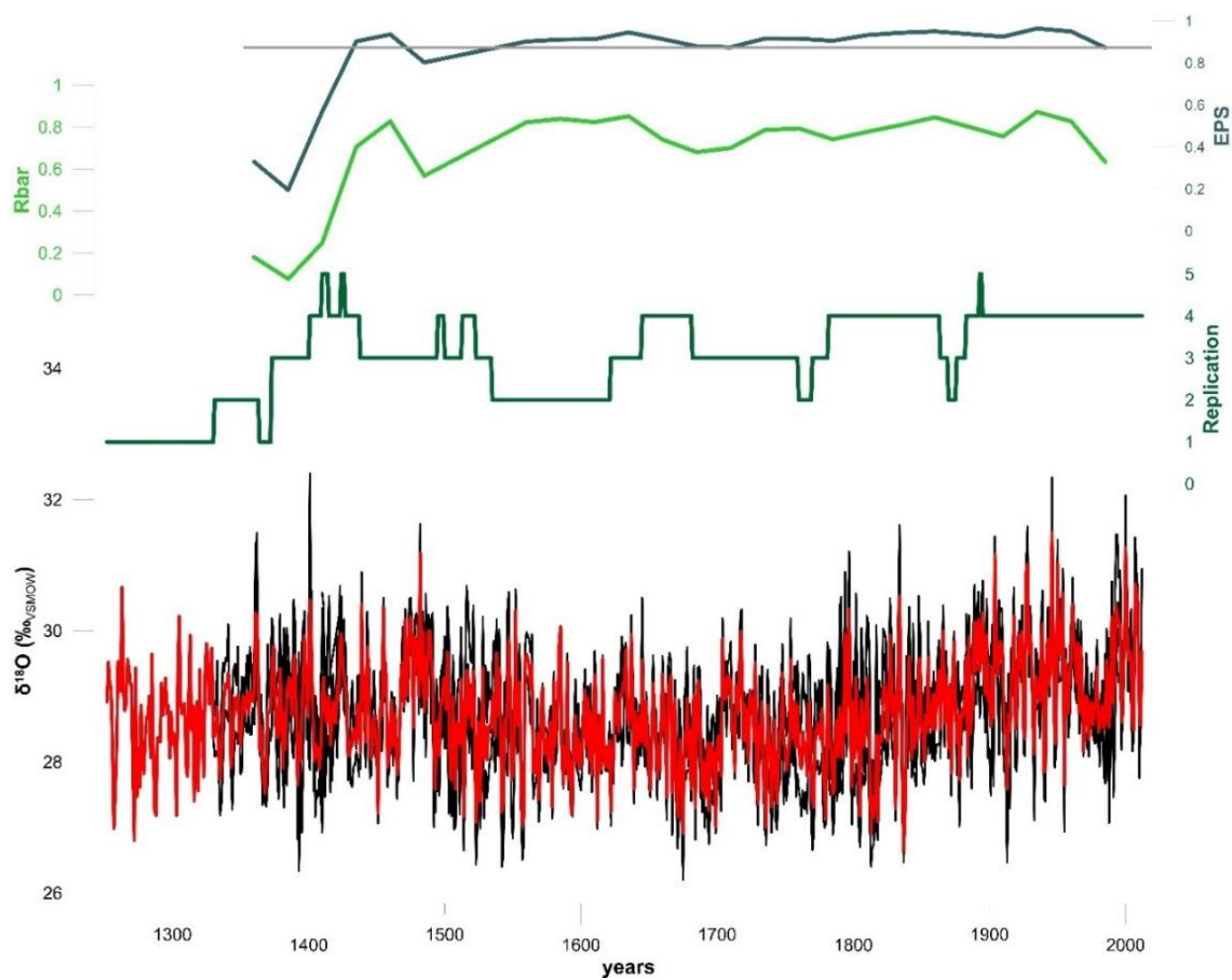


Figura7.1. Evoluția temporală a valorilor de $\delta^{18}O$, a replicării și a valorilor R_{bar}

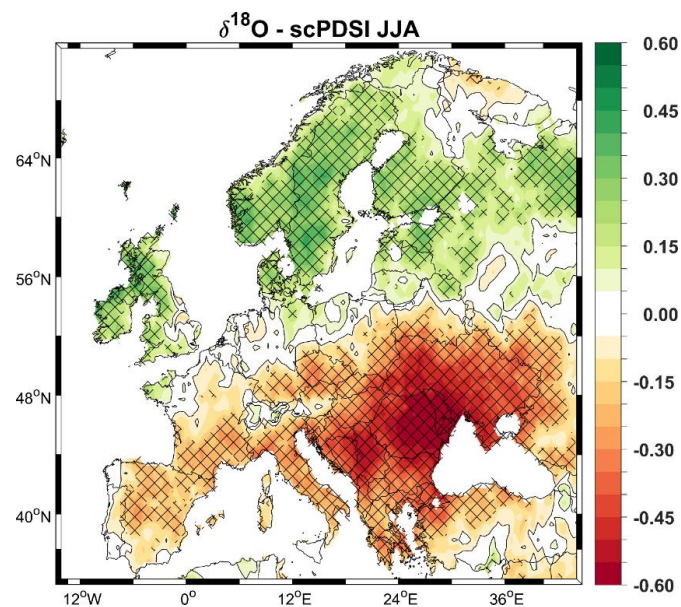


Figura7.2. Corelația spațială între $\delta^{18}O$ în celuloza inelelor anuale din Munții Călimani și scPDSI, pentru perioada 1901-2012

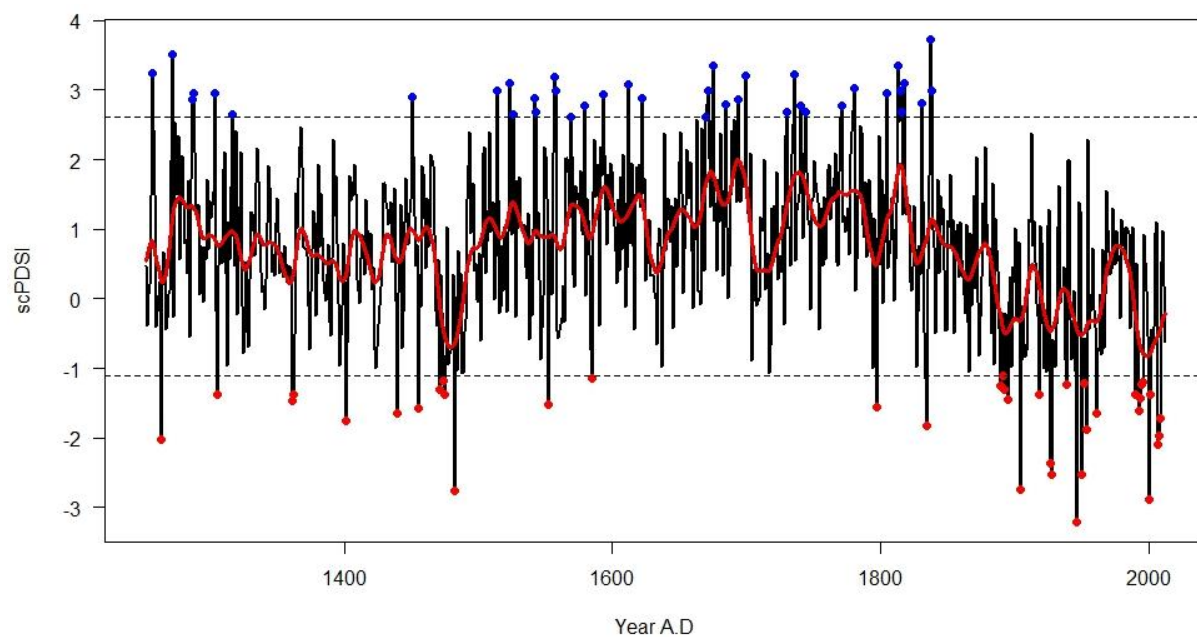


Figura7.3. Reconstituirea scPDSI pe baza $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale pentru perioada 1252-2012

8. Concluzii și contribuții personale

8.1. Concluzii

Obiectivul principal al acestei teze de doctorat a fost să prezinte o evaluare globală a transferului semnalului climatic în parametri fizici și geochimici ai inelelor de arbori din diferite situri și specii de arbori din România și răspunsul lor la variabilitatea climatică locală și pe scară largă, pentru a cuantifica potențialul lor dendroclimatic pentru reconstituiri paleoclimatice. În mod corespunzător, am investigat transferul semnalului climatic în parametri fizici (lățimea inelului anual (TRW), densitatea maximă a inelelor anuale (MXD), intensitatea în albastru (BI)), precum și în parametri geochimici (compoziția izotopică de carbon ($\delta^{13}\text{C}$) și oxigen ($\delta^{18}\text{O}$) în inele anuale) și am evaluat potențialul fiecăruia dintre proxy-urile menționate mai sus pentru reconstituiri paleoclimatice. Pentru aceasta s-au prelevat probe de la trei specii, din trei situri din România: *Pinus Sylvestris* la situl Zugreni pentru analiza TRW, BI și MXD, *Quercus robur L.* la situl Nușfalău pentru $\delta^{18}\text{O}$ și *Pinus cembra L.* la situl Călimani pentru $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$.

Conform obiectivelor specifice care au fost prezentate în partea introductivă a tezei, contribuția specifică a tezei poate fi rezumată după cum urmează:

- *Analiza răspunsului climatic al parametrilor MXD, BI și TRW în Pinus sylvestris, folosind datele climatice zilnice și lunare, pentru a găsi intervalul optim al fiecărui proxy pentru reconstituirea paleoclimatică (Capitol III – Articolul I)*

Pentru a evalua răspunsul climatic al parametrilor MXD, BI și TRW, au fost elaborate cronologiile MXD, BI și TRW pentru perioada 1886-2015 și au fost comparate cu datele climatice zilnice și lunare pentru a găsi intervalul optim al fiecărui proxy pentru reconstituiri paleoclimatice. Rezultatele arată că proxy-urile paleoclimatice MXD și BI înregistrează un semnal climatic similar, în timp ce TRW are un semnal climatic diferit. Cei mai mari coeficienți de corelație au fost obținuți pentru cronologia MXD cu toți parametrii climatici, cea mai mare valoare înregistrându-se pentru temperatura maximă în intervalul de la sfârșitul lunii iulie până la mijlocul lunii septembrie. În plus, s-au obținut corelații semnificative între cronologia BI și temperatura maximă din august.

Analiza bazată pe datele climatice zilnice indică coeficienți de corelație mai mari în comparație cu datele climatice lunare pentru toți cei trei parametri proxy, precum și pentru toți parametrii climatici analizați. Intervalul optim pentru cronologia MXD și temperatura maximă pentru care s-a obținut cel mai mare coeficient de corelație, este 30 iulie - 24 septembrie, de asemenea intervalul optim pentru precipitații este 12 august - 02 octombrie și 30 iulie - 24 septembrie pentru nebulozitate. Pentru cronologia BI, intervalul optim pentru temperatura maximă este 30 iulie - 27 august, 25 iulie - 24 august pentru cantitatea de precipitații și 25 iulie - 30 septembrie pentru nebulozitate. În cazul cronologiei TRW, intervalul optim este 18 noiembrie din anul precedent - 16 martie an curent pentru temperatura maximă, 24 decembrie din anul precedent - 26 ianuarie an curent pentru precipitații și 23 decembrie din anul precedent - 26 ianuarie și 18 martie - 16 iulie pentru nebulozitate.

Corelația mare dintre MXD respectiv BI și semnalul climatic puternic înregistrat de ambii indicatori proxy sugerează că cronologia BI poate fi folosită ca un proxy-surogat pentru MXD, dar numai pentru luna august, iar cronologiile MXD și / sau BI pot fi utilizate în paralel cu TRW, din cauză că înregistrează semnale climatice din perioade diferite. Deși

coeficienții de corelație între BI și variabilele climatice sunt semnificative, aceste corelații nu sunt stabile în timp, ceea ce sugerează că BI nu poate fi utilizat în reconstituirea climei, cel puțin în regiunea analizată. Rezultatele studiului arată că relația dintre variabilele climatice și parametrii MXD, BI și TRW poate fi stabilă sau instabilă, în funcție de tipul de proxy, ceea ce indică faptul că este necesară prudență în studiile de reconstituire paleoclimatică, deoarece stabilitatea semnalului climatic înregistrat în datele proxy este principiul de bază al reconstituirii climei.

- *Evaluarea gradului de influență a descompunerii parțiale a lemnului asupra izotopilor stabili de carbon și oxigen în celuloza de inelelor anuale de Pinus Cembra (Capitol IV – Articol II)*

Pentru aceasta, am analizat $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$ în 34 de inele de arbori anuale, de la trei pini subfosili (*Swiss stone pine*), cu secțiuni de lemn parțial descompus și lemn nedescompus pe circumferința aceluiași inel, și patru arbori cu lemn neafectat de procese de descompunere din același sit. Rezultatele au arătat că procesul de descompunere a lemnului analizat în acest studiu are o influență limitată asupra compoziției izotopilor stabili de oxigen și o influență mai mare asupra compoziției izotopice de carbon. Prin urmare, sugerăm că lemnul de *Pinus Cembra* parțial descompus din situl nostru poate fi folosit pentru analiza compoziției izotopice în cercetări paleoclimatice. Diferențele în valorile $\delta^{13}\text{C}$ între lemnul parțial descompus și nedescompus sunt mai mici decât cele dintre arborii diferiți din același sit, sugerând astfel un efect limitat al descompunerii parțiale a lemnului asupra compoziției izotopilor stabili de oxigen și carbon în celuloza inelelor anuale, care nu ar afecta reconstituirile paleoclimatice. Cu toate acestea, în absența unor studii comparative între lemnul parțial descompus și nedescompus, abordarea cea mai sigură ar fi totuși să se evite lemnul parțial descompus atunci când este posibil în analiza compoziției izotopilor stabili în inelele anuale.

Diferențele dintre lemnul parțial descompus și nedescompus pe circumferința aceluiași inel sunt mai mici decât diferențele de la un arbore la alt arbore, totuși setul nostru de date este limitat pentru o concluzie robustă privind variabilitatea compoziției izotopilor stabili pe circumferința aceluiași inel, prin urmare concluzia noastră este preliminară. O recomandare metodologică generală pentru viitoarele studii pe baza izotopilor stabili în inelele anuale de lemn subfossil este de a furniza o documentație detaliată și prezentarea tipului de degradare observat în orice secțiune de lemn utilizată pentru măsurători izotopice, astfel ar contribui la o mai bună înțelegere a potențialelor efecte izotopice care însoțesc diferitele procese de descompunere.

- *Evaluarea potențialului paleoclimatic al $\delta^{18}\text{O}$ în Quercus robur de la altitudini joase pentru reconstituirea secetelor la scară locală din perioada verii și legătura sa cu circulația atmosferică la scară mare în Europa (Capitol V – Articol III)*

Pentru a evalua potențialul paleoclimatic al $\delta^{18}\text{O}$ în *Quercus robur* de la altitudini joase pentru reconstituirea secetelor de vară la scară locală și legătura sa cu circulația atmosferică la scară mare în Europa, a fost elaborată o cronologie de $\delta^{18}\text{O}$ pentru perioada 1900-2015 și a fost comparată cu variabilele climatice locale și cu parametrii circulației atmosferice la scară mare.

Rezultatele calibrării și verificării demonstrează că valorile $\delta^{18}\text{O}$, în lemnul târziu a inelelor anuale de stejar, din România, reprezintă un indicator foarte bun pentru condițiile de umiditate relativă și de secetă pe timpul sezonului de vară și ar putea fi utilizate pentru a

furniza o reconstituire pe termen lung a secetelor de vară. Variabilitatea interanuală a valorilor $\delta^{18}\text{O}$ este reflectată și în circulația atmosferică de vară la scară mare, cu valori mari ale $\delta^{18}\text{O}$ asociate cu o circulație de tip anticiclonic, asociată cu secetă și valuri de căldură în partea centrală și estică a Europei. Rezultatele acestui studiu indică că există un potențial considerabil de a produce în România cronologii pe baza compoziției izotopilor stabili în inelele anuale, de lungă durată, care ar permite reconstituirea atât a secetei regionale, cât și a variabilității circulației pe scară largă în Europa de sud și centrală.

- *Calibrarea și validarea modelului de reconstituire a climei pe baza izotopilor stabili în Pinus cembra L. din Munții Călimani și stabilirea relației dintre variabilele climatice locale și valorile $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{18}\text{O}$) precum și legătura lor cu circulația atmosferică la scară mare din Europa (Capitol VI – Articol IV).*

Pentru acest studiu am analizat semnalul climatic înregistrat de izotopii stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor de Swiss Stone Pine din Munții Călimani, România. Rezultatele arată că $\delta^{18}\text{O}$ reprezintă un indicator mai bun decât $\delta^{13}\text{C}$ pentru reconstituirea paleoclimatică. Corelația tuturor parametrilor climatici este mai mare și temporal mai stabilă cu $\delta^{18}\text{O}$ decât cu $\delta^{13}\text{C}$. Analizele de calibrare și verificare demonstrează că valorile $\delta^{13}\text{C}$ sunt mai puțin fiabile ca indicator proxy la nivel local și european, comparativ cu valorile $\delta^{18}\text{O}$. Pentru valorile $\delta^{18}\text{O}$, rezultatele calibrării și verificării demonstrează că $\delta^{18}\text{O}$ prezintă corelații semnificative, din punct de vedere statistic, cu umiditatea relativă, nebulozitatea, temperatura maximă, precum și condițiile de secetă la scară europeană. Coeficienții de corelație cei mai mari au fost obținuți pentru valorile $\delta^{18}\text{O}$ și umiditatea relativă la scară locală, și pentru valorile $\delta^{18}\text{O}$ și SPEI3 și CI la scară europeană. Ca atare, această calibrare ar putea fi utilizată pentru a furniza o reconstituire pe termen lung a condițiilor de secetă de vară din partea estică a Europei.

Variabilitatea interanuală a valorilor $\delta^{18}\text{O}$ reflectă schimbări în circulația atmosferică la scară largă și în temperatura de la suprafața mării din Oceanul Atlantic de Nord și din Marea Mediterană. Valori ridicate ale $\delta^{18}\text{O}$ sunt asociate cu o circulație atmosferică de tip blocaj (circulație anticiclonică) în partea centrală și estică a Europei, precum și o Mare Mediterană caldă. Acest tip de circulație atmosferică la scară largă este, de obicei, asociat cu secete extreme și caniculă în partea centrală și estică a Europei (Ionita et al., 2017; Van Lanen et al., 2016). Compoziția izotopului stabil de oxigen în celuloza inelelor anuale de pin din Munții Călimani reprezintă un mare potențial pentru reconstituirile paleoclimatice. Compoziția izotopică de oxigen în celuloza inelelor anuale oferă posibilitatea de a reconstitui atât seceta la scară regională, cât și variabilitatea la scară mare a circulației atmosferice în sudul și centrul Europei, acoperind în acest fel lipsa reconstituirilor paleoclimatice din partea estică a Europei, și care va permite o mai bună înțelegere a variabilității climatice din trecut la scară continentală.

- *Reconstituirea variabilității climatice din trecut în România pe baza izotopilor stabili în celuloza inelelor anuale de Pinus cembra L. din Munții Călimani (Capitol VII – Articol V).*

În acest studiu prezentăm prima reconstituire a variabilității umidității relative (iunie-august) și a indicelui de secetă Palmer (scPDSI) pe baza $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale pentru Carpații Orientali. Reconstituirea umidității relative de vară (și scPDSI) pentru Munții Călimani, Carpații Orientali, se extinde până la 1252 d.Hr. Pe de altă parte, analiza cronologiei lungi a carbonului a confirmat rezultatele anterioare și ar fi necesară o replicare mai mare pentru $\delta^{13}\text{C}$ pentru a putea cuantifica semnalul climatic. Modelul de calibrare și

verificare pentru $\delta^{18}\text{O}$ și RH (și scPDSI) a trecut toate testele de verificare convenționale pentru ambii parametri, indicând robustețea modelului de regresie. Rezultatele testelor statistice indică faptul că formula de reconstituire este fiabilă și poate fi luată în considerare pentru reconstituirea RH la scară locală și scPDSI la scară europeană.

Distribuția temporală a evenimentelor extreme înregistrate de $\delta^{18}\text{O}$ se suprapune foarte bine cu frecvența evenimentelor extreme din alte regiuni ale Europei. Frecvența ridicată a evenimentelor extreme pozitive din perioada 1500-1850 se suprapune foarte bine cu Mica Eră Glaciară (LIA), caracterizată prin condiții climatice reci și umede (Bradley și Jonest, 1993; Esper et al., 2018a). Contrar, absența evenimentelor extreme pozitive și frecvența ridicată a evenimentelor extreme negative din ultimul secol ar putea fi legate de schimbările climatice globale. Prin poziția sitului de studiu în sud-estul Europei centrale, reconstituirea umidității relative și scPDSI pe baza $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale este semnificativ legată de variația condițiilor climatice uscate / umede în partea de est a României (și Europa de Est).

În ansamblu, în această teză a fost elaborată o cronologie nouă pe baza compoziției izotopilor stabili de carbon și oxigen în celuloza inelelor anuale, cu o rezoluție anuală care acoperă mai mult de 700 de ani, reprezentând cea mai lungă cronologie a izotopilor stabili în inelele anuale din România. Relația dintre $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale și variabilele climatice s-a dovedit a fi stabilă în timp. Acesta este un rezultat extrem de valoros, care arată capacitatea $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale pentru reconstituirile paleoclimatice. Stabilitatea relației dintre datele proxy ($\delta^{18}\text{O}$) și variabilele climatice este foarte importantă, mai ales că în ultimul raport al IPCC (IPCC, 2013) s-a subliniat că este necesară o evaluare mai realistă a reconstituirilor paleoclimatice și incertitudinile aferente diferitelor date proxy, precum și necesitatea utilizării unor metode statistice mai complexe pentru acest tip de analiza. În această teză am arătat că există proxy-uri ale inelelor anuale (de exemplu, $\delta^{18}\text{O}$ și MXD) capabile să capteze un semnal climatic care este stabil în timp, prin folosirea unor metode statistice complexe (de exemplu, hărțile de stabilitate) care sunt noi în domeniul dendroclimatologiei.

Rezultatele prezentate în această teză au arătat potențialul parametrilor fizici (TRW, MXD, BI) și geochimici ($\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$) pentru reconstituirea variațiilor climatice din trecut. Mai mult, am evaluat gradul de influență al descompunerii parțiale a lemnului asupra compoziției izotopice de $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$ și am arătat care este intervalul optim de timp pentru diferiți parametri fizici ai inelului anual (MXD, BI, TRW) pentru reconstituiri paleoclimatice. Reconstituirile paleoclimatice pe bază $\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$, în partea estică a Europei, sunt foarte valoroase, în special datorită lipsei reconstituirilor paleoclimatice din această regiune. Astfel, datele și rezultatele obținute în această teză vor umple golul de informație la nivel european și vor oferi o nouă perspectivă pe termen lung a variabilității secetei în ultimii 700 de ani. În final, diferitele studii prezentate în această teză de doctorat vor oferi o bază valoroasă pentru viitoarele studii de paleoclimă, fiind folosite ca un punct de referință pentru ulterioare studii pe baza parametrilor fizici (TRW, MXD, BI) și geochimici ($\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$) din partea de est a Europei.

8.2 Contribuții personale

Pe baza cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze de doctorat, se evidențiază următoarele *contribuții personale originale*:

- Dezvoltarea cronologiilor MXD, BI și TRW pe același set de probe de *Pinus sylvestris* preluate din Munții Carpați Orientali; cronologii pe baza MXD și BI au fost dezvoltate pentru prima dată în România;
- Evaluarea potențialului parametrilor MXD, BI și TRW pentru studii dendroclimatice folosind datele climatice lunare și zilnice;
- Identificarea intervalului optim de timp pentru asigurarea celei mai mari corelații cu parametrii climatici pentru reconstituirile paleoclimatice ale parametrilor MXD, BI și TRW;
- Aplicarea unor metode statistice complexe (de exemplu, hărțile de stabilitate) care sunt noi în domeniul dendroclimatologiei pentru a evalua stabilitatea semnalului climatic înregistrat de datele proxy;
- Am demonstrat faptul că există indicatori proxy a inelelor anuale de arbori (de exemplu, $\delta^{18}\text{O}$ și MXD) capabili să capteze un semnal climatic care este stabil în timp, prin utilizarea unor metode statistice complexe (de exemplu, hărțile de stabilitate);
- Am arătat că probele de lemn care sunt parțial descompuse au o influență limitată asupra compoziției izotopilor stabili de oxigen și carbon și că lemnul parțial descompus de *Pinus cembra* din Munții Călimani poate fi folosit pentru analiza compoziției izotopice în cercetări paleoclimatice;
- Am analizat pentru prima dată în România parametrii geochimici ($\delta^{13}\text{C}$ și $\delta^{18}\text{O}$) în contextul cercetărilor paleoclimatice, explorând potențialul lor paleoclimatic în celuloza inelelor anuale de *Quercus robur* și *Pinus cembra*;
- Am arătat că valorile $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza lemnului târziu în inelele anuale de stejar din România reprezintă un bun indicator proxy pentru umiditatea relativă de vară la scară locală și ar putea fi folosită pentru a furniza o reconstituire pe termen lung a secetelor de vară și că variabilitatea interanuală a valorilor $\delta^{18}\text{O}$ este influențată de circulația atmosferică de vară la scară mare, permițând reconstituirea atât a secetei regionale, cât și a variabilității circulației pe scară largă în Europa de Sud și Europa Centrală.
- Am demonstrat că $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale de *Pinus Cembra* din Munții Călimani, România, se corelează cu umiditatea relativă, nebulozitatea și temperatura maximă la nivel local, precum și condițiile de secetă la scară europeană și ar putea fi utilizată pentru a furniza o reconstituire pe termen lung a condițiilor de secetă de vară în partea estică a Europei;
- Am dovedit că compoziția izotopilor stabili în inele anuale din Munții Călimani prezintă un potențial mare pentru reconstituirile paleoclimatice, ceea ce ar permite reconstituirea atât la scară locală cât și la scară regională a variabilității climei în Europa centrală, de est și de sud;
- Am realizat prima reconstituire de vară (iunie-august) a variației umidității relative și a indicelui de secetă Palmer (scPDSI), pe baza valorilor $\delta^{18}\text{O}$ în celuloza inelelor anuale din Munții Călimani, Carpații Orientali, reconstituire care se extinde până în anul 1252;
- Am arătat că distribuția temporală a evenimentelor extreme înregistrate de $\delta^{18}\text{O}$ se suprapune foarte bine cu frecvența evenimentelor extreme din alte regiuni ale Europei;
- Am elaborat o nouă cronologie, care acoperă mai mult de 700 de ani, pe baza compoziției izotopice de carbon și oxigen, cu o rezoluție anuală, reprezentând astfel cea mai lungă reconstituire pe baza compoziției izotopilor stabili în celuloza inelelor anuale din România, precum și din partea de est a Europei.

Bibliografie

- Barbu, I., Popa, I., 2004. *Monitoringul secetei în pădurile din România*. Editura Tehnică Silvică, București (in Romanian).
- Barriopedro, D., Físcer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., García-Herrera, R., 2011. The Hot Summer of 2010 : Map of Europe. *Science* 332, 220–224. doi:10.1080/10255842.2015.1069566
- Becker, B., Kromer, B., Trimborn, P., 1991. A stable-isotope tree-ring timescale of the Late Glacial/Holocene boundary. *Nature* 353, 647–649. doi:10.1038/353647a0
- Beniston, M., Stephenson, D.B., 2004. Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change* 44, 1–9. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.001
- Bissolli, P., Ziese, M., Pietzsch, S., Finger, P., Friedrich, K., H, N., Obregon, A., 2012. Drought conditions in Europe in the spring of 2012.
- Björklund, J.A., Gunnarson, B.E., Seftigen, K., Esper, J., Linderholm, H.W., 2014. Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. *Clim. Past* 10, 877–885. doi:10.5194/cp-10-877-2014
- Björklund, J.A., Gunnarson, B.E., Seftigen, K., Esper, J., Linderholm, H.W., 2013. Is blue intensity ready to replace maximum latewood density as a strong temperature proxy? A tree-ring case study on Scots pine from northern Sweden. *Climate of the Past* 9, 5227–5261. doi:10.5194/cpd-9-5227-2013
- Boettger, T., Hiller, A., Kremenetski, K., 2003. Mid-Holocene warming in the northwest Kola Peninsula, Russia: northern pinelimit movement and stable isotope evidence. *The Holocene*. doi:10.1191/0959683603hl633rp
- Bradley, R.S., 1999. *PALEOCLIMATOLOGY Reconstructing Climates of the Quaternary* Second Edition, 2nd ed. Elsevier.
- Bradley, R.S., 1985. *Quaternary Paleoclimatology: Methods of Paleoclimatic Reconstruction*. Chapman and Hall, London.
- Bradley, R.S., Jonest, P.D., 1993. “Little Ice Age” summer temperature variations: their nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene* 3, 367–376. doi:10.1177/095968369300300409
- Briffa, K., Jones, P.B., 1990. Basic chronology statistics and assessment, in: Cook E.R., Kairiukstis, L. (Eds.), *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 137–152.
- Büntgen, U., Tegel, W., 2011. European tree-ring data and the Medieval Climate Anomaly. *PAGES news* 19, 14–15. doi:10.1029/2007GL030844.Kausrud
- Campbell, R., Mccarroll, D., Loader, N.J., Grudd, H., Robertson, I., Jalkanen, R., Campbell, R., Mccarroll, D., Loader, N.J., Robertson, I., Jalkanen, R., 2007. Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree-rings : developing a new palaeoclimate proxy. *The Holocene* 17, 821–828. doi:10.1177/0959683607080523
- Carrington, D., 2012. 2012: the year Britain’s weather turned dangerous [WWW Document]. *The Guardian*. URL <https://www.theguardian.com/environment/2013/jan/04/2012-year-british-weather-dangerous> (accessed 1.18.19).
- Carteni, F., Deslauriers, A., Rossi, S., Morin, H., 2018. The Physiological Mechanisms Behind the Earlywood-To-Latewood Transition : A Process-Based Modeling Approach. *Frontiers in Plant Science* 9:1053. doi:10.3389/fpls.2018.01053
- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A., 1990. *Methods of dendrochronology. Applications in the environmental science*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1990. Kluwer. doi:10.1007/978-94-015-7879-0
- Cook, E.R., Seager, R., Kushnir, Y., Briffa, K.R., Büntgen, U., Frank, D., Krusic, P.J., Tegel, W., Schrier, G., Van Der, Andreu-hayles, L., Baillie, M., Baittinger, C., Bleicher, N., Bonde, N., Brown, D., Carrer, M., Cooper, R., Katarina, Č., Dittmar, C., Esper, J., Griggs, C., Heussner, K., Hofmann, J., Janda, P., Kontic, R., Köse, N., Kyncl, T., Levani, T., Nola, P., Panayotov, M., Popa, I., Rothe, A., Seftigen, K., Seim, A., Svarva, H., Svoboda, M., Thun, T., Timonen, M.,

- Touchan, R., Trotsiuk, V., Trouet, V., Walder, F., Ważny, T., Wilson, R., Zang, C., 2015. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Sci. Adv.* e1500561 6, 1–10.
- Coumou, D., Rahmstorf, S., 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change* 2, 491–496. doi:10.1038/nclimate1452
- Cox Analytical Systems, 2016. Itrax M u l t i s c a n n e r and XRF Element Analysis in one Instrument for Wood Analysis [WWW Document]. URL www.coxsys.se (accessed 2.6.15).
- Creber, G.T., Chaloner, W.G., 1984. Influence of Environmental Factors on the Wood Structure of Living and Fossil Trees. *The Botanical Review* 50, 357–448.
- Croitoru, A.E., Piticar, A., Burada, D.C., 2016. Changes in precipitation extremes in Romania. *Quaternary International* 415, 325–335. doi:10.1016/j.quaint.2015.07.028
- Cuny, H.E., Rathgeber, C.B.K., 2016. Xylogenesis: Coniferous Trees of Temperate Forests Are Listening to the Climate Tale during the Growing Season But Only Remember the Last Words ! *Plant Physiology* 171, 306–317. doi:10.1104/pp.16.00037
- Cuny, H.E., Rathgeber, C.B.K., Frank, D., Fonti, P., Fournier, M., 2014. Kinetics of tracheid development explain conifer tree-ring structure. *New Phytologist* 203, 1231–1241. doi:10.1111/nph.12871
- Danis, P.A., Masson-Delmotte, V., Stievenard, M., Guillemain, M.T., Daux, V., Naveau, P., von Grafenstein, U., 2006. Reconstruction of past precipitation $\delta^{18}\text{O}$ using tree-ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$: A calibration study near Lac d’Annecy, France. *Earth and Planetary Science Letters* 243, 439–448. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.023
- Della-Marta, P.M., Haylock, M.R., Luterbacher, J., Wanner, H., 2007. Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 112, 1–11. doi:10.1029/2007JD008510
- Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., Quan, X.W., Xu, T., Murray, D., 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophysical Research Letters* 38, 1–5. doi:10.1029/2010GL046582
- Duffy, J.E., McCarroll, D., Barnes, A., Bronk Ramsey, C., Davies, D., Loader, N.J., Miles, D., Young, G.H.F., 2017. Short-lived juvenile effects observed in stable carbon and oxygen isotopes of UK oak trees and historic building timbers. *Chemical Geology* 472, 1–7. doi:10.1016/j.chemgeo.2017.09.007
- Esper, J., Cook, E.R., Schweingruber, F.H., 2002. Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science* 295, 2250–2253. doi:10.1126/science.1066208
- Esper, J., Frank, D.C., Battipaglia, G., Büntgen, U., Holert, C., Treydte, K., Siegwolf, R., Saurer, M., 2010. Low - frequency noise in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ tree ring data : A case study of *Pinus uncinata* in the Spanish Pyrenees. *Global and Planetary Change* 24, 1–11. doi:10.1029/2010GB003772
- Esper, J., George, S.S., Anchukaitis, K., D’Arrigo, R., Ljungqvist, F.C., Luterbacher, J., Schneider, L., Stoffel, M., Wilson, R., Büntgen, U., 2018a. Large-scale, millennial-length temperature reconstructions from tree-rings. *Dendrochronologia* 50, 81–90. doi:10.1016/j.dendro.2018.06.001
- Esper, J., Holzkämper, S., Büntgen, U., Schöne, B., Keppler, F., Hartl, C., George, S.S., Riechelmann, D.F.C., Treydte, K., 2018b. Site-specific climatic signals in stable isotope records from Swedish pine forests. *Trees - Structure and Function* 32, 855–869. doi:10.1007/s00468-018-1678-z
- Esper, J., Konter, O., Krusic, P.J., Saurer, M., Holzkämper, S., Büntgen, U., 2015. Long-term summer temperature variations in the Pyrenees from detrended stable carbon isotopes. *Geochronometria* 42, 53–59. doi:10.1515/geochr-2015-0006
- Fick, S., Hijmans, R.J., 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*.
- Founda, D., Giannakopoulos, C., 2009. The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece - A typical summer in the future climate? *Global and Planetary Change* 67, 227–236. doi:10.1016/j.gloplacha.2009.03.013
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London.
- Fritts, H.C., Swetnam, T.W., 1989. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Adv. Ecol. Res.* 19, 111–188.
- Gagen, M., McCarroll, D., Robertson, I., Loader, N.J., Jalkanen, R., 2008. Do tree ring $\delta^{13}\text{C}$ series

- from *Pinus sylvestris* in northern Fennoscandia contain long-term non-climatic trends? *Chemical Geology* 252, 42–51. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.01.013>
- Gagen, M., Zorita, E., McCarroll, D., Young, G.H.F., Grudd, H., Jalkanen, R., Loader, N.J., Robertson, I., Kirchhefer, A., 2011. Cloud response to summer temperatures in Fennoscandia over the last thousand years. *Geophysical Research Letters* 38, 1–5. doi:10.1029/2010GL046216
- Gagen, M.H., McCarroll, D., Loader, N.J., Robertson, I., 2011. Stable Isotopes in Dendroclimatology: Moving Beyond ‘Potential,’ 11th ed, In: Hughes M., Swetnam T., Diaz H. (eds) *Dendroclimatology Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer, Dordrecht. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0_6
- Gerald A. Meehl, Claudia Tebaldi, 2004. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science* 305, 994–997. doi:10.1126/science.1098704
- Grudd, H., Briffa, K.R., Karlén, W., Bartholin, T.S., Jones, P.D., Kromer, B., 2002. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. *The Holocene* 12, 657–665. doi:10.1191/0959683602hl578rp
- Hartl-Meier, C., Zang, C., Büntgen, U., Esper, J., Rothe, A., Göttele, A., Dirnböck, T., Treydte, K., 2015. Uniform climate sensitivity in tree-ring stable isotopes across species and sites in a mid-latitude temperate forest. *Tree Physiology* 35, 4–15. doi:10.1093/treephys/tpu096
- Hartmann, F., Rathgeber, C., Fournier, M., Moulia, B., Hartmann, F., Rathgeber, C., Fournier, M., Moulia, B., 2017. Modelling wood formation and structure: power and limits of a morphogenetic gradient in controlling xylem cell proliferation and growth. *Annals of Forest Science*, Springer Verlag/EDP Sciences 74, 15 p. doi:10.1007/s13595-016-0613-y
- Haupt, M., Weigl, M., Grabner, M., Boettger, T., 2011. A 400-year reconstruction of July relative air humidity for the Vienna region (eastern Austria) based on carbon and oxygen stable isotope ratios in tree-ring latewood cellulose of oaks (*Quercus petraea* Matt. Liebl.). *Climatic Change* 105, 243–262. doi:10.1007/s10584-010-9862-1
- Hunkeler, D., Butler, B.J., Aravena, R., Barker, J.F., 2001. Monitoring biodegradation of methyl tert-butyl ether (MTBE) using compound-specific carbon isotope analysis. *Environmental Science and Technology* 35, 676–681.
- Ionita, M., 2017. Mid range forecasting of the German Waterways streamflow based on hydrologic, atmospheric and oceanic data, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. Bremerhaven, 711.
- Ionita, M., 2015. Interannual summer streamflow variability over Romania and its connection to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology* 35, 4186–4196. doi:10.1002/joc.4278
- Ionita, M., Dima, M., Lohmann, G., Scholz, P., Rimbu, N., 2014. Predicting the June 2013 European Flooding Based on Precipitation, Soil Moisture, and Sea Level Pressure. *Journal of Hydrometeorology* 16, 598–614. doi:10.1175/JHM-D-14-0156.1
- Ionita, M., Lohmann, G., Rimbu, N., 2008. Prediction of spring Elbe discharge Based on stable teleconnections with winter global temperature and precipitation. *Journal of Climate* 21, 6215–6226. doi:10.1175/2008JCLI2248.1
- Ionita, M., Lohmann, G., Rimbu, N., Chelcea, S., Dima, M., 2012. Interannual to decadal summer drought variability over Europe and its relationship to global sea surface temperature. *Climate Dynamics* 38, 363–377. doi:10.1007/s00382-011-1028-y
- Ionita, M., Nagavciuc, V., 2019. The potential of predicting low flow periods for the central European rivers with a special focus on summer 2018. in press.
- Ionita, M., Scholz, P., Grosfeld, K., Treffeisen, R., 2018. Moisture transport and Antarctic sea ice: Austral spring 2016 event. *Earth System Dynamics Discussions* 9, 939–954. doi:10.5194/esd-2017-114
- Ionita, M., Tallaksen, L.M., Kingston, D., Stagge, J.H., Laaha, G., Van Lanen, H.A.J., Scholz, P., Chelcea, S.M., Haslinger, K., 2017. The European 2015 drought from a climatological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 1397–1419. doi:10.5194/hess-21-1397-2017
- IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report. Geneva, Switzerland. doi:10.1017/CBO9781107415324
- IPCC, 2014. IPCC Climate Change 2014 Synthesis Report, Climate Change 2014: Synthesis Report.

- Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. doi:10.1017/CBO9781107415324
- ITRDB, 2019. The International Tree-Ring Data Bank [WWW Document]. NOAA. URL <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring>
- Kaczka, R.J., Spyt, B., Janecka, K., Beil, I., Büntgen, U., Scharnweber, T., Nievergelt, D., Wilmking, M., 2018. Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results. *Dendrochronologia* 49, 94–101. doi:10.1016/j.dendro.2018.03.005
- Kern, Z., Popa, I., 2016. Dendrochronological and radiocarbon analyses of subfossil oaks from the foothills. *Geochronometria* 43, 113–120. doi:10.1515/geochr-2015-0038
- Kern, Z., Popa, I., 2007. Climate-growth relationship of tree species from a mixed stand of Apuseni Mts., Romania. *Dendrochronologia* 24, 109–115.
- Kern, Z., Popa, I., Varga, Z., Széles, É., 2009. Degraded temperature sensitivity of a stone pine chronology explained by dendrochemical evidences. *Dendrochronologia* 27, 121–128. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2009.06.005
- Konter, O., Holzkämper, S., Helle, G., Büntgen, U., Saurer, M., Esper, J., 2014. Climate sensitivity and parameter coherency in annually resolved $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ from *Pinus uncinata* tree-ring data in the Spanish Pyrenees. *Chemical Geology* 377, 12–19. doi:10.1016/j.chemgeo.2014.03.021
- Kozłowski, T.T., Kramer, P.J., Pallardy, S.G., 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press, San Diego, California, USA; London, England, UK. Illus. Maps.
- Kress, A., Saurer, M., Siegwolf, R.T.W., Frank, D.C., Esper, J., Bugmann, H., 2010. A 350 year drought reconstruction from Alpine tree ring stable isotopes. *Global Biogeochemical Cycles* 24, 1–16. doi:10.1029/2009GB003613
- Labuhn, Inga, Daux, V., Girardclos, O., Stievenard, M., Pierre, M., Masson-Delmotte, V., 2016. French summer droughts since 1326 CE: A reconstruction based on tree ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$. *Climate of the Past*. doi:10.5194/cp-12-1101-2016
- Labuhn, I., Daux, V., Girardclos, O., Stievenard, M., Pierre, M., Masson-Delmotte, V., 2016. French summer droughts since 1326 CE: A reconstruction based on tree ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$. *Clim. Past* 12, 1101–1117. doi:doi:10.5194/cp-12-1101-2016
- Leavitt, S.W., 2010. Tree-ring C–H–O isotope variability and sampling. *Science of The Total Environment* 408, 5244–5253. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.057
- Levanič, T., Gričar, J., Gagen, M., Jalkanen, R., Loader, N.J., McCarroll, D., Oven, P., Robertson, I., 2008. The climate sensitivity of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in the southeastern European Alps. *Trees* 23, 169. doi:10.1007/s00468-008-0265-0
- Levanič, T., Popa, I., Poljanšek, S., Nechita, C., 2013. A 323-year long reconstruction of drought for SW Romania based on black pine (*Pinus nigra*) tree-ring widths. *International journal of biometeorology* 57, 703–714. doi:10.1007/s00484-012-0596-9
- Lohmann, G., Rimbu, N., Dima, M., 2005. Where can the Arctic oscillation be reconstructed? Towards a reconstruction of climate modes based on stable teleconnections. *Climate of the Past Discussions* 1, 17–56. doi:10.5194/cpd-1-17-2005
- Mancini, S. a, Ulrich, A.C., Lacrampe-couloume, G., Sleep, B., Edwards, E. a, Lollar, B.S., 2003. Carbon and hydrogen isotopic fractionation during anaerobic biodegradation of benzene. *Appl. Environ Microbiol.* 69, 191–198. doi:10.1128/AEM.69.1.191
- McCarroll, D., 2015. “Study the past, if you would divine the future”: A retrospective on measuring and understanding Quaternary climate change. *Journal of Quaternary Science* 30, 154–187. doi:10.1002/jqs.2775
- McCarroll, D., Loader, N.J., 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 23, 771–801. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.017
- McCarroll, D., Loader, N.J., Jalkanen, R., Gagen, M.H., Grudd, H., Gunnarson, B.E., Kirchhefer, a. J., Friedrich, M., Linderholm, H.W., Lindholm, M., Boettger, T., Los, S.O., Remmele, S., Kononov, Y.M., Yamazaki, Y.H., Young, G.H., Zorita, E., 2013. A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the northern pine forest limit of Europe. *The Holocene*. doi:10.1177/0959683612467483
- McCarroll, D., Pettigrew, E., Luckman, A., Guibal, F., Edouard, J.L., 2002. Blue reflectance provides

- a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree rings. *Arctic, antarctic, and alpine research* 4, 450–453.
- Nagavciuc, V., 2015. Potențialul izotopilor stabili în cercetări dendroclimatologice. *Revista de Silvicultură și Cinegetică* 37, 33–37.
- Nagavciuc, V., Bădăluță, C.-A., Ionita, M., 2019a. Tracing the Relationship between Precipitation and River Water in the Northern Carpathians Base on the Evaluation of Water Isotope Data. *Geosciences* 9, 1–14. doi:doi:10.3390/geosciences9050198
- Nagavciuc, V., Ionita, M., Perșoiu, A., Popa, I., Loader, N.J., McCarroll, D., 2019b. Stable oxygen isotopes in Romanian oak tree rings record summer droughts and associated large-scale circulation patterns over Europe. *Climate Dynamics* 52, 6557–6568. doi:doi.org/10.1007/s00382-018-4530-7
- Nagavciuc, V., Kern, Z., Perșoiu, A., Kesjár, D., Popa, I., 2018. Aerial decay influence on the stable oxygen and carbon isotope ratios in tree ring cellulose. *Dendrochronologia* 49, 110–117. doi:10.1016/J.DENDRO.2018.03.007
- Nagavciuc, V., Roibu, C., Ionita, M., Mursa, A., Cotos, M., Popa, I., 2019c. Different climate response of three tree ring proxies of *Pinus sylvestris* from the Eastern Carpathians, Romania. *Dendrochronologia* 54, 56–63. doi:10.1016/j.dendro.2019.02.007
- Nechita, C., 2014. The dendroclimatic signal in *Quercus robur*. *Analele Universității din Oradea, Facultatea Protecția Mediului XXIII*, 509–516.
- Nechita, C., Popa, I., 2012. The relationship between climate and radial growth for the Oak (*Quercus robur* L.) in the Western Plain of Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 7, 137–144.
- Nechita, C., Popa, I., Eggertsson, Ó., 2017. Climate response of oak (*Quercus* spp.), an evidence of a bioclimatic boundary induced by the Carpathians. *Science of the Total Environment* 599–600, 1598–1607. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.118
- Osborne, D.J., Jackson, M.B. (Eds.), 1989. *Cell Separation in Plants Physiology, Biochemistry and Molecular Biology*, 1st ed. NATO Scientific Affairs Division, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Honh Kong. doi:0.1007/978-3-642-74161-6
- Österreicher, A., Weber, G., Leuenberger, M., Nicolussi, K., 2015. Exploring blue intensity - comparison of blue intensity and MXD data from Alpine spruce trees. *Trace* 10, 56–61. doi:DOI: 10.2312/GFZ.b103-15069
- Pasarcan, D., Danciu, M., 2001. *Fiziologia plantelor lemnoase*. Editura Pentru Viață, Brașov.
- Polge, H., 1973. Qualité du bois et largeur d'accroissements en foret de Tronçais. *Revue Forestiere Française* 5, 361–370.
- Popa, I., 2016. Multi-secular trees between myth and reality. *Revista de Silvicultură și Cinegetică* 21, 31–34.
- Popa, I., 2004. *Fundamente metodologice și aplicații de dendrocronologie (in romanian)*. Editura Tehnică Silvică, București.
- Popa, I., Bouriaud, O., 2013. Reconstruction of summer temperatures in Eastern Carpathian Mountains (Rodna Mts, Romania) back to AD 1460 from tree-rings. *International Journal of Climatology* n/a-n/a. doi:10.1002/joc.3730
- Popa, I., Cheval, S., 2007. Early winter temperature reconstruction of Sinaia area (Romania) derived from tree-rings of silver fir (*Abies Alba Mill.*). *Romanian Journal of Meteorology* 9, 47–54.
- Popa, I., Kern, Z., 2009. Long-term summer temperature reconstruction inferred from tree ring records from the Eastern Carpathians. *Climate Dynamics* 32, 1107–1117.
- Popa, I., Popa, C., 2007. Impactul modificărilor structurale asupra proceselor auxologice într-un ecosistem de limită cu molid (*Picea abies* Karst) și zâmbbru (*Pinus cembra* L.) din Munții Rodnei. *Revista pădurilor* 2.
- Popa, I., Sidor, C., 2010. *Rețeaua romaneasca de dendrocronologie RODENDRONET 1. Conifere*. Editura Silvica.
- Posea, G., 2006. *Geografia fizică a României, II. ed.* Editura Fundației România de Măine, București.
- Rădoane, M., Nechita, C., Chiriloaei, F., Rădoane, N., Popa, I., Roibu, C., Robu, D., 2015. Late Holocene fluvial activity and correlations with dendrochronology of subfossil trunks: Case studies of northeastern Romania. *Geomorphology* 239, 142–159. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.036

- Rebetez, M., Dupont, O., Gaillard, M.G., 2008. An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 1–7. doi:10.1007/s00704-007-0370-9
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J.P., Menzel, A., 2006. Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals of Forest Science* 63, 569–577. doi:10.1051/forest:2006043
- Rinne, K.T., Loader, N.J., Switsur, V.R., Waterhouse, J.S., 2013. 400-year May e August precipitation reconstruction for Southern England using oxygen isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 60, 13–25. doi:10.1016/j.quascirev.2012.10.048
- Robertson, I., Leavitt, S., Loader, N., Buhay, W., 2011. Progress in isotope dendroclimatology. *Chemical Geology* 252, 2001–2004. doi:10.1016/S0009-2541(08)00177-0
- Sandu, I., Pescaru, V.I., Poiana, I., 2008. *Clima Romaniei*. Editura Academiei Române, București (in Romanian).
- Saurer, M., Cherubini, P., Reynolds-Henne, C.E., Treydte, K.S., Anderson, W.T., Siegwolf, R.T.W., 2008. An investigation of the common signal in tree ring stable isotope chronologies at temperate sites. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. doi:10.1029/2008JG000689
- Schweingruber, F.H., 2007. *Wood structure and environment*. Springer series in wood science 279. doi:10.1007/978-3-540-48548-3
- Schweingruber, F.H., 1996. *Tree Rings and Environment*. Dendroecology. Swiss Federal Intitute of Forest, Snow and Landscape Research WSL/FNP, Birmensdorf.
- Schweingruber, F.H., 1988. *Tree Rings Basics and Applications of Dendrochronology*, Kluwer Academic Publishers. doi:10.1007/978-94-009-1273-1
- Schweingruber, F.H., Bartholin, T., Schar, E., Briffa, K.R., 1988. Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland). *Boreas* 17, 559–566.
- Schweingruber, F.H., Fritts, H.C., Braker U., O., Drew, L.G., Schar, E., 1978. The X-Ray Technique as Applied to Dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin* 38, 61–91.
- Sidorova, O. V., Saurer, M., Myglan, V.S., Eichler, A., Schwikowski, M., Kirdeyanov, A. V., Bryukhanova, M. V., Gerasimova, O. V., Kalugin, I.A., Daryin, A. V., Siegwolf, R.T.W., 2012. A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai. *Climate Dynamics* 38, 175–188. doi:10.1007/s00382-010-0989-6
- Sidorova, O. V., Siegwolf, R.T.W., Saurer, M., Naurzbaev, M.M., Vaganov, E.A., 2008. Isotopic composition ($\gamma^{13}\text{C}$, $\gamma^{18}\text{O}$) in wood and cellulose of Siberian larch trees for early Medieval and recent periods. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113, 1–13. doi:10.1029/2007JG000473
- Speer, J.H., 2010. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. The University of Arizona Press, Tucson.
- Spiker, E.C., Hatcher, P.G., 1987. The effects of early diagenesis on the chemical and stable carbon isotopic composition of wood. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51, 1385–1391. doi:10.1016/0016-7037(87)90323-1
- Timofeeva, G., Treydte, K., Bugmann, H., Rigling, A., Schaub, M., Siegwolf, R., Saurer, M., 2017. Long-term effects of drought on tree-ring growth and carbon isotope variability in Scots pine in a dry environment. *Tree Physiology* 37, 1028–1041. doi:10.1093/treephys/tpx041
- Tiwari, M., Singh, A.K., Sinha, D.K., 2015. STABLE ISOTOPES: TOOLS FOR UNDERSTANDING PAST CLIMATIC CONDITIONS AND THEIR APPLICATIONS IN CHEMOSTRATIGRAPHY, in: Ramkumar, M. (Ed.), *Chemostratigraphy*. Elsevier Inc., pp. 65–92. doi:10.1016/B978-0-12-419968-2.00003-0
- Treydte, K., Frank, D., Esper, J., Andreu, L., Bednarz, Z., Berninger, F., Boettger, T., D'Alessandro, C.M., Etien, N., Filot, M., Grabner, M., Guillemin, M.T., Gutierrez, E., Haupt, M., Helle, G., Hilasvuori, E., Jungner, H., Kalela-Brundin, M., Krapiec, M., Leuenberger, M., Loader, N.J., Masson-Delmotte, V., Pazdur, A., Pawelczyk, S., Pierre, M., Planells, O., Pukiene, R., Reynolds-Henne, C.E., Rinne, K.T., Saracino, A., Saurer, M., Sonninen, E., Stievenard, M., Switsur, V.R., Szczepanek, M., Szychowska-Krapiec, E., Todaro, L., Waterhouse, J.S., Weigl, M., Schleser, G.H., 2007. Signal strength and climate calibration of a European tree-ring isotope network. *Geophysical Research Letters* 34, L24302, 1–6. doi:10.1029/2007GL031106
- Treydte, K.S., Frank, D.C., Saurer, M., Helle, G., Schleser, G.H., Esper, J., 2009. Impact of climate

- and CO₂ on a millennium-long tree-ring carbon isotope record. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 4635–4647. doi:10.1016/j.gca.2009.05.057
- Twardosz, R., Kossowska-Cezak, U., 2013. Exceptionally hot summers in Central and Eastern Europe (1951–2010). *Theoretical and Applied Climatology* 112, 617–628. doi:10.1007/s00704-012-0757-0
- Van Lanen, H.A.J., Laaha, G., Kingston, D.G., Gauster, T., Ionita, M., Vidal, J.P., Vlnas, R., Tallaksen, L.M., Stahl, K., Hannaford, J., Delus, C., Fendekova, M., Mediero, L., Prudhomme, C., Rets, E., Romanowicz, R.J., Gailliez, S., Wong, W.K., Adler, M.J., Blauhut, V., Caillouet, L., Chelcea, S., Frolova, N., Gudmundsson, L., Hanel, M., Haslinger, K., Kireeva, M., Osuch, M., Sauquet, E., Stagge, J.H., Van Loon, A.F., 2016. Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes* 30, 3097–3104. doi:10.1002/hyp.10838
- Văsar, G., 1968. *Izotopi stabili*. Editura Tehnică, Bucuresti.
- Xu, G., Liu, X., Qin, D., Chen, T., Wang, W., Wu, G., Sun, W., An, W., Zeng, X., 2014. Tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ evidence for the drought history of eastern Tianshan Mountains, northwest China since 1700 AD. *International Journal of Climatology* 34, 3336–3347. doi:10.1002/joc.3911
- Young, G.H.F., Loader, N.J., McCarroll, D., Bale, R.J., Demmler, J.C., Miles, D., Nayling, N.T., Rinne, K.T., Robertson, I., Watts, C., Whitney, M., 2015. Oxygen stable isotope ratios from British oak tree-rings provide a strong and consistent record of past changes in summer rainfall. *Climate Dynamics* 45, 3609–3622. doi:10.1007/s00382-015-2559-4
- Young, G.H.F., McCarroll, D., Loader, N.J., Kirchhefer, A.J., 2010. A 500-year record of summer near-ground solar radiation from tree-ring stable carbon isotopes. *Holocene* 20, 315–324. doi:10.1177/0959683609351902

Publicații

Preprints and in preparation

- [11] **21st century central European drought in a long-term perspective: cold vs. hot drought**
M. Ionita, M. Dima, V. Nagavciuc, P.Scholz1, G. Lohmann
Nature Communications **in preparation**
- [10] **The potential of predicting lowflowperiods for the central European riverswith a special focus on summer 2018**
Ionita, M., Nagavciuc, V.,
Hydrology and Earth System Sciences **in preparation**
- [9] **A 760 years of paleoclimatic reconstitution of summer relative humidity and droughts based on oxygen isotope ratios of Pinus cembra tree-ring cellulose from Călimani Mountains, Romania**
Viorica Nagavciuc, Monica Ionita, Zoltán Kern, Ionel Popa
Nature Communications **in preparation**
- [8] **Climate signals in carbon and oxygen isotope ratios of Pinus cembra tree-ring cellulose from the Călimani Mountains, Romania,**
Viorica Nagavciuc, Zoltán Kern, Monica Ionita, Claudia Hartl, Oliver Konter, Jan Esper, Ionel Popa
International Journal of Climatology **-accepted**

Publications in peer-reviewed journals

- [7] **Tracing the interactions between precipitation and river water in the Northern Carpathian Mountains Base on the evaluation of water isotope data,**
Nagavciuc V., Bădăluță C A, Ionita M.,
2019, Geoscience Journal 9(5), 198; <https://doi.org/10.3390/geosciences9050198>
- [6] **Stable H and O isotope-based investigation of moisture sources and their role in river and ground water recharge in the NE Carpathian Mountains, East-Central Europe**
Bădăluță C A, Perșoiu A, Ionita M, Nagavciuc V, Bistricean P I.
2019, Isotopes in Environmental & Health Studies Journal 55 (2) 161-178; doi:10.1080/10256016.2019.1588895
- [5] **Different climate response of threetree ring proxies of Pinus Sylvestris from Eastern Carpathians, Romania,**
Nagavciuc V., Roibu CC, Mursa A., Popa I.,
2019, Dendrochronologia, 54, 56-63, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.02.007>
- [4] **Stable oxygen isotopes in Romanian oak tree rings record summer droughts and associated large-scale circulation patterns over Europe,**
Nagavciuc V., Ioniță M., Perșoiu A., Popa I., Loader N.J., McCarroll D.,
2019, Climate Dynamics Journal, 52:6557-6568, doi.org/10.1007/s00382-018-4530-7;
- [3] **Aerial decay influence on the stable oxygen and carbon isotope ratios in tree ring cellulose, Nagavciuc V., Kern Z., Perșoiu A., Dóra K., Popa I.,**
2018, Dendrochronologia, 49 (2018) 110-117, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.03.007>
- [2] **Transfer of environmental signals from surface to the underground at Ascunsă Cave, Romania, Drăgușin, V., Balan, S., Blamart, D., Forray, F. L., Marin, C., Mirea, I., Nagavciuc, V., Perșoiu, A., Tîrlă, L., Tudorache, A. and Vlaicu, M.**
2017, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 5357–5373, doi:10.5194/hess-2016-625.
- [1] **Pattern of richness and distribution of groundwater Copepoda (Cyclopoida: Harpacticoida) and Ostracoda in Romania: an evolutionary perspective,**
Iepure, S., Feurdean, A. N., Bădăluță, C., Nagavciuc, V., Persoiu, A
2015, Biological Journal of the Linnean Society; DOI:10.1111/bij.12686, Impact Factor 2.26.2016, 119, 593–608

Publications in nonpeer-reviewed journals

-
- [4] **Potențialul izotopilor stabili în cercetări dendroclimatologice, Nagavciuc, V.,**
2015, Revista de Silvicultură și Cinegetică, nr 37/2015, 33-37. http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/RSC_37_2015.pdf
- [3] **Dynamics of the Structuring Vectors of Geographical Landscapes in Bucovina, Romania, Chiriță, V., Bădăluță, C., Nagavciuc, V.,**
2014, Journal of Settlements and Spatial Planning, 5(3): 39-46
- [2] **Using GIS techniques in the analysis of land use in the Soloneț river catchment between 1856 and 2011,**
Bădăluță, C.A., Bistricean, P.I., **Nagavciuc, V.,**
2013, GEOREVIEW, Scientific Annals of Ștefan cel Mare University of Suceava. Geography Series, 23 (2): 23-33.
- [1] **Observations on the spatial variability of the Prut river discharges,**
Briciu, A.E., Mihăilă, D., Lazurcă, L.G., Costan, L.A., **Nagavciuc, V., Bădăluță, C.A.,**
2011, Scientific Annals of the Ștefan cel Mare University, Suceava, Romania, 20 (1):45-56.