



Universitatea
Transilvania
din Brașov

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Silvicultură și exploatare forestiere

Ing. Mihnea Ioan Cezar CIOCÎRLAN

Variabilitatea fenotipică a fagului de-a lungul unui profil altitudinal

Phenotypic variability of common beech along an altitudinal gradient

REZUMAT

Conducător științific

Prof. dr. Ing. Alexandru Lucian CURTU

BRAȘOV, 2025

Ing. Mihnea Ioan Cezar CIOCÎRLAN

TEZĂ DE DOCTORAT

Variabilitatea fenotipică a fagului de-a lungul unui profil altitudinal

Phenotypic variability of common beech along an altitudinal gradient

Domeniul de doctorat: Silvicultură

Cuprins

PREFAȚĂ.....	5
LISTĂ CU ABREVIERI.....	7
INTRODUCERE.....	9
CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CUNOȘTINȚELOR.....	13
1.1. Fagul, cea mai importantă specie de foioase din România.....	13
1.2. Observații fenologice la fag.....	14
1.3. Relația între caracteristici fenotipice ale arborilor și gradul de heterozigoție	16
CAPITOLUL 2: SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR.....	18
CAPITOLUL 3: MATERIAL ȘI METODE DE CERCETARE.....	19
3.1. Localizarea cercetărilor	19
3.2. Observații fenologice.....	20
3.3. Date meteorologice.....	21
3.4. Efectuarea observațiilor fenologice prin intermediul teledetecției	22
3.4.1. Colectarea datelor pe serii temporale și procesarea imaginilor obținute prin intermediul dronei	22
3.4.2. Colectarea datelor pe serii temporale și procesarea imaginilor obținute prin intermediul platformei <i>Copernicus</i>	26
3.5. Evaluarea caracteristicilor arhitecturale ale arborilor	27
3.5.1. Evaluarea caracteristicilor arhitecturale ale arborilor prin intermediul teledetecției (TLS). 27	
3.5.2. Înfurcirea arborilor	29
3.5.3. Zveltețea arborilor	29
3.5.4. Evaluarea competiției	29
3.6. Indicele de heterozigoție	30
3.7. Analize statistice.....	30
3.7.1. Date fenologice.....	30
3.7.2. Analizele statistice ale datelor fenologice obținute prin intermediul dispozitivelor de teledetecție.....	30
3.7.3. Analizele statistice ale asocierii datelor fenologice, genetice și a caracteristicilor arhitecturale obținute prin intermediul scanării cu laser terestru.....	31

CAPITOLUL 4: REZULTATE ȘI DISCUȚII.....	32
4.1. Observații fenologice.....	32
4.1.1. Fenologia de primăvară.....	32
4.1.2. Fenologia de toamnă (senescentă).....	37
4.1.3. Lungimea sezonului de vegetație.....	41
4.1.4. Variația temperaturii medii anuale pe parcursul celor trei ani monitorizați.....	44
4.2. Observațiile fenologice obținute prin intermediul teledetecției.....	46
4.2.1. Predicția fenologiei prin intermediul imaginilor aeriene colectate cu drona.....	46
4.2.2. Predicția fenologiei prin intermediul parametrilor biofizici <i>Copernicus</i>	50
4.3. Analiza asocierii datelor fenologice, genetice și a caracteristicilor arhitecturale obținute prin intermediul scanării cu laser terestru	51
4.3.1. Intensitatea competiției	51
4.3.2. Efectele competiției asupra fenologiei și a caracteristicilor arhitecturale ale fagului	52
4.3.3. Relația dintre zveltețea, fenologia și caracteristicile arhitecturale ale fagului.....	53
4.3.4. Efectele altitudinii asupra fenologiei și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag	54
4.3.5. Efectele heterozigoției asupra fenologiei și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag.....	55
CAPITOLUL 5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	56
5.1. Concluzii finale.....	56
5.1.1. Concluzii în urma efectuării observațiilor fenologice.....	56
5.1.2. Concluzii în urma efectuării observațiilor fenologice prin intermediul teledetecției	57
5.1.3. Concluzii în urma corelării datelor fenologice, genetice și a caracteristicilor arhitecturale obținute prin intermediul scanării cu laser terestru	57
5.2. Contribuții originale.....	58
5.3. Diseminarea rezultatelor.....	59
5.4. Direcții viitoare de cercetare.....	61
BIBLIOGRAFIE.....	63

PREFAȚĂ

În prezenta teză de doctorat, au fost prezentate rezultatele cercetărilor desfășurate în cadrul Școlii Doctorale Interdisciplinare a Universității Transilvania din Brașov, în colaborare cu Institutul Național de Cercetare și Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”, Stațiunea Brașov. Cercetările mele au vizat evaluarea variabilității fenotipice a fagului de-a lungul unui profil altitudinal, în vederea analizei gradului de adaptare la condițiile locale de mediu, prin observarea fenologiei de primăvară și de toamnă, atât prin intermediul observațiilor din teren, cât și prin intermediul unor mijloace de teledetecție, iar ulterior, de a asocia aceste date fenotipice cu diversitatea genetică, cuantificată prin indicii de heterozigotie.

Realizarea acestei lucrări nu ar fi fost posibilă fără sprijinul, încrederea și îndrumarea acordate de către unui număr mai mare de persoane, cărora, în cele ce urmează, aș dori să le mulțumesc și să îmi exprim recunoștința.

În primul rând, aș dori să îi mulțumesc conducătorului științific al tezei de doctorat, dl. Prof. Alexandru Lucian CURTU, atât pentru încrederea acordată încă de la începutul stagiului meu de doctorat, prin oportunitatea pe care mi-a oferit-o de a îmi desfășura activitățile de cercetare sub îndrumarea sa, cât și pentru suportul moral și științific, răbdarea și eforturile depuse pe întreaga perioadă. Toate acestea au contribuit atât la realizarea acestei teze de doctorat, cât și la formarea mea profesională.

Gândul meu se îndreaptă și către dl. Prof. Oliver GAILING, căruia doresc să îi mulțumesc pentru ajutorul oferit în obținerea datelor genetice, dar și pentru îndrumarea și feedback-urile constructive oferite pe parcursul stagiului meu de doctorat, atât în elaborarea articolelor științifice, cât și a lucrării finale. De asemenea, îi sunt recunoscător și pentru cele două săptămâni în care mi-a fost gazdă într-unul din stagiiile mele de cercetare, în laboratorul de Genetică moleculară din cadrul Universității Georg-August din Göttingen. Informațiile asimilate și abilitățile dobândite în urma acestui stagiu m-au ajutat să îmbunătățesc considerabil această lucrare.

În același timp, aș dori să îmi exprim gratitudinea și către membrii comisiei de îndrumare, dl. Prof. Neculae ȘOFLETEA, dl. Conf. Victor PĂCURAR, dl. Prof. Mihai Daniel NIȚĂ și, nu în ultimul rând, dl. CS I Dănuț CHIRA, pentru recomandările pe care mi le-au oferit în stabilirea metodologiei, logistica oferită, îndrumarea efectivă în analiza datelor, precum și disponibilitatea oferită de a face parte din această comisie, contribuții care au condus la întocmirea acestei lucrări.

Mulțumiri doresc să le adresez și dl. Dr. Gheorghe Raul RADU, pentru împrumutarea dronei în vederea efectuării survolărilor pentru obținerea imaginilor fenologice, pentru ajutorul oferit în procesarea și interpretarea ulterioară a acestora și feedback-urile constructive acordate atât în elaborarea articolelor științifice, cât și a lucrării finale. De asemenea doresc să le mulțumesc și

colegilor săi din colectivul de Biometrie, dl. Ing. Alexandru CUCU și dl. Ing. Tibor ȘERBAN, din cadrul Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”, Stațiunea Brașov, pentru ajutorul oferit în teren pe parcursul efectuării survolărilor cu drona.

Doresc să le mulțumesc și celorlalți colegi de la Universitatea Georg-August din Göttingen, dra. Drd. Ourania GROGORIADOU-ZORMPA și dna. Dr. Katharina BUDDE, pentru ajutorul oferit în prelevarea probelor din teren, dar și în efectuarea analizelor ADN, incomensurabile acestei lucrări.

Gândul meu se îndreaptă și către dra. Conf. Elena CIOCÎRLAN, căreia îi sunt recunoscător pentru ajutorul oferit în interpretarea datelor genetice și în elaborarea articolelor științifice și a tezei de doctorat. De asemenea, le sunt recunoscător și dl. Conf. Ioan DUTCĂ și dl. Prof. Cătălin PETRIȚAN pentru feedback-urile oferite privitoare la abordarea metodelor statistice adecvate de analiză și vizualizare a datelor. Îi adresez mulțumiri și dl. Prof. Valeriu Norocel NICOLESCU, pentru informațiile oferite și bibliografia recomandată privitoare la intervențiile silviculturale și influența acestora asupra caracteristicilor arhitecturale ale arborilor.

În mod deosebit, aș dori să îi mulțumesc și conducerii Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”, dna. CS I Nicoleta Ecaterina APOSTOL, dl. CS I Nicolae Ovidiu BADEA și dl. CS II Șerban Octavian DAVIDESCU, pentru sprijinul acordat, punerea la dispoziție a materialului suport și asigurarea fondurilor necesare pentru stagiile de cercetare și oportunitățile de diseminare a rezultatelor obținute.

De asemenea, aș dori să îi mulțumesc dl. CS I Costel VÎNĂTORU, Director al Băncii de Resurse Genetice Vegetale din Buzău (B.R.G.V.B), membru corespondent al Academiei de Științe Agricole și Silvicultură, pentru încurajările, sfaturile, încrederea acordată și găzduirea în laboratorul de Genetică moleculară al B.R.G.V.B, unde, în urma efectuării unui stagiului de pregătire, am reușit să îmbunătățesc această lucrare.

Sincere mulțumiri doresc să le aduc și colegilor mei de birou, dna. CS III Florentina CHIRA și dl. CS Costel MANTALE, pentru sprijinul tehnic și încurajările acordate. De asemenea, doresc să îi mulțumesc și colegului meu de doctorat, dl. CS Emanuel BEȘLIU, care mi-a fost alături în stagiile de cercetare efectuate și cu care am colaborat foarte strâns pe întreaga perioadă a stagiului de doctorat. Le acord sincera mea recunoștință și dl. Ing. Ionel BUTUNOI și dl. Ing. Cătălin GRIDEANU, pentru ajutorul oferit în efectuarea observațiilor fenologice din teren și prelevarea probelor.

Nu în ultimul rând, doresc să le mulțumesc părinților mei, Victor și Sonia, care mi-au insuflat dragostea pentru lucrul bine făcut până la capăt, respectarea cuvântului dat și onestitate. Le mulțumesc și pentru sprijinul și încrederea oferite în momentele mai dificile și pentru ridicarea moralului ori de câte ori a fost nevoie. De asemenea, îi mulțumesc și mătușii mele, dna. Sub-Ing. Joița APOSTOL, care mi-a insuflat dragostea pentru silvicultură și m-a sprijinit pe calea aleasă.

LISTĂ CU ABREVIERI

%CFL – engl. “Percentage of colored and fallen leaves” - procentajul de frunze îngălbenite și căzute

%CL – engl. “Percentage of colored leaves” - procentajul de frunze îngălbenite

%FL – engl. “Percentage of fallen leaves” - procentajul de frunze căzute

(EST)-SSRs - engl. “gene-based Expressed Sequence Tag” – repetări de secvențe scurte în regiuni transcrise din gene

ADD - engl. “autumn degree days” – grade zilnice de senescență

ADN – acid dezoxiribonucleic

BBCH – ger. “Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie” – Institutul Federal de Biologie, Oficiul Federal pentru Soiuri de Plante și Industria Chimică

CDD - engl. “Cumulated degree days” – grade zilnice cumulate

DBH – engl. “Diameter at breast height” – diametrul măsurat la înălțimea de 1,30 m

DOY – engl. “Day Of Year” – ziua calendaristică din an

DSM – engl. “Digital Surface Model” – modelul digital al terenului

GDD - engl. “Growing degree days” – grade zilnice de creștere

GPS - engl. “Global Positioning System” – sistemul de poziționare globală

GSD - engl. “Ground Sampling Distance” – distanța dintre doi pixeli consecutivi măsurată la nivelul terenului

IFN – rom. „Inventarul forestier național”

IPCC – engl. “Intergovernmental Panel on Climate Change” – Grupul Interguvernamental al Națiunilor Unite pentru Schimbările Climatice

m – media

me - mediana

Mpx – Megapixeli

MSE - engl. “Mean Squared Error” – eroarea medie pătratică

NDVI – engl. “Normalized difference vegetation index” – indicele de vegetație cu diferență normalizată

NIR – engl. “Near-Infrared Light” – lumină infraroșie invizibilă ochiului liber

nPD – engl. “number of point divisions” – numărul de diviziuni de puncte

RGB – engl. “Red Green Blue” – modelul cromatic Roșu Verde Albastru (RVA)

RMSE – engl. “Root Mean Square Error” – radicalul valorii medii la pătrat a erorii

SD – engl. “Standard Deviation” – abaterea standard

SLC – engl. “Slenderness coefficient” – coeficientul de zveltețe

SNPs – engl. “Single nucleotide polymorphism” – polimorfism la nivelul unei singure nucleotide

SSRs – engl. “Simple Sequence Repeats” – repetări de secvențe scurte

TLS – engl. “Terrestrial laser scanning” – scanare cu laser terestru

UAVs – engl. “Unnamed aerial vehicle” – vehicul aerian/ aeronave fără pilot

UNESCO – engl. “United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization” – Organizația

Națiunilor Unite pentru Educație, Știință și Cultură

VI – engl. “Vegetation Index” – indice de vegetație

INTRODUCERE

Tendința de creștere a temperaturilor a devenit din ce în ce mai perceptibilă. Ea poate fi asociată direct cu procesele de deșertificare, topirea ghețarilor, reducerea zonelor acoperite de zăpadă, ridicarea nivelelor mărilor și oceanelor, intensificarea furtunilor și, indirect, cu eroziunea solurilor (Aitken et al. 2008). În contextul preconizat al schimbărilor climatice, speciile din ecosistemele forestiere sunt forțate să se adapteze la noile condiții și să reacționeze prin intermediul propriilor mecanisme de reglare (adaptare fiziologică), fiind nevoite să își restrângă și repositioneze habitatele (Barbu et al. 2016; Prasad et al. 2024) sau sunt chiar împinse până la limita lor de supraviețuire.

În contextul schimbărilor climatice, managementul forestier trebuie să se concentreze asupra speciilor care au dovedit o capacitate de adaptare și o plasticitate fenotipică ridicate la noile condiții, rezistență la agenții dăunători de natură entomologică și fitopatologică, cât și o utilizare diversificată a materialului lemnos. Atât aceste argumente, cât și nevoi, justifică alegerea fagului ca o soluție viabilă și necesitatea obținerii a cât mai multor informații privitoare la potențialului său de adaptare.

Fagul (*Fagus sylvatica* L.) este cea mai răspândită specie de arbori din Europa (Rigo et al. 2016), inclusiv din România (Rezultate IFN-Ciclul II 2018). Această specie are o valoare ecologică și economică ridicate, fiind o specie de interes la nivel european (Leuschner & Ellenberg 2017; Leuschner 2020). Fagul are o capacitate ridicată de stocare a carbonului în biomasa sa (Jagodźiński et al. 2020), un potențial ridicat de adaptare la noi condiții de mediu (Kramer et al. 2010), o gamă largă de utilizare a lemnului (Pramreiter & Grabner 2023) și o bună rezistență la agenții patogeni de natură entomologică și fitopatologică (Chira et al. 2014; Biriș 2014). Fiind o specie mezotermă și mezofilă (Șofletea & Curtu 2007), în contextul schimbărilor climatice, capacitatea sa competitivă poate fi redusă (Geßler et al. 2007), preferând un climat moderat, lipsit de temperaturi extreme (Zlatník 1978). Pentru o mai bună înțelegere a potențialului de adaptare al acestei specii, este necesară monitorizarea răspunsurilor fenologice la efectele schimbările climatice (Schieber 2006).

Fenologia foliară reprezintă un bioindicator al adaptabilității locale (McKown et al. 2018) și poate fi considerată drept un răspuns la schimbările climatice, foarte sensibil la variația temperaturilor. Prin intermediul monitorizării fenologiei, se pot cuantifica schimbările proceselor din ecosistemele terestre, precum fotosinteza și transpirația (Klosterman & Richardson 2017), permițând, totodată, evaluarea impactului efectelor schimbărilor climatice asupra acestora (Atkins et al. 2020). Totodată, momentele pornirii arborilor în fenologia de primăvară și în cea de toamnă, pot fi asociate cu

susceptibilitatea la diverși agenți patogeni din arboret (van Asch et al. 2007; Krokene et al. 2011; McKinney et al. 2011) și conceperea atât a unui management eficient de prevenție și combatere, cât și a unui de plantare, fertilizare și recoltare a culturilor.

Observațiile pe serii de timp la fenologia de primăvară și de toamnă pot contribui la o mai bună înțelegere a efectelor variabilității climatice, dar și a schimbărilor climatice asupra proceselor biologice de la nivelul plantelor și arborilor, în corelație cu factorii meteorologici (Budeanu et al. 2016). Imaginile colectate prin intermediul utilizării diferitelor dispozitive de teledetecție (drone sau sateliți) facilitează delimitarea și cuantificarea precisă a diferitelor fenofaze ale fenologiei de primăvară și de toamnă. Folosirea a diverși indici de vegetație calculați pe baza valorilor pixelilor extrași din aceste imagini poate furniza informații despre starea de sănătate a unui arboret, dar și a altor caracteristici fenotipice, în cazul de față, a fenologiei. Îmbunătățirea rezoluției acestor imagini permite extragerea diverselor informații chiar și la nivel de individ/ arbore.

Arhitectura unui arbore depinde de mulți factori, printre care și cei care compun condițiile staționale (climat, expoziție, înclinarea terenului) și pe cele de arboret (densitate, competiție, acces la lumină), care pot fi controlați, într-o oarecare măsură, de intervențiile silviculturale, fiind considerată și drept un răspuns la acestea (Tomșa et al. 2021). Această trăsătură fenotipică este rezultatul interacțiunii dintre genotipul unui individ și condițiile de mediu (Chéné et al. 2012). La rândul ei, fiecare ramură răspunde la condițiile de microrelief (Abegg et al. 2021). Gradul de înfurcire al unui arbore este un aspect important care determină în mod special valoarea economică a acestuia. Totuși, natura apariției acestei trăsături fenotipice este încă incertă, fiind asociată atât cu înghețurile târzii din primăvară (Jouve et al. 2007), cât și cu prezența anumitor agenți patogeni de natură entomologică (Kerr & Boswell 2001) și fitopatologică (Lebeda 1983) sau a diversității genetice (Xiong et al. 2010; Callister et al. 2011).

Creșterea unui arbore este o trăsătură care relevă valoarea adaptativă a acestuia, rata de creștere fiind asociată în mod direct cu succesul reproductiv individual (Avanzi et al. 2020), iar deseori, este folosită și drept un indicator de predicție pentru supraviețuire (Bigler & Bugmann 2004). În cazul fagului, rata de creștere și momentul pornirii în sezonul de vegetație reprezintă trăsături ereditare (Gauzere et al. 2016). Cu toate acestea, în mediile naturale și în arboretele pluriene, acești indicatori de creștere, precum înălțimea și DBH, pot reflecta variația condițiilor de microclimat și vârsta acestora.

Intervențiile silviculturale reduc densitatea din interiorul unui arboret, implicit, a competiției (Kirk & Berrill 2016). Competiția exercitată asupra unui arbore de către exemplarele învecinate depinde de

specie, mărime, forma coroanei (Barbeito et al. 2017), dar și de accesul acestuia la resurse (apă, lumină) (Fichtner et al. 2012). Competiția afectează atât exemplarele juvenile (Palaghianu 2009), cât și arborii maturi (Duduman et al. 2010), fiind chiar un factor determinant al caracteristicilor ce țin de trunchiul și coroana arborilor (Burkardt et al. 2020). Plasticitatea coroanei unui arbore în ceea ce privește accesul la lumină reprezintă un factor limitativ pentru creșterea acestuia (Penanhoat et al. 2024), iar zveltețea este deseori utilizată drept un indice care denotă rezistența la doborâturile provocate de vânt (Wang et al. 1998).

Caracteristicile fenotipice sunt determinate și controlate de interacțiunea dintre genotip și mediu (Li et al. 2017; Bian et al. 2022). Heterozigoția este unul dintre cei mai importanți indicatori ai variației genetice care poate influența rata de creștere a arborilor (Mitton et al. 1980). O heterozigoție scăzută implică și o reducere a fitness-ului unui arbore (Rodríguez-Quilón et al. 2015). Totuși, asocierea heterozigoției cu diverse trăsături fenotipice este încă intens dezbătută (Szulkin et al. 2010; Mueller et al. 2011; Gkafas et al. 2019). În contextul schimbărilor climatice, fagul a avut abilitatea de a se specializa genotipic, conducând astfel la apariția anumitor varietăți și ecotipuri adaptate local (Božič et al. 2013). Genotipurile unei specii au capacitatea de a se adapta la noi condiții de mediu, manifestând un comportament fenologic în zonele de altitudine scăzute și ridicate, aceasta determinând direct lungimea sezonului de vegetație (Menamo et al. 2021).

În cadrul acestei teze de doctorat, a fost evaluată variabilitatea fenotipică a fagului prin monitorizarea fenologiei de primăvară și de toamnă, pe parcursul a trei ani, de-a lungul unui profil altitudinal cu o amplitudine de 900 m, care a inclus și suprafețe experimentale amplasate în teren accidentat, atât prin intermediul observațiilor din teren, cât și prin intermediul unor diferite dispozitive de teledetecție (dronă și imagini satelitare), în vederea analizei gradului de adaptare la diferitele condiții locale de mediu. Tot prin intermediul teledetecției, mai exact a utilizării metodei de scanare cu laser terestru (TLS), au fost extrase diferite caracteristici biometrice ale exemplarelor de fag analizate, care, ulterior, au fost asociate cu diversitatea genetică a fiecărui individ, cuantificată drept grad de heterozigoție. Analizele statistice au fost efectuate atât prin abordarea metodelor clasice (coeficientul de corelație Pearson), dar și prin tehnici noi de *machine learning* (algoritmul random forest) sau a unor modele liniare și neliniare, aplicate atât pe setul de date de calibrare, cât și pe cel de testare.

CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CUNOȘȚINȚELOR

1.1. Fagul, cea mai importantă specie de foioase din România

Fagul (*Fagus sylvatica* L.) este una dintre cele mai importante și răspândite specii forestiere de foioase din Europa (Rigo et al. 2016), cu o amplitudine largă în ceea ce privește condițiile de mediu (Leuschner et al. 2006). Este o specie foarte competitivă, deseori fiind întâlnită sub formă de arborete pure sau în arborete de amestec cu bradul (*Abies alba*), molidul (*Picea abies*) și gorunul (*Quercus petraea*) (Doniță et al. 1990; Doniță et al. 2005). Pădurile de fag, în special arboretele în vârstă, au un rol important în conservarea biodiversității și prezintă un interes economic deosebit (Moning & Müller 2009).

Din suprafața totală a pădurilor din România (6,9 mil. ha), fagul ocupă o suprafață de aprox. 31%, fiind cea mai răspândită specie din fondul forestier național (Rezultate IFN – Ciclul II 2018). Din volumul total de lemn pe picior din pădurile României, fagul ocupă aprox. 38%, având cea mai mare pondere. În România, fagul se întâlnește preponderent în zonele montane, arealul acestuia suprapunându-se în mare parte cu lanțul carpatic. Limita inferioară a făgetelor încheiate, denumită și limita xerică, este reprezentată de altitudini de 300 m, găsindu-se și izolat pe văi înguste și umede, în Banat și Podișul Moldovei, la altitudini de 100-200 m (Stănescu et al. 1997). Limita superioară a făgetelor încheiate din România se situează la altitudini cuprinse între 1200-1400 m, în Carpații Occidentali, regăsindu-se și la altitudini mai ridicate cu 100-200 m în Carpații Meridionali (Șofletea & Curtu 2007). Optimul altitudinal în care această specie de regăsește în România este de 600-1200 m (Budeanu et al. 2016), însă, amplitudinea altitudinală în care este distribuită ea este de 200-1600 (Budeanu et al. 2015). Limita superioară a ariei de răspândire a fagului este determinată, în general, de temperaturile scăzute, iar cea inferioară, de temperaturile ridicate și cantitățile reduse de precipitații (Grace et al. 2002; Nedelcov et al. 2018). Deși această specie este considerată a avea o capacitate de adaptare și toleranță ridicate, demonstrate prin arealul vast și amplitudinea altitudinală largă în care se regăsește, ea devine sensibilă la condițiile climatice atât în limitele inferioare de distribuție, cât și în cele superioare (Mátyás et al. 2010). El poate fi întâlnit de la altitudini scăzute în nordul continentului, ca spre sudul acestuia să fie găsit la altitudini de peste 1000 m, uneori chiar și aproape de 2000 (von Wühlisch 2008), conform nevoii de precipitații și a unei temperaturi optime regăsite pe gradientul latitudinal.

Această specie atinge performanțele maxime în zonele cu un climat umed, blând și însoțit (Horgan et al. 2003), fiind exigentă la condițiile termice și hidrice. La nivel european, distribuția fagului acoperă o gamă largă de condiții climatice, cu o amplitudine de 4-12 °C a temperaturii medii anuale și un cumul anual al precipitațiilor cuprins între 450-2000 mm (Konnert 1995). Optimul termic al fagului în

România este cuprins între 6-9 °C (temperatura medie anuală) (Șofletea & Curtu 2007), manifestându-și comportamentul mezoterm, dar limita de toleranță este 3 °C. Pornirea în sezonul de vegetație are loc atunci când temperatura medie zilnică depășește pragul de 10 °C (Popescu & Șofletea 2020).

Ca răspuns la schimbările climatice, fagul, ca orice altă specie forestieră, este nevoit să se adapteze și să reacționeze prin intermediul propriilor mecanisme de reglare, uneori, fiind împins chiar la limita lui de supraviețuire. Adaptarea fagului depinde de diversitatea genetică a acestei specii și de plasticitatea sa ecologică la noile condiții staționale (Westergren et al. 2023).

Plasticitatea fenotipică și capacitatea de adaptare a fagului la diverse condiții de mediu este datorată compoziției sale genetice (Schaberg et al. 2008; Nicolescu et al. 2017). Exemplarele de fag care provin din sud-estul continentului nu sunt afectate în aceeași măsură de secetă, precum cele din centrul arealului natural de răspândire (Fotelli et al. 2009), deși acestea manifestă o diversitate genetică mare (Vornam et al. 2004). La o scară mai largă, această diferențiere genetică între populații devine și mai substanțială (Magri et al. 2006), justificând răspunsul diferit al acestei specii la diferite condiții de mediu (Knutzen et al. 2015).

1.2. Observații fenologice la fag

Fenologia speciilor forestiere este unul dintre cei mai reprezentativi, senzitivi și relativ ușor de observat indicator care răspunde efectelor climatului. Rata de supraviețuire, capacitatea de reproducere, persistența și, implicit, zona de distribuție a speciilor forestiere sunt afectate de dinamica fenologiei (Chuine 2010). Plasticitatea fenotipică a unei specii este cea care îi oferă posibilitatea de a supraviețui în diverse condiții de mediu (Preite et al. 2015). Pornirea în sezonul de vegetație este considerată un indicator al adaptabilității, cu implicații importante pentru managementul forestier (Chuine et al. 2000; Casmey et al. 2022).

Temperatura este un factor important pentru creșterea și dezvoltarea speciilor forestiere. Ea influențează rata reacțiilor chimice din cadrul proceselor fiziologice ale unei plante sau arbore (Badeck et al. 2004), în mod diferit la nivelul fiecărui organ (Delpierre et al. 2016). În multe cazuri, a fost demonstrat faptul că o creștere a temperaturii accelerează dezvoltarea arborilor, mai exact, o creștere de un grad a temperaturii din primăvară poate determina un start în avans al sezonului de vegetație cu 2-7 zile (Zohner et al. 2021), implicit, o tranziție mai rapidă către următoarea fenofază (Badeck et al. 2004). Un sezon de vegetație mai lung implică un start în avans al procesului de creștere și dezvoltare a mugurilor, respectiv de apariție a frunzelor, cauzat de încălzirea globală (Chmielewski et al. 2018). În schimb, un start în avans al pornirii în sezonul de vegetație cumulat cu temperaturi ridicate și precipitații reduse (secetă) cauzează o îngălbenire prematură a frunzelor,

implicit un start în avans al senescentei (Menzel 2003). Pornirea în sezonul de vegetație a fagului este influențată în mare măsură de dinamica temperaturii, atât în sfârșitul iernii, cât și în începutul primăverii (Bigler & Vitasse 2019). Temperaturile scăzute din toamnă determină un debut precoce al senescentei; o creștere cu un grad a temperaturii din toamnă determină o întârziere a senescentei de până la 8 zile pentru unele specii forestiere (Zohner et al. 2021).

Pe baza observațiilor din teren sau a celor obținute cu ajutorul tehnicilor „remote sensing” (drone, imagini satelitare), fenologia poate furniza algoritme și modele care să explice reacțiile speciilor forestiere la efectele schimbărilor climatice și capacitatea acestora de a se adapta la noi condiții staționale. Deși observațiile din teren asupra fenologiei speciilor forestiere sunt solicitante și consumatoare de timp, ele oferă informații valoroase și precise la nivel de individ (Park et al. 2019). Observațiile pe serii de timp atât asupra fenologiei de primăvară, cât și a celei de toamnă pot contribui la o mai bună înțelegere a variabilității climatice sau a efectelor schimbărilor climatice și răspunsurile speciilor forestiere la acestea, în corelație cu datele meteorologice, în special temperatura (Budeanu et al. 2016). Imaginile colectate cu ajutorul dispozitivelor UAV și a sateliților facilitează delimitarea și cuantificarea precisă a diferitelor fenofaze ale fenologiei (Fig. 1.1). Există însă anumiți factori care pot afecta calitatea datelor/ imaginilor obținute, în special cei de natură meteorologică (nori, vânt, ploi, ceață), dar și specificațiile lor tehnice (rezoluția, autonomia, înălțimea și distanța maximă de survolare), mai ales în cazul monitorizării la nivel de individ (Jacobsen 2017; Sánchez-Azofeifa et al. 2011).

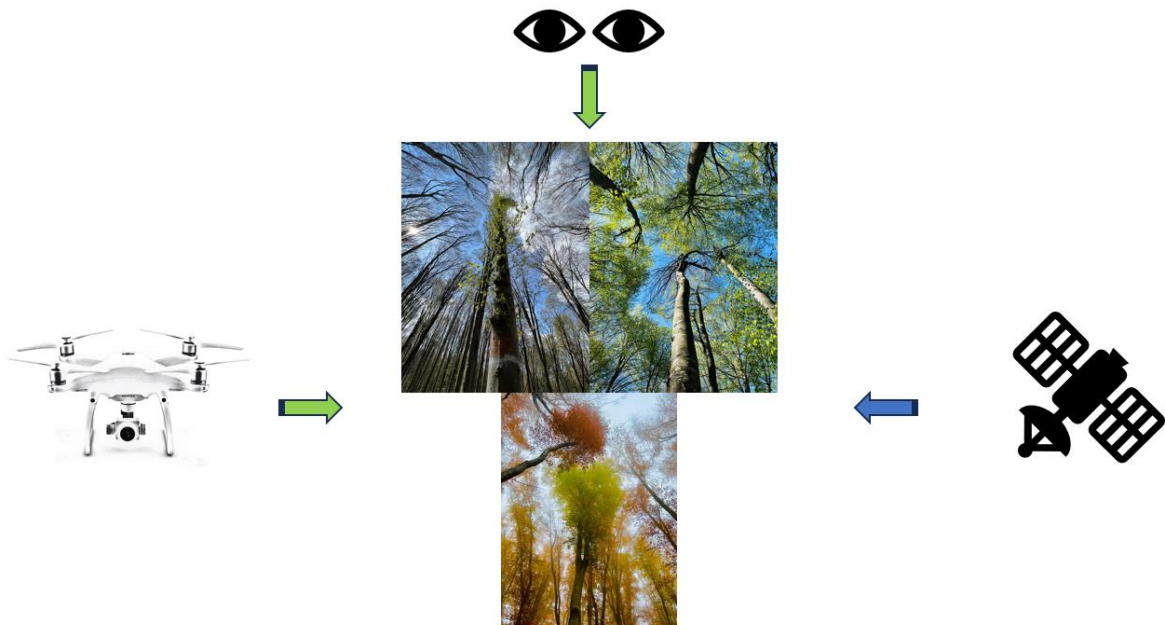


Fig. 1.1 - Ilustrarea celor 3 modalități adoptate de evaluare a fenologiei la *F. sylvatica*: observații clasice în teren, dronă și imagini satelitare

1.3. Relația între caracteristici fenotipice ale arborilor și gradul de heterozigoție

Metodele de scanare cu laser terestru (TLS) au demonstrat potențial în aplicarea din domeniul forestier. Metodele TLS pot estima cu succes o gamă largă de indici structurali ai unui arboret (Pascu et al. 2019). Apostol et al. (2018) au demonstrat că utilizarea metodelor TLS poate furniza rezultate la fel de exacte precum a celor convenționale, în estimarea valorilor diametrelor arborilor, dar pentru determinarea înălțimilor, le recomandă tot pe cele din urmă. În ultimii ani, metodele TLS au fost îmbunătățite, Capalb et al. (2023) afirmând că datele obținute din norii de puncte procesați de aceste dispozitive, sunt de o rezoluție suficientă pentru a extrage atât valori ale diametrului, cât și ale înălțimii arborilor dintr-un arboret echien și relativ-echien de molid (cu toate acestea, au fost raportate câteva limitări în cazul unor indivizi cu înălțime redusă). Acuratețea cu care sunt obținute datele privitoare la arhitectura arborilor este însă crucială în procesarea și interpretarea ulterioară a acestora (Tomșa et al. 2021).

Markerii genetici au fost deja utilizați în testarea asocierii fenologiei cu diversitatea genetică a unui arbore, determinată atât prin intermediul SSRs, dar și prin SNPs (Hall et al. 2007). Heterozigoția a fost și ea asociată cu fenologia atât a unor diferite specii de plante (Kitamoto et al. 2006; Suni & Whiteley 2015), dar și de arbori (Kembrytė et al. 2022). Pentru calculul heterozigoției au fost utilizați atât markeri genetici de tipul EST (Tomșa et al. 2021), SSR (Kembrytė et al. 2022), cât și a SNPs (Hall et al. 2007). Inițial, cele mai multe studii care au vizat variabilitatea genetică a fagului au utilizat izoenzimele propuse de Müller-Starck & Starke (1993). Mai târziu, analizele genetice efectuate asupra exemplarelor de fag care au utilizat microsateliți (SSRs-simple sequence repeats/ secvențe simple repetitive), au furnizat informații importante privitoare la distribuția variabilității genetice (Vornam et al. 2004; Cvrčková et al. 2017), influența refugiilor glaciare (Buiteveld et al. 2007), dinamica populațiilor (Rajendra et al. 2014) și relațiile evolutive la nivel inter- și intraspecific între diferite subspecii de fag interfertile (Budde et al. 2023). Babushkina et al. (2016) au afirmat că indivizii care au un grad mai ridicat de heterozigoție manifestă un model de creștere mai stabil și o toleranță mai ridicată la influențele factorilor de mediu, precum temperatura sau cantitatea de precipitații. Leimu et al. (2006) au demonstrat faptul că nivelul scăzut de heterozigoție al unui individ (de exemplu, cauzat de împerecherea exemplarelor înrudite sau a derivei genetice din cadrul unei populații restrânse) poate provoca o reducere a fitness-ului. Mutațiile genetice dăunătoare (în principal, mutațiile recesive cu efecte adverse asupra fitness-ului), sunt (parțial) mascate în cazul indivizilor heterozigoți. Prin urmare, arborii care prezintă un nivel de heterozigoție scăzut, pot manifesta un fitness considerabil mai redus, în comparație cu exemplarele cu un grad ridicat de heterozigoție. Puțini markeri genetici din gene specifice cu efecte semnificative (efect local) ar putea provoca astfel

de corelații între heterozigoție și fitness (Hansson et al. 2002; Szulkin et al. 2010). Combinația mai multor markeri genetici, presupuși neutri, poate fi utilizată în calculul nivelului de heterozigoție individuală la nivelul genomului (Forstmeier et al. 2012).

CAPITOLUL 2: SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR

Cercetările prezentate în cadrul acestei lucrări au avut ca scop evaluarea variabilității fenotipice a fagului de-a lungul unui profil altitudinal în vederea analizei gradului de adaptare la condițiile locale de mediu.

Pentru atingerea scopului propus, raportat la stadiul actual al cunoștințelor, au fost stabilite următoarele obiective specifice:

1. Observarea fenologiei de primăvară și de toamnă în populații de fag situate la niveluri altitudinale diferite
2. Testarea unor mijloace de teledetecție pentru efectuarea observațiilor fenologice în teren accidentat
3. Analiza relației dintre caracteristici fenotipice ale fagului și indicii de heterozigoție

CAPITOLUL 3: MATERIAL ȘI METODE DE CERCETARE

3.1. Localizarea cercetărilor

Cercetările au fost efectuate de-a lungul unui profil altitudinal cu o amplitudine cuprinsă în intervalul 550 – 1450 m și care cuprinde cinci suprafețe de studiu (Fig. 3.1). Limita inferioară a profilului altitudinal se găsește pe Dealul Lemeș, din depresiunea Țării Bârsei. Celelalte populații se găsesc de-a lungul masivului Postăvaru. Au fost selectați în total 150 de arbori maturi, câte 30 din fiecare suprafață de probă, localizați la cel puțin 25 de m unul de celălalt, majoritar situați pe expoziția nordică, din plafonul superior al arboretului (clasele I, II și III Kraft) (Kraft 1884). Vârsta exemplarelor analizate a fost cuprinsă în intervalul 80-120 de ani. Acest profil altitudinal cu un ecart de 900 m se suprapune cu arealul natural al fagului din zona Brașovului, acolo unde acesta formează amestecuri cu alte specii de foioase (precum *Acer pseudoplatanus* sau *Carpinus betulus*) și de rășinoase (*Picea abies* sau *Abies alba*) (Irimin & Ungureanu 2015; Mărgălinescu & Irimin 2016; Ștefan 2018).

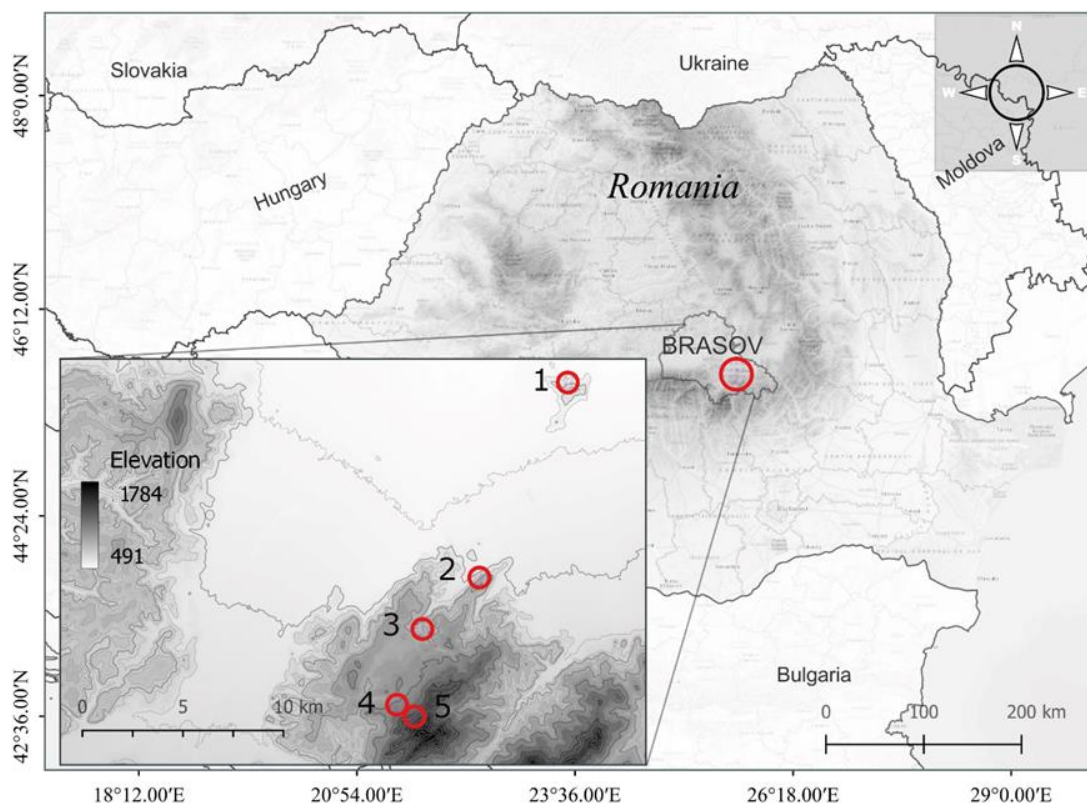


Fig. 3.1 - Localizarea geografică a suprafețelor de studiu dispuse de-a lungul profilului altitudinal (1 – Lemeș, 2 – Tâmpa, 3 – Solomon, 4 – P. Lupului și 5 – Ruia; QGis 2024)

3.2. Observații fenologice

Observațiile fenologice din teren au fost efectuate conform metodologiei propuse de Vitasse și colaboratorii (2009). Fiecare populație, din fiecare suprafață de probă, a fost monitorizată la o frecvență de două ori pe săptămână, din aprilie până în lunie, în cazul fenologiei de primăvară (chiar și de trei ori pe săptămână, pentru a putea surprinde tranzițiile rapide de la o fenofază la o alta), și din septembrie până în noiembrie, în cazul senescentei. Aceste observații au fost efectuate întotdeauna de către același operator, cu ochiul liber sau cu ajutorul unui binocular cu mărimea 15x, de la o distanță medie de 15 m față de individ/ arbore.

Fenologia de primăvară a fost evaluată conform scării lui Vitasse, ce cuprinde 4 stadii de dezvoltare (Tabelul 3.1). Unui arbore i-a fost atribuit un stadiu în funcție de ponderea majoritară (>50%) a mugurilor localizați la nivelul treimii superioare din coroană. Unei populații i-a fost atribuit un stadiu în funcție de media celor 30 de indivizi din fiecare suprafață de studiu. În funcție de procentul de acoperire al culorii verzi, această scară calitativă de evaluare a procesului de dezvoltare a mugurilor și apariție a frunzelor a fost convertită în una cantitativă, cu scopul de a avea o precizie mai ridicată în delimitarea stadiilor și pentru a o aduce la aceeași unitate de măsură cu cea a senescentei. Această metodă s-a dovedit eficientă și în studiul lui Alberto et al. (2011), obținându-se rezultate promițătoare.

Tabelul 3.1 – Stadiile fenologiei de primăvară

Cod	0	1	2	3
Stadiul fenologic				
Denumire	Muguri dorminzi	Muguri umflați	Muguri plesniți	Cel puțin o frunză complet dezvoltată
Correspondent BBCH	BBCH 00	BBCH 01	BBCH 07	BBCH 09

Interval de acoperire al culorii verzi (%)	<25	26-50	51-75	>75
--	-----	-------	-------	-----

Senescenta (%CFL) a fost calculată pe baza a două variabile evaluate în teren, procentul de frunze îngălbenite/ colorate și procentul de frunze căzute/ lipsă, conform formulei (1):

$$\%CFL = (\%CL \times (100 - \%FL))/100 + \%FL, \quad \text{Formula 3.1}$$

unde: %CFL – procentajul de frunze îngălbenite și căzute

%CL – procentajul de frunze îngălbenite

%FL – procentajul de frunze căzute

Unui arbore i-a fost atribuit un procent al %CL și %FL în funcție de ponderea majoritară (>50%) a frunzelor localizate la nivelul treimii superioare din coroană. Unei suprafețe de studiu i-a fost atribuit un procent al %CL și %FL în funcție de media celor 30 de indivizi localizați în fiecare dintre acestea.

Momentul pornirii în sezonul de vegetație al unui individ a fost asociat cu cel al atingerii stadiului 2 conform scării de creștere și dezvoltare a mugurilor, respectiv cel al mugurilor plesniți (Chesnoiu & Sofletea 2009, Schieber et al. 2013). Această asociere este justificată de faptul că acest stadiu poate fi identificat de către operatorul din teren cu o precizie mai ridicată comparativ cu primul (muguri umflați), în timpul efectuării observațiilor fenologice. Stadiul echivalent al acestuia din scara BBCH este cel de BBCH 09, împărțindu-se aceeași denumire de "muguri plesniți" (Hack et al. 1992). Momentul începerii senescentei a fost asociat cu cel al îngălbenirii frunzelor din treimea superioară a coroanei, în proporție de 50 % (Cufar et al. 2012, Schieber et al. 2017). Lungimea sezonului de vegetație a fost asociată cu perioada cuprinsă între momentul pornirii în vegetație (muguri plesniți) și cel al îngălbenirii frunzelor în proporție de 50% (Drobyshev et al. 2010).

3.3. Date meteorologice

Procesul de achiziție a datelor meteorologice a fost unul diferit pentru fiecare din cei 3 ani de efectuare a studiilor. În primul an, 2021, datele brute au fost extrase din stațiile meteorologice localizate în imediata vecinătate a suprafețelor de studiu. În cel de al doilea an, 2022, au fost instalați în fiecare suprafață de studiu, în interiorul arboretelor, câte 3 senzori de înregistrare a valorilor temperaturii (°C) și umidității relative (%) din aer (doi loggeri model *HOBO* și unul *iButton*. Ulterior,

aceste date meteorologice au fost descărcate prin intermediul stațiilor și software-urilor dedicate fiecărui model (*HOBOWare*, respectiv *OneWireViewer*).

Fiecare senzor a fost configurat astfel încât să poată înregistra valorile temperaturii și umidității relative la o frecvență de 30 de minute (48 de valori/ zi), fiind comparate cu cele descărcate din aceleași stații meteorologice. De asemenea, au fost descărcate date meteorologice pentru perioada 1970 – 2000 de pe platforma *WorldClim* (Fick & Hijmans 2017), pentru a putea compara seturile de date și de a surprinde o eventuală tendință de creștere a temperaturii. Ulterior, aceste date brute au fost procesate și prelucrate, fiind obținuți mai mulți indici meteorologici: temperatura medie zilnică (°C), valoarea temperaturii maxime zilnice (°C), valoarea temperaturii minime zilnice (°C), umiditatea relativă medie zilnică (%), umiditatea relativă maximă zilnică (%) și umiditatea relativă minimă zilnică (%). Pentru fenologia de primăvară, au fost calculați indicii GDD (engl. "growing degree days"), grade zile de creștere, extrăgând pragurile termice de 5 °C pentru GDD_5 și 10 °C pentru GDD_10 din valorile temperaturii medii zilnice (McMaster & Wilhelm 1997) și CDD (engl. "cumulated degree days"), grade zile cumulate, extrăgând pragurile termice de 0 °C (Grigorieva et al. 2010). Pe baza conceptului de cumul specific de GDD necesar startului fiecărei fenofaze abordat de Zafarian et al. (2019), a fost conceput și indicatorul meteorologic ADD (engl. „autumn degree days”), grade zilnice de senescentă, pentru fenologia de toamnă, fiind calculat extrăgând pragul termic de 0 °C din valoarea temperaturii medii zilnice și cumulând valorile rămase.

3.4. Efectuarea observațiilor fenologice prin intermediul teledetecției

3.4.1. Colectarea datelor pe serii temporale și procesarea imaginilor obținute prin intermediul dronelor

Obținerea imaginilor prin intermediul dronelor

Simultan cu efectuarea observațiilor fenologice din teren, au fost colectate imagini aeriene cu ajutorul unui dispozitiv de teledetecție, mai exact, cu drona. Aceste survolări au fost efectuate doar în două din cele cinci suprafețe de studiu, în Solomon și în P. Lupului, și au vizat toți cei 60 de arbori. Pentru aceasta, a fost necesară operațiunea de preluare a coordonatelor exacte GPS ale acestor arbori, prin intermediul echipamentului de navigație *Global Navigation Satellite System* (GNSS 2008).

Modelul de dispozitiv de teledetecție utilizat a fost o dronă *Phantom 4 Pro v2* (Fig. 3.2), echipată cu un senzor RGB (*Red* – 660 nm, *Green* – 550 nm și *Blue* – 460 nm) CMOS de 1 inch, rezoluție de 20 de Mpx (pixeli efectivi) și un obiectiv FOV de 84° cu lentile 8.8/24 mm (echivalent cu formatul de 35 mm), apertură de f/2.8 – f/11 (Bârliba et al. 2020). Survolările au fost programate astfel încât să fie

acoperiți toți cei 60 de indivizi din cele două suprafețe de studiu, utilizând software-ul *PIX4Dcapture* (2022).



Fig. 3.2 - Dispozitivul UAV folosit de tip dronă, model *Phantom 4 Pro v2* (fotografia din stânga) și stabilirea traseului de survolare deasupra arborilor țintă (fotografia din dreapta) (Ciocîrlan 2022)

Au fost efectuate 32 de survolări (câte 16 pentru fiecare suprafață de studiu), pe parcursul sezonului de vegetație din anul 2021, fiind validate 14 dintre acestea, obținând astfel o serie temporală care să surprindă dinamica fenofazelor din primăvară și din toamnă.

Procesarea imaginilor obținute prin intermediul dronei

Imaginile colectate au fost procesate utilizând *OpenDroneMap* (OpenDroneMap v1.1.0), un software cu acces liber, rezultând imagini ortorectificate pentru fiecare zbor. Ulterior, aceste produse au fost georeferențiate utilizând puncte de control din teren și software-ul *QGIS* (QGIS v3.26.3. 2017). În fiecare dintre aceste imagini, au fost identificate porțiunile umbrite prin aplicarea unui filtru asupra pixelilor, astfel încât aceștia să corespundă unui anumit interval de valori specific modelului RGB (estimate inițial din identificarea eșantionului), ulterior fiind înlocuite cu valori nule, utilizând pachetul *raster* (Hijmans & van Etten 2012) din software-ul *R* (R Project v4.1.4. 2022) (Fig. 3.3).

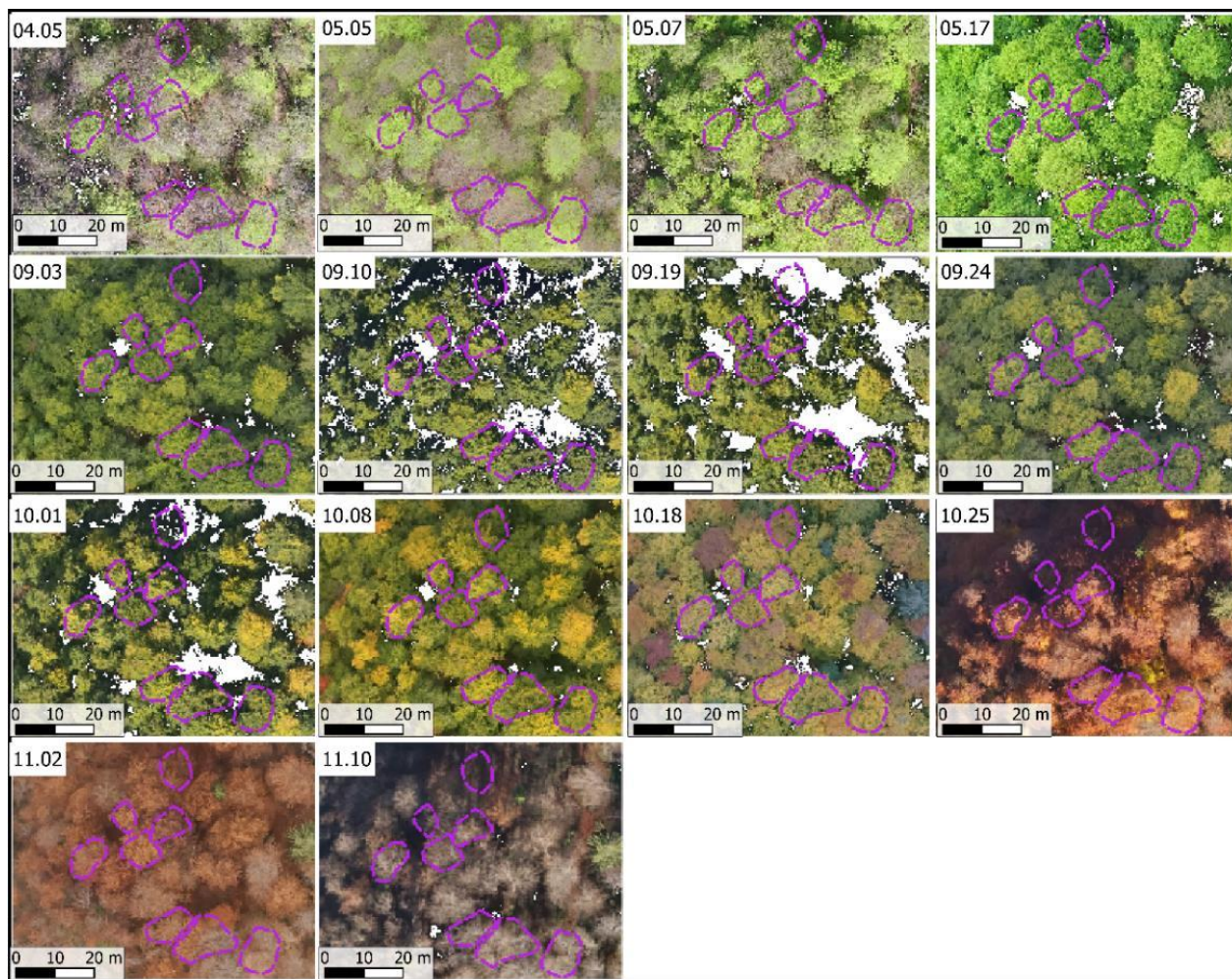


Fig. 3.3 - Capturi în serie temporală ale unor indivizi monitorizați în suprafața de probă Solomon, pe diferite stadii fenologice (luna și ziua în colțul din stânga sus), după procesul de înlăturare a porțiunilor umbrite și convertire a valorilor pixelilor acestora în valori nule. Porțiunile magenta cu linie întreruptă reprezintă delimitarea coroanei și au fost trasate cu scopul de a prelua ulterior valorile lungimii de undă ale benzii RGB.

Delimitarea coroanelor a fost realizată manual pentru fiecare din cei 60 de arbori, ulterior, utilizând pachetul *rgdal* (Bivand et al. 2023), au fost calculați mai mulți indici de vegetație (Tabelul 3.2) și extrase valorile mediei, medianei și erorii standard pentru fiecare pixel, din fiecare imagine.

Tabelul 3.2. Indicii de vegetație utilizați.

Număr	Denumire	Abreviere	Formulă de calcul	Referință
1	Digital number for red band	R	$\text{red}/255$	Pearson et al. 1976
2	Digital number for green band	G	$\text{green}/255$	Pearson et al. 1976

3	Digital number for blue band	B	blue/255	Pearson et al. 1976
4	Green Red Ratio Index	GRI	G/R	Fuentes et al. 2001
5	Blue Green Ratio Index	BRI	B/G	Zarco-Tejada et al. 2005
6	Green Blue Difference Index	GBDI	G - B	Kawashima & Nakatani 1998
7	Red Blue Difference Index	RBDI	R - B	Kawashima & Nakatani 1998
8	Excess of green index	ExG	2G - R - B	Woebbecke et al. 1995
9	Grayscale index	GRAY	(R + G + B)/ 3	Wang et al. 2014
10	Chromatic coordinates for red/ Normalized red of RGB	NRRGB	R/ (R + G + B)	Woebbecke et al. 1995
11	Chromatic coordinates for green/ Normalized green of RGB	NGRGB	G/ (R + G + B)	Woebbecke et al. 1995
12	Chromatic coordinates for blue/ Normalized blue of RGB	NBRGB	B/ (R + G + B)	Woebbecke et al. 1995
13	Normalized Green Red Difference Index	NGRDI	(G - R)/ (G + R)	Rouse et al. 1974
14	Kawashima index	KAW	(R - B)/ (R + B)	Kawashima & Nakatani 1998
15	Normalized Green Blue Difference Index	NGBDI	(G - B)/ (G + B)	Hunt et al. 2005
16	Green Leaf Index	GLI	(2G - R - B)/ (2G + R + B)	Louhaichi et al. 2001
17	Modified Green Red Vegetation Index	MGVRI	(G ² - R ²) / (G ² + R ²)	Bendig et al. 2015
18	Red Green Blue Vegetation Index	RGVBI	(G - B x R)/ (G ² + B x R)	Bendig et al. 2015
19	Visible Atmospherically Resistant Index	VARI	(G - R)/ (G + R - B)	Gitelson et al. 2002

Setul de date folosit pentru predicția fenologiei constă într-o matrice aferentă celor 60 de indivizi pe parcursul a 16 survolări cu drona de-a lungul sezonului de vegetație (din care validate au fost 14), 960 de observații și 48 de predictorii.

Pe baza imaginilor ortorectificate, fiecare arbore a fost evaluat conform aceleiași metodologii descrisă în Tabelul 3.1, pentru a putea fi obținute date cuantificate în aceeași unitate de măsură și de a permite o comparație între datele fenologice din teren și cele obținute prin intermediul dronei.

3.4.2. Colectarea datelor pe serii temporale și procesarea imaginilor obținute prin intermediul platformei *Copernicus*

Colectarea datelor

Produsele în format raster, disponibile pe portalul *Copernicus Land Monitoring* au fost colectate din perioada aprilie – noiembrie 2021, în 19 capturi, pentru fiecare suprafață de studiu. Parametrii biofizici sunt furnizați la o rezoluție de 300 m, prin intermediul satelitului *Sentinel-3 OLCI*, la o frecvență de 10 zile. Pentru a estima stadiul fenologic la nivelul fiecărei suprafețe de studiu, au fost extrase valorile pixelilor ale unor parametri biofizici (Tabelul 3.3), pentru perioadele similare în care au fost efectuate observațiile fenologice din teren.

Tabelul 3.3 - Parametrii biofizici extrași de pe platforma *Copernicus*, utilizați în monitorizarea fenologiei.

Număr	Denumire	Abreviere	Descriere
1	Dry Matter Productivity	DMP	Ritmul general de creștere/ creșterea biomasei uscate a vegetației (kg/ha/day)
2	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation	FAPAR	Fracția radiațiilor solare absorbite de frunze în procesul de fotosinteză
3	Fraction of Vegetation Cover	FCover	Proporția terenului acoperit de vegetație
4	Leaf Area Index	LAI	Jumătate din suprafața totală a elementelor de culoare verde a baldachinului pe unitate de suprafață de sol orizontală
5	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	Indicator al proporției culorii verzi al biomasei vegetației

Procesarea parametrilor biofizici și a imaginilor satelitare obținute prin intermediul platformei *Copernicus*

Setul de date referitor la parametrii biofizici colectați pe perioada sezonului de vegetație a anului 2021 a constat în 95 rastere (5 suprafețe de studiu x 19 capturi), din care au fost extrase valori medii

ale pixelilor pentru fiecare suprafață de studiu, prin intermediul pachetului *rgdal* (Bivand et al. 2023) în software-ul *R* (R Project v4.1.4. 2022).

3.5. Evaluarea caracteristicilor arhitecturale ale arborilor

3.5.1. Evaluarea caracteristicilor arhitecturale ale arborilor prin intermediul teledetecției (TLS)

Pentru evaluarea caracteristicilor arhitecturale a 55 de exemplare de fag, din primele patru suprafețe de studiu (Fig. 3.1), a fost adoptată o metodă nedistructivă de scanare cu laser terestru (TLS). Pentru capturarea în detaliu a modelelor 3D a structurii fiecărui arbore de interes, a fost utilizat dispozitivul *GeoSlam Horizon Mobile Scanner*. Pentru fiecare arbore țintă, au fost extrase coordonatele GPS, în vederea georeferențierii modelului 3D al întregii suprafețe scanate.

Procedura de scanare a constat în efectuarea unui tur de 360° în jurul arborelui de interes, obținând astfel un nor de puncte consistent, minimalizând interferențele și ocluziunile cauzate de arborii vecini și unghiul la care au fost realizate scanările de către operatorul din teren. Astfel, a fost asigurată o acoperire completă a structurii unui arbore țintă.

După finalizarea scanărilor din teren, datele brute care conțin norii de puncte, au fost descărcate și, ulterior, procesate în software-ul *CloudCompare*. Pentru pregătirea analizei datelor, au fost parcurse următoarele etape: separarea punctelor de vegetație și de sol, segmentarea manuală a arborilor țintă și filtrarea zgomotului (Fig. 3.4).

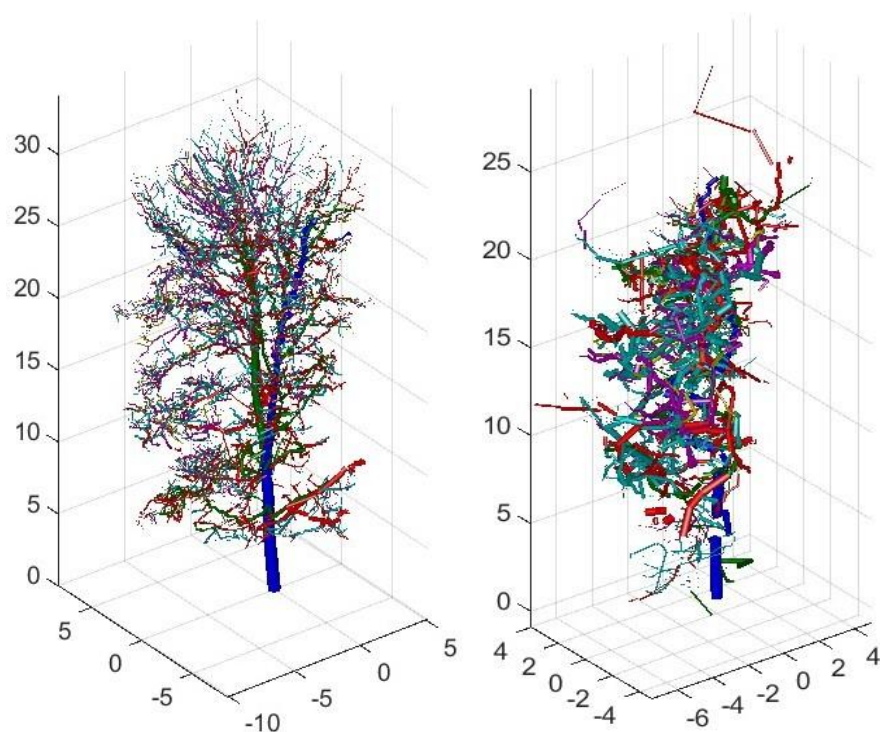


Fig. 3.4 - Segmentarea și filtrarea zgomotului, pentru obținerea caracteristicilor arhitecturale ale arborilor țintă, cât mai detaliate (exemple de caz validat și unul nevalidat) (Ciocîrlan 2024)

Norii de puncte procesați au fost ulterior importați în software-ul *TreeQSM* (Tree Quantitative Structure Models), implementat în *MATLAB* (Toh et al. 1999). Astfel, a fost permisă extragerea cantitativă a caracteristicilor arhitecturale ale arborilor. Caracteristicile arhitecturale extrase ale arborilor sunt volumul total, volumul trunchiului, volumul ramurilor, înălțimea arborilor, înălțimea trunchiului, lungimea ramurilor, ordinul maxim de ramificație, DBH și diametrul coroanei (valoarea medie și maximă) (Tabelul 3.4).

Tabelul 3.4 - Caracteristicile arhitecturale analizate ale arborilor

Caracteristicile arhitecturale analizate	Formulă/ metodă de calcul	Referință
Volumul total	Volumul tuturor cilindrelor (m^3)	TreeQSM
Volumul trunchiului	Volumul trunchiului (m^3)	TreeQSM
Volumul ramurilor	Volumul ramurilor (m^3)	TreeQSM
Înălțimea arborelui (H)	Distanța măsurată de la baza arborelui până la vârful celei mai înalte ramuri din coroană (m)	TreeQSM
Înălțimea trunchiului	Distanța măsurată de la baza arborelui până la vârful celei mai înalte ramuri de ordinul I din coroană (m)	TreeQSM

Lungimea ramurilor	Lungimea totală a tuturor ramurilor (m)	TreeQSM
Numărul ramurilor	Numărul tuturor ramurilor (buc.)	TreeQSM
Ordinul maxim de ramificație	Ordinul maxim de ramificație din coroană	TreeQSM
DBHqsm (DBH)	Diametrul cilindrului trunchiului la înălțimea de 1,30 m	TreeQSM
Diametrul coroanei (valoare medie)	Proiecția redusă la orizont a coroanei, media lungimilor a două direcții perpendiculare, în m	TreeQSM
Diametrul coroanei (valoare maximă)	Proiecția redusă la orizont a coroanei, valoarea maximă a lungimilor a două direcții perpendiculare, în m	TreeQSM

3.5.2. Înfurcirea arborilor

Înfurcirea arborilor a fost evaluată conform protocolului *TreeBreeDex* (Ducci et al. 2012) Fiecărui individ i-a fost atribuită o clasă, în funcție de prezența sau absența înfurcirii și de numărul și poziția acestora de pe trunchi.

3.5.3. Zveltețea arborilor

Coeficientul de zveltețe (SLC) a fost calculat ca raport între înălțimea totală a unui arbore și diametrul acestuia măsurat la 1,30 m (Wang et al. 1998). Cei doi indicatori ai biomasei au fost cuantificați în aceeași unitate de măsură (m) (Formula 3.2).

$$SLC = \frac{H}{DBH}, \quad \text{Formula 3.2}$$

unde: *SLC* - coeficientul de zveltețe; *H* – înălțimea totală a arborelui (m); *DBH* – diametrul măsurat la 1,30 m (m).

3.5.4. Evaluarea competiției

Intensitatea competiției exercitată asupra arborilor țintă a fost cuantificată prin intermediul indicelui *Hegyi* (Hegyi 1974). Variabilele utilizate în calculul acestui indicator al competiției au fost diametrele arborilor vecini ai exemplarelor de interes, cu un diametru mai mare de 7 cm (DBH), și distanța dintre arborii de interes și competitorii acestora, pe o rază de 15 m (Formula 3.3).

$$(z) = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{D_j} \times \frac{1}{Dis_{ij}}, \quad \text{Formula 3.3}$$

unde: *j* – arborele țintă; *i* – competitor al *j*, pe o rază de 15 m ; *D* – DBH (cm); *Dis* – distanța dintre *j* și *i* (m).

3.6. Indicele de heterozigoție

ADN-ul a fost izolat din mugurii a 55 de exemplare fag, colectați în anul 2020, prin intermediul kit-ului de extracție DNeasy Plant Mini Kit (Qiagen, Hilden, Germania). Compoziția genetică a probelor a fost exprimată prin utilizarea a șase microsateliți nucleari (secvențe simple repetitive, SSRs) (Asuka et al. 2004; Pastorelli et al. 2003; Vornam et al. 2004) și a șase secvențe replicate pe baza genelor (EST)-SSRs (Kubisiak et al. 2009; Burger et al. 2018). Compoziția genetică și analiza markerilor unui număr mai mare de indivizi, inclusiv cele 55 de exemplare pentru care au fost colectate și caracteristicile arhitecturale (descrise în subcapitolul 3.5.1), sunt descrise mai detaliat de către Grigoriadou Zormpa et al. (2024). Heterozigoția a fost calculată la nivel de individ, ca numărul markerilor heterozigoți, raportat la numărul total de markeri analizați (în cazul curent, 12).

3.7. Analize statistice

3.7.1. Date fenologice

Pentru studiul varianței, schimbările de-a lungul gradientului altitudinal au fost analizate la nivelul fiecărui stadiu fenologic (muguri umflați, muguri plesniți, cel puțin o frunză complet dezvoltată, începutul îngălbenirii frunzelor, sfârșitul îngălbenirii frunzelor, începutul căderii frunzelor, sfârșitul căderii frunzelor) cât și pentru lungimea sezonului de vegetație, pentru toți cei 3 ani monitorizați. Ele au fost ilustrate grafic utilizând software-ul *R* (v. 4.3.1; R Core Team 2021) și pachetele *dplyr* (Wickham et al. 2023) și *ggplot2* (Wickham 2016). A fost efectuat testul de normalitate *Shapiro Wilk* (Shapiro & Wilk 1965) și cel neparametric de comparație al mediei între grupuri, *Kruskal-Wallis* (Kruskal & Wallis 1952) pentru a identifica diferențele dintre populații pe parcursul fenologiei de primăvară și cea de toamnă, fiind ilustrate prin intermediul pachetelor *ggsignif* (Kassambara 2023), *ggsignif* (Constantin & Patil 2021) și *tidyr* (Wickham & Girlich 2022). Ulterior, a fost aplicat testul *Dunn* (Dunn 1964) pentru evidențierea diferențelor semnificative dintre grupuri/ populații. Testarea corelației dintre dinamica fenologiei și datele meteorologice menționate anterior a fost efectuată prin intermediul unei corelograme, utilizând software-ul *R* cu pachetele *ggplot2* (Wickham 2016), *dplyr* (Wickham et al. 2023), *factoextra* (Kassambara & Mundt 2020), *ggcorrplot* (Wei & Simko 2021), *Hmisc* (Harrell 2023), *PerformanceAnalytics* (Peterson et al. 2018) și *RColorBrewer* (Neuwirth 2014).

3.7.2. Analizele statistice ale datelor fenologice obținute prin intermediul dispozitivelor de teledetecție

Predicția fenologiei prin intermediul analizei regresiei liniare

Au fost folosite două metode pentru construirea unui model reproductibil care să prezică fenologia. Primul model prezice fenologia ca pondere a acoperirii arborilor cu frunze, la nivel de individ, prin intermediul indicilor de vegetație calculați pe baza imaginilor obținute cu drona și care utilizează locația (suprafața de studiu) și data (momentul efectuării observațiilor fenologice din teren și a survolărilor cu drona) drept predictor. Cel de-al doilea model a presupus predicția unei valori medii pentru fiecare suprafață de studiu, raportată la parametrii biofizici colectați de pe platforma *Copernicus*. Ulterior, au fost testate modele de regresie multiple pentru a identifica cei mai potriviți predictor, precum și interacțiunea dintre ei (Duncan et al. 1986).

Predicția fenologiei prin intermediul analizei regresiei neliniare

Pentru predicția stadiilor fenologice la nivel de individ prin intermediul imaginilor aeriene, a fost implementat un algoritm *machine learning* de tipul *random forest*. Acest algoritm utilizează mostre aleatorii din setul inițial de date și construiește un model care identifică cea mai adecvată funcție, repetând această operație pentru a maximiza eficiența. În acest caz, algoritmul bazat pe regresia neliniară se raportează la setul de date inițial și furnizează rezultate bazate pe predicții medii.

Anterior procesării, seriile de date au fost convertite cu scopul de a obține valori cuprinse în intervalul (0 – 1), iar activitatea sezonieră, tranziția dintre anotimpuri, a fost aleasă drept predictor. Acest algoritm a fost implementat utilizând pachetul *caret* (Kuhn 2008) în software-ul *R*, construind modelul raportat la setul de date inițial de calibrare (în proporție de 80%, 48 de arbori) și testat asupra celor 12 indivizi rămași.

3.7.3. Analizele statistice ale asocierii datelor fenologice, genetice și a caracteristicilor arhitecturale obținute prin intermediul scanării cu laser terestru

Pragurile de semnificație ale coeficienților de corelație pentru cele 55 de exemplare analizate, calculate pe baza valorilor limită ale coeficientului de corelație semnificativ (Tabela 12) (Giurgiu 1972) din * ($p < 0.05$) - $r > 0.266$, ** ($p < 0.01$) $r > 0.3633$ și *** ($p < 0.001$) - $r > 0.432$.

Pentru extragerea valorilor R^2 și p ale caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor analizate, după procesarea datelor brute în software-lui *TreeQSM*, a fost utilizat software-ul *RStudio* (versiunea 4.2.2.).

De asemenea, interfața *RStudio* a fost utilizată pentru corelarea datelor fenologice, genetice și a caracteristicilor arhitecturale, prin intermediul funcției "rcorr" (pachetul *R* "corrplot"). Utilizarea acestei funcții a condus la conceperea unei corelograme de tip "matrice", care să permită atât vizualizarea valorilor coeficienților de corelație și a semnificației acestora (conform unui gradient de culori), cât și testarea ipotezei nule (valoarea coeficientului de corelație $r = 0$). Rezultatele obținute au fost ilustrate grafic prin utilizarea pachetului *R* "ggplot2", sub forma unei matrice de corelație.

CAPITOLUL 4: REZULTATE ȘI DISCUȚII

4.1. Observații fenologice

4.1.1. Fenologia de primăvară

Conform metodologiei adoptate, a fost monitorizată dinamica fenofazelor fenologiei de primăvară pe parcursul celor 3 ani (2021, 2022 și 2023), în cele 5 suprafețe de studiu. A fost înregistrată o diferență de 14 zile între primii doi ani, în cadrul populației Lempes, situată la extrema inferioară a profilului altitudinal, respectiv de 9 zile între 2022 și 2023 (Fig. 4.1), în ceea ce privește startul în sezonul de vegetație (moment asociat cu obținerea stadiului de muguri plesniți). În cadrul populației situate la extrema superioară a gradientului, Ruia, a fost înregistrată o diferență de 14 zile între primii doi ani, 2021 și 2022, respectiv de 5 zile între 2022 și 2023. Pe parcursul celor 3 ani, populațiile au obținut în mod diferit stadiul 2 (muguri plesniți). În primii doi ani, a fost înregistrată o diferență de 29 zile între populațiile localizate la extremele profilului altitudinal, respectiv de 25 de zile în cel de-al treilea. În primul an, durata tranziției dintre primele trei fenofaze, de la muguri umflați la muguri plesniți, respectiv de la muguri plesniți la cel puțin o frunză complet dezvoltată, a variat de la 6-7 zile (12 zile în cazul populației situate la extremitatea superioară a profilului, Ruia), 11-13 zile în 2022 (14 zile în Ruia) și 6-12 zile în 2023 (15 zile în Ruia), rezultând o dinamică a fenologiei de primăvară mai accelerată în anul 2021 comparativ cu ceilalți doi, deși pornirea în sezonul de vegetație a avut loc mai târziu (120 D.O.Y. în 2021, comparativ cu 106 D.O.Y. în 2022 și 115 D.O.Y. în 2023, valorii medii pentru populația localizată la extremitatea inferioară a profilului altitudinal, Lempes).

2021	Aprilie			Mai															Iunie	
Suprafață de studiu	117	119	120	121	122	123	124	125	126	130	131	132	134	135	140	141	147	148	151	152
Lempes																				
Tampa																				
Solomon																				
P. Lupului																				
Ruia																				

2022	Aprilie														Mai													
Suprafață de studiu	97	99	105	106	108	109	111	112	113	115	116	119	120	124	125	126	127	128	129	133	134	139	140	142				
Lempes																												
Tampa																												
Solomon																												
P. Lupului																												
Ruia																												

2023	Aprilie									Mai													
Suprafață de studiu	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	128	129	130	134	135	138	139	142	143		
Lempes																							
Tampa																							
Solomon																							
P. Lupului																							
Ruia																							

Muguri dorminzi (0)	Muguri umflați (1)	Muguri plesniți (2)	Cel puțin o frunză complet dezvoltată (3)
---------------------	--------------------	---------------------	---

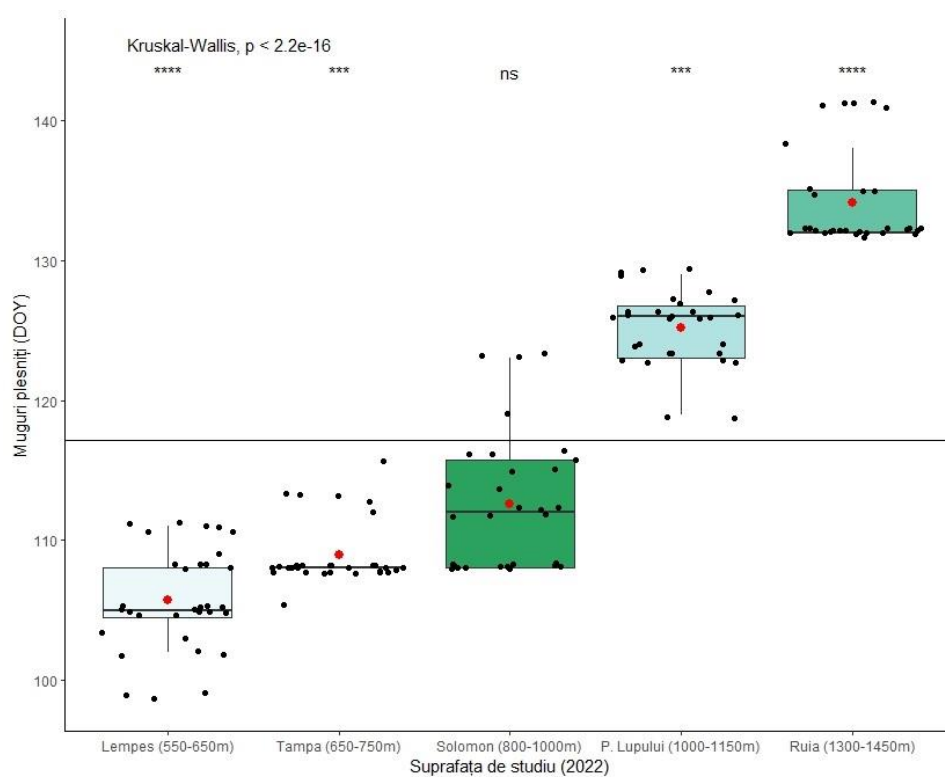
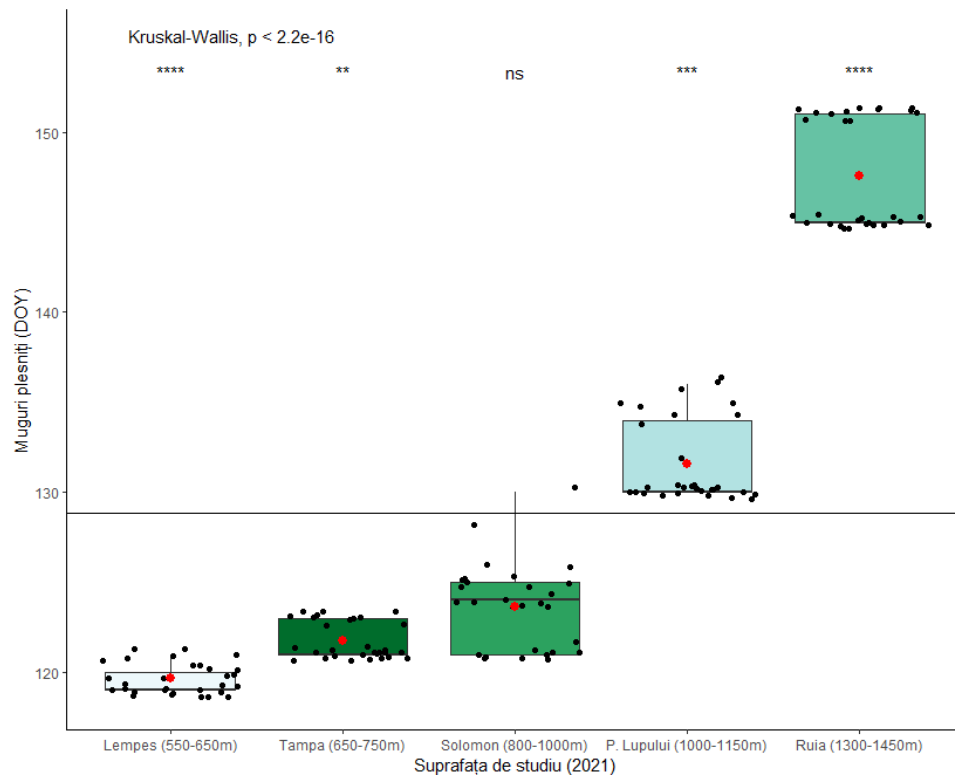
Fig. 4.1 - Dinamica fenofazelor din fenologia de primăvară din cei 3 ani monitorizați, în fiecare suprafață de studiu, bazată pe valori medii, pe parcursul D.O.Y. (engl. *Day of the year*).

Fenofaza mugurilor plesniți

În urma testării normalității asupra setului de date referitoare la stadiul fenologic de muguri plesniți, prin intermediul testului *Shapiro-Wilk*, au fost obținute diferențe semnificative pe parcursul celor 3 ani monitorizați, în toate cele cinci suprafețe de studiu (Tabelul 4.1). Ca urmare, a fost aplicat testul neparametric *Kruskal-Wallis*, variația intra- și interpopulațională (Fig. 4.2) în obținerea stadiului 2 fiind una semnificativă în toate cazurile. Startul acestei fenofaze a variat conform gradientului altitudinal, debutul acesteia fiind direct proporțional cu creșterea în altitudine. În anii 2021 și 2022, a fost înregistrată o diferență de 28 de zile între indivizii localizați în suprafețele extreme din cadrul acestui profil altitudinal și de 24 zile în anul 2023, în ceea ce privește startul fenofazei de muguri plesniți.

Tabelul 4.1 - Testarea normalității asupra setului de date referitoare la stadiul fenologic de muguri plesniți pe parcursul celor 3 ani monitorizați în cele 5 suprafețe de studiu (Testul *Shapiro Wilk*).

Muguri plesniți			
Suprafața de studiu	2021	2022	2023
Lempes	$0,06359 \times 10^{-4}$	0,01304	$0,05659 \times 10^{-3}$
Tâmpa	$0,01023 \times 10^{-5}$	$0,07699 \times 10^{-6}$	$0,0442 \times 10^{-8}$
Solomon	0,001183	$0,03572 \times 10^{-2}$	$0,03816 \times 10^{-2}$
P. Lupului	$0,04093 \times 10^{-5}$	0,01375	$0,0451 \times 10^{-3}$
Ruia	$0,01823 \times 10^{-5}$	$0,01628 \times 10^{-5}$	$0,01951 \times 10^{-5}$



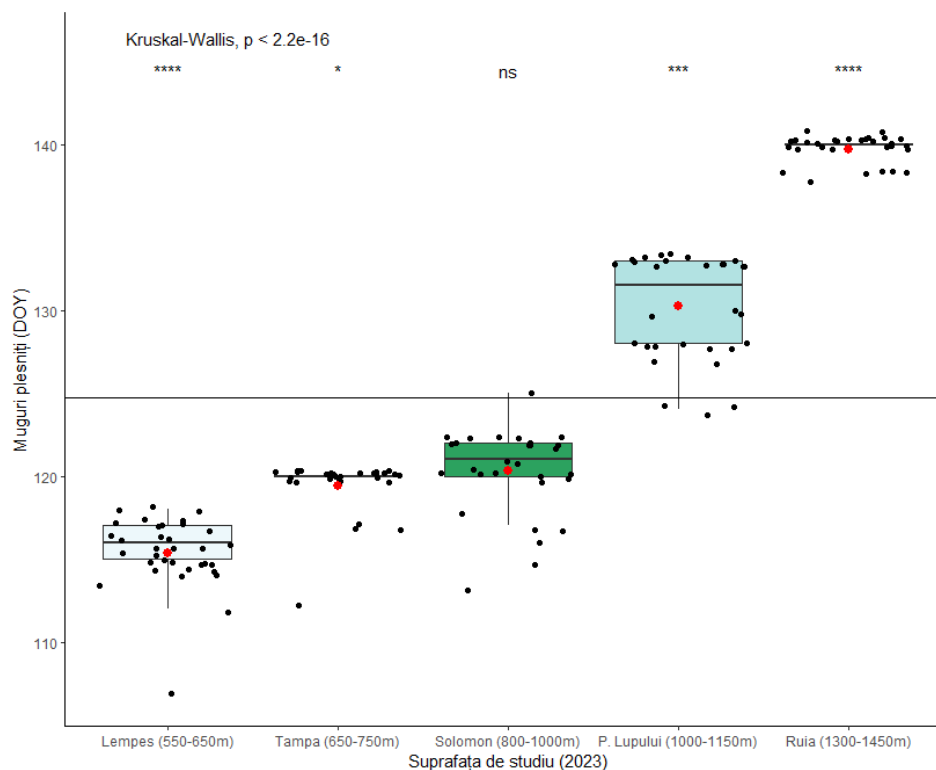


Fig. 4.2 - Variația intra- și interpopulațională a fagului în obținerea stadiului 2 (muguri plesniți), asociat cu momentul începerii sezonului de vegetație, în cele 5 suprafețe de studiu, pe parcursul celor 3 ani monitorizați (Testul *Kruskal-Wallis*; **** - $p \leq 0.0001$, *** - $p \leq 0.001$, ** - $p \leq 0.01$, * - $p \leq 0.05$ și *ns* – $p > 0.05$).

Monitorizarea fenologică a celor trei ani relevă diferențe semnificative în ceea ce privește începutul fenofazei de muguri plesniți la nivel interpopulațional, existând diferențe semnificative între indivizii localizați în cele cinci suprafețe de studiu, cu excepția celor localizați în suprafețele Tampa și Solomon în anii 2021 și 2023 (Tabelul 4.2).

Tabelul 4.2 - Variația interpopulațională bazată pe calculul diferențelor dintre mediile celor cinci suprafețe de studiu, pe parcursul celor 3 ani monitorizați, asupra setului de date referitoare la stadiul fenologic de muguri plesniți (Testul *Dunn*).

2021	Lempes	Tâmpa	Solomon	P. Lupului
Tâmpa	0,0018	X	X	X
Solomon	0	0,0648	X	X
P. Lupului	0	0	0,0004	X
Ruia	0	0	0	0,0032
2022	Lempes	Tâmpa	Solomon	P. Lupului

Tâmpa	0,0314	X	X	X
Solomon	0,0002	0,0496	X	X
P. Lupului	0	0	0,0001	X
Ruia	0	0	0	0,0034
2023	Lempeș	Tâmpa	Solomon	P. Lupului
Tâmpa	0,0007	X	X	X
Solomon	0	0,1685	X	X
P. Lupului	0	0	0,0001	X
Ruia	0	0	0	0,0042

În raport cu creșterea în altitudine, dinamica fenofazei de muguri plesniți a variat pe parcursul celor 3 ani monitorizați fenologic. La fiecare 100 m în altitudine, indivizii localizați de-a lungul profilului altitudinal au necesitat, în medie, în anul 2021, cca. 3,5 zile în plus ca să obțină stadiul fenologic 2, cca. 3,5 zile în 2022 și cca. 3 zile în 2023. Valorile coeficienților de determinare R^2 au fost foarte mari în cazul celor 3 ani, 0,92 (2021), 0,9182 (2022) și 0,886 (2023), reflectând o potrivire foarte bună cu modelele unor regresii liniare (Fig. 4.3).

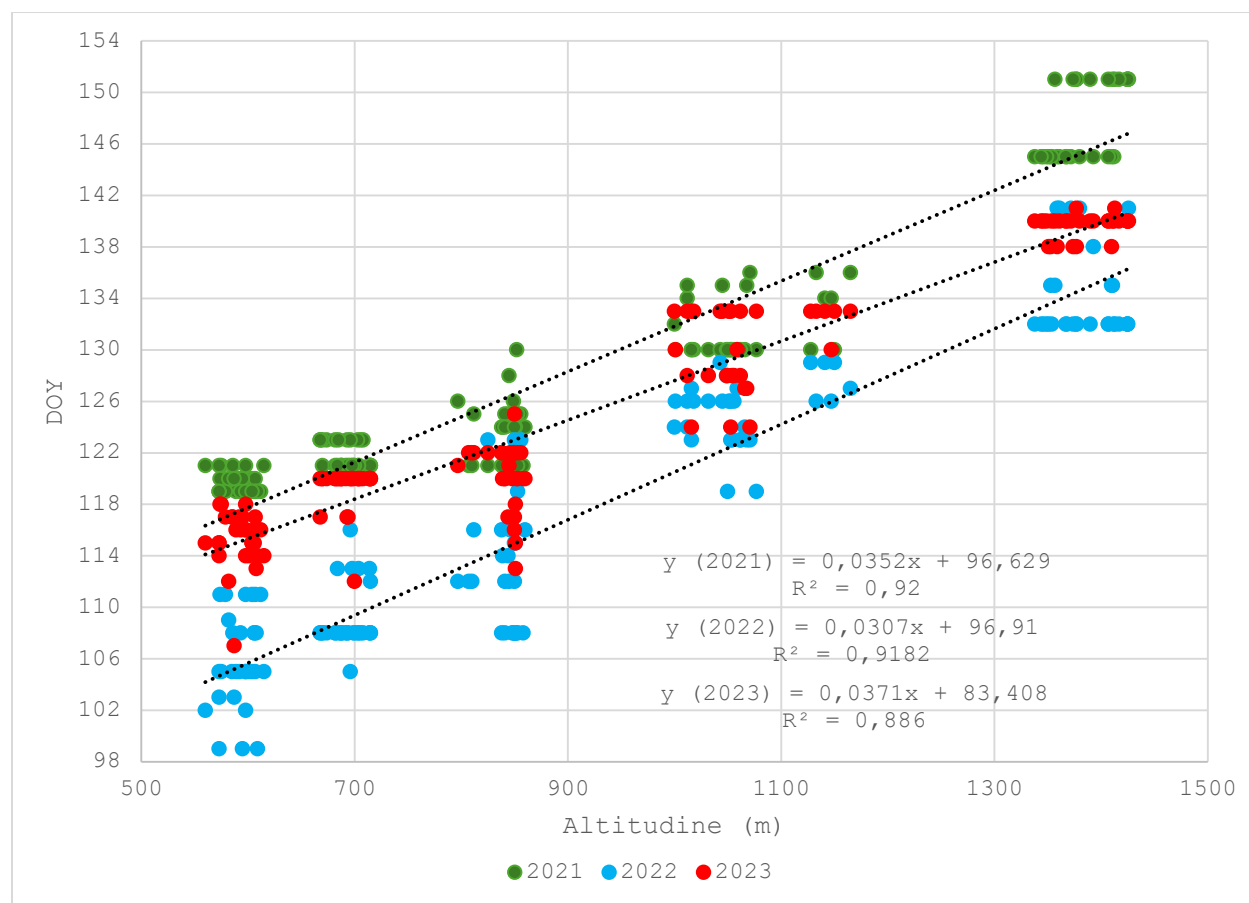


Fig. 4.3 - Dinamica fenofazei de muguri plesniți în raport cu gradientul altitudinal, la nivel de individ, pentru cei 3 ani monitorizați fenologic.

4.1.2. Fenologia de toamnă (senescenta)

Dinamica fenologiei de toamnă la fag a variat pe parcursul celor trei ani monitorizați (Fig. 4.4). Senescenta a fost estimată prin cuantificarea a doi indicatori, care reprezintă în același timp și cele două fenofaze ale fenologiei de toamnă, mai exact, a îngălbenirii și a căderii frunzelor. Fenofaza de îngălbenire a frunzelor la fag s-a întins pe o perioadă mai mare de timp în anul 2021 (21-32 de zile), comparativ cu anul 2022 (18-25 de zile), respectiv anul 2023 (5-9 zile). Cea de a doua fenofază a durat mai mult în anul 2021 (17-27) comparativ cu anul 2022 (12-18), dar mai puțin decât în 2023 (19-28). Debutul acestor două fenofaze a fost invers proporțional creșterii în altitudine, excepție făcând anul 2021, acolo unde influența celorlalte condiții staționale (expoziție, curenți de aer, vânt și densitatea arboretului) a fost mai mare.

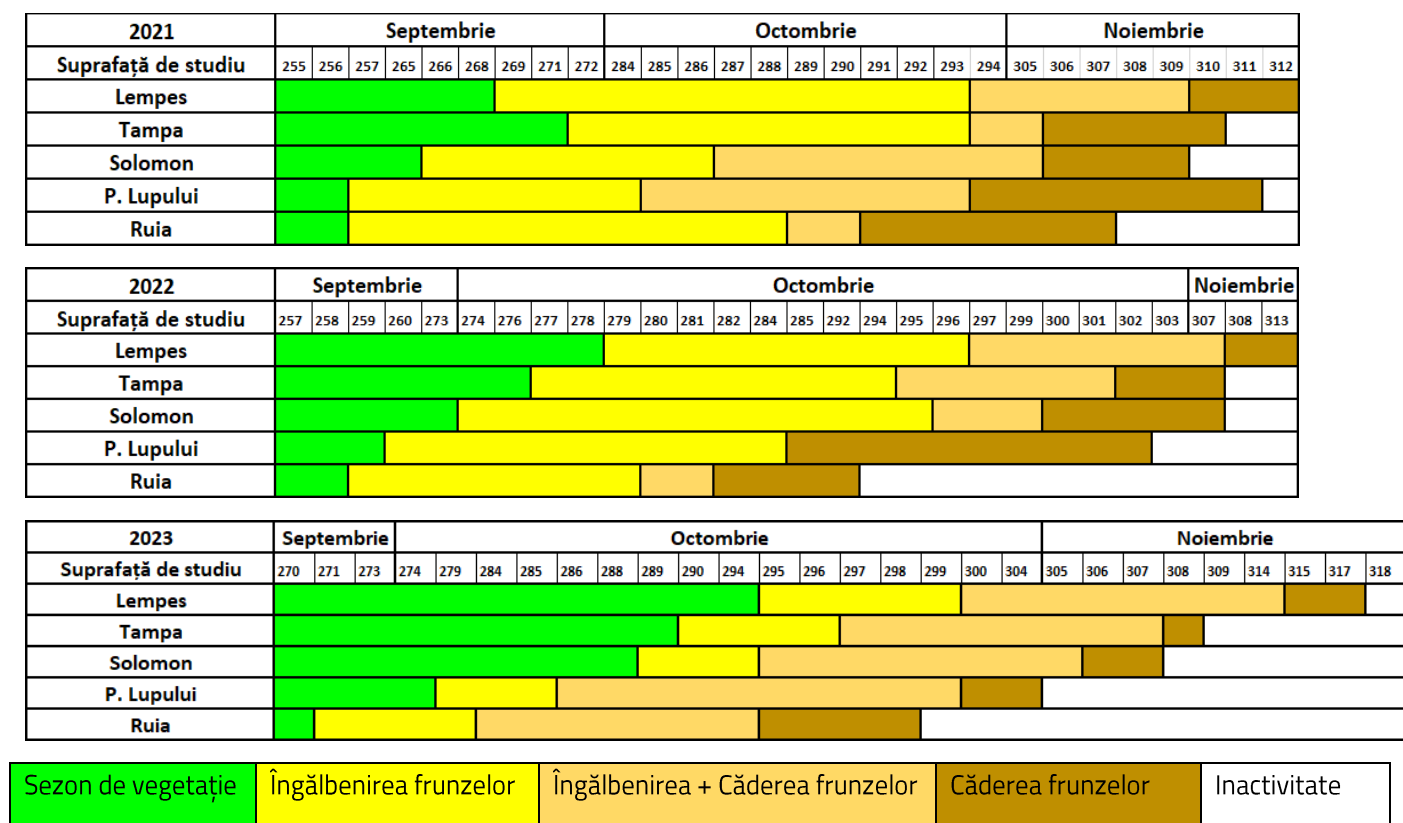


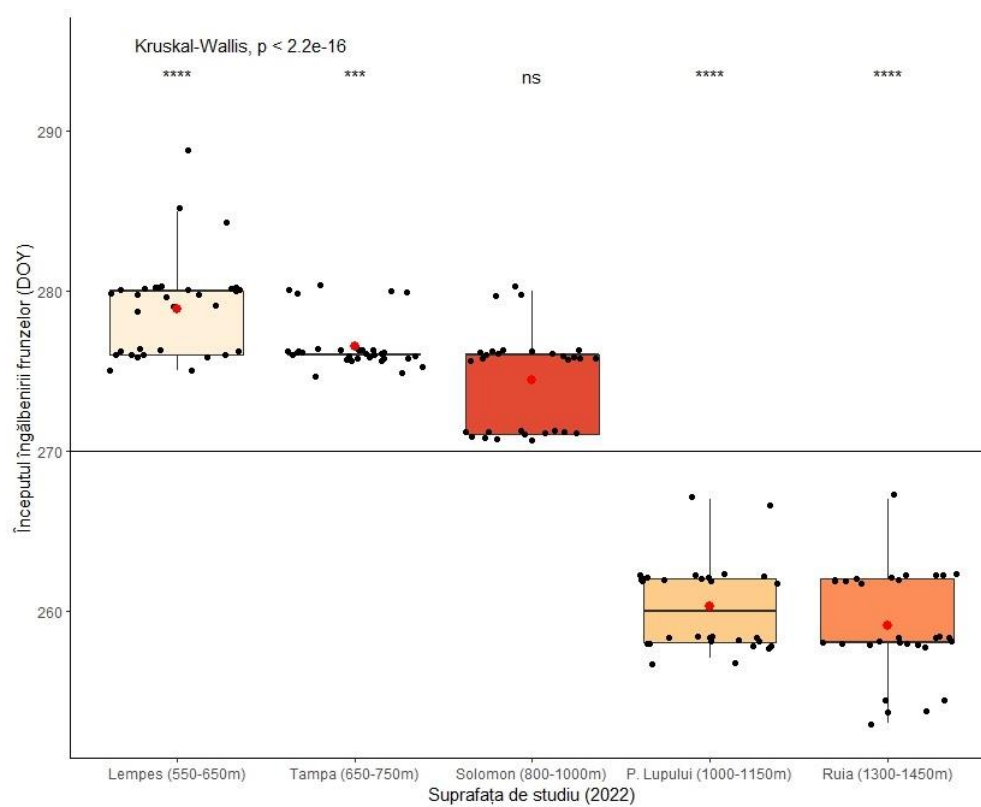
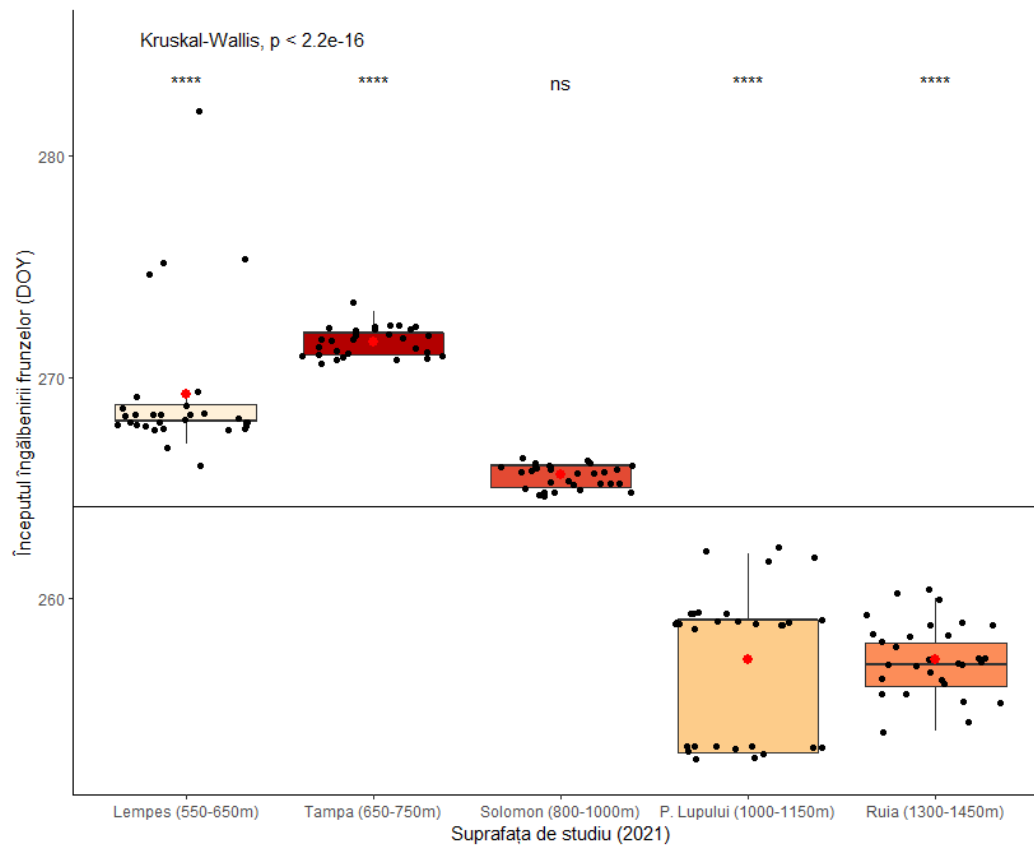
Fig. 4.4 - Dinamica fenofazelor din fenologia de toamnă din cei 3 ani monitorizați, în fiecare suprafață de studiu, bazată pe valori medii, pe parcursul D.O.Y. (engl. „Day of the year”).

Fenofaza îngălbenirii frunzelor

În urma testării normalității asupra setului de date referitoare la debutul stadiului fenologic de îngălbenire a frunzelor, prin intermediul testului *Shapiro-Wilk*, au fost obținute diferențe semnificative pe parcursul celor 3 ani monitorizați, în toate cele cinci suprafețe de studiu (Tabelul 4.3). Ca urmare, a fost aplicat testul neparametric *Kruskal-Wallis*, variația intra- și interpopulațională (Fig. 4.5.) în startul acestei fenofaze fiind una semnificativă în toate cazurile. Debutul acestei fenofaze a variat conform gradientului altitudinal, fiind direct proporțional cu creșterea în altitudine, excepție făcând anul 2021, indivizii localizați în cea de a doua suprafață de probă din cadrul acestui profil, Tâmpa, fiind cei care au avut cel mai tardiv început al îngălbenirii frunzelor. Tot în același an, indivizii localizați în suprafețele P. Lupului și Ruia, aflate la extrema superioară altitudinală, au debutat simultan în această fenofază. În anul 2021, a fost înregistrată o diferență de 12 de zile între indivizii localizați în suprafețele extreme din cadrul acestui profil altitudinal, de 20 de zile în anul 2022 și de 24 de zile în anul 2023, în ceea ce privește startul fenofazei de îngălbenire a frunzelor.

Tabelul 4.3 - Testarea normalității asupra setului de date referitoare la începutul stadiului fenologic de îngălbenire a frunzelor pe parcursul celor 3 ani monitorizați în cele 5 suprafețe de studiu (Testul *Shapiro Wilk*).

Începutul îngălbenirii frunzelor			
Suprafața de studiu	2021	2022	2023
Lempeș	$0,01602 \times 10^{-6}$	$0,07752 \times 10^{-3}$	$0,06083 \times 10^{-2}$
Tâmpa	$0,03107 \times 10^{-4}$	$0,0173 \times 10^{-6}$	$0,02152 \times 10^{-3}$
Solomon	$0,01823 \times 10^{-5}$	$0,02065 \times 10^{-3}$	$0,02331 \times 10^{-2}$
P. Lupului	$0,01274 \times 10^{-3}$	$0,03142 \times 10^{-3}$	$0,08511 \times 10^{-3}$
Ruia	0,1723	0,001622	0,001461



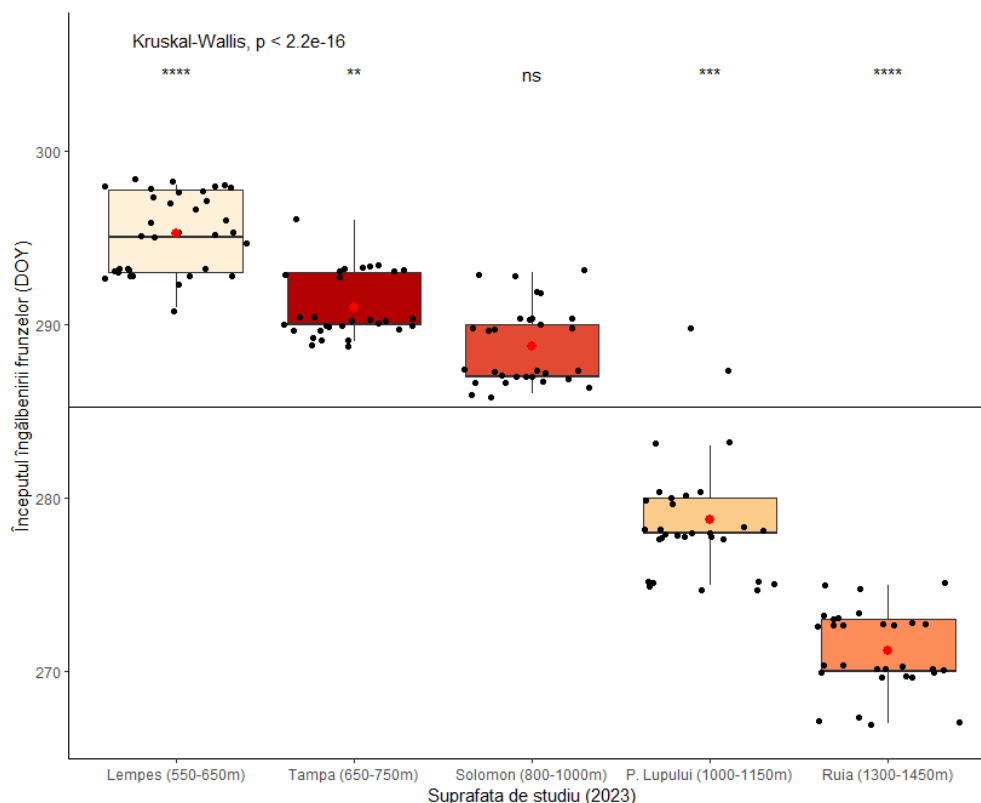


Fig. 4.5 - Variația intra- și interpopulațională a fagului în începerea fenofazei de îngălbenire a frunzelor, în cele 5 suprafețe de studiu, pe parcursul celor 3 ani monitorizați (Testul *Kruskal-Wallis*; **** - $p \leq 0.0001$, *** - $p \leq 0.001$, ** - $p \leq 0.01$, * - $p \leq 0.05$ și *ns* – $p > 0.05$).

Monitorizarea fenologică a celor trei ani relevă diferențe semnificative în ceea ce privește începutul îngălbenirii frunzelor la nivel interpopulațional, existând diferențe semnificative între indivizii localizați în cele cinci suprafețe de studiu, cu excepția celor localizați în suprafețele Tâmpa și Solomon, în anii 2022 și 2023, și a celor localizați în P. Lupului și Ruia, în anii 2021 și 2022 (Tabelul 4.4).

Tabelul 4.4 - Calculul diferențelor dintre mediile celor cinci suprafețe de studiu, pe parcursul celor 3 ani monitorizați, asupra setului de date referitoare la stadiul fenologic de început al îngălbenirii frunzelor (Testul *Dunn*)

2021	Lempes	Tâmpa	Solomon	P. Lupului
Tâmpa	0,023	X	X	X
Solomon	0,0014	0	X	X
P. Lupului	0	0	0	X
Ruia	0	0	0	0,3941
2022	Lempes	Tâmpa	Solomon	P. Lupului
Tâmpa	0,0449	X	X	X
Solomon	0,0017	0,1075	X	X

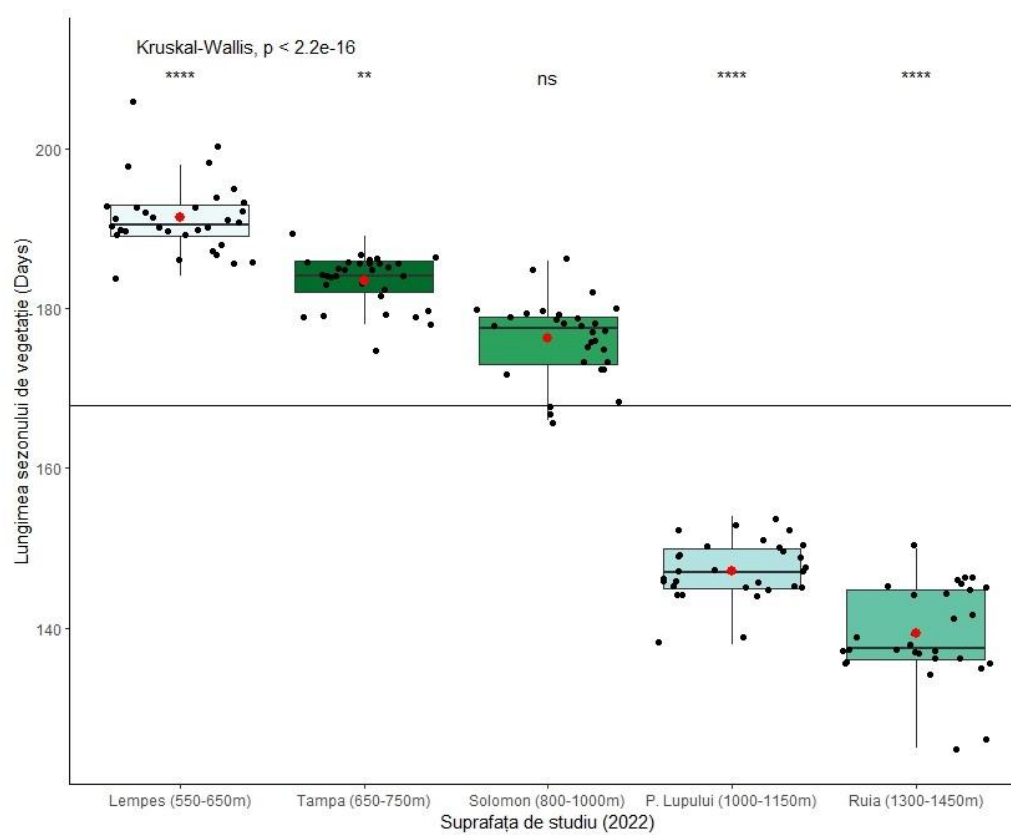
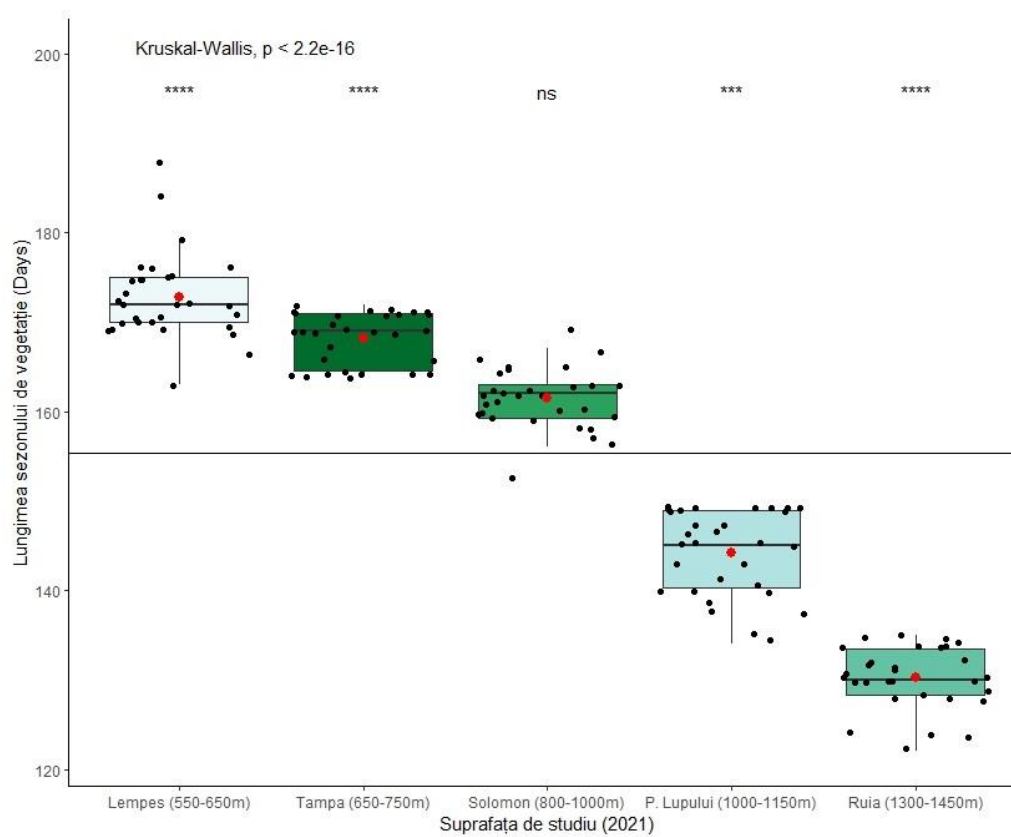
P. Lupului	0	0	0	X
Ruia	0	0	0	0,3297
2023	Lempeș	Tâmpa	Solomon	P. Lupului
Tâmpa	0,0012	X	X	X
Solomon	0	0,0624	X	X
P. Lupului	0	0	0,0008	X
Ruia	0	0	0	0,0037

4.1.3. Lungimea sezonului de vegetație

Lungimea sezonului de vegetație (raportată în această lucrare ca perioada cuprinsă între obținerea stadiului de muguri umflați și îngălbenirea frunzelor din treimea superioară a coroanei în proporție de 50 %), a variat pe parcursul celor 3 ani monitorizați (Fig. 4.6). În urma testării normalității (testul *Shapiro-Wilk*) asupra setului de date referitoare la lungimea sezonului de vegetație (Tabelul 4.5) și a aplicării testului *Kruskal-Wallis*, pe parcursul celor 3 ani monitorizați în cele 5 suprafețe de studiu, variația intra- și interpopulațională (Fig. 4.6) a fost semnificativă în toate cazurile, cu excepția suprafețelor Solomon în primii doi ani monitorizați și P. Lupului în ultimii doi ani evaluați fenologic. Lungimea sezonului de vegetație a variat conform gradientului altitudinal, fiind invers proporțională cu creșterea în altitudine. În anul 2021, a fost înregistrată o diferență de 43 de zile între indivizii localizați în suprafețele extreme din cadrul acestui profil altitudinal, de 52 de zile în anul 2022 și de 43 de zile în anul 2023, în ceea ce privește lungimea sezonului de vegetație.

Tabelul 4.5 - Testarea normalității asupra setului de date referitoare la lungimea sezonului de vegetație pe parcursul celor 3 ani monitorizați în cele 5 suprafețe de studiu (Testul *Shapiro Wilk*).

Începutul căderii frunzelor			
Suprafața de studiu	2021	2022	2023
Lempeș	0,01013	0,008557	0,02726
Tâmpa	0,01106 x 10 ⁻²	0,005367	0,04114
Solomon	0,9646	0,1927	0,0141
P. Lupului	0,002449	0,2367	0,3857
Ruia	0,02563	0,02359	0,03184



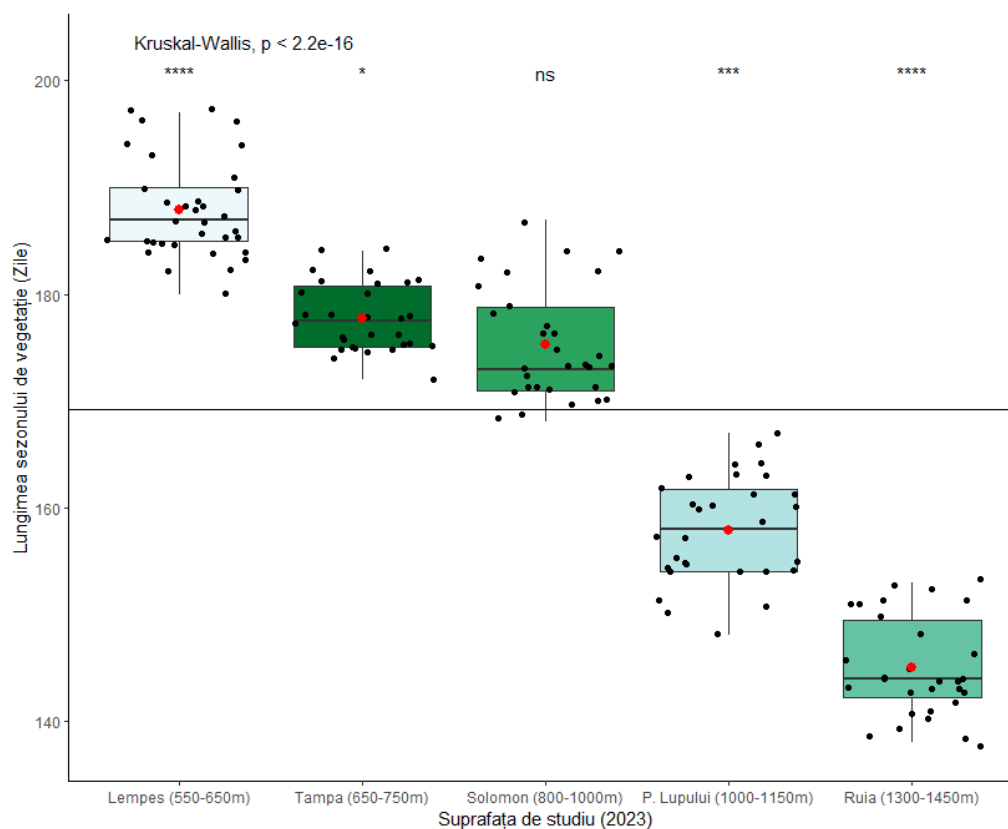


Fig. 4.6 - Variația intra- și interpopulațională a fagului cu privire la lungimea sezonului de vegetație, în cele 5 suprafețe de studiu, pe parcursul celor 3 ani monitorizați (Testul *Kruskal-Wallis*, **** - $p \leq 0.0001$, *** - $p \leq 0.001$, ** - $p \leq 0.01$, * - $p \leq 0.05$ și *ns* - $p > 0.05$).

Monitorizarea fenologică a celor trei ani relevă diferențe semnificative în ceea ce privește lungimea sezonului de vegetație la nivel interpopulațional, existând diferențe semnificative între indivizii localizați în cele cinci suprafețe de studiu, cu excepția celor localizați în Tâmpa și Solomon în anul 2023 (Tabelul 4.6).

Tabelul 4.6 - Diferențele dintre mediile celor cinci suprafețe de studiu, pe parcursul celor 3 ani monitorizați, asupra setului de date referitoare la lungimea sezonului de vegetație (Testul *Dunn*).

2021	Lempes	Tâmpa	Solomon	P. Lupului
Tâmpa	0,0448	X	X	X
Solomon	0	0,0023	X	X
P. Lupului	0	0	0,0017	X
Ruia	0	0	0	0,0042
2022	Lempes	Tâmpa	Solomon	P. Lupului

Tâmpa	0,0021	X	X	X
Solomon	0	0,0134	X	X
P. Lupului	0	0	0,0006	X
Ruia	0	0	0	0,0231
2023	Lempeș	Tâmpa	Solomon	P. Lupului
Tâmpa	0,0002	X	X	X
Solomon	0	0,1793	X	X
P. Lupului	0	0	0,0002	X
Ruia	0	0	0	0,007

4.1.4. Variația temperaturii medii anuale pe parcursul celor trei ani monitorizați

Temperatura este factorul meteorologic declanșator pentru apariția fenofazei de plesnire a mugurilor. Atunci când pragul termic de 10 °C este depășit, fagul pornește în vegetație, dar această condiție este complementară cu depășirea unui cumul specific de CDD. Pe parcursul celor trei ani de monitorizare, plesnirea mugurilor a apărut după acumularea a cel puțin 52 CDD în ultimele 7 zile (Fig. 4.7).

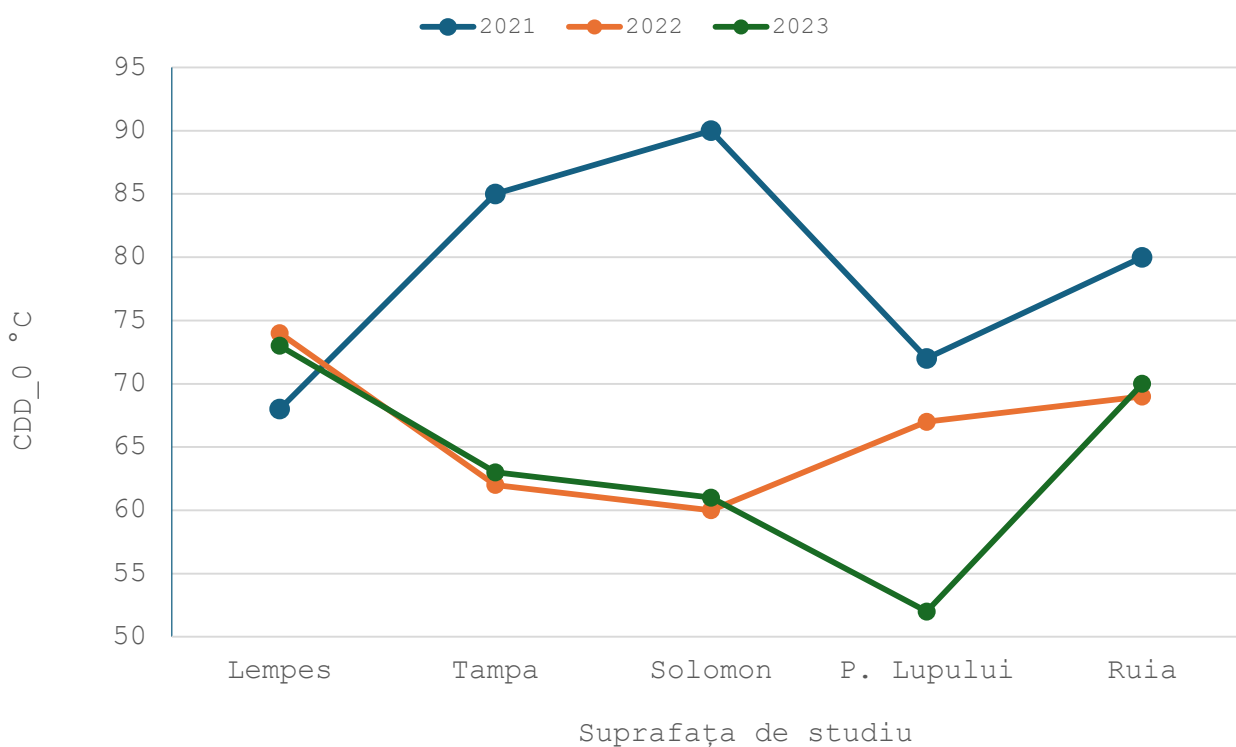


Fig. 4.7 - Cumulul CDD pe parcursul celor 3 ani de monitorizare a fenofazei de plesnire a mugurilor la fag, moment asociat cu pornirea în sezonul de vegetație a acestuia, în ultimele 7 zile pentru fiecare dintre cele 5 suprafețe de studiu (în ordinea gradientului altitudinal).

Senescenta este și ea influențată de temperatură. Prima fenofază a fenologiei de toamnă, îngălbenirea frunzelor, este declanșată de acumularea a cel puțin 65 ADD cu pragul termic de 0 °C din ultimele 7 zile (Tabelul 4.7).

Tabelul 4.7 - Cumulul ADD pe parcursul celor 3 ani de monitorizare a fenofazei de îngălbenire a frunzelor la fag în ultimele 7 zile pentru fiecare dintre cele 5 suprafețe de studiu (în ordinea gradientului altitudinal).

Suprafața de studiu	2021	2022	2023
Lempeș	72,14	81,49	76,8
Tâmpa	80,25	89,79	74,93
Solomon	72,87	85,47	65,83
P. Lupului	86,55	76,69	91,64
Ruia	78,97	78,35	99,96

Cea de a doua fenofază a senescentei fagului, căderea frunzelor, nu este influențată în aceeași măsură ca și prima de acumularea unor anumite temperaturi din ultimele 7 zile, cât nici de apariția înghețului. Totuși, ea se desfășoară invers proporțional gradientului altitudinal, excepție făcând anul 2022 (Fig. 4.8).

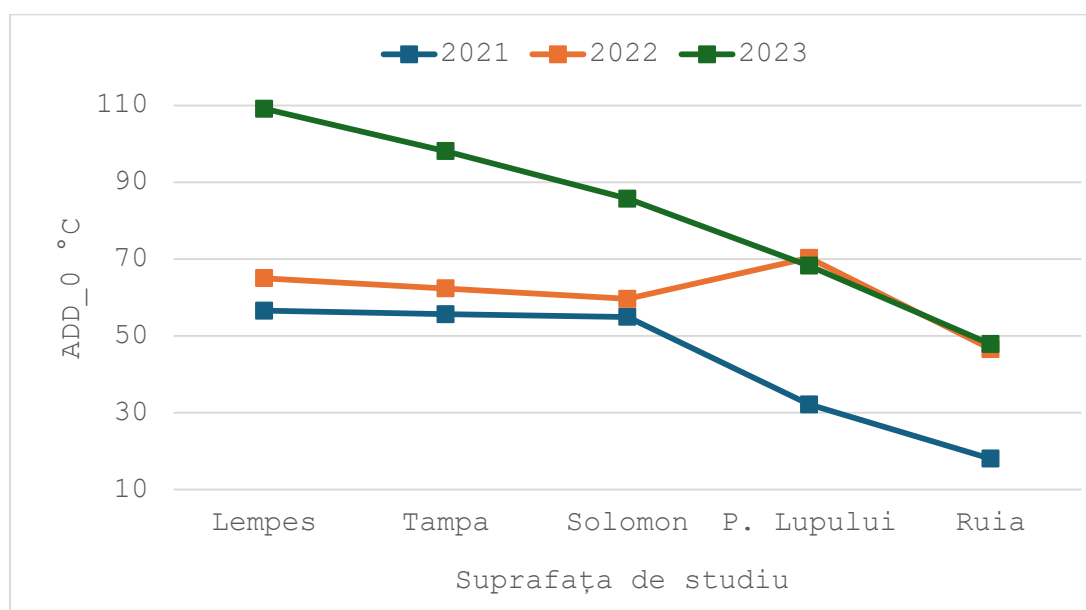


Fig. 4.8 - Cumulul ADD pe parcursul celor 3 ani de monitorizare a fenofazei de cădere a frunzelor la fag în ultimele 7 zile pentru fiecare dintre cele 5 suprafețe de studiu (în ordinea gradientului altitudinal).

4.2. Observațiile fenologice obținute prin intermediul teledetecției

4.2.1. Predicția fenologiei prin intermediul imaginilor aeriene colectate cu drona

Pe baza imaginilor aeriene rectificate obținute prin intermediul dronei, pentru toți cei 60 de indivizi din suprafețele de studiu Solomon și P. Lupului, au fost estimate stadiile fenologiei de primăvară și ale senescentei ca pondere de acoperire a arborilor cu frunze, de către operatori cu expertiză, care nu au fost implicați în efectuarea observațiilor fenologice din teren. Valoarea coeficientului de corelație *Pearson* dintre observațiile fenologice efectuate în teren și cele colectate pe baza imaginilor aeriene obținute cu drona a fost una foarte ridicată ($r = 0,98$).

Ulterior, pentru fiecare arbore, din coroanele lor delimitate (Fig. 3.3), au fost extrase valorile pixelilor benzilor de lumină vizibilă roșie, verde și albastră, au fost calculați indicii de vegetație și preluate valorile mediei, medianei și erorii standard, rezultând 864 de observații și 50 de predictorii.

Toate valorile coeficienților de corelație *Pearson* calculați pe baza observațiilor fenologice din teren și cei 19 indici de vegetație sunt ilustrate în Anexa 4, într-o corelogramă *Pearson* între observațiile fenologice din teren și indicii de vegetație, unde sunt ilustrate valorile coeficienților de corelație, tipul de corelație (pozitivă/ negativă) prin scara de culori (albastră/ roșie) și mărimea cercului în care sunt menționate aceste valori, semnificând probabilitatea ipotezei nule.

În urma aplicării acestor corelații, 4 indici de vegetație au înregistrat valori mai mari de 0,8: GLI (0,86), NGRGB (0,85), RGVBI (0,83) și ExG (0,81), iar 5 au obținut valori mai mari de 0,7: MGVRI (0,73), VARI (0,73), NGRDI (0,72), GRRRI (0,71) și GBDI (0,70), indicând o strânsă legătură.

Pe baza relației dintre indicii de vegetație și observațiile fenologice din teren, au fost construite mai multe modele care să prezică fenologia de primăvară și senescenta. Pentru a îl alege pe cel mai potrivit, a fost testată performanța acestora atât asupra setului de date de antrenare/ calibrare, cât și a celui de testare, raportat la complexitatea modelelor (Fig. 4.9).

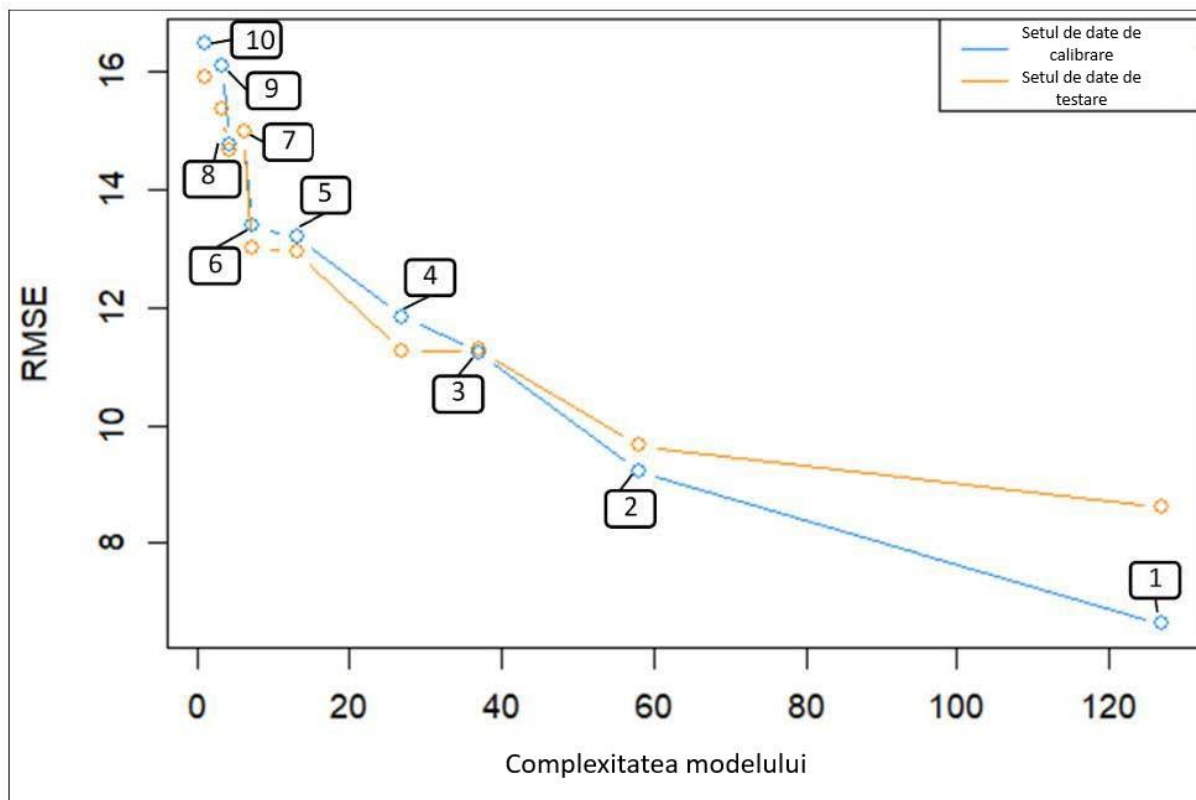


Fig. 4.9 - Complexitatea modelelor RMSE pe setul de date de calibrare și pe cel de testare. Fiecare număr corespunde unui model specific, detaliat în tabelul 4.8.

Modelele construite sunt detaliate în tabelul 4.8, fiind menționate valorile RMSE asupra celor două seturi de date, complexitatea și formulele de calcul. Complexitatea fiecărui model constă în numărul de parametri implicați. Deși primul model a înregistrat o eroare relativ mică (6,63 asupra setului de date de calibrare și 8,61 asupra celui de testare), el a avut cea mai mare complexitate (127), tendința de predicție a procentajului de acoperire cu frunze fiind cea mai ridicată. Modelul 10 s-a raportat doar la GLL, indicele de vegetație care s-a dovedit a fi cel mai puternic corelat cu observațiile fenologice din teren atunci când este selectat în mod individual, însă, integrat în model, a obținut o valoare mai semnificativă de 16,47 a RMSE asupra setului de date de calibrare, respectiv de 15,91 asupra celui de testare. Modelul 3 a înregistrat valori apropiate ale RMSE asupra celor două seturi de date (11,24 și 11,27), o complexitate relativ redusă comparativ cu primele două, de 37, prezentând potențial în predicția asupra unor noi seturi de date. Procentul prognozat de acoperire al arborilor cu frunze comparativ cu cel estimat în teren pe parcursul efectuării observațiilor fenologice este menționat în cele două coloane aferente RMSE – urilor setului de date de calibrare și cel de testare. Cu cât diferența dintre cele două este mai mică, cu atât capacitatea de predicție a datelor este mai ridicată.

Tabelul 4.8 - Descrierea modelor testate pe cele două seturi de date (calibrare & testare).

Nr.	Calibrare <i>RMSE</i>	Testare <i>RMSE</i>	Complexitatea modelului	Ecuția modelului liniar alcătuită din variabile independente
1	6,63	8,61	127	$^1F(x)=NGRGB*GLI*ExG*RGVBI*GBDI*NGBDI*anotimp$
2	9,21	9,65	58	$^1F(x)=R+G+B+GRRI+BGRI+GBDI+RBDI+ExG+GRAY+NRRGB+NGRGB+NBRGB++NGRDI+KAW+NGBDI+GLI+MGVRI+RGVBI+VARI$
3	11,24	11,27	37	$^2F(x)=NGRGB_m+NGRGB_me+NGRGB_sd+GLI_m+GLI_me+GLI_sd+ExG_m+ExG_me+ExG_sd+RGVBI_m+RGVBI_me+RGVBI_sd+GBDI_m+GBDI_me+GBDI_sd+NGBDI_m+NGBDI_me+NGBDI_sd)*anotimp$
4	11,84	11,27	27	$^1F(x)=(NGRGB+GLI+ExG+RGVBI+GBDI+NGBDI)*anotimp*I$ ocație
5	13,19	12,95	13	$^1F(x)=(NGRGB+GLI+ExG+RGVBI+GBDI+NGBDI)*anotimp$
6	13,38	13,02	7	$^1F(x)=(NGRGB+GLI+RGVBI)*anotimp$
7	14,99	15,00	6	$^1F(x)=NGRGB+GLI+ExG+RGVBI+GBDI+NGBDI$
8	14,76	14,67	4	$^1F(x)=NGRGB+GLI+RGVBI+anotimp$
9	16,11	15,35	3	$^1F(x)=GLI*anotimp$
10	16,47	15,91	1	$^1F(x)=NGRGB*GLI*ExG*RGVBI*GBDI*NGBDI*anotimp$

¹ variabilele independente au fost estimate pe baza valorilor medii ale pixelilor din coroanele segmentate ale arborilor; ² variabilele independente au fost calculate pe baza mediei (m), medianei (me) și al erorii standard (sd) pentru fiecare coroană segmentată a unui arbore.

Un algoritm de tipul *random forest* a fost calibrat pentru a realiza un model de regresie care să depășească limitele modelului liniar. Acesta a avut ca parametri toți indicatorii statistici (media, mediana și eroarea standard) ai indicilor de vegetație selectați și momentul/ perioada din sezonul de vegetație. Acest model a înregistrat rezultate foarte bune, explicând 91,1 % din varianță și dovedind o

tendință de suprapunere a datelor prezise cu cele din teren foarte ridicată, cu o valoare RMSE de doar 8,12 asupra setului de date de testare (Tabelul 4.9).

Tabelul 4.9. Performanța algoritmului *random forest* asupra celor două seturi de date (calibrare și testare)

Tipul de eroare	Setul de date de calibrare	Setul de date de testare
MSE	23,11	159,39
RMSE	3,28	8,12

În fig. 4.10 sunt ilustrate datele fenologice obținute prin intermediul observațiilor din teren și valorile prezise de către modelul *random forest*. Linia de tendință de culoare roșie semnifică setul de date fenologice obținut pe baza observațiilor din teren (60 de indivizi, din care 48 au servit drept set de date pentru calibrarea modelului, iar ceilalți 12, set de date pentru testarea acestuia), linia de culoare albastru închis semnifică valorile fenologice prezise prin intermediul modelului, bazat pe setul de date de calibrare, iar linia de culoare turcoaz semnifică valorile fenologice prezise prin intermediul modelului, bazat pe setul de date de testare.

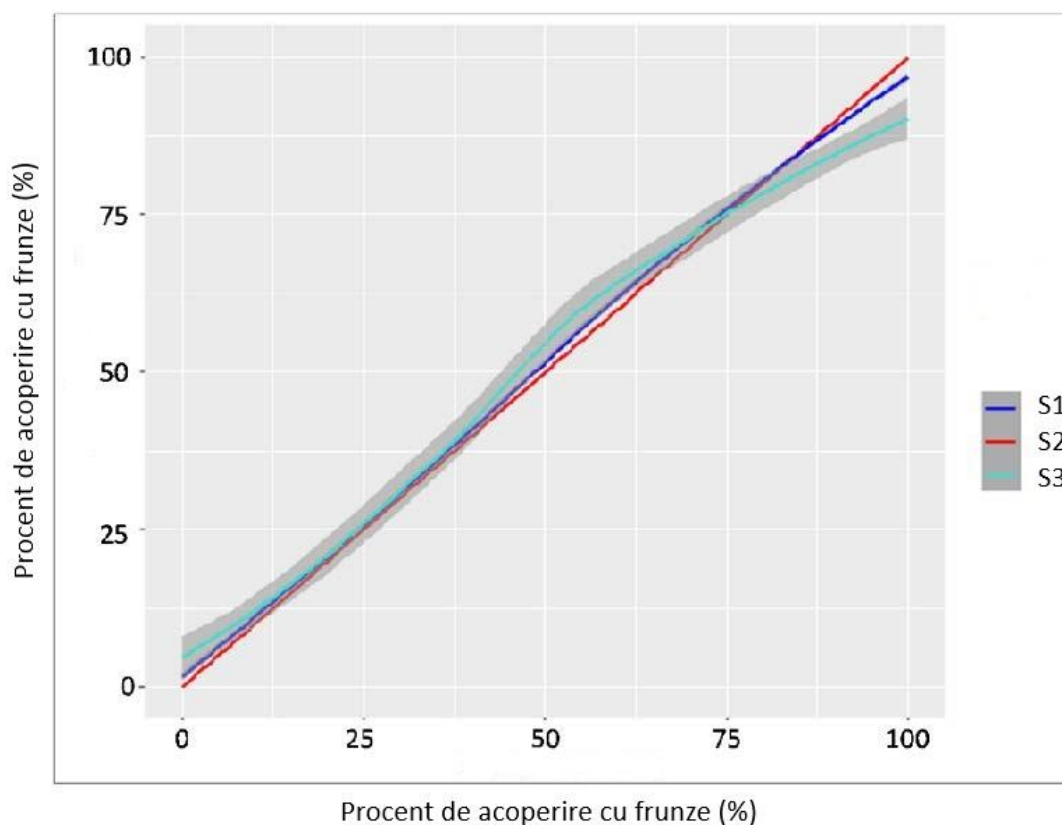


Fig. 4.10 - Comparație între setul de date obținut prin intermediul observațiilor fenologice din teren (S2) și cele două seturi de date prezise, de calibrare (S1) și de testare (S3).

4.2.2. Predicția fenologiei prin intermediul parametrilor biofizici *Copernicus*

Pentru fiecare dintre cele 5 suprafețe de studiu, pe baza observațiilor din teren, au fost calculate valori medii ale stadiilor fenologice, atât pentru fenologia de primăvară, cât și pentru senescentă. Seriile temporale de date extrase de pe platforma *Copernicus* pentru cei cinci parametri biofizici selectați (Tabelul 3.3), raportate la valori medii pentru fiecare suprafață de studiu, au obținut o corelație bună cu datele fenologice bazate pe observații în teren (Fig. 4.11). Indicele *Fraction of Vegetation Cover* (FCover), care se bazează pe ponderea culorii verzi a vegetației arborilor din teren, s-a dovedit a fi cel mai relevant, înregistrând o valoare a coeficientului de corelație $r = 0,91$. De asemenea, valori ridicate ale coeficienților de corelație au obținut și indicii LAI (*Leaf Area Index*), DMP (*Dry Matter Productivity*) și FAPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*), cu $r = 0,88$, $r = 0,84$ și, respectiv, $r = 0,83$. Indicele NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) a obținut o valoare a coeficientului de corelație de doar 0,51, în cazul acesta, semnificând o legătură mai puțin strânsă cu valorile datelor fenologice din teren.

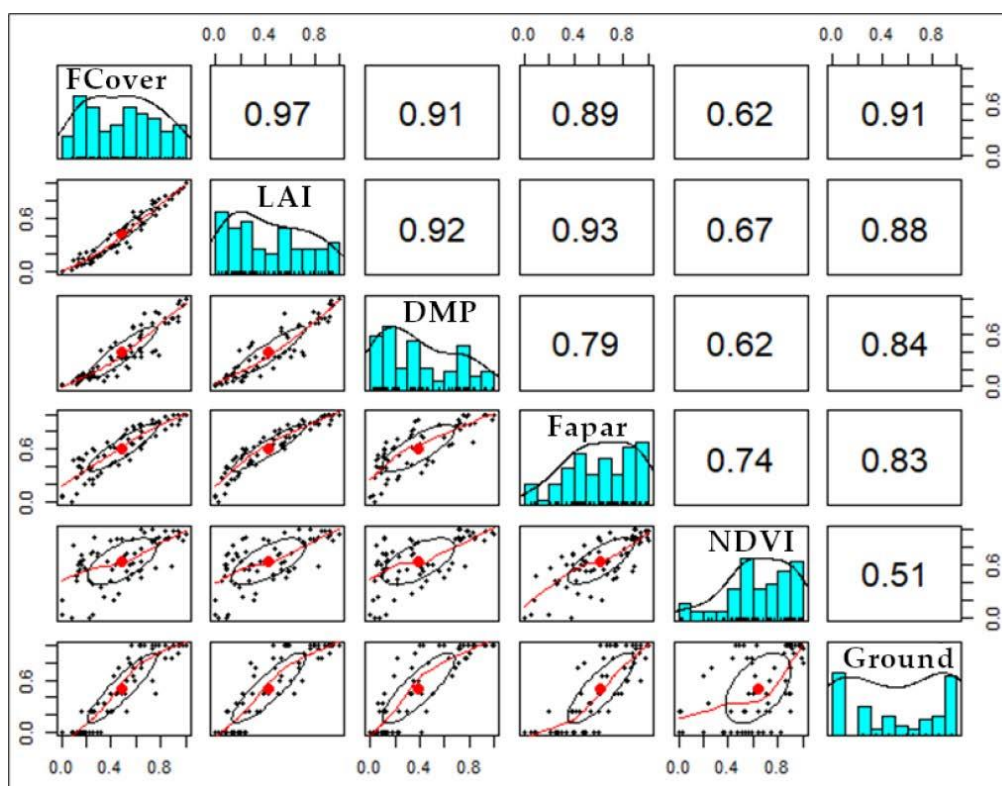


Fig. 4.11 - Corelograma datelor fenologice obținute prin intermediul observațiilor din teren și parametrilor biofizici *Copernicus*, raportate la valori medii pentru fiecare suprafață de studiu/ populație (ultima coloană; *Ground* – datele fenologice obținute în teren).

Datorită liniarității dintre datele fenologice din teren și parametrilor biofizici extrași de pe platforma *Copernicus*, au fost testate mai multe modele liniare. Cel mai potrivit algoritm, care a înregistrat cea mai mică valoare a erorii (RMSE), de 7,84 %, și cel mai mare coeficient al coeficientului de

determinare R^2 , de 0,94, a fost modelul 2, care i-a avut ca variabile pe toți cei cinci parametri biofizici *Copernicus* și locația drept variabilă independentă de separare a populațiilor (Tabelul 4.10). În celelalte modele, locația nu a fost utilizată ca parametru. Deși acestea au înregistrat o valoare mai ridicată a $RMSE$, ele s-au dovedit mai eficiente în prezicerea fenologiei frunzelor la fag, în afara suprafețelor de studiu monitorizate. Cel mai bun echilibru între valoarea $RMSE$ și cea a R^2 , este înregistrat în cazul modelului 3, care a avut ca variabile primii patru cei mai eficienți parametri biofizici *Copernicus* și interacțiunea acestora cu cele două anotimpuri monitorizate (primăvara și toamna).

Tabelul 4.10. Descrierea modelor utilizate și rezultatele $RMSE$ și R^2 obținute în urma testării acestora

Numărul modelului	Valoarea $RMSE$	Valoarea R^2	Complexitatea modelului	Variabilele utilizate
1	11,65	0,87	11	$F(x)=(FCover+LAI+FAPAR+DMP+NDVI)*anotimp$
2	7,84	0,94	9	$F(x)=FCover+LAI+FAPAR+DMP+NDVI+locație$
3	11,89	0,85	9	$F(x)=(FCover+LAI+FAPAR+DMP)*anotimp$
4	12,32	0,85	7	$F(x)=(FCover+LAI+FAPAR)*anotimp$
5	12,57	0,85	5	$F(x)=FCover+LAI+FAPAR+DMP+NDVI$
6	12,99	0,84	5	$F(x)=(FCover+LAI)*anotimp$
7	13,00	0,84	3	$F(x)=FCover*anotimp$
8	13,11	0,83	1	$F(x)=FCover$

4.3. Analiza asocierii datelor fenologice, genetice și a caracteristicilor arhitecturale obținute prin intermediul scanării cu laser terestru

4.3.1. Intensitatea competiției

Mărima valorii indicelui de competiție a unui exemplar de fag analizat este influențată de distanța dintre acesta și competitorii acestuia. Pe măsură ce această distanță crește, valoarea indicelui de competiție *Hegyí* scade, existând o relație invers proporțională între cele două (conform funcției polinomiale de ordinul 6: $y = 3E-06x^6 - 0,0002x^5 + 0,0042x^4 - 0,0489x^3 + 0,309x^2 - 1,0275x + 1,5836$). Rezultatele obținute relevă faptul că efectul exercitat de către un competitor asupra unui arbore țintă, situat la o distanță mai mare de 4 m, scade semnificativ (Fig. 4.12). Împreună cu distanța, diametrul arborilor competitori influențează valoarea indicelui de competiție, existând o relație direct proporțională între acestea.

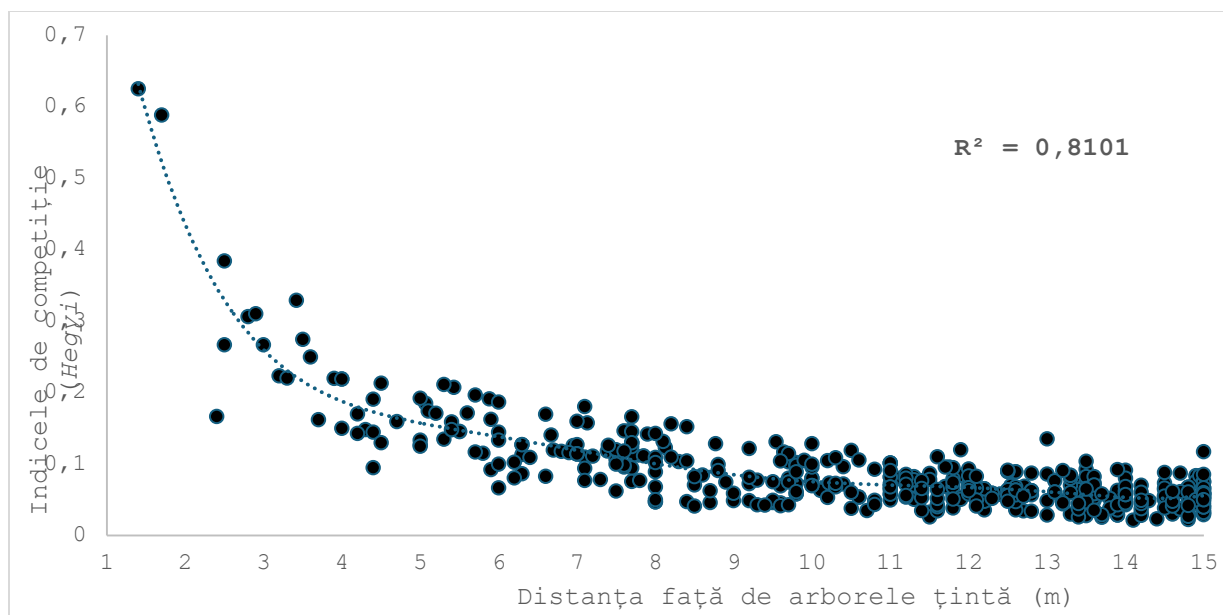


Fig. 4.12 - Valorile indicelui de competiție *Hegyi* pentru arborii competitori (*i*) ai arborilor țintă selectați (*j*)

4.3.2. Efectele competiției asupra fenologiei și a caracteristicilor arhitecturale ale fagului

Rezultatele obținute relevă o corelație semnificativă și pozitivă între competiția exercitată de către competitorii celor 55 de exemplare selectate (cuantificată prin intermediul indicelui de competiție *Hegyi*) și zveltețea acestora ($r = 0,32$) (Tabelul 4.11). Astfel, o creștere a competiției implică o scădere a indicatorilor de biomasă: volumul total ($r = -0,38$), volumul trunchiului ($r = -0,39$), volumul ramurilor ($r = -0,36$), înălțimea arborilor ($r = -0,38$), lungimea ramurilor ($r = -0,30$), diametrul măsurat la înălțimea de 1,30 m ($r = -0,39$) și diametrul coroanei ($r = -0,34$).

Tabelul 4.11 - Efectele competiției asupra fenologiei și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag analizate

Corelația dintre competiție și ...	Valoarea coeficientului de corelație <i>Pearson</i>
Pornirea în vegetație	0,08
Lungimea sezonului de vegetație	-0,09
Zveltețe	0,32*
Înfrucire	0,13
Volumul total	-0,38**
Volumul trunchiului	-0,39**

Volumul ramurilor	-0,36**
Înălțimea arborilor	-0,38**
Înălțimea trunchiului	-0,34*
Lungimea ramurilor	-0,30*
Numărul ramurilor	-0,12
Ordinul maxim de ramificare	-0,16
DBH	-0,39**
Diametrul coroanei (valoarea medie)	-0,34*

* - $r > 0,266$, ** - $r > 0,363$ și *** - $r > 0,432$

4.3.3. Relația dintre zveltețea, fenologia și caracteristicile arhitecturale ale fagului

Rezultatele obținute relevă o corelație semnificativă și pozitivă între zveltețea exemplarelor de fag analizate și competiția exercitată de către competitorii acestora (Tabelul 4.12). O zveltețe ridicată a exemplarelor de fag implică o scădere puternic semnificativă a volumului trunchiului acestora ($r = -0,62$), a volumului ($r = -0,47$) și lungimii ramurilor ($r = -0,41$) și a diametrului coroanei ($r = -0,58$). Pornirea în sezonul de vegetație ($r = -0,23$) și lungimea sezonului de vegetație nu sunt influențate semnificativ de către zveltețea exemplarelor analizate. Diversitatea genetică (cuantificată la nivel de individ prin heterozigoție) nu influențează zveltețea arborilor ($r = -0,16$).

Tabelul 4.12 - Efectele zvelteții asupra fenologiei, variabilității fenotipice și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag analizate

Corelația dintre zveltețe și ...	Valoarea coeficientului de corelație <i>Pearson</i>
Pornirea în vegetație	-0,23
Lungimea sezonului de vegetație	0,24
Înfurcire	0,24
Competiție	0,32*
Heterozigoție	-0,16
Volumul trunchiului	-0,62***
Volumul ramurilor	-0,47***
Înălțimea trunchiului	-0,10
Lungimea ramurilor	-0,41**
Numărul ramurilor	-0,14

Ordinul maxim de ramificare	-0,26
Diametrul coroanei (valoarea medie)	-0,58***

* - $r > 0,266$, ** - $r > 0,363$ și *** - $r > 0,432$

4.3.4. Efectele altitudinii asupra fenologiei și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag

Influența altitudinii asupra pornirii și lungimii sezonului de vegetație ale exemplarelor de fag analizate este confirmată de valorile puternic semnificative ale coeficienților de corelație obținuți în urma analizei datelor, de 0.90, respectiv -0.91 (tabelul 4.13). Astfel, o creștere în altitudine implică o pornire tardivă a fagului în sezonul de vegetație, cât și o lungime mai mică a acestuia. Totodată, rezultatele arată că o creștere în altitudine va determina o scădere a înălțimii arborilor ($r = -0,61$), dar și o scădere a lungimii trunchiului ($r = -0,44$).

Tabelul 4.13 - Influența altitudinii asupra fenologiei, variabilității genetice și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag analizate

Corelația dintre altitudine și ...	Valoarea coeficientului de corelație <i>Pearson</i>
Pornirea în vegetație	0,90***
Lungimea sezonului de vegetație	-0,91***
Competiție	0,28
Înfrucire	0,41**
Volumul total	-0,20
Volumul trunchiului	-0,20
Volumul ramurilor	-0,19
Înălțimea arborilor	-0,61***
Înălțimea trunchiului	-0,44**
Lungimea ramurilor	0,08
Numărul ramurilor	0,24
Ordinul maxim de ramificare	0,20
DBH	-0,17
Diametrul coroanei (valoarea medie)	-0,10

** - $r > 0,363$ și *** - $r > 0,432$

4.3.5. Efectele heterozigoției asupra fenologiei și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag

A fost observată o influență semnificativă a heterozigoției asupra lungimii sezonului de vegetație ($r = 0,30$), un exemplar cu o mai mare diversitate genetică manifestând o pornire precoce în vegetație ($r = -0,21$) și un sezon de vegetație mai lung (tabelul 4.14). De asemenea, a fost obținută o valoare semnificativă a coeficientului de corelație dintre heterozigoție și volumul trunchiului exemplarelor de fag ($r = 0,35$), dar și una apropiată de pragul critic de semnificație cu volumul total al arborilor ($r = 0,26$). A fost obținută o corelație slabă negativă între heterozigoție și gradul de înfurcire al exemplarelor de fag analizate ($r = -0,21$).

Tabelul 4.14. Influența diversității genetice asupra fenologiei, variabilității genetice și a caracteristicilor arhitecturale ale exemplarelor de fag analizate

Corelația dintre heterozigoție și ...	Valoarea coeficientului de corelație <i>Pearson</i>
Pornirea în vegetație	-0,21
Lungimea sezonului de vegetație	0,30*
Înfurcire	-0,21
Volumul total	0,26
Volumul trunchiului	0,35*
Volumul ramurilor	0,22
Înălțimea arborilor	0,18
Înălțimea trunchiului	-0,06
Lungimea ramurilor	0,06
Numărul ramurilor	-0,16
Ordinul maxim de ramificare	-0,08
DBH	0,30*
Diametrul coroanei (valoarea medie)	0,25

* - $r > 0,266$

CAPITOLUL 5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

5.1. Concluzii finale

5.1.1. Concluzii în urma efectuării observațiilor fenologice

- Rezultatele obținute indică o variație atât la nivel interpopulațional (între cele cinci suprafețe de studiu), datorată condițiilor staționale diferite, cât și la nivel intrapopulațional (30 de indivizi din fiecare suprafață de studiu), datorate condițiilor de microclimat și a genotipurilor diferite.
- Au fost identificate diferențe semnificative între mediile suprafețelor extreme ale profilului altitudinal, atât în pornirea în fenologia de primăvară (24-28 zile) cât și în apariția senescentei (12-24 zile), implicând diferențe considerabile și în lungimea sezonului de vegetație (43-52 zile).
- În cazul unui start întârziat al pornirii în vegetație (2021 și 2023), s-au înregistrat tranziții mai rapide de la o fenofază la o alta, implicând o apariție mai rapidă a frunzelor. Exemplarele de fag analizate au pornit în vegetație cu 3-3,5 zile la 100 m creștere în altitudine.
- În cadrul aceluiași suprafață de studiu, au fost identificate diferențe semnificative de la 3 până la 12 zile în pornirea în vegetație, de la 5 la 16 zile în sfârșitul sezonului de vegetație și de la 14 la 24 de zile în lungimea sezonului de vegetație, evidențiindu-se astfel comportamentele fenologice precoc și tardive ale exemplarelor de fag analizate.
- Asocierea datelor fenologice cu cele meteorologice confirmă faptul că temperatura este factorul declanșator al fenologiei fagului, atât a celei de primăvară, cât și a celei de toamnă. Atunci când pragul termic de 10°C este depășit, fagul pornește în vegetație, dar această condiție este complementară cu depășirea unui cumul specific de grade zile cumulate (CDD). Pe parcursul celor trei ani de monitorizare, plesnirea mugurilor a apărut după acumularea a cel puțin 52 CDD, cu 7 zile înainte de fenofază.
- Senescenta exemplarelor de fag a fost influențată de temperatură. Prima fenofază a fenologiei de toamnă, îngălbenirea frunzelor, este declanșată de acumularea a cel puțin 65 grade zile de senescentă (ADD), cu 7 zile înainte de fenofază.

- Cea de a doua fenofază a senescentei fagului, căderea frunzelor, nu este influențată în aceeași măsură ca și prima de acumularea unor anumite temperaturi, cât nici de apariția înghețului timpuriu.

5.1.2. Concluzii în urma în urma efectuării observațiilor fenologice prin intermediul teledetecției

- Utilizarea imaginilor colectate prin intermediul dronei permite monitorizarea fenologiei arborilor, la nivel de individ. Produsele ortofotografice realizate pe baza imaginilor aeriene oferă o perspectivă de ansamblu asupra coroanei arborilor, comparabilă cu cea din teren, oferind o alternativă eficientă.
- Indicii de vegetație calculați pe baza acestor imagini s-au dovedit eficienți în a estima stadiul fenologic, acesta fiind comparabil cu cel atribuit prin intermediul observațiilor din teren. Per ansamblu, se poate afirma că observațiile fenologice realizate prin intermediul dronei pot reduce considerabil efortul necesar efectuării observațiilor din teren. Indicii de vegetație care s-au dovedit cei mai preciși în atribuirea unui stadiu fenologic au fost GLI, NGRGB, RGVBI și ExG, care utilizează toate cele trei benzi (roșu, verde și albastru) ale modelului RGB.
- Modelele de predicție s-au dovedit precise, atât cele liniare cât și cele neliniare, inclusiv algoritmul *random forest*, deși, pe eșantioane mici de arbori, acestea au avut tendința de supra-adaptare, replicarea acestora în alte suprafețe de studiu prezentând riscul de a nu furniza rezultate de aceeași calitate. Algoritmii au dovedit o acuratețe ridicată, atât în cazul în care culoarea a fost utilizată ca variabilă independentă, cât și în cel în care textura a fost utilizată în același mod.
- Parametrii biofizici extrași de pe platforma *Copernicus* (care are la bază sateliții *Sentinel*) au dovedit, în general, o acuratețe bună în atribuirea unui stadiu fenologic (cuantificat ca procentaj de acoperire cu frunze al arborilor) la nivel de suprafață de studiu. Cel mai eficient indice s-a dovedit a fi *Fraction of Vegetation Cover* (FCover).
- Utilizarea celor două metode de teledetecție (drona și imaginile satelitare) în efectuarea observațiilor fenologice la fag s-a dovedit eficientă, fiind obținute rezultate strâns corelate cu cele obținute în urma monitorizării fenologiei în teren, reprezentând astfel o alternativă mai rapidă și mai puțin consumatoare de resurse (personal, transport).

5.1.3. Concluzii în urma corelării datelor fenologice, genetice și a caracteristicilor arhitecturale obținute prin intermediul scanării cu laser terestru

- Creșterea în altitudine determină un start tardiv și un sfârșit precoce al sezonului de vegetație pentru exemplarele de fag evaluate fenologic. Acest fapt implică direct o lungime mai scurtă a întregului sezon de vegetație. Înălțimea arborilor și, implicit, lungimea trunchiului au scăzut

concomitent cu creșterea în altitudine. Gradul de înfurcire al arborilor selectați a crescut proporțional cu altitudinea.

- Influența competitorilor asupra arborilor țintă este determinată direct de distanța dintre aceștia (efectele mai semnificative fiind resimțite la o distanță mai mică de 4 m) și diametrul competitorilor (relație invers proporțională). O competiție mai mare exercitată asupra arborilor țintă implică o reducere a indicatorilor de biomasă al exemplarelor de fag analizate (volumul arborelui, al trunchiului, înălțimea arborelui, lungimea trunchiului, diametrul acestuia, volumul ramurilor, lungimea ramurilor și diametrul coroanei).
- Un individ care are o heterozigoție mai ridicată, implicit, o diversitate genetică mai mare, are un sezon de vegetație mai lung, aceasta implicând un start precoce în pornirea în vegetație și un debut tardiv al senescentei. De asemenea, exemplarele care au o heterozigoție mai mare sunt asociate și cu valori mai ridicate ale indicatorilor de biomasă. Între diversitatea genetică și gradul de înfurcire al exemplarelor analizate a fost identificată o relație negativă, apropiată de pragul de semnificație.
- Metodele de scanare cu laser terestru au dovedit un potențial ridicat în extragerea valorilor indicilor de biomasă ai indivizilor evaluați, dar se recomandă în continuare utilizarea complementară a metodelor convenționale pentru validarea datelor, chiar dacă sunt consumatoare de timp și resurse.

5.2. Contribuții originale

În urma efectuării cercetărilor care au condus la întocmirea prezentei teze de doctorat, se pot releva următoarele contribuții originale:

1. Efectuarea unui studiu fenologic al fagului (*Fagus sylvatica*), pe parcursul a trei ani, de-a lungul unui profil altitudinal cu o amplitudine ridicată a elevației (900 m) și cinci suprafețe de probă cu porțiuni semnificative de teren accidentat, reprezentativ pentru arealul natural al acestei specii din zona Brașovului.
2. Realizarea monitorizărilor fenologice, prin intermediul observațiilor din teren la o frecvență ridicată, de cca. 2-3 zile, în special în cazul fenologiei de primăvară, cu scopul de surprinde cu o fidelitate sporită tranzițiile dintre fenofaze, micșorând astfel efectul negativ al interpolării datelor.
3. Efectuarea în premieră, în România, a unor observații fenologice la fag, la nivel de individ, în teren accidentat, pe baza produselor ortorectificate de înaltă rezoluție obținute prin intermediul unui dispozitiv UAV (dronă), realizate în paralel cu observațiile din teren, și testarea a 19 indici de vegetație calculați pe baza valorilor pixelilor extrași din aceste imagini, în vederea identificării celor care au o precizie ridicată.

4. Testarea și identificarea a cinci parametri biofizici de vegetație extrași din imagini satelitare, obținute de pe platforma *Copernicus*, care să estimeze fenologia foliară a fagului, la nivel de suprafață de studiu.
5. Testarea și identificarea unor modele liniare și neliniare (algoritmul *random forest*), care să estimeze fenologia foliară a fagului, atât la nivel de individ, cât și de populație.
6. Asocierea datelor fenologice cu date meteorologice, obținute prin senzori de înregistrare a valorilor temperaturii și umidității relative, amplasați chiar în interiorul arboretelor.
7. Conceperea cumulului de grade zile de senescență, ADD, declanșator al fenologiei de toamnă, bazat pe suma temperaturilor zilnice, necesar pornirii în vegetație a fagului. Acesta poate fi replicat și în cazul altor specii.
8. Analiza caracteristicilor arhitecturale și a indicatorilor de biomasă ale exemplarelor de fag obținute prin intermediul utilizării teledetecției, mai exact a scanării cu laser terestru (TLS).
9. Evaluarea diversității genetice a exemplarelor de fag, cuantificată prin intermediul indicelui de heterozigoție, pe baza a șase markeri de tipul SSRs și a șase (EST)-SSRS.
10. Efectuarea de cercetări exploratorii privind asocierea diversității genetice individuale cu caracteristici arhitecturale, de biomasă și fenologice la fag.
11. Bază de date meteorologice și fenologice din suprafețele studiate.
12. Instalarea unei rețele fenologice, care poate fi valorificată în cadrul unor viitoare studii multidisciplinare.

5.3. Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute în urma efectuării cercetărilor din cadrul acestui stagiul de doctorat au fost diseminate în cinci articole științifice, 4 dintre acestea indexate ISI (în momentul depunerii tezei, cel de-al 5-lea fiind în stadiul de review și publicat ca preprint), și participarea la nouă conferințe și simpozioane științifice internaționale.

Lista articolelor științifice publicate în reviste cotate *Web of Science*:

1. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Curtu, A.L., Radu, G.R. (2022). Predicting Leaf Phenology in Forest Tree Species Using UAVs and Satellite Images: A Case Study for European Beech (*Fagus sylvatica* L.). *Remote Sens.*, 14, 6198. <https://doi.org/10.3390/rs14246198>
Q1/ IF=5,349
2. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Ciocîrlan, E., Chira, D., Radu, G.R., Păcurar, V.D., Beșliu, E., Zormpa, O.G., Gailing, O., Curtu, A.L. (2024). Large Differences in Bud Burst and Senescence between Low- and High-Altitude European Beech Populations along an Altitudinal Transect in the South-Eastern Carpathians. *Forests*, 15, 468. <https://doi.org/10.3390/f15030468>

Q1/ IF=2,4

3. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Ciocîrlan, E., Radu, G.R., Chira, D., Gailing, O., Vînătoru, C., Zormpa, O.G., Vucetic, B., Budde, K.B., Florea, S., Niță, M.D., Curtu, A.L.. (2024). Exploring the association between adaptive and growth traits and within-individual genetic diversity in common beech (*Fagus sylvatica*). *Annals of Forest Research*, 67(2): 151-166.

Q2/ IF=1,7

4. Budde, K., Zormpa, O. G., Wilhelmi, S., Vucetic, B., Müller, M., Gailing, O., **Ciocîrlan, M.I.C.**, Ciocîrlan, E., Curtu, A. L., Targem, M. & Wildhagen, H. (2024). Differences in fine-scale spatial genetic structure of European beech populations along elevational gradients. *ResearchSquare* (Preprint)
5. Beșliu, E.; Curtu, A. L.; Budeanu, M.; Apostol, E. N.; **Ciocîrlan, M. I. C.** (2024). Exploring the effects of the assisted transfer of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances in the Romanian Carpathians. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(3), 13968. <https://doi.org/10.15835/nbha52313968>

Q3/ IF=1,4

Lista prezentărilor susținute în cadrul conferințelor științifice internaționale:

1. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Radu, R.G., Curtu, A.L. (2022). Phenology monitoring in European beech (*Fagus sylvatica*) in the Carpathian Mountains using UAVs sensor. Conferința PHENOLOGY 2022 – „Phenology at the crossroads”, 20-24 Iunie, Avignon, Franța.
2. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Radu, R.G., Curtu, A.L. (2022). Spring and autumn phenology monitoring in European beech along an altitudinal transect in Brasov during 2021 and 2022. 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOREST AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 14-15 Octombrie, Brașov, România.
3. Targem, M.B., Zormpa, O. G., Götz, J., Schneider, T.M.T., Müller, M., Budde, K.B., Koebel, R., Hofmann, M., Steiner, W., Hertel, D., Leuschner, C., **Ciocîrlan, M.I.C.**, Curtu, A.L., Gailing, O., Wildhagen, H. (2022). Entwicklung genetischer Marker zur Analyse von Anpassungen an Trockenstress bei Trauben-Eiche und Buche. Waldklimafonds-Kongress 2022, 11-12 Octombrie, Göttingen, Germania.
4. Zormpa, O. G., Budde, K., Vucetic, B., **Ciocîrlan, M.I.C.**, Müller, M., Curtu, A. L., Gailing, O., (2022). Genetic and phenotypic variation in Romanian beech along an altitudinal gradient. Ecology and Evolution: New perspectives and societal challenges. 21-25 Noiembrie 2022, Metz, Franța.
5. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Radu, R.G., Ciocîrlan, E., Chira, D., Chira, F., Mantale, C.Ș., Gailing, O., Curtu, A.L. (2023). Spring and autumn phenology monitoring in European beech (*Fagus sylvatica*) in

the Carpathian Mountains using Uavs images and Copernicus biophysical parameters. *"Forest science for people and societal challenges"*. The 90th "Marin Drăcea" INCDS Anniversary, 2-5 Octombrie, București, România.

6. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Ciocîrlan, E., Chira, D., Chira, F., Mantale, C.Ș., Radu, R.G., Gailing, O., Curtu, A. L. (2023). Bud-burst monitoring in the European beech population (*Fagus sylvatica* L.) along an altitudinal gradient in the South-Eastern Carpathian Mountains. Second EVOLTREE Conference 2023 - *"Resilient forests for the future"*, 12-15 Septembrie 2023, Brașov, România.
7. Zormpa, O. G., Wilhelmi, S., Vucetic, B., **Ciocîrlan, M.I.C.**, Müller, M., Ciocîrlan, E., Curtu, A. L., Targem, M.B., Wildhagen, H., Gailing, O., Budde, K. (2023). Fine scale spatial genetic structure in *Fagus sylvatica* along a steep elevational gradient in the Carpathian Mountains. Second EVOLTREE Conference 2023 - *"Resilient forests for the future"*, 12-15 Septembrie 2023, Brașov, România.
8. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Ciocîrlan, E., Radu, R.G., Chira, D., Gailing, O., Zormpa, O. G., Niță, M.D., Curtu, A.L. (2024). Does heterozigosity and competition affects the bud burst and architectural tree characteristics? A case study for European beech. 11TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOREST AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 17-18 Octombrie, Brașov, România.

Lista prezentărilor susținute în cadrul simpozioanelor naționale:

1. **Ciocîrlan, M.I.C.**, Beșliu, E., Stoica, E., (2024). "Participări la instruiți pentru perfecționarea personalului de cercetare în instituții și universități din străinătate". Simpozionul „Performanță instituțională -Dezvoltarea instituțională și finanțarea excelenței în CDI”, organizat cu ocazia finalizării Proiectului Creșterea capacității și performanței instituționale a INCDS „Marin Drăcea” în activitatea de CDI – CresPerInst, 25 Mai 2024, București, România.

5.4. Direcții viitoare de cercetare

În contextul schimbărilor climatice, continuarea cercetărilor asupra comportamentului fagului reprezintă o deosebită importanță pentru gestionarea pădurilor de fag. Totodată, metodele utilizate în cercetările prezentate în această teză de doctorat pot fi replicate și în cazul celorlalte specii de interes pentru silvicultură.

Așadar, consider că cercetările prezentate pot fi continuate în următoarele direcții:

1. Evaluarea fenologiei la fag, în vederea obținerii unui set de date de calibrare mai complex pentru crearea unui model îmbunătățit de precizie a comportamentului fenologic.

2. Efectuarea analizelor genetice la un nivel mai complex, prin abordarea conceptului de polimorfism la nivelul unei singure nucleotide, SNPs, și care să conducă la obținerea unui nou indice de cuantificare a diversității genetice, care, ulterior, poate fi asociat cu comportamentul fenologic al fagului și identificarea eventualelor particularități ale exemplarelor care au manifestat atât o precocitate sau tardivitate fenologică, cât și anumite caracteristici arhitecturale.
3. Includerea inversiunilor termice în corelația datelor meteorologice cu cele fenologice.
4. Testarea a mai multor indici de vegetație care au inclusă în formula de calcul ponderea culorii verzi, ipoteză care se justifică a fi testată în urma rezultatelor obținute în cadrul acestei lucrări.
5. Replicarea observațiilor fenologice efectuate prin intermediul mijloacelor de teledetecție, dronă și imagini satelitare, și la alte specii de arbori de interes pentru managementul forestier.
6. Îmbunătățirea preciziei de obținere a datelor meteorologice, până la nivel de microclimat, prin instalarea senzorilor de înregistrare a valorilor acestora la diferite înălțimi și pe diferite expoziții ale aceluiași arbore.
7. Continuarea efectuării observațiilor fenologice la fag în vederea constituirii unei rețele fenologice de lungă durată.

BIBLIOGRAFIE

1. Abegg, M., Boesch, R., Schaepman, M. E., & Morsdorf, F. (2021). Impact of Beam Diameter and Scanning Approach on Point Cloud Quality of Terrestrial Laser Scanning in Forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(10). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3037763>
2. Aitken, S.N.; Yeaman, S.; Holliday, J.A.; Wang, T.; Curtis-McLane, S. Adaptation, Migration or Extirpation: Climate Change Outcomes for Tree Populations. *Evol. Appl.* **2008**, *1*, 95–111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
3. Alberto, F., Bouffier, L., Louvet, J. M., Lamy, J. B., Delzon, S., & Kremer, A. (2011). Adaptive responses for seed and leaf phenology in natural populations of sessile oak along an altitudinal gradient. *Journal of Evolutionary Biology*, 24(7). <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2011.02277.x>
4. Apostol, B., Chivulescu, S., Ciceu, A., Petrila, M., Pascu, I. S., Apostol, E. N., Leca, Ș., Loren , A., Tănase, M., & Badea, O. (2018). Data collection methods for forest inventory: A comparison between an integrated conventional equipment and terrestrial laser scanning. *Annals of Forest Research*, 61(2). <https://doi.org/10.15287/afr.2018.1189>
5. Asuka, Y., Tani, N., Tsumura, Y., & Tomaru, N. (2004). Development and characterization of microsatellite markers for *Fagus crenata* Blume. *Molecular Ecology Notes*, 4(1). <https://doi.org/10.1046/j.1471-8286.2003.00583.x>
6. Atkins, J. W., Stovall, A. E. L., & Yang, X. (2020). Mapping temperate forest phenology using tower, UAV, and ground-based sensors. *Drones*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/drones4030056>
7. Avanzi, C., Heer, K., Büntgen, U., Labriola, M., Leonardi, S., Opgenoorth, L., Piermattei, A., Urbinati, C., Vendramin, G. G., & Piotti, A. (2020). Individual reproductive success in Norway spruce natural populations depends on growth rate, age and sensitivity to temperature. *Heredity*, 124(6). <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0305-0>
8. Babushkina, E. A., Vaganov, E. A., Grachev, A. M., Oreshkova, N. v., Belokopytova, L. v., Kostyakova, T. v., & Krutovsky, K. v. (2016). The effect of individual genetic heterozygosity on general homeostasis, heterosis and resilience in Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) using dendrochronology and microsatellite loci genotyping. *Dendrochronologia*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.02.005>

9. Badeck, F.-W.; Bondeau, A.; Böttcher, K.; Doktor, D.; Lucht, W.; Schaber, J.; Sitch, S. Research Review Responses of Spring Phenology to Climate Change. *New Phytol.* **2004**, *162*, 295–309. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x>
10. Barbeito, I., Dassot, M., Bayer, D., Collet, C., Drössler, L., Löf, M., del Rio, M., Ruiz-Peinado, R., Forrester, D. I., Bravo-Oviedo, A., & Pretzsch, H. (2017). Terrestrial laser scanning reveals differences in crown structure of *Fagus sylvatica* in mixed vs. pure European forests. *Forest Ecology and Management*, *405*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.043>
11. Barbu I., Curcă M., Barbu C., Ichim V. (2016). Adaptarea pădurilor României la schimbările climatice. Ed. Silvică, Seria Lucrări de cercetare, 397 pag.
12. Bârliba, F. C., Luminița Livia Bârliba, and C. Bârliba. "Methods of acquisition and data processing carried out with DJI Phantom 4 Pro v2. 0 UAV equipment." (2020): 14–23.
13. Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. L., & Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *39*. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
14. Bian, L., Zhang, H., Ge, Y., Čepl, J., Stejskal, J., & EL-Kassaby, Y. A. (2022). Closing the gap between phenotyping and genotyping: review of advanced, image-based phenotyping technologies in forestry. In *Annals of Forest Science* (Vol. 79, Issue 1). <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01143-x>
15. Bigler, C., & Bugmann, H. (2004). Predicting the time of tree death using dendrochronological data. *Ecological Applications*, *14*(3). <https://doi.org/10.1890/03-5011>
16. Bigler, C., & Vitasse, Y. (2019). Daily maximum temperatures induce lagged effects on leaf unfolding in temperate woody species across large elevational gradients. *Frontiers in Plant Science*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00398>
17. Biriș, I. Făgetele Primare Din România, o contribuție La Patrimoniul Mondial UNESCO. Bucov. For. 2014, 14, 77–85; disponibil online: <https://bucovina-forestiera.ro/BF%20old%20site/Bucovina%20forestiera/www.bucovina-forestiera.ro/article/fagetele-primare-din-romania/index.html>
18. Bivand R, Keitt T, Rowlingson B (2023). *rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library*. <http://rgdal.r-forge.r-project.org>, <https://gdal.org>, <https://proj.org>, <https://r-forge.r-project.org/projects/rgdal/>.
19. Božič, G., IVANKOVIĆ, M., & Kutnar, L. (2013). Genetic structure of european beech (*Fagus sylvatica* L.) seed stands from different forest sites of gorjanci mountains as revealed by isoenzymes. *Sumarski List*, *137*(1–2).
20. Budde, K. B., Hötzel, S., Müller, M., Samsonidze, N., Papageorgiou, A. C., & Gailing, O. (2023). Bidirectional gene flow between *Fagus sylvatica* L. and *F. orientalis* Lipsky despite strong genetic divergence. *Forest Ecology and Management*, *537*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120947>

21. Budde, K., Zormpa, O. G., Wilhelmi, S., Vucetic, B., Müller, M., Gailing, O., Ciocîrlan, M.I.C., Ciocîrlan, E., Curtu, A. L., Targem, M. & Wildhagen, H. (2024). Differences in fine-scale spatial genetic structure of European beech populations along elevational gradients.
22. Budeanu, M., Petritan, A. M., Popescu, F., Vasile, D., & Tudose, N. C. (2016). The Resistance of European Beech (*Fagus sylvatica*) from the Eastern Natural Limit of Species to Climate Change. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 44(2). <https://doi.org/10.15835/nbha44210262>
23. BUDEANU, M., POPESCU, F., & PEPELEA, D, 2015. Analiza caracterelor fenotipice ale arborilor și semințișului de fag din RGF Șercaia, în contextul schimbărilor climatice. *Revista de Silvicultură și Cinegetică*, Numărul 36, pag. 25-28.
24. Buiteveld, J., Vendramin, G. G., Leonardi, S., Kamer, K., & Geburek, T. (2007). Genetic diversity and differentiation in European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands varying in management history. *Forest Ecology and Management*, 247(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.018>
25. Burger, K., Müller, M., & Gailing, O. (2018). Characterization of EST-SSRs for European beech (*Fagus sylvatica* L.) and their transferability to *Fagus orientalis* Lipsky, *Castanea dentata* Bork., and *Quercus rubra* L. *Silvae Genetica*, 67(1). <https://doi.org/10.2478/sg-2018-0019>
26. Burkardt, K., Pettenkofer, T., Ammer, C., Gailing, O., Leinemann, L., Seidel, D., & Vor, T. (2021). Influence of heterozygosity and competition on morphological tree characteristics of *Quercus rubra* L.: a new single-tree based approach. *New Forests*, 52(4). <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09814-1>
27. Callister, A. N., England, N., & Collins, S. (2011). Genetic analysis of eucalyptus Globulus diameter, straightness, branch size, and forking in Western Australia. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(6). <https://doi.org/10.1139/x11-036>
28. Capalb F., Petrila M., Lorent A., Apostol B., Marcu C., Badea O., 2023. Estimarea volumului la arbori individuali pe baza norilor de puncte obținuți prin scanare cu laser terestru (TLS)– studiu de caz pentru arborete de molid din vestul Carpaților Meridionali. *Revista de Silvicultură și Cinegetică* 28(53):12-18.
29. Casmey, M., Hamann, A., & Hacke, U. G. (2022). Adaptation of white spruce to climatic risk environments in spring: Implications for assisted migration. *Forest Ecology and Management*, 525. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120555>
30. Chéné, Y., Rousseau, D., Lucidarme, P., Bertheloot, J., Caffier, V., Morel, P., Belin, É., & Chapeau-Blondeau, F. (2012). On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants. *Computers and Electronics in Agriculture*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.12.007>
31. Chesnoiu, E. N., & Sofletea, N. (2009). Bud burst and flowering phenology in a mixed oak forest from Eastern Romania. *Annals of Forest Research*, 52(1). <https://doi.org/10.15287/afr.2009.136>

32. Chira, D.; Dănescu, F.; Roșu, C.; Chira, F.; Mihalciuc, V.; Surdu, A.; Nicolescu, N.V. Some recent issues regarding the European beech decline in Romania. *Ann. ICAS 2014*, 46, 167–176.
33. Chmielewski, F. M., Götz, K. P., Weber, K. C., & Moryson, S. (2018). Climate change and spring frost damages for sweet cherries in Germany. *International Journal of Biometeorology*, 62(2). <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1443-9>
34. Chuine, I. (2010). Why does phenology drive species distribution? In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 365, Issue 1555). <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0142>
35. Chuine, I., Belmonte, J., & Mignot, A. (2000). A modelling analysis of the genetic variation of phenology between tree populations. *Journal of Ecology*, 88(4). <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00468.x>
36. Constantin A, Patil I (2021). "ggsignif: R Package for Displaying Significance Brackets for 'ggplot2'." *PsyArxiv*. <https://osf.io/preprints/psyarxiv/7awm6>
37. Copernicus Land Monitoring Service. <https://land.copernicus.eu/en> (accesat în 13.03.2022)
38. Čufar, K., De Luis, M., Saz, M.A. et al. Temporal shifts in leaf phenology of beech (*Fagus sylvatica*) depend on elevation. *Trees* 26, 1091–1100 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0686-7>
39. Cvrčková, H., Máchová, P., Poláková, L., & Trčková, O. (2017). Evaluation of the genetic diversity of selected *Fagus sylvatica* L. populations in the Czech Republic using nuclear microsatellites. *Journal of Forest Science*, 63(2). <https://doi.org/10.17221/88/2016-JFS>
40. Delpierre, N., Vitasse, Y., Chuine, I., Guillemot, J., Bazot, S., Rutishauser, T., & Rathgeber, C. B. K. (2016). Temperate and boreal forest tree phenology: from organ-scale processes to terrestrial ecosystem models. In *Annals of Forest Science* (Vol. 73, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0477-6>
41. Doniță N., Chiriță, C., Stănescu, V. (ed.) (1990). *Tipuri de Ecosisteme Forestiere din Romania*. Ed. Tehnică Agricolă, București.
42. Doniță, N., Paucă-Comănescu, M., Popescu, A., Mihăilescu, S. and Biriș, I.A. (2005). *Habitatele din România*. București: Ed. Tehnică Silvică. pp. 177–208.
43. Drobyshev, I., Övergaard, R., Saygin, I., Niklasson, M., Hickler, T., Karlsson, M., & Sykes, M. T. (2010). Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 259(11). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.037>
44. Ducci F., De Cuyper B., Pâques L.E., Proietti R., Wolf H. (Compilers), 2012. Reference protocols for assessment of trait and reference genotypes to be used as standards in international research projects. Ed. CRA SEL - Arezzo, Italy: p. 82.
45. Duduman G., Roibu C. C., Duduman M. L., Miron-Onciul M., 2010. The influence of competition and dimensional-spatial characteristics of trees on their radial growth in Old-Growth Slătioara forest, Romania. *AES Bioflux*, Cluj-Napoca. 2(2):215-230.

46. Duncan, G. M., Berry, W. D., & Feldman, S. (1986). Multiple Regression in Practice. *Journal of Marketing Research*, 23(3). <https://doi.org/10.2307/3151494>
47. Dunn, O. J. 1964. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*. 6: 241--252.
48. Fichtner, A., Sturm, K., Rickert, C., Härdtle, W., & Schrautzer, J. (2012). Competition response of European beech *Fagus sylvatica* L. varies with tree size and abiotic stress: Minimizing anthropogenic disturbances in forests. *Journal of Applied Ecology*, 49(6). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02196.x>
49. Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
50. Forstmeier, W., Schielzeth, H., Mueller, J. C., Ellegren, H., & Kempenaers, B. (2012). Heterozygosity-fitness correlations in zebra finches: Microsatellite markers can be better than their reputation. In *Molecular Ecology* (Vol. 21, Issue 13). <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05593.x>
51. Fotelli, M. N., Nahm, M., Radoglou, K., Rennenberg, H., Halyvopoulos, G., & Matzarakis, A. (2009). Seasonal and interannual ecophysiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) at its south-eastern distribution limit in Europe. *Forest Ecology and Management*, 257(3). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.026>
52. Fuentes, D. A., Gamon, J. A., Qiu, H. L., Sims, D. A., & Roberts, D. A. (2001). Mapping Canadian boreal forest vegetation using pigment and water absorption features derived from the AVIRIS sensor. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D24). <https://doi.org/10.1029/2001JD900110>
53. Gauzere, J., Klein, E. K., Brendel, O., Davi, H., & Oddou-Muratorio, S. (2016). Using partial genotyping to estimate the genetic and maternal determinants of adaptive traits in a progeny trial of *Fagus sylvatica*. *Tree Genetics and Genomes*, 12(6). <https://doi.org/10.1007/s11295-016-1062-3>
54. Geßler, A., Keitel, C., Kreuzwieser, J., Matyssek, R., Seiler, W., & Rennenberg, H. (2007). Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. In *Trees - Structure and Function* (Vol. 21, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0107-x>
55. Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
56. Giurgiu, V. (1972). Metode ale statisticii matematice aplicate în silvicultură. Editura Ceres. București.
57. Gkafas, G. A., Hatzioannou, M., Malandrakis, E. E., Tsigenopoulos, C. S., Karapanagiotidis, I. T., Mente, E., Vafidis, D., & Exadactylos, A. (2019). Heterozygosity fitness correlations and generation interval of the Norway lobster in the Aegean Sea, eastern Mediterranean. *Journal of Biological Research (Greece)*, 26(1). <https://doi.org/10.1186/s40709-019-0103-0>

58. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. (2008). *Choice Reviews Online*, 45(11). <https://doi.org/10.5860/choice.45-6185>
59. Grigorieva, E. A., Matzarakis, A., & de Freitas, C. R. (2010). Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude. *Climate Research*, 42(2). <https://doi.org/10.3354/cr00888>
60. Hack, H.; Bleiholder, H.; Buhr, L.; Meier, U.; Schnock-Fricke, U.; Weber, E.; Witzemberger, A. Einheitliche Codierung Der Phänologischen Entwicklungsstadien Mono- Und Dikotyler Pflanzen. -Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzkd.* 1992, 44, 265–270.
61. Hall, D., Luquez, V., Garcia, V. M., St Onge, K. R., Jansson, S., & Ingvarsson, P. K. (2007). Adaptive population differentiation in phenology across a latitudinal gradient in European aspen (*Populus tremula*, L.): A comparison of neutral markers, candidate genes and phenotypic traits. *Evolution*, 61(12). <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00230.x>
62. Hansson, B., & Westerberg, L. (2002). On the correlation between heterozygosity and fitness in natural populations. In *Molecular Ecology* (Vol. 11, Issue 12). <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2002.01644.x>
63. Harrell Jr F (2023). Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 5.1-2, <https://hbiostat.org/R/Hmisc/>.
64. Hegyi F., 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. Fries J (ed) Growth models for tree and stand simulation: International Union of Forestry Research Organizations Working Party S4, Skogshögskolan, Garpenberg, pp 74–90.
65. HOBOWare software <https://www.onsetcomp.com/products/software/hoboware> (accesat în 19.12.2021)
66. Horgan, T., Keane, M., McCarthy, R., Lally, M., Thompson, D., & Carroll, J. O. (2003). A Guide to Forest Tree Species Selection and Silviculture in Ireland. Coford.
67. Hunt, E. R., Cavigelli, M., Daughtry, C. S. T., McMurtrey, J. E., & Walthall, C. L. (2005). Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 6(4). <https://doi.org/10.1007/s11119-005-2324-5>
68. Irimin, A. & Ungureanu M. (2015). Amenajamentul fondului forestier proprietate publică a Municipiului Braşov, administrat de R.P.L.P. Kronstadt R.A., judeţul Braşov. U.P. IV. Braşov. IRISILVA.
69. Jacobsen, K. (2017). Problems and limitations of satellite image orientation for determination of height models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(1W1). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-257-2017>
70. Jagodziński, A. M., Dyderski, M. K., & Horodecki, P. (2020). Differences in biomass production and carbon sequestration between highland and lowland stands of *Picea abies* (L.) H. Karst.

- and *Fagus sylvatica* L. *Forest Ecology and Management*, 474. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118329>
71. JOHN GRACE, K BERNINGER, LASZLO NAGY, Impacts of Climate Change on the Tree Line, *Annals of Botany*, Volume 90, Issue 4, 1 October 2002, Pages 537–544, <https://doi.org/10.1093/aob/mcf222>
 72. Jouve, L., Jacques, D., Douglas, G. C., Hoffmann, L., & Hausman, J. F. (2007). Biochemical characterization of early and late bud flushing in common ash (*Fraxinus excelsior* L.). *Plant Science*, 172(5). <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2007.02.008>
 73. Kassambara A (2023). ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots. R package version 0.6.0, <https://rpkgs.datanovia.com/ggpubr/>.
 74. Kassambara, A. and Mundt, F. (2020) Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package Version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
 75. Kawashima, S., & Nakatani, M. (1998). An Algorithm for Estimating Chlorophyll Content in Leaves Using a Video Camera. *Annals of Botany*, 81(1), 49–54. <https://doi.org/10.1006/ANBO.1997.0544>
 76. Kembrytė, R., Danusevičius, D., Baliuckas, V., & Buchovska, J. (2022). Phenology Is Associated with Genetic and Stem Morphotype Variation in European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Stands. *Forests*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/f13050664>
 77. Kerr, G., & Boswell, R. C. (2001). The influence of spring frosts, ash bud moth (*Prays fraxinella*) and site factors on forking of young ash (*Fraxinus excelsior*) in southern Britain. *Forestry*, 74(1). <https://doi.org/10.1093/forestry/74.1.29>
 78. Kirk, C., & Berrill, J. P. (2016). Second-log branching in multiaged redwood and douglas-fir: Influence of stand, site, and silviculture. *Forests*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/f7070147>
 79. Kitamoto, N., Ueno, S., Takenaka, A., Tsumura, Y., Washitani, I., & Ohsawa, R. (2006). Effect of flowering phenology on pollen flow distance and the consequences for spatial genetic structure within a population of *Primula sieboldii* (Primulaceae). *American Journal of Botany*, 93(2). <https://doi.org/10.3732/ajb.93.2.226>
 80. Klosterman, S., & Richardson, A. D. (2017). Observing spring and fall phenology in a deciduous forest with aerial drone imagery. *Sensors (Switzerland)*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/s17122852>
 81. Knutzen, F., Meier, I. C., & Leuschner, C. (2015). Does reduced precipitation trigger physiological and morphological drought adaptations in European beech (*Fagus sylvatica* L.)? Comparing provenances across a precipitation gradient. *Tree Physiology*, 35(9). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv057>
 82. Konnerth, M. (1995). Investigations on the genetic variation of beech (*Fagus sylvatica* L.) in Bavaria. *Silvae Genetica*, 44(5–6).

83. Krokene, P., Lahr, E., Dalen, L. S., Skrøppa, T., & Solheim, H. (2011). Effect of phenology on susceptibility of Norway spruce (*Picea abies*) to fungal pathogens. *Plant Pathology*, 61(1). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02487.x>
84. Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583–621. <https://doi.org/10.2307/2280779>
85. Kubisiak T., Carey D., Burdine C., Koch J., 2009. Characterization of ten EST-based polymorphic SSR 2 loci isolated from American beech, *Fagus grandifolia* Ehrh. Permanent Genetic Resources Note Added to Mol Ecol Resour 9(6):1460-1466. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2009.02759.x>
86. Kuhn, Max (2008). "Building Predictive Models in R Using the caret Package." *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1–26. <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v028i05>
87. Lebeda, A. (1983). The Genera and Species Spectrum of Cucumber Powdery Mildew in Czechoslovakia. *Journal of Phytopathology*, 108(1). <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1983.tb00565.x>
88. Leimu, R., Mutikainen, P., Koricheva, J., & Fischer, M. (2006). How general are positive relationships between plant population size, fitness and genetic variation? In *Journal of Ecology* (Vol. 94, Issue 5). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01150.x>
89. Leuschner, C. (2020). Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.)—A review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2020.125576>
90. Leuschner, C., & Ellenberg, H. (2017). Ecology of Central European Forests: Vegetation Ecology of Central Europe. In *Ecology of Central European Forests: Vegetation Ecology of Central Europe* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43042-3>
91. Leuschner, C., Meier, I. C., & Hertel, D. (2006). On the niche breadth of *Fagus sylvatica*: Soil nutrient status in 50 Central European beech stands on a broad range of bedrock types. *Annals of Forest Science*, 63(4). <https://doi.org/10.1051/forest:2006016>
92. Li, Y., Suontama, M., Burdon, R. D., & Dungey, H. S. (2017). Genotype by environment interactions in forest tree breeding: review of methodology and perspectives on research and application. In *Tree Genetics and Genomes* (Vol. 13, Issue 3). <https://doi.org/10.1007/s11295-017-1144-x>
93. Louhaichi, M., Borman, M. M., & Johnson, D. E. (2001). Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>
94. Magri, D., Vendramin, G. G., Comps, B., Dupanloup, I., Geburek, T., Gömöry, D., Latałowa, M., Litt, T., Paule, L., Roure, J. M., Tantau, I., van der Knaap, W. O., Petit, R. J., & de Beaulieu, J. L. (2006). A new scenario for the Quaternary history of European beech populations:

- Palaeobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist*, 171(1). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01740.x>
95. Mărgălinescu, A. & Irimin, A. (2016). Amenajamentul fondului forestier proprietate publică a Municipiului Braşov, administrat de R.P.L.P. Kronstadt R.A., judeţul Braşov. U.P. V. Râul Mic. IRISILVA.
 96. Mátyás, C., Berki, I., Czúcz, B., Gálos, B., Móricz, N., & Rasztovits, E. (2010). Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 6. <https://doi.org/10.37045/aslh-2010-0007>
 97. McKinney, L. v., Nielsen, L. R., Hansen, J. K., & Kjær, E. D. (2011). Presence of natural genetic resistance in *Fraxinus excelsior* (Oleraceae) to *Chalara fraxinea* (Ascomycota): An emerging infectious disease. *Heredity*, 106(5). <https://doi.org/10.1038/hdy.2010.119>
 98. McKown, A. D., Klápště, J., Guy, R. D., El-Kassaby, Y. A., & Mansfield, S. D. (2018). Ecological genomics of variation in bud-break phenology and mechanisms of response to climate warming in *Populus trichocarpa*. *New Phytologist*, 220(1). <https://doi.org/10.1111/nph.15273>
 99. McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4). [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
 100. Menamo, T., Kassahun, B., Borrell, A. K., Jordan, D. R., Tao, Y., Hunt, C., & Mace, E. (2021). Genetic diversity of Ethiopian sorghum reveals signatures of climatic adaptation. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(2). <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03727-5>
 101. Menzel, A. (2003). Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 57(3). <https://doi.org/10.1023/A:1022880418362>
 102. Mitton, J. B., & Pierce, B. A. (1980). The distribution of individual heterozygosity in natural populations. *Genetics*, 95(4). <https://doi.org/10.1093/genetics/95.4.1043>
 103. Moning, C., & Müller, J. (2009). Critical forest age thresholds for the diversity of lichens, molluscs and birds in beech (*Fagus sylvatica* L.) dominated forests. *Ecological Indicators*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.11.002>
 104. Müller-Starck G., Starke R., 1993. Inheritance of Isoenzymes in European Beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Heredity* 84(4):291–296. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a111341>
 105. Nedelcov, M., Donica, A., & Grigoraş, N. (2018). Expunerea ecosistemelor forestiere către aridizarea climei Republicii Moldova (studii de caz). *Revista de Silvicultură şi Cinegetică*, 23(43): 58-64.
 106. Neuwirth, E. (2014) RColorBrewer: ColorBrewer Palettes. R Package Version 1.1-3. <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>
 107. Nicolescu, V.-N., Carvalho, J., Hochbichler, E., Bruckman, V. J., Piqué, M., Hernea, C., Viana, H., Štochlová, P., Ertekin, M., Đodan, M., Dubravac, T., Vandekerckhove, K., Kofman, P. D.,

- Rossney, D., & Unrau, A. (2017). Silvicultural Guidelines for European Coppice Forests. *Silviculture*, 7.
108. OneWireViewer software <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/1-wire-sdks/download-1wire-ibutton-drivers.html> (accesat în 15.12.2021)
 109. OpenDroneMap. WebODM: Drone Mapping Software (Version 1.1.0). <https://www.opendronemap.org/webodm/> (accesat în data de 01.03.2021)
 110. Palaghianu, C. (2009). Researches on forests regeneration by informatical tools. Universitatea " Ștefan cel Mare", Suceava, Romania. Teză de doctorat (în limba română).
 111. Park, J. Y., Muller-Landau, H. C., Lichstein, J. W., Rifai, S. W., Dandois, J. P., & Bohlman, S. A. (2019). Quantifying leaf phenology of individual trees and species in a tropical forest using unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Remote Sensing*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/rs11131534>
 112. Pascu, I. S., Dobre, A. C., Badea, O., & Tănase, M. A. (2019). Estimating forest stand structure attributes from terrestrial laser scans. *Science of the Total Environment*, 691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.536>
 113. Pastorelli, R., Smulders, M. J. M., Van'T Westende, W. P. C., Vosman, B., Giannini, R., Vettori, C., & Vendramin, G. G. (2003). Characterization of microsatellite markers in *Fagus sylvatica* L. and *Fagus orientalis* Lipsky. *Molecular Ecology Notes*, 3(1). <https://doi.org/10.1046/j.1471-8286.2003.00355.x>
 114. Pearson, R. L., Miller, L. D., & Tucker, C. J. (1976). Hand held spectral radiometer to estimate gramineous biomass. *Applied Optics*, 15(2). <https://doi.org/10.1364/AO.15.000416>
 115. Penanhoat A., Guerrero Ramirez N., Aubry-Kientz M. et al., 2024. Effect of competition intensity and neighbor identity on architectural traits of *Fagus sylvatica*. *Trees* 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02544-3>
 116. Peterson, B.G.; Carl, P.; Boudt, K.; Bennett, R.; Ulrich, J.; Zivot, E.; Cornilly, D.; Hung, E.; Lestel, M.; Balkissoon, K.; et al. Package 'performance analytics'. R Team Coop. 2018, 3, 13–14. <https://github.com/braverock/PerformanceAnalytics>
 117. PIX4Dmapper: Professional Photogrammetry Software for Drone Mapping. <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/> (accesat în data de 26.11.2022)
 118. Popescu, R., & Sofletea, N. (2020). Spring and autumn phenology in sub-mesothermal beech stands from the southwestern extremity of the Carpathians. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(2). <https://doi.org/10.15835/nbha48211897>
 119. Pramreiter, M., & Grabner, M. (2023). The Utilization of European Beech Wood (*Fagus sylvatica* L.) in Europe. In *Forests* (Vol. 14, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/f14071419>
 120. Prasad, A., Pedlar, J., Peters, M., Matthews, S., Iverson, L., McKenney, D., & Adams, B. (2024). Understanding climate change dynamics of tree species: Implications for future forests. In *Future Forests* (pp. 151-175). Elsevier.

121. Preite, V., Stöcklin, J., Armbruster, G. F. J., & Scheepens, J. F. (2015). Adaptation of flowering phenology and fitness-related traits across environmental gradients in the widespread *Campanula rotundifolia*. *Evolutionary Ecology*, 29(2). <https://doi.org/10.1007/s10682-015-9754-y>
122. QGIS. QGIS Project 3.26.3. 2017. <https://www.qgis.org/nl/site/> (accesat în data de 01.03.2021)
123. R Project for Statistical Computing. R Version 4.1.3, Released on 10.03.2022. <https://www.r-project.org/> (accesat în 31.03.2022)
124. Rajendra, K. C., Seifert, S., Prinz, K., Gailing, O., & Finkeldey, R. (2014). Subtle human impacts on neutral genetic diversity and spatial patterns of genetic variation in European beech (*Fagus sylvatica*). *Forest Ecology and Management*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.003>
125. Rezultate IFN—Ciclul II; National Forest Inventory (IFN) Forest Resources Assessment in Romania: Bucuresti, Romania, 2018; Available online: <https://roifn.ro/site/rezultate-ifn-2/> (accessed on 28 February 2024).
126. Rigo, D., Caudullo, G., & Houston, T. (2016). *Fagus sylvatica* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *European Atlas of Forest Tree Species*. Disponibil online: https://www.researchgate.net/publication/299468838_Fagus_sylvatica_in_Europe_distribution_habitat_usage_and_threats (accesat în 28 Februarie 2024).
127. Robert J. Hijmans & Jacob van Etten (2012). raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2.0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=raster>
128. Rodríguez-Quilón, I., Santos-del-Blanco, L., Grivet, D., Jaramillo-Correa, J. P., Majada, J., Vendramin, G. G., Alía, R., & González-Martínez, S. C. (2015). Local effects drive heterozygosity–fitness correlations in an outcrossing long-lived tree. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1820). <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.2230>
129. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA special publication. *NASA Special Publication*, 24(1). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614> (accesat în 01.06.2021)
130. Sánchez-Azofeifa, A., Rivard, B., Wright, J., Feng, J. L., Li, P., Chong, M. M., & Bohlman, S. A. (2011). Estimation of the distribution of *Tabebuia guayacan* (Bignoniaceae) using high-resolution remote sensing imagery. *Sensors*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/s110403831>
131. Schaberg, P. G., DeHayes, D. H., Hawley, G. J., & Nijensohn, S. E. (2008). Anthropogenic alterations of genetic diversity within tree populations: Implications for forest ecosystem resilience. In *Forest Ecology and Management* (Vol. 256, Issue 5). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.038>
132. Schieber, B. (2006). Spring phenology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a submountain beech stand with different stocking in 1995–2004. *Journal of Forest Science*, 52(5). <https://doi.org/10.17221/4503-jfs>

133. Schieber, B., Janík, R., & Snopková, Z. (2013). Phenology of common beech (*Fagus sylvatica* L.) along the altitudinal gradient in Slovak Republic (Inner Western Carpathians). *Journal of Forest Science*, 59(4). <https://doi.org/10.17221/82/2012-jfs>
134. Schieber, B., Kubov, M., & Janík, R. (2017). Effects of climate warming on vegetative phenology of the common beech *Fagus sylvatica* in a submontane forest of the Western Carpathians: Two-decade analysis. *Polish Journal of Ecology*, 65(3). <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2017.65.3.003>
135. SHAPIRO, S. S., & WILK, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
136. Șofletea, N., Curtu, L. A. (2007). *Dendrologie*. Editura Universității "Transilvania".
137. Stănescu, V., Șofletea, N., & Popescu, O. C. (1997). *Flora forestiera lemnoasa a Romaniei*. Ceres.
138. Ștefan, C. (2018). Amenajamentul fondului forestier proprietate publică aparținând comunei Sânpetru, județul Brașov. U.P. I. SÂNPETRU. R.P.L.P. Măieruș R.A. SC. Amenajări Silvice Ștefan S.R.L.
139. Suni, S. S., & Whiteley, A. R. (2015). Genetic structure of a montane perennial plant: the influence of landscape and flowering phenology. *Conservation Genetics*, 16(6). <https://doi.org/10.1007/s10592-015-0751-z>
140. Szulkin, M., Bierne, N., & David, P. (2010). Heterozygosity-fitness correlations: A time for reappraisal. *Evolution*, 64(5). <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2010.00966.x>
141. Toh K. C., Todd M. J., Tütüncü R. H., 1999. SDPT3—a MATLAB software package for semidefinite programming, version 1.3. *Optimization methods and software*, 11(1-4), 545-581.
142. Tomșa, V. R., Curtu, A. L., & Niță, M. D. (2021). Tree shape variability in a mixed oak forest using terrestrial laser technology: Implications for mating system analysis. *Forests*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/f12020253>
143. van Asch, M., van Tienderen, P. H., Holleman, L. J. M., & Visser, M. E. (2007). Predicting adaptation of phenology in response to climate change, an insect herbivore example. *Global Change Biology*, 13(8). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01400.x>
144. Vitasse, Y., Delzon, S., Dufrêne, E., Pontailier, J. Y., Louvet, J. M., Kremer, A., & Michalet, R. (2009). Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(5). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.019>
145. von Wühlisch G. 2008. EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for European beech (*Fagus sylvatica*). Biodiversity International, Rome, Italy. 6 pages.
146. Vornam, B., Decarli, N., & Gailing, O. (2004). Spatial distribution of genetic variation in a natural beech stand (*Fagus sylvatica* L.) based on microsatellite markers. *Conservation Genetics*, 5(4). <https://doi.org/10.1023/B:COGE.0000041025.82917.ac>

147. Wang, Y., Titus, S. J., & LeMay, V. M. (1998). Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixedwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(8). <https://doi.org/10.1139/x98-092>
148. Wang, Y., Wang, D., Shi, P., & Omasa, K. (2014). Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. *Plant Methods*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/1746-4811-10-36>
149. Wei T, Simko V (2021). *R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix*. (Version 0.92), <https://github.com/taiyun/corrplot>.
150. Westergren, M., Archambeau, J., Bajc, M., Damjanić, R., Theraroz, A., Kraigher, H., Oddou-Muratorio, S., & González-Martínez, S. C. (2023). Low but significant evolutionary potential for growth, phenology and reproduction traits in European beech. *Molecular Ecology*, n/a(n/a). <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/mec.17196>
151. Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.
152. Wickham H, François R, Henry L, Müller K, Vaughan D (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.4, <https://github.com/tidyverse/dplyr>, <https://dplyr.tidyverse.org>.
153. Wickham H, Girlich M (2022). *tidyr: Tidy Messy Data*. <https://tidyr.tidyverse.org>, <https://github.com/tidyverse/tidyr>.
154. Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995). Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 38(1). <https://doi.org/10.13031/2013.27838>
155. Xiong, J. S., Isik, F., McKeand, S. E., & Whetten, R. W. (2010). Genetic variation of stem forking in loblolly pine. *Forest Science*, 56(5). <https://doi.org/10.1093/forestscience/56.5.429>
156. Zafarian, E., Ebrahimi, A., Boroujeni, E. A., & Surki, A. A. (2019). Required growing degree-days (GDDs) for each phenological stage of *Fritillaria imperialis*. *Journal of Rangeland Science*, 9(1).
157. Zarco-Tejada, P. J., Berjón, A., López-Lozano, R., Miller, J. R., Martín, P., Cachorro, V., González, M. R., & de Frutos, A. (2005). Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, 99(3), 271–287. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2005.09.002>
158. Zlatník, Alois. *Lesnická fytoecologie: Příručka pro lesnické fak.* SZN, 1978. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Lesnick%C3%A1%20fytoecologie&publication_year=1978&author=Zlatn%C3%ADk%2CA. (accesat pe data de 13.10.2022).
159. Zohner, C.M.; Renner, S.S.; Sebald, V.; Crowther, T.W. How Changes in Spring and Autumn Phenology Translate into Growth-Experimental Evidence of Asymmetric Effects. *J. Ecol.* 2021, 109, 2717–2728. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13682>

