

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: Silvicultură și Exploataři Forestiere

Ing. Albert CICEU

**Dezvoltarea unui model privind creşterea arborilor și
producția arboretelor reprezentative din Parcul Național
Retezat**

**Developing an individual tree-growth and yield model for
representative stands in Retezat National Park**

REZUMAT/ABSTRACT

Conducător științific

CS I. dr. ing. Nicolae Ovidiu BADEA

Membru corespondent al Academiei Române

BRAȘOV, 2022



D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov

Nr. din

Prof. dr. ing. Alexandru Lucian CURTU	Preşedinte, Universitatea Transilvania din Braşov
Prof. dr. ing. Nicolae Ovidiu BADEA	Conducător științific, Universitatea Transilvania din Braşov
CS I. dr. ing. Ioan SECELEANU	Referent oficial, Academia de științe Agricole și Silvice "Gheorghe Ionescu-Sisești"
Prof. dr. ing. Iosif VOROVENCII	Referent oficial, Universitatea Transilvania din Braşov
CS I. dr. ing. Ionel POPA	Referent oficial, Institutul Național de Cercetare Dezvoltare în Silvicultură "Marin Drăcea"

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat:, ora, online

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa Albert.Ciceu@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

CUPRINS

	Pg. teză	Pg. rezumat
1. INTRODUCERE	11	13
2. SCOP ŞI OBIECTIVE	13	15
2.1. Scop	13	15
2.2. Obiective	13	15
3. METODOLOGIE	14	16
3.1 Localizarea cercetărilor	14	16
3.2. Reţeaua de cercetare din Parcul Naţional Retezat	14	16
3.2.1 Caracteristicile reţelei de cercetare	15	16
3.2.2 Inventarierea reţelei de cercetare	15	17
3.3 Determinarea formei curbei de distribuţie a numărului de arbori pe categorii de diametre	18	17
3.4 Modelarea şi predicţia distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre	19	17
3.4.1 Distribuţia teoretică Weibull 2P şi Weibull 2P trunchiat la stânga	21	18
3.4.2 Metoda prezicerii parametrilor (PPM)	22	18
3.4.3 Metoda recuperării parametrilor (PRM)	26	19
3.4.4 Evaluarea funcţiilor şi a metodelor folosite	26	19
3.5 Curba înălţimilor şi curba generalizată a înălţimilor	28	20
3.5.1 Funcţia simplă a relaţiei înălţime-diametru	28	20
3.5.2 Validarea şi evaluarea modelelor	30	20
3.5.3 Variabile adiţionale la nivel de arbore şi arboret	31	21
3.5.4 Curba generalizată a înălţimilor folosind regresia mixtă	37	21
3.5.4.1 Calibrarea parametrilor ficşi ai curbei generalizate a înălţimilor	38	22
3.5.4.2 Calibrarea parametrilor aleatori ai curbei generalizate a înălţimilor	38	22



3.5.5 Curba înălţimilor folosind regresia cuantilelor.....	39	23
3.5.6 Stabilirea celei mai precise proceduri de calibrare.....	40	23
3.6 Modele de creştere în diametru.....	41	24
3.6.1 Informaţii utilizate.....	41	24
3.6.2 Modelul dinamic de creştere în diametru la nivel de arbore.....	44	24
3.6.3 Dezvoltarea modelului de creştere în diametru folosind ecuaţiile independente de vârstă scrise sub forma diferenţei algebrice a ecuaţiilor.....	47	25
3.6.4 Indicele creşterii în diametru.....	48	26
3.6.5 Evaluarea şi validarea modelelor de creştere în diametru.....	49	26
3.7 Modelul de mortalitate şi recrutare a arborilor.....	50	27
3.7.1 Modelul de mortalitate.....	50	27
3.7.2 Modelul de recrutare.....	50	27
3.8 Modelul de predicţie a volumului.....	51	27
3.8.1 Predicţia creşterii în volum a arborilor şi arboretelor.....	51	27
3.8.2 Predicţia volumului arboretelor prin metoda recuperării parametrilor şi a curbei generalizate a înălţimilor.....	51	28
3.9 Modelul de simulare a creşterii arborilor şi arboretelor şi a producţie acestora.....	52	28
4. REZULTATE ŞI DISCUŢII	55	31
4.1. Informaţii generale obţinute în urma inventarierii reţelei sistematice.....	55	31
4.2. Caracteristici generale privind distribuţia numărului de arbori pe categorii de diametre.....	56	31
4.3 Forma distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre în arboretele cercetate din Parcul Naţional Retezat.....	58	32
4.4 Metode de predicţie a distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre.....	59	32
4.4.1 Predicţia distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre prin metoda prezicerii parametrilor (PPM).....	60	32

4.4.2 Predicţia distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre prin metoda recuperării parametrilor (PRM).....	64	34
4.4.3 Evaluarea funcţiilor şi a metodelor folosite.....	65	35
4.4.4 Testarea celor mai bune metode PPM şi PRM în suprafeţe de cercetare reprezentative noi din Parcul Naţional Retezat.....	67	35
4.4.5 Analiza modelelor de predicţie a distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre.....	71	/
4.5 Modelul de predicţie a înălţimii arborilor.....	72	38
4.5.1 Modelul de predicţie a înălţimii arborilor pentru specia molid.....	73	38
4.5.1.1 Modelul înălţime-diametru pentru specia molid.....	73	38
4.5.1.2 Corelaţia variabilelor adiţionale cu parametri funcţiei simple folosită pentru modelarea relaţiei înălţime-diametru.....	76	39
4.5.1.3 Curba simplă a înălţimilor pentru specia molid folosind regresia neliniară mixtă.....	79	41
4.5.1.4 Curba generalizată a înălţimilor pentru specia molid folosind regresia neliniară mixtă.....	82	42
4.5.1.5 Curba generalizată a înălţimilor pentru specia molid folosind regresia cuantilelor.....	85	43
4.5.2 Modelul de predicţie a înălţimii arborilor pentru specia fag, brad şi grupele de specii diverse tari, diverse moi şi diverse răşinoase.....	88	44
4.5.2.1 Modelul înălţime-diametru de bază pentru specia fag, brad şi grupele de specii diverse tari, diverse moi şi diverse răşinoase.....	88	44
4.5.2.2 Curba simplă a înălţimilor pentru specia fag, brad şi grupele de specii diverse tari, diverse moi şi diverse răşinoase folosind regresia neliniară mixtă.....	89	45
4.5.3 Calibrarea modelelor înălţime-diametru pentru o suprafaţă nouă folosind un număr redus de observaţii.....	90	45

4.5.4 Analiza modelelor înălţime-diametru dezvoltate.....	93	/
4.5.4.1 Tipul şi forma funcţiilor.....	93	/
4.5.4.2 Generalizarea modelelor înălţime diametru.....	95	/
4.5.4.3 Strategia de calibrare a modelelor înălţime-diametru.....	97	/
4.6 Modelul de creştere în diametru.....	98	46
4.6.1 Modelul dinamic de creştere în diametru la nivel de arbore.....	98	46
4.6.1.1 Validarea modelelor dinamice de creştere în diametru.....	103	47
4.6.1.2 Calibrarea modelelor dinamice de creştere în diametru.....	103	48
4.6.2 Modelul de creştere în diametru la nivel de arbore dezvoltat folosind ecuaţiile independente de vârstă scrise sub forma diferenţei algebrice a ecuaţiilor.....	107	48
4.6.2.1 Indicele creşterii în diametru.....	107	48
4.6.2.2 Dezvoltarea modelului de creştere în diametru.....	109	49
4.6.3 Compararea modelelor de creştere în diametru dezvoltate.....	113	50
4.6.4 Analiza modelelor de creştere în diametru dezvoltate.....	114	/
4.6.4.1 Modelul dinamic de creştere în diametru la nivel de arbore.....	114	/
4.6.4.2 Calibrarea modelului dinamic de creştere în diametru.....	115	/
4.6.4.3 Indicele creşterii în diametru.....	116	/
4.6.4.4 Modelul de creştere în diametru bazat pe ecuaţiile independente de vârstă scrise sub forma diferenţei algebrice a ecuaţiilor....	117	/
4.7 Modelul de mortalitate şi recrutare a arborilor.....	118	51
4.7.1 Modelul de mortalitate.....	118	51
4.7.2 Modelul de recrutare.....	119	52
4.8 Modelul de predicţie a volumului şi creşterii în volum a arborilor şi arboretelor.....	120	52
4.8.1 Volumul pe picior al arboretelor din reţeaua sistematică de inventariere.....	120	52



4.8.2 Metoda recuperării parametrilor și a curbei generalizate a înălțimilor pentru determinarea volumului pe picior al arboretelor.....	120	53
4.9 PROgnoza Creșterii arbOrilor și arboretelor și a proDucției acestora pRin simUlare (PROCODRU).....	125	55
4.9.1 Validarea modelului de simulare.....	125	55
4.9.2 Simularea creșterii și producției arboretelor folosind modelul PROCODRU.....	126	57
5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.	130	59
5.1 Concluzii.....	130	59
5.2 Contribuții originale.....	134	63
5.3 Direcții viitoare de cercetare.....	135	/
5.4 Diseminarea rezultatelor.....	136	64
BIBLIOGRAFIE	138	66
SCURT REZUMAT	147	74

CONTENT

	Pg. thesis	Pg. abstract
1. INTRODUCTION	11	13
2. AIM AND OBJECTIVES	13	15
2.1. Aim	13	15
2.2. Objectives	13	15
3. METHODOLOGY	14	16
3.1 Location	14	16
3.2. The permanent sampling network in the Retezat National Park	14	16
3.2.1 Characteristics of the permanent sampling network	15	16
3.2.2 Sampling methodology	15	17
3.3 Determining the shape of the tree diameter distribution	18	17
3.4 Modelling and predicting the tree diameter distribution	19	17
3.4.1 Weibull 2P and left truncated Weibull 2P theoretical distribution	21	18
3.4.2 Parameter prediction method (PPM)	22	18
3.4.3 Parameter recovery method (PRM)	26	19
3.4.4 Evaluation of the theoretical functions and methods used	26	19
3.5 Height-diameter model and generalized height-diameter model	28	20
3.5.1 Base function of the height-diameter model	28	20
3.5.2 Validation and evaluation of the methods used	30	20
3.5.3 Additional tree level and stand level variables	31	21
3.5.4 Generalized nonlinear mixed-effects height-diameter model	37	21
3.5.4.1 Calibration of the fixed-effects generalized height-diameter model	38	22
3.5.4.2 Calibration of the random-effects generalized height-diameter model	38	22



3.5.5 The height-diameter model using quantile regression.....	39	23
3.5.6 Establishing the most accurate calibration procedure.....	40	23
3.6 Diameter increment models.....	41	24
3.6.1 Data.....	41	24
3.6.2 Dynamic individual tree diameter increment model.....	44	24
3.6.3 Diameter increment model using age-independent difference equations...	47	25
3.6.4 Diameter growth index.....	48	26
3.6.5 Validation and evaluation of the methods used.....	49	26
3.7 Tree mortality and recruitment model.....	50	27
3.7.1 Mortality model.....	50	27
3.7.2 Recruitment model.....	50	27
3.8 Volume prediction model.....	51	27
3.8.1 Tree and stand growth prediction.....	51	27
3.8.2 Stand volume prediction using the parameter recovery method and the generalized height-diameter model.....	51	28
3.9 Individual tree growth model.....	52	28
4. RESULTS AND DISCUSSION	55	31
4.1. General information obtained from the permanent systematic network inventory.....	55	31
4.2. General characteristics of the tree diameter distribution of the Retezat National Park stands.....	56	31
4.3 Tree diameter distribution shape in the researched stands of the Retezat National Park.....	58	32
4.4 Methods for predicting tree diameter distribution.....	59	32
4.4.1 Tree diameter distribution prediction using the parameter prediction method (PPM).....	60	32

4.4.2 Tree diameter distribution prediction using the parameter recovery method (PRM).....	64	34
4.4.3 Evaluation of the functions and methods used.....	65	35
4.4.4 Testing the best PPM and PRM methods in new representative research areas in the Retezat National Park.....	67	35
4.4.5 Analysis of tree diameter distribution prediction methods.....	71	/
4.5 Tree height prediction model.....	72	38
4.5.1 Tree height prediction model for spruce.....	73	38
4.5.1.1 Height-diameter model for spruce.....	73	38
4.5.1.2 Correlation between additional stand variables and the base height-diameter model parameters.....	76	39
4.5.1.3 Simple nonlinear mixed effects height-diameter model for spruce.....	79	41
4.5.1.4 Generalized nonlinear mixed-effects height-diameter model for spruce.....	82	42
4.5.1.5 Generalized height-diameter model for spruce using quantile regression.....	85	43
4.5.2 Tree height prediction model for European beech, silver fir, other hard broadleaves, other soft broadleaves and other conifers species.....	88	44
4.5.2.1 Height-diameter base model for European beech, silver fir, other hard broadleaves, other soft broadleaves and other conifers species.....	88	44
4.5.2.2 Simple nonlinear mixed effects height-diameter model for European beech, silver fir, other hard broadleaves, other soft broadleaves and other conifers species.....	89	45
4.5.3 Calibration of height-diameter models for a new plot using a reduced number of observations.....	90	45
4.5.4 An analysis of the height-diameter models developed.....	93	/
4.5.4.1 Type and form of the height-diameter functions.....	93	/

4.5.4.2 Generalization of the height-diameter models.....	95	/
4.5.4.3 Calibration strategy for height-diameter models.....	97	/
4.6 Tree diameter increment model.....	98	46
4.6.1 Dynamic individual tree diameter increment model.....	98	46
4.6.1.1 Validation of the dynamic diameter increment models.....	103	47
4.6.1.2 Calibration of the dynamic diameter increment models.....	103	48
4.6.2 Diameter increment model developed using the age-independent difference equations.....	107	48
4.6.2.1 Diameter increment index.....	107	48
4.6.2.2 Development of the diameter increment model.....	109	49
4.6.3 Comparison between the diameter increment models developed.....	113	50
4.6.4 Analysis of the diameter increment models developed.....	114	/
4.6.4.1 Dynamic individual tree diameter increment model.....	114	/
4.6.4.2 Calibration of the dynamic diameter increment model.....	115	/
4.6.4.3 Diameter increment index.....	116	/
4.6.4.4 Diameter increment model developed using the age-independent difference equations.....	117	/
4.7 Tree mortality and recruitment model.....	118	51
4.7.1 Mortality model.....	118	51
4.7.2 Recruitment model.....	119	52
4.8 Tree growth and stand volume prediction model.....	120	52
4.8.1 Standing volume of the stands in the systematic inventory network.....	120	52
4.8.2 Parameter recovery and the generalized height-diameter method for standing volume prediction.....	120	53
4.9 Prognosis of the individual tree growth and yield through simulation (PROCODRU).....	125	55
4.9.1 Validation of the simulation model.....	125	55

4.9.2 Simulation of stand growth and yield using the PROCODRU model.....	126	57
5. CONCLUSIONS. ORIGINAL CONTRIBUTIONS. FUTURE RESEARCH DIRECTIONS.		
RESULTS DISSEMINATION	130	59
5.1 Conclusions.....	130	59
5.2 Original contributions.....	134	63
5.3 Future research directions.....	135	/
5.4 Results dissemination.....	136	64
BIBLIOGRAPHY	138	66
SHORT RESUME	147	74

1. INTRODUCERE

Managementul durabil al resurselor forestiere la nivel local, regional și național este condiționat de cunoașterea stării acestora, care depinde, în principal, de instrumentele disponibile pentru măsurarea și evaluarea lor. În prezent, în condițiile manifestării tot mai accentuate a fenomenelor asociate schimbărilor climatice, se impune utilizarea unor instrumente care să ofere factorilor de decizie capacitarea adoptării unor politici și strategii forestiere bine fundamentate și armonizate cu cele adoptate pe plan european și internațional.

Printre instrumentele de mare utilitate în cuantificarea stocurilor și a ratelor de sechestrare a carbonului de către păduri, modelele de prognoză a creșterii și producției arboretelor, oferă informațiile necesare pentru luarea deciziilor privind politicile forestiere și evaluarea potențialului impact al acțiunii schimbărilor climatice asupra ecosistemelor forestiere (Weiskittel et al. 2011). Toate modelele de prognoză a dezvoltării vegetației forestiere sunt o abstractizare a realității obținută prin conceptualizarea relațiilor cheie ale ecosistemului folosind date empirice și noțiuni ecologice.

Primul și poate unul dintre cele mai importante modelele de prognoză a creșterii și producției arboretelor este modelul tabelelor de producție. Acesta oferă o imagine a dezvoltării arboretului în timp, fiind destinat arboretelor pure cu o structură echienă.

Tabelele de producție au fost dezvoltate pentru a evalua, organiza și planifica gospodărirea pădurilor, asigurând continuitatea ecosistemului forestier. Acestea au fost adoptate la scară mondială ca instrumente esențiale în amenajarea pădurilor. Așa cum au fost ele dezvoltate, tabelele de producție au o flexibilitate limitată, fiind aplicabile doar pentru arboretelor pure echiene. Pentru a depăși aceste limitări a fost necesară o schimbare de paradigmă în ceea ce privește modelarea creșterii și producției arboretelor. În 1964, Newnham și Smith dezvoltă primul model la nivel de arbore aplicabil inclusiv pădurilor amestecate și a celor cu o structură complexă. În scurt timp, acest tip de model a luat amploare pe plan mondial iar până în 1980 Ek & Dudek raportează peste 40 de modele de acest gen destinate arboretelor de diferite structuri și amestecuri dezvoltate în toată lumea.

Astfel, în următoarele decenii, atenția biometriștilor s-a îndepărtat de la dezvoltarea modelelor matematice care se referă la întreg arboretul și s-a îndreptat spre modele care simulează și proiectează caracteristicile biometrice la nivel de arbore. Modelele la nivel de arbore au înlocuit cu timpul tabelele de producție clasice, având o aplicabilitate și flexibilitate mai mare decât acestea din urmă (Wykoff et al. 1982a; Monserud et al. 1997; Pretzsch 2002; Hasenauer et al. 2006; Hamidi et al. 2021; Pretzsch et al. 2022).

Modelele statistice de simulare-proiectare a creșterii arborilor sau „Individual Tree Growth Models” se referă la mărirea dimensiunilor fiecărui arbore în particular, folosind tehnici de regresie și date empirice. Aceste modele au capacitatea de a simula și proiecta apariția, creșterea și moartea fiecărui arbore din arboret (Dale et al. 1985). Relațiile statistice dezvoltate fac legătura matematică

între creşterea arborilor și variabile care cuantifică competiția inter și intraspecifică, condițiile staționale și influența intervențiilor silviculturale.

Modele de creștere la nivel de arbore sunt mai departe utilizate în simulatoare de creștere și producție a arboretelor prin care se pot simula diferite scenarii ale gospodării pădurilor asigurându-se astfel un management adaptativ și dinamic al fondului de producție (de Wergifosse et al. 2022). Simulările desfășurate pot indica cel mai bun tip de gospodărire pentru a maximiza funcțiile urmărite (producție sau protecție) și de asemenea pot oferi prognoza veniturilor obținute prin eliminare sau păstrarea anumitor sortimente sau categorii de diametre în arboret (Pretzsch 2002).

Pădurile mixte de molid (*Picea abies* (L.) H. Karst), brad (*Abies alba* Mill.) și fag (*Fagus sylvatica* L.) acoperă peste 10 milioane de hectare în Europa (Hilmers et al. 2020a) și peste 200 de mii de hectare numai în România. Aceste păduri temperate sunt considerate mai rezistente și reziliente decât pădurile pure echine (Griess et al. 2012; Pretzsch et al. 2013, 2021) și în viitor se așteaptă că vor avea un rol esențial în atenuarea impactului schimbărilor climatice (Vacek et al. 2021). Strategiile de adaptare a pădurilor la schimbările climatice se vor baza, inclusiv, pe conversia arboretelor pure de molid în arborete mixte de molid, brad și fag (Hilmers et al. 2020b; Reventlow et al. 2021). Astfel, înțelegerea modului de dezvoltare al acestor arborete este esențială în contextul schimbărilor climatice.

Structura arboretelor amestecate de molid, brad și fag este de obicei una plurienă, acest tip de structură apare în mare parte datorită temperamentului de umbră și a complementarității acestor specii. Pădurile amestecate de molid, brad și fag au o productivitate mai ridicată decât pădurile echine (O'Hara 1998; Dănescu et al. 2016; Bauhus et al. 2017; Vacek et al. 2021), dar complexitatea lor structurală duce la o evaluare greoaie a creșterii și producției. Mai mult de atât, studii recente (Bosela et al. 2018; Pretzsch et al. 2020) demonstrează cum creșterea speciilor menționate mai sus s-a intensificat în ultimele trei secole, făcând modelele pentru evaluarea producției dezvoltate în trecut, perimate.

Aceste dificultăți au fost depășite în unele țări prin dezvoltarea modelelor individuale de creștere a arborilor care sunt capabile să ofere estimări precise inclusiv în arborete amestecate cu o structură complexă (Wykoff et al. 1982; Monserud et al. 1997; Pretzsch et al. 2002; Hasenauer et al. 2006).

Modelele individuale de creștere a arborilor lipsesc în acest moment în România, până în prezent atenția biometriștilor români îndreptându-se spre dezvoltarea tabelelor de producție (Popescu-Zeletin 1957; Giurgiu & Drăghiciu 2004).

Sunt necesare așadar, cercetări pentru dezvoltarea unor noi modele de prognoză a creșterii arborilor și arboretelor destinate cu precădere arboretelor amestecate cu o structură plurienă sau relativ plurienă.

Profitând de suprafețele permanente de monitorizare a stării de sănătate instalate în Parcul Național Retezat această lucrare își propune dezvoltarea primului model de creștere a arborilor și de producție a arboretelor din România, destinat arboretelor amestecate de molid, brad și fag cu o structură complexă.

2. SCOP ŞI OBIECTIVE

2.1 Scop

Pentru o gospodărire durabilă și eficientă a pădurilor amestecate, cu structură plurienă, sunt necesare modele precise și flexibile, de evaluare și prognoză a creșterii și producției acestor arborete. Luând în considerare lipsa acestor tipuri de modele în România, **scopul** cercetărilor desfășurate în această teză este acela de a dezvolta un model de prognoză privind creșterea arborilor și producția arboretelor amestecate de molid, brad și fag cu o structură complexă localizate în Parcul Național Retezat.

2.2 Obiective

Cercetărilor întreprinse au rolul de a oferi cunoștințe noi privind modelarea creșterii arborilor și arboretelor și a producției acestora prin metode moderne fundamentate statistic.

Obiectivele științifice formulate în vederea atingerii scopului urmărit sunt:

- stabilirea celei mai bune metode de determinare a parametrilor distribuției arborilor pe categorii de diametre;
- dezvoltarea unui model generalizat al relației înălțime-diametru;
- dezvoltarea unui model de creștere în diametru la nivel de arbore;
- dezvoltarea unui model de mortalitate la nivel de arbore;
- dezvoltarea unui model de recrutare a arborilor la nivel de suprafață de probă;
- îmbinarea modelelor construite într-un model de prognoză a creșterii arborilor și arboretelor și a producției acestora, prin simulare.

3. METODOLOGIE

3.1 Localizarea cercetărilor

Zona de cercetare este situată în partea de vest a Carpaţilor Meridionali în cadrul celui mai vechi dintre cele 14 parcuri naţionale înfiinţate în România, Parcul Naţional Retezat (PNR), legal constituit în 1935. Munţii Retezat fac parte din grupa montană Retezat-Godeanu iar crestele acestuia trec frecvent peste înălţimea de 2400 m, cel mai înalt vârf fiind vârful Peleaga (2509 m). În medie, altitudinea masivului este de 1444 m iar amplitudinea altimetrică este de aproximativ 2000 m.

Pădurile acoperă peste 45% din parc, fiind foarte bine reprezentate în etajul montan al vegetaţiei forestiere din Masivul Retezat. La baza masivului mai ales pe versanţi însoriţi se întâlnesc diseminat păduri de amestecate de Gorun (GO-*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) Tei (TE-*Tilia sp.*) şi Carpen (CA-*Carpinus betulus* L.). Făgetele pure urmează altitudinal, regăsindu-se mai ales în jurul altitudinii de 700 m. Pădurile de amestec de molid (MO), brad (BR) şi fag (FA) se observă la altitudini între 750 m şi 1300 m. Pădurile predominant pure de MO se regăsesc în etajul montan superior la peste 1300 m altitudine.

3.2 Reţeaua de cercetare din Parcul Naţional Retezat

Acoperind aproximativ 2772 ha din 38138 ha ocupate de parc, zona de studiu se întinde pe arii protejate si strict protejate, precum pădurile cvasivirgine ale rezervaţiei ştiinţifice Gemenele, aflate în proprietatea Academiei Române dar şi alte zone cu funcţii de protecţie a ecofondului şi genofondului forestier. Pe întreaga zonă de cercetare din cuprinsul Parcului Naţional Retezat, în 2015 a fost proiectată şi amplasată o reţea sistematică de cercetare, de către departamentul de biometrie a; Institutului Naţional de Cercetare Dezvoltare în Silvicultură "Marin Drăcea". Prin inventarierea periodică a reţelei de cercetare, pe termen lung cercetările au ca scop analiza dinamici creşterii arboretelor, monitorizarea stării de sănătate şi monitorizarea diversităţii biologice şi structurale ale arboretelor.

3.2.1 Caracteristicile reţelei de cercetare

Informaţiile biometrice ale arborilor şi arboretelor folosite în cadrul cercetărilor au fost obţinute în ani 2015 şi 2020 din inventarierea reţelei de cercetare (RC) proiectată şi amplasată în Parcul Naţional Retezat. Reţeaua de cercetare este compusă dintr-o reţea sistematică (RS) şi o reţea nesistematică (RN) de inventariere.

Dimensionare reţelei sistematice (numărul sondajelor şi distanţa dintre acestea) a fost realizată utilizând informaţii privind coeficientul de variaţie a volumului la nivelul arboretelor, calculat pe baza volumului arboretelor din amenajamentele silvice. Numărul de sondaje permanente necesar pentru a obţine o precizie de $\pm 10\%$ pentru un interval de încredere de 95%, şi un coeficient de variaţie a volumului de 50% , a fost calculat folosind relaţia 1.

$$n = \frac{F u^2 s_{\%}^2}{F \Delta^2 + u^2 s_{\%}^2} \quad (1)$$

unde n este numărul necesar de sondaje, F este aria zonei de studiu, u este intervalul de încredere impus $s_{\%}$ este coeficientul de variație a volumului și Δ este nivelul de precizie adoptat.

Astfel rețeaua statistică sistematică de inventariere are o desime de 400 x 400m (un sondaj la 16 ha) și un număr de 178 de sondaje permanente (SP). Rețea nesistematică a fost amplasată în arborete reprezentative pure și amestecate din cuprinsul Rezervației Naturale Gemenele (3 suprafețe experimentale, de formă pătrată - SE) cu aria de câte un hectar și patru astfel de suprafețe cu câte 5 suprafețe de probă permanente -SPP) în formă de cerc cu aria de 500 m², dispuse în cluster (în centru și pe direcția punctelor cardinale).

3.2.2 Inventarierea rețelei de cercetare

În RS, pentru fiecare SPP a fost stabilit în prealabil centrul SPP-ului și direcția nordului cu ajutorul unei busole. Toți arborii cu un diametru mai mare sau egal cu 8 cm au fost inventariați.

Caracteristicile determinate, estimate sau măsurate cu ocazia inventarierii și reinventarierii RC au fost: specia, azimutul, distanța, starea, circumferința, înălțimea totală, înălțimea coroanei, clasa pozițională, clasa Kraft sau etajul, clasa de calitate, procentul de defoliere și de decolorare a frunzișului coroanei și intensitatea vătămarilor fizice produse de diferiți factori biotici, abiotici și antropici.

3.3 Determinarea formei curbei de distribuție a numărului de arbori pe categorii de diametre

În arborete pluriene forma distribuție numărului de arbori pe categorii de diametre în scară semilogaritmică poate fi foarte ușor studiată cu ajutorul unui polinom de până la gradul trei. Această metodă este în special preferată în cazul suprafețelor de probă cu un număr redus de observații așa cum este și cazul de față. Aplicarea metodei presupune următorii pași (Janowiak, M. K., Nagel, L. M., & Webster 2008):

- Obținerea numărului de arbori pe categorii de diametre de 2, 4 și 5 cm pentru fiecare suprafață de probă.
- Logaritizarea numărului de arbori
- Ajustarea prin analiza regresiei a numărului de arbori în scară logaritmică folosind iterativ un polinom de până la gradul al treilea
- Stabilirea relației care ajustează cel mai bine distribuția experimentală
- Determinarea tipului de distribuție teoretică pe baza coeficienților de regresie obținuți și a semnelor acestora

3.4 Modelarea și predicția distribuției numărului de arbori pe categorii de diametre

Pentru stabilirea tipului de distribuție teoretică care ajustează cel mai bine distribuțiile experimentale din sondajele rețelei sistematice din Parcul Național Retezat au fost selectate doar sondajele cu minim 50 de arbori pe sondaj (SP) și cu aria de 1000 m². Setul de date folosit pentru

ajustarea distribuțiilor experimentale este format din 103 suprafețe experimentale cu aria de 1000 de m².

Un al doilea set de date a fost utilizat pentru testarea metodelor folosite în obținerea parametrilor distribuțiilor. Acest set de date are în componență 2 suprafețe de probă cu aria de un hectar, inventariate integral atât în anul 2012 cât și în 2019, o suprafață de probă inventariată integral în anul 2015 cu aria de un hectar și patru suprafețe de un hectar inventariate parțial printr-un cluster cu 5 suprafețe de câte 500 m². Primele două suprafețe inventariate integral sunt arborete pure de molid respectiv fag (GMO, GFA) cea de-a doua suprafață inventariată integral (ZNG) este dominată de fag (45%) în amestec cu molid și brad și DT iar cele patru suprafețe inventariate parțial sunt arborete amestecate de molid cu zâmbru în aceeași proporție (P1), molid în procent de peste 75% (P2,P3), și molid în procent de peste 60% în amestec cu brad și fag (P4).

3.4.1 Distribuția teoretică Weibull 2P și Weibull 2P trunchiat la stânga

Distribuția teoretică Weibull 2P este descrisă de parametri b și c numiți scară (scale) și formă (shape). Funcția de densitate a probabilităților (pdf) este dată de:

$$f(D) = \frac{c}{b} \left(\frac{D}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{D}{b}\right)^c} \quad (2)$$

$(d, c, b > 0)$

unde: $f(D)$ este funcția de densitate a arborilor de mărimea D ($0 \leq D$) iar b și c sunt parametri funcției și \ln reprezintă logaritm natural.

Atunci când valoarea minimă a variabilei D nu variază natural ci este impusă prin metodologia de culegere a datelor de teren așa cum este foarte des întâlnit în practica inventarierii pădurilor, distribuția Weibull este trunchiată sau cenzurată la un anumit capăt al distribuției. În cazul informațiilor obținute din RS de inventariere distribuția diametrelor este trunchiată la capătul din stânga, mai precis la valoare de 8 cm impusă de metodologia de culegere a datelor de teren. Astfel, pentru Weibull 2P trunchiat în partea stângă, funcția de densitate a probabilității (pdf), funcția de densitate cumulativă (cdf) și inversa funcției de densitate cumulativă (icdf) descrise mai sus devin:

$$f_T(D) = \frac{c}{b} \left(\frac{D}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{T-D}{b}\right)^c} \quad (3)$$

$(T \leq D < \infty, t, c, b > 0)$

unde: T reprezintă limita inferioară a diametrelor de la care s-au cules informațiile, respectiv 8 cm în cazul de față iar restul termenilor au fost descriși mai sus.

3.4.2 Metoda predicției parametrilor (PPM)

Metoda PPM a fost dezvoltată de Clutter & Bennett (1965) și presupune parcurgerea a trei pași. Primul pas îl reprezintă identificarea și inventarierea unor suprafețe de probă reprezentative pentru

o anumită zonă, tip de pădure, condiții staționale, etc. Al doilea pas este obținerea parametrilor distribuției pentru fiecare suprafață inventariată. Al treilea pas constă în explicarea variației parametrilor distribuției prin intermediul regresiei liniare între fiecare parametru al distribuției și variabile calculate la nivelul suprafețelor de probă, (Clutter & Bennett 1965; Robinson 2004). Cel de-al doilea pas poate fi ignorat ajustând simultan ecuațiile construite pentru prezicerea parametrilor (Cao 2004). În această lucrare am testat patru abordări prin care am prezis parametri (M1-M4) distribuției teoretice Weibull.

Există mai multe metode de determinare a parametrilor funcțiilor de distribuție. Cele mai cunoscute metode sunt metoda de maximizare a funcției logaritmice de probabilitate, metoda momentelor și metoda percentilelor (Cao 2004; Siipilehto & Mehtätalo 2013). În această lucrare au fost folosite primele două metode.

3.4.3 Metoda recuperării parametrilor (PRM)

Metoda recuperării parametrilor se bazează pe relația dintre parametrii funcțiilor W2P și WT2P și dintre relația acestora cu indicatorii obținuți la nivelul arboretului. Dacă este cunoscut sau prezis unul dintre parametrii funcției, celălalt parametrul se poate determina cu ajutorul acestuia sau dacă este cunoscută relația dintre parametri și indicatori, cei dintâi pot fi recuperați pe baza informațiilor culese de pe teren. Astfel, deși pentru funcția W2P sunt descrise numeroase metode de recuperare a parametrilor pe baza relației acestora cu numărului de arbori la hectar, diametrului mediu pătratic sau suprafața de bază la hectar (Siipilehto & Mehtätalo 2013) cu ocazia cercetărilor desfășurate în această lucrare a fost folosită metoda de recuperare a parametrilor prin metoda momentelor, utilizând relația dintre coeficientul de variație și parametrul c (M5).

Plecând de la observația potrivit căreia la baza determinării parametrilor prin metoda momentelor stau DMA și DG și cunoscându-se faptul că DG este diametrului mediu al suprafeței de bază folosit în practica amenajării pădurilor din România, a fost construită o relație prin care să se poată prezice DMA pentru fiecare SP.

Pe baza DMA prezis (\widehat{DMA}) și a valorile măsurate DG, parametri distribuțiilor W2P și WT2P au fost estimați utilizând algoritmul propus de Merganič & Sterba (2006) și programului statistic R.

3.4.4 Evaluarea funcțiilor și a metodelor folosite

Pentru evaluarea funcțiilor și metodelor aplicate au fost utilizați doi indicatori ai dispersiei valorilor prezise față de valorile reale (Maltamo et al. 1995; Palahí et al. 2007).

$$\%RMSE^c = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i^c - \widehat{D}_i^c)^2}{N-1}} \times \frac{1}{\sum_{i=1}^N \widehat{D}_i^c / N} \quad (4)$$

$$\%ME^c = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^N (D_i^c - \hat{D}_i^c)}{N-1} \times \frac{1}{\sum_{i=1}^N \hat{D}_i^c / N} \quad (5)$$

unde: N reprezintă numărul de SP-uri, D_i^c este suma diametrelor distribuției experimentale definită de relația 6, \hat{D}_i^c este suma diametrelor obținute prin ajustarea funcțiilor W2P și WT2P care utilizează de asemenea relația 6 și c este puterea la care diametrul este ridicat.

$$D_i^c = \sum_{j=1}^{n_i} n_{ij} D_{ij}^c \quad (6)$$

unde:

n_i este numărul de arbori din SP i, n_{ij} reprezintă numărul de arbori la hectar corespunzător arborelui j, D_{ij} - diametrul arborelui j în SP-ul i. Exponentul c a luat iterativ valori de la 0 la 3, astfel pentru D_i^0 valoarea rezultată este numărul arborilor la hectar. Știind că procentul cel mai ridicat al volumului la hectar se află în categoriile mari de diametre ridicând suma diametrelor la puterea a 2 și a 3 este oferită o pondere mai mare categoriilor de diametre mai importante. Mai exact suma diametrelor la puterea a 2 aproximează suprafața de bază pe când suma diametrelor la puterea a 3 aproximează volumul arborilor.

3.5 Curba înălțimilor și curba generalizată a înălțimilor

3.5.1 Funcția simplă a relației înălțime-diametru

Literatura de specialitate abundă în referințe cu funcții folosite pentru a modela relația dintre înălțime și diametru (H-D) (Curtis 1967; Giurgiu 1979; Huang et al. 1992, 2000; Zeide 1993; Giurgiu et al. 2004). Dintre acestea au fost selectate și testate cele mai întâlnite 32 funcții.

3.5.2 Validarea și evaluarea modelelor

Criteriile folosite pentru a evalua funcțiile H-D sunt: performanța de ajustare a fiecărei SPP, sensibilitatea modelului la valorile extreme, capacitatea modelului de a prezice cu cea mai mică eroare înălțimile unei suprafețe noi și evaluarea vizuală a valorilor reziduale. Următoarele relații au fost folosite în acest scop.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-p} \sum_{j=1}^n (H_j - \hat{H}_j)^2} \quad (7)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (H_j - \hat{H}_j) \quad (8)$$

$$PRESS = \sum_{j=1}^n (H_j - \hat{H}_{j,j})^2 \quad (9)$$

$$p^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (H_j - \hat{H}_{j,j})^2}{\sum_{j=1}^n (H_j - \bar{H})^2} \quad (10)$$

unde \hat{H} reprezintă înălţimea prezisă pentru arborele j , n reprezintă numărul de arbori pentru care s-a ajustat funcţia H-D, p reprezintă numărul de parametri ai funcţiei iar celelalte variabile au fost explicate mai sus.

3.5.3 Variabile adiţionale la nivel arbore şi arboret

Au fost testate 23 de variabile cu scopul de a mări aplicabilitatea funcţiei care a oferit cele mai bune rezultate. Măsurătorile din teren ale unghiului şi distanţei dintre centrul cercului şi arbori au fost folosite pentru a calcula variabile spaţial explicite. Variabilele folosite descriu structura pe verticală şi orizontală, competiţia şi biodiversitatea arboretelor studiate.

3.5.4 Curba generalizată a înălţimilor folosind regresia mixtă

În literatura de specialitate sunt folosite două metode pentru a dezvolta curba generalizată a înălţimilor. Prima metodă presupune:

- ajustarea individuală a fiecărei suprafeţe de probă,
- obţinerea parametrilor fiecărei funcţii,
- stabilirea celei mai bune funcţii simple sau de bază
- stabilirea unei relaţii matematice între parametrii celei mai bune ecuaţii şi alte variabile la nivel de arbore sau arboret.

Această metodă este folosită când există un număr suficient de înălţimi măsurate în fiecare suprafaţă de probă. În cazul de faţă doar pentru specia molid a fost aplicată această metodă, celelalte specii fiind slab reprezentate în fiecare suprafaţă.

În cea de-a doua metodă se stabileşte cea mai bună funcţie folosind întreg setul de date şi se dezvoltă ecuaţia de bază introducând şi alte variabile fără a testa în prealabil corelaţia acestora cu parametrii funcţiei. Această metodă a fost utilizată pentru a dezvolta curba generalizată a înălţimilor pentru speciile slab reprezentate numeric în fiecare suprafaţă.

Modelul neliniar al regresiei mixte pentru observaţia j a SPP-ului i poate fi scrisă sub următoarea formă (Pinheiro & Bates 2006; Mehtatalo & Lappi 2020):

$$y_{ij} = f(\Phi_{ij}, x_{ij}) + \epsilon_{ij} \quad i=1, \dots, M; j=1, \dots, n_i \quad (11)$$

unde f reprezintă funcţia neliniară folosită pentru a modela variabila y , Φ_i este un vector de parametri specifici unui SPP, x_{ij} este vectorul de valori ale variabilelor independente, ϵ_{ij} este eroarea reziduală neexplicată, normal distribuită în fiecare SPP, M reprezintă numărul de SPP-uri şi n_i reprezintă numărul de observaţi din SPP-ul i .

Vectorul de parametri ϕ_i este definit de funcția:

$$\phi_i = A_{ij}\beta + B_{ij}b_i, \quad b_i \sim N(0, \psi) \quad (12)$$

unde vectorul β reprezintă parametri ficși ai funcției vectorul b_i reprezintă vectorul de parametri aleatori pentru SPP i având o distribuție normală cu media 0 și matricea varianței covarianței ψ . Dimensiunile matricelor depind de numărul de observații din fiecare SPP. Analiza grafică a valorilor reziduale a fost folosită pentru a detecta heteroscedasticitatea. Aceasta a fost modelată prin introducerea funcției de tip putere:

$$\text{var}(\epsilon_{ij}) = \sigma^2 D_{ij}^{2\delta} \quad (13)$$

unde:

$\text{var}(\epsilon_{ij})$ – reprezintă variația abaterilor reziduale

σ^2 și δ sunt parametrii estimați ai ratei și formei funcției de tip putere.

3.5.4.1 Calibrarea parametrilor ficși ai curbei generalizate a înălțimilor.

O practică obișnuită în utilizarea modelelor mixte este predicția parametrilor aleatori pentru o nouă suprafață folosind noi observații din suprafața pentru care se face calibrarea.

Cu toate acestea și valorile prezise folosind doar parametri ficși pot fi calibrate pentru o nouă suprafață folosind următoarea relație (Temesgen et al. 2008):

$$k_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n [(\hat{H}_{ij} - 1.3)(H_{ij} - 1.3)]}{\sum_{j=1}^n (\hat{H}_{ij} - 1.3)^2} \quad (14)$$

unde k_i^* este factorul de corecție specific suprafeței pentru care se face calibrarea, \hat{h}_{ij} este înălțimea prezisă cu folosind parametri ficși ai modelului generalizat H-D iar h_{ij} este înălțimea măsurată a arborelui j din suprafața i .

3.5.4.2 Calibrarea parametrilor aleatori ai curbei generalizate a înălțimilor.

Similar calibrării parametrilor ficși obținerea parametrilor aleatori pentru o nouă suprafață este posibilă doar în cazul în care, pentru suprafața nouă sunt făcute un număr de observații.

Pentru obținerea parametrilor aleatori se pot folosi două metode. Prima metodă constă în liniarizarea funcției folosite și obținerea matricelor următoarei formule:

$$\hat{b}_i = \hat{D}\hat{Z}_i^T (\hat{R}_i + \hat{Z}_i\hat{D}\hat{Z}_i^T)^{-1} (y_j - \hat{y}_j) \quad (15)$$

\hat{D} – matricea varianței-covarianței ce determină variabilitatea dintre suprafețele de probă

\hat{R}_i – matricea varianței-covarianței ce determină variabilitate din suprafețele de probă

\hat{Z}_i – matricea valorilor variabilelor independente a căror parametri sunt aleatorii

\hat{y}_j – valoarea prezisă folosind doar parametri ficși (parametri populației)

y_j – valoarea măsurată (înălțimea măsurată)

Cea de-a doua metodă presupune ajustarea funcție H-D în forma neliniară. Obținerea parametrilor aleatori pentru o nouă suprafață se face printr-o procedură iterativă.

Predicția parametrilor aleatori se face prin aproximarea liniară a funcției:

$$y_i = X_i \beta + \hat{Z}_i b_i + \epsilon_i \quad (16)$$

Unde X_i și Z_i sunt matricele care includ derivatele parțiale ale funcției generalizate a înălțimilor dezvoltate cu respect față parametri aleatori \hat{b}_i .

Soluția este obținută iterativ conform procedurii propuse de Mehtatalo & Lappi (2020).

$$\hat{b}_i = \hat{D} \hat{Z}_i^T \left(\hat{R}_i + \hat{Z}_i \hat{D} \hat{Z}_i^T \right)^{-1} \left(y_i - f_i(x_i, \hat{\beta}_i, \hat{b}_i) + \hat{Z}_i \hat{b}_i \right) \quad (17)$$

În primul pas parametri aleatori (\hat{b}_i) primesc valoarea 0. Se calculează partea dreaptă a formulei pentru a obține noi estimări ale parametrilor aleatori. Valoarea obținută a parametrilor aleatori este folosită într-o procedura iterativă până când diferența dintre valoarea parametrilor aleatori obținuți între două iterații este mai mică decât pragul impus de $1e-10$.

3.5.5 Curba înălțimilor folosind regresia cuantilelor

Folosind funcția generalizată a înălțimilor dezvoltată mai sus au fost obținuți parametri de regresiei pentru 11 cuantile (τ) (0.01, 0.05, 0.1, 0.25, 0.3, 0.5, 0.7, 0.75, 0.9, 0.95, 0.99) folosind întreg setul de date. Știind că pentru aplicarea regresiei cuantilelor este necesar un număr ridicat de observații această analiză a fost aplicată doar pentru specia molid

În cazul regresiei cuantilelor parametrii funcție au fost obținuți minimizând următoarea funcție:

$$S = \sum_{H_{ij} \geq \hat{y}_\tau(d_{ij})} \tau [H_{ij} - \hat{y}_\tau(t)] + \sum_{H_{ij} < \hat{y}_\tau(d_{ij})} (1-\tau) [\hat{y}_\tau(D_{ij}) - H_{ij}] \quad (18)$$

Un set de 3, 5 și 7 cuantile au fost folosite pentru a prezice înălțimile pentru fiecare SPP. Pentru a obține curba înălțimilor pentru fiecare SPP parametrii celor 3, 5 respectiv 7 cuantile au fost interpolați pentru a obține o nouă curbă.

Astfel pentru înălțimea arborelui H_{ij} cuprinsă între cuantila k și cuantile $k+1$ curba înălțimilor va fi modificată prin interpolarea parametrilor celor două cuantile pentru a trece prin acel punct folosind următoarea expresie:

$$H_k^* = \alpha \hat{H}_k(D_{ij}) + (1-\alpha) H_{k+1}(D_{ij}) \quad (19)$$

unde

$$\alpha = \frac{\hat{H}_{k+1}(d_{ij}) - H_{ij}}{\hat{H}_{k+1}(d_{ij}) - \hat{H}_k(d_{ij})} \quad (20)$$

Raportul de interpolare α a fost optimizată astfel încât să obțină valoarea minimă a următoarei relații:

$$\sum_j^n (H_{ij} - \hat{H}_{ij})^2 \quad (21)$$

3.5.6 Stabilirea celei mai precise proceduri de calibrare

Pentru calibrarea parametrilor aleatorii, a parametrilor ficși și a parametrilor regresiei cuantilele au fost testate diferite senarii în care valorile cunoscute ale înălțimilor au variat de la o singură valoare până la 9 alternând de asemenea și dimensiunile arborilor pentru care se cunoaște înălțimea. Obiectivul este de a determina care sunt dimensiunile și numărul de arbori a căror înălțime trebuie să fie cunoscută astfel încât calibrarea făcută să ofere o acuratețe cât mai ridicată. Pentru calibrare au fost selectate doar suprafețele cu mai mult de 9 arbori. Arborii acestor suprafețe au fost împărțiți în două categorii: arbori pentru obținerea parametrilor aleatorii (setul de calibrare) și arborii care au fost folosiți pentru a testa predicția parametrilor aleatorii (setul de testare). Setul de calibrare a inclus cei mai mici 3 arbori, cei mai mari trei arbori și trei arbori din jurul diametrului mediu. Din setul de calibrare au fost selectați iterativ de la 1 la 9 arbori și combinații de la 1 la 9 pentru obținerea parametrilor aleatori. După obținerea parametrilor aleatori, aceștia au fost folosiți în predicția înălțimii pentru setul de testare comparând înălțimile prezise cu inferența creșterii făcută doar cu parametri ficși.

3.6 Modele de creștere în diametru

3.6.1 Informații utilizate

Pentru obținerea modelelor de creștere în diametru a arborilor au fost folosite două seturi de date. Primul model de creștere individuală a arborilor a fost dezvoltat folosind măsurătorile rezultate din inventarierea succesivă a suprafețelor de cercetare din rețeaua sistematică de inventariere (RSI) iar cel de-al doilea model pe baza carotelor de creștere. Pentru construirea primului modelului de creștere a fost analizată creșterea vii arborilor comuni celor două inventare.

3.6.2 Modelul dinamic de creștere în diametru la nivel de arbore

Ecuția aleasă pentru dezvoltarea modelului de creștere în diametru este flexibilă, are proprietățile necesare modelării unui astfel de proces biologic și are puțini parametri.

$$\ln(i_{d5}) = a_1 + a_2 D^2 + a_3 \ln(D) + e \quad (22)$$

unde:

\ln – reprezintă logaritmul natural

i_{d5} – creșterea în înregistrată în 5 ani exprimată în cm

a_1, a_2, a_3 – parametrii ecuației

D – diametrul de bază exprimat în cm

e – eroarea ecuaţiei exprimată prin abatere reziduală

Relaţia 22 include doar componenta dimensională, variabilele componente competiţionale şi staţionale au fost incluse ulterior astfel încât să îmbunătăţească precizia modelului.

Parametrii au fost obţinuţi folosind regresia lineară mixtă. Astfel relaţia 22 a fost rescrisă sub forma unei relaţii lineare mixte (Relaţia 23).

$$\ln(i_{d5ij}) = a_1 + b_i^{(1)} + a_2 D_{ij}^2 + a_3 \ln(D_{ij}) + b_i^{(2)} \ln(D_{ij}) + e_{ij} \quad (23)$$

unde:

\ln – reprezintă logaritm natural

i_{d5ij} - reprezintă creştere în diametru pe 5 ani al arborelui j din SPP j

a_1, a_2, a_3 – reprezintă parametrii ficşi ai ecuaţiei (parametrii populaţiei) (*fixed effects*)

b_i – parametrii aleatori sau efectele aleatoare (*random effects*)

e_{ij} – este valoare reziduală cu media zero şi varianţă necunoscută

3.6.3 Dezvoltarea modelului de creştere în diametru folosind ecuaţiile independente de vârstă scrise sub forma diferenţei algebrice a ecuaţiilor

Pentru speciile MO, FA şi BR a fost dezvoltat un model de creştere pe baza datelor obţinute din măsurarea carotelor de creştere. Primul pas a presupus determinarea celei mai bune ecuaţii independente de vârstă pentru a modela creşterea în diametru. Ecuaţiile de bază candidate pentru a dezvolta modelul de creştere în diametru sunt printre cele mai folosite în modelarea caracteristicilor biometrice ale arborilor sau arboretelor. Astfel, în tabelul 1 sunt prezentate ecuaţiile de bază şi forma diferenţei algebrice a (*Algebraic Difference Approach*) ecuaţiilor luate în considerare pentru construirea modelului independent de vârstă.

Tabelul 1. Ecuaţiile testate pentru dezvoltarea modelelor de creştere.

Nume	Ecuaţie	Para m. liber	Forma diferenţei algebrice a ecuaţiei	Forma diferenţei algebrice a ecuaţiei independente de vârstă
Lundqvist-Korf (L-K)	$Y = A \exp\left(\frac{-k}{t^m}\right)$	k	$Y_2 = A \left(\frac{Y_1}{A}\right)^{\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^m}$	$Y_{1+dist} = A \exp\left\{-k \frac{1}{\left[\left(\frac{-k}{\ln(Y_1/A)}\right)^{\frac{1}{m}} + dist\right]}\right\}$
Richard-Chapman (R-C)	$Y = A[1 - \exp(-kt)]$	k	$Y_2 = A \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{Y_1}{A}\right)^{1-m} \right]^{\frac{t_2}{t_1}} \right\}^{\frac{1}{1-m}}$	$Y_{1+dist} = A \left\{ 1 - \exp(-k \cdot dist) \right\}^{\frac{1}{1-m}} \left[\left(\frac{Y_1}{A}\right)^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}}$

Nume	Ecuatie	Para m. liber	Forma diferenței algebrice a ecuației	Forma diferenței algebrice a ecuației independente de vârstă
Hossfeld (H)	$Y = \frac{t^c}{(b+at^c)}$	a, b		$Y_{1+dist} = \frac{\left[\sqrt[c]{ \frac{Y_1 b}{1-aY_1} + dist } \right]^c}{b+a \left[\sqrt[c]{ \frac{Y_1 b}{1-aY_1} + dist } \right]^c}$

unde:

Y_1 – reprezintă diametrul la timpul 1

Y_{1+dist} – diametrul la timpul 1+ *dist*

A, k, m, β , α , a, b – parametrii funcțiilor

t – vârsta arborilor

dist –distanța în ani dintre măsurători (în cazul nostru 1 an)

3.6.4 Indicele creșterii în diametru

Știind că o componentă majoră în rata de creștere a arborilor este reprezentată de condițiile staționale, în cea de-a doua etapă a analizei, coeficienții ecuațiilor prezentate mai sus au fost dezvoltate astfel încât să includă o variabilă care determină potențialul productiv al stațiunii.

Astfel, conform metodologie propuse de Vanclay (1992) și Trasobares, Pukkala & Miina (2004) a fost dezvoltat un indice al productivității numit indicele creșterii.

Odată construită funcția, indicele de creștere (IC) este calculat cu următoarea formulă:

$$IC_1 = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{i_{d_5}}{\hat{i}_{d_5}} \quad (24)$$

unde:

IC_1 – reprezintă indicele de creștere 1

i_{d_5} – creșterea măsurată

\hat{i}_{d_5} – creșterea prezisă cu ajutorul funcției dezvoltate

n – numărul de arbori din fiecare suprafața de probă.

3.6.5 Evaluarea și validarea modelelor de creștere în diametru

Această etapă este una din cele mai importante etape în procesul de construire a oricărui model matematic a cărui scop este predicția variabilei dependente folosind un nou set de date. Cea mai obiectivă metodă de validare a modelelor este obținută validând modelul pe un set nou de date. Astfel modelul obținut din probele de creștere a fost validat folosind datele din rețeaua sistematică de inventariere. Deoarece nu există alt set de date independent de cel folosit pentru a construi modelul dinamic de creștere in diametru, acesta din urmă a fost validat folosind metoda de validare încrucișată. Această metodă a presupus eliminarea iterativă a fiecărui SPP din setul de date folosit

pentru obținerea parametrilor și evaluarea modelului (predicția creșterilor) pentru SPP-ului eliminat. Parametrii modelului final au fost obținuți ajustând întreg setul de date.

Evaluarea modelelor a fost efectuată utilizând o serie de indicatori statistici RMSE, ME și AIC care au permis estimarea capacității variabilelor independente de a modela creșterea în diametru.

3.7 Modelul de mortalitate și recrutare a arborilor

3.7.1 Modelul de mortalitate

Modelul de mortalitate a fost dezvoltat pentru a prezice probabilitatea unui arbore de a muri în următoarea perioadă de 5 ani. Pentru a dezvolta modelul de mortalitate a fost folosită funcția logistică (Relația 25), preferată de cele mai multe ori pentru a modela variabile binare.

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-bX)} \quad (25)$$

unde p este probabilitatea unui arbore de a muri, X sunt variabile la nivel de arbore și arboret care explică mortalitatea arborilor iar b coeficienții de regresie ale acestor variabile.

3.7.3 Modelul de recrutare

Modelul de recrutare a arborilor a fost construit astfel încât să prezică numărul de arbori care vor depăși pragul de 8 cm într-o perioadă de 5 ani. Similar modelului de mortalitate, modelul a fost dezvoltat indiferent de specie din cauza numărului redus de observații aferent fiecărei specii.

Modelul de recrutare este un model linear generalizat Poisson folosit de obicei pentru a modela variabile dependente ordinale sau tabele de contingență. Pentru a folosi acest model distribuția variabilei dependente trebuie să urmeze distribuția Poisson.

$$\ln(NR) = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + \dots + nx_n \quad (26)$$

unde NR este numărul de recruți, a, b, \dots, n parametri de regresii aferenți variabilelor $x_1 - x_n$.

3.8 Modelul de predicție a volumului

3.8.1 Predicția creșterii în volum a arborilor și arboretelor

Determinarea volumului arborilor și arboretelor inventariate din rețeaua sistematică a fost realizată utilizând într-un prim pas, modelul de creștere în diametru, pentru a prezice diametrul arborilor pentru o perioadă de 5 ani utilizând datele din prima inventariere (2015). În cel de-al doilea pas folosind diametrul prezis, înălțimea fiecărui arbore a fost prezisă, utilizând modelul generalizat al curbei înălțimilor. În cel de-al treilea pas diametrul prezis și înălțimea prezisă a fiecărui arbore împreună cu ecuația dublu logaritmică (Giurgiu et al. 2004) (Relația 27) au fost folosite pentru a prezice volumul arborilor.

$$\log_{10}(v_{ij}) = a_0 + a_1 \log_{10}(\hat{D}_{ij}) + a_2 \log_{10}^2(\hat{D}_{ij}) + a_3 \log_{10}(\hat{H}_{ij}) + a_4 \log_{10}^2(\hat{H}_{ij}) \quad (27)$$

unde:

v_{ij} – este volumul arborelui j din SPP i (m^3)

\hat{D}_{ij} – este diametrul prezis al arborelui j din SPP i prin modelul dinamic de creştere în diametru

\hat{H}_{ij} – este înălţimea prezisă a arborelui j din SPP i prin modelul generalizat H-D

3.8.2 Predicţia volumului arboretelor prin metoda recuperării parametrilor şi a curbei generalizate a înălţimilor

Această metodă de determinare a volumului este una expeditivă şi necesită determinarea pe teren a unui număr redus de variabile (variabilele care fac parte din modelele menţionate vor fi prezentate în secţiunea rezultate). În cazul nostru variabilele necesare au fost extrase din fişele de inventariere. Odată recuperaţi parametrii distribuţiei Weibull, frecvenţa relativă a numărului de arbori a fost obţinută pentru categorii de diametre de 1 cm iar aceasta a fost înmulţită cu numărul de arbori la hectar (N) determinat pe teren. Pentru fiecare categorie de diametre a fost determinată înălţimea folosind curba generalizată a înălţimilor dezvoltată pentru MO. Volumul fiecărei categorii a fost estimat folosind ecuaţia dublu logaritmică iar volumul arboretului a fost calculat însumând volumul arborilor pentru fiecare categorie de diametre .

3.9 Modelul de simulare a creşterii arborilor şi arboretelor şi a producţiei acestora

Pornind de la scopul acestei lucrări care este acela de a dezvolta un model de simulare a creşterii arboretelor şi a producţiei acestora pentru Parcul Naţional Retezat, toate modelele dezvoltate au fost în final asamblate într-un model de simulare care reproduce creşterea, mortalitatea şi regenerarea arborilor şi arboretelor din această zonă (Figura 1).

Modelul poate fi clasificat ca un model de creştere la nivel de arbore, iar prin agregare poate produce valori raportate la hectar. Modelul a fost astfel creat, încât să permită utilizarea a două tipuri de date de intrare:

- listă cu arbori rezultată din inventarierea unei suprafeţe, unităţi amenajistice, etc
- informaţii sumare despre o suprafaţă, unitate amenajistică, etc.

În cazul în care datele de intrare sunt sumare, modelul va crea o listă de arbori recuperând parametri distribuţiei Weibull şi generând o distribuţie a numărului de arbori la hectar pe categorii de diametre de 0.2 cm. Folosind această distribuţie se poate presupune că arborii din acea categorie de diametre au acelaşi diametru, diferenţa dintre dimensiunile acestora fiind neglijabilă.

În cazul în care datele de intrare provin dintr-o inventariere, principalele caracteristici biometrice vor fi raportate la hectar, folosind o pondere egală cu raportul dintre o suprafaţă 1ha şi suprafaţa inventariată.

Înainte de a începe simularea se vor recupera parametrii distribuţiei Weibull din valorile obţinute, se va prezice distribuţia pe categorii de diametre de 0.2 cm şi se va calcula volumul aferent fiecărei

categorii prezicând în prealabil înălţimea fiecărei categorii. În cazul datelor de intrare provenite din inventarieri se vor prezice înălţimile acolo unde este cazul şi se va calcula volumul fiecărui arbore. În primul pas al simulării va fi aplicat modelului de mortalitate. Pentru arborii care vor fi clasificaţi ca morţi se va calcula înălţimea, unde este cazul, folosind curba generalizată a înălţimilor şi volumul. În cel de-al doilea pas se va calcula creşterea arborilor rămaşi, calculând toate variabilele competiţiei necesare modelului de creştere folosind arbori rămaşi vii. În cel de-al treilea pas se calculează numărul de arbori care vor depăşi pragul de 8 cm folosind modelul de recrutare. Numărul arborilor recrutaţi vor fi distribuiţi pe intervalul 8-15 cm folosind ca pondere frecvenţa relativă aferentă fiecărei categorii din acest interval. Astfel, în cazul arboretelor pluriene cu o distribuţie negativ exponenţială numărul arborilor care vor intra în primele categorii va fi ridicat iar numărul de arbori recruţi care vor intra în categoria de 15 cm va fi unul scăzut.

În următorul pas algoritmul de simulare diferă în funcţie de datele de intrare. În cazul folosirii unei liste de inventariere, pasul următor va fi predicţia înălţimilor pentru toţi arborii şi calculul volumului. Procesul de simulare va fi repetat dacă este specificată această cerinţă aplicând din nou modelul de mortalitate şi continuând acelaşi proces descris mai sus.

În cazul datelor de intrare provenite din informaţii sumare algoritmul de simulare va recupera parametrii distribuţiei Weibull şi prezice o nouă distribuţie folosind numărul de arbori la hectar şi DG, nou calculate după aplicarea modelului de creştere în diametru şi recrutare. Folosind distribuţia nou generată se va prezice înălţimea arborilor, folosind curba generalizată H-D pentru fiecare categorie şi se va calcula volumul. Procesul de simulare va fi repetat, dacă este specificată această cerinţă, aplicând din nou modelul de mortalitate şi continuând acelaşi proces descris mai sus.

Pasul de simulare este de 5 ani iar la fiecare pas de simulare principalele caracteristici biometrice la nivel de arboret sunt salvate într-o listă.

Modelele de simulare sunt de cele mai multe ori testate pe un set de date, independent de cel folosit pentru a fi dezvoltate. Mai mult decât atât, seturile de date folosite pentru validare provin din suprafeţe de monitorizare de lungă durată în care dinamica fiecărei caracteristici biometrice este urmărită la fiecare 5 sau 10 ani. Astfel se poate face o evaluare obiectivă a acurateţii modelului de simulare. În zona de cercetare, modelul de simulare a fost evaluat folosind o parte din suprafeţele inventariate în reţeaua de inventariere. Pentru aceste suprafeţe au fost determinate principalele caracteristici biometrice la nivel de arboret pentru prima şi a doua inventariere iar prin simulare au fost prezise aceleaşi caracteristici pentru cea de-a doua inventariere, plecând de la lista de observaţii obţinută la prima inventariere.

Toate analizele au fost efectuate utilizând, programul statistic *R* (R Core Team 2020), modelele a fost ajustate folosind funcţiile *lme* şi *nlme* ale pachetului *nlme* (Pinheiro et al. 2018) iar pentru manipularea datelor şi obţinerea graficelor au fost folosite pachetele *dplyr* şi *ggplot2* (Wickham 2016; Wickham et al. 2019).

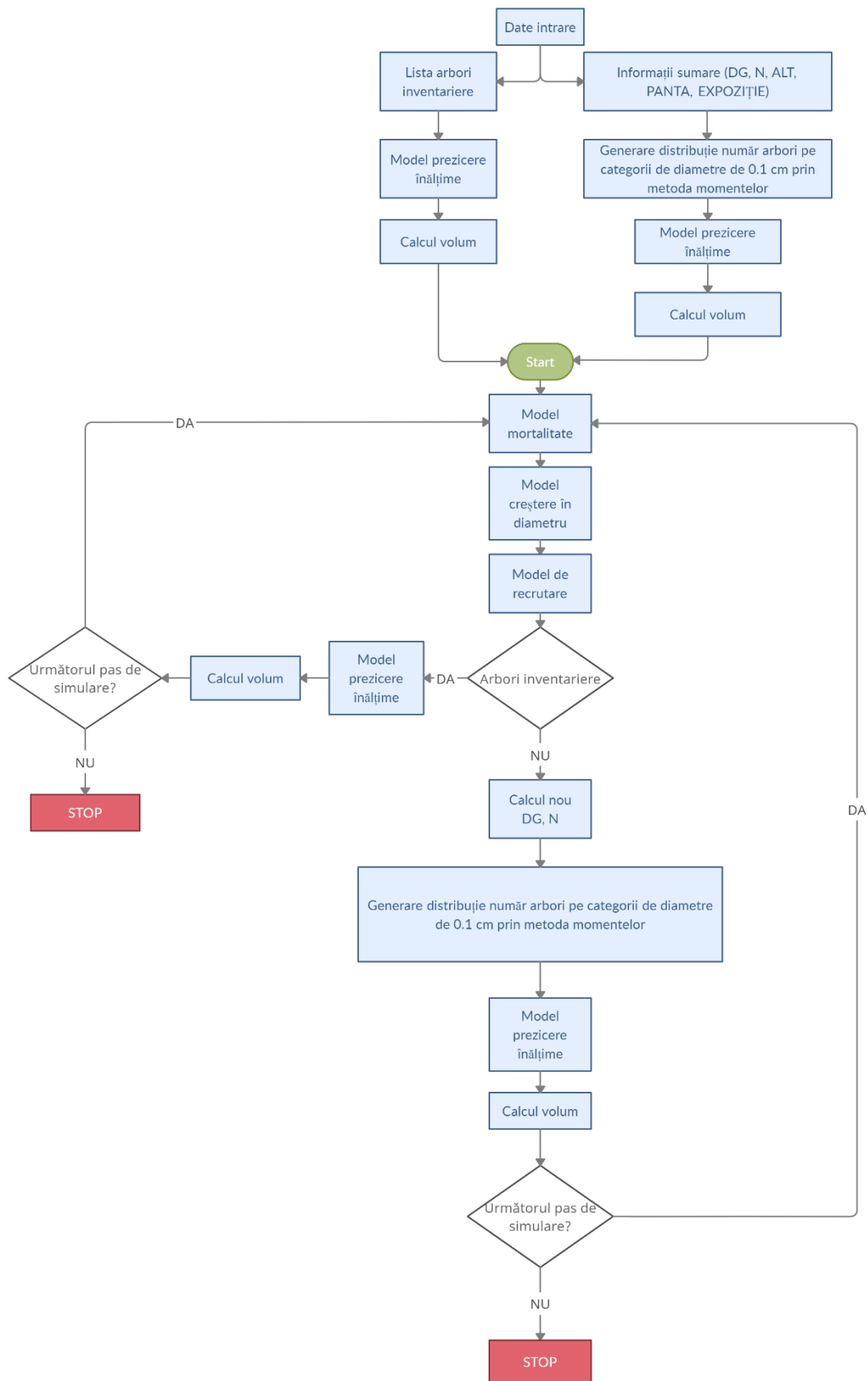


Figura 1. Schema de funcționare a modelului de prognoză a creșterii arborilor și arboretelor și a producție acestora

4. REZULTATE ȘI DISCUȚII

4.1 Informații generale obținute în urma inventarierii rețelei sistematice

În urma inventarierilor desfășurate în anii 2015 și 2020 au fost identificate un număr de 21 specii de plante lemnoase. În anul 2015 au fost parcurse 121 de SP-uri și 225 de SPP-uri iar în anul 2020 numărul SP-urilor inventariate a fost de 119 și 222 de SPP-uri. Un număr de 6341 de arbori au fost identificați și mășurați în ambele inventare din care 5556 au fost clasificați ca arbori vii. Arborii au fost grupați pe specii sau grupe de specii după cum urmează MO - Molid, BR - Brad, FA - Fag, DT - Diverse tari, DM - Diverse moi, DR - Diverse rășinoase. Specia majoritară în Parcul Național Retezat (PNR) este molidul cu un procent de 67% urmat de fag și brad în proporție de 14% respectiv, 9%. Diverse specii de esență tare și moale se întâlnesc în proporție de 4% respectiv, 5%, pe când diverse specii rășinoase se găsesc în procent de 1%.

4.2 Caracteristici generale privind distribuția numărului de arbori pe categorii de diametre

În zona de studiu, distribuția numărului de arbori pe categorii de diametre este specifică unui tip de structură pluriennă. Numărul de arbori de dimensiuni mici domină iar frecvența acestora descrește de la categorii mici la categorii mari (Figura 2).

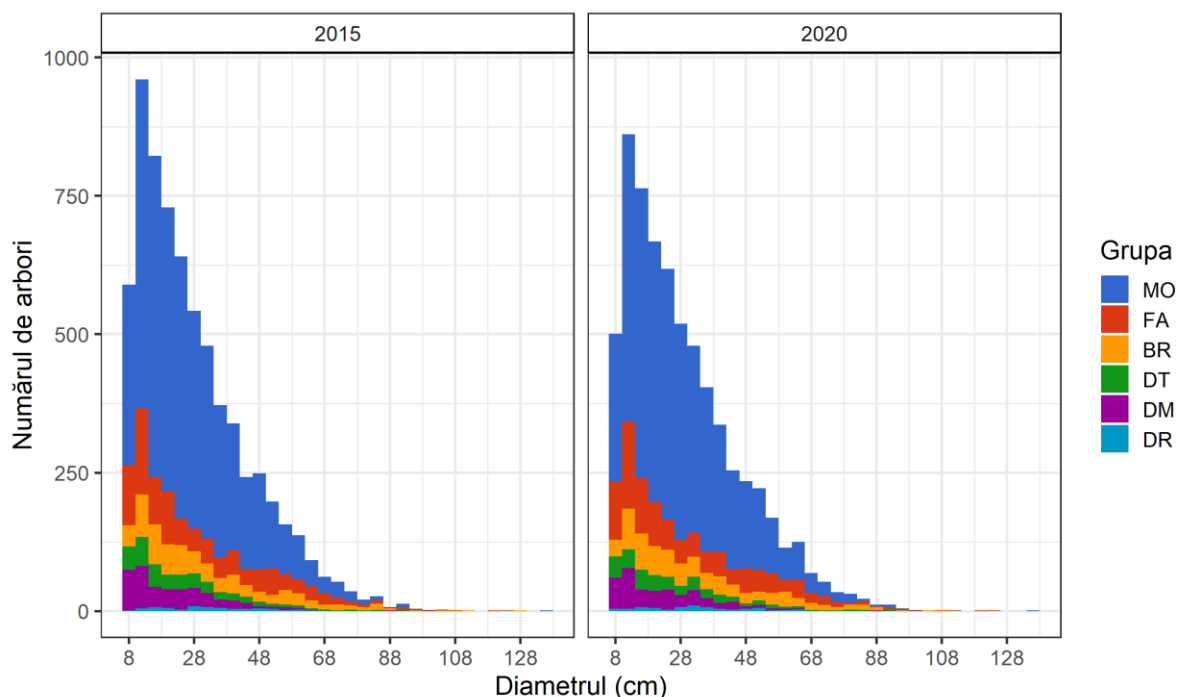


Figura 2. Distribuția numărului de arbori pe categorii de diametre cu amplitudinea de 4 cm.

Acestui tip de distribuție este cel mai des întâlnită în arborete virgine și cvasivirgine în care apariția sau mortalitatea arborilor sunt fenomene care se desfășoară în urma unei dinamicii nealterate de intervenția omului.

4.3 Forma distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre în arboretele cercetate din Parcul Naţional Retezat

În arboretele luate în considerare pentru a testa forma distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre au fost identificate 5 forme de distribuţie, cea mai întâlnită fiind forma distribuţiei negativ exponenţială (Figura 3). Această distribuţie este asociată mai ales în ţara noastră arboretelor cu structură pluriennă echilibrate având o raţie (q) constantă pe toata amplitudinea categoriilor de (Meyer, 1951).

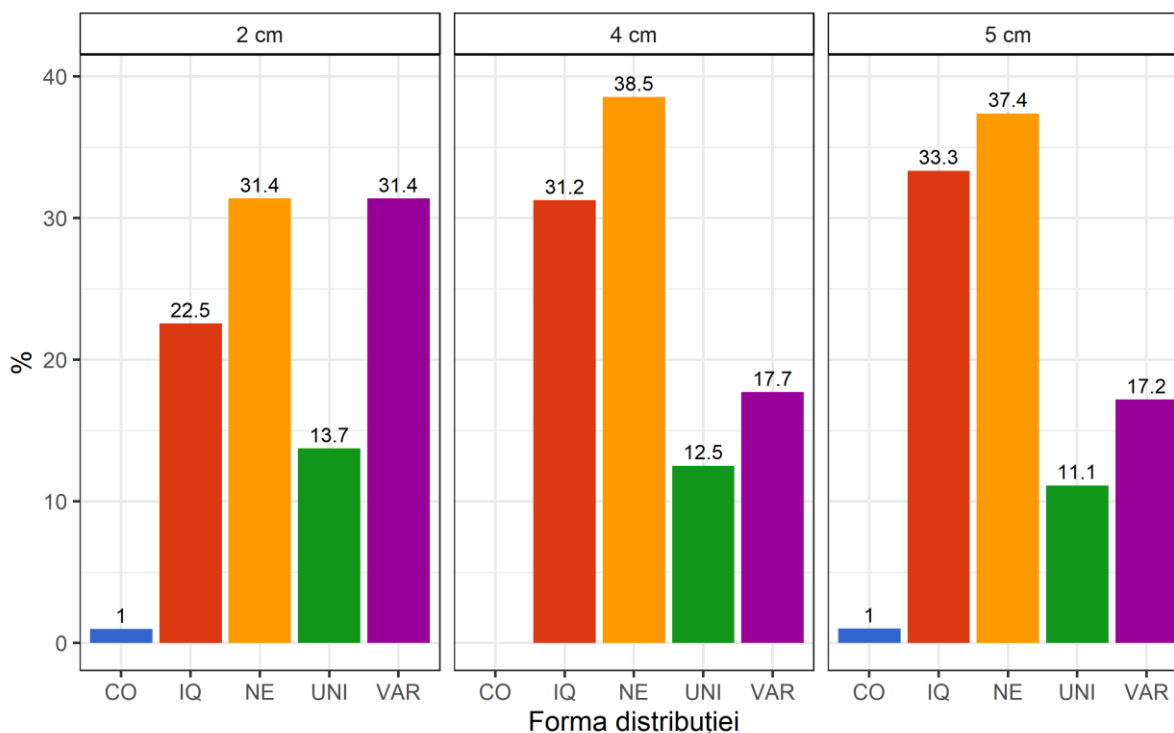


Figura 3. Forma distribuţiei numărului de arbori pe categorii de diametre (2,4 și 5 cm) pe baza rețelei sistematice de inventariere.

Scopul acestei analize a fost de a determina și fundamenta alegerea unei funcții teoretice pentru modelarea și predicția distribuției numărului de arbori pe categorii de diametre. Din rezultatele analizei se poate observa că forma distribuției numărului de arbori pe categorii de diametre variază foarte mult iar funcția teoretică trebuie să fie destul de flexibilă încât să acopere toate formele identificate.

4.4 Metode de predicție a distribuției numărului de arbori pe categorii de diametre

4.4.1 Predicția distribuției numărului de arbori pe categorii de diametre prin metoda predicției parametrilor (PPM)

Primele două metode au avut în vedere determinarea parametrilor funcțiilor pentru fiecare SP. Cei mai importanți indicatori identificați pentru a explica variația parametrilor funcțiilor W2P și WT2P sunt diametrul mediu (DMA), diametrul mediu pătratic (DG), înălțimea maximă (Hmax), și diametrul

maxim (Dmax). Atât metoda de maximizare a funcției de probabilitate (M1) cât și metoda momentelor (M2) arată o mai strânsă corelație a DMA și DG cu parametrul b decât cu parametrul c. În schimb indicatorii Hmax și dmax au o legătură mai puternică cu parametrul c al funcțiilor (Figura 4).

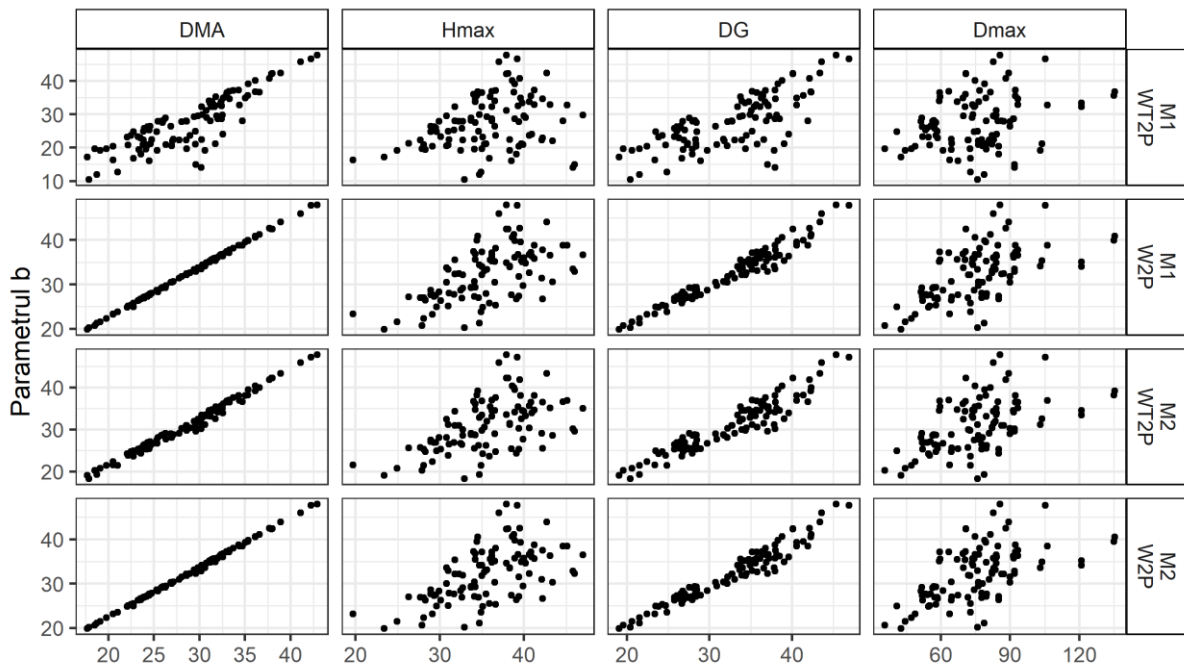


Figura 4. Variația parametrului b în cele 103 SP-uri. Unitatea de măsură pentru indicatorii DMA, DG, DMA sunt cm iar pentru Hmaxeste m.

Parametrii funcției WT2P determinați prin M1 au o corelație mai slabă decât cei obținuți prin M1 pentru aceeași distribuție. În schimb prin M2 se obține o corelație mai puternică pentru distribuția WT2P comparativ cu W2P.

Atât DMA cât și diametrul mediu pătratic DG pot fi folosiți pentru determinarea parametrului b. Însă, datorită ușurinței prin care se poate determina DG în lucrările de teren prin procedeul Bitterlich (Bitterlich 1952) sau prin alte procedee expeditiv dar și datorită stabilității ridicate al acestui indicator față de media aritmetică, în această lucrare dar și în alte lucrări de cercetare (Cao 2004; Palahí et al. 2006; Schmidt et al. 2020) fost preferat indicatorul DG pentru determinarea parametrului b.

Parametrul c are o corelație mai slabă cu indicatorii calculați însă se poate distinge o relație corelativă între DG, Dmax și Hmax (Figura 5). De regulă în arborete echiene cercetările pe plan internațional arată o legătură mai puternică a parametrului c cu suprafața de bază la hectar, numărul de arbori la hectar și înălțimea dominantă. Au fost testați și acești indicatori (rezultate care nu sunt prezentate în această lucrare) dar legătura corelativă a fost mai slabă decât a indicatorilor prezentați aici.

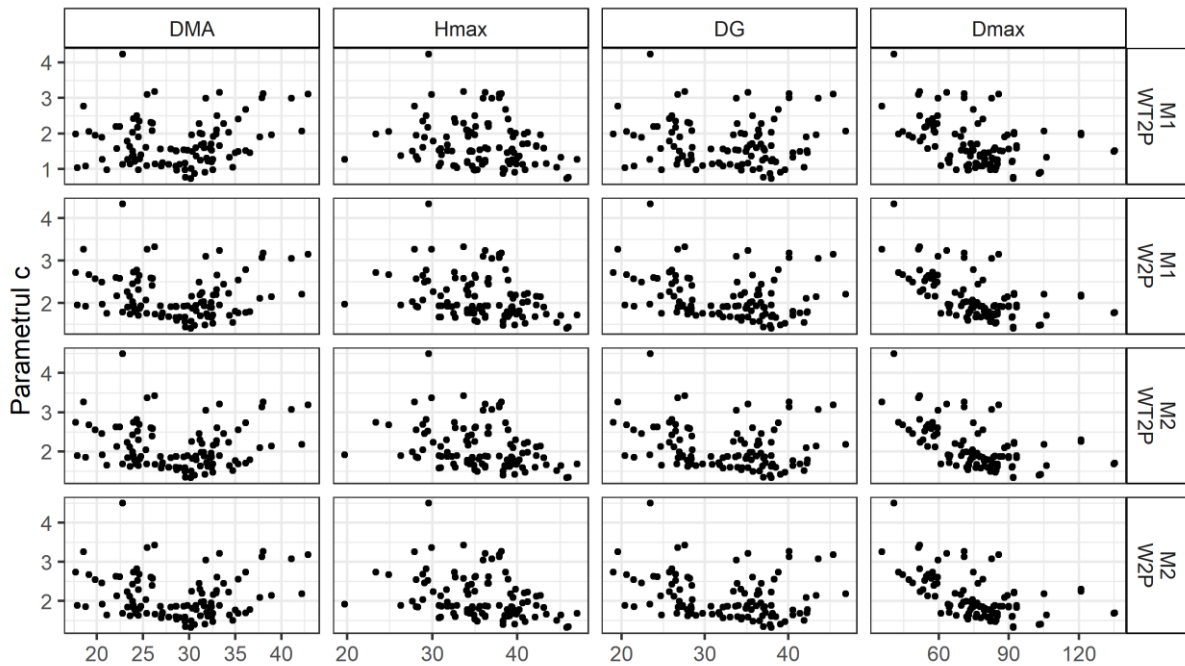


Figura 5. Variația parametrului c în cele 103 SP-uri. Unitatea de măsură pentru indicatorii DMA, DG, Dmax sunt cm iar pentru Hmax este m.

Astfel ecuațiile folosite pentru predicția parametrilor funcției W2P și WT2P prin metoda SUR sunt:

$$\ln(b) = \beta_1 + \beta_2 \ln(DG) \quad (28)$$

$$\ln(c) = \alpha_1 + \alpha_2 \ln(DG) + \alpha_3 \left(\frac{H_{max}}{D_{max}} \right) \quad (29)$$

unde: β și α sunt coeficienții de regresie \ln este logaritmul natural iar celelalte variabile au fost descrise mai sus.

Pentru a stabili variația valorilor reziduale și pentru a îmbunătăți modelul a fost necesară liniarizarea modelului.

4.4.2 Predicția distribuției numărului de arbori pe categorii de diametre prin metoda recuperării parametrilor (PRM)

Având în vedere corelația slabă dintre parametrul c și indicatorii calculați la nivelul fiecărui SP, metoda recuperării parametrilor încearcă predicția parametrului c în funcție de parametrul b și alți indicatori biometrici.

În această lucrare folosind metoda momentelor au fost recuperați parametrii funcțiilor W2P și WT2P.

Știind că media aritmetică a diametrelor nu este un indicator des folosit în practica gospodăririi pădurilor dar este necesar pentru a calcula parametrii funcțiilor de distribuție, a fost elaborată următoarea relație între DG și DMA:

$$DMA = DG - \exp(a_0 + a_1 G + a_2 N) \quad (30)$$

unde: DMA și DG au fost explicați mai sus, a_0 - a_2 , sunt parametri de regresie determinați, G este suprafața de bază la hectar și N numărul de arbori la hectar. G și N sunt variabile care pot fi determinate cu o precizie ridicată fie prin metoda Bitterlich (Bitterlich 1952) fie prin alte metode expeditivă (Giurgiu 1968, 1979).

Folosind această ecuație se poate determina DMA al unei suprafețe dacă variabile introduse în ecuația de regresie sunt cunoscute. Această relație a fost folosită pentru a determina DMA pentru fiecare SP astfel încât să se poată calcula parametrii distribuțiilor W2P și WT2P folosind MM.

4.4.3 Evaluarea funcțiilor și a metodelor folosite

Toate cele 5 metode de determinare a parametrilor funcție W2P și WT2P folosite în PPM au oferit rezultate satisfăcătoare în predicția parametrilor distribuțiilor experimentale din zona de studiu.

Distribuția teoretică care a prezis numărul de arbori și suma diametrelor cu cea mai mare acuratețe a fost WT2P. Primele trei locuri în clasament au fost ocupate de WT2P, în timp ce cea mai bună clasare obținută de W2P a fost al patrulea loc. Chiar și în acest caz, în general, W2P tinde să aibă o precizie mai mare decât WT2P atunci când sumele diametrelor au fost ridicate la puterea a doua și a treia.

Abordările de modelare utilizate au arătat o diferență clară între PPM clasic în două etape (M1, M2) și abordarea de ajustare simultană (M3, M4). Cu toate acestea, parametrii care estimează cu cea mai mare acuratețe distribuția experimentală au fost obținuți cu PRM folosind metoda momentelor. Precizia obținută de WT2P prin M5 măsurată prin statistica %RMSE este foarte ridicată cu doar 4,8% pentru suma diametrelor, până la 12,6% la suma diametrelor la puterea a treia care aproximează volumul arboretului și doar 0,02 % pentru suma diametrelor la puterea a doua care aproximează suprafața de bază a arboretului. Valorile statisticii ME(%) au fost cuprinse între 2,4% și 5,5% cu cea mai mică valoare înregistrată de suma diametrelor la puterea a doua (0,01%).

4.4.4 Testarea celor mai bune metode PPM și PRM în suprafețe de cercetare reprezentative noi din Parcul Național Retezat (PNR)

Modelul M5 a avut cele mai bune rezultate în predicția sumelor celei de-a doua puteri ale diametrelor, în timp ce cea mai slabă performanță a fost în predicția valorilor sumelor diametrelor la puterea a treia (Tabelul 2). Distribuția W2P a avut tendința de a obține valori mai mici pentru statisticile %RMSE și %ME la puteri mai mari (D_2 și D_3), în timp ce WT2P s-a comportat mai bine atunci când a prezis suma diametrelor (D_1).

Acest lucru este explicabil având în vedere că prin PRM parametrii obținuți sunt derivați din o aproximare cu o precizie mai bună a momentelor distribuției reale (DG, DMA), comparativ cu metoda PPM unde parametrul c are o legătură corelativă mult mai slabă decât parametrul c determinat prin metoda PRM.

Tabelul 2. Testarea metodelor, funcțiilor și abordărilor considerate pentru a prezice distribuția diametrelor pe categorii de diametre pe setul de date de testare (valoarea scorului relativ este prezentată între paranteze).

Metodă	Abordare	Distribuție	RMSE%				ME (%)				Punctaj	Clasament
			D ⁰	D ¹	D ²	D ³	D ⁰	D ¹	D ²	D ³		
PPM	M1	W2P	0.00	5.58 (3.46)	3.81 (3.19)	6.90 (1.00)	0.00	-3.40 (4.71)	-3.05 (3.00)	-1.91 (1.72)	17.09	2
PPM	M1	WT2P	0.00	(9.68)	(15.58)	(17.04)	0.00	7.88 (10)	13.68 (10)	13.88 (10)	60.00	10
PPM	M2	W2P	0.00	5.49 (3.31)	4.15 (3.39)	7.62 (1.64)	0.00	-3.19 (4.46)	-3.36 (3.20)	-3.47 (2.80)	18.80	4
PPM	M2	WT2P	0.00	4.16 (1.19)	4.52 (3.60)	10.20 (3.93)	0.00	0.25 (1.00)	3.62 (3.38)	6.98 (5.23)	18.33	3
PPM	M3	W2P	0.00	6.74 (5.32)	8.22 (5.74)	13.08 (6.49)	0.00	-4.79 (6.36)	-7.00 (5.60)	-9.65 (7.07)	36.58	9
PPM	M3	WT2P	0.00	5.26 (2.95)	6.90 (4.98)	14.39 (7.65)	0.00	0.29 (1.04)	-2.34 (2.53)	-9.68 (7.10)	26.25	6
PPM	M4	W2P	0.00	6.60 (5.09)	7.79 (5.50)	12.46 (5.94)	0.00	-4.68 (6.22)	-6.78 (5.46)	-9.30 (6.83)	35.04	8
PPM	M4	WT2P	0.00	5.11 (2.72)	6.19 (4.57)	13.53 (6.89)	0.00	0.51 (1.31)	-2.02 (2.32)	-9.32 (6.85)	24.65	5
PRM	M5	W2P	0.00	6.00 (4.14)	6.86 (4.96)	12.04 (5.56)	0.00	-4.38 (5.87)	-6.72 (5.41)	-8.58 (6.33)	32.27	7
PRM	M5	WT2P	0.00	4.04 (1.00)	0.02 (1.00)	8.86 (2.74)	0.00	-0.88 (1.75)	-0.02 (1.00)	0.87 (1.00)	8.49	1

Ambele metode au limitări în ajustarea distribuției în zona diametrelor mari (Figura 6). Acest fapt este de înțeles dacă luăm în considerare că în arboretele virgine și cvasivirgine așa cum sunt arboretele din Rezervația Gemenele întâlnim arbori care sunt la limita longevității fiziologice cu diametre foarte mari ceea ce face această porțiune a distribuției greu de modelat.

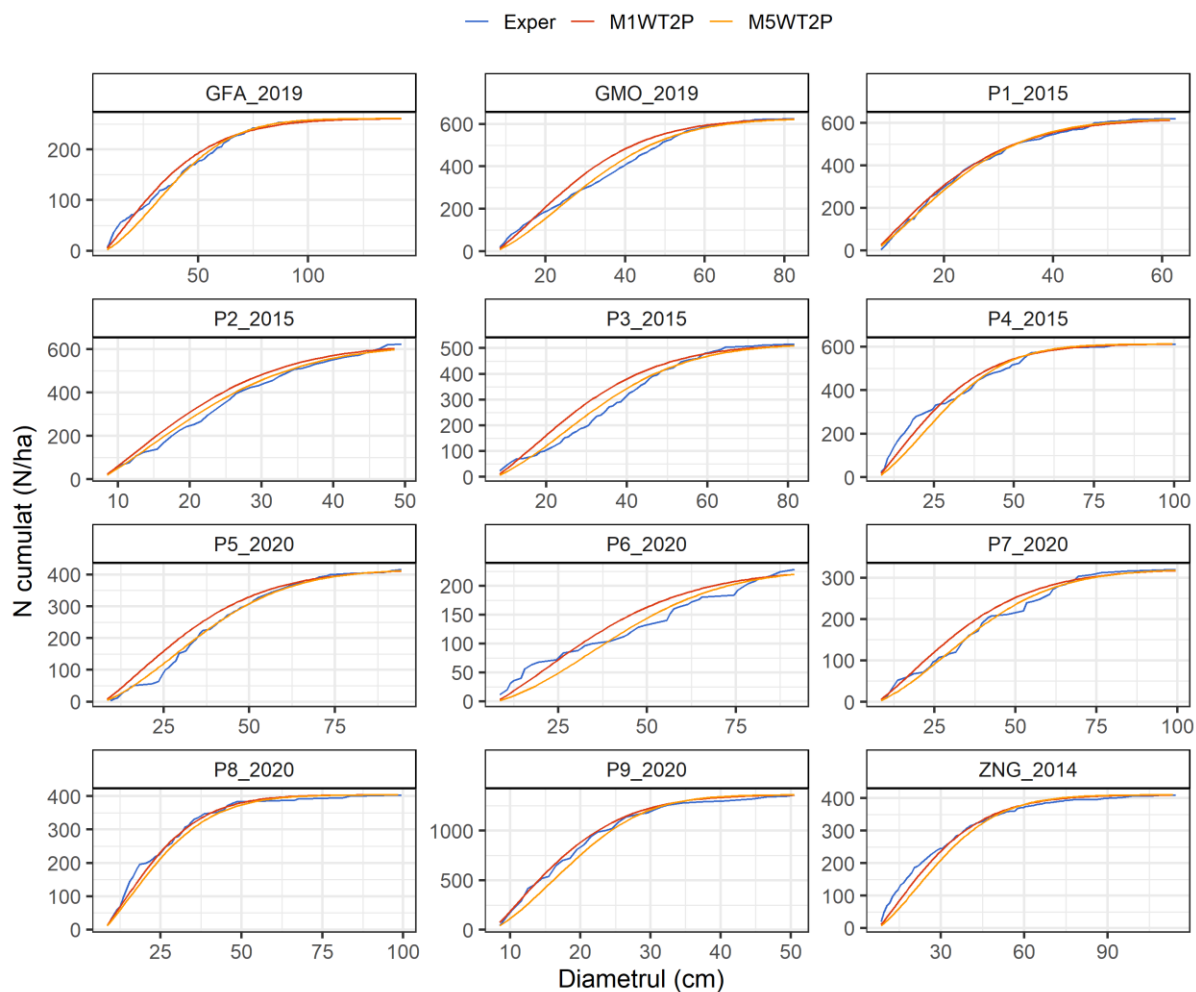


Figura 6. Numărul de arbori cumulat pe categorii de diametre calculat prin cea mai bună abordare (M5WT2P) și abordarea cu cele mai slabe rezultate (M1WT2P) comparativ cu numărul de arbori calculat din distribuția experimentală (Exper).

Folosind numărul de arbori prezis pentru fiecare categorie de diametre se poate calcula și suprafața de bază cumulată. Diferențele dintre curbele teoretice și cele experimentale sunt mult mai evidente în cazul suprafeței de bază față de cele ale numărului de arbori pe categorii de diametre și erorile obținute apar în cele mai multe cazuri în partea superioară a distribuției (Figura. 7). Cu toate acestea valorile obținute și forma distribuțiilor sunt comparabile cu cele ale distribuției experimentale excepție făcând suprafața de ZNG_2014 care are o valoare mult mai mică a suprafeței de bază pentru categoriile mari de diametre. Metoda PRM ajustează mai bine distribuțiile experimentale mai ales pentru categoriile mari de diametre unde se apropie mai mult de acestea. Metodele de determinare distribuției arborilor pe categorii de diametre oferă rezultate ce indică aplicabilitatea acestora în aplicarea măsurilor silviculturale. Obținerea unor distribuții ale arborilor pe categorii de diametre duce la o prognoză mai precisă a volumului arboretelor pe sortimente, un indicator al aplicării gospodăririi durabile a pădurilor și de asemenea, un indicator a biodiversității structurale a arboretelor.

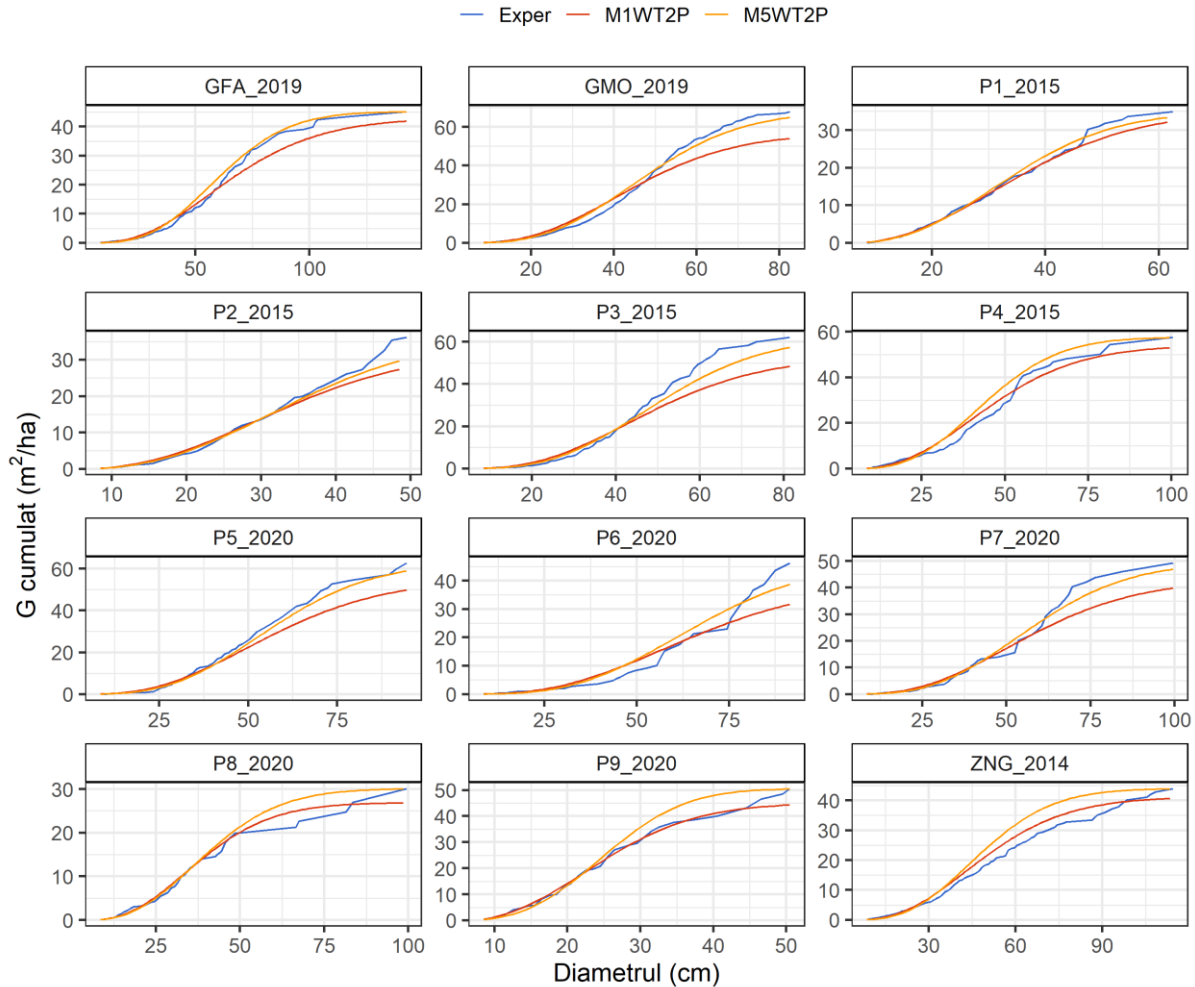


Figura 7. Suprafața de bază cumulată pe categorii de diametre calculat prin cea mai bună abordare (M5WT2P) și abordarea cu cele mai slabe rezultate (M1WT2P) comparativ cu suprafața de bază cumulată din distribuția experimentală (Exper).

4.5. Modelul de predicție a înălțimii arborilor

Acuratețea modelelor H-D depinde de cât de puternică este corelația dintre cele două variabile. În Parcul Național Retezat corelația dintre cele două variabile este de 0.836, specia cu cea mai puternică corelație este BR urmată de FA și MO.

4.5.1 Modelul de predicție a înălțimii arborilor pentru specia molid

4.5.1.1 Modelul înălțime-diametru pentru specia molid

În procesul de ajustare a curbei înălțimilor la nivelul fiecărui SPP pentru specia MO fost observată incapacitatea modelelor cu 3 parametri de a ajunge la convergență pentru toate SPP-urile deși valorile inițiale necesare pentru obținerea parametrilor au fost obținute inițial prin liniarizarea modelului.

Modelul doi (M2) a ajustat cel mai bine datele de teren, are cel mai scăzut PRESS și, de asemenea, a avut cele mai bune performanțe pe un nou set de date. Diferența dintre performanța celor mai bune modele cu doi și trei parametri este minoră cu toate acestea ne-am concentrat pe modelele cu doi parametri pentru a estima cel mai mic număr posibil de parametri obținând astfel parsimonia modelului construit.

Astfel, modelul M2 a fost ales ca model de bază pentru dezvoltarea curbei generalizate a înălțimilor. Modelul se bazează pe relația liniară propusă de Curtis (1967) unde parametrii funcției sunt parametrii rate și formei, iar valoarea +1 se adaugă la diametru pentru a evita estimări absurde atunci când valoarea diametrului se apropie de zero.

4.5.1.2 Corelația variabilelor adiționale cu parametrii funcției simple folosită pentru modelarea relației înălțime-diametru

Variabilele calculate pentru a explica variația înălțimii descriu structura verticală și orizontală a arboretului, amestecul de specii, competiția individuală a arborilor și competiția generală la nivelul coronamentului arboretului.

Variabilele care descriu structura pe verticală a arboretului, în special cele care măsoară diferențierea verticală (de exemplu, Amplit[H]), au arătat cea mai mare corelație cu parametrii modelului M2. Cea mai puternică corelație cu parametrii modelului M2 este înregistrată de înălțimea maximă (Max[H]) și H50 (Figura 8).

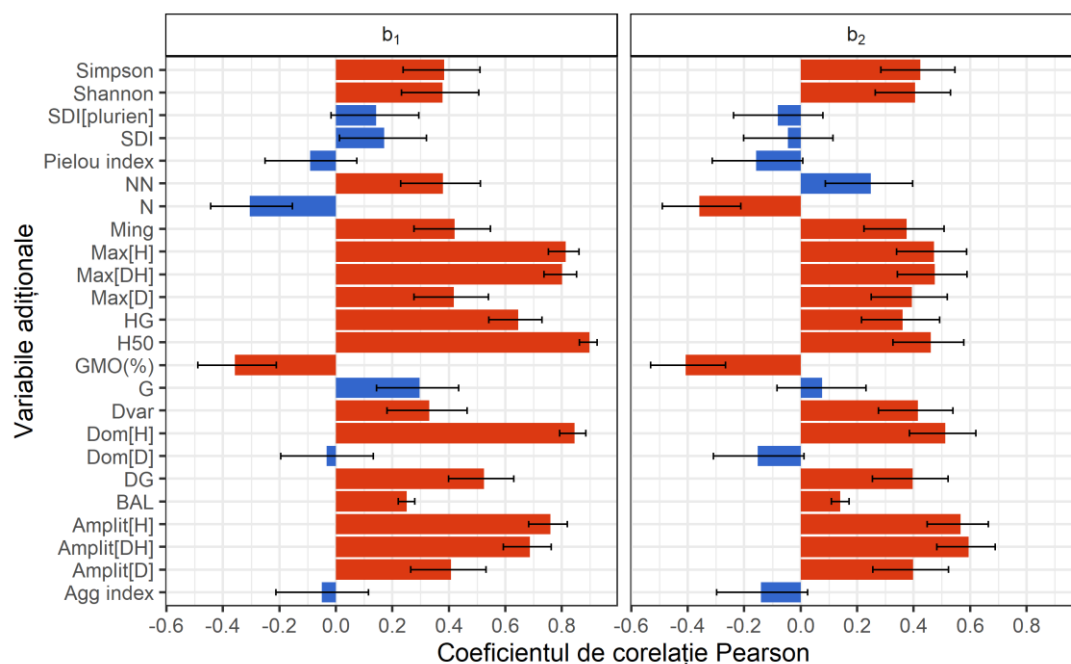


Figura 8. Intensitatea și semnificația corelației între variabilele arboretului și parametrii modelului M2. Barele de culoare albastră indică o corelație nesemnificativă ($\alpha < 0.0001$) cu parametrii modelului, iar cele de culoare roșie arată o corelație semnificativă. Barele negre reprezintă intervalul de încredere de 0.95%.

Cea mai puternică corelație cu parametri modelului M2 este înregistrată de înălțimea maximă (Max[H]) și H50. Se observă de asemenea o mai puternică corelație a variabilelor adiționale cu parametrul b_1 comparativ cu parametrul b_2 (Figura 9-10).

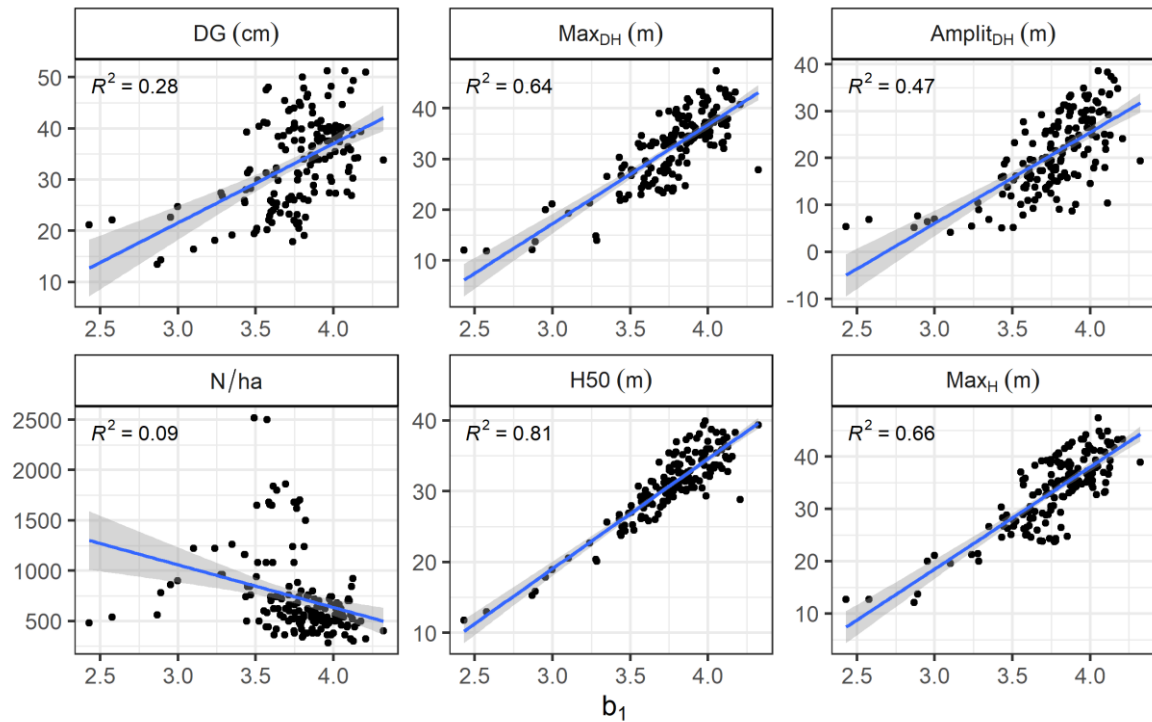


Figura 9. Relația celor mai importante variabilele ale arboretului cu parametrul b_1 .

Relația dintre variabilele cu o corelație semnificativă și parametrii modelului este liniară și nu este necesară nici o transformare.

Înălțimea indicatoare H_{50} calculată pentru diametrului indicator de 50 cm (D_{50}) și a ecuației simple M2 pentru fiecare suprafață prezintă cea mai ridicată corelație cu parametrul b_1 . Este cunoscută relația dintre înălțimea medie sau dominantă a arboretului și productivitate. Din acest motiv cele mai multe modele generalizate H-D folosesc înălțimea dominantă ca variabilă adițională pentru curbele generalizate H-D. Modelele de determinare a înălțimii dominante sunt dezvoltate în prealabil pentru a putea folosi acest indicator ca indicator al productivității arboretului. Aceste modele folosesc vârsta pentru a prezice clasa de producție și sunt frecvente pentru arborete echiene.

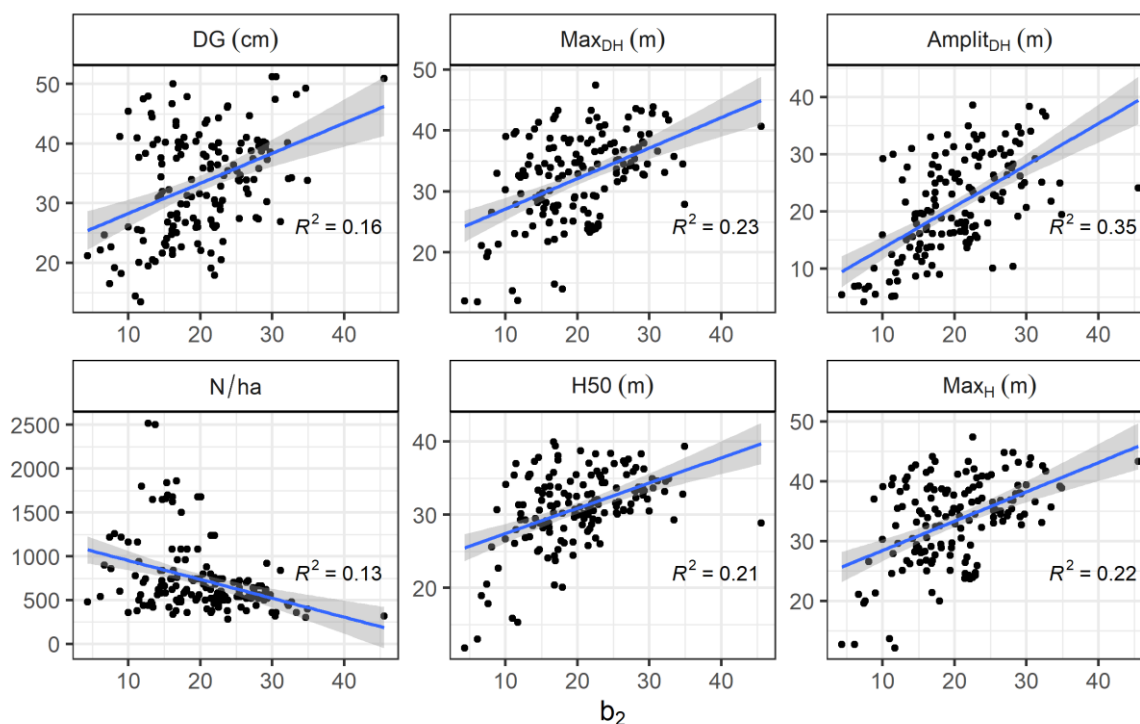


Figura 10. Relația celor mai importante variabilele ale arboretului cu parametrul b_1 .

Un criteriu esențial în alegerea variabilelor adiționale constă ușurința de determinare al acestuia pe teren. Pentru a determina indicatorul H_{50} pentru o nouă suprafață este necesară măsurarea unui număr ridicat de înălțimi ceea ce va duce la creșterea timpului și costurilor aferente măsurătorilor de teren, astfel s-a decis să se renunțe la acest indicator. Cu toate acestea trebuie evidențiată corelația acestui indicator cu parametri funcției H-D și posibilitatea pe care acest indicator o oferă de a construi un model cu o acuratețe ridicată.

Înălțimea celui mai gros arbore și a celui mai subțire arbore, DG sau N au fost considerate variabile mult mai ușor de determinat pe teren. Folosind aceste variabile a fost dezvoltat curba generalizată H-D pentru specia MO.

4.5.1.3 Curba simplă a înălțimilor pentru specia molid folosind regresia neliniară mixtă.

Curba înălțimilor pentru specia MO a fost construită pe baza inventarierilor efectuate în anul 2015. Setul de date provenite din inventarierile efectuate în anul 2020 a fost folosit pentru etapa de calibrare.

Primul model H-D dezvoltat a luat în considerare cazul simplu al relație H-D în care nu există nici un altă variabilă adițională disponibilă la nivel de arbore sau arboret. Astfel, modelul M2 a fost scris sub forma regresiei mixte:

$$H_{ij} = 1.3 + \exp \left[b_1 + b_i^{(1)} + \frac{(b_2 + b_i^{(2)})}{(D_{ij} + 1)} \right] + e_{ij} \quad (31)$$

$$b_i = \begin{pmatrix} b_i^{(1)} \\ b_i^{(2)} \end{pmatrix} N(0, \psi) \quad (32)$$

unde H_{ij} este înălțimea arborelui j din SPP i , D_{ij} este diametrul arborelui j din SPP i , b_1 și b_2 sunt parametri ficși, $b_i^{(i)}$ sunt parametri altelei iar ψ reprezintă matricea varianței-covarianței parametrilor aleatori.

Prezența heterodasticității a fost identificată prin analiza valorilor reziduale. Aceasta a fost îndepărtată parțial prin ajustarea simultană a datelor cu funcția de tip putere

4.5.1.4 Curba generalizată a înălțimilor pentru specia molid folosind regresia neliniară mixtă

Procesul de dezvoltarea a curbei generalizate a înălțimilor a fost unul iterativ. Variabilele adiționale au fost introduse pe rând în model rescriind parametrii modelului în funcție de acestea. Informația explicată de aceste modele a fost estimată folosind testul F condițional și statisticile AIC și RMSE. În primul model dezvoltat a fost inclus înălțimea celui mai gros arbore ($\text{Max}[\text{DH}]$), diferența înălțimilor celui mai gros și celui mai subțire arbore ($\text{Amplit}[\text{DH}]$) și numărul de arbori la hectar (N). Deoarece variabila DG este mai ușor de determinat pe teren decât înălțimile celor mai subțiri și groși arbori am considerat oportună includerea acestei variabile într-un al doilea model generalizat H-D. Astfel, modelul generalizat al curbei înălțimilor pentru specia MO este dat de relațiile următoare:

$$H_{ij} = 1.3 + \exp \left[\left(b_1 + b_2 \text{Max}[\text{DH}] + b_i^{(1)} \right) + \frac{(b_3 + b_4 \text{Amplit}[\text{DH}] + b_5 N + b_i^{(2)})}{(D_{ij} + 1)} \right] + e_{ij} \quad (33)$$

$$H_{ij} = 1.3 + \exp \left[\left(b_1 + b_2 DG + b_i^{(1)} \right) + \frac{(b_3 + b_i^{(2)})}{(D_{ij} + 1)} \right] + e_{ij} \quad (34)$$

unde b_1 - b_5 sunt parametri ficși ai modelului iar restul variabilelor au fost prezentate mai sus.

Abaterilor reziduale de la valorile măsurate ale celor două modele neliniare generalizate cu efecte mixte au indicat de asemenea prezența heteroscedasticității confirmând că este necesară ponderarea varianței pentru diametrele mari. În final cele două modele au fost ajustate simultan cu funcția de tip putere.

Scopul folosirii modelelor de regresie mixtă este în final, predicția parametrilor aleatori pentru o nouă suprafață pe baza unui număr redus de observații. Cu cât variabilele introduse în modelul generalizat explică variația înălțimilor cu atât mai puțini arbori vor fi necesari pentru predicția cu acuratețe a parametrilor aleatori pentru o suprafață nouă (Figura 11).

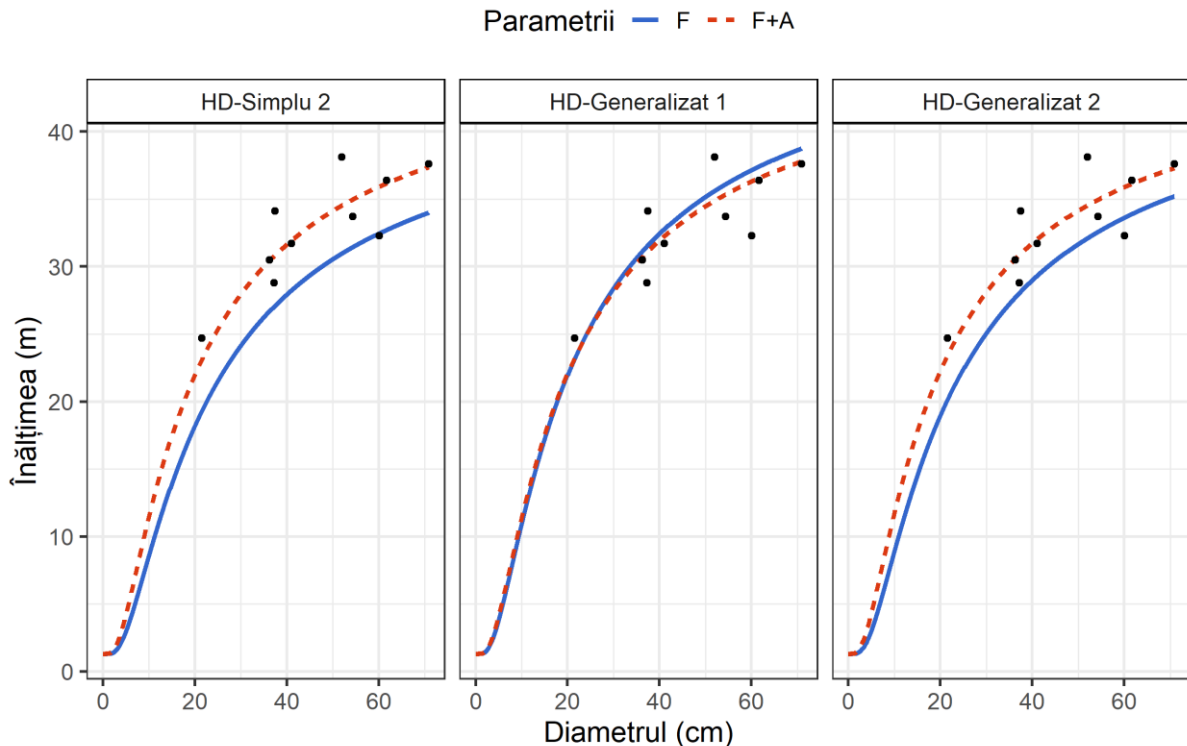


Figura 11. Curba înălțimilor prezisă folosind cele trei modele dezvoltate pentru specia MO în SP 132 SPP 1. Parametrii F reprezintă folosirea parametrilor ficși pentru predicție și parametri F+A reprezintă folosirea parametrilor ficși și aleatori.

Modelele generalizate asigură un comportament și o predicție logică a relației H-D cu variabilele ce influențează dinamica relației H-D la nivel de arboret. Această proprietate facilitează dezvoltarea modelelor de simulare a creșterii și producției arboretelor pentru o gospodărire adaptivă a arboretelor.

4.5.1.5 Curba simplă și generalizată a înălțimilor pentru specia molid folosind regresia cuantilelor

Folosind modelul de bază și modelul generalizat dezvoltat pentru specia MO au fost estimați parametrii a 11 cuantile prin regresia cuantilelor (Figura 12). În continuare, cele mai bune combinații de 3, 5 și 7 cuantile au fost folosite pentru a obține o curbă calibrată la nivelul fiecărui SPP.

Pentru predicția curbei înălțimilor la nivelul fiecărui SPP au fost testate diferite combinații de cuantile. În urma analizei și pe baza literaturii de specialitate au fost selectate următoarele combinații de 3, 5 și 7 cuantile (Q3, Q5, Q7) :

- Q3 – 0.1, 0.5, 0.9;
- Q5 – 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9;
- Q7 – 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.95.

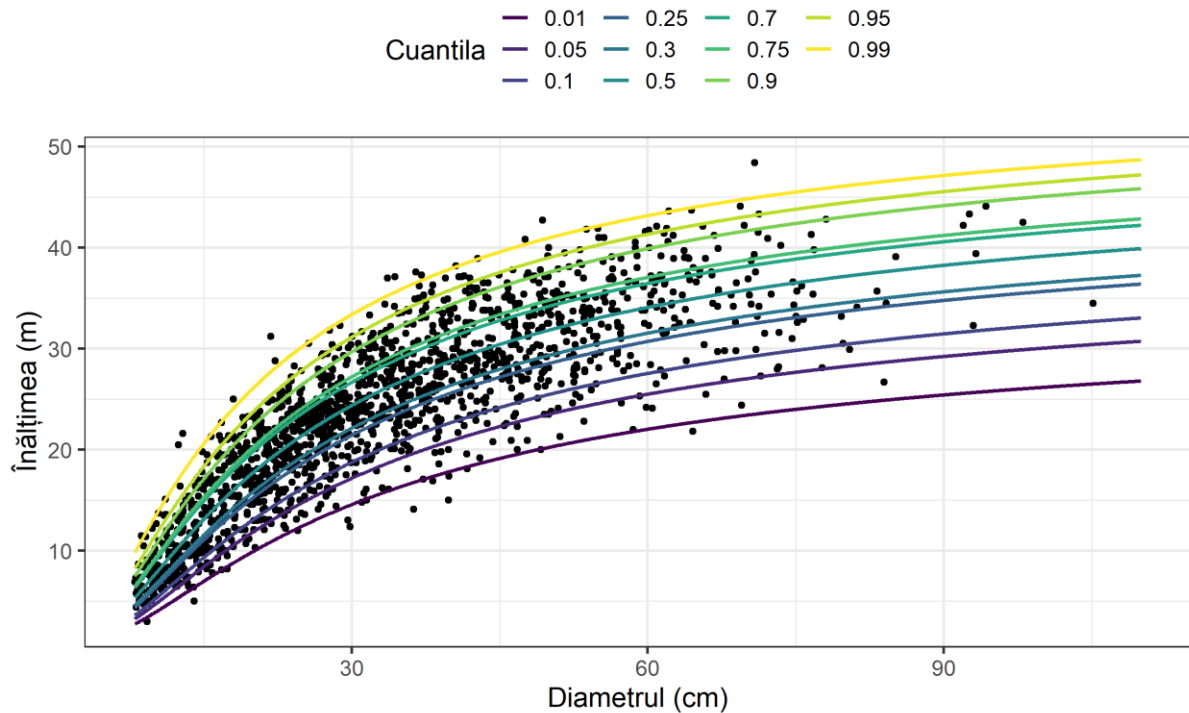


Figura 12. Curba ecuațiilor de regresie a celor 11 cuantile folosind modelul simplu H-D pentru specia MO

Diferențele de precizie obținute de cele trei seturi de cuantile sunt nesemnificative. Astfel pentru determinarea înălțimii arborilor prin metoda interpolării cuantilelor se poate folosi doar setul de trei cuantile (0.1,0.5,0.9).

4.5.2 Modelul de predicție a înălțimii arborilor pentru specia fag, brad și grupele de specii diverse tari, diverse moi și diverse rășinoase

4.5.2.1 Modelul înălțime diametru de bază pentru specia fag, brad și grupele de specii diverse tari, diverse moi și diverse rășinoase

Funcția M7 s-a clasat pe unul din cele trei locuri pentru majoritatea speciilor. Mai mult de cât atât, funcția prezintă un comportament logic și în afara amplitudinii de diametre pentru care s-au obținut parametrii. Deoarece diferența dintre primele trei modele este iar mică a fost preferată funcția M7 pentru toate speciile și grupele de specii rămase.

$$H_{ij} = 1.3 + (b_1) \exp\left(\frac{b_2}{D_{ij}}\right) + e_{ij} \quad (35)$$

unde H_{ij} este înălțimea arborelui j din SPP i, D_{ij} este diametrul arborelui j din SPP i, b_1 - b_2 sunt parametrii funcției.

4.5.2.2 Curba simplă a înălțimilor pentru specia fag, brad, diverse tari, diverse moi și diverse rășinoase folosind regresia neliniară mixtă.

Expresia funcției M7 a fost scrisă sub forma regresiei mixte folosind doi parametri aleatori (Relația 35). Pentru dezvoltarea modelului generalizat au fost incluse în funcție variabile la nivel de arbore și arboret. Din cauza unui număr redus de observații în fiecare SPP, nu a fost posibilă construirea curbei înălțimilor pentru fiecare suprafață de probă și stabilirea unei relații între parametrii funcției și variabilele adiționale. Astfel, variabilele adiționale au fost introduse în funcție iterativ comparând modelele prin testul F care cuantifică câtă informație este explicată de influența fiecărei variabile introdusă în model. Nici una din variabilele adiționale calculate nu a explicat variația înălțimilor. Astfel modelul simplu dintre înălțime și diametru este scris sub forma regresiei mixte, astfel:

$$H_{ij} = 1.3 + (b_1 + b_i^{(1)}) \exp\left(\frac{b_2 + b_i^{(2)}}{D_{ij}}\right) + e_{ij} \quad (36)$$

4.5.3 Calibrare modelelor înălțime-diametru pentru o suprafață nouă folosind un număr redus de observații

În setul de calibrare au fost selectate SPP-urile în care peste 90% din arbori au avut înălțimile măsurate și numărul de înălțimi măsurate este de cel puțin 12 arbori. Calibrarea a fost posibilă doar pentru specia MO.

Au fost folosite 3 metode de calibrare și anume, metoda calibrării parametrilor ficși (CPF), metoda calibrării parametrilor aleatori (CPA) și metoda calibrării setului de regresii cu 3 cuantile (CQ3).

Aceste trei metode de calibrare au fost comparate cu eroarea obținută prin construirea curbei înălțimilor (OLS) la nivelul fiecărui SPP folosind toate înălțimile măsurate (Figura 13).

Acuratețea modelului generalizat este cu 21% mai mare decât cea a modelului simplu atunci când se folosesc doar parametri. În schimb, modelul generalizat ajunge la aceeași acuratețe cu modelul simplu atunci când cele două modele sunt calibrate.

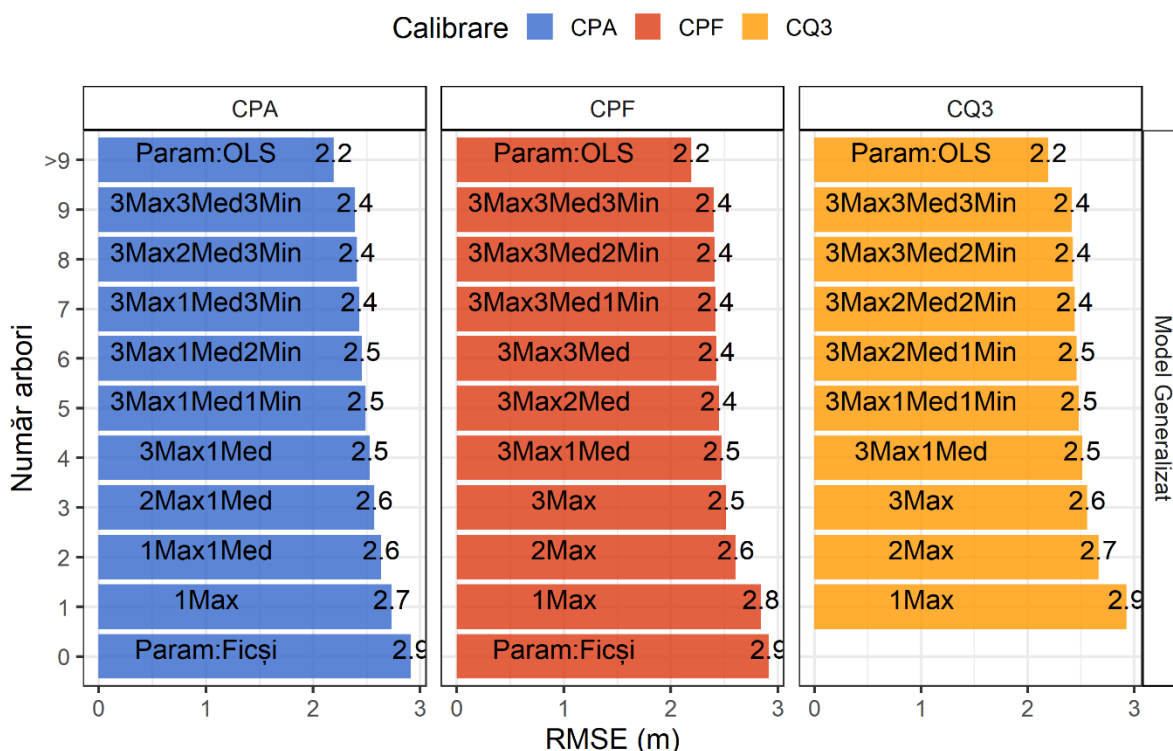


Figura 13. Numărul de arbori, dimensiunile acestora și eroarea obținută pentru cele trei metode de calibrare ale modelului generalizat.

Astfel pentru predicția înălțimilor în Parcul Național Retezat pentru specia MO, se recomandă folosirea modelului generalizat al înălțimilor și calibrarea acestui folosind 4-5 înălțimi măsurate de la arbori cu diametrul apropiat de diametrul mediu al arboretului și diametrul maxim al arboretului.

4.6 Modelul de creștere în diametru

4.6.1 Modelul dinamic de creștere în diametru la nivel de arbore

Proprietatea esențială pe care modelele de creștere în diametru trebuie să o dețină este capacitatea de a reproduce dinamica logică și biologică a creșterii în diametru a unui arbore. Astfel, relația 37 a fost dezvoltată să îndeplinească această cerință.

$$\ln(i_{d5}) = a_1 + b_i^{(1)} + a_2 D^2 + a_3 \ln(D) + b_i^{(2)} \ln(D) + a_4 \left(\frac{BAL}{G}\right) + a_5 RD + a_6 \ln(G) + a_7 Alt + a_8 [PA \cdot \cos(EXP)] + a_9 [PA \cdot \sin(EXP)] + e \quad (37)$$

Acest model include indicatori ai celor trei componente care explică variabilitatea creșterilor. Parametrii variabilelor D, BAL și G au fost condiționați să aibă valori negative. Pentru speciile care, prin ajustare, valoarea parametrilor a fost pozitivă, aceștia au fost eliminați din ecuație. Forma curbei de creștere este una este specifică creșterii în diametru a arborilor. Maximul creșterii este realizat în jurul diametrului de 40 cm, forma curbei fiind unimodală cu o asimetrie pozitivă (Figura 14).

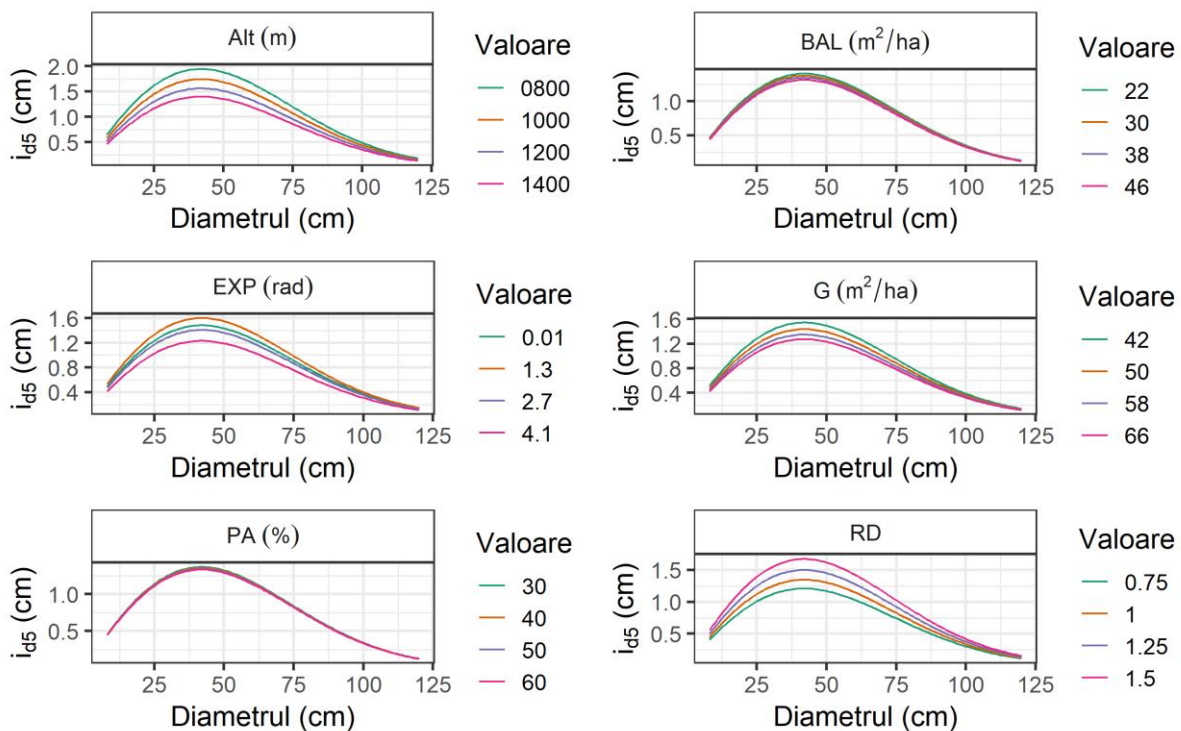


Figura 14. Dinamica creşterii în raport cu variabilele dependente folosite în relaţia.36 pentru specia molid. Pe axa x este diametrul iniţial, pe axa y, i_{d5} reprezintă creşterea în 5 ani.

În fiecare grafic din figura 14 au fost folosite aceleaşi valori pentru toate variabilele modelului exceptând variabila pentru care s-a construit graficul care a luat valorile afişate în legendă. Valorile menţinute constante reprezintă media obţinută la nivelul întregii RSI. Astfel, Alt=1472, BAL= 38, EXP = 3, G=58, PA=49, RD=1. De exemplu, pentru graficul „Alt (m)” au fost folosite valorile variabilelor medii menţionate anterior cu excepţia valorii altitudinii medii. În locul acesteia, variabila altitudinii a luat iterativ valorile 800, 1200, 1400 şi 1600 (m).

Modelul a fost construit pentru intervalul de diametre 8-100 cm. În graficele de mai sus au fost prezise valori şi în afara intervalului pentru care a fost construit modelul pentru a observa comportamentul modelului. Se poate observa că pentru un diametru mai mare de 100 de cm, modelul oferă aceleaşi rezultate indiferent de variabilele folosite. Cu toate acestea forma curbei este una logică şi descreşte spre 0 la diametre ridicate.

4.6.1.1 Validarea modelelor dinamice de creştere în diametru

Modelele aplicate au în general un RMSE de 1 cm şi o eroare medie sistematică de până 0.01 cm. Calibrarea modelelor de creştere şi obţinerea parametrilor aleatorii folosind toţi arborii din SPP oferă o precizie mult mai ridicată faţă de aplicarea modelelor utilizând doar parametri ficşi.

De exemplu, folosind indicatorul statistic RMSE putem observa ca utilizând predicţia parametrilor aleatori împreună cu parametri ficşi, precizia modelului de creştere în diametru a crescut cu 17.6 % pentru MO, 21% pentru FA şi 10% pentru BR (Tabelul 3).

4.6.1.2 Calibrarea modelelor dinamice de creştere în diametru

Calibrarea modelelor mixte este unul dintre principalele motive pentru care acest model statistic este promovat și folosit în biometria forestieră. Chiar și o singură valoare cunoscută a variabilei independente dintr-o nouă suprafață poate duce la calibrarea modelelor mixte, îmbunătățind semnificativ predicția modelului comparativ cu predicția obținută aplicând parametri ficși. Acuratețea predicției parametrilor aleatorii este influențată de numărul de arbori folosiți dar și dimensiunile acestora. Cunoașterea acestor informații este de un real folos în practica silvică pentru a obține rezultatele dorite.

Rezultatele obținute pentru specia MO arată că arborii din extremele dimensionale duce la cea mai bună calibrare. În tabelul 3 sunt prezentate dimensiunile arborilor care au dat cele mai bune rezultate pentru fiecare număr de arbori folosit în procesul de calibrare.

Tabelul 3. Rezultatele calibrării modelului prin predicția parametrilor aleatorii, utilizând un număr de arbori și de dimensiuni diferite.

Nr. arbori	Dimensiunea arborilor	RMSE
0	Param, ficși	0,980
1	1max	0,946
1	1min	0,946
2	1min+1max	0,922
3	1min+1med+1max	0,910
4	1min+1med+2max	0,895
5	2min+med+2max	0,890
6	2min+2med+2max	0,886
7	2min+2med+3max	0,880
7	3min+2med+2max	0,880
8	3min+3med+2max	0,880
9	3min+3med+3max	0,872

În tabelul 3, valoarea indicatorului statistic RMSE, corespunzătoare numărului de arbori 0, este rezultatul aplicării modelului dinamic de creştere în diametru folosind doar parametri ficși. Notațiile min, max, med, reprezintă dimensiunea arborilor folosiți pentru calibrare, min=minim, max= maxim, med=mediu.

4.6.2 Modelul de creştere în diametru la nivel de arbore dezvoltat folosind ecuațiile independente de vârstă scrise sub forma diferenței algebrice a ecuațiilor

4.6.2.1 Indicele creșterii în diametru

Folosind o ecuație similară cu cea formulată mai sus dar fără a include variabilele stațiunii a fost dezvoltată relația 38. Aceasta a fost folosită pentru a prezice creșterea ultimilor 5 ani folosind informațiile obținute în inventarierea realizată în 2020. Relația include componenta dimensională

și competițională astfel încât abaterile reziduale de la predicția făcută cu această funcție au fost folosite pentru a calcula un indice al productivității pentru fiecare SPP și specie.

$$\ln(i_{d5}) = a_1 + b_i^{(1)} + a_2 D^2 + a_3 \ln(D) + b_i^{(2)} \ln(d) + a_4 \left(\frac{BAL}{G}\right) + a_5 RD + a_6 \ln(G) + e \quad (38)$$

unde:

i_{d5} – reprezintă creșterea în diametru pe o perioadă de 5 ani

D – diametrul de bază măsurat în 2020

BAL – suprafața de bază a arborilor mai groși calculată folosind inventarierea din anul 2020

G – suprafața de bază în anul 2020

RD – raportul dintre diametrul arborelui și media pătratică a diametrelor

e – eroarea modelului

4.6.2.2 Dezvoltarea modelului de creștere în diametru

Cele trei ecuații au fost testate pentru fiecare specie. Performanța celor trei ecuații în ajustarea datelor provenite din carote de creștere este similară. Cu toate acestea doar modelele L-K și R-C au fost dezvoltate mai departe pentru a include și indicele de creștere deoarece abaterile reziduale a modelului H au avut o tendință nedorită.

Întrucât valoarea obținută pentru parametrul A prin ajustare a luat valori ilogice (900 cm), aceasta a fost introdus în ecuație având valoarea fixă de 150, știind că parametrul A reprezintă asimptota modelele R-C și L-K. Această valoare reprezintă diametrul maxim înregistrat în RSI și a fost considerat plauzibil ca și valoare asimptotică a diametrului pentru toate cele trei specii din zona de studiu.

Ecuațiile dezvoltate pentru a include și indicele de creștere sunt următoarele:

$$Y_{1+dist} = 150 \left\{ 1 - \exp(-(b_0 + b_1 CI) dist) \left[1 - \left(\frac{Y_1}{150}\right)^{1-m} \right] \right\}^{\frac{1}{1-m}} \quad (39)$$

$$Y_{1+dist} = 150 \exp \left\{ -(c_0 + c_1 CI) \frac{1}{\left[\frac{-(c_0 + c_1 CI)}{\left(\ln(Y_i/150)}\right)^{\frac{1}{m}} + dist \right]^m} \right\} \quad (40)$$

unde:

b_0, b_1, c_0, c_1, m – reprezintă parametri modelelor de creștere în diametru

CI – unul dintre cei doi indici de creștere dezvoltati

Y_1 – diametrul la timpul 1

Y_{1+dist} – diametrul la timpul 1 + dist

dist – distanța în ani dintre măsurători (în cazul de față, de 1 an).

4.6.3 Compararea modelelor de creştere în diametru dezvoltate

În acest subcapitol sunt comparate modelele dezvoltate pentru specia MO, fiind cea mai importantă specie din zona de studiu. Pentru fiecare arbore din specia MO a fost prezis diametrul folosind cele două modele dezvoltate. Suprafaţa de bază aferentă arborilor măsuŗaţi din specia MO din fiecare SPP a fost cumulată şi comparată cu suprafaţa de bază prezisă (Figura 15).

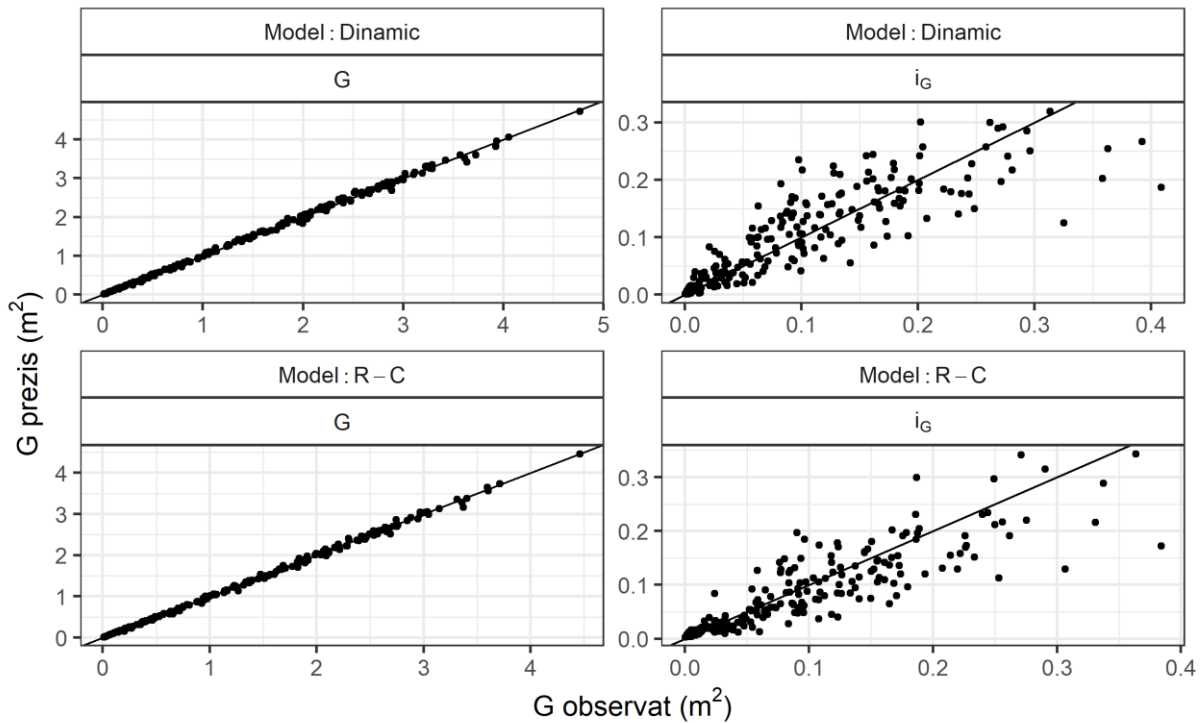


Figura 15. Predicţia suprafeţii de bază la nivelul fiecărui SPP.

În graficele cu titlul G, pe axa x , s-a reprezentat suprafaţa de bază (G) măsurată pentru fiecare SPP în 2020 iar pe axa y , suprafaţa de bază prezisă folosind modelul dinamic şi modelul R-C. În graficele cu titlul i_G pe axa x s-a reprezentat creşterea în suprafaţa de bază pentru fiecare SPP rezultată din inventarierea desfăşurată în anii 2015 şi 2020 iar pe axa y creşterea în suprafaţa de bază rezultată din diferenţa suprafeţii de bază prezise şi suprafaţa de bază măsurată în 2015.

Pentru modelul de creştere R-C, în cazul predicţiei diametrului valoarea statisticii RMSE este 1.105 cm iar valoarea ME (bias) -0.094 cm. În schimb pentru modelul dinamic valorile statisticilor RMSE şi ME sunt 1.042 şi $1.156777e-16$. Se poate observa şi în figura 15 tendinţa nedorită a creşterilor (i_G) cauzată de eroarea sistematică (ME) mai mare în cazul modelului R-C.

În cazul predicţiei creşterii în suprafeţii de bază statisticile RMSE şi ME pentru modelul R-C sunt 0.043 m^2 şi 0.011 m^2 iar erorile modelul dinamic sunt $\text{RMSE} = 0.047 \text{ m}^2$ şi $\text{ME} = -0.003 \text{ m}^2$.

4.7 Modelul de mortalitate și recrutare a arborilor

4.7.1 Modelul de mortalitate

Procentul mediu al arborilor înregistrați ca arbori morți între cele două inventarieri este de 7.4%. Numărul de arbori înregistrați ca arbori morți între cele două inventarieri variază în funcție de specie. Mortalitatea cea mai ridicată este întâlnită la grupa de specii diverse tari. Relația 41 a fost dezvoltată pentru a prezice mortalitate individuală a arborilor.

$$P = \frac{1}{(1 + \exp(a_1 + b_i^{(1)} + a_2 D + a_3 \text{BAL} + a_4 \text{RD} + a_5 N))} + e \quad (41)$$

unde:

p – reprezintă probabilitate unui arbore de a muri în o perioadă de 5 ani

d – diametrul de bază măsurat în 2015

BAL – suprafața de bază a arborilor mai groși calculată folosind inventarierea din anul 2015

RD – raportul dintre diametrul arborelui și media pătratică a diametrelor

N – numărul de arbori la hectar în anul 2015

e – eroarea modelului

$b_i^{(1)}$ – efectul aleatoriu specific SPP i

Numărul de arbori morți pentru fiecare clasă de diametre de 5 cm a fost calculat folosind datele provenite din rețeaua de inventariere și iar cel prezis, folosind modelul dezvoltat. Deoarece modelul este unul stocastic, modelul a fost rulat de 100 de ori iar valorile medii sunt prezentate în figura 16.

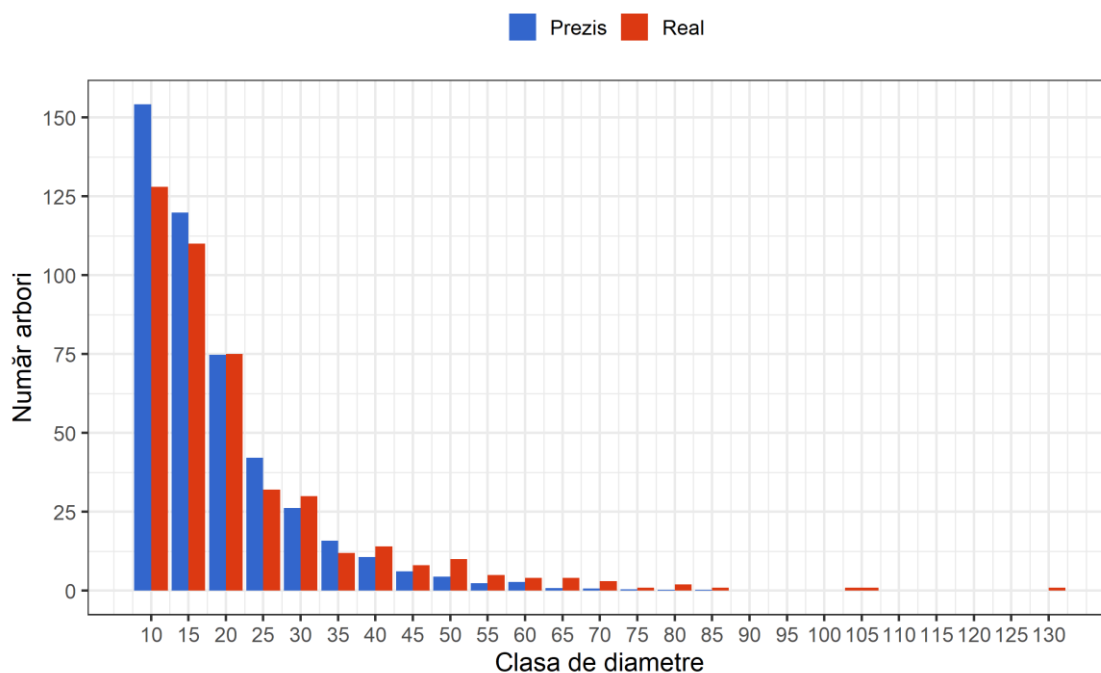


Figura 16. Distribuția arborilor morți pe clase de diametre identificați prin inventariere și preziși folosind modelul de mortalitate.

Numărul real de arbori morți identificați în cadrul rețelei de inventariere este mai mic decât cel prezis pentru clasele mici de diametre și mai mare pentru clasele mari de diametre. Modelul are o valoare a RMSE de 8 arbori și o eroare sistematică de -1.

4.7.2 Modelul de recrutare

Pentru a dezvolta modelul de recrutare, numărul de arbori care au depășit pragul de inventariere în fiecare SPP, cu ocazia reinventarierilor a fost exprimat la hectar. Variația numărului de recruți a fost analizată în raport cu indicatori calculați la nivelul arboretului.

Astfel, modelul construit pentru a prezice numărul de arbori care depășesc pragul de 8 cm într-o perioadă de 5 ani este dat de relația 42.

$$\ln(NR) = a_1 + a_2 DG + a_3 N + a_4 G^2 \quad (42)$$

4.8 Modelul de predicție a volumului și creșterii în volum a arborilor și arboretelor.

4.8.1 Volumul pe picior al arboretelor din rețeaua sistematică de inventariere

Volumul SPP-urilor a fost determinat pentru fiecare inventariere folosind măsurătorile făcute în teren iar acolo unde a fost cazul curba înălțimilor a fost construită pentru a estima înălțimile nemăsurate. Modelele de creștere construite în această lucrare pot fi folosite pentru a face prognoze pe perioade scurte sau medii cu privire la creșterea și dezvoltarea arborilor și arboretelor. Astfel folosind inventarierea din anul 2015 și modelul de creștere în diametru a fost prezis diametrul arborilor peste 5 ani. Înălțimea arborilor a fost prezisă de asemenea folosind modelul generalizat al înălțimilor cu DG și diametrele prezise în pasul anterior. Volumul arborilor și arboretelor calculat cu ajutorul celor două variabile prezise a fost comparat cu volumul calculat prin măsurarea celor două variabile în teren la inventarierea din 2020.

Pentru a asigura comparabilitatea rezultatelor, volumul a fost calculat doar pentru arborii vii măsurați cu ocazia celor două inventarieri (Figura 17).

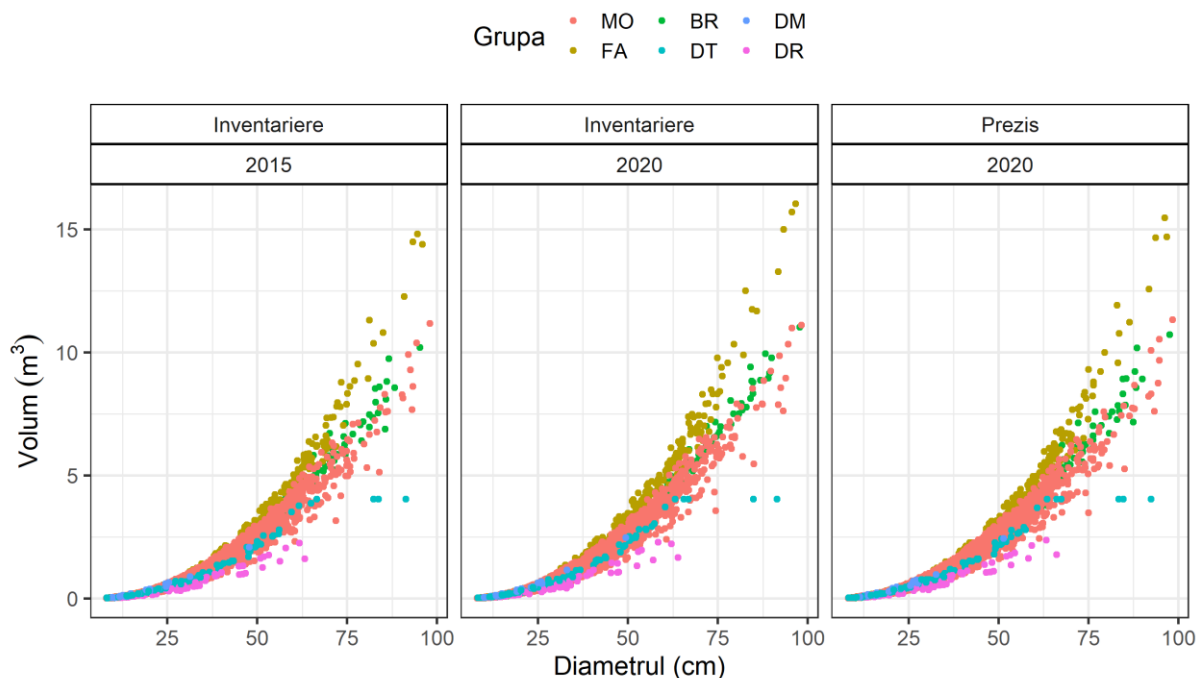


Figura 17. Volumul individual al arborilor pe picior rezultat din inventarierea arborilor și estimat cu ajutorul diametrului și înălțimii prezise.

Volumul mediu la hectar rezultat prin inventarierea arborilor 2015 este de 517 m^3 . Volumul mediu la hectar calculat în inventarierea din 2020 este de 579 m^3 iar volumul mediu prezis prin modelele de creștere este de 561 m^3 . Creșterea medie la hectar a arborilor pe picior comuni celor două inventare rezultată din inventarierea arborilor este de $12.4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ iar cea rezultată din predicția volumului este de $8.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

4.8.2 Metoda recuperării parametrilor și a curbei generalizate a înălțimilor pentru determinarea volumului pe picior al arboretelor

Variabilele necesare pentru a determina volumul prin această metodă sunt: diametrul mediu pătratic (DG), numărul de arbori la hectar (N), suprafața de bază la hectar (G) și înălțimea celui mai subțire și gros arbore din arboret.

Folosind parametri Weibull preziși distribuția pe categorii de diametre de 1 cm a suprafețelor inventariate a fost estimată pentru fiecare suprafață și an al inventarierii (Figura 18).

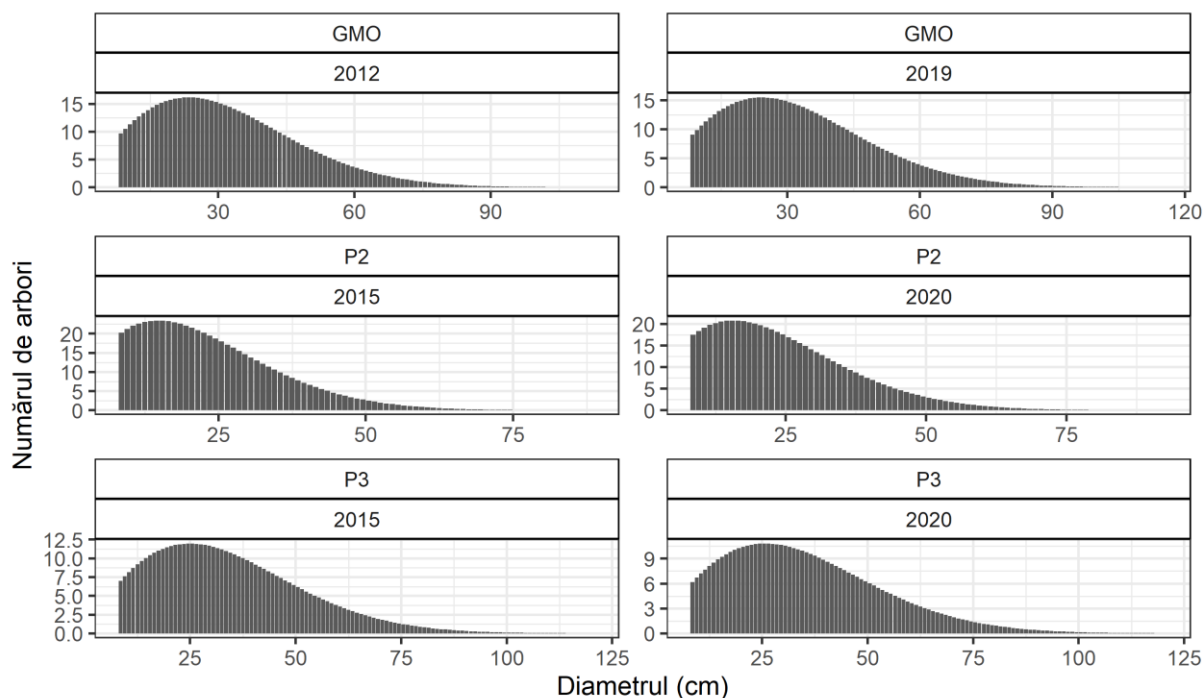


Figura 18. Predicția distribuției numărului de arbori pe categorii de diametre de 1 cm.

Folosind modelul H-D generalizat, înălțimea celui mai subțire și gros arbore și N din suprafețele inventariate au fost prezise înălțimile pentru fiecare clasă de diametre, suprafață și an al inventarierii (Figura 19).

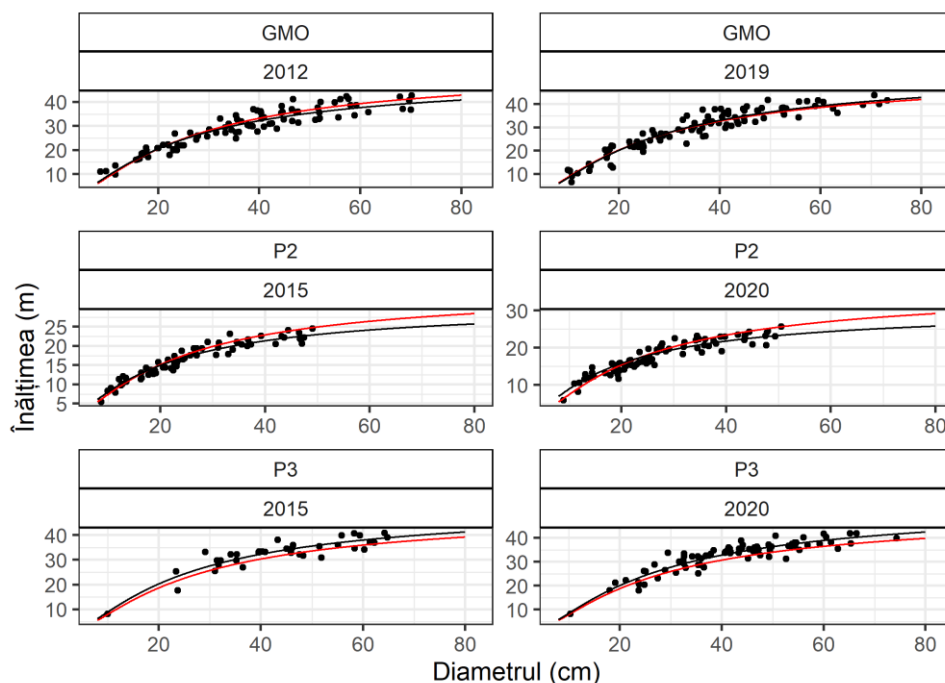


Figura 19. Predicția curbei generalizate a înălțimilor pentru suprafețele de probă. Linia roșie reprezintă curba obținută prin modelului generalizat iar curba neagră reprezintă curba obținută prin ajustarea fiecărei suprafețe folosind înălțimile măsurate (punctele negre).

Modelul generalizat nu a fost calibrat pentru a vedea performanța acestuia atunci când nu există informații adiționale. Calibrarea modelului folosind 1,2 sau 3 înălțimi ar fi îmbunătățit predicția înălțimii considerabil așa cum s-a putut vedea mai sus.

Curba înălțimilor obținută pentru fiecare din suprafețe a fost folosită pentru a prezice înălțimea arborilor la care înălțimea nu a fost măsurată pe teren.

Volumul prezis prin această metodă a fost comparat cu volumul real determinat prin măsurarea diametrului și înălțimii pe teren (Tabelul 4).

Tabelul 4. Volumul estimat prin inventarierea arboretelor și volumul prezis prin metoda recuperării parametrilor și a curbei generalizate a înălțimilor.

SP	An	Volum (m ³)		
		Real	Prezis	Diferență procentuală
GMO	2012	909	937	+3%
GMO	2019	977	954	-2.3%
P2	2015	273	313	+14.6%
P2	2020	294	338	+15%
P3	2015	862	808	-6.2%
P3	2020	883	823	-6.7%

4.9 PROGNOZA CREȘTERII ARBORILOR ȘI ARBORETELOR ȘI A PRODUCȚIEI ACESTORA PRIN SIMULARE (PROCODRU)

Modelul de simulare PROCODRU este primul model de creștere la nivel de arbore dezvoltat în România. Modelele de acest gen sunt considerate noul standard pe plan mondial pentru predicția creșterii și producției arboretelor înlocuind parțial sau total modelele tabelelor de producție în unele țări.

4.9.1 Validarea modelului de simulare

Modelul de simulare a fost validat utilizând suprafețele folosite pentru a construi modelul de predicție a distribuției arborilor pe categorii de diametre.

Pentru fiecare dintre aceste suprafețe au fost folosite observațiile obținute prin inventariere în 2015 și utilizând modelul de simulare PROCODRU au fost prezise valorile principalelor caracteristici biometrice în 2020. Acestea din urmă au fost comparate cu valorile reale obținute prin inventarierea din 2020 (Figura 20). Pentru caracteristicile biometrice V și G modelul de simulare PROCODRU oferă rezultate precise fără erori sistematice ridicate. Însă, valorile obținute pentru caracteristicile N și DG au o eroare sistematică de care trebuie să se țină cont în prognozele făcute cu acest model.

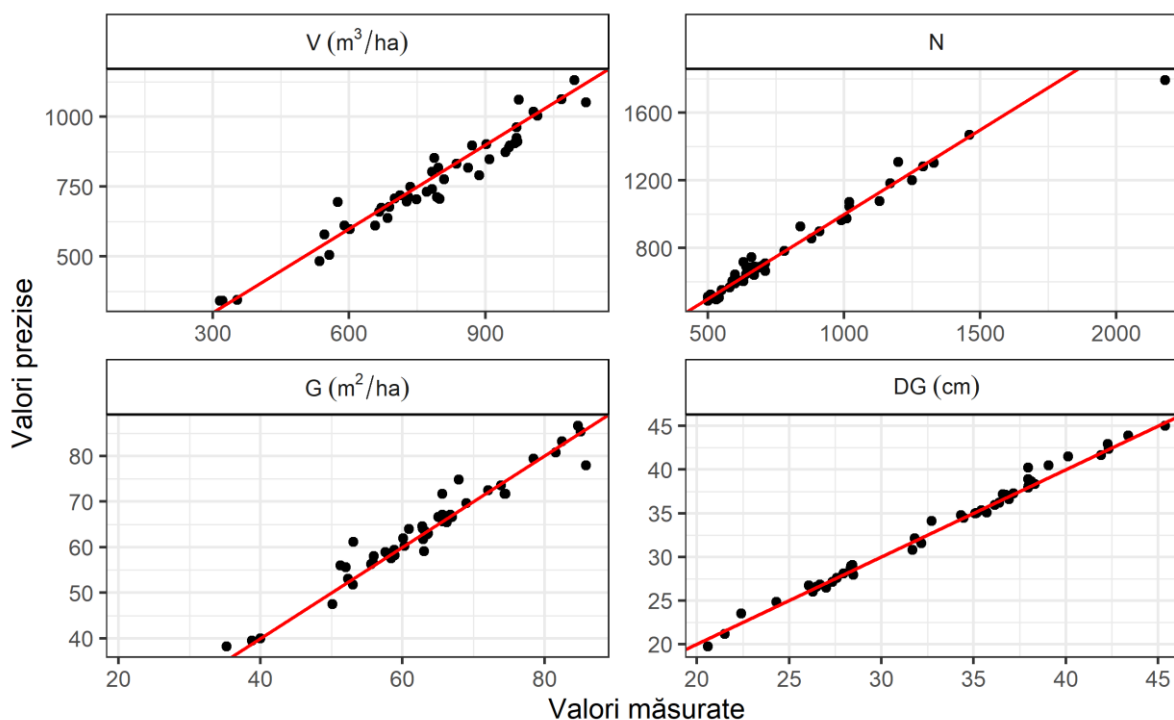


Figura 20. Precizia predicție principalelor caracteristici biometrice ale arboretului folosind modelul PROCODRU.

Acest comportament este cauzat fie de modelul de mortalitate fie de modelul de recrutare fie de ambele modele simultan. Aceste modele ar putea fi corectate prin calibrarea modelului folosind observații repetate din suprafețe de lungă durată. Cel mai probabil modelul de recrutare este cel care duce la această eroare sistematică și se poate observa efectul acesteia și pentru caracteristica DG. Caracteristica DG are o valoare prezisă sistematic mai mare decât cea măsurată. Un număr mai mare de recruți în primele care categorii de diametre ar corecta această eroare (Tabelul 5).

Tabelul 5. Precizia modelului PROCODRU

Caracteristica	RMSE	ME
V (m ³ /ha)	48	16
G (m ² /ha)	2.7	-0.60
N	67	4.4
DG (cm)	0.66	-0.21

Cu toate acestea eroarea sistematică a volumului este de numai 16 m³ pe ha, iar precizia modelului în ceea ce privește caracteristica V este de ± 48 m³ pe ha

Caracteristicile biometrice ale arboretului sunt precise cu o acuratețe ridicată iar eroarea sistematică a modelului tinde spre 0 pentru majoritatea variabilelor

4.9.2 Simularea creşterii şi producţiei arboretelor folosind modelul PROCODRU

Modelul de simulare poate fi folosit pentru a produce tabele de producţie specifice zonei studiate.

De exemplu pentru două arborete care au aceleaşi caracteristici biometrice dar se află în condiţii staţionale diferite, rezultatele obţinute sunt variază semnificativ. În figura 21 arboretul A şi B au la începutul perioadei de simulare aceleaşi valori ale caracteristicilor biometrice. Arboretul A este situat la o altitudine de 1200 m, pe o pantă de 15% şi o expoziţie umbrită. Arboretul B este situat la o altitudine de 1400 m, pe o pantă de 30% şi o expoziţie însorită.

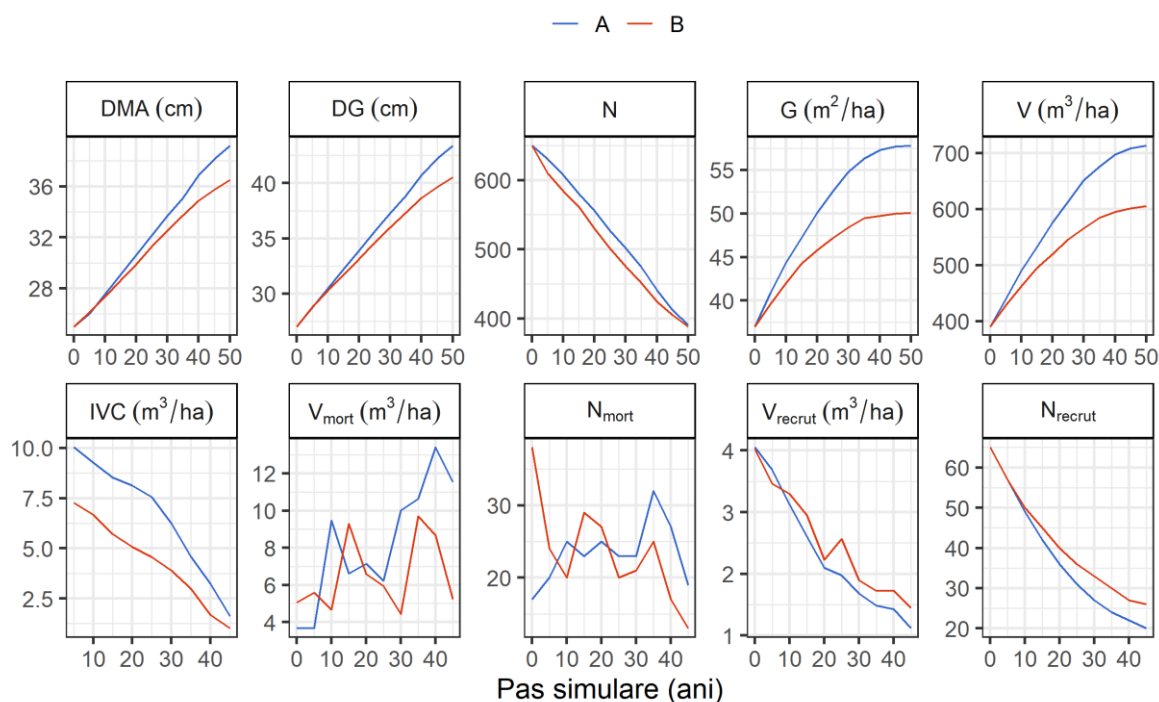


Figura 21. Folosirea modelului de simulare PROCODRU pentru prognoza creşterii şi producţiei arboretelor

Folosind modelul PROCODRU se poate estima dinamica principalelor caracteristici biometrice ale celor două arborete. Volumul la hectar al arboretului situat la 1200 m este mai mare iar creşterea acestuia este mai viguroasă. Creşterea curentă a arboretului scade pe măsură ce volumul la hectar atinge un maxim. Mortalitatea în arboretul A este mai ridicată la început fiind corelată direct cu numărul de arbori la hectar şi suprafaţa de bază a arborilor. Mortalitatea scade cu timpul pentru cele două arborete dar volumul acestora creşte. Acest lucru se datorează dimensiunilor mari pe care le au arborii clasificaţi ca morţi. Odată cu dezvoltarea arboretului numărul de recruţi scade. Putem explica această dinamică prin faptul că arborii rămaşi duc la închiderea completă a coronamentului reducând considerabil lumina necesară noilor recruţi de a creşte. Este bine cunoscut cum în arboretele pluriene naturale apariţia unei noi generaţii este condiţionată de un apariţia unui eveniment major o disturbantă în structura arboretului (rupturi sau doborâturi produse de vânt sau de zăpadă). Un asemenea model poate fi dezvoltat şi implementat în modelul PROCODRU pentru a prezice mult mai precis creşterea şi producţia arboretelor de acest tip. Pentru dezvoltarea unui

asemenea model de disturbantă este necesară monitorizarea pe termen lung al acestui model studiind periodicitatea și intensitatea disturbantelor în raport cu structura arboretelor.

Folosirea modelului PROCODRU pentru prognoze pe termen lung trebuie făcută cu mare atenție iar rezultatele obținute trebuie fie tratate critic și cu precauție. Modelul a fost dezvoltat folosind un număr relativ mic de arbori inventariați doar pentru o perioadă de 5 ani. Dacă modelele de creștere în diametru și înălțime au oferit rezultate precise, modelele de mortalitate și de recrutare trebuie tratate cu prudență. Modelarea acestor două fenomene necesită un număr ridicat de observații care provin din suprafețe de monitorizare de lungă durată.

Aceste tipuri de modele de prognoză a creșterii și producției arboretelor sunt folosite în amenajarea pădurilor pentru estimarea și gestionarea resurselor forestiere lemnoase. Au capacitatea de a simula răspunsul arboretului la diferite tipuri de rărituri sau intervenții silviculturale dar și pentru a estima dezvoltarea acestora în diferite condiții climatice și de mediu.

Dezvoltarea și adoptarea unor astfel de modele pentru gestionarea pădurilor României este de o imensă importanță, mai ales în contextul schimbărilor climatice. Pentru o gestionare durabilă a resurselor forestiere lemnoase sunt necesare instrumente performante de evaluare, prognoză și simulare. Majoritatea țărilor europene au investit în dezvoltarea unor modele de simulare similare cu cel construit în această lucrare. Complexitatea acestora diferă dar scopul lor este același. Astfel în ultimi 20-30 de ani au fost dezvoltate un număr mare de modelele de simulare a creșterii și producției arboretelor. Printre cele mai importante se găsesc SILVA (Pretzsch et al. 2002) (Germania), MOSES (Hasenauer et al. 2006) (Austria), SIBYLA (Fabrika & Ľurský 2006) (Slovacia), STAND (Palahí et al. 2006) (Finlanda), SORTIE-ND (Pacala et al. 1996) (Franța). Aceste modele au fost calibrate și pentru alte țări. Un exemplu elocvent este modelul MOSES care fost calibrat pentru Elveția (Thurnher et al. 2017), Grecia (Chatziphilippidis & Spyroglou 2006) și Scoția (GARTLEHNER 2016). Menținerea și îmbunătățirea acestor modele este un proces continuu, noi capacități sunt adăugate modelelor în funcție de noile cerințe ale pieței.

Temelia de bază a acestor modele o reprezintă suprafețele de probă permanente de lungă durată. Acestea sunt structura pe care aceste tipuri de modele se construiesc și se îmbunătățesc continuu. Este astfel imperios necesar dezvoltarea unei rețele de suprafețe de probă permanente la nivelul întregii țări special destinată monitorizării dinamicii creșterii și producției arborilor și arboretelor. Fără o astfel de infrastructură *in situ*, construirea unor astfel de modele aplicabile pădurilor la nivelul întregii țări este un obiectiv îndepărtat.

5. CONCLUZII. CONTRIBUŢII ORIGINALE. DIRECŢII VIITOARE DE CERCETARE. DISEMNIAREA REZULTATELOR

5.1 Concluzii

Cu ocazia cercetărilor efectuate în raport cu scopul și obiectivele științifice ale tezei de doctorat, a rezultatelor obținute și pe baza unei riguroase analize a acestora, din punct de vedere al contribuției lor la dezvoltarea cunoașterii în domeniul biometriei forestiere, se pot desprinde următoarele concluzii:

- **Cu privire la metodele de predicție a distribuției arborilor pe categorii de diametre și la modelul de predicție a înălțimii arborilor:**

În procesul de *ajustare a distribuției experimentale a numărului de arbori pe categorii de diametre*, distribuția teoretică Weibull 2P trunchiată la stânga s-a dovedit superioară distribuției Weibull 2P. Această superioritate este justificată de faptul că diametrul mediu real folosit pentru obținerea parametrilor distribuției este mai apropiat de diametrul mediu calculat din datele generate de distribuția Weibull 2P trunchiat decât cel obținut prin distribuția teoretică Weibull 2P. Se recomandă, astfel, aplicarea distribuțiilor trunchiate în cazul distribuțiilor experimentale obținute pe baza măsurărilor efectuate peste un prag minim impus, așa cum este cazul de cele mai multe ori în inventarierea statistică a arboretelor și a pădurii în ansamblu.

Metoda momentelor folosită pentru obținerea parametrilor distribuției teoretice Weibull 2P a oferit rezultate mai precise decât metoda maximizării funcției logaritmice de probabilitate datorită legăturii directe dintre parametrii distribuției teoretice și caracteristicile biometrice medii ale arboretului.

În metoda de predicție a parametrilor, caracteristicile biometrice diametrul mediu al suprafeței de bază, diametrul maxim și înălțimea maximă s-au corelat cu parametrii b și c ai distribuției teoretice Weibull. Aceste informații pot fi determinate cu ușurință prin inventarieri sau în cazul înălțimii maxime - prin tehnici ale teledetecției, fapt ce permite acestei metode să fie aplicată cu relativă ușurință în activitatea practică.

Metoda momentelor prin care parametrii funcției Weibull 2P trunchiată la stânga sunt recuperați printr-o procedură iterativă oferă o legătură directă cu primul și al doilea moment brut al distribuției experimentale. Astfel, în zona studiată, pentru a predicția numărului de arbori pe categorii de diametre se poate aplica metoda recuperării parametrilor în detrimentul metodei de predicție a parametrilor dezvoltată

Metoda recuperării parametrilor utilizată în aceste cercetări se poate aplica în orice arboret, fără a fi necesară, în prealabil obținerea relațiilor dintre parametrii funcțiilor și indicatori la nivelul arboretului. Această metodă este aplicabilă și în arborete amestecate sau multi-etajate unde se poate determina o distribuție teoretică pentru fiecare element de arboret.

Metodele de predicție și recuperare a parametrilor unei distribuții teoretice, aplicate în premieră pentru pădurile din România, au un puternic caracter practic pentru obținerea volumului pe picior și

a suprafeței de bază a arboretului. Introducerea acestor metode în practica amenajării pădurilor din România ar duce la facilitarea determinării volumului pe picior, a volumului pe sortimente sau a creșterii arboretului, ducând în același timp la creșterea acurateții prin care aceste caracteristici biometrice sunt determinate în prezent.

Pentru *ajustarea curbei înălțimilor* funcțiile cu doi parametri au oferit rezultate mai bune decât funcțiile cu trei parametri. Cea mai mare parte din funcțiile cu trei parametri s-au dovedit a fi mai puțin eficiente, având probleme de convergență atunci când numărul de observații este redus. Comparativ cu acestea, funcțiile cu doi parametri reușesc să aibă o flexibilitate ridicată.

Modelul generalizat al înălțimilor pentru predicția înălțimii arborilor dezvoltat pentru specia molid, prin introducerea unor variabile la nivel de arboret care au dovedit o relevanță statistică în dinamica acestei caracteristici biometrice, mărește aria de aplicabilitate a acestui model.

Parametrii celei mai precise funcții simple înălțime-diametru se corelează puternic cu înălțimea maximă a arboretului, cu amplitudinea dintre înălțimi și cu diametrul mediu al suprafeței de bază iar generalizarea relației înălțime-diametru prin introducerea acestor variabile adiționale, crește flexibilitatea și sfera de aplicabilitate a modelului înălțime-diametru.

Obținerea parametrilor funcției cu ajutorul regresiei mixte a permis modelarea heterodasticității și a ierarhiei datelor oferind totodată, posibilitatea calibrării modelului, în cazul în care sunt disponibile noi informații. De asemenea, dezvoltarea modelelor de predicție a înălțimii arborilor folosind regresia mixtă sau regresia cuantilelor oferă posibilitatea elaborării unor modele cu o precizie și aplicabilitate ridicată.

Metodologia de calibrare a curbei înălțimilor prin cele trei metode (metoda calibrării parametrilor ficși (CPF), metoda calibrării parametrilor aleatori (CPA) și metoda calibrării setului de regresii cu 3 cuantile -CQ3) poate fi utilizată pentru a calibra modelele dezvoltate, folosind un număr redus de informații. Strategia de calibrare adoptată este extrem de importantă și poate afecta considerabil acuratețea predicției obținute. Astfel, un număr de 4 înălțimi măsurate în jurul diametrului mediu și a celui mai gros arbore sunt îndeajuns pentru a calibra modelele de predicție a înălțimii arborilor și a obține o curbă localizată pentru un nou arboret.

Dezvoltarea unor modele înălțime-diametru generalizate pe suprafețe mari vor putea permite folosirea acestora în domeniul amenajării pădurilor și la lucrările de punere în valoare a volumului de lemn destinat exploatarei. Aplicabilitatea acestor modele crește și mai mult când modelele dezvoltate vor fi calibrate folosind un număr redus de informații obținând, cu o precizie mai mare, curbe ale înălțimilor, la nivel de suprafață de probă sau unitate amenajistică.

- **Cu privire la *modelul de creștere în diametru*:**

Modelul de creștere în diametru construit pe baza caracteristicilor dimensionale (D, G) ale variabilelor privind relațiile competiționale dintre arbori (RD, BAL) și variabile staționale (ALT, EXP, și PA), poate simula dezvoltarea unui arbore sub diferite scenarii staționale sau competiționale. Astfel, indicele poziției ierarhice al arborilor din arboret (RD) și suprafața de bază a arborilor mai

mari decât arborele în cauză (BAL) explică variația creșterilor datorată competiției inter- și intraspecifice din arboretele pluriene. S-a confirmat, de asemenea, faptul că altitudinea și expoziția au cel mai important efect asupra creșterii în diametru a molidului în zona de cercetare. Astfel creșterea în diametru la molid se reduce odată cu creșterea altitudinii și cu creșterea pantei.

Metoda raportului empiric propusă de Snowdon (Snowdon 1991) s-a dovedit a fi cea mai bună metodă de corectare a transformării logaritmice. O posibilă cauză pentru care corectarea clasică prin adăugarea jumătății varianței la predicția făcută nu a oferit cele mai bune rezultate, este faptul că regresia mixtă are tendința să supraestimeze valoarea varianței. Variabilele introduse în modelul de creștere în diametru și metoda de ajustare folosită măresc aplicabilitatea acestui model iar acuratețea predicțiilor pentru modelele dezvoltate este ridicată, de până la 1 cm.

Utilizarea indicelui de creștere pentru determinare productivității arboretului s-a dovedit utilă pentru a explica variația creșterilor în diametru la specia molid. Pe baza acestui indicator, seriile de creștere în diametru au fost modelate în 5 clase de productivitate. Folosirea regresiei mixte pentru dezvoltarea indicelui de creștere duce la mărirea ariei de aplicare acestui indicator datorită ușurinței cu care modelul se poate calibra. Astfel, pentru calibrarea modelului de creștere în diametru și obținerea unei curbe localizate sunt suficiente 3 observații privind creșterea ultimilor 5 ani a trei arbori subțiri, medii și groși.

- **Cu privire la modelele de determinare a mortalității arborilor și de recrutare a celor nou inventariați :**

Prin modelarea probabilității unui arbore de a muri bazată pe diametrul, indicele poziției ierarhice al arborilor din arboret (RD) și suprafața de bază a arborilor mai mari decât arborele în cauză (BAL) s-a constatat că aceasta crește pe măsură ce diametrul și suprafața de bază cresc sau pe măsură ce raportul dintre diametrul arborelui în cauză și al diametrului mediu al arboretului este subunitar. De asemenea, rata mortalității este mai ridicată în clasele mici de diametre și scade odată cu creșterea diametrului. Din cauza numărului redus de observații curba de mortalitate nu are o formă specifică de "U" când numărul de arbori morți domină la clasele de diametre mici și foarte mari de diametru iar rata mortalității este scăzută în clasele de diametre mijlocii. Modelul de mortalitate obținut, copiază fidel forma curbei mortalității empirice obținute prin inventarierele efectuate în cadrul rețelei de cercetare. Cu toate acestea, modelul de mortalitate prezice un număr mai mare de arbori morți pentru categoriile mici de diametre față de valorile obținute în teren.

Modelul de recrutare, pentru a prezice numărul de arbori recruți la hectar pe o perioadă de 5 ani, ia în considerare suprafața de bază, diametrul mediu și numărul de arbori la hectar. Modelul elaborat prezice un număr mai mic de arbori ce vor trece pragul de 8 cm pe măsură ce diametrul mediu și suprafața de bază crește iar numărul de arbori scade.

Modelului de recrutare a arborilor nou inventariați are asociat cel mai mare grad de neîncredere, fapt datorat numărului redus de observații, modului de dezvoltare a arboretelor pluriene și tipului rețelei de inventariere amplasat. În foarte multe din suprafețele de probă permanente nu a fost înregistrat nici un arbore recrut pe o perioadă de 5 ani. Acest fapt este neverosimil și cel mai probabil

se datorează stadiului de dezvoltare în zona în care suprafaţa de probă a fost amplasată în teren, fiind bine cunoscută dispunerea mozaicată a porţiunilor de arboret plurien, aflate în diferite stadii de dezvoltare.

- **Cu privire la modelul de predicţie a volumului şi creşterii în volum a arborilor şi arboretelor:**

Metoda de calcul al volumului unui arboret se bazează pe modelul de predicţie a distribuţiei arborilor pe categorii de diametre şi a modelului generalizat al înălţimilor. Este o procedură nouă, neaplicată până în prezent pentru pădurile din România, prin care volumul arboretului se poate estima cu o acurateţe ridicată folosind următoarele caracteristici biometrice ale arboretului: diametrul mediu pătratic (DG), numărul de arbori la hectar (N), suprafaţa de bază la hectar (G) şi înălţimea celui mai subţire şi gros arbore din arboret. Această metodă poate fi aplicată în amenajarea pădurilor şi poate fi extinsă ca metodă standard de determinare a volumului arboretului pe picior dezvoltând modele similare cu cele descrise în cadrul lucrării de doctorat. Prin calibrarea modelului generalizat al înălţimilor folosind un număr redus de observaţi acurateţea acestei metode creşte considerabil.

- **Cu privire la modelul de PROgnoză a Creşterii arBORilor şi arboretelor şi a proDucţiei acestoRa prin simUlare (PROCODRU):**

Modelul dezvoltat, cu ocazia cercetărilor efectuate, este un model de creştere la nivel de arbore şi poate fi folosit pentru prognoza creşterii şi producţiei arboretelor. Acest model este primul model de acest gen dezvoltat în România şi printre puţinele pe plan internaţional dezvoltat pentru arborete pluriene negospodărite intensiv. Acesta este un model statistic care utilizează date empirice şi în cea mai mare parte tehnici de regresie pentru a obţine relaţii cantitative între variabile. Acest tip de modele sunt construite pentru a actualiza inventare forestiere, pentru a compara tratamente silviculturale şi a estima producţia arboretelor. Relaţia dintre variabilele dependente şi independente au fost modelate, în cele mai multe cazuri, utilizând regresia mixtă. Acest tip de model este folosit pentru a modela observaţii cu o structură ierarhică, şi prezenţa heterodasticităţii. Principalul avantaj pe care aceste modele îl aduc este posibilitatea de a fi calibrate utilizând un număr redus de informaţii.

Modelul PROCODRU simulează mortalitatea, creşterea arborilor în diametru, estimează numărul de arbori care vor trece peste pragul de 8 cm într-o perioadă de 5 ani, prezice înălţimea arborilor şi calculează volumul. Poate simula dezvoltarea arboretelor folosind informaţii sumare privind caracteristicile biometrice ale arboretului sau liste de inventarieri. Îmbunătăţirea performanţei modelului de recrutare a arborilor nou inventariaţi, dezvoltat cu ocazia cercetărilor, poate fi realizată prin includerea în acesta a unui model de perturbări la nivel de arbore care să permită stabilirea de prognoze pe perioade lungi. În arboretele care nu sunt parcurse cu tăieri de regenerare, perturbările (doborâturi şi rupturi produse de vânt şi de zăpadă sau fenomene de uscare) sunt principalele procese de stimulare a regenerării arboretelor. Eroarea asociată modelului este de $48 \text{ m}^3 / \text{ha}$ în predicţia volumului, de $2.7 \text{ m}^2 / \text{ha}$ în predicţia suprafeţei de bază, de 67 de arbori /ha în predicţia numărului de arbori şi de 0.66 cm în predicţia diametrului mediu al suprafeţei de bază.

PROCODRU este un model care poate fi folosit pentru a construi tabele de producție pentru zona studiată. Modelul elaborat este aplicabil arboretelor amestecate de molid, brad și fag. PROCODRU este capabil să simuleze creșterea molidului, bradului și a fagului folosind modelul de creștere în diametru și curba generalizată a înălțimilor dezvoltate la nivel de specie. Folosind tehnicile de calibrare descrise, modelul permite obținerea curbelor localizate pentru variabila diametru, înălțime și procentul mortalității. Acest tip de modele constituie soluția pentru estimarea și prognoza creșterilor și producției arboretelor amestecate cu tipuri de structuri complexe. De asemenea, modelul de simulare PROCODRU este sensibil la principalele caracteristicile staționale, astfel, rezultatele obținute pot varia în funcție de altitudine, pantă și expoziție. Aceste variabile staționale sunt folosite ca variabile reprezentative ale productivității arboretelor.

Tabelele de producție, așa cum au fost ele dezvoltate în trecut și utilizate și în prezent pot fi completate, suplinite parțial sau total de modele de simulare, de tipul celui realizat, bine fundamentate și testate, cu un grad mare de flexibilitate. Sunt elocvente cuvintele ilustrului profesor Mihail Prodan, care observând această schimbare de paradigmă a făcut în urmă cu aproape 6 decenii, următoarea afirmație (Prodan 1965, p. 605): „Fără îndoială, tabelele de producție sunt încă cel mai colosal progres pozitiv realizat în cercetarea științifică forestieră. Conștientizarea că tabelele de producție nu vor mai putea fi utilizate în viitor, cu excepția unor scopuri mai mult sau mai puțin comparative, nu afectează în niciun fel această realizare.”.

Modelul dezvoltat este primul pas făcut în biometria forestieră românească spre dezvoltarea modelelor de creștere la nivel de arbore și primul model de creștere și producție a arboretelor dezvoltat după apariția tabelele de producție românești, considerate drept o operă inegalabilă pe plan național și internațional a biometriștilor români V. Giurgiu, D. Drăchiciu, I. Decei, S. Armășescu, I. Popescu-Zeletin, V. N. Stinghe, G. T. Toma și D. A. Sburlan și mulți alții.

Acest tip de modele poate deveni noul standard pentru estimarea creșterii și producției arboretelor în România oferind posibilitatea practicării unei silviculturi adaptate la nevoile tot mai complexe ale societății.

5.2 Contribuții originale

Metodologia elaborată, rezultatelor obținute și a concluziilor formulate permit evidențierea următoarelor contribuții personale cu caracter de originalitate:

- a) Utilizarea în premieră în România a funcției teoretice Weibull 2P trunchiate la stânga pentru ajustarea distribuției experimentale a numărului de arbori pe categorii de diametre, creându-se astfel, posibilitatea ajustării corecte a distribuțiilor a căror observații sunt cenzurate de la o limită impusă de metodologia de recoltare a datelor.
- b) Aplicarea pentru prima dată în cercetările din țara noastră a metodelor de predicție și recuperare a parametrilor unei distribuții teoretice folosind informații sumare de caracterizare a arboretului, aducând-se astfel noi contribuții la determinare tipului de structură a arboretelor.

- c) Dezvoltarea unui model generalizat al curbei înălţimilor, care oferă posibilitatea creşterii aplicabilităţii modelelor de acest gen pentru o scară largă de arborete.
- d) Descrierea şi utilizarea pentru pădurile din România a regresiei mixte şi a regresiei cuantilelor la dezvoltarea modelului de predicţie a înălţimilor, fundamentând astfel, dezvoltarea unor astfel de modele pe tipuri de ecosisteme sau tipuri de gospodărire.
- e) Dezvoltarea şi aplicarea în premieră în ţara noastră a metodologiilor de calibrare a curbei înălţimilor pe baza unui set nou de observaţii primare, contribuind la îmbunătăţirea preciziei acestor modele şi la reducerea substanţială a efortului necesar inventarierii arboretelor.
- f) Elaborarea în premieră a unui model de creştere în diametru la nivel de arbore bazat pe caracteristici dimensionale, competiţionale şi staţionale. Modelul, testat pe arboretele eşantion din Parcul Naţional Retezat poate fi utilizat - la nivel naţional - pentru arborete similare cu cele din zona de studiu
- g) Folosirea pentru prima dată în cadrul cercetărilor domeniului abordat a ecuaţiei independente de vârstă exprimată sub forma diferenţei algebrice pentru modelarea creşterii în diametru a arborilor, aducându-se contribuţii semnificative la modelarea bazată pe observaţii repetate rezultate din serii individuale de creştere.
- h) Utilizarea şi descrierea metodologiei de aplicare a indicelui de creştere în diametru pentru evaluarea productivităţii arboretelor pluriene; se oferă astfel, o alternativă la varianta clasică folosită în România (Înălţimea indicatoare (h_{50})) pentru determinarea productivităţii arboretelor pluriene.
- i) Dezvoltarea unui model de determinare a volumului pe picior a arboretului bazat pe metoda recuperării parametrilor şi a curbei generalizate a înălţimilor.
- j) Elaborarea unui model de simulare a prognozei creşterii arborilor şi producţiei arboretelor. Algoritmii realizaţi, incluşi în acesta fundamentează ştiinţific modelul de dezvoltare a arboretelor amestecate pluriene aducând-se în biometria forestieră, importante contribuţii în ceea ce priveşte modelarea acestor procese.

5.4 Diseminarea rezultatelor

Articole scrise în reviste cotate ISI Thomson Reuters:

1. Chivulescu, S., **Ciceu, A.**, Leca, S., Apostol, B., Popescu, O., & Badea, O. (2020). Development phases and structural characteristics of the Penteleu-Viforâta virgin forest in the Curvature Carpathians. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 13(5), 389.
2. **Ciceu, A.**, Garcia-Duro, J., Seceleanu, I., & Badea, O. (2020). A generalized nonlinear mixed-effects height–diameter model for Norway spruce in mixed-uneven aged stands. *Forest Ecology and Management*, 477, 118507.
3. **Ciceu, A.**, Pitar, D., & Badea, O. (2021). Modeling the Diameter Distribution of Mixed Uneven-Aged Stands in the South Western Carpathians in Romania. *Forests*, 12(7), 958.
4. Han, Y., Lei, Z., **Ciceu, A.**, Zhou, Y., Zhou, F., & Yu, D. (2021). Determining an Accurate and Cost-Effective Individual Height-Diameter Model for Mongolian Pine on Sandy Land. *Forests*, 12(9), 1144.

Conferințe internaționale:

Ciceu, A., García-Duro, J., Badea, Ovidiu. (2020). Modelling site index curves and Romanian yield tables variables. Presentation. 9th International Symposium Forest and Sustainable Development 16-17 Oct 2020, Brasov, Romania.

Ciceu, A., Bronisz, K., García-Duro, J., Badea, Ovidiu. (2021). Age-independent diameter increment models for Norway spruce, European beech and silver fir in mixed-uneven aged stands. Presentation. 5th Edition of the International Conference Integrated Management of Environmental Resources - Suceava, October 28th, 2021.

BIBLIOGRAFIE

1. Bauhus J, Forrester DI, Gardiner B, et al (2017) Ecological stability of mixed-species forests. In: Mixed-Species Forests: Ecology and Management
2. Bitterlich W (1952) Die Winkelzählprobe. Forstwissenschaftliches Cent. <https://doi.org/10.1007/bf01821439>
3. Bosela M, Lukac M, Castagneri D, et al (2018) Contrasting effects of environmental change on the radial growth of co-occurring beech and fir trees across Europe. *Sci Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.092>
4. Cao Q V. (2004) Predicting parameters of a weibull function for modeling diameter distribution. *For Sci.* <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.5.682>
5. Chatziphilippidis G, Spyroglou G (2006) Modelling the growth of *Quercus frainetto* in Greece. In: Sustainable Forest Management: Growth Models for Europe
6. Clutter JL, Bennett FA (1965) Diameter distributions in old-field slash pine plantations, 13th, 9th edn. GA. For. Res. Council.
7. Curtis R (1967) Height-Diameter and Height-Diameter-Age Equations For Second-Growth Douglas-Fir. *For Sci.* <https://doi.org/10.1093/forestscience/13.4.365>
8. Dale VH, Doyle TW, Shugart HH (1985) A comparison of tree growth models. *Ecol Modell.* [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(85\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0304-3800(85)90051-1)
9. Dănescu A, Albrecht AT, Bauhus J (2016) Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in southwestern Germany. *Oecologia.* <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3623-4>
10. de Wergifosse Louis, André F, Goosse H, et al (2022) Simulating tree growth response to climate change in structurally diverse oak and beech forests. *Sci Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150422>
11. Ek AR, Dudek A (1980) Development of individual tree based stand growth simulators: progress and applications.
12. Fabrika M, Ľurský J (2006) Implementing tree growth models in Slovakia. In: Sustainable Forest Management: Growth Models for Europe
13. GARTLEHNER C (2016) APPLICATION OF THE TREE-GROWTH-MODEL MOSES FOR SITKA SPRUCE IN SCOTLAND
14. Giurgiu V (1968) Cercetări privind inventarierea statistică a arboretelor. Centrul de Documentare Tehnică pentru Economia Forestieră
15. Giurgiu V (1979) Dendrometrie și auxologie forestieră. Ceres
16. Giurgiu V, Decei I, Drăghiciu D (2004) Metode și tabele dendrometrice. Ed Ceres
17. Giurgiu V, Drăghiciu D (2004) Modele matematico-auxologice și tabele de producție pentru arborete. Ed Ceres, București 607
18. Griess VC, Acevedo R, Härtl F, et al (2012) Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. *For Ecol Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.035>
19. Hamidi SK, Weiskittel A, Bayat M, Fallah A (2021) Development of individual tree growth

- and yield model across multiple contrasting species using nonparametric and parametric methods in the Hyrcanian forests of northern Iran. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01340-1>
20. Hasenauer H, Kindermann G, Steinmetz P (2006) The tree growth model MOSES 3.0. In: Sustainable forest management. Springer, pp 64–70
 21. Hilmers T, Avdagi A, Bartkowicz L, et al (2020a) The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. *Forestry.* <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz035>
 22. Hilmers T, Biber P, Knoke T, Pretzsch H (2020b) Assessing transformation scenarios from pure Norway spruce to mixed uneven-aged forests in mountain areas. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01270-y>
 23. Huang S, Price D, Titus SJ (2000) Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. *For Ecol Manage.* [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00151-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00151-6)
 24. Huang, Titus SJ, Wiens DP (1992) Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/x92-172>
 25. Janowiak, M. K., Nagel, L. M., & Webster CR (2008) Spatial Scale and Stand Structure in Northern Hardwood Forests: Implications for Quantifying Diameter Distributions. *For Sci.* <https://doi.org/10.1093/forestscience/54.5.497>
 26. Maltamo M, Puumalainen J, Päivinen R (1995) Comparison of beta and Weibull functions for modelling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand J For Res* 10:284–295
 27. Mehtatalo L, Lappi J (2020) Biometry for forestry and environmental data: With examples in R. CRC press
 28. Merganič J, Sterba H (2006) Characterisation of diameter distribution using the Weibull function: Method of moments. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-006-0138-2>
 29. Meyer HA (1951) Structure, Growth, and Drain in Balanced Uneven-Aged Forests. *J For*
 30. Monserud RA, Sterba H, Hasenauer H (1997) The single-tree stand growth simulator PROGNAUS. In: booktitle = Proceedings: Forest Vegetation Simulator Conference
 31. Newnham RM, Smith JHG (1964) DEVELOPMENT AND TESTING OF STAND MODELS FOR DOUGLAS FIR AND LODGEPOLE PINE. *For Chron.* <https://doi.org/10.5558/tfc40494-4>
 32. O'Hara KL (1998) Silviculture for structural diversity: a new look at multiaged systems. *J For* 96:4–10
 33. Pacala SW, Canham CD, Saponara J, et al (1996) Forest models defined by field measurements: estimation, error analysis and dynamics. *Ecol Monogr.* <https://doi.org/10.2307/2963479>
 34. Palahí M, Pukkala T, Blasco E, Trasobares A (2007) Comparison of beta, Johnson's SB, Weibull and truncated Weibull functions for modeling the diameter distribution of forest stands in Catalonia (north-east of Spain). *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342->

007-0177-3

35. Palahí M, Pukkala T, Trasobares A (2006) Modelling the diameter distribution of *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* and *Pinus halepensis* forest stands in Catalonia using the truncated Weibull function. *Forestry*. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl037>
36. Pinheiro J, Bates D (2006) *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer Science & Business Media
37. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, et al (2018) Package "nlme": Linear and nonlinear mixed effects models. Version
38. Popescu-Zeletin I (1957) Tabele dendrometrice
39. Pretzsch H (2002) Application and evaluation of the growth simulator SILVA 2.2 for forest stands, forest estates and large regions. Forstwissenschaftliches Cent
40. Pretzsch H, Biber P, Ďurský J (2002) The single tree-based stand simulator SILVA: Construction, application and evaluation. *For Ecol Manage.* [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00047-6)
41. Pretzsch H, del Río M, Giammarchi F, et al (2022) Changes of Tree and Stand Growth: Review and Implications
42. Pretzsch H, Hilmers T, Biber P, et al (2020) Evidence of elevation-specific growth changes of spruce, fir, and beech in european mixed mountain forests during the last three centuries. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0368>
43. Pretzsch H, Hilmers T, Uhl E, et al (2021) European beech stem diameter grows better in mixed than in mono-specific stands at the edge of its distribution in mountain forests. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01319-y>
44. Pretzsch H, Schütze G, Uhl E (2013) Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol* 15:483–495. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>
45. Prodan M, Holzmesselehre JD (1965) Sauerlander's Verlag. Frankfurt am Main
46. R Core Team (2020) R Core Team 2020. In: R A Lang. *Environ. Stat. Comput.*
47. Reventlow DOJ, Nord-Larsen T, Biber P, et al (2021) Simulating conversion of even-aged Norway spruce into uneven-aged mixed forest: effects of different scenarios on production, economy and heterogeneity. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01381-0>
48. Robinson A (2004) Preserving correlation while modelling diameter distributions. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/x03-191>
49. Schmidt LN, Sanquetta MNI, McTague JP, et al (2020) On the use of the weibull distribution in modeling and describing diameter distributions of clonal eucalypt stands. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0051>
50. Siipilehto J, Mehtätalo L (2013) Parameter recovery vs. parameter prediction for the Weibull distribution validated for Scots pine stands in Finland. *Silva Fenn.* <https://doi.org/10.14214/sf.1057>
51. Temesgen H, Monleon VJ, Hann DW (2008) Analysis and comparison of nonlinear tree

- height prediction strategies for Douglas-fir forests. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/X07-104>
52. Thurnher C, Klopff M, Hasenauer H (2017) MOSES – A tree growth simulator for modelling stand response in Central Europe. *Ecol Modell.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.01.013>
 53. Trasobares A, Pukkala T, Miina J (2004) Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. *Ann For Sci.* <https://doi.org/10.1051/forest:2003080>
 54. Vacek Z, Prokúpková A, Vacek S, et al (2021) Mixed vs. monospecific mountain forests in response to climate change: structural and growth perspectives of Norway spruce and European beech. *For Ecol Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119019>
 55. Vanclay JK (1992) Assessing site productivity in tropical moist forests: a review. *For Ecol Manage.* [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90017-4)
 56. Weiskittel AR, Hann DW, Kershaw JA, Vanclay JK (2011) *Forest Growth and Yield Modeling*
 57. Wickham H (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*
 58. Wickham H, François R, Henry L, Müller K (2019) *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version. Media
 59. Wykoff WR, Crookston NL, Stage AR (1982a) User's guide to the stand prognosis model (forestry). US Dep Agric For Serv Gen Tech Rep
 60. Wykoff WR, Crookston NL, Stage AR, et al (1982b) User's Guide to the Stand Prognosis Model
 61. Zeide B (1993) Analysis of Growth Equations. *For Sci.* <https://doi.org/10.1093/forestscience/39.3.594>
 62. Bauhus J, Forrester DI, Gardiner B, et al (2017) Ecological stability of mixed-species forests. In: *Mixed-Species Forests: Ecology and Management*
 63. Bitterlich W (1952) Die Winkelzählprobe. *Forstwissenschaftliches Cent.* <https://doi.org/10.1007/bf01821439>
 64. Bosela M, Lukac M, Castagneri D, et al (2018) Contrasting effects of environmental change on the radial growth of co-occurring beech and fir trees across Europe. *Sci Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.092>
 65. Cao Q V. (2004) Predicting parameters of a weibull function for modeling diameter distribution. *For Sci.* <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.5.682>
 66. Chatziphilippidis G, Spyroglou G (2006) Modelling the growth of *Quercus frainetto* in Greece. In: *Sustainable Forest Management: Growth Models for Europe*
 67. Clutter JL, Bennett FA (1965) Diameter distributions in old-field slash pine plantations, 13th, 9th edn. GA. For. Res. Counc.
 68. Curtis R (1967) Height-Diameter and Height-Diameter-Age Equations For Second-Growth Douglas-Fir. *For Sci.* <https://doi.org/10.1093/forestscience/13.4.365>
 69. Dale VH, Doyle TW, Shugart HH (1985) A comparison of tree growth models. *Ecol Modell.* [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(85\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0304-3800(85)90051-1)

70. Dănescu A, Albrecht AT, Bauhus J (2016) Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in southwestern Germany. *Oecologia*. <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3623-4>
71. de Wergifosse `Louis, André F, Goosse H, et al (2022) Simulating tree growth response to climate change in structurally diverse oak and beech forests. *Sci Total Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150422>
72. Ek AR, Dudek A (1980) Development of individual tree based stand growth simulators: progress and applications.
73. Fabrika M, Ľurský J (2006) Implementing tree growth models in Slovakia. In: *Sustainable Forest Management: Growth Models for Europe*
74. GARTLEHNER C (2016) APPLICATION OF THE TREE-GROWTH-MODEL MOSES FOR SITKA SPRUCE IN SCOTLAND
75. Giurgiu V (1968) Cercetări privind inventarierea statistică a arboretelor. Centrul de Documentare Tehnică pentru Economia Forestieră
76. Giurgiu V (1979) Dendrometrie și auxologie forestieră. *Ceres*
77. Giurgiu V, Decei I, Drăghiciu D (2004) Metode și tabele dendrometrice. Ed Ceres
78. Giurgiu V, Drăghiciu D (2004) Modele matematico-auxologice și tabele de produc ie pentru arborete. Ed Ceres, Bucureşti 607
79. Griess VC, Acevedo R, Härtl F, et al (2012) Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. *For Ecol Manage*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.035>
80. Hamidi SK, Weiskittel A, Bayat M, Fallah A (2021) Development of individual tree growth and yield model across multiple contrasting species using nonparametric and parametric methods in the Hyrcanian forests of northern Iran. *Eur J For Res*. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01340-1>
81. Hasenauer H, Kindermann G, Steinmetz P (2006) The tree growth model MOSES 3.0. In: *Sustainable forest management*. Springer, pp 64–70
82. Hilmers T, Avdagi A, Bartkowicz L, et al (2020a) The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. *Forestry*. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz035>
83. Hilmers T, Biber P, Knoke T, Pretzsch H (2020b) Assessing transformation scenarios from pure Norway spruce to mixed uneven-aged forests in mountain areas. *Eur J For Res*. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01270-y>
84. Huang S, Price D, Titus SJ (2000) Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. *For Ecol Manage*. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00151-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00151-6)
85. Huang, Titus SJ, Wiens DP (1992) Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Can J For Res*. <https://doi.org/10.1139/x92-172>
86. Janowiak, M. K., Nagel, L. M., & Webster CR (2008) Spatial Scale and Stand Structure in Northern Hardwood Forests: Implications for Quantifying Diameter Distributions. *For Sci*.

- <https://doi.org/10.1093/forestsience/54.5.497>
87. Maltamo M, Puumalainen J, Päivinen R (1995) Comparison of beta and Weibull functions for modelling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand J For Res* 10:284–295
 88. Mehtatalo L, Lappi J (2020) *Biometry for forestry and environmental data: With examples in R*. CRC press
 89. Mehtätalo L, Lappi J (2020) *Biometry for Forestry and Environmental Data*
 90. Merganič J, Sterba H (2006) Characterisation of diameter distribution using the Weibull function: Method of moments. *Eur J For Res*. <https://doi.org/10.1007/s10342-006-0138-2>
 91. Meyer HA (1951) Structure, Growth, and Drain in Balanced Uneven-Aged Forests. *J For*
 92. Monserud RA, Sterba H, Hasenauer H (1997) The single-tree stand growth simulator PROGNAUS. In: booktitle = *Proceedings: Forest Vegetation Simulator Conference*
 93. Newnham RM, Smith JHG (1964) DEVELOPMENT AND TESTING OF STAND MODELS FOR DOUGLAS FIR AND LODGEPOLE PINE. *For Chron*. <https://doi.org/10.5558/tfc40494-4>
 94. O’Hara KL (1998) Silviculture for structural diversity: a new look at multiaged systems. *J For* 96:4–10
 95. Pacala SW, Canham CD, Saponara J, et al (1996) Forest models defined by field measurements: estimation, error analysis and dynamics. *Ecol Monogr*. <https://doi.org/10.2307/2963479>
 96. Palahí M, Pukkala T, Blasco E, Trasobares A (2007) Comparison of beta, Johnson’s SB, Weibull and truncated Weibull functions for modeling the diameter distribution of forest stands in Catalonia (north-east of Spain). *Eur J For Res*. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0177-3>
 97. Palahí M, Pukkala T, Trasobares A (2006) Modelling the diameter distribution of *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* and *Pinus halepensis* forest stands in Catalonia using the truncated Weibull function. *Forestry*. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl037>
 98. Pinheiro J, Bates D (2006) *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer Science & Business Media
 99. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, et al (2018) Package “nlme”: Linear and nonlinear mixed effects models. Version
 100. Popescu-Zeletin I (1957) Tabele dendrometrice
 101. Pretzsch H (2002) Application and evaluation of the growth simulator SILVA 2.2 for forest stands, forest estates and large regions. *Forstwissenschaftliches Cent*
 102. Pretzsch H, Biber P, Ďurský J (2002) The single tree-based stand simulator SILVA: Construction, application and evaluation. *For Ecol Manage*. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00047-6)
 103. Pretzsch H, del Río M, Giammarchi F, et al (2022) Changes of Tree and Stand Growth: Review and Implications
 104. Pretzsch H, Hilmers T, Biber P, et al (2020) Evidence of elevation-specific growth

- changes of spruce, fir, and beech in european mixed mountain forests during the last three centuries. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0368>
105. Pretzsch H, Hilmers T, Uhl E, et al (2021) European beech stem diameter grows better in mixed than in mono-specific stands at the edge of its distribution in mountain forests. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01319-y>
 106. Pretzsch H, Schütze G, Uhl E (2013) Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol* 15:483–495. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>
 107. Prodan M, Holzmesselehre JD (1965) Sauerlander's Verlag. Frankfurt am Main
 108. R Core Team (2020) R Core Team 2020. In: R A Lang. *Environ. Stat. Comput.*
 109. Reventlow DOJ, Nord-Larsen T, Biber P, et al (2021) Simulating conversion of even-aged Norway spruce into uneven-aged mixed forest: effects of different scenarios on production, economy and heterogeneity. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01381-0>
 110. Robinson A (2004) Preserving correlation while modelling diameter distributions. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/x03-191>
 111. Schmidt LN, Sanquetta MNI, McTague JP, et al (2020) On the use of the weibull distribution in modeling and describing diameter distributions of clonal eucalypt stands. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0051>
 112. Siipilehto J, Mehtätalo L (2013) Parameter recovery vs. parameter prediction for the Weibull distribution validated for Scots pine stands in Finland. *Silva Fenn.* <https://doi.org/10.14214/sf.1057>
 113. Temesgen H, Monleon VJ, Hann DW (2008) Analysis and comparison of nonlinear tree height prediction strategies for Douglas-fir forests. *Can J For Res.* <https://doi.org/10.1139/X07-104>
 114. Thurnher C, Klopff M, Hasenauer H (2017) MOSES – A tree growth simulator for modelling stand response in Central Europe. *Ecol Modell.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.01.013>
 115. Trasobares A, Pukkala T, Miina J (2004) Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. *Ann For Sci.* <https://doi.org/10.1051/forest:2003080>
 116. Vacek Z, Prokúpková A, Vacek S, et al (2021) Mixed vs. monospecific mountain forests in response to climate change: structural and growth perspectives of Norway spruce and European beech. *For Ecol Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119019>
 117. Vanclay JK (1992) Assessing site productivity in tropical moist forests: a review. *For Ecol Manage.* [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90017-4)
 118. Weiskittel AR, Hann DW, Kershaw JA, Vanclay JK (2011) Forest Growth and Yield Modeling
 119. Wickham H (2016) ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis



120. Wickham H, François R, Henry L, Müller K (2019) dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version. Media
121. Wykoff WR, Crookston NL, Stage AR (1982a) User's guide to the stand prognosis model (forestry). US Dep Agric For Serv Gen Tech Rep
122. Wykoff WR, Crookston NL, Stage AR, et al (1982b) User's Guide to the Stand Prognosis Model
123. Zeide B (1993) Analysis of Growth Equations. For Sci. <https://doi.org/10.1093/forestscience/39.3.594>

SCURT REZUMAT

Modelele de prognoză a creşterii şi producţiei arboretelor stau la baza sistemelor de gospodărire a pădurilor asigurând organizarea şi continuitatea acestor ecosisteme. Pentru o lungă perioadă timp modelele construite s-au concentrat asupra modelării şi predicţiei principalelor caracteristici biometrice ale arboretului. Astfel, urmând aceste tendinţele pe plan mondial, singurele modele construite în România pentru prognoza creşterii şi producţiei arboretelor au fost tabelele de producţie. Cu toate că aceste modele sunt considerate de actualitate aplicabilitatea lor este limitată la arborete pure echiene. În acest context, scopul acestei lucrări a fost dezvoltarea unui model de prognoză a creşterii şi producţiei arboretelor cu o flexibilitate şi aplicabilitate ridicată care, prin simulare, poate genera dinamica creşterii unui arboret amestecat cu o structură complexă.

În acest sens, modelarea s-a concentrat asupra caracteristicilor biometrice ale arborelui şi nu a arboretului. Au fost construite modele de predicţie a creşterii în diametru, înălţime şi a mortalităţii la nivel de arbore iar modelul de recrutare a fost construit pentru a prezice numărul de arbori care depăşeşte pragul de 8 cm în o perioadă de 5 ani. Aceste modele au fost asamblate într-un program de simulare care este capabil să simuleze dezvoltarea arboretelor pluriene amestecate din Parcul Naţional Retezat.

Rezultatele obţinute au arătat capacitatea modelului de a prezice cu o acurateţe ridicată creşterea şi producţia arboretelor din reţeaua de inventariere instalată în Parcul Naţional Retezat. Eroarea asociată modelului de simulare PROCODRU evaluată folosind indicatorul statistic RMSE este de 48 m³ în cazul volumului pe picior la hectar, de 2.7 m² în cazul suprafeţei de bază la hectar, de 67 indivizi în cazul numărului de arbori la hectar şi de numai 0.66 cm în cazul diametrului mediu al suprafeţei de bază.

Acest model este primul de acest gen construit în România şi poate constitui soluţia pentru estimarea şi prognoza creşterilor şi producţiei arboretelor amestecate cu structuri complexe, depăşind astfel, limitările impuse de metodele actuale de predicţie a creşterii şi producţie a arboretelor.

SHORT SUMMARY

Growth and yield models are the main tool used in forestry for planning, organizing, and ensuring the continuity of forest ecosystems. The first growth and yield models built to predict the main biometric characteristics of the stand are the classic yield tables. Although other countries have now developed more advanced tools for projecting stand development, in Romania yield tables remain the only type of growth and yield models used. The main limitation of yield tables is that their applicability is generally limited to pure even-aged stands. In this context, the aim of this paper was to develop a flexible growth and yield model able to project stand development in mixed uneven-aged stands.

In order to achieve this goal, we focused on developing individual tree models for the main tree characteristics. The main models were built to predict diameter growth, tree height, mortality, and recruitment. These models were assembled into a simulation model-PROCODRU, which is capable of simulating the development of mixed uneven-aged stands in the study area.

The results obtained demonstrated the model's ability to predict the growth and yield of the stand with high accuracy. The error associated with the PROCODRU model evaluated using the RMSE statistic is 48 m³ for the standing volume per hectare, 2.7 m² for the basal area per hectare, 67 individuals for the number of trees per hectare, and 0.66 cm for the mean quadratic diameter.

This type of model is the first of its kind built in Romania and can be the solution for estimating and projecting the growth and yield of mixed stands with a complex structure, thus overcoming the limitations imposed by current methods used to project stand development.