

PN-III-P4-PCE-2021-1677, Contract 108PCE/2021

SAFECLIM – Evaluarea integrată a evoluției ofertei de servicii ecosistemice ale pădurilor României sub influența schimbărilor climatice

Raport științific final

Data depunerii: 20/11/2024

Numărul raportului	PN-III-P4-PCE-2021-1677, Contract 108PCE/2021
Titlul	Raport științific final. Evaluarea integrată a evoluției ofertei de servicii ecosistemice ale pădurilor României sub influența schimbărilor climatice.
Stadiul	Raport științific final
Durata proiectului	02.06.2022 – 31.11.2024
Site-ul proiectului	https://usv.ro/cercetare/proiecte/programe-pncdi-iii/safeclim/
Autoritatea contractantă	Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și Inovării (UEFISCDI). Persoană de contact pentru Autoritatea Contractantă: Iulia Brat (iulia.brat@uefiscdi.ro).
Coordonator	Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava. Director proiect : Olivier Bouriaud.

Raport științific final

1	OBIECTIVELE PROIECTULUI	2
2	PREZENTAREA REZULTATELOR OBȚINUTE PENTRU FIECARE OBIECTIV	2
2.1	CONTEXTUL, SCOPUL PROIECTULUI.....	2
2.2	O1- ÎMBUNĂȚIREA CUNOȘTIINȚELOR ACTUALE DESPRE TRĂSĂTURILE FUNDAMENTALE ALE SPECIILOR DE ARBORI.	3
2.2.1	<i>Scop și ipoteze de cercetare</i>	3
2.2.2	<i>Metoda de lucru pe teren.....</i>	4
2.2.3	<i>Prelucrarea datelor</i>	5
2.2.4	<i>Rezultate</i>	6
2.2.5	<i>Gradul de realizare.....</i>	9
2.3	O2- EVALUAREA CANTITATIVĂ A IMPACTULUI SCHIMBĂRILOR CLIMATICE ASUPRA STRUCTURII, COMPOZIȚIEI ȘI PRODUCTIVITĂȚII PĂDURILOR DIN ROMÂNIA.	10
2.3.1	<i>Scop și ipoteze de cercetare</i>	10
2.3.2	<i>Compararea modelelor de distribuție</i>	10
2.3.3	<i>Calibrarea modelelor</i>	11
2.3.4	<i>Rezultate cu privire la estimarea stării viitoare</i>	14
2.3.5	<i>Gradul de realizare.....</i>	14
2.4	O3- EVALUAREA IMPACTUL MANAGEMENTULUI ASUPRA SERVICIILOR ECOSISTEMICE FORESTIERE ȘI POTENȚIALUL DE ADAPTARE AL PĂDURILOR LA SCHIMBĂRILE CLIMATICE.	15
2.4.1	<i>Obiectivele și principiile studiului</i>	15
2.4.2	<i>Dezvoltarea și implementarea unui model predictiv pentru evoluția compoziției speciilor și consecințele asupra stocului</i>	15
2.4.3	<i>Propagarea erorilor.....</i>	16
2.4.4	<i>Estimarea dinamicii serviciilor ecosistemice</i>	16
2.4.5	<i>Rezultatele generale și evoluția diferită a dinamicii speciilor</i>	17
2.4.6	<i>Evoluția serviciilor ecosistemice.....</i>	19
2.4.7	<i>Gradul de realizare.....</i>	21
2.5	O4- PERSPECTIVE ALE MANAGEMENTULUI ADAPTATIV SAU CONSERVATOR AL PĂDURILOR.	21
2.5.1	<i>Gradul de realizare.....</i>	22
3	INDICATORI DE REZULTAT	22
4	IMPACTUL ESTIMAT AL REZULTATELOR OBȚINUTE	24

1 Obiectivele proiectului

Lista obiectivele proiectului (*in extenso de pe platforma UESFISCDI*) este :

O1- îmbunătățirea cunoștințelor actuale despre trăsăturile fundamentale ale speciilor de arbori. Acest obiectiv vizează în special trăsăturile alometrice ale speciilor (*species traits*). Măsurătorile vor permite cuantificarea variabilității spațiale în alometria arborilor pe o colecție de parcele și specii reprezentative.

O2- evaluarea cantitativa al impactului schimbărilor climatice asupra structurii, compoziției și productivității pădurilor din România. Caracteristicile deosebite ale pădurilor românești, precum stocurile mari realizate, amestecurile mari și funcționarea aproape naturală aduc o valoare ridicată comunității științifice.

O3- evaluarea impactul managementului asupra serviciilor ecosistemice forestiere și potențialul pădurilor de adaptare și rezistență la schimbările climatice. Modelele de landscape (peisaj) vor fi implementate pentru a testa scenariu de management și pentru a evalua cantitativ impactul acestora asupra resurselor forestiere și a funcțiilor majore ale ecosistemului.

O4- Perspective ale managementului adaptativ sau conservator al pădurilor. Acest obiectiv sintetic (O4) este de a formula recomandări relevante pentru politici pentru impactul schimbărilor climatice asupra biodiversității, stocurilor și aprovizionării ecosistemelor din România.

Proiectul și-a propus să furnizeze cunoștințe cantitative asupra trăsăturilor speciilor pentru a evalua schimbările provocate de schimbările climatice asupra pădurilor din România, pentru a proiecta starea lor posibilă într-un orizont de 100 de ani și pentru a evalua opțiunile de management pentru a crește rezistența la schimbările cliimei. Acesta include studiul interacțiunilor dintre specii, în special efectele amestecurilor asupra creșterii la arbori și studiul trăsăturilor cheie ale speciilor, împreună cu opțiuni de management adaptativ, pentru a produce recomandări practice pentru managementul pădurilor în România.

2 Prezentarea rezultatelor obținute pentru fiecare obiectiv

2.1 Contextul, scopul proiectului

Obiectivul proiectului este de a proiecta starea posibilă a pădurilor României până în anul 2100 și de a evalua opțiunile de management care să sporească rezistența pădurilor la schimbările climatice. Proiectul furnizează cunoștințe cantitative privind caracteristicile (trăsăturile) principale ale speciilor (*species traits*) importante pentru a evalua impactul provocat de schimbările climatice asupra pădurilor din România. S-au studiat interacțiunile dintre specii, în special în cazul arboretelor de amestec, sub influența unor constrângeri și limitări specifice ale mediului. Caracteristicile-cheie analizate pot explica felul în care speciile forestiere interacționează și sunt fundamentale pentru a putea formula opțiuni de management forestier adaptiv și recomandări practice care să țină cont de evoluția climatică și starea de sănătate a arborilor. Una dintre nevoile urgente ale silviculturii în prezent este găsirea speciilor adaptate condițiilor climatice viitoare pentru a asigura regenerarea pădurilor (plantații, completare regenerării naturale sau favorizarea unor specii în regenerarea naturală) în condiții de secete prelungite, schimbări ale regimului precipitațiilor, mortalitate crescută la arborii maturi, dezgolirea prematură a solului și înierbarea, etc.

2.2 O1- Îmbunătățirea cunoștințelor actuale despre trăsăturile fundamentale ale speciilor de arbori.

2.2.1 Scop și ipoteze de cercetare

Studiile din literatura susțin că arborii cu trăsături alometrice adaptative ating adesea o creștere și o stabilitate mai bună în arboretele mixte, sugerând că adaptabilitatea alometrică poate îmbunătăți abilitățile competitive și rezistența. Trăsăturile alometrice adaptative contribuie la beneficii la nivel de ecosistem, cum ar fi creșterea biodiversității, eficiența îmbunătățită a utilizării resurselor și productivitate mai mare în pădurile mixte în comparație cu monoculturi. În pădurile cu specii mixte, arborii cu trăsături alometrice adaptabile tind să echilibreze mai bine concurența și coexistența cu alte specii. De exemplu, trăsături alometrice adaptative pot fi reprezentate:

- Raportul înălțime / diametru: arborii care își pot ajusta raportul înălțime-diametru pot fi mai competitivi în asigurarea luminii în amestecuri, unde disponibilitatea luminii variază în funcție de speciile prezente. Speciile tolerante la umbră se pot adapta pentru a acorda prioritate creșterii în diametru sub un coronament mai înalt, în timp ce speciile care necesită lumină cresc mai rapid în înălțime.

- Plasticitatea coroanei: arborii care prezintă o arhitectură flexibilă a coroanei pot optimiza captarea luminii chiar și în arborete umbrite, neuniforme, tipice amestecurilor. Această plasticitate ajută copacii din păduri mixte să își adapteze modelele de ramificare și alocarea frunzelor în funcție de vecinii lor.

Una din primele etape ale proiectului a fost crearea unui gradient ecologic pentru evaluarea caracteristicilor primare sau trăsături (*species traits*) ale speciilor forestiere dominante din România. Deoarece amestecurile de specii au un impact semnificativ asupra acestor trăsături, deși puține studii au acoperit această relație, este esențial să se analizeze amestecurile prin construirea unui gradient controlat. Având în vedere constrângerile privind numărul de zone care pot fi eșantionate, au fost necesare metode de eșantionare statistică pentru a se asigura că zonele eșantionate sunt reprezentative. Motivul pentru stabilirea acestui gradient constă în necesitatea de a minimiza factorii de confuzie - adică orice influențe externe asupra rezultatelor țintă care nu sunt controlate direct.

Speciile analizate sunt : fag (*Fagus sylvatica* L.), brad (*Abies alba* Mill.), molid (*Picea abies* Karst.), gorun (*Quercus petraea* Liebl.), pedunculat oak (*Quercus robur* L.), Cer (*Quercus cerris* L.), carpen (*Carpinus betulus* L.), jugastru (*Acer campestre* L.), paltin (*Acer pseudoplatanus* L.), mestecăan (*Betula pendula* L.), salcâm (*Robinia pseudacacia* L.).

În constituirea gradientului s-au urmărit principiile stabilite în cadrul proiectului FundivEurope (FP-7, desfășurat în perioada 2010-2014). Astfel, alegerea piețelor de probă pentru proiectul SAFECLim a urmărit metodologia descrisă de Baeten et al. (2013) prin care gradientul se focalizează asupra unor specii principale (10 în cadrul proiectului), care au o contribuție la volumul suprateran local la un nivel definit : 100% (arborete pure), 50% amestec de două specii. Ceilalți factori, precum vârsta arboretului și altitudinea trebuie să și ei controlați. În cadrul proiectului s-au studiat arboretele mature unde ultima lucrare (răritură) s-a efectuat în urmă cu cel puțin 5 ani pentru a minimiza influența perturbărilor legate de activitățile de gestionare silvică, și a lăsa arboretele să revină la un mod de funcționare relativ stabil.

În zona Moldovei, fagul, molidul, bradul sunt specii foarte răspândite și s-au găsit fără probleme arborete care să ofere amestecuri cu proporțiile dorite (cu încadrarea în toleranță). Pentru arboretele de gorun, cer, gârnița s-au găsit arborete în vestul țării.

Lista suprafețelor reprezentative scanate în cadrul proiectului se regăsește în tabelul 1. Speciile și amestecurile principale sunt incluse, iar primele patru specii cele mai frecvente sunt mai bine reprezentate decât celelalte: fag, molid, brad, carpen.

Tabelul 1. Lista suprafețelor reprezentative scanate în cadrul proiectului pentru determinarea trăsăturilor speciilor (species traits)

Numărul suprafeței de probă	Compoziția	Localizarea suprafețelor	Număr de arbori	Anul instalării
P1	MoBr	47°02'45.25"N 26°16'32.09"E	28	2022
P2	BrPam	47°02'49.84"N 26°16'02.22"E	24	2022
P3	Mo	47°02'46.03"N 26°16'30.24"E	27	2022
P4	MoPam	47°02'46.17"N 26°16'32.28"E	17	2022
P5	CeGo	46°55'49.12"N 21°59'29.7"E	17	2022
P6	Ce	46°55'56.19"N 21°59'58.89"E	10	2022
P7	CeCa	46°56'18.8"N 21°58'16.72"E	10	2022
P8	CeGi	46°52'35.34"N 21°57'04.8"E	19	2022
P9	Go	46°54'19.68"N 21°57'00.72"E	16	2022
P10	CeTe/Ju	46°55'06.63"N 21°57'15.71"E	22	2022
P11	Fa	46°55'8.43"N 27° 4'28.32"E	10	2023
P12	FaGo	46°53'53.22"N 27° 4'52.61"E	18	2023
P13	CaGo	46°54'25.76"N 27° 4'36.00"E	20	2023
P14	FaCa	46°55'6.15"N 27° 4'19.21"E	14	2023
P15	MeFa	46°50'14.86"N 27°01'15.3"E	12	2023
P16	StCa	46°50'14.1"N 27°01'16.85"E	8	2023
P17	St	46°50'15.49"N 27°01'17.5"E	11	2023
P18	Ca	46°55'6.04"N 27°04'17.59"E	8	2023
P19	Me	46°59'23.00"N 26°24'28.34"E	16	2023
P20	FaPam	47°01'55.6"N 26°16'24.79"E	11	2023
P21	BrFa	47° 1'47.00"N 26°16'29.00"E	12	2023
P22	JuSt	46°54'19.15"N 26°59'20.47"E	12	2023
P23	Ju	46°54'21.37"N 26°59'23.52"E	12	2023
P24	JuCa	46°59'25.00"N 26°22'20.00"E	13	2023
P25	ScCa	47°42'19.00" N 26°18'21.00"	15	2023
P26	GoSt	47°41'59.00"N 26°17'47.00"E	16	2023
P27	MeSc	46°59'26.00"N 26°24'52.00"E	23	2023
P28	Br	47° 1'40.00"N 26°16'21.00"E	16	2023
P29	MoFa	47° 2'53.00"N 26° 9'50.00"E	19	2023
P30	Sc	46°22'57.00"N 26°56'53.00"E	13	2023
P31	GoPlt	46°24'3.00"N 26°53'15.00"E	23	2023

2.2.2 Metoda de lucru pe teren

Schema de scanare a folosit principiile descrise în Coșofreț et al. (2018) : în fiecare suprafață de probă am amplasat o scanare în centrul suprafeței, și încă 6 într-o rază de 13 m de la centrul suprafeței pentru a diminua ocluzia. Astfel, au fost scanați în jur de 10-20 de arbori pe fiecare suprafață de probă, în funcție de desimea locală a arboretelor (Figura 4).

Scanarea s-a realizat cu scannerul laser terestru Z+F Imager 5010 de tip „phase shift” achiziționat prin proiectul PN-III-P2-2.1-PED-2016-1540, cu un nivel înalt de precizie și de intensitate și cu ajutorul unor ținte sferice pentru a fuziona norii de puncte produși pentru o suprafață de probă (Figura 5). Scannerul Z+F Imager 5010 are o precizie mult mai mare decât scanerul Faro și poate să măsoare cu precizie pe distanțe de peste 100 m. Lungimea de undă a laserului este de 1500 nm, fiind situat în infraroșu apropiat. Fiecare nor de puncte reprezintă între 100 și 300 milioane de puncte de măsurare.

Am optat pentru o scanare tip „leaf out” pentru că surprinde mult mai bine coroana arborilor (ex. Figura 5), mai ales în cazul în care coroanele se interpătrund. Am beneficiat de condiții meteorologice destul de favorabile pentru scanare, astfel încât datele înregistrate sunt de calitate foarte bună.

În total au fost inventariați 492 de arbori în cadrul celor 31 de suprafețe de probă, cu un diametru mediu de cca. 36,5 cm și înălțime medie de cca. 26,4 m. După diametru, cele mai mari valori au fost înregistrate la specia stejar cu cca. 89,8 cm, iar pentru înălțime valoarea maximă este înregistrată la molid (42,2 m) în piața de probă 29 (arboret cu structură plurienă).

Tabelul 1. Variația caracteristicilor biometrice în suprafețele de probă analizate.

Nr. crt.	Specia	Arbori	Diametru (cm)			Înălțimea (m)		
			Media ± StdDev	Min	Max	Media ± StdDev	Min	Max
1	BR	44	32.13 ± 7.93	9.2	63.5	32.13 ± 7.93	7	41.5
2	CA	59	31.62 ± 10.62	8.05	54.75	24.00 ± 5.97	10.8	32.8
3	CE	31	37.81 ± 14.94	9.1	66.15	26.64 ± 4.25	14.8	32.1
4	CI	2	24.08 ± 5.34	20.3	27.85	24.3	-	-
5	FA	74	36.28 ± 17.07	8.3	75.65	26.70 ± 9.38	6.8	38.1
6	GI	7	39.29 ± 16.17	8.65	55.95	23.45 ± 3.89	20.7	26.2
7	GO	57	35.46 ± 11.94	12.6	62.8	25.21 ± 4.59	13.6	35
8	JU	31	33.97 ± 9.14	20.1	56.55	20.00 ± 3.66	11.8	25.9
9	ME	34	31.92 ± 9.18	18.85	52.6	22.86 ± 4.08	15.6	27.8
10	MO	61	38.72 ± 10.2	20.2	76	33.57 ± 5.59	15.8	42.2
11	PAM	22	34.12 ± 8.09	18.6	47.5	29.23 ± 3.84	24.4	36.1
12	PLT	3	37.88 ± 5.34	33.3	43.75	24.83 ± 1.55	23.1	26.1
13	SC	21	42.75 ± 12.26	25.35	77.3	24.41 ± 6.11	12.8	38.1
14	SO	1	14.3	-	-	14.8	-	-
15	ST	28	44.89 ± 15.63	23.15	89.75	25.93 ± 3.94	16.6	33.3
16	TE	13	24.80 ± 11.42	8.4	40.3	18.86 ± 4.53	12	24.2
17	ULM	4	17.78 ± 3.6	14.45	22.8	15.55 ± 1.2	14.7	16.4
Total general		492	36.46 ± 13.31	8.05	89.75	26.39 ± 7.2	6.8	42.2

2.2.3 Prelucrarea datelor

Am folosit programul dedicat Z+F LaserControl pentru coregistrarea norilor de puncte. Coregistrarea s-a bazat pe identificarea țintelor fixe și pentru care determinarea centrului geometric a putut fi efectuată cu un nivel de precizie suficient de mare. Coregistrarea arată că erorile de poziționare la 10 m sunt de ordinul a 2 mm (aceste erori corespund deviațiilor de la un nor la altul ale unui obiect dat, aici a sferelor de coregistrare), ceea ce este foarte bun și suficient pentru analizele următoare. Norii de puncte au fost segmentați și filtrați. Pentru aceste analize, norii 3D de înaltă precizie obținuți din scanări au fost utilizați pentru a extrage partea corespunzătoare coroanelor verzi ale arborilor. Algoritmii bazați pe triangulații Delaunay sunt apoi utilizați pentru a determina învelișul exterior convex al coroanelor. Prin ajustarea formelor convexe (Fig. 1), este posibilă estimarea suprafeței de contact a coroanei și a volumului pe care îl ocupă. Datorită acestor modele, este posibil să se cunoască dimensiunile coroanei în toate direcțiile și, mai ales, volumul, care este una dintre caracteristicile fundamentale ale speciei, dar care este foarte greu de estimat. Alegerea parametrului de netezire (Fig. 1) s-a bazat pe analiza descreșterii varianței conform Pateiro-Lopez și Rodriguez-Casal 2010.

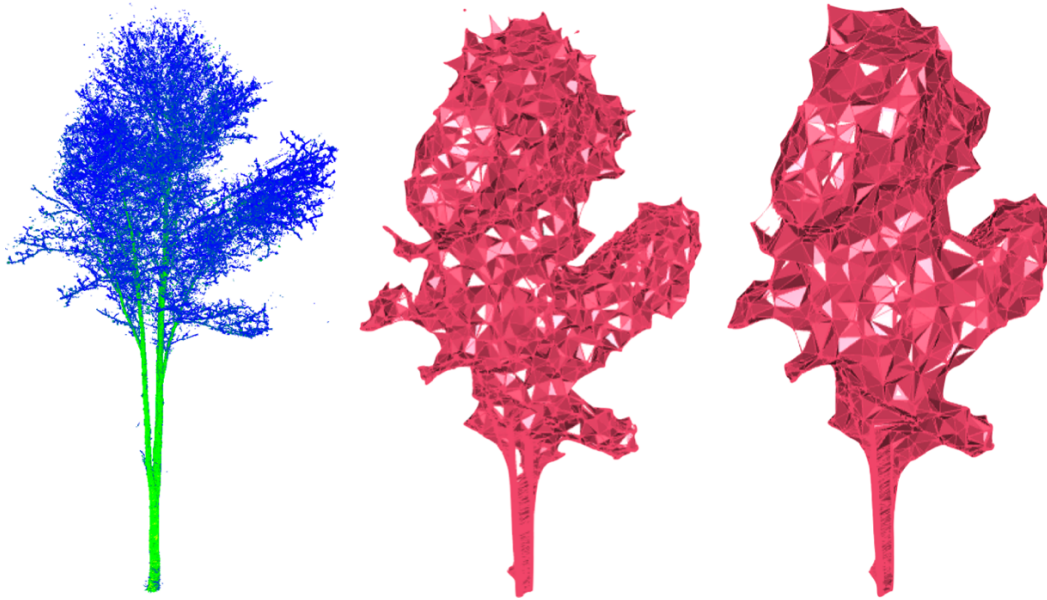


Fig. 1. Scanarea 3D LiDAR (stânga) este procesată pentru a determina volumul coroanei prin algoritmul de determinare a formei (α -convex hull) cu un grad mare (mijloc) sau mai mic (dreapta) de netezire.

Am creat o bază de date în care sunt stocate datele de teren și datele prelucrate cu privire la arbori. Scanările au fost, de asemenea, procesate pentru a extrage date cantitative despre coroanele arborilor.

2.2.4 Rezultate

Diametrul arborilor este cel mai bun predictor al volumului coroanelor, iar relația dintre diametru și volum depinde foarte mult de specie (Fig. 2). Relația observată este o relație alometrică foarte similară cu relația dintre diametrul și volumul arborelui, cu un nivel de variabilitate similar. Regularitatea norilor de puncte subliniază faptul că volumul coroanei este un atribut foarte important pentru arbori, și foarte controlat.

Măsurătorile TLS arată fără echivoc faptul că forma și volumul coroanelor arborilor pot varia foarte mult, în funcție de apropierea dintre arbori, ca un efect al competiției (Fig. 3). Datele produse arată o diferență marcată între specii în variabilitatea volumului coroanelor, cu unele specii care au o variabilitate redusă a volumului (bradul, gorunul și cer, teiul) și specii pentru care volumul la un anumit diametru variază pe o scară de la 1 la 4 (carpenul, fagul, jugastrul, molidul, paltinul, salcâmul). Capacitatea de a produce coroane cu un volum mare în ciuda competiției este o trăsătură fundamentală care poate să explice reziliența unor arbori față de umbră. Toleranța la umbră este considerată de mult timp în literatură ca fiind o trăsătură fundamentală, dar nu s-au explicat principiile și motivele pentru care această toleranță este posibilă.

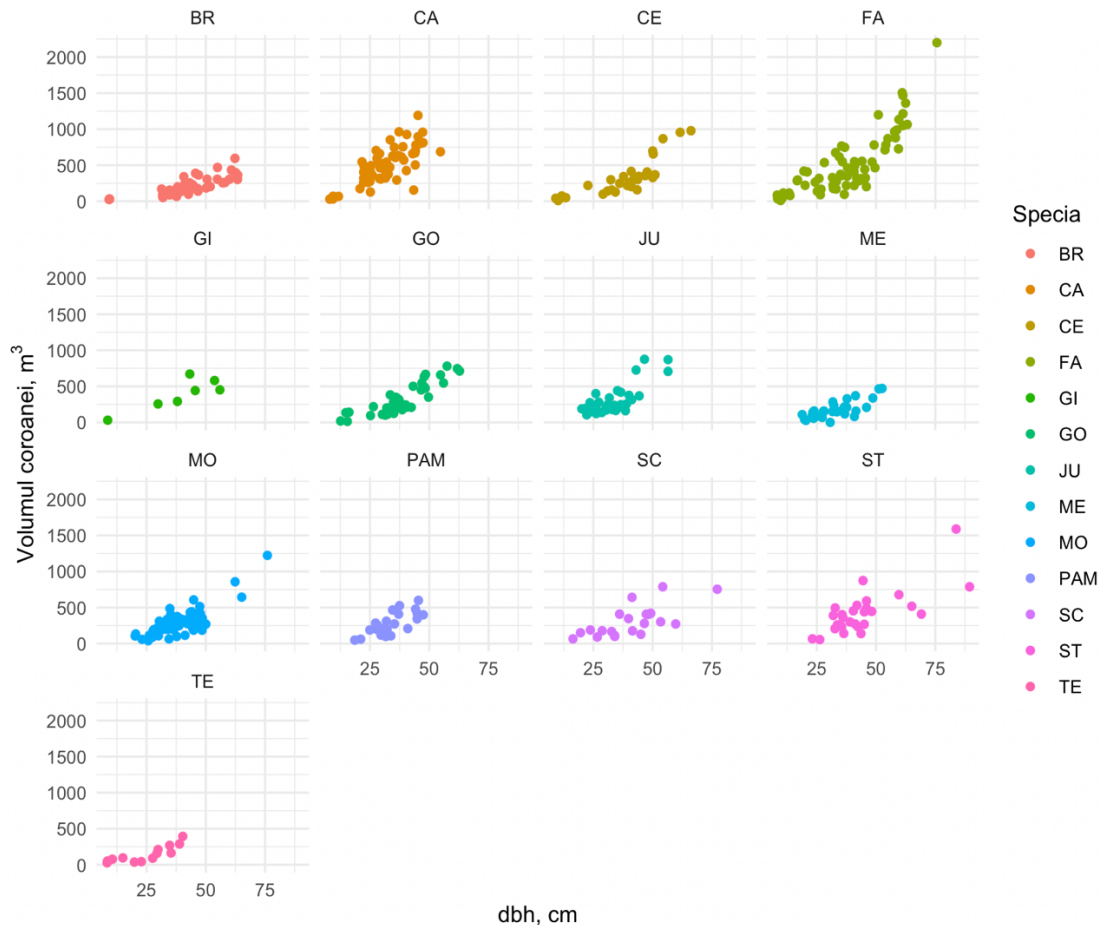


Fig. 2. Relația dintre diametrul la 1,3 m și volumul coroanei pentru speciile studiate în cadrul proiectului.

Am analizat în mod special impactul amestecului asupra volumului și suprafeței la sol a coroanelor. Am ajustat un model de regresie explicativ generalizat pentru a testa impactul unor variabile continue precum diametrul la 1,3 m, variabile categoriale moderatoare precum specia, și variabile moderatoare dihotomice precum apartenența la un arboret pur sau amestecat. Modelul analitic confirmă influența speciei, dar subliniază și influența amestecului pentru mai multe specii precum mesteacăn, molidul și jugastrul (Tabel 3).

După cum se poate și observa în figura 3, pentru rășinoase, prezența unor specii foioase în arboret limitează volumul coroanelor și mai ales pentru diametrele mari (> 40 cm) pentru care în arboretele pure volumele întrec 600 m^3 .

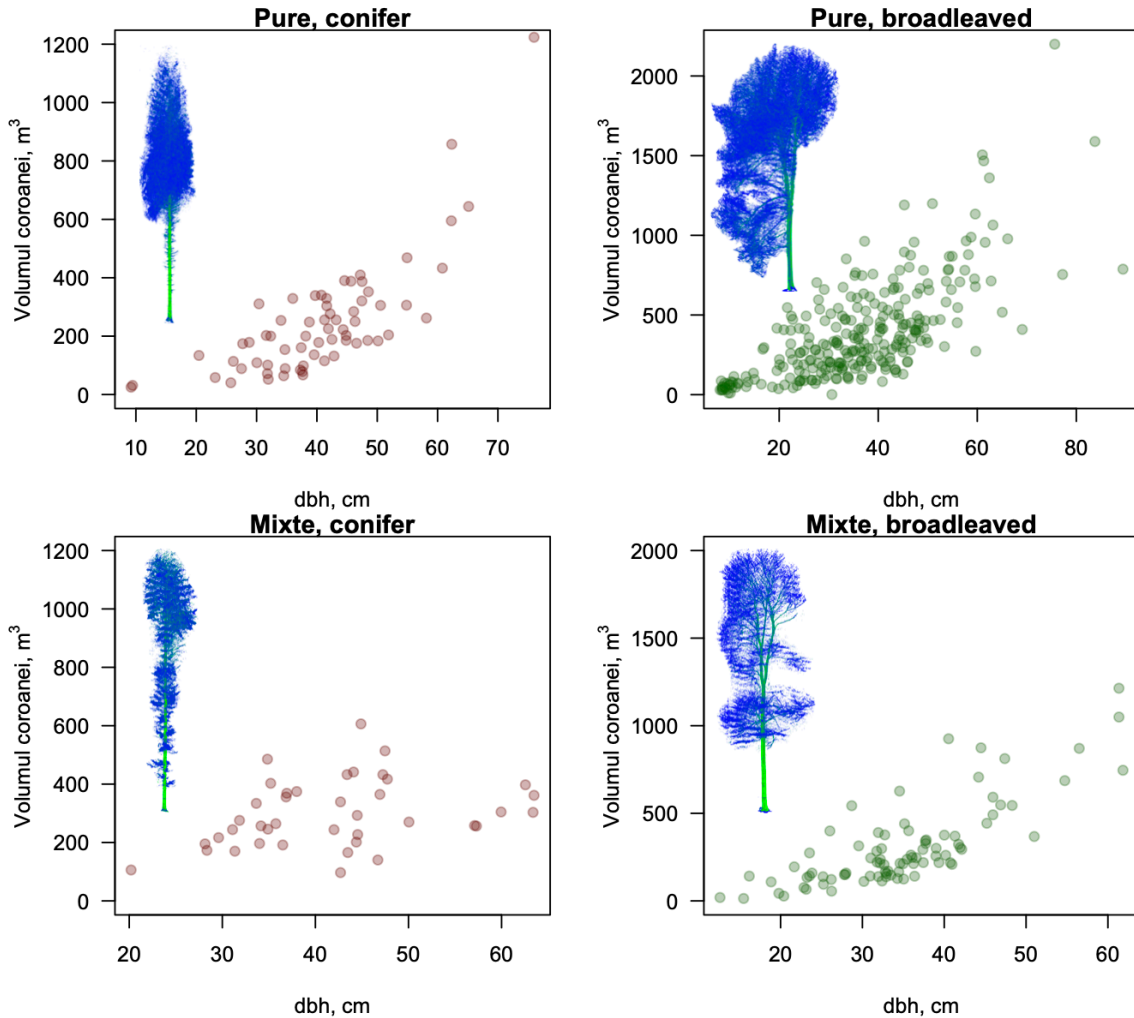


Fig. 3. Relația dintre diametrul la 1,3 m și volumul coroanelor variază în funcție de tipul de arbori (rășinoase versus foioase) dar și în funcție de amestecul de specii. Astfel amestecul de specii apare a fi un factor limitativ în determinarea volumului coroanelor la rășinoase.

Tabelul 3. Modelul de analiză a relațiilor dintre volumul coroanei și diametru, specie și amestecul în arboret

Parametrul	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Semnificația
(Intercept)	-1.72e+02	3.174e+01	-5.42	9.82e-08	***
SpeciaCA	4.429e+02	3.648e+01	12.141	< 2e-16	***
SpeciaCE	1.766e+02	4.387e+01	4.026	6.68e-05	***
SpeciaFA	3.564e+02	3.510e+01	10.156	< 2e-16	***
SpeciaGI	2.014e+02	6.558e+01	3.071	0.002267	**
SpeciaGO	1.737e+02	4.106e+01	4.231	2.83e-05	***
SpeciaJU	2.319e+02	4.603e+01	5.037	6.91e-07	***
SpeciaME	6.782e+01	4.673e+01	1.451	0.147419	
SpeciaMO	9.808e+01	3.888e+01	2.523	0.011994	*
SpeciaPAM	2.117e+02	4.472e+01	4.733	2.98e-06	***

SpeciaSC	9.848e+01	4.445e+01	2.215	0.027235	*
SpeciaST	7.555e+01	4.899e+01	1.542	0.123794	
SpeciaTE	1.695e+02	5.256e+01	3.225	0.001351	**
Amestec	-1.16e+02	5.091e+01	-2.27	0.023711	*
diametru	2.037e-01	7.522e-03	27.085	< 2e-16	***
SpeciaCA:pure	1.426e+02	7.803e+01	1.827	0.068302	.
SpeciaCE:pure	6.373e+01	8.022e+01	0.794	0.427367	
SpeciaFA:pure	-2.16e+01	7.083e+01	-0.305	0.760469	
SpeciaGO:pure	8.162e+01	7.053e+01	1.157	0.247847	
SpeciaJU:pure	1.274e+02	7.691e+01	1.657	0.098258	.
SpeciaME:pure	2.204e+02	7.441e+01	2.962	0.003225	**
SpeciaMO:pure	2.186e+02	6.527e+01	3.349	0.00088	***
SpeciaPAM:pure	-5.71e+01	1.677e+02	-0.34	0.733687	
SpeciaST:pure	2.777e+02	8.128e+01	3.417	0.000692	***

2.2.5 Gradul de realizare

Activitățile planificate au reprezentat o investiție semnificativă de timp necesară pentru înființarea suprafețelor de probă, măsurătorile de teren și mai ales prelucrarea datelor. Ca rezultat, aceste eforturi au permis crearea unei baze de date în care pentru prima dată am adunat informații cu privire la diametru, înălțimea (totală și baza coroanei), densitatea lemnului, și toate măsurătorile morfometrice care ni le oferă datele LiDAR 3D. Datele au confirmat ipotezele potrivit cărora i) variabilitatea volumului coroanelor este o trăsătură prin care se deosebesc principale specii forestiere și care explică o mare parte din toleranța față de umbră a acestora, ii) amestecul de specii influențează volumul coroanelor, dar nu la toate specii. Dintre rășinoase, molidul realizează cel mai bine adaptarea la amestec, dar amestecul cu alte specii este în defavoarea lui. La fel se întâmplă și în cazul mesteacănului.

Obiectivele au fost atinse, și urmează finalizarea punerii în valoare prin publicații. Un articol care prezintă efectul amestecului de specii asupra morfometriei coroanelor este în pregătire, știind că aceste rezultate sunt foarte rare în literatură.

Trei articole ISI au fost dezvoltate, două fiind publicate (Petrițan et al. 2023, Bouriaud et al. 2024), altul fiind în curs de evaluare (Dănilă et al.), și o cerere de brevet este în curs, astfel:

- Petrițan et al. este un articol cu privire la densitatea lemnului, aceasta fiind o trăsătură fundamentală a speciilor forestiere, a fost publicat în jurnalul *Forest Ecology and Management* (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112723002414>).

- Bouriaud et al. 2024 (<https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/cjfr-2024-0007>) a analizat metodele prin care inventarele forestiere realizează măsurarea arborilor și produc estimările de volum sau de biomasă la hectar. Având în vedere creșterea nevoilor de analizare și raportare cu privire la diversitatea speciilor, relația dintre diversitatea caracteristicilor arborilor și metodele de inventariere poate determina felul în care inventarierea forestieră pot oferi estimări fără deviație (bias). Articol a fost rezultatul unei colaborări cu cercetători din Franța, specializați în teoria sondajelor și a fost descărcat de peste 200 de ori, ceea ce arată interesul comunității științifice pentru acest tip de analiză.

- Dănilă et al. (în evaluare) prezintă o metodă de folosire a tehnologiei LiDAR terestră pentru optimizarea stabilirii modelelor alometrice. Scopul articolului este de a demonstra faptul că tehnologia LiDAR are un potențial ridicat pentru evaluarea unor caracteristici asupra unui număr foarte mare de arbori, mai mult

decât metodele tradiționale. Articolul prezintă felul în care măsurătorile tradiționale pot fi combinate cu cele obținute prin LiDAR pentru a optimiza eșantionul de arbori evaluat.

- În atenția OSIM a fost înaintată o cerere de brevet, care descrie un dispozitiv optim de amplasare a echipamentelor la scanarea suprafețelor de probă pentru determinarea atributelor biometrice ale arborilor.

2.3 O2- Evaluarea cantitativă a impactului schimbărilor climatice asupra structurii, compoziției și productivității pădurilor din România.

2.3.1 Scop și ipoteze de cercetare

Potrivit analizei Climate Copernicus, vara 2024 a fost cea mai caldă din toată perioada pentru care avem date meteorologice, și cea mai caldă pentru Europa. În mod special luna august a fost cea mai caldă, încă o dată peste recordul din 2023, cu temperaturi depășind media pe perioada de referință 1991-2020 cu 0,71°C (<https://climate.copernicus.eu/copernicus-summer-2024-hottest-record-globally-and-europe>).

Nivelul concentrației gazelor cu efect de seră reprezintă unul din cele mai influenți factori direcți care duc la schimbări ale regimului climatic la nivel global și regional. Așa-numite gazele cu efect de seră sunt gaze care au capacitatea de a converti lumina soarelui în căldură. Ele duc la modificarea echilibrului dintre radiațiile solare primite și emisiile de radiații infraroșii din atmosfera. Pentru prognozele pe termen lung au fost dezvoltate scenariile de emisii „RCP: Representative Concentration Pathway” (Calea reprezentativă a concentrației), stabilite pentru perioada 2006-2250. Aceste scenarii pleacă de la ipoteze de dezvoltare socio-economică ca fiind factorul principal care determină emisiile. Principalele caracteristici a acestor scenarii sunt descrise în tabelul următor (Tabel 4), preluat din Moss et al. (2008, 2010).

Tabelul 4. Caracteristicile principale ale scenariilor RCP (Sursa: Moss et al., 2008). NB: Numele scenariilor de emisii nu se referă la creșterea temperaturilor, ci la nivelul de forțare radiativă.

	Forțarea radiativă în 2100	Concentrația (CO ₂ -eq), ppm	Tendință
RCP2.6	3,0 W m ⁻²	490	Scădere și declin
RCP4.5	4,5 W m ⁻²	650	Stabilizare
RCP8.5	8,5 W m ⁻²	1370	Creșterea continuă

Scenariile climatice bazate pe aceste scenarii arată o evoluție importantă a temperaturilor și a precipitațiilor în viitor pentru România, în sensul aridizării.

Întrebarea de cercetare este simplă : care vor fi schimbările în compoziția arboretelor din România, așa cum pot fi anticipate în baza predicțiilor scenariilor climatice.

Pentru a răspunde la această întrebare am realizat trei acțiuni diferite : 1) am comparat și analizat diferitele modele de distribuție ale speciilor, 2) am calibrat două tipuri de modele pe datele din România, și 3) am aplicat modelul cel mai pertinent pentru a realiza predicții ale distribuției speciilor în viitor, având în vedere două scenarii climatice (RCP4.5 și RCP8.5). În plus, am procedat la o modelare prin care am studiat impactul gestiunii forestiere asupra schimbărilor de distribuție ale speciilor pe o scară geografică mai mică (nivel de ocoale silvice).

2.3.2 Compararea modelelor de distribuție

Modelele de distribuție ale speciilor sunt modele care asociază prezența unei anumite specii cu anumiți parametri climatici. Prezența sau absența poate fi corelată cu diverși parametri climatici, definind astfel probabilitatea ca o specie să fie observată într-o anumită locație. Modelele de compatibilitate (sau potrivire) climatică sunt folosite în continuare pentru a transpune condiții climatice (actuale sau viitoare) în zone geografice. Zonele de potrivire sunt zonele în care climatul este conform condițiilor necesare pentru prezența speciei analizate.

Mai multe modele de potrivire climatică au fost dezvoltate la nivel european, spre exemplu Mauri et al. 2017, Chakraborty et al. 2021 care propun și hărți de distribuție spațială. În aceste studii, modelul de potrivire climatică se bazează pe un ansamblu mare de parametri climatici, care creează o anvelopă multi-dimensională în interiorul căreia prezența speciei este posibilă. Modelele au fost dezvoltate în baza datelor setului de date EU-Forest (Mauri et al. 2017), care cuprinde aproape toate țările din EU, și la care au participat inventarele forestiere naționale cu mii de puncte de observație. Totuși, modelele dezvoltate de Mauri et al. (2017) și Chakraborty et al. (2021) se bazează pe ipoteze foarte stricte precum stabilitatea în timp a relației dintre variabilele climatice și prezența unei specii.

O altă dificultate întâmpinată în dezvoltarea acestor modele de distribuție ale speciilor este faptul că matricele de prezență-absență din seturile de date constituie descriu nișa creată, nu și nișa teoretică. Chiar și în cazul acestor două studii (op. cit.) care folosesc un set de date european, nișa observată nu cuprinde nișa teoretică. Motivele pentru această discrepanță au fost discutate cu ceva vreme în urmă (Barbet-Massin et al. 2012, Senay et al. 2013) :

- gestiunea favorizează anumite specii, în defavoarea altora;
- migrația speciilor este lentă și foarte lentă, iar zona de compatibilitate este mult mai mobilă.

Ca urmare, speciile se întâlnesc în zone în care nu mai sunt compatibile (fenomen numit „trailing edge”, Svenning and Sandel 2013) pentru că ieșirea din zona de compatibilitate nu înseamnă o mortalitate neapărat rapidă. Similar, există zone noi de compatibilitate care nu sunt ocupate rapid („leading edge”), tot din cauza propagării cu viteză redusă a speciilor forestiere. Aceste „time-lags” (Ells et al. 2024) creează o imagine falsă asupra potențialul speciilor, dar și a posibilității de apariție a unor ansambluri fitosociologice.

Molidul este una dintre speciile favorizate în România, care a ocupat mai mult spațiu decât ar fi asigurat un echilibru natural, de exemplu în detrimentul bradului. Astfel, pentru a rezolva aceste probleme, mai mulți autori au recurs la pseudo-date ce au fost create prin aplicarea unui algoritm care estimează prezența unei specii (Senay et al. 2013). Una dintre consecințele acestei abordări este că datele utilizate pentru calibrarea modelului de distribuție nu mai reprezintă observații, cum ar fi normal, ci predicții ale algoritmului.

Relațiile dintre variabilele climatice pot influența ajustarea modelelor, dacă modelul este calibrat pe un set de date cu o colinearitate ridicată între variabile. Au fost elaborate mai multe metode de reducere sau atenuare a coliniarității. Dintre aceste metode, care sunt metode de reducere, cele mai utilizate sunt cele bazate pe teste recursive care elimină succesiv o variabilă și măsoară impactul asupra calității predicției unui anumit model. Abordările corelative au un oarecare succes, dar sunt limitate atunci când scopul este de a crea modele bazate pe un set mare de variabile ale căror relații pot fi neliniare.

În plus față de coliniaritate, modelele construite pe un set mare de variabile suferă aproape întotdeauna de ceea ce se numește adaptare multiplă („overfitting”). Adaptarea multiplă apare atunci când nu numai că informațiile variabilelor sunt „învățate” de un model, ci și legăturile dintre variabile sunt învățate prin procesul de ajustare a modelului. Aceste legături constituie o învățare „nedorită”, deoarece aduc în model memoria unor procese trecute care nu sunt adaptate la situațiile viitoare în care modelul va fi solicitat să facă predicții. Acest fenomen este cu atât mai supărător în cazul modelelor de predicție a distribuției speciilor, care, prin definiție, vor trebui să prevadă distribuțiile viitoare, în condiții climatice despre care știm că vor fi diferite de cele actuale.

2.3.3 Calibrarea modelelor

Modelul RandomForest. Un model adaptat bazat pe un algoritm de învățare automată este modelul RandomForest (RF), dezvoltat pentru a rezolva probleme de regresie sau de clasificare. Principiul său este de a crea un arbore de regresie (regression tree) pe baza unei subeșantionări aleatorii a datelor dintr-un set de instruire. Mediile predicțiilor din acești arbori de regresie sunt apoi folosite pentru a prezice noi valori ale datelor. Prin urmare, este o abordare de tip bootstrap. Ca în cazul oricărui arbore de regresie, unul dintre

punctele critice este găsirea punctelor de ramificare, care sunt stabilite de algoritm pe baza unor extrageri aleatorii succesive, pentru care se testează variabila explicativă care oferă cea mai bună predicție posibilă. Atunci când se adaptează un model RF, principalul parametru de adaptare este numărul de variabile explicative care trebuie luate în considerare pentru fiecare ramură a arborilor de decizie. Algoritmii de auto-optimizare sprijină aceste evoluții cu soluții standard. Acestea se bazează pe autoevaluarea creată de validarea încrucișată, care urmărește, în esență, minimizarea deviației medii pătratice (RMSE). Este posibil să se intervină în ajustare și să se caute numărul de variabile explicative în afara algoritmului propriu-zis de învățare a modelului RF, dar rezultatele nu au arătat nicio îmbunătățire cantitativă a RMSE.

La fel ca toate modelele bazate pe învățare automată, modelul este limitat de faptul că predicțiile sunt ele însele întotdeauna limitate de intervalul de valori furnizate de observație. În mod intrinsec, aceste modele nu sunt capabile să producă extrapolări. Acest lucru subliniază importanța setului de instruire, care trebuie să fie cât mai complet posibil, deoarece are o influență directă asupra predicțiilor. În studiul nostru, calibrarea s-a bazat pe setul de date consolidate din ciclul 1 al IFN. Ajustările s-au bazat pe pachete de funcții binecunoscute pe platforma R, anume randomForest și biomod2. Pachetul "caret" este utilizat pentru a testa o optimizare externă. Toate datele și codurile pentru implementarea modelului sunt furnizate de Mauri et al. 2022 pe figshare.

Modelul IKS. În contrast, modelul IKS este un model foarte econom în resurse și ipoteze care definește zona de compatibilitate climatică pentru o anumită specie în baza a doar trei indicatori. Pentru un asemenea model efortul de calibrare este redus la trei parametri (desigur, pentru fiecare specie în parte). Robustețea modelului conferită de parcimonia sa a făcut posibilă evitarea multor dificultăți. Pentru fag, efortul de calibrare reprezintă 14,0% care este proporția punctelor de observație IFN pentru care prognoza este greșită (Fig. 4), iar pentru brad și molid (Figura 5) proporția este mai mică, fiind de 3,7% și respectiv 8,4%. Pentru gorun și salcâm de 7,5% și 3,7%. Pentru stejar și brad, limita a fost legată de pragul minim anual de temperatură pe care aceste specii îl pot tolera. Scăderea pragurilor de temperatură rezolvă problema. Principalul motiv al diferenței dintre distribuția reală observată și cea prognozată de model, în cazul fagului este faptul că pragul modelului pentru temperaturile minime este prea mic. Acest lucru poate fi observat prin examinarea histogramei altitudinilor în cele două clase, unde identificăm punctele pentru care modelul prezice corect prezența și punctele pentru care modelul nu prezice prezența, în timp ce datele din teren arată prezența speciei (Figura 5). Pentru salcâm, diferențele sunt explicate mai degrabă prin limita de rezistență față de secetă, care este considerată mai mică decât cea reală, pentru zona sudică a țării. Depășirea acestor limite de secetă poate însă avea la bază o estimare incorectă a rezervei de apă utilă a solului. Parametrii modelului sunt pe cale să fie recalibrați de către echipa care dezvoltă modelul și cu care cooperăm în acest sens, ca urmare a schimbării datelor meteorologice (Chelsa având o variantă nouă), a datelor cu privire la sol, și mai ales a scenariilor climatice viitoare. Modificările în curs nu au însă un impact foarte mare asupra previziunilor modelului, datorită robusteții lui.

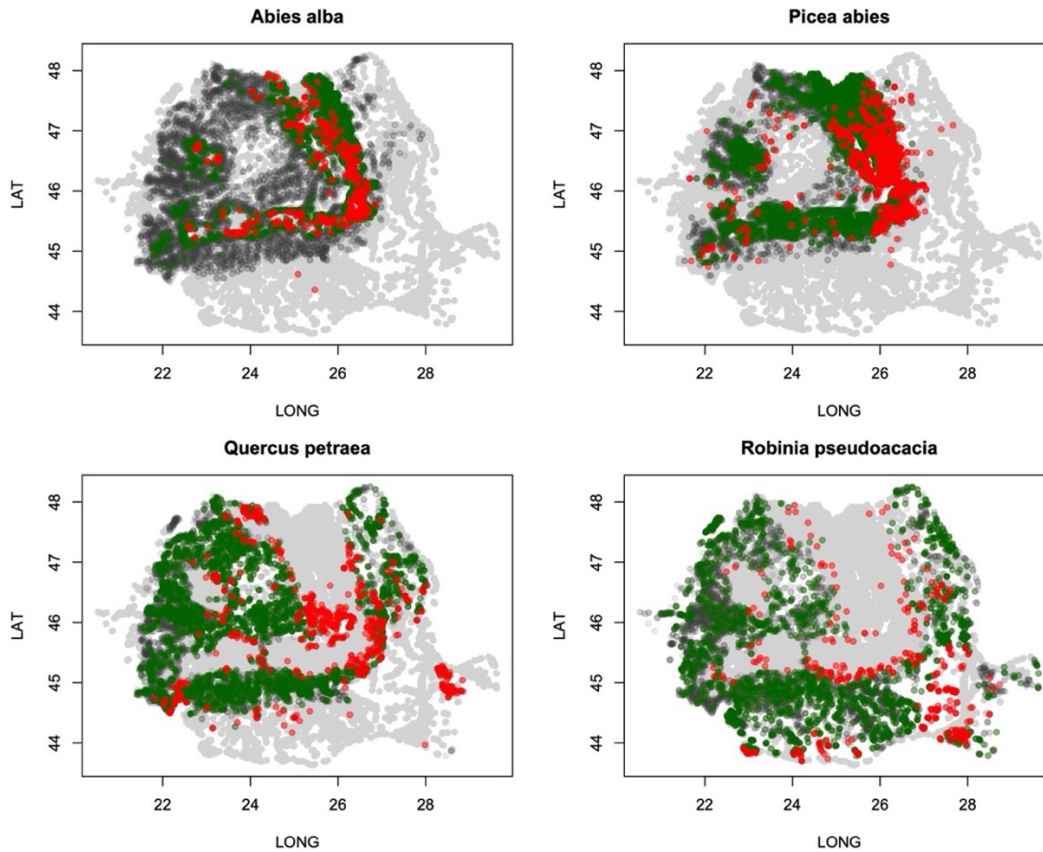


Fig. 4. Hărți care arată diferențele dintre prezența observată (rețeaua IFN) și prezența prezisă de modelul IKS pentru patru specii. Punctele roșii indică punctele în care specia este prezentă, dar prezența nu este prezisă de model.

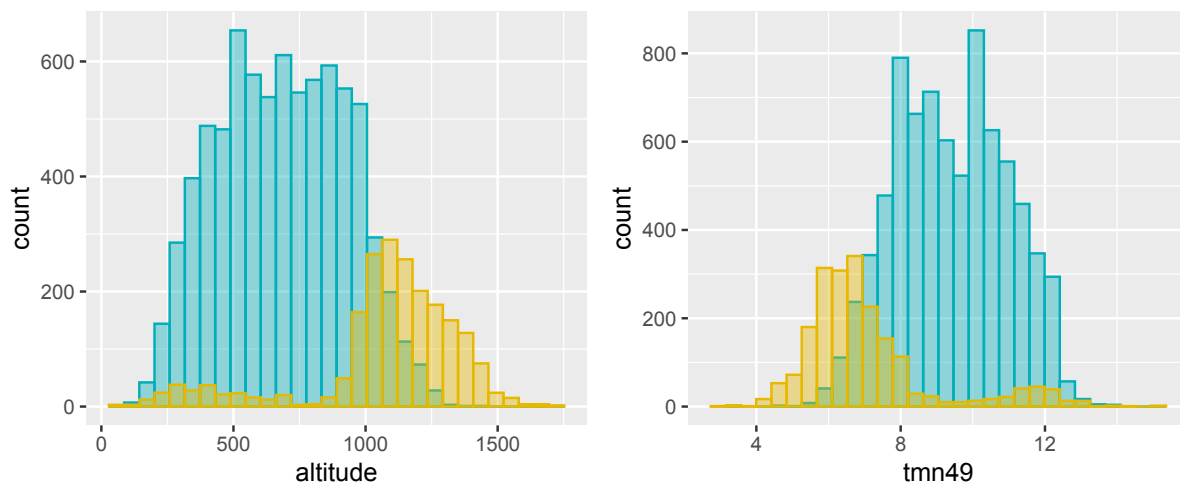


Fig. 5. Compararea distribuției altitudinilor (stânga) și a temperaturilor (dreapta) pentru zonele în care modelul prevede corect prezența fagului (albastru) și zonele în care modelul necalibrat nu prevede prezența fagului deși este prezent (galben).

2.3.4 Rezultate cu privire la estimarea stării viitoare

Compararea dintre predicțiile modelului IKS și modelul RF pe date de prezență-absență din prezent arată o performanță similară a modelelor pentru speciile cele mai răspândite (i.e., fagul, molidul), cu un avantaj marginal pentru modelul RF. Pentru speciile mai puțin răspândite, statisticile de ajustare dau un avantaj destul de clar în favoarea modelului IKS. În mod special, statistica Kappa (Cohen 1960, care aici reprezintă rata de succes a predicției prezențe speciilor evaluată în baza datelor de validare IFN) pentru mai multe specii principale precum gorunul, paltinul, salcâmul, tei arată faptul că modelul RF nu are performanțe mai bune decât o distribuție pur aleatorie (o valoare mică a statisticii Kappa, ex. $< 0,1$, înseamnă că predicția nu este mai bună decât una pur întâmplătoare). Astfel spus, capacitatea de predicție a modelului este satisfăcătoare pentru speciile foarte răspândite în EU, dar pentru alte specii nu are capacități reale de predicție. În consecință am continuat cu modelul IKS.

Tabelul 5. Compararea valorilor statisticii Kappa (rata de succes a predicției prezențe speciilor evaluată) a modelelor IKS și randomForest (RF) pentru speciile principale.

Specia/ modelul	Fagus sylvatica	Picea abies	Quercus robur	Quercus petraea	Carpinus betulus	Acer pseudoplatanus	Robinia pseudacacia	Tilia cordata
IKS	0,290	0,375	0,076	0,288	0,345	0,032	0,161	0,031
RF	0,325	0,486	-0,001	0,146	0,134	0,038	0,039	0,003

Hărțile de predicție a zonelor de compatibilitate climatică sunt prezentate pe pagina proiectului pe link-ul : <https://usv.ro/cercetare/proiecte/programe-pncdi-iii/safeclim/rezultate-si-rapoarte/harti-de-distributie/>
De asemenea, hărțile care arată schimbările în distribuția spațială a speciilor forestiere sunt disponibile pe site-ul web al proiectului la: <https://usv.ro/cercetare/proiecte/programe-pncdi-iii/safeclim/rezultate-si-rapoarte/harti-de-schimbari-de-distributie/>

2.3.5 Gradul de realizare

Obiectivele sunt îndeplinite, am produs hărțile de distribuție care pot fi folosite de către public și specialiștii silvici pentru a evalua care sunt speciile cele mai potrivite în regiunea lor, spre a orienta alegerea speciilor cele mai adaptate condițiilor climatice viitoare.

Cooperarea cu echipa de modelizare din Franța se continuă, prin actualizarea datelor pentru model, a scenariilor climatice și pentru a redacta un articol științific care să prezinte avantajele și performanța unui model bioclimatic cu parametri specifici pentru procese ecofiziologice.

Datorită proiectului s-a concretizat o colaborare cu echipa din Franța care dezvoltă modelul IKS, care este modelul folosit pentru a realiza estimări dinamice ale zonelor de potrivire climatică. Colaborarea va continua chiar după finalizarea proiectului deoarece au fost demarate acțiuni care vor permite o calibrare mai fină a modelului. Mai mult, s-a început un articol științific care va prezenta performanța modelului IKS pentru România, prin compararea cu datele culese pe teren, și cu predicțiile modelului dezvoltat de Mauri et al. 2022 și care acoperă România.

2.4 O3- Evaluarea impactul managementului asupra serviciilor ecosistemice forestiere și potențialul de adaptare al pădurilor la schimbările climatice.

2.4.1 Obiectivele și principiile studiului

Studiul și-a propus să combine înțelegerea noastră despre schimbările climatice la scară națională, cerințele climatice ale speciilor forestiere și starea actuală a pădurilor pentru a prezice evoluția stocului de masă lemnoasă până în anul 2100 (orizontul scenariilor climatice actuale). Abordarea presupune utilizarea unei descrieri detaliate a pădurilor actuale, luând în considerare compoziția speciilor, dimensiunile arborilor, structura de vârstă și practicile de gestionare a pădurilor. Datele de descriere a pădurilor provin din al doilea ciclu al inventarului forestier național.

Pentru fiecare parcelă, în funcție de compoziție, vârstă și practicile de gestionare, un model prezice evoluția vârstei, dimensiunii și creșterii arborilor. Condițiile climatice viitoare sunt, de asemenea, integrate pentru a estima creșterea și pentru a identifica speciile cele mai potrivite pentru aceste noi condiții. În timpul gestionării arborilor, în funcție de tipul funcțional și de modul de gestionare local descris de inventarul național, noii arbori sunt incluși (recruitment) conform diferitelor scenarii de dispersie. Modelul ia în considerare, de asemenea, mortalitatea cauzată de incompatibilitatea speciilor cu noile condiții, pe baza anumitor ipoteze.

Astfel, modelul își propune să combine informațiile despre structura actuală a pădurilor cu proiecțiile climatice viitoare, care vor duce la înlocuirea unor specii cu altele, mai bine adaptate, pentru a evalua impactul asupra evoluției stocului la scară largă.

2.4.2 Dezvoltarea și implementarea unui model predictiv pentru evoluția compoziției speciilor și consecințele asupra stocului

Modelele de distribuție prezic în unanimitate schimbări majore în compoziția speciilor forestiere din România. Indiferent de scenariul climatic, cele mai multe specii dominante actuale, care formează elementul de bază al multor ecosisteme, vor suferi modificări importante în arealul lor de distribuție.

Predicția acestor schimbări și impactul asupra stocului ține cont de mai mulți parametri influențați de modelele climatice. Structura de vârstă este un factor esențial, deoarece influențează momentul exploatării pădurilor. În funcție de această dată, arborii nou integrați pot modifica compoziția viitoare a ecosistemelor. În timpul exploatării, compoziția poate fi actualizată pentru a reflecta mai bine speciile cele mai bine adaptate la noile condiții climatice.

Schimbarea compoziției poate avea loc în mod pasiv, bazându-se exclusiv pe speciile deja existente la nivel local. Totuși, această dependență limitează adaptarea, deoarece speciile cele mai bine adaptate la viitoarele condiții climatice sunt, în general, absente sau situate la distanță mare față de locurile unde ar trebui introduse. Într-o gestionare adaptativă, speciile potrivite la climatul viitor sunt introduse și concurează cu speciile locale. Alegerea speciilor depinde aici de cunoașterea cerințelor lor ecologice. Modelele de distribuție permit propunerea celor mai bune opțiuni, identificând speciile compatibile cu fiecare sit și scenariu climatic.

Două modele de dispersie sunt utilizate în simulări. Primul este un model foarte optimist, bazat pe o gestionare proactivă, în care speciile cele mai bine adaptate sunt introduse activ în ecosistem. Această abordare permite includerea unui număr mare de specii în regenerare, fără interacțiune cu speciile deja existente, și se bazează pe plantații sau semințe. Deși această abordare este oarecum utopică, ea arată ce s-ar putea obține în cel mai favorabil caz.

Cealaltă abordare, mai moderată, se bazează pe modelul de migrație MigClim (Engler și Guisan 2009), care diferențiază habitatele compatibile de cele colonizabile. Modelul ia în considerare atât scenariile climatice, cât și fragmentarea pădurilor la nivel de peisaj.

Un alt factor cheie în dinamica populațiilor de arbori este mortalitatea, care poate deveni semnificativă când o specie nu mai este compatibilă climatic. Scenariul climatic are aici un impact clar. După cum au arătat simulările modelului LandClim, dispariția speciilor necompatibile este treptată în scenariul RCP4.5, deși

intensă, în timp ce în scenariul RCP8.5 extinderea zonelor afectate de temperaturi extreme și deficit de apă crește rapid după 2050. Această mortalitate este dificil de evaluat cu precizie, dar au fost observate cazuri de mortalitate masivă, demonstrând că suprafețe mari pot fi afectate într-un termen relativ scurt de timp. De asemenea, vârsta arborilor poate juca un rol important, deoarece arborii tineri sunt adesea mai rezistenți la extremele climatice, ceea ce le reduce mortalitatea în perioadele de criză. Deși pragurile de vârstă sunt dificil de stabilit, este probabil ca arborii maturi, în timpul episoadelor climatice extreme, să fie cei mai afectați. Pragul de mortalitate a fost stabilit aici la 80 de ani, vârstă la care arborii nu mai beneficiază de etapa de rărire și sunt lăsați să crească în vederea recoltării, conform inventarului forestier național. Ultimul parametru, creșterea arborilor vii trebuie modelată și trebuie să depindă de condițiile de creștere. Aici modelarea este un model macroscopic de creștere, reprezentând o creștere netă, excluzând auto-răirirea. Predicțiile sunt foarte dificile, deoarece trebuie să reflecte compoziția, structura pe clase de vârstă sau mărime a arborilor și adaptabilitatea la schimbările climatice. Abordările euristice au făcut recent progrese semnificative datorită progreselor în algoritmi de învățare automată. Construirea unui model de creștere la nivel de arboret cu atât de mulți factori conform abordărilor convenționale nu este posibilă pentru toate speciile, deoarece, în afară de cele prezente în multe locuri, dimensiunea eșantioanelor de ajustare rămâne prea mică în raport cu numărul de factori care trebuie incluși, fără a mai ține cont de interacțiunile acestora. Învățarea automată este de un interes deosebit aici, deoarece face posibilă abordarea în masă a tuturor situațiilor și luarea în considerare a interacțiunilor din spațiul multidimensional. Prin urmare, această abordare a fost favorizată aici. Mai mult, datorită naturii sale intrinsec iterative, oferă în mod spontan o estimare a incertitudinilor de predicție.

Scenariile climatice sunt folosite pentru a determina clima viitoare în orice locație din pădure. Valorile parametrilor climatici esențiali sunt modificate la fiecare dintre datele de predicție, adică 2050 și 2070. Prin urmare, compatibilitatea este evaluată în fiecare deceniu pentru fiecare scenariu climatic, iar consecințele asupra mortalității și creșterii sunt evaluate ținând seama de compoziția arboretului la acea dată, de vârsta acestuia și de structura arboretului.

2.4.3 Propagarea erorilor

Modelul include patru surse de erori. Prima este legată de compoziția speciilor, care este rezultatul compoziției actuale, a fluxurilor demografice, cum ar fi recrutarea și mortalitatea. Mortalitatea este în sine un proces care arată o mare parte a stocasticității, dar evenimentele majore (perturbări la scară foarte mare) nu au fost reprezentate aici. A treia sursă este incrementalitatea, fiind un proces pentru care abordarea de învățare automată oferă o estimare a incertitudinilor. Ultima sursă este clima însăși, care în plus condiționează toate procesele demografice și creșterea.

Integrarea erorilor presupune propagarea de la o etapă de calcul la alta și un model de propagare. Partea de incertitudine legată de climă a fost discretizată și este reprezentată de diferitele scenarii climatice în sine. Pentru a limita gama de posibilități, având în vedere că există aproximativ douăzeci de modele de proiecție climatică bazate pe scenarii RCP, o practică obișnuită este calcularea mediei predicțiilor din mai multe modele.

În același mod, incertitudinea privind recrutarea copacilor din dispersie poate fi discretizată prin efectuarea predicțiilor celor două modele de dispersie incluse separat (modelul de dispersie completă și modelul de dispersie controlată mai moderat).

2.4.4 Estimarea dinamicii serviciilor ecosistemice

Am folosit abordarea bazată pe definiția unui prag dezvoltată de Gamfeldt et al. (2008) pentru a calcula multifuncționalitatea ecosistemului la fiecare grafic de inventar, pe scenariu climatic și model de dispersie, folosind valorile prezise ale funcțiilor ecosistemului. Pragul este calibrat la România, cu toate tipurile de păduri și tipurile de management fuzionate. Multifuncționalitatea la nivel de ecosistem a fost definită ca numărul de funcții ecosistemice cu niveluri peste pragul de 50% din valoarea maximă medie găsită pentru acea funcție. Valoarea maximă a mediei a fost estimată după eliminarea a 3% dintre valorile cele mai mari observate pe setul complet de suprafețe de probă, pentru a evita influența valorilor aberante. Funcțiile

ecosistemice au fost ponderate, urmând metoda propusă de Van der Plaas et al. (2018). Măsurile de reglare a climei au primit o pondere de 1, variabilele de sechestrare a carbonului au primit și ele o pondere de 1, în timp ce alte măsuri au primit o pondere de 0,25.

2.4.5 Rezultatele generale și evoluția diferită a dinamicii speciilor

Rezultatele la nivel de țară arată o creștere lentă a volumelor până în 2040, urmată de o scădere abruptă, influențată de scenariile climatice și de dispersie (Fig. 6). Toate scenariile sugerează că stocurile pot continua să crească moderat până în 2040, după care se preconizează o scădere severă, de aproximativ 40%, fără o recuperare semnificativă ulterior. Această dinamică este îngrijorătoare, deoarece modelele de dispersie utilizate favorizează stabilirea speciilor teoretic bine adaptate la climatul viitor. Pentru unele specii, precum fagul, declinul stocului începe chiar din perioada 2030-2040 (Fig. 7).

Erorile de estimare sunt în general ridicate și cresc în timp, dar nu maschează tendințele foarte diferite între specii.

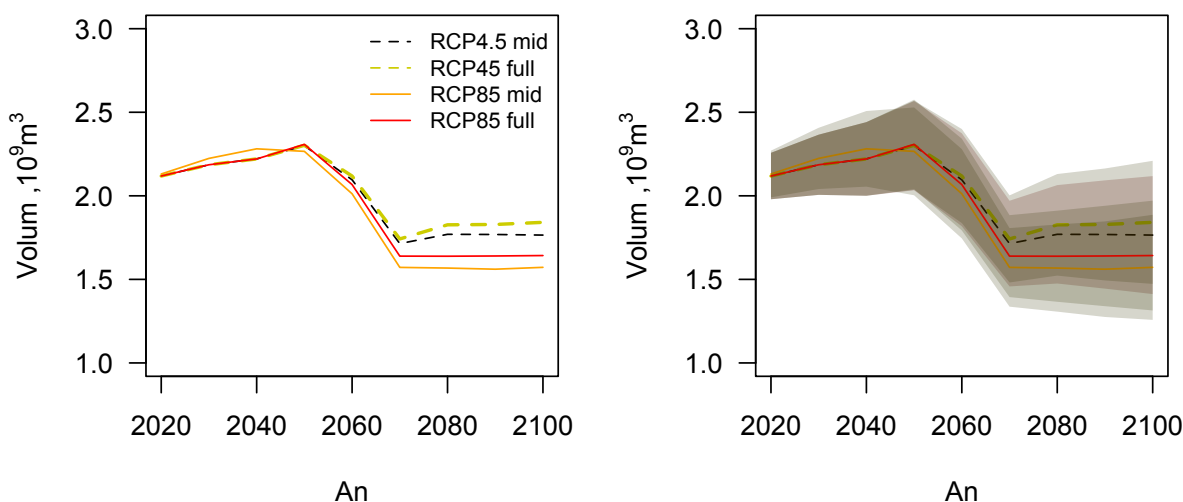


Fig. 6. Evoluția stocului de lemn pe picior în funcție de scenariul climatic (RCP4.5 sau RCP 8.5) și de modelul de dispersie a speciilor (modelul moderat MigClim vs full dispersion).

Dezechilibrul între clasele de vârstă

Este important de menționat faptul că pădurile au, în prezent, o distribuție a claselor de vârstă neomogenă cu predominantă a arborilor relativ tineri și un vârf la clasa 60-80 de ani. Această categorie va ajunge la vârsta exploatabilă în perioada 2040-2060, ceea ce va determina un val de recolte care se va suprapune cu efectul presiunii schimbărilor climatice, care vor atinge fie un maxim în 2050, fie vor continua să se intensifice. Temperaturile și deficitul de apă vor fi considerabil mai mari decât în prezent. Prima consecință va fi o reducere semnificativă a stocului, atât prin exploatare, cât și prin mortalitatea arborilor rămași, care încă nu au atins vârsta exploatabilă. Proporția arboretelor în strictă protecție (tipul funcțional 1) rămâne constantă, similară cu proporția actuală.

Combinăția dintre exploatarea normală a arborilor ajunși la maturitate cu agravarea condițiilor de creștere explică scăderea considerabilă a stocurilor în intervalul 2040-2050.

O dinamică diferită a speciilor

Pentru principala specie de foioase, fagul, diminuarea stocului începe mai devreme decât la alte specii, încă din 2030, și continuă până în 2070, cu o scădere de aproximativ 30-42%. În scenariile climatice RCP4.5, stocurile par să se stabilizeze treptat după 2070. La molid, dinamica este similară cu cea a fagului, înregistrând o scădere marcată din 2030, dar după 2070 se observă o stabilizare pentru scenariul RCP4.5, în timp ce în RCP8.5 stocurile continuă să scadă. Scenariul RCP8.5, care anticipează o creștere continuă a

temperaturilor până în 2100, indică o reducere graduală a compatibilității climatice, pe măsură ce majoritatea arboretelor neadaptate vor dispărea, iar arboretele cu o distribuție marginală vor persista.

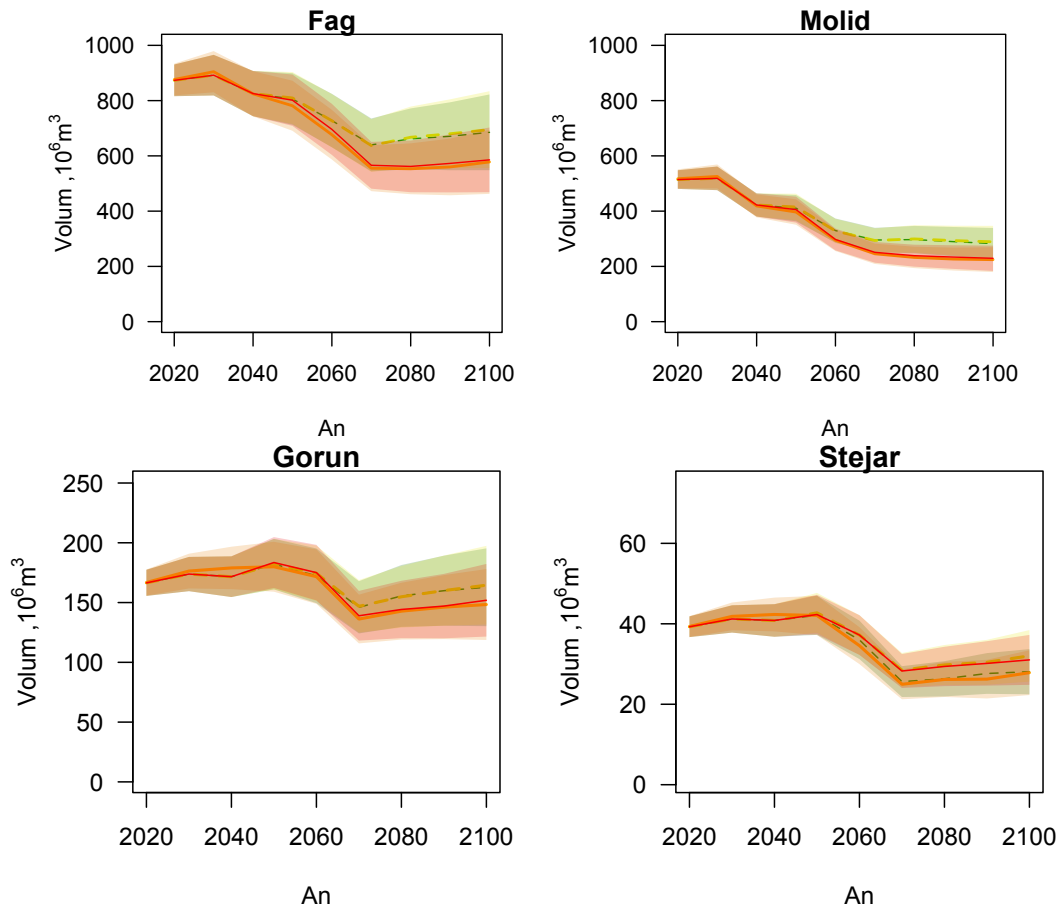


Fig. 7. Evoluția stocului de lemn pe picior în funcție de scenariul climatic (RCP4.5 sau RCP8.5) și de modelul de dispersie a speciilor (modelul moderat MigClim vs full dispersion) pentru 4 specii principale.

Gorunul prezintă o stabilitate interesantă a stocurilor până în 2050, cu o scădere între 2040 și 2070, urmată de o perioadă de stabilitate. În 2100, scăderea totală a stocului rămâne semnificativă, între 21-35%, în funcție de scenariu. Stejarul pedunculat are o dinamică mai robustă, cu o scădere puternică în 2070, dar urmată de o recuperare importantă, aproape identică în toate scenariile, de bună augur pentru această specie. Salcâmul, spre deosebire de celelalte specii, înregistrează o creștere a stocurilor în toate scenariile. Această creștere este însă neregulată și include o scădere temporară între 2060-2070. În ciuda acestei scăderi, nivelul stocurilor rămâne mai mare decât în prezent și se stabilizează ulterior. Interesant este că scenariile climatice nu par să influențeze dinamica stocurilor pentru această specie, similar cu situația stejarului pedunculat, însă într-un mod încă și mai afirmat. De asemenea, modelele de dispersie nu influențează evoluția stocurilor, ceea ce sugerează că salcâmul va rămâne o specie importantă și rezistentă la schimbările climatice, chiar și în scenariul RCP8.5, cu o creștere medie a stocurilor între 1 și 8%.

Carpenul rămâne o specie cu o importanță economică și ecologică ridicată, care va avea o creștere potențială foarte marcată a volumului în viitor în toate scenariile climatice, ocupând locul patru în clasamentul stocurilor în 2100.

Tabel 6. Evoluția stocurilor (m3) în raport cu stocul actual pentru speciile principale în România, în funcție de scenariul climatic și de modelul de dispersie, varianta full-dispersal fiind utopică.

Specia	RCP4.5		RCP85	
	Mid-dispersal	Full dispersal	Mid-dispersal	Full dispersal
Brad	-8,49	-6,41	-24,38	-22,50
Molid	-41,47	-40,14	-53,53	-52,50
Fag	-31,42	-30,44	-42,15	-41,40
Cer	-30,72	-30,64	-36,65	-37,16
Gorun	+33,59	+35,03	+21,74	+24,68
Stejar	-4,12	+9,34	-4,95	+5,91
Carpen	+188,37	+193,12	+175,46	+182,75
Frasin	+57,59	+76,86	+43,26	+63,71
Paltin	+223,35	+231,74	+188,90	+194,36
Salcâm	-1,45	+6,47	-7,68	+7,92
Tei pucios	+12,52	+22,30	+13,65	+16,13

2.4.6 Evoluția serviciilor ecosistemice

Pădurile furnizează numeroase servicii societăților umane, cum ar fi aprovizionarea cu materiale lemnoase și nelemnoase, dar și stocarea carbonului în biomasa arborilor și în sol pe o perioadă lungă de timp. Aceste contribuții sunt strâns legate de capacitatea productivă a arborilor de a absorbi CO₂ atmosferic și de a-l transforma în biomasă lemnoasă prin fotosinteză. Pe tema această a fost dat spre evaluare un articol ISI într-o revistă specializată împreună cu o echipă de cercetători cu înaltă recunoaștere internațională : <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2024-3092/>.

Pentru înțelegerea valorilor ecosistemice a speciilor de arbori din pădurea temperată, mai multe surse discută contribuțiile diferite ale speciilor de arbori la serviciile ecosistemice, cum ar fi captarea carbonului, purificarea aerului, îmbogățirea solului și asigurarea habitatului. Această capacitate a fost analizată prin intermediul funcțiilor principale : densitatea lemnului, biomasa, înălțimea și producția, care sunt trăsăturile fundamentale ale speciilor de arbori forestiere.

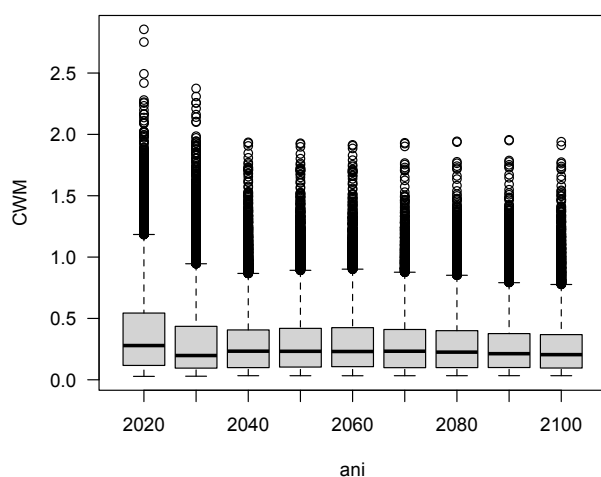


Fig. 8. Evoluția indicelui de multifuncționalitate la nivel de România.

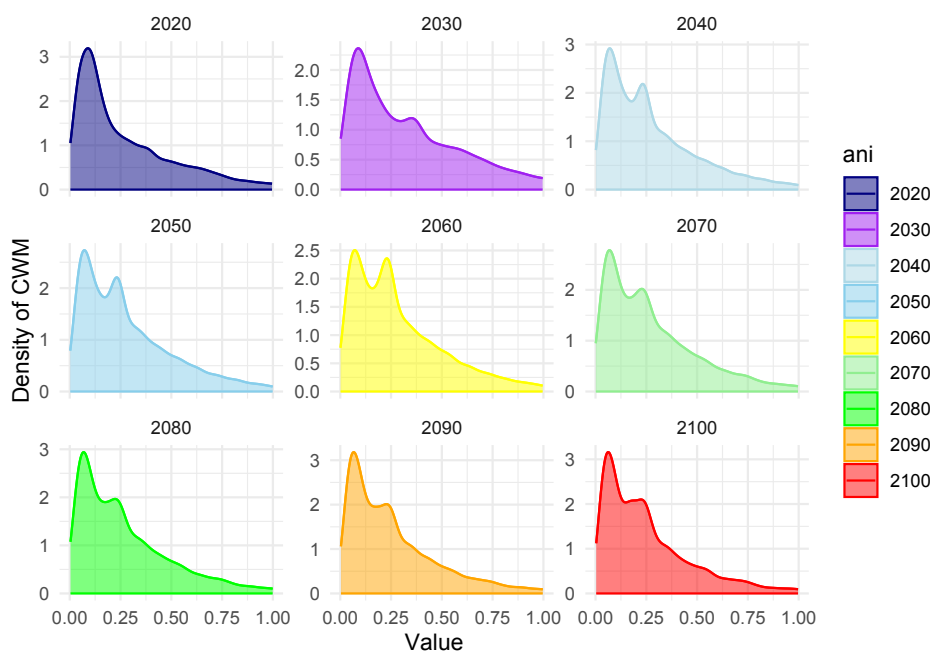


Fig. 9. Evoluția indicelui de multifuncționalitate sintetic al pădurilor la nivel de țară (CWM), pentru perioada 2020-2100 și scenariul climatic RCP4.5 cu modelul de dispersie MigClim.

Din calculele realizate în baza scenariilor climatice RCP4.5 și RCP8.5, evoluția serviciilor ecosistemice ale pădurilor prezintă o ușoară descreștere în primele decade (până în 2040) dar este destul de stabilă (Fig. 8, în care este prezentat CWM adică community weighted multifunctionality index). Având în vedere schimbările de compoziție prevăzute, această stabilitate este o veste bună și poate fi explicată prin mai mulți factori :

- descreșterea proporției rășinoaselor, și deci creșterea ponderii foioaselor, mai ales în zona de deal;
- înlocuirea arboretele monospecifice cu arborete amestecate;
- diversificarea structurii în general, cu apariția unor arborete mai tinere.

Se poate observa dezvoltarea unui al doilea maxim al CWM în intervalul [0.1, 0.3], care este absent în prezent. Acest al doilea maxim al CWM este datorat pădurilor bătrâne, cu vârsta peste 100 de ani. Aceste păduri contribuie foarte mult la multifuncționalitatea globală, prin stocare de biomasă, diversitate structurală, prin capacitatea ridicată de a asigura o diversitate de habitate. În scenariul RCP8.5, o mortalitate mai importantă a acestor arborete induce o atenuare marcată a acestui al doilea maxim.

Sunt cel puțin două necunoscute în aceste simulări : una este legată de mortalitatea arborilor din cauza nepotrivirii climatice, altă este intensitatea și frecvența evenimentelor de tip doborâturi de vânt, care pot distruge arboretele bătrâne pe suprafețe mari. Astfel de perturbări mijlocii și mari ar afecta și multifuncționalitatea pădurilor. Timpul necesar pentru a reveni la starea de masiv va depinde foarte mult de prezența unor arbori seminceri în apropiere. Pe lângă necesitatea de a constitui rezerve (insule de îmbătrânire), această perspectivă subliniază necesitatea de a constitui urgent rezerve/rezervații de semințe. Sprijinirea și asistarea tranziției către arboretele forestiere mai bine adaptate la schimbările climatice necesită o bună înțelegere a capacității pădurilor de a se adapta la tendințele climatice. Analizele genetice oferă o perspectivă prin identificarea caracteristicilor genetice care pot diferenția proveniențele care sunt deja adaptate în condiții climatice mai dure. Analizele comparative pe plantații permit compararea comportamentului diferitelor proveniențe atunci când acestea sunt supuse unui climat diferit de cel al zonei lor de origine. Astfel de experiențe lipsesc în România în prezent, deși au existat eforturi în trecut destul de însemnate, și subliniem aici interesul lor foarte mare în contextul schimbărilor climatice. Ca parte a

proiectului, colaborarea cu cercetătorii canadieni a contribuit la analiza datelor comparative privind cele mai importante specii din Canada. Analizând inelele copacilor și datele genetice de la 62 de populații plantate în patru locații comune din Canada, am descoperit că populațiile cu istorii postglaciare variate vor răspunde diferit la schimbările climatice, impactând creșterea lor viitoare și potențialul de sechestrare a carbonului. Înțelegerea acestor diferențe genetice este crucială pentru proiectarea cu precizie a răspunsului speciei la schimbările climatice.

2.4.7 Gradul de realizare

Comparația dintre modelele globale și modelul LandClim care funcționează la o scară mult mai fină a demonstrat concordanța predicțiilor, în ciuda faptului că mecanismele reproduse în modele sunt foarte diferite. Chiar dacă predicțiile modelelor sunt total independente și se bazează pe un set diferit de procese, aceste modele au propus predicții foarte asemănătoare, ceea ce sugerează o robustețe a predicțiilor și subliniază dominația factorilor climatici.

Pe pagina proiectului poate fi consultată evoluția arealului de compatibilitate a speciilor pentru toate scenariile climatice și variantele modelelor climatice (pesimist/mediu/optimist) care arată impactul incertitudinilor asupra estimarea arealului. Astfel, incertitudinile pot fi luate în seama pentru deciziile cu privire la alegerea speciilor cele mai adaptate în viitor. Pagina se află la linkul: https://usv.ro/fisiere_utilizator/file/SAFEClim/doc/Evolutia%20arealului%20de%20compatibilitate%20climatică%20SAFEClim.pdf.

Patru articole ISI au fost elaborate:

Bouriaud et al. 2023, în evaluare : <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2024-3092/>

Robert et al. 2024, publicat : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/gcb.17347>

Coșofreț C., Bouriaud L., Costa M., Bouriaud O. Comparing the efficiency of forest mitigation strategies: climate change and windthrow as overarching drivers. *Landscape Ecology*.

Herzog L., Piedallu C., Lebourgeois F., Bouriaud O., Bontemps J.-D. Climate change is leading to a turning point in productivity in western European forests. *Science of the Total Environment*.

2.5 O4- Perspective ale managementului adaptativ sau conservator al pădurilor.

Prin cercetările din cadrul proiectului am demonstrat amploarea schimbărilor de compoziție de specii care pot interveni într-un viitor apropiat din cauza schimbărilor climatice. Am identificat speciile cele mai afectate de aceste schimbări, care vor suferi în urma modificărilor habitatului lor bioclimatic, având în vedere toleranța lor specifică. Deoarece aceste schimbări vor impacta speciile principale în mai multe zone, impactul global al schimbărilor climatice se va traduce printr-o scădere marcată a volumului de lemn din pădurile României după anii 2040. Magnitudinea scăderii va fi influențată de schimbarea climatică propriu zisă în primul rând, și de măsuri de ajutorare a înlocuirii speciilor cu alte specii mai bine adaptate condițiilor viitoare.

Așadar aceste rezultate au subliniat importanța unor politici și măsuri țintite în practica regenerării pădurilor și a migrației arborilor care trebuie acompaniată - sau chiar anticipată și accelerată- pentru a reduce din efectele negative ale schimbărilor climatice.

Scopul managementului forestier în condițiile de stres climatic constă în :

- identificarea speciilor vulnerabile, vulnerabilitate care depinde de condițiile locale având în vedere variabilitatea spațială a manifestării schimbărilor climatice;
- favorizarea instalării unor specii mai bine adaptate condițiilor climatice viitoare;
- creșterea rezilienței și sporirea furnizării serviciilor ecosistemice ale pădurilor, mai ales prin ocrotirea pădurilor bătrâne care au depășit 100 de ani și care nu prezintă semne de debilitare de amploare ;
- compensarea dispariției speciilor vulnerabile în zonele cele mai afectate.

Prin aceste măsuri se poate atenua într-o oarecare măsură efectul schimbărilor climatice. Din simulările realizate la nivele spațiale diferite (i.e., național și regional), managementul nu poate să evite dispariția speciilor care vor ieși din zonele lor de compatibilitate climatică. Însă, managementul poate să atenueze ritmul de scădere a stocului printr-o serie de măsuri care sunt sugerate de rezultatele analizelor proiectului.

Aceste măsuri sunt :

- sporirea diversității speciilor : sporirea și ocrotirea diversității speciilor are scopul de a asigura o producere de semințe din toate speciile, și de a constitui bănci de unde se va produce selecția naturală. O dată dispărută dintr-o anumite regiune, o specie nu mai poate să revină sau revine doar dacă migrația ei este asistată. Dar migrația asistată oricum cere existența unor bănci de semințe așa că asigurarea producerii de semințe este obligatorie.

- examinarea potrivirii tipului natural fundamental : tipul natural fundamental a fost un principiu foarte bine păstrat în amenajamentului silvic, și care reprezintă un principiu foarte precaut și eficient. Acest principiu va fi pus sub semnul întrebării și va trebui reexaminat prin prisma schimbărilor climatice. Analiza derivelor locale (succesiuni care deviază de la tipul natural fundamental de pădure) va fi un prim pas, căci semne există deja un proces de migrație a speciilor forestiere. Va fi necesar ca amenajamentul forestier, în punerea lui în aplicare, să aibă în vedere posibilitatea de a schimba tipul natural fundamental deoarece derivate locale pot fi în același timp un semn de gestionare necorespunzătoare, dar și un semn al presiunii climatice.

- ocrotirea arborilor de valoare : identificarea arborilor seminceri va reprezenta o activitate importantă pentru a spori capacitatea de aprovizionare în semințe. Cererea de semințe va crește ca rezultat al nevoilor de regenerare sporite, dar condițiile climatice nu vor fi favorabile producerii și nici supraviețuirii puieților. Totodată, trebuie subliniat faptul că speciile pioniere vor fi dintre cele care vor suferi cel mai mult în urma încălzirii. Astfel, terenuri goale din pădure nu vor putea fi împădurite în mod spontan în scenariile mai severe.

- gestionarea dezechilibrului pe clase de vârstă a arborilor : pe de o parte, reînnoirea pădurilor bătrâne după exploatarea lor este cea mai bună ocazie de a da posibilitatea compoziției să se schimbe către o compoziție mai compatibilă, în pas cu schimbări ale regimului de precipitații sau de temperatură. Pe de altă parte, aceste păduri oferă un nivel foarte ridicat de servicii, spre exemplu ocrotirea unor habitate care vor fi amenințate în alte zone. Constituirea unor insule de îmbătrânire ar permite o tranziție mai progresivă către un arboret potențial diferit din punct de vedere al compoziției și structurii.

- lupta împotriva fragmentării peisajului : migrația arborilor va fi un element esențial în atenuarea efectelor schimbărilor climatice prin populare cu arbori de specii diferite și diversificarea compoziției. Pentru aceasta este nevoie de conectarea pe scară cât mai largă a habitatelor forestiere.

2.5.1 Gradul de realizare

În cadrul acestei activități au avut loc foarte multe activități de comunicare/ diseminare, asigurându-se legăturile de cercetare necesare cu un alt proiect internațional care va valorifica în continuare rezultatele obținute de proiectul SAFECLIM.

Un articol este un curs de dezvoltare, cuantificând impactul măsurilor de conservare implementate în amenajamentului forestier asupra biodiversității și mai ales a diversității structurale a pădurilor la nivel de țară. Articolul compară eficiența tipurilor funcționale folosite în sistemul tehnic din România din punctul de vedere al diversității pe care o asigură.

3 Indicatori de rezultat

Articole ISI publicate

- Palaghianu C., Coșofreț C. 2023. Patterns of forest species association in a broadleaf forest in Romania. *Forests*, 14(6), 1118. <https://doi.org/10.3390/f14061118>
- Petrișan C., Mihăilă V., Yuste J.G., Bouriaud O., Petrișan A.M. 2023. Deadwood density, C stocks and their controlling factors in a beech-silver fir mixed virgin European forest. *For Ecol Manage* 539(1): 121007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121007>
- Bouriaud O., Brion P., Chauvet G., Duong T., Pulkkinen M. 2024. The weight share method in forest inventories: refining the relation between points and trees. *Can J For Res* 54(10). <https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0007>
- Robert, E., Lenz, P., Bergeron, Y., de Lafontaine, G., Bouriaud, O., Isabel, N., & Girardin, M. P. (2024). Future carbon sequestration potential in a widespread transcontinental boreal tree species: Standing genetic variation matters! *Global Change Biology*, 30(6), e17347. <https://doi.org/10.1111/gcb.17347>

Articole ISI în evaluare

- Bouriaud O., Schulze E.-D., Gregor K., Bourkhris I., Högberg P., Irslinger R., Papastefanou P., Pongratz J., Rammig A., Valentini R., Körner C. Saturating response of photosynthesis to increasing leaf area index allows selective harvest of trees without affecting forest productivity. *Biogeosciences*. <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2024-3092/> (acest articol a fost trimis într-o formă inițială la *journalul Global Biogeochemical Cycles*).
- Dănilă I.C., Coșofreț C., Bouriaud O. Optimizing tree sampling for biomass model fitting using a terrestrial laser scanner (TLS). *Forest Ecosystems*. (acest articol a fost trimis inițial la *journalul Biomass and Bioenergy*).
- Coșofreț C., Bouriaud L., Costa M., Bouriaud O. Comparing the efficiency of forest mitigation strategies: climate change and windthrow as overarching drivers. *Landscape Ecology*.
- Herzog L., Piedallu C., Lebourgeois F., Bouriaud O., Bontemps J.-D. Climate change is leading to a turning point in productivity in western European forests. *Science of the Total Environment*.

Conferințe internaționale

Coșofreț C., Bouriaud O., Bouriaud L.: Comparing the efficiency of forest mitigation strategies on carbon sequestration, 6th Edition of the International Conference “Integrated Management of Environmental Resources”, Suceava, Romania, 23-24 November 2023 (oral presentation)

Coșofreț, C., Palaghianu, C., Talpă, N., Savin, A., Bouriaud, L., Bouriaud, O.: Climate change effects on tree species composition in the Southern region of the Republic of Moldova, 11th International symposium on forest and sustainable development, Brașov, Romania, 17-18 October 2024 (oral presentation, cu proceedings)

Coșofreț C., Bouriaud O., Bouriaud L. Comparing the efficiency of forest mitigation policies: Is sequestering more efficient than using wood? EGU 2024, Vienna, Austria, 14–19 April 2024 2024/3/7. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU24/EGU24-5483.html>

Promovarea audiovizuală și în cadrul întâlnirilor de lucru cu mediul profesional sau decizional

„Plantăm fapte bune în România” animată de dl. dr. ing. Mihai Enescu, vizibilă pe Youtube la: <https://youtu.be/uIVzSThSDHo>

1.06 – 1.06 Moinești : Activități de diseminare și vizită în teren: Care sunt riscurile schimbărilor climatice, Ocolul silvic Moinești și Ocolul silvic Zeletin, Direcția silvică Bacău, 10 participanți specialiști silvici.

4.06-5.06 Oradea, Ocolul Silvic Sfanta Maria: Impactul schimbărilor climatice asupra pădurilor României, Autori: Laura Bouriaud, Olivier Bouriaud, Cosmin Coșofreț, eveniment profesional cu 40 de participanți.

21.03.2024: Bucuresti, Eveniment ‘Uniti pentru păduri – dialog și acțiune’, Palatul Parlamentului, București. Prezentare efectul schimbărilor climatice, eveniment de conștientizare, 21 participanți, societate civilă, ONG-uri și studenți.

Panel Illegal logging and trade, 24th Annual Conference of the European Society of Criminology, 11-14.09.2024, Bucharest. Forest crime in Romania: policing, criminalisation and ecojustice. Eveniment de tip diseminare/workshop de analiză a efectului tăierilor ilegale asupra posibilității de adaptare a pădurilor la schimbările climatice. 4 paneliști și 18 participanți cercetători din străinătate.

4 Impactul estimat al rezultatelor obținute

Proiectul SAFEClim a produs hărți importante ale distribuției speciilor într-o varietate de scenarii privind schimbările climatice, utilizând un model robust de predicție calibrat cu date noi din România. Predicțiile au integrat sursele de eroare legate de incertitudinile climatului viitor în sine. Compararea predicțiilor cu alte modele a evidențiat concordanța între modele, ceea ce sugerează un anumit grad de robustețe în aceste predicții. Pe baza stării actuale a pădurilor din România și a distribuției viitoare prognozate a speciilor, proiectul a construit o serie de estimări privind evoluția stocurilor de lemn. De asemenea, a fost evaluată evoluția multifuncționalității pădurii, care este ecoul dinamicii stocurilor forestiere, și care a arătat un grad mai mare de reziliență decât dinamica stocurilor de lemn.

Aceste rezultate sunt esențiale pentru formularea unor politici forestiere la nivel național menite să crească reziliența pădurilor la schimbările climatice. Estimările cantitative realizate în cadrul proiectelor oferă orientări pentru adaptarea gestionării pădurilor la provocările majore pe care le generează schimbările climatice. Acestea oferă răspunsuri la numeroasele necunoscute cu care se vor confrunta administratorii, care sunt deja declanșate de numeroasele semne importante de suferință pe care pădurile le-au arătat în ultima vreme.

Hărțile generate în cadrul proiectului sunt de mare relevanță pentru administratorii de păduri. Deoarece au fost produse atât pentru variantele optimiste, pesimiste și mediane ale scenariilor climatice, acestea oferă o imagine de ansamblu a incertitudinilor actuale legate de comportamentul arborilor forestieri și de răspunsul acestora la schimbările climatice. **Hărțile pot fi folosite ca instrumente primare pentru planificarea gestionării pădurilor, deoarece arată speciile care sunt cele mai expuse riscului în viitor. De asemenea, acestea oferă informații cu privire la grupul de specii care vor fi cele mai potrivite pentru noile condiții de creștere din viitor. Ca atare, aceste hărți pot ghida alegerea compoziției speciilor, a speciilor care ar putea fi introduse pentru a asigura o creștere continuă a pădurilor și furnizarea susținută de servicii ecosistemice.**

Astfel, pe lângă realizările științifice, care sunt încă în mare parte în curs de desfășurare, cu 3 articole în curs de revizuire, alte 2 articole fiind pregătite cu membrii proiectului ca autori principali, proiectul a avut un mare succes în comunicarea rezultatelor sale către practicienii din domeniul gestionării pădurilor și către minister, care este interesat de rezultatele acestui studiu pentru propria sa strategie de adaptare la schimbările climatice. Baza de date care cuprinde un număr mare de arbori scanați constituie un material ideal pentru activități didactice cu studenții, fiind utilizabilă imediat în exerciții orientate spre efortul de digitalizare a sectorului forestier.

În cele din urmă, proiectul a reușit, de asemenea, să stabilească colaborări fructuoase cu mai multe grupuri de cercetare importante și renumite din străinătate, fapt reflectat de diversitatea grupurilor

prezente în rândul coautorilor publicațiilor. În ceea ce privește aspectele legate de ciclul carbonului, putem cita : Max Plank Institute of Biogeochemical Cycles (Jena, Germania), Universitatea Tehnică din München; în ceea ce privește modelarea la scară regională cu interacțiuni de gestionare : ETH Politehnica Zürich, Elveția; în ceea ce privește modelarea la scară globală a habitatului climatic al speciilor: ONF Research and Development, Franța; în ceea ce privește migrația și adaptarea speciilor: Natural Resources Canada, Université de Montréal, Canada.

Referințe bibliografice

- Baeten, L., Verheyen, K., Wirth, C., Bruelheide, H., Bussotti, F., Finér, L., ... & Scherer-Lorenzen, M. (2013). A novel comparative research platform designed to determine the functional significance of tree species diversity in European forests. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 15(5), 281-291.
- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert, C. H., & Thuiller, W. (2012). Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many?. *Methods in ecology and evolution*, 3(2), 327-338.
- Chakraborty, D., Móricz, N., Rasztoivts, E., Dobor, L., & Schueler, S. (2021). Provisioning forest and conservation science with high-resolution maps of potential distribution of major European tree species under climate change. *Annals of Forest Science*, 78(2), 1-18.
- Cohen, Jacob (1960). "A coefficient of agreement for nominal scales". *Educational and Psychological Measurement*. 20 (1): 37–46. [doi:10.1177/001316446002000104](https://doi.org/10.1177/001316446002000104)
- Coșofreț, C., Barnoaiea, I., Scriban, R. E., Dănilă, I. C., Duduman, M. L., & Bouriaud, O. (2018). TLS in forest inventories: methodology and precautions.
- Engler, R., & Guisan, A. (2009). MigClim: predicting plant distribution and dispersal in a changing climate. *Diversity and distributions*, 15(4), 590-601.
- Essl, F., García-Rodríguez, A., Lenzner, B., Alexander, J. M., Capinha, C., Gaüzère, P., ... & Dullinger, S. (2024). Potential sources of time lags in calibrating species distribution models. *Journal of Biogeography*, 51(1), 89-102.
- Gamfeldt, L., Hillebrand, H., & Jonsson, P. R. (2008). Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning. *Ecology*, 89(5), 1223-1231.
- Mauri, A., Girardello, M., Strona, G., Beck, P. S., Forzieri, G., Caudullo, G., ... & Cescatti, A. (2022). EU-Trees4F, a dataset on the future distribution of European tree species. *Scientific data*, 9(1), 37.
- Moss, R. H., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J. A., ... & Zurek, M. (2008). Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies.
- Pateiro-López, B., & Rodríguez-Casal, A. (2010). Generalizing the convex hull of a sample: the R package alphahull. *Journal of Statistical software*, 34, 1-28.
- Senay, S. D., Worner, S. P., & Ikeda, T. (2013). Novel three-step pseudo-absence selection technique for improved species distribution modelling. *PloS one*, 8(8), e71218.
- Svenning, J. C., & Sandel, B. (2013). Disequilibrium vegetation dynamics under future climate change. *American Journal of Botany*, 100(7), 1266-1286.
- Van der Plas, F., Ratcliffe, S., Ruiz-Benito, P., Scherer-Lorenzen, M., Verheyen, K., Wirth, C., ... & Allan, E. (2018). Continental mapping of forest ecosystem functions reveals a high but unrealised potential for forest multifunctionality. *Ecology letters*, 21(1), 31-42.