Bucovina Forestieră 26(1): 9-19, 2026
DOI: 10.4316/bf.2026.002

Articol de cercetare

Evaluarea stocului de carbon din biomasa forestieră aferentă perdelelor forestiere prin prisma tehnologiei senzorilor multispectrali

C. I. Bragă, Ș. Petrea, E. Mihăilă, G. R. Radu

Bragă C.I., Petrea Ș., Mihăilă E., Radu G.R., 2026. Assessing carbon stocks in forest biomass of shelterbelts through multispectral sensor technology. Bucov. For. 26(1): 9-19.

Abstract. Agroforestry systems, particularly shelterbelts, have gained strategic importance in recent decades, being recognized as essential sustainable practices for both primary production (e.g., timber) and the provision of ecosystem services (e.g., agricultural protection). This study evaluates the feasibility of using vegetation indices (NDVI, GNDVI, EVI, and SAVI) derived from Sentinel-2 satellite data to estimate the aboveground biomass and carbon stock of living trees within shelterbelts. The methodology involved correlating data obtained through terrestrial inventories at four distinct locations in Călărași county with the values of the corresponding multispectral indices. The results highlighted significant variations in carbon stocks among the study location (Welch's ANOVA test, $p < 0.05$), ranging from 11.72 tC ha^{-1} (GRS) to 91.39 tC ha^{-1} (DOM). At the same time, the study reveals a limitation of vegetation indices in the direct estimation of biomass, and implicitly of carbon stocks ($r < 0.40$), as they primarily reflect canopy vigor. In conclusion, although multispectral remote sensing presents constraints in quantifying biomass carbon stocks for such structures (shelterbelts), it remains an effective tool for monitoring the shelterbelts health and can provide decision support within regional development policies.
Keywords: agroforestry systems, carbon stock, Sentinel-2, vegetation indices.
Authors. Cosmin Ion Bragă, Ștefan Petrea (stefan.petrea19@gmail.com), Gheorghe Raul Radu - "Marin Drăcea" National Research-Development Institute in Forestry, Station Brașov, Cloșca 13, 500040, Brașov, România; Ștefan Petrea - Faculty of Silviculture and Forest Engineering, Transilvania University of Brașov, Șirul Beethoven 1, 500123 Brașov, Brașov County, Romania; Elena Mihăilă - "Marin Drăcea" National Research-Development Institute in Forestry, Voluntari 128, 077190, Ilfov, Romania.
Manuscript received April 02, 2026; revised April 17, 2026; accepted April 20, 2026; online first April 20, 2026.

Introducere

Atingerea obiectivelor de atenuare a schimbărilor climatice stabilite în Acordul de la Paris și în Pactul Verde european implică și includerea Sectorului Utilizării Terenurilor, Schimbării Utilizării Terenurilor și a Silviculturii, LULUCF, (Verkerk et al. 2022). După cum

afirmă Grupul Interguvernamental privind Schimbările Climatice (IPCC, 2023), sectorul LULUCF oferă un potențial semnificativ de atenuare a schimbărilor climatice (aproximativ cu 25% reducere a emisiilor, din contribuțiilor la nivel național), pe termen scurt, la un cost relativ redus (Grassi et al. 2017). Totodată, o parte semnificativă a potențialului de atenuare a schimbărilor climatice referitoare la sectorul LULUCF este dată și de vegetația din afara fondului forestier, care reprezintă aproximativ un milion de hectare în România, conform Inventarului Forestier Național (Ciceu et al. 2019). Pe de altă parte, conform Codului Silvic din România, terenurile cu perdele forestiere (de ex., perdele de protecție a căilor de comunicație) sunt incluse în fondul forestier, fiind asimilate pădurilor, restul perdelelor forestiere (de ex., perdele de protecție agricolă), fiind asimilate terenurilor cu folosință agrosilvică (Mihăilă et al. 2024).

Conform analizei globale realizate de Chapman et al. (2020), potențialul maxim al sistemelor agrosilvice de atenuare a schimbărilor climatice la nivel mondial este de 9,4 $GtCO_2eq$ an^{-1}, ceea ce reprezintă o estimare conservatoare, întrucât autorii iau în considerare doar biomasa supraterană. Pe de alta parte, Kay et al. (2019) au estimat potențialul de sechestrare a carbonului pentru o gamă largă de practici agrosilvice din Europa și au constatat că potențialul de sechestrare a carbonului variază între 0,09 și 7,29 $tC\ ha^{-1}\ an^{-1}$. Se estimează că sistemele agrosilvice existente în prezent la nivel mondial (în toate varietățile sale) vor sechestra 1,9 Pg C în următorii 50 de ani, cantitate care ar putea fi crescută și mai mult prin îmbunătățirea ratei de sechestrare a carbonului în cadrul sistemelor actuale și prin conversia utilizărilor terenurilor cu emisii reduse de carbon în sisteme agrosilvice (Cardinael et al. 2021, Jose 2009). Totodată, se poate afirma cu certitudine că există un interes crescut privind cuantificarea stocului de carbon din cadrul sistemelor agrosilvice, întrucât acestea dețin un potențial deloc de neglijat de stocare a carbonului (Király et al. 2024, Mayrinck et al. 2019).

În regiunile temperate, interesul pentru sistemele agrosilvice a crescut în ultimele două decenii, deoarece acestea sunt considerate o practică agricolă durabilă care combină producția primară cu alte servicii ecosistemice (Deng et al. 2024, Pardon et al. 2017) ce poate aduce beneficii atât productivității culturilor agricole, cât și a mijloacelor prin care oamenii își asigură existența (Chapman et al. 2020, Torralba et al. 2016).

Sistemele agrosilvice sunt sisteme de gestionare a utilizării terenurilor în care arborii sunt cultivați în combinație cu culturile agricole sau pășunile, pe același teren (Lasco et al. 2014, Nair 1993). Conform definiției, sistemele agrosilvice reprezintă un ansamblu de sisteme diverse de gestionare a terenurilor care integrează arbori și arbuști cu culturi și/sau animale în spațiu și/sau timp (van Noordwijk et al. 2021, Quandt et al. 2023). În general, cele mai importante tipuri de sisteme agrosilvice pot fi enumerate ca fiind perdelele forestiere, pășunile cu arbori, aliniamentele forestiere în terenuri agricole și gardurile vii perimetrale (Mihăilă et al. 2024, Nerlich et al. 2013). Totodată cele mai reprezentative tipuri de sisteme agrosilvice de la noi din țară sunt reprezentate de perdelele forestiere cu rol de protecție (Mihăilă et al. 2024).

Aceste sisteme pot produce, pe de o parte, hrană și lemn, iar pe de altă parte pot furniza o serie de servicii ecosistemice, precum stocarea carbonului și, implicit, atenuarea schimbărilor climatice (Cardinael et al. 2021, Deng et al. 2024). Carbonul este stocat în biomasa supra și subterană a arborilor, iar transferul de materie organică de la arbori la sol poate crește stocurile de carbon organic din litieră și sol (Cardinael et al. 2017). Pentru ca aceste beneficii să fie valorificate pe termen lung, este necesară o monitorizare periodică și obiectivă a biomasei forestiere (de ex., structura și starea vegetației lemnoase) aferente acestor sisteme agrosilvice (Sharma et al. 2023). Evaluările clasice, bazate exclusiv pe inventarieri de teren, sunt în general costisitoare, consumatoare de timp și dificil de replicat la scară mare, în special pen-

tru obiective alungite, înguste și dispersate în teritoriu, cum sunt perdelele forestiere. Teledetecția multispectrală satelitară (în special misiunea Sentinel-2 a programului Copernicus) pune la dispoziție instrumente moderne pentru cuantificarea stării fiziologice a vegetației (prin indici de vegetație calculați din reflectanțele în benzile roșu, verde, albastru și NIR - infraroșu apropiat), detectarea schimbărilor în timp (degradare, regenerare, perturbări), sau actualizarea bazei de date spațiale și a hărților de vegetație forestieră la rezoluții ridicate (Huete et al. 2002, Zhu et al. 2024).

Prezentul studiu a vizat analiza eficacității unei metodologii operaționale de estimare a stocului de carbon din biomasa perdelelor forestiere, integrând datele de inventariere din teren cu utilizarea sistematică a indicilor de vegetație derivați din produsele satelitare de tip Sentinel-2.

Material și metodă

Localizarea și descrierea studiului

Cercetările au fost desfășurate în patru locații, pe raza județului Călărași, unde au fost amplasate suprafețe experimentale permanente cu o distribuție heterogenă sub raportul vârstei și compoziției, tocmai pentru a surprinde situații diverse în ceea ce privește dezvoltarea vegetației forestiere (Figura 1). Condițiile climatice sunt specifice zonei de silvostepă de câmpie, cu temperatura medie anuală de 11,0 °C, precipitații medii anuale de 470 mm și un indice de ariditate De Martonne cu valoarea de 22,4, caracteristică unui climat cu temperaturi ridicate și deficit de precipitații, mai ales în perioada estivală. Din punct de vedere pedologic, solul se încadrează în tipul cernoziom, subtipul calcaros, așezat pe depozite de loess cu textură mijlocie și permeabilitate ridicată.

În ceea ce privește compoziția speciilor și

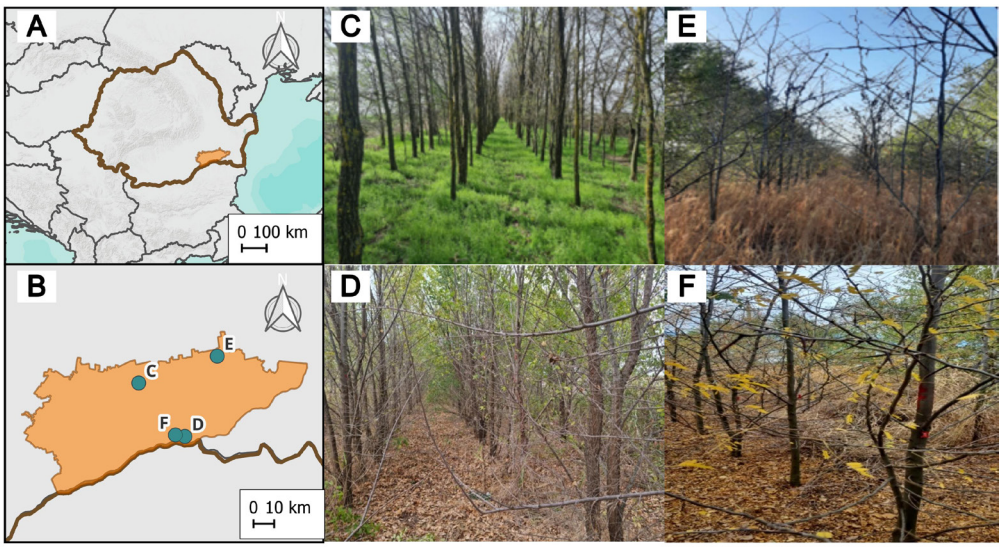


Figura 1 Localizarea zonei de studiu și condițiile reprezentative din teren. (A) Poziția României în Europa, cu evidențierea zonei de studiu din județul Călărași. (B) Harta detaliată a județului Călărași, indicând distribuția locațiilor analizate. (C–F) Fotografii din teren care ilustrează structura arboretelor și condițiile staționale în punctele analizate: (C) Dor Mărunt, (D) Grădiștea STB, (E) Perișoru, (F) Grădiștea ULT.
Location of the study area and representative field conditions. (A) Position of Romania within Europe, with the study area highlighted in Călărași County. (B) Detailed map of Călărași County showing the distribution of sampling sites. (C–F) Field photographs illustrating stand structure and site conditions at the sampled locations: (C) Dor Mărunt, (D) Grădiștea STB, (E) Perișoru, (F) Grădiștea ULT.

Tabel 1 Descrierea sintetică a suprafețelor experimentale
Summary description of experimental plots

Locația	Coordonate geografice		Nr. SP	Suprafață SP (m^2)	Compoziție	Vârsta (ani)
	Latitudine	Longitudine				
DOR	44°25′44,85″ N	26°59′44,39″ E	10	120	3SC3GL2ULT	21
GRS	44°09′33,44″ N	27°11′58,24″ E	11	100	8STB2MJ	8
GRU	44°10′28,90″ N	27°08′45,26″ E	12	140	9ULT1GL	7
PER	44°27′48,41″ N	27°29′44,99″ E	12	140	6ULT4GL	5

anul instalării acestor culturi, acestea pot fi redate succint pentru fiecare locație, astfel:
i) Perdeaua forestieră de protecție constituită din salcâm, glădiță și ulm de Turkestan înființată la Herghelia Dor Mărunt în 2005 (DOR);
ii) Perdeaua de protecție constituită din stejar brumăriu, mojdrean și păr sălbatic, înființată în toamna anului 2017 la Ferma Grădiștea (GRS);
iii) Perdeaua forestieră de protecție constituită din ulm de Turkestan și glădiță, înființată în primăvara anului 2018 la Ferma Grădiștea (GRU);
iv) Perdeaua forestieră constituită din ulm de Turkestan și glădiță, înființată în primăvara anului 2020 la Ferma Perișoru (PER).

Aceste suprafețe au fost utilizate ca zone de interes pentru extragerea și analiza indicilor de vegetație, precum și ca suport pentru o calibrare cu măsurătorile de teren.

Colectarea și prelucrarea datelor din teren

Campania lucrărilor de teren s-a desfășurat la sfârșitul sezonului de vegetație al anului 2024. Deoarece a fost dificilă realizarea unei inventarieri integrale ale arborilor ce compun perdelele forestiere investigate, s-au estimat valorile medii ale populației pornind de la examinarea unui eșantion. Mărimea suprafețelor de probă a fost stabilită ținând cont de suprafața totală și lățimea perdelei forestiere. Astfel, suprafața de probă a variat între 100-140 m^2, fiind amplasate între 10-12 piețe pentru fiecare locație (Tabelul 1). În acest sens s-a asigurat reprezentativitatea statistică necesară calculării stocului de carbon pentru fiecare locație, conform metodologiei eșantionajului selectiv. Pentru fiecare suprafață de probă s-a determinat diametrul la 1,3 m, pe baza măsurării circumferinței arborilor, folosind o ruletă dendrometrică. Totodată, înălțimea arborilor din fiecare suprafață de probă a fost măsurată folosind hipsometrul ultrasonic tip Haglof (IV).

Pentru determinarea stocului de carbon din biomasa arborilor este necesară mai întâi o estimare a volumului arborilor. Pentru determinarea volumului total al arborilor pe picior (d ≥ 6 cm) s-a utilizat ecuația de regresie folosită în literatura de specialitate (Giurgiu et al. 2004):

$$\lg(V)=a_0+a_1\lg(d)+a_2\lg^2(d)+a_3\lg(h)+a_4\lg^2(h) \quad (1)$$

în care: V = volumul arborelui cu d ≥ 6 cm, ce include crăcile până la 5 cm, în m^3; d = diametrul de bază al arborelui la 1,30 m de sol, în cm; h = înălțimea arborelui, în m; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 = coeficienții de regresie stabiliți pe specii; lg = logaritm în baza 10.

Pentru estimarea biomasei arborilor tineri (d<6 cm) s-au utilizat următoarea ecuație alometrică (Blujdea et al. 2012):

$$B= e^{a} \times d^{b} \times e^{(SEE^2/2)} \quad (2)$$

în care: B = biomasa supra sau subterană a arborilor tineri cu d < 6 cm, în t ha ,; d = diametrul arborelui la 1,3 m de sol; $e^{(SEE^2/2)}$ = factor de corecție, unde SE este eroarea standard a valorilor reziduale a modelului alometric liniar în spațiul logaritmic; a, b = coeficienții ecuației de regresie stabiliți pe specii pentru arbori cu d < 6 cm.

Estimarea stocului de carbon existent în biomasa supra și subterană din vegetația forestieră din cadrul suprafețelor experimentale s-a estimat ca produs dintre volumul arborilor estimat, densitatea arborilor pe grupe de specii și fracția de carbon din biomasă, după cum urmează:

$$C_{suprateran} = V \times D \times CF \quad (3)$$

$$C_{subteran} = V \times D \times R \times CF \quad (4)$$

$$C_{tineri} = B \times CF \quad (5)$$

în care: V = este volumul total al arborelui determinat cu ecuația logaritmică, m^3; B = reprezintă biomasa totală a puietului (supra și subterană), în t ha^{-1}; D = densitatea de bază a lemnului, s-a folosit o valoare medie de 570 kg m^{-3} pentru toate speciile; R = raportul dintre volumul subteran și suprateran al arborelui; s-a considerat ca având valoarea de 0,22 pentru stejar brumăriu și 0,20 pentru restul speciilor; CF = fracția de carbon din biomasa uscată, tone C pentru materia uscată este de 0,47, valoare implicită pentru foioase (IPCC, 2006).

Colectarea și prelucrarea datelor satelitare

Metodologia s-a bazat în principal pe: (A) produse satelitare Sentinel-2 L2A (colecția Copernicus/S2_SR_Harmonized, Tabel 2)), cu rezoluție spațială de 10 m pentru benzile B2, B3, B4 și B8 și acoperire temporală frecventă (5 zile); (B) prelucrarea acestor produse în platforma Google Earth Engine (GEE), utilizând scripturi dedicate pentru filtrare, mascarea norilor (maxim 5%), calculul indicilor de vegetație și generarea de compozite mediene; (C) intersectarea rasterelor de indici cu poligoanele zonelor de interes (AOI) pentru extragerea valorilor medii pe fiecare cultură. Perioada de analiză a fost sezonul de vegetație din anul 2025 (între 01 aprilie și 31 octombrie). Acest lucru permite corelarea stării biomasei forestiere (expresia indicilor de vegetație în 2025) cu informația structurală a perdelelor forestiere analizate din campania de inventarieri. În mod concret, pentru anul 2025 s-a generat un compozit median Sentinel-2 pentru sezonul de vegetație aprilie-octombrie, pe baza căruia au fost calculați patru indici de vegetație (NDVI, EVI, GNDVI, SAVI) și au fost obținute valori medii pe fiecare locație. Aceste valori sintetice sunt folosite pentru a compara starea vegetației din

Tabel 2 Prezentarea generală a indicilor de vegetație spectrali folosiți și interpretarea lor
General overview of the spectral vegetation indices used and their interpretation

Indice	Formula (în raport cu benzile Sentinel-2)	Benzile folosite	Ce măsoară / Interpretare	Utilizare în studiu
NDVI (Indicele de vegetație cu diferență normalizată)	(B8 − B4) / (B8 + B4)	B4 (Red), B8 (NIR)	Indicator general al vigorii vegetației verzi; valori mari → vegetație densă și sănătoasă, valori mici → sol, vegetație rară sau stresată.	Compararea stării generale a biomasei forestiere între locații; corelare cu stocurile de carbon.
EVI (Indicele de vegetație îmbunătățit)	2.5 × (B8 - B4) / (B8 + 6B4 – – 7,5 B2 + 1)	B2 (Blue), B4 (Red), B8 (NIR)	Variantă de indice de vegetație mai puțin sensibilă la saturare în zone cu vegetație foarte densă și la influența solului/atmosferei.	Evaluarea diferențelor de vigoare din perdelele forestiere, complementar cu NDVI; corelare cu stocurile de carbon.
GNDVI (Indicele de vegetație cu diferență normalizată verde)	(B8 - B3) / (B8 + B3)	B3(Green), B8 (NIR)	Mai sensibil la conținutul de clorofilă și la statusul nutrițional; pune accent pe banda verde.	Analiza stării fiziologice a vegetației și compararea fină între culturi cu NDVI similar, dar potențial fotosintetic diferit; corelare cu stocurile de carbon.
SAVI (Indicele de vegetație ajustat la sol)	(B8 - B4) / (B8 + B4 + L)	B4 (Red), B8 (NIR)	Indice de vegetație ajustat de influența solului, util în zone cu acoperire vegetală redusă sau neuniformă.	Evaluarea perdelelor tinere, unde solul este parțial expus, pentru a separa mai bine contribuția vegetației de cea a solului; corelare cu stocurile de carbon.

culturi și stocul de carbon determinat prin măsurătorile terestre la nivel de perdea forestieră.

Analiza statistică a datelor

Pentru alegerea testului statistic adecvat comparării stocului de carbon între cele patru locații (DOM, GRS, GRU și respectiv PER), s-a evaluat inițial normalitatea distribuției datelor utilizând testul Shapiro-Wilk. Aplicarea analizei variației (ANOVA) presupune și condiția de omogenitate a datelor, verificarea acestui criteriu fiind realizată cu ajutorul testului Bartlett. Întrucât asumpția de normalitate a fost îndeplinită, iar omogenitatea variațelor nu, s-a folosit testul parametric Welch's ANOVA, o variantă a ANOVA adaptată pentru varianțe diferite ale grupurilor comparate. Pentru identificarea perechilor de locații între care apar diferențe ale stocurilor de carbon, a fost aplicat testul post-hoc Games-Howell. Prelucrarea primară a datelor a fost realizată utilizând programul Microsoft Office Excel 2021, iar prelucrarea statistică și reprezentarea grafică a acestora au fost efectuate în mediul de programare R (versiunea 2025.09.2+418, (Posit team 2025)), utilizând pachetele *dplyr, rstatix, multicompView, ggplot2 și ggpubr* (Kassambara 2026, Wickham 2016, Wickham et al. 2026).

Rezultate

Estimarea stocului de carbon s-a realizat folosind în special ecuații alometrice, cele mai multe culturi fiind plantații tinere (5-8 ani), cu excepția perdelei forestiere de la Dor Mărunt (21 ani). Cele patru perdele forestiere analizate au înregistrat stocuri de carbon mai mult sau mai puțin diferite, datorate mai ales particularităților fiecărei culturi, precum specia dominantă, vârsta și densitatea arborilor.

Determinarea biomasei și a stocului de carbon

Biomasa arborilor și stocul de carbon specifică acesteia a cunoscut o variație atât după vârsta arborilor inventariați cât și după compoziția speciilor care constituie fiecare suprafață de probă din cadrul fiecărei perdele forestiere (Tabel 3). Cele mai mari valori atât ale biomasei arborilor (194,44 t ha^{-1}), cât și ale stocului de carbon aferent acesteia au fost înregistrate în locația Dor Mărunt (91,39 tC ha^{-1}), iar cele mai mici valori au fost înregistrate în locația Grădiștea cu stejar brumăriu (11,72 tC ha^{-1}). Totodată, valori intermediare pentru biomasă au fost înregistrate în perdelele forestiere de la Grădiștea cu ulm de Turkestan (57,63 t ha^{-1}), respectiv Perișoru cu specii de ulm de Turkestan și glădiță (28,50 t ha^{-1}).

Pe de altă parte, analiza variabilității biomasei și a stocului de carbon la nivelul fiecărei perdele forestiere (valorile de min, max și a coeficientului de variație), a arătat că perdeaua forestieră Dor Mărunt a înregistrat cea mai mică variație (18,68%), confirmând o structură relativ omogenă sub raport dimensional, comparativ cu Grădiștea (cu stejar brumăriu), unde s-a observat o structură relativ heterogenă, prin prezența atât a unor suprafețe de probă cu

Tabel 3 Indicatorii statistici determinați pentru biomasa si stocul de carbon
Statistical indicators determined for biomass and carbon stocks

Parametrii statistici	Biomasa (t ha^{-1})				Stocul de carbon (tC ha^{-1})			
	DOM	GRS	GRU	PER	DOM	GRS	GRU	PER
Media	194,44	24,93	57,63	28,50	91,39	11,72	27,09	13,39
Mediana	195,29	26,32	51,58	27,70	91,79	12,37	24,24	13,02
Min	151,70	13,01	42,45	19,23	71,30	6,12	19,95	9,04
Max	263,36	34,65	76,84	44,79	123,78	16,28	36,11	21,10
Ab. Standard	36,32	7,27	11,94	7,36	17,07	3,42	5,61	3,46
Er. Standard	11,49	2,19	3,45	2,13	5,40	1,03	1,62	0,99
Coef. Variație	18,68	29,18	20,71	25,84	18,68	29,18	20,71	25,84

arbori de mici dimensiuni (min 13,01 t ha^{-1}), cât și a unor suprafețe de probă cu arbori de dimensiuni mai mari (max 34,65 t ha^{-1}). Totodată, valori relativ mici înregistrate pentru eroarea standard, în raport cu media pentru toate locațiile, confirmă faptul că eșantionarea s-a efectuat corespunzător, iar mediile calculate sunt reprezentative pentru întreaga suprafață a perdelelor forestiere.

Testarea semnificației diferențelor pentru stocul de carbon între locații

Prima parte a analizei statistice, a arătat faptul că datele urmează o distribuție normală în toate cele patru locații analizate, ipoteza nulă a testului Shapiro-Wilk fiind acceptată (DOM – p = 0,576; GRS – p = 0,425; GRU – p = 0,113; PER – p = 0,484). Mai departe, prin aplicarea analizei variației (ANOVA), s-a verificat condiția de omogenitate a variațelor. Verificarea acestui criteriu cu ajutorul testului Bartlett (Bartlett's K-squared = 36,469, p < 0,001), a arătat că variațele diferă semnificativ între locații (heteroscedasticitate). În acest context, marcat de variația neuniformă a datelor de teren, s-a optat pentru utilizarea testului parametric Welch ANOVA, ce a generat diferențe semnificative între cele patru locații în ceea ce privește stocul de carbon. Ulterior, prin aplicarea testului Games-Howell (Tabelul 4), s-au înregistrat diferențe semnificative ($p.adj$ < 0,05) pentru majoritatea perechilor comparate, cu excepția perechei GRS–PER, pentru care nu s-au evidențiat diferențe semnificative, sugerând o similitudine a stocurilor de carbon între aceste locații.

Analiza distribuției stocului de carbon între cele patru locații a arătat că perdeaua forestieră de la Dor Mărunt (DOM) a înregistrat cele mai ridicate valori ale carbonului, cu o medie de aproximativ 91,39 tC ha^{-1}, fiind urmat de Grădiștea ULT (GRU) cu 27,09 tC ha^{-1} (Figura 2). Pe de altă parte, cele mai scăzute stocuri de carbon au fost identificate în perdelele forestiere de la Perișoru (PER) (13,39 tC ha^{-1}) și respectiv Grădiștea STB (GRS) (11,72 tC ha^{-1}).

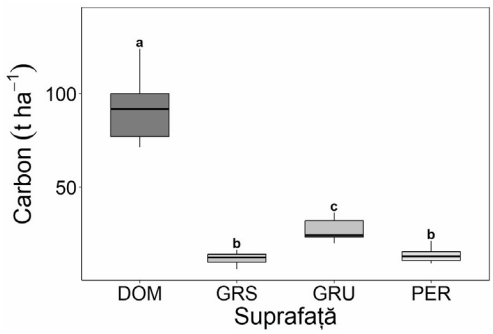


Figura 2 Distribuția stocului de carbon din biomasa totală a arborilor vii inventariați. Mediile marcate cu litere diferite indică diferențe semnificative conform testului post-hoc Games-Howell (p < 0,05). Barele boxplotului reprezintă mediana și cuartilele, iar liniile de extensie indică valorile minime și maxime. *Carbon stock distribution of the total biomass of inventoried living trees. Means marked with different letters indicate significant differences according to Games-Howell's post-hoc test (p < 0,05). Boxplot bars represent the median and quartiles, while whiskers indicate the minimum and maximum values.*

Tabel 4 Comparații multiple folosind testul Games- Howell (Welch ANOVA), cu valorile p ajustate *Multiple comparisons using Games - Howell (Welch's ANOVA) test with adjusted p-values*

Comparare	Statistica Z	Valoare p_ajustată	Semnificație
DOM-GRS	-79,7	<0.0001	da (***)
DOM-PER	-78,0	<0.0001	da (***)
GRS-GRU	15,4	<0,0001	da (***)
GRU-PER	-13,7	<0,0001	da (***)
DOM-GRU	1,971	<0,0001	da (***)
GRS-PER	-0.428	0,653	nu

Totodată, testul parametric Welch ANOVA a confirmat existența unor diferențe semnificative între cele patru locații ($p < 0,001$). Conform testului Games - Howell, stocul de carbon de la DOM este semnificativ diferit de stocul de carbon din locațiile GRS, PER, respectiv GRU. Pe de altă parte, stocul de carbon de la locația GRU a înregistrat diferențe statistic semnificative față de celelalte trei locații, chiar dacă vârsta culturii a fost relativ similară cu cele ale culturii de la GRS și PER (Figura 2, Tabel 4).

Determinarea indicilor de vegetație specifici

Valorile medii ale indicilor de vegetație evidențiază diferențe clare între locațiile analizate, reflectând variații ale densității și vigorii coronamentului perdelelor forestiere (Tabel 5). Pentru analiza comparativă între locații, suprafața de la Perișoru a înregistrat cele mai ridicate valori medii pentru toți indicii analizați (max NDVI=0,689 și min SAVI=0,305). Totodată, pentru suprafața de la Dor Mărunt au rezultat valori relativ ridicate dar similare (0,635) atât pentru NVDI cât și pentru GNDVI, însă cu abateri standard mari, care pot indica o variabilitate internă crescută a structurii vegetației. Pentru suprafața de la Grădiștea cu ulm de Turkestan s-au obținut valori intermediare, cu abateri standard mai reduse comparativ cu celelalte locații, ceea ce sugerează o structură a vegetației mai omogenă. Ultima locație, suprafața de la Grădiștea cu stejar brumăriu, a înregistrat cele mai scăzute valori medii pentru indicii de vegetație analizați (0,563 în cazul NDVI, respectiv 0,252 în cazul SAVI, Tabel 5), care pot sugera existența unui coronament mai rar și o dezvoltare vegetativă mai redusă.

Tabel 4 Indicii de vegetație (medie ± abaterea standard) pentru compozitul median Sentinel-2
Vegetation indices (mean ± SD) derived from the Sentinel-2 median composite image

Locație	NDVI (medie ± SD)	EVI (medie ± SD)	GNDVI (medie ± SD)	SAVI (medie ± SD)
DOM	0,635 ± 0,163	0,426 ± 0,123	0,635 ± 0,101	0,266 ± 0,068
GRS	0,563 ± 0,160	0,418 ± 0,133	0,559 ± 0,106	0,252 ± 0,074
GRT	0,617 ± 0,107	0,441 ± 0,100	0,579 ± 0,079	0,266 ± 0,056
PER	0,689 ± 0,109	0,497 ± 0,102	0,664 ± 0,065	0,305 ± 0,054

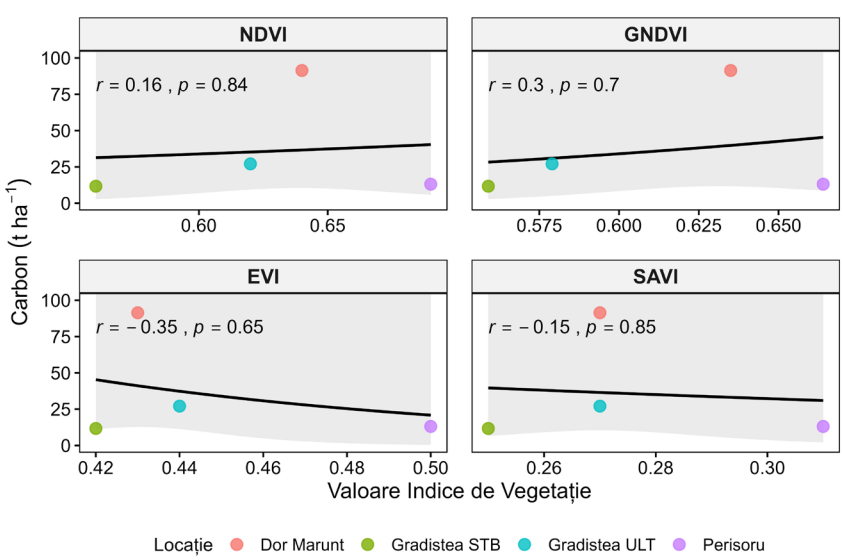


Figura 3 Corelația dintre indicii de vegetație și carbonul din biomasa arborilor
Correlation between vegetation indices and carbon stocks in tree biomass

Analiza corelației între stocul de carbon din biomasa arborilor și indicii de vegetație multispectrali

Rezultatele privind analiza corelației dintre indicii de vegetație și carbonul din biomasa perdelelor forestiere, indică corelații modeste, coeficienții de corelație fiind cuprinși între -0,35 (EVI) și 0,30 (GNDVI), ceea ce poate sugera o relație liniară slabă între indicii de vegetație și carbonul estimat, coroborat cu numărul redus de valori analizate. De asemenea, valorile $p >$ 0,05 pentru toți indicii indică lipsa semnificației statistice, ceea ce înseamnă că relațiile observate nu sunt statistic robuste (Figura 3). Așadar, din cauza numărului redus de locații analizate (n = 4), corelațiile nu ating pragul de semnificație statistică, însă indică o tendință de saturație a indicilor la densități mari de biomasă.

Discuții

Sistemele agrosilvice, în cazul nostru perdelele forestiere, constituie un segment crucial al agriculturii integrate și al utilizării terenurilor forestiere, care susține sechestrarea ridicată a carbonului și menține serviciile de reglare, cu precădere la nivel regional (Király et al. 2024).

Determinarea biomasei și a stocului de carbon reprezintă un indicator esențial al eficienței sistemelor agrosilvice atât din perspectiva atenuării schimbărilor climatice, inclusiv a climatului local, dar și al managementului durabil al terenurilor (Cardinael et al. 2021). Așa cum ne așteptam, valorile stocurilor de carbon determinate pentru cele patru situații au cunoscut diferențe semnificative ce pot fi explicate de vigoarea culturii, densitatea și vârsta arborilor ce compun perdeaua forestieră. Valoarea stocului de carbon a înregistrat o amplitudine ridicată (min. de 11,72 tC ha^{-1} la GRS și max. de 91,39 tC ha^{-1} la DOM), valori similare cu alte studii din Europa (Lukić et al. 2018, Spyroglou et al. 2021). Pe de altă parte, diferențele semnificative ale stocului de carbon înregistrate între cele patru locații pot fi explicate și de plasticitatea fiziologică ridicată la perioadele de secetă pentru diferitele specii ce compun perdelele forestiere, prin creșterea grosimii frunzelor și prin reducerea pierderilor de apă (Alesso et al. 2021, Qin et al. 2016).

În ceea ce privește analiza corelației dintre stocul de carbon obținut pe baza datelor din teren și principalii indici de vegetație multispectrali, utilizând seturi de date optice obținute prin teledetecție (Sentinel 2), a prezentat o ierarhizare clară a zonelor studiate, în funcție de principalele caracteristici ale perdelelor forestiere (vârsta arborilor și compoziția speciilor). Pe de altă parte, indicii de vegetație măsoară "vigoarea" frunzișului și densitatea coronamentului, nu neapărat volumul lemnos acumulat în trunchi (Mngadi et al. 2021, Myneni et al. 1997). În baza acestei afirmații, locația de la Perișoru a înregistrat cele mai mari valori pentru indicii de vegetație (Tabel 5), comparativ cu stocul de carbon determinat în celelalte locații (Tabel 3). Totodată, suprafața DOM prezintă un stoc de carbon de șapte ori mai mare decât suprafața GRS, chiar dacă valorile NDVI nu reflectă această proporție (0,64 vs 0,56). Acest fenomen este cunoscut în literatura de specialitate sub numele de "saturația indicelui NDVI", adică odată ce coronamentul se închide complet, indicele nu mai poate detecta acumularea ulterioară de biomasă în trunchi și ramuri (Laurin et al. 2018, Mutanga și Skidmore 2004). Corelația cu indicii EVI și SAVI arată o sensibilitate ușor diferită la structura solului și la influența radiației atmosferice (Zhen et al. 2021). Acest fapt confirmă aceeași tendință ca mai înainte, adică indicii optici satelitari tind să subestimeze biomasa în pădurile cu densitate mare de carbon, precum suprafața DOM, unde structura verticală a arborilor devine mai importantă decât suprafața foliară.

Totodată, putem afirma existența unor limitări ale studiului, fapt subliniat de corelațiile slabe între stocul de carbon și indicii de vegetație ($r <$ 0,4), ce pot fi explicate atât de numărul redus de locații, cât mai ales de structura îngustă și discontinuă a perdelelor forestiere, ceea ce poate fi dificil de captat prin pixeli multispectrali. Mai mult decât atât, existența unei neconcordanțe dintre stocul de carbon și răspunsul spectral (indicii de vegetație), poate fi reflectat în general de starea coronamentului perdelei forestiere.

Pe de altă parte, indicii de vegetație analizați nu explică semnificativ variația carbonului din biomasa perdelelor forestiere la nivelul celor patru locații, însă indicii EVI și GNDVI prezintă un potențial relativ mai bun comparativ cu indicii de vegetație NDVI și SAVI, necesitând analize suplimentare pe seturi de date mai extinse. Totodată, corelația lor slabă cu stocul de carbon poate sublinia necesitatea integrării pe viitor a datelor de teledetecție de tip LIDAR.

Concluzii

Evaluarea stocului de carbon din sistemele agrosilvice, cu specific pentru perdelele forestiere, este un demers esențial în contextul schimbărilor climatice, transformând aceste "bariere verzi" din simple elemente de protecție agricolă în adevărate active de stocare a carbonului. Diferențele statistice înregistrate între cele patru locații sugerează că factorii locali, precum vârsta arborilor și compoziția speciilor, au o influență semnificativă asupra stocării carbonului, comparativ cu aportul senzorilor multispectrali în stadiul actual de monitorizare. Totodată, folosirea tehnologiei satelitare în viitorul apropiat, pentru evaluarea și monitorizarea stocurilor de biomasă și carbon, poate constitui o măsură eficientă care însă trebuie folosită cu precauție, mai ales pentru ecosisteme cu structură îngustă și discontinuă ca în cazul perdelelor forestiere.

Mulțumiri

Cercetările s-au efectuat în cadrul proiectelor: Contract 798/M/20.12.2024 finanțat de Ministerul Mediului, Apelor și Pădurilor și Programul Nucleu FORCLIMSOC, proiect PN23090203 – "Contribuții științifice noi pentru un management sustenabil al bazinelor hidrografice torențiale, terenurilor degradate, perdelelor forestiere și al altor sisteme agrosilvice în contextul schimbărilor climatice", finanțat de Ministerul Educației și Cercetării Naționale. De asemenea, mulțumim celor doi recenzori ai lucrării, pentru observațiile și sugestiile constructive, care au contribuit semnificativ la îmbunătățirea manuscrisului în vederea publicării.

Bibliografie

Aalde H., Gonzalez P., Gytarsky M., Krug T., Kurz W.A., Ogle S., Raison J., Schoene D., Ravindranath N.H., Elhassan N.G., Heath L.S., Higuchi N., Kainja S., Matsumoto M., Sánchez M.J.S., Somogyi Z. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4, Chapter 4: Forest Land.

Alesso S.P., Tapias R., Alaejos J., Fernández M. 2021. Biomass Yield and Economic, Energy and Carbon Balances of Ulmus pumila L., Robinia pseudoacacia L. and Populus × euroamericana (Dode) Guinier Short-Rotation Coppices on Degraded Lands under Mediterranean Climate Forests 12(10): 1337. https://doi.org/10.3390/f12101337

Blujdea V.N.B., Pilli R., Dutca I., Ciuvat L., Abrudan I.V. 2012. Allometric biomass equations for young broadleaved trees in plantations in Romania Forest Ecology and Management 264 172-184. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042

Cardinael R., Cadisch G., Gosme M., Oelbermann M., van Noordwijk M. 2021. Climate change mitigation and adaptation in agriculture: Why agroforestry should be part of the solution Agriculture, Ecosystems & Environment 319 107555. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107555

Cardinael R., Chevallier T., Cambou A., Béral C., Barthès B.G., Dupraz C., Durand C., Kouakoua E., Chenu C. 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France Agriculture, Ecosystems & Environment 236 243-255. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011

Chapman M., Walker W.S., Cook-Patton S.C., Ellis P.W., Farina M., Griscom B.W., Baccini A. 2020. Large climate mitigation potential from adding trees to agricultural lands Global Change Biology 26(8): 4357-4365. https://doi.org/10.1111/gcb.15121

Ciceu A., Radu, G.R., García-Duro J. 2019. National forestry accounting plan of Romania For the first compliance period (2021-2025) Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură„Marin Drăcea" (INCDS).

Deng R., Yang G., Wang W., Li Y., Zhang X., Hu F., Guo Q., Jia M. 2024. A new method of estimating shelterbelt carbon storage on the regional scale: Combined the single tree carbon storage with tree numbers Ecological Indicators 163 112071. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112071

Giurgiu V., Decei I., Drăghiciu D. 2004. Metode și tabele dendrometrice Editura Ceres.

Grassi G., House J., Dentener F., Federici S., Elzen M., Penman J. 2017. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation Nature Climate Change 7 220-226. https://doi.org/10.1038/nclimate3227

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices Remote Sensing of Environment, The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): a new generation of Land Surface Monitoring 83(1): 195-213. https://doi.

org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (ed.) 2023. *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926
Jose S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview Agroforest Syst 76(1): 1-10. https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7
Kassambara A. 2026. *ggpubr: „ggplot2" Based Publication Ready Plots.*
Kay S., Rega C., Moreno G., Den Herder M., Palma J.H.N., Borek R., Crous-Duran J., Freese D., Giannitsopoulos M., Graves A., Jäger M., Lamersdorf N., Memedemin D., Mosquera-Losada R., Pantera A., Paracchini M.L., Paris P., Roces-Díaz J.V., Rolo V., Rosati A., Sandor M., Smith J., Szerencsits E., Varga A., Viaud V., Wawer R., Burgess P.J., Herzog F. 2019. Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe Land Use Policy 83 581-593. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025
Király É., Keserű Z., Molnár T., Szabó O., Borovics A. 2024. Carbon Sequestration in the Aboveground Living Biomass of Windbreaks—Climate Change Mitigation by Means of Agroforestry in Hungary Forests 15(1): 63. https://doi.org/10.3390/f15010063
Lasco R.D., Delfino R.J.P., Catacutan D.C., Simelton E.S., Wilson D.M. 2014. Climate risk adaptation by smallholder farmers: the roles of trees and agroforestry Current Opinion in Environmental Sustainability, Sustainability challenges 6 83-88. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.013
Laurin G.V., Balling J., Corona P., Mattioli W., Papale D., Puletti N., Rizzo M., Truckenbrodt J., Urban M. 2018. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data JARS 12(1): 016008. https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.016008
Lukić S., Belanović Simić S., Pantić D., Beloica J., Baumgertel A., Miljković P., Borota D., Kadović R. 2018. Carbon storage in shelterbelts in the Agroforestry Systems Of The Bačka Palanka Area (Serbia) AGR 3(2). https://doi.org/10.7251/AGRENG1802080L
Mayrinck R.C., Laroque C.P., Amichev B.Y., Van Rees K. 2019. Above- and Below-Ground Carbon Sequestration in Shelterbelt Trees in Canada: A Review Forests 10(10): 922. https://doi.org/10.3390/f10100922
Mihăilă E., Tudora A., Bîtcă M., Drăgan D., Achim E. 2024. Evaluarea structurii vegetației forestiere din perdele forestiere în vederea realizării lucrărilor de îngrijire și conducere Revista pădurilor 4 3-34
Mngadi M., Odindi J., Mutanga O. 2021. The Utility of Sentinel-2 Spectral Data in Quantifying Above-Ground Carbon Stock in an Urban Reforested Landscape Remote Sensing 13(21): 4281. https://doi.org/10.3390/rs13214281
Mutanga O., Skidmore A. 2004. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation International Journal of Remote Sensing 25 3999-4014. https://doi.org/10.1080/01431160310001654923
Myneni R.B., Ramakrishna R., Nemani R., Running S.W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35(6): 1380-1393. https://doi.org/10.1109/36.649788
Nair P.K.R. 1993. *An introduction to agroforestry* Kluwer Acad. Publ, 499 pp.
Nerlich K., Graeff-Hönninger S., Claupein W. 2013. Agroforestry in Europe: a review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany Agroforest Syst 87(2): 475-492. https://doi.org/10.1007/s10457-012-9560-2
van Noordwijk M., Coe R., Sinclair F.L., Luedeling E., Bayala J., Muthuri C.W., Cooper P., Kindt R., Duguma L., Lamanna C., Minang P.A. 2021. Climate change adaptation in and through agroforestry: four decades of research initiated by Peter Huxley Mitig Adapt Strateg Glob Change 26(5): 18. https://doi.org/10.1007/s11027-021-09954-5
Pardon P., Reubens B., Reheul D., Mertens J., De Frenne P., Coussement T., Janssens P., Verheyen K. 2017. Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems Agriculture, Ecosystems & Environment 247 98-111. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.018
Posit team 2025. *RStudio: Integrated Development Environment for R* Posit Software, PBC.
Qin J., Xi W., Rahmlow A., Kong H., Zhang Z., Shangguan Z. 2016. Effects of forest plantation types on leaf traits of *Ulmus* pumila and *Robinia* pseudoacacia on the Loess Plateau, China Ecological Engineering 97 416-425. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.038
Quandt A., Neufeldt H., Gorman K. 2023. Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps Current Opinion in Environmental Sustainability 60 101244. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244
Sharma P., Bhardwaj D.R., Singh M.K., Nigam R., Pala N.A., Kumar A., Verma K., Kumar D., Thakur P. 2023. Geospatial technology in agroforestry: status, prospects, and constraints Environ Sci Pollut Res Int 30(55): 116459-116487. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20305-y
Spyroglou G., Fotelli M., Nanos N., Radoglou K. 2021. Assessing Black Locust Biomass Accumulation in Restoration Plantations Forests 12(11): 1477. https://doi.org/10.3390/f12111477
Torralba M., Fagerholm N., Burgess P.J., Moreno G., Plieninger T. 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis Agriculture, Ecosystems & Environment 230 150-161. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002
Verkerk H., Delacote P., Hurmekoski E., Kunttu J., Matthews R., Mäkipää R., Mosley F., Perugini L., Reyer C., Roe S., Trømborg E. 2022. *Forest-based climate change mitigation and adaptation in Europe.* https://doi.org/10.36333/fs14
Wickham H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* Springer-Verlag New York
Wickham H., François R., Henry L., Müller K., Vaughan D. 2026. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation.*
Zhen Z., Chen S., Yin T., Chavanon E., Lauret N., Guilleux J., Henke M., Qin W., Cao L., Li J., Lu P., Gastellu-Etchegorry J.-P. 2021. Using the Negative Soil Adjustment Factor of Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) to Resist Saturation Effects and Estimate Leaf Area Index (LAI) in Dense Vegetation Areas Sensors 21(6): 2115. https://doi.org/10.3390/s21062115
Zhu X., Luleva M., Paolini van Helfteren S., Gou Y., Gajda W., Neinavaz E. 2024. Comparison of functional and structural biodiversity using Sentinel-2 and airborne LiDAR data in agroforestry systems Remote Sensing Applications: Society and Environment 35 101252. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101252