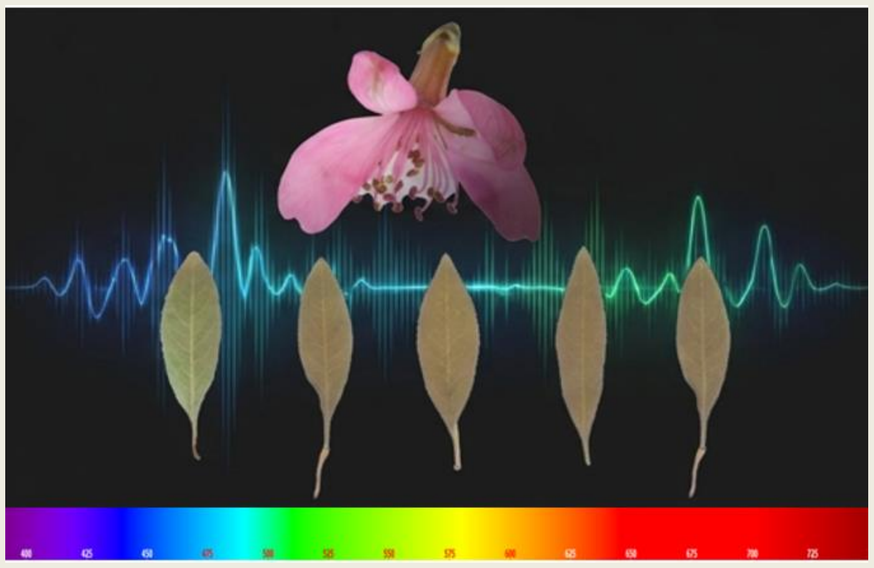
Descifrarea limbajului spectral al frunzelor: un instrument spectroscopic pentru predicția strategiilor ecologice în populațiile de *Prunus tenella* Batsch

Anamaria Roman[1]✉, Dana Șuteu[1], Zoltan R. Balázs[2,3], Thomas Kuhn[1,4], Alexia-Gabriela Barbu[1,3], Andreea-Irene Türk[1,5], Tudor-Mihai Ursu[1]

Corresponding author: anamaria.roman@icbcluj.ro

[1]Institutul de Cercetări Biologice Cluj – Filială a INCDSB, Cluj-Napoca, România; [2]Universitatea Babeș-Bolyai, Școala Doctorală de Biologie Integrativă, Cluj-Napoca, România; [3]Universitatea Babeș-Bolyai, Facultatea de Biologie și Geologie, Cluj-Napoca, România; [4]Universitatea Babeș-Bolyai, Grădina Botanică „Alexandru Borza”, Cluj-Napoca, România; [5]INRAE, Universitatea din Avignon, Școala Doctorală IMPLANTEUS, Avignon, Franța



CONTEXT

Prezicerea modului în care plantele vor răspunde schimbărilor climatice și pierderii habitatelor este una dintre cele mai mari provocări în studiile ecologice și/sau agronomice de astăzi. Teoria strategiilor ecologic-adaptative CSR (Competitor–Stres-tolerant–Ruderal; Grime 2001) poate servi ca indicator indirect al plasticității sau adaptabilității unei specii la condițiile de mediu, prin proiectarea celor trei tipuri de strategii pe un triunghi CSR. Teoria descrie compromisul prin care speciile excelează fie în medii competitive, fie în medii cu stres ridicat, fie în medii ruderale. Acest cadru poate fi extins pentru a înțelege cum răspund speciile la condițiile în schimbare, folosind indicatori bazați pe trăsături pentru a cuantifica poziția unei populații pe „Triunghiul adaptabilității” (pentru a identifica variabilitatea intraspecifică și adaptabilitatea la mediu). Această poziție, precum și modificările ei în timp sau de-a lungul gradienților de mediu, pot indica potențialul adaptativ al unei specii la diferite condiții ecologice.

Teoria ecologică CSR

Speciile competitive (C): Domină în medii cu stres redus, perturbări reduse și resurse abundente. Prioritizează creșterea rapidă și dimensiunea mare pentru a monopoliza resursele.

- Maximizează captarea resurselor → frunze mari, moi, bogate în nutrienți.

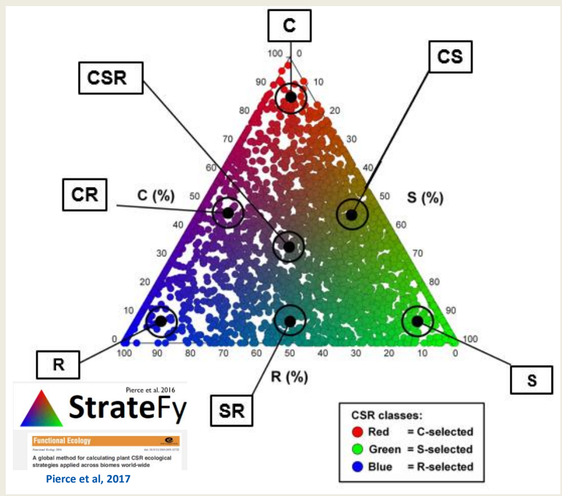
Speciile tolerante la stres (S): Prosperă în medii cu stres ridicat și perturbări reduse (de exemplu, resurse limitate, temperaturi extreme). Se concentrează pe supraviețuirea pe termen lung și pe conservarea resurselor.

- Maximizează supraviețuirea în condiții de stres → frunze mici, groase, dense, longevive, cu conținut ridicat de celuloză și lignină.

Speciile ruderale (R): Adaptate la medii cu stres redus și perturbări intense. Sunt specii cu creștere rapidă și reproducere rapidă, care profită de terenurile perturbate.

- Maximizează reproducerea rapidă după perturbare → frunze subțiri, „ieftine”, cu SLA ridicat (suprafață foliară specifică) și durată de viață scurtă.

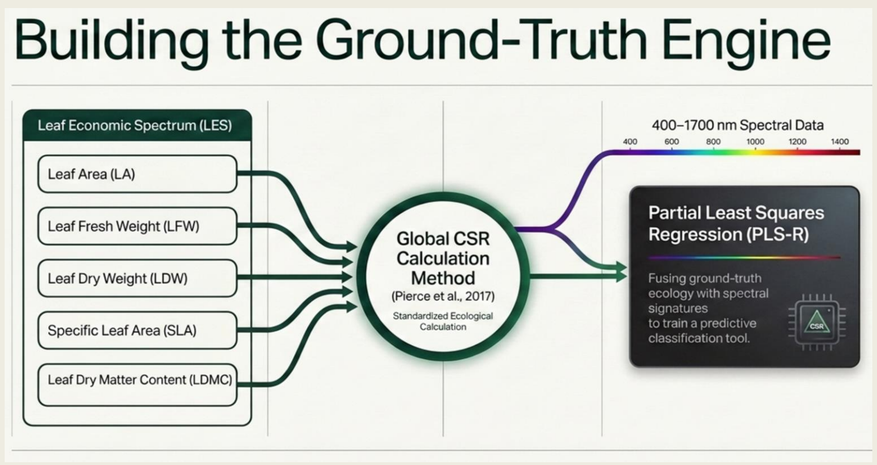
Triunghiul strategiilor ecologice CSR



Pierce et al, 2017

METODE

Evaluările CSR tradiționale sunt îngreunate de prelevarea distructivă a probelor, care consumă multe resurse și limitează utilizarea lor în conservarea la scară largă. Studiul nostru propune o abordare spectroscopică cu randament ridicat, care permite determinarea strategiei ecologice direct din spectrul frunzei, pentru a depăși această barieră. Am colectat date de reflectanță spectrală (400–1700 nm) de la frunze uscate din mai multe populații de migdal pitic (*Prunus tenella*) și am măsurat trăsături funcționale cheie: suprafața frunzei (LA), masa proaspătă a frunzei (LFW) și masa uscată a frunzei (LDW). Acestea au fost folosite pentru a evalua trăsături din Spectrul Economic al Frunzei (LES; Wright et al., 2004), inclusiv suprafața foliară specifică (SLA) și conținutul de substanță uscată al frunzei (LDMC), pentru a calcula scoruri CSR precise, de referință, conform metodologiei lui Pierce et al. (2017). Folosind această metodă globală de calcul, am obținut scoruri ale strategiilor ecologice pentru fiecare populație. Ulterior, a fost dezvoltat un model de regresie prin metoda celor mai mici pătrate parțiale (PLSR) pentru a prezice aceste scoruri CSR integrate direct din datele spectrale, rezultând astfel un instrument de diagnostic puternic.



PUNCTE CHEIE ALE STUDIULUI

PROVOCAREA

Prezicerea adaptabilității plantelor la schimbările climatice prin cadrul CSR este eficientă, dar laborioasă

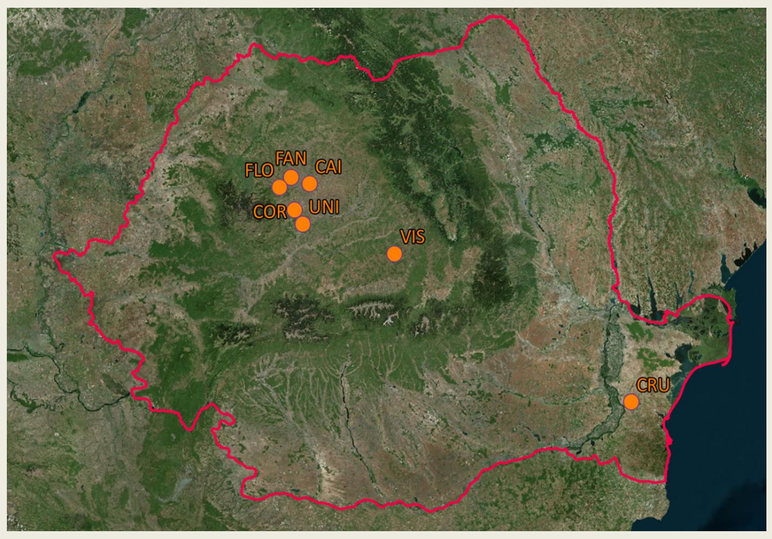
ELEMENTELE DE NOUTATE

Un model de regresie prin metoda celor mai mici pătrate parțiale (PLSR), cu randament ridicat, care prezice scorurile CSR integrate direct din reflectanța spectrală a frunzelor

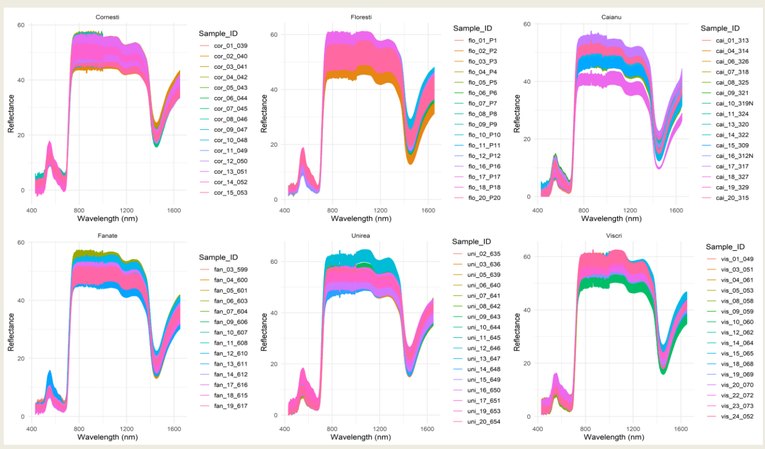
IMPACTUL

O „piatră Rosetta” spectrală: pentru conservare: evaluarea rapidă a vulnerabilității, plasticității populațiilor sălbatice; pentru ameliorare, un screening rapid al genotipurilor reziliente la climă.

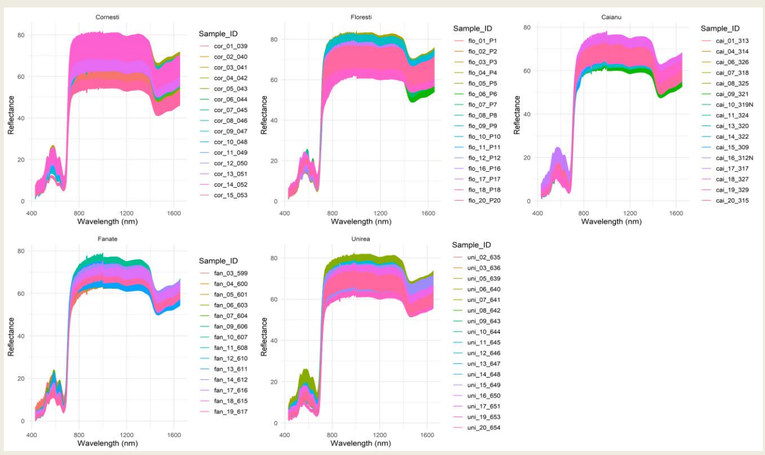
Locații de eșantionare



Populații de *Prunus tenella* din România: CAI (Căianu), UNI (Unirea), COR (Cornești), CRU (Crucea) FAN (Fânațele Clujului), FLO (Florești), VIS (Viscri).



***Prunus tenella* - Spectre ale frunzelor proaspete**



***Prunus tenella* - Spectre ale frunzelor uscate**

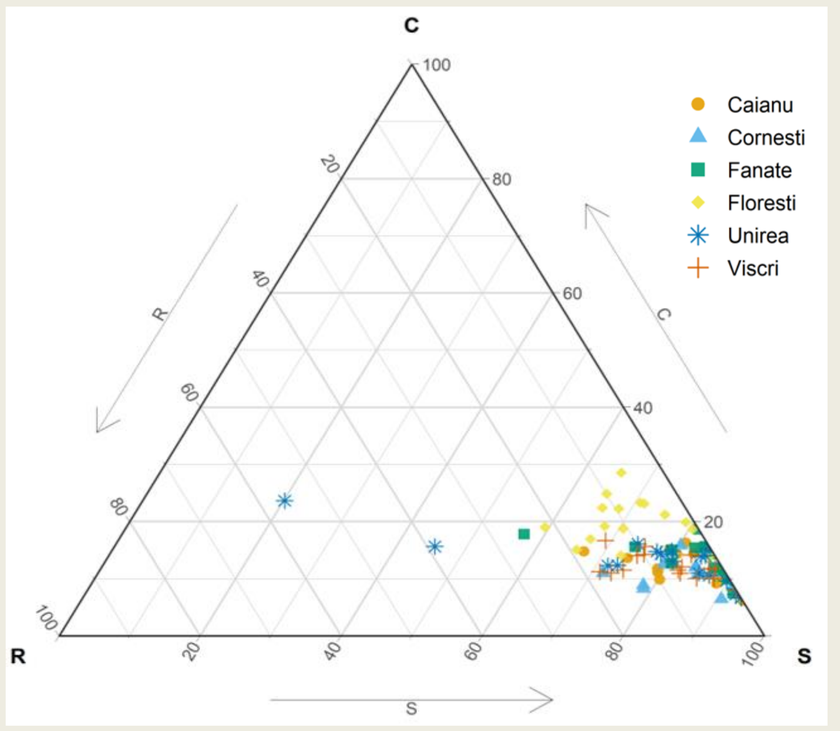
Trăsăturile măsurate și strategiile ecologice ale speciei *Prunus tenella*

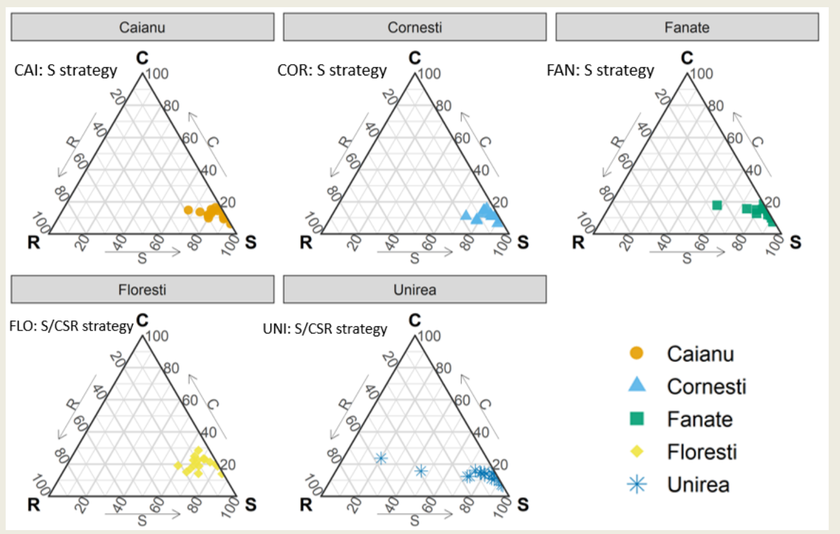
METHOD	TRAIT/STRATEGY	CAI	COR	FAN	VIS	FLO	UNI
Measured	LA	265.03	284.00	322.81	264.52	658.46	321.45
Measured	LFW	67.77	62.67	86.76	65.10	157.41	75.10
Measured	LDW	24.95	26.13	33.15	24.09	55.65	28.74
Measured	LSI	1.63	1.28	1.63	1.55	1.53	1.41
Measured	LWC	62.59	57.85	60.92	62.87	64.65	60.56
Measured	LMA	96.10	93.40	103.74	92.01	84.22	93.12
Measured	LDMC	37.41	42.15	39.08	37.13	35.35	39.44
Measured	SLA	10.76	11.12	10.05	11.24	12.18	11.90
Measured	C	12.35	11.26	13.92	12.16	20.08	13.25
Measured	S	82.09	82.59	81.82	80.08	70.65	76.53
Measured	R	5.56	6.15	4.25	7.76	9.27	10.22
Measured	**Strategy Class**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S/CSR**	**S/CSR**

FINANȚARE: Acest studiu a fost susținut prin proiectele FRUITDIV-101133964; 88 PHE (PN-IV-P8-8.1-PRE-HE-ORG) și BIORESGREEN-7N/03.01.2023/23020401.

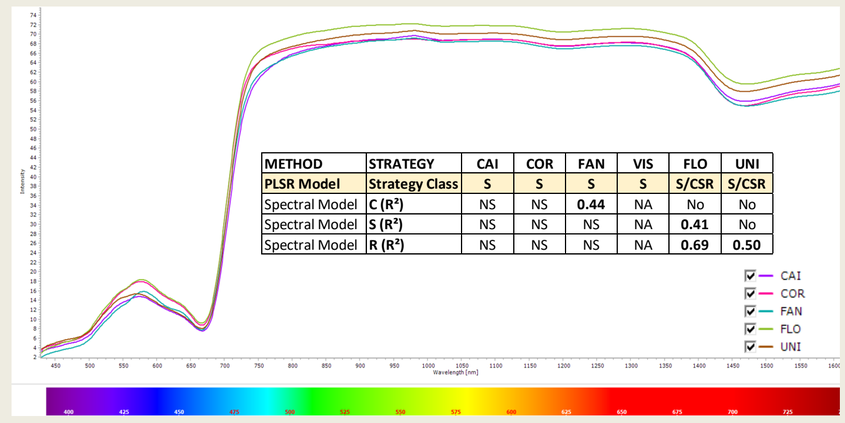
REZULTATE

Trăsăturile măsurate în mod tradițional în cadrul LES indică faptul că trei populații (CAI, COR și FAN) sunt predominant tolerante la stres, în timp ce FLO și UNI prezintă strategii mixte S/CSR. Modelele de predicție spectrală au surprins cu succes aceste strategii ecologice, în special pentru populația FLO, unde au explicat 69% din variația strategiei ruderale (R^2 = 0,69) și 41% din cea a strategiei de toleranță la stres (R^2 = 0,41). O capacitate predictivă semnificativă a fost observată și pentru strategia ruderală la populația UNI (R^2 > 0,50) și pentru strategia competitivă la populația FAN (R^2 = 0,41). Relația dintre strategia CSR și mediu este reflectată de spectrele frunzelor: populațiile CAI, COR și FAN, caracterizate de strategia S, apar în pajiști stepice situate pe pante abrupte, cu condiții foarte uscate, adică habitate sărace în nutrienți și tipice pentru speciile tolerante la secetă. În schimb, populațiile FLO și UNI se găsesc în zone degradate, influențate antropic: FLO se află în depozite de deșeuri/gropi de gunoi aflate lângă terenuri agricole fertilizate, iar UNI în pajiști suprapășunate, condiții caracteristice mediilor ruderale, de tip CSR (populații mai generaliste).





Triunghiul strategiilor ecologice CSR – indicator indirect pentru evaluarea plasticității și adaptabilității intraspecifice a populațiilor de *Prunus tenella* la condițiile de mediu



METHOD	STRATEGY	CAI	COR	FAN	VIS	FLO	UNI
PLSR Model	**Strategy Class**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S/CSR**	**S/CSR**
Spectral Model	**C (R^2)**	NS	NS	**0.44**	NA	No	No
Spectral Model	**S (R^2)**	NS	NS	NS	NA	**0.41**	No
Spectral Model	**R (R^2)**	NS	NS	NS	NA	**0.69**	**0.50**

Trăsăturile măsurate și strategiile ecologice ale populațiilor de *Prunus tenella* se reflectă în spectrul de reflectanță:

1. VIS (450 - 700 nm) - „Regiunea pigmenților - invers corelată cu CHL”
   FLO > COR > FAN > UNI > CAI
2. The Red Edge (700 - 750 nm) - „Sănătatea plantei/Stresul”
   FLO > COR > FAN > UNI > CAI
3. NIR (750 - 1350 nm) - „Regiunea structurală”
   FLO > UNI > COR > CAI > FAN
4. SWIR (>1300 nm) - „Regiunea apei”
   FLO > UNI > CAI > COR > FAN

Această abordare reprezintă o „piatră Rosetta” spectrală pentru ecologia plantelor. Instrumentul nostru descifrează semnătura spectrală a luminii de la nivelul frunzei, dezvăluindu-i strategia ecologică fundamentală privind utilizarea resurselor și toleranța la stres. Această trecere de la observarea lentă la predicția instantanee are implicații profunde. Pentru specialiștii în conservare, permite evaluări rapide ale vulnerabilității populațiilor sălbatice. Pentru agricultură, oferă o metodă de screening cu randament ridicat, menită să accelereze ameliorarea culturilor pentru rezistența la schimbările climatice. Prin traducerea limbajului spectral al frunzelor, lucrarea noastră oferă un instrument util pentru a prognoza plasticitatea sau adaptabilitatea unei specii. Într-o lume care are nevoie de răspunsuri, acest instrument ne permite să decodăm limbajul frunzelor, transformând reflectanța lor spectrală în strategii aplicabile în practică, pentru reziliență globală.