**CZU: 528.8:631.147:004.6** **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.29**

# COMPARAREA SENZORILOR MULTISPECTRALI (MICASENSE, PARROT SEQUOIA, SENTERA) ȘI ELABORAREA UNEI BAZE CALIBRATE DE IMAGINI

# COMPARISON OF MULTISPECTRAL SENSORS (MICASENSE, PARROT SEQUOIA, SENTERA) AND DEVELOPMENT OF A CALIBRATED IMAGE DATABASE

**Valentina TÎRȘU**[1] email: valentina.tirsu@tse.utm.md ORCID ID: 0000-0002-1726-792X
**Alisa MAȘNIC**[2] email: alisa.masnic@tlc.utm.md ORCID ID: 0000-0001-9202-7144
**Nelea MANIN**[3] email: nelea.manin@tse.utm.md ORCID ID: 0009-0009-7651-8475

[1,2,3]Universitatea Tehnică a Moldovei

***Abstract.*** *In precision agriculture, multispectral images collected by drones represent an essential source of information for assessing plant health, chlorophyll content, water stress, and crop productivity. However, the quality and comparability of these data largely depend on the characteristics of the sensors used, such as spectral sensitivity, radiometric calibration, spatial resolution, and stability under variable lighting conditions. The aim of the project is the comparative evaluation of the performance of multispectral sensors (MicaSense, Parrot Sequoia, Sentera) in collecting data over the same agricultural areas and the development of a calibrated database containing radiometrically and spectrally standardized images.*
***Keywords:*** *Multispectral images; multispectral sensors; vegetation indices; pseudo-image; histogram.*

## Introducere

Originile agriculturii de precizie pot fi urmărite începând cu anii 1980, perioadă în care au fost introduse primele aplicații bazate pe senzori pentru evaluarea proprietăților fizice ale solului și ale biomasei. Ulterior, aceste tehnici au cunoscut o diversificare semnificativă, incluzând în prezent imagini satelitare, imagini aeriene obținute cu avioane sau drone, precum și echipamente terestre specializate pentru determinarea poziționării [1]. Pentru valorificarea optimă a informațiilor provenite din domeniul multispectral, a fost dezvoltat un set extins de indici de vegetație [2], care permit evaluarea stării vegetative a culturilor agricole. Acești indici contribuie la identificarea timpurie a stresului biotic și abiotic, facilitând luarea unor decizii informate privind intervențiile agricole. În plus, integrarea lor în sistemele moderne de monitorizare contribuie la îmbunătățirea eficienței gestionării resurselor și la creșterea sustenabilității producției agricole. Indicele de Diferență a Vegetației (DVI) este unul dintre cei mai simpli indici de vegetație, fiind bazat pe diferența dintre reflectanța în banda infraroșu apropiat și cea în banda roșie. Vegetația sănătoasă reflectă mai mult în infraroșu și mai puțin în roșu, ceea ce conduce la valori ridicate ale indicelui. DVI este util pentru a distinge zonele acoperite de vegetație de cele lipsite de vegetație. Raportul Simplu (SR) reprezintă raportul dintre reflectanța în infraroșu apropiat și reflectanța în banda roșie. Acest indice evidențiază vegetația prin valori ridicate și reduce influențele umbrei și ale împrăștierii atmosferice. SR este frecvent utilizat pentru a evalua densitatea și dezvoltarea vegetației dintr-o anumită zonă. Indicele Normalizat de Diferență a Vegetației (NDVI) este unul dintre cei mai răspândiți indici de vegetație, datorită modului său de calcul care normalizează diferențele de reflectanță și minimizează efectele condițiilor de iluminare. NDVI oferă informații clare despre starea și vigoarea vegetației, fiind un instrument esențial în monitorizarea culturilor și a ecosistemelor [10].




**Figura 1. Parcelă agricolă și pseudo-imaginea NDVI corespunzătoare.**

Valorile indicelui NDVI se situează în intervalul -1 până la 1. Acest indice oferă informații relevante privind densitatea și vigoarea vegetației și contribuie la reducerea influențelor topografice asupra interpretării datelor. Totodată, NDVI permite separarea clară între suprafețele vegetale și cele lipsite de vegetație, precum solul sau alte substraturi. Valori apropiate de 1 indică prezența unei vegetații sănătoase și bine dezvoltate, în timp ce solul expus prezintă, în mod tipic, valori cuprinse între 0,1 și 0,2. Valorile negative sau apropiate de -1 sunt specifice bazinelor acvatice. Calculul indicelui normalizat de diferență a vegetației este relativ simplu și urmează scala ilustrată în figura 1. Utilizarea NDVI reprezintă o metodă eficientă pentru cuantificarea vegetației verzi și pentru evaluarea stării acesteia, întrucât se bazează pe diferențele de reflectanță ale plantelor la anumite lungimi de undă ale radiației electromagnetice. Domeniul de variație al NDVI rămâne același, între -1 și 1. Valorile negative indică prezența apei, cele apropiate de zero (aproximativ -0,1 până la 0,1) caracterizează suprafețe precum roca, nisipul sau zăpada, iar valorile pozitive reduse sunt asociate vegetației rare, precum arbuștii și pajiștile (0,2–0,4). Valorile ridicate, apropiate de 1, sunt caracteristice formațiunilor forestiere dense, precum pădurile.

**Crearea bazei de imagini calibrate**

Procesul de construire a unei baze multispectrale standardizate presupune parcurgerea mai multor etape esențiale: captarea imaginilor în condiții controlate, calibrarea radiometrică și geometrică, generarea indicilor de vegetație și organizarea metadatelor într-un sistem coerent. Importanța acestor etape este prezentată pe larg în literatura de specialitate, în special în lucrările axate pe teledetecție agricolă și prelucrarea imaginii multispectrale [1], [3], [6]. În practică, întregul flux începe chiar din teren, în momentul în care drona se ridică și surprinde primele cadre ale culturilor. Orice diferență de lumină, un unghi nepotrivit sau o setare greșită poate afecta precizia rezultatelor finale, motiv pentru care fiecare captură este tratată cu grijă [4], [7]. În etapa de calibrare, imaginile trec printr-un proces atent de corectare, unde valorile brute sunt transformate în informații reale despre modul în care plantele reflectă lumina. Este un pas tehnic, dar esențial, pentru că doar astfel imaginea capătă un sens dincolo de ceea ce se vede la suprafață [3], [6]. Ulterior, datele sunt ordonate și structurate, astfel încât fiecare imagine să își găsească locul potrivit în sistem. Indicii de vegetație sunt generați și adăugați în baza de date, iar metadatele—coordonate GPS, momentul capturii, senzorul folosit—sunt asociate fiecărui fișier, asemenea unei cărți de identitate care spune povestea imaginii [5], [9]. Pe măsură ce toate aceste elemente sunt reunite, baza de date capătă formă.

Dincolo de aspectul tehnic, ea devine o hartă inteligentă a terenului, un tablou digital în care fiecare pixel are un rol și fiecare valoare reflectă starea reală a culturilor. Astfel, procesul nu este doar o succesiune de pași tehnici, ci o reconstrucție fidelă a realității din câmp, transpusă în date care pot fi analizate, comparate și interpretate cu precizie [1], [9].

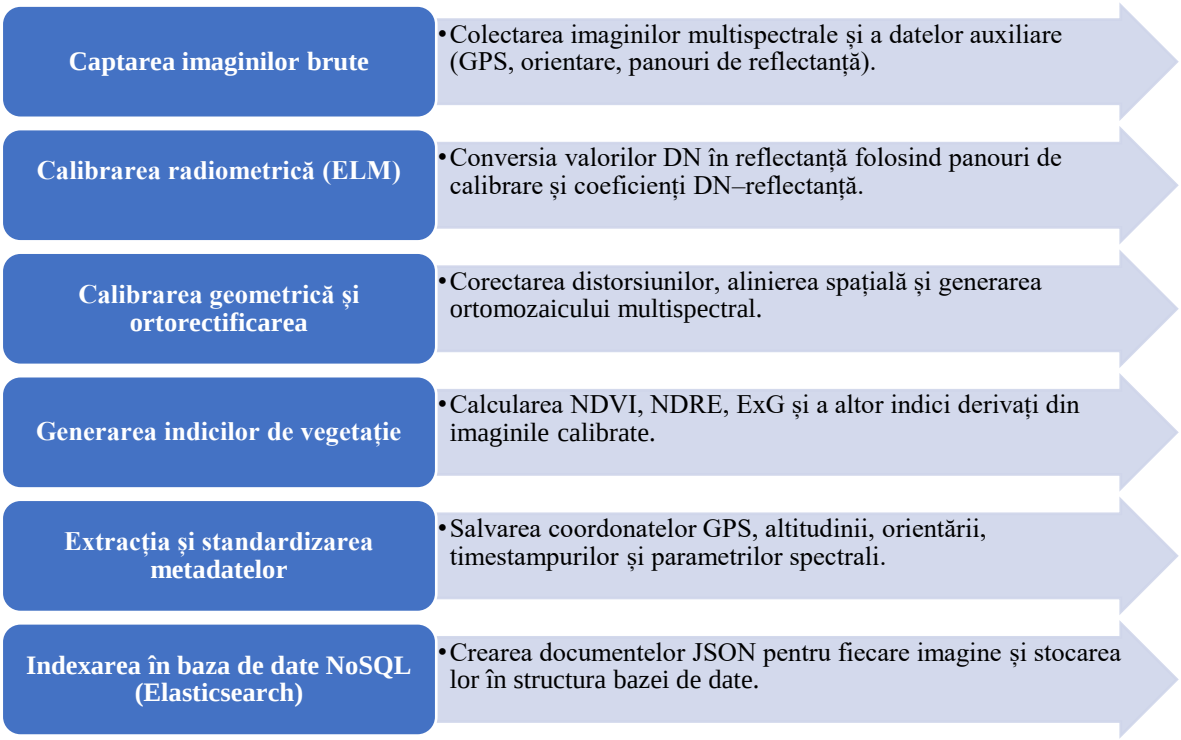



**Figura 2. Fluxul de pregătire a imaginilor pentru baza de date.**
**Sursa: elaborată de autori**

Figura prezintă lanțul complet de procesare prin care o imagine multispectrală trece înainte de a ajunge în baza de date. Procesul începe cu achiziția imaginilor brute împreună cu toate informațiile auxiliare necesare. Aceste date sunt apoi corectate radiometric și geometric pentru a obține o reprezentare fidelă a realității din teren. După calibrare, din imaginile procesate sunt generați indicii de vegetație care dezvăluie starea culturilor. În paralel, toate metadatele sunt extrase, standardizate și pregătite pentru stocare. Fluxul se încheie prin indexarea fiecărui element — imagini, indici și metadate — în baza de date Elasticsearch, unde devin ușor de căutat, analizat și vizualizat.

**Calibrarea radiometrică** este etapa prin care valorile brute înregistrate de senzor (DN) sunt convertite în reflectanță spectrală, pentru a permite compararea imaginilor obținute în condiții diferite de iluminare sau cu senzori diferiți — un principiu documentat în mod detaliat în literatura recentă. În acest studiu a fost utilizată metoda **Empirical Line Method (ELM)**, care stabilește o relație directă DN–reflectanță pe baza panourilor de calibrare fotografiate înainte și după zbor [3], [4], [6], [7].

Procesul include trei pași principali: (1) captarea panourilor de reflectanță cu valori spectrale cunoscute; (2) determinarea funcției de regresie DN–reflectanță pentru fiecare bandă spectrală; (3) aplicarea coeficienților obținuți tuturor pixelilor pentru generarea imaginilor calibrate în format TIFF. Rezultatul este un set de imagini standardizate, compatibile între senzori și sesiuni de zbor diferite, pregătite pentru calculul indicilor de vegetație și pentru integrarea în baza de date Elasticsearch.

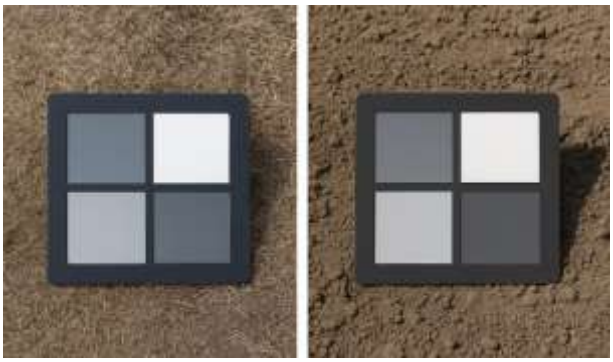


**Figura 3. Panourile de reflectanță utilizate în calibrare.**

Figura prezintă panourile de calibrare în nuanțe alb, gri și negru utilizate în procesul de corecție radiometrică. Aceste panouri sunt fotografiate în aceleași condiții de iluminare ca imaginile din teren, oferind referințe stabile pentru calcularea coeficienților de conversie DN–reflectanță.

**Calibrarea geometrică** este etapa în care imaginile multispectrale sunt corectate din punct de vedere spațial, astfel încât fiecare pixel să corespundă exact poziției sale reale din teren, un proces bine documentat în studiile privind fotogrammetria multispectrală UAV [6]. Deoarece imaginile brute pot prezenta distorsiuni cauzate de lentilă, mișcarea dronei, altitudine variabilă sau unghiuri de captare diferite, această prelucrare este esențială pentru a obține produse cartografice fiabile.

Pentru realizarea corecțiilor au fost utilizate trei aplicații specializate: PIX4Dfields, PIX4Dmapper și ArcGIS Pro. În PIX4D, imaginile sunt procesate pentru:

- corectarea distorsiunilor optice ale camerei,
- ajustarea poziției imaginii folosind datele GPS din metadate,
- compensarea variațiilor de altitudine și orientare,
- reconstruirea suprafeței terenului prin puncte-cheie și nori de puncte,
- generarea unui ortomozaic multispectral georeferențiat.

Ortomozaicul rezultat este un strat spațial uniform, în care distorsiunile au fost eliminate, iar fiecare pixel este aliniat la coordonatele sale reale, lucru esențial pentru suprapunerea cu alte date GIS sau cu imagini satelitare precum Sentinel-2.



**Figura 4. Ortomozaic multispectral.**

Cele două imagini arată aceeași parcelă agricolă, surprinsă din dronă. În fotografia din stânga, rândurile de cultură sunt clare și bine aliniate, culorile sunt uniforme, iar scena pare mai ordonată — semn că imaginea a fost deja procesată. În schimb, imaginea din dreapta păstrează aspectul „brut": este mai contrastată, unele rânduri par ușor deformate, iar iluminarea nu este uniformă. Privite împreună, fotografiile arată foarte bine diferența dintre o captură inițială și versiunea corectată geometric.

După finalizarea calibrării radiometrice și geometrice, imaginile multispectrale sunt procesate pentru a **extrage indici de vegetație** relevanți pentru analiza sănătății culturilor. Acești indici se bazează pe raporturi între diferite benzi spectrale și permit evidențierea variațiilor fiziologice ale plantelor mult mai bine decât imaginile RGB tradiționale.

În acest studiu au fost generați următorii indici:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – cel mai utilizat indice pentru evaluarea vigorii vegetației și diferențierea zonelor sănătoase de cele afectate. Unul dintre cei mai vechi și importanți indici, introdus și analizat extensiv în lucrări clasice [2], respectiv revizuit în analize recente [8].
- NDRE (Normalized Difference Red Edge) – sensibil la variațiile de clorofilă și eficient în etapele târzii de creștere, când NDVI se poate satura [1], [9].
- GNDVI (Green NDVI) – util pentru evaluarea nivelului de azot și a densității coronamentului [1], [9].
- Excess Green (ExG) – folosit de senzorii Sentera pentru detecția buruienilor și a vegetației neuniforme [9].
- VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) – rezistent la variațiile de iluminare, ideal pentru scene captate în condiții atmosferice schimbătoare, aspect confirmat în literatura tehnică [4], [7].

Figura 5 prezintă trei dintre cei mai relevanți indici rezultați în urma procesării multispectrale. Harta NDVI evidențiază diferențele de vigoare între rândurile de cultură; NDRE scoate în evidență variațiile subtile ale conținutului de clorofilă; iar ExG separă vizual vegetația de sol, accentuând zonele cu densitate slabă sau infestări cu buruieni. Împreună, aceste hărți oferă o imagine completă asupra sănătății culturilor.

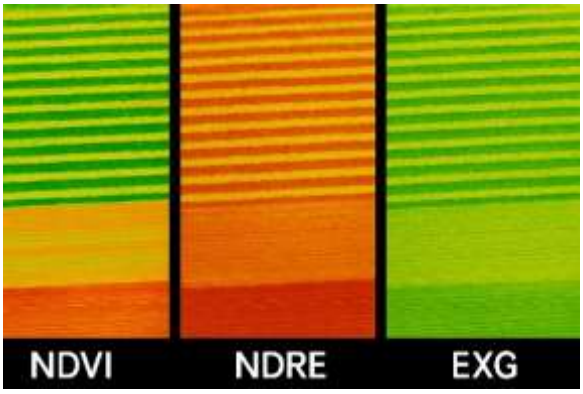



**Figura 5. Hărți generate: NDVI, NDRE și ExG.**

### Structura bazei de imagini

Figura 6 prezintă, într-o formă simplă și clară, modul în care este organizată baza de imagini calibrate. În centru se află folderul principal, care adună la un loc toate datele utilizate în proiect.

Aici sunt păstrate imaginile brute provenite de la cei trei senzori — MicaSense, Parrot Sequoia și Sentera — alături de imaginile calibrate și transformate în valori de reflectanță pentru fiecare bandă spectrală. Tot în această structură sunt incluse hărțile indicilor de vegetație, cum ar fi NDVI și NDRE, precum și metadatele salvate în format JSON, care conțin informații esențiale despre poziția, momentul și condițiile fiecărei capturi. Fișierele GeoJSON completează baza, permițând reprezentarea spațială a datelor în aplicații GIS.

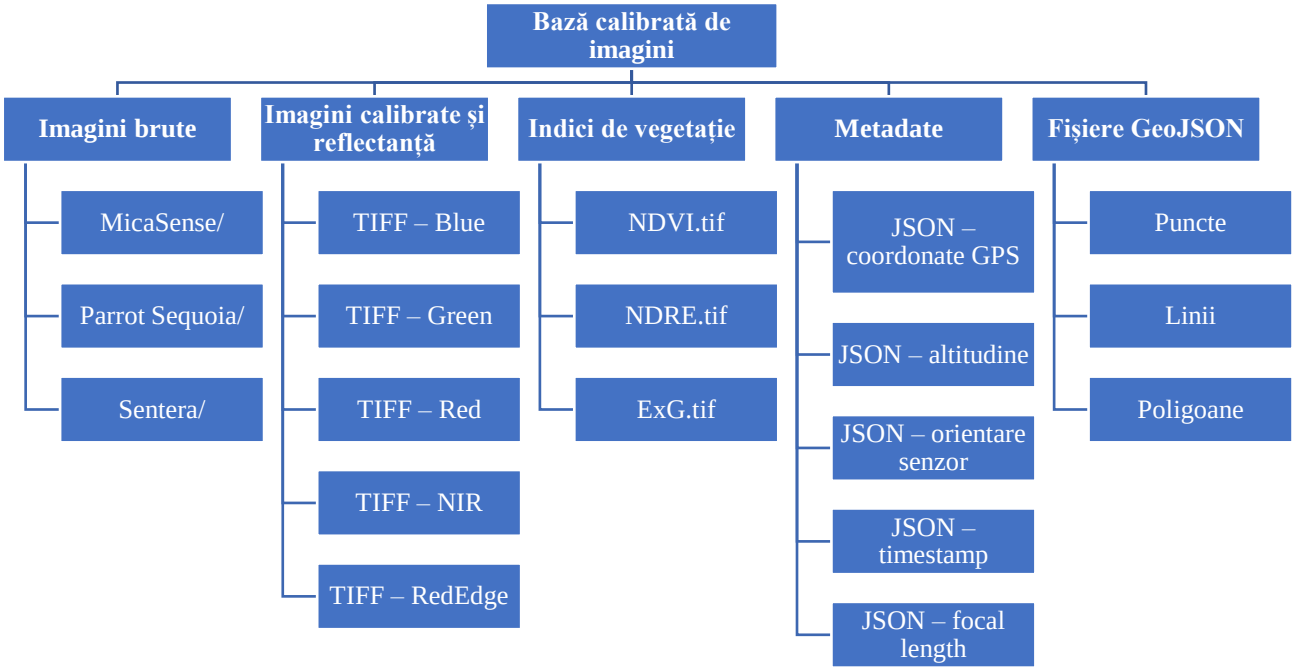



**Figura 6. Structura logică a bazei NoSQL (Elasticsearch).**
**Sursa: elaborată de autori în baza documentației Elasticsearch Documentation**

În partea de jos, figura oferă un exemplu de document JSON utilizat în Elasticsearch, unde fiecare imagine este descrisă prin senzori, benzi, coordonate și indici calculați. În ansamblu, figura arată cum toate aceste elemente se leagă între ele pentru a forma o bază de date coerentă, ușor de explorat și optimizată pentru analiză.

***Validarea bazei de imagini*** este momentul în care ne asigurăm că tot ceea ce am colectat și prelucrat chiar reprezintă realitatea din teren. Practic, este pasul în care verificăm dacă imaginile multispectrale obținute cu drona „spun adevărul” și dacă pot fi folosite cu încredere în analiză. Pentru aceasta, am comparat semnăturile spectrale din imaginile UAV cu cele din imaginile satelitare Sentinel-2, un sistem recunoscut pentru acuratețea și stabilitatea sa. Dacă profilul spectral al culturilor arată la fel în ambele surse, înseamnă că toate calibrările făcute — radiometrică, geometrică și de aliniere — au funcționat corect [6], [7]. Pe scurt, validarea este o verificare finală care ne spune: *„da, datele sunt coerente, precise și poți construi analize pe ele fără griji”*. După acest pas, baza de imagini poate fi folosită în siguranță pentru hărți NDVI, monitorizarea culturilor sau orice altă analiză agricolă sau GIS.

O bază multispectrală calibrată face analiza culturilor mult mai sigură și mai ușor de interpretat. Pentru că toate imaginile sunt aduse la același nivel de reflectanță, putem compara sincer datele provenite de la senzori diferiți, fără influența luminii sau a setărilor camerei.

În plus, experimentul poate fi repetat oricând, iar rezultatele rămân comparabile în timp, ceea ce ajută enorm la urmărirea evoluției culturilor. Datele astfel pregătite se integrează ușor în sisteme Big Data și pot alimenta algoritmi de inteligență artificială, care învață mai precis să recunoască semnele de stres vegetal. În final, baza calibrată devine o resursă solidă, pe care te poți baza pentru orice analiză sau decizie agricolă.

**Concluzii**

Calibrarea riguroasă a imaginilor multispectrale transformă datele brute în informații coerente și comparabile, oferind o imagine fidelă a stării reale a culturilor. Integrarea indicilor de vegetație și organizarea metadatelor într-o bază unitară sprijină analize precise și permite monitorizarea evoluției culturilor în timp. Validarea prin comparație cu date Sentinel-2 confirmă acuratețea întregului flux, consolidând utilitatea practică a bazei multispectrale calibrate atât în cercetare, cât și în aplicațiile agricole. Monitorizarea continuă a stării culturilor la nivel regional este esențială pentru investitorii privați care urmăresc creșterea productivității agricole. Imaginile multispectrale și indicii de vegetație permit identificarea timpurie a stresului hidric și a altor factori care afectează plantele, susținând adoptarea tehnologiilor moderne în agricultură pentru a răspunde provocărilor actuale.

Rezultatele cercetării pot fi valorificate în mod direct:

- în laboratoarele universitare, pentru instruirea studenților în teledetecție aplicată;
- de fermieri și companii agricole, pentru alegerea senzorului optim în funcție de cultură și buget;
- de centrele de cercetare, pentru dezvoltarea unor baze de date calibrate la nivel regional.

**Bibliografie:**


1. MULLA, D. J., Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems engineering, 114(4):358-371, 2013.
2. JACKSON, R. D., HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. Preventive veterinary medicine, 11 (3-4):185-200, 1991.
3. HOLMAN, F. H., et al. "Radiometric Calibration of 'Commercial Off the Shelf' UAV Imagery." *Remote Sensing*, vol. 11, no. 14, 2019. Disponibil: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/14/1657 MDPI.
4. SWAMINATHAN, V., et al. "Radiometric calibration of UAV multispectral images under variable illumination conditions." *Plant Pathology Journal* (sau alt jurnal relevant), 2024. Disponibil:https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppj2.70005acsess.onlinelibrary.wiley.com.
5. DI GENNARO, S. F., et al. "Spectral Comparison of UAV-Based Hyper and Multispectral Cameras for Precision Viticulture." 2022. Disponibil: https://iris.cnr.it/retrieve/3cc23df4-4dc9-434c-abad-41-7850d08381/prod_463485-doc_181632.pdf iris.cnr.it.
6. ZHU, H., et al. "Assessing radiometric calibration methods for multispectral UAV-based remote sensing for precision agriculture: a comparison between different cameras." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024. Disponibil: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/-pii/S0168169924002126 ScienceDirect.
7. WANG, Y., Kootstra, G., Yang, Z., et al. "UAV multispectral remote sensing for agriculture: A comparative study of radiometric correction methods under varying illumination conditions." *Biosystems Engineering*, vol. 248, November 2024. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.11.005. Disponibil:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751102400240X.
8. HUANG, S. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI). *Journal of Forestry Research*, 2020. Disponibil: https://journal.hep.com.cn/jfr/EN/10.1007/s11676-020-01155-1 journal.hep.com.cn
9. LUO, S., et al. "Multispectral remote sensing for accurate acquisition of rice phenotypes." *Frontiers in Plant Science*, 2022. Disponibil: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.33-89/fpls.2022.958106/full Frontiers.
10. MAȘNIC, A., et al. Vegetation and water body inspection and monitoring using multispectral drone imagery, 13th International Conference on ELECTRONICS, Communications and Computing, October, 2024, ISBN 978-9975-64-480-8. Disponibil: Vegetation and water body inspection and using multispectral drone imagery.

**Finanțare:** Această lucrare a fost finanțată prin proiectul Ministerului Educației și Cercetării din Republica Moldova, intitulat „Sisteme satelitare și platformă pentru monitorizarea plantațiilor și a suprafețelor acvatice utilizând tehnologii spațiale și drone", cod 020401.