

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris
C.Z.U.: 631.452(478)

ILUȘCA MARINA

**EVALUAREA FERTILITĂȚII SOLURILOR
ÎN REPUBLICA MOLDOVA
(CU FOLOSIREA ANALIZEI SPECTRALE)**

SPECIALITATE: 411.01 – AGROTEHNICA

Rezumatul tezei de doctor în științe agricole

CHIȘINĂU, 2023

Teza a fost elaborată în cadrul laboratorului „Tehnologii agricole și sisteme agrotehnice” al IP Institutul de Cercetări pentru Culturile de Câmp „Selecția”, mun. Bălți

Conducător științific:

BOINCEAN Boris, membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat, profesor cercetător

Consultant științific:

SCHMIDHALTER Urs, doctor habilitat, profesor, Universitatea Tehnică din München, Germania

Componența Comisiei de Susținere Publică a Tezei de Doctorat:

RUSU Teodor – doctor, profesor universitar, UȘAMV Cluj-Napoca, România, *președinte*

DUBIȚ Daniela – doctor, conferențiară universitară, UTM, *secretar științific*

BOINCEAN Boris – doctor habilitat, profesor cercetător, membru corespondent AȘM, ICCC „Selecția”, *membru*

POPOV Leonid – doctor, conferențiar cercetător, IPAPS „Nicolae Dimo”, *membru*

CERBARI Valerian – doctor habilitat, profesor universitar, IPAPS „Nicolae Dimo”, *referent oficial*

DENT David – doctor, cercetător independent (Marea Britanie) *referent oficial*

HU Yuncai – doctor habilitat, Universitatea Tehnică din München (Germania), *referent oficial*

Susținerea va avea loc la 19.04.2023, ora 11:00, în ședința Comisiei de Susținere Publică a Tezei de Doctorat din cadrul Școlii Doctorale a Universității Tehnice a Moldovei (aprobată prin decizia Consiliului Științific UTM, proces-verbal nr. 2 din 24.02.2023), mun. Chișinău, MD-2049, str. Mircești 48, et. 2, aula A-211.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a ANACEC (www.cnaa.md).

Secretar al Comisiei de Doctorat,

DUBIȚ Daniela, dr., conf. univ. _____

Conducător științific

BOINCEAN Boris, membru coresp. AȘM, dr. habil., prof. cerc. _____

Autor

ILUȘCA Marina _____

CUPRINS

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
SINTEZA CAPITOLELOR	7
1. FERTILITATEA SOLULUI ȘI METODELE DE EVALUARE (DISTRUCTIVE ȘI NEDISTRUCTIVE)	7
2. CONDIȚIILE ȘI METODELE DE CERCETARE	7
2.1. Condițiile meteorologice.....	7
2.2. Arealul studiat și prelevarea profilelor de sol	7
2.3. Analiza spectroscopică de absorbție în regiunea infraroșu apropiat.....	8
2.4. Analizele chimice de referință	8
3. EFICACITATEA METODEI DE ANALIZĂ SPECTROSCOPICĂ DE ABSORBȚIE ÎN REGIUNEA INFRAROȘU APROPIAT	9
3.1. Compoziția chimică și fizică a datelor de referință	9
3.2. Procesarea datelor spectrale	9
3.3. Crearea modelelor de predicție	9
3.3.1. <i>Calibrarea și modelele de predicție la nivel zonal</i>	10
3.3.2. <i>Calibrarea și modelele de predicție la nivel local</i>	14
4. ANALIZA COMPARATIVĂ A FERTILITĂȚII SOLURILOR DIN ZONA DE NORD A MOLDOVEI DUPĂ DIFERIȚI INDICATORI	17
5. STUDIAREA VARIABILITĂȚII ORIZONTALE A PROPRIETĂȚILOR SOLULUI	21
6. EVALUAREA PRACTICILOR AGRICOLE DE MANAGEMENT A SOLULUI.....	24
6.1. Influența rotației culturilor, sistemului de lucrare și fertilizare a solului asupra indicatorilor fertilității solului.....	24
6.2. Producția culturilor de câmp în experiența polifactorială.....	24
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	27
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	29
LISTA PUBLICAȚIILOR ȘTIINȚIFICE	32
ADNOTĂRI	33

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea și importanța temei de cercetare. Practicarea agriculturii de precizie, numită și managementul specific locației, își propune să utilizeze cunoașterea variațiilor solului în câmp pentru gestionarea acestuia prin utilizarea diferențiată a dozelor de îngrășăminte, pesticide, normelor de semănat etc. [22; 26; 39]. Ajustarea intrărilor în funcție de heterogenitatea câmpului, va asigura o folosire rațională a substanțelor nutritive și a apei de către plante [8], obținându-se atât beneficii economice, cât și ecologice. Datorită progresului tehnologic din ultimii 20 de ani a sistemelor de navigație globală prin satelit (GNSS), sistemelor informatice geografice (GIS) și a tehnicilor de aplicare diferențiată a inputurilor, ajustarea lor este automatizată în câmp, însă colectarea datelor necesare la un cost rezonabil a rămas o provocare [39].

Totodată, pentru determinarea eficienței diferitor practici de management a solului, precum și studierea variațiilor în proprietățile solului în cadrul câmpului, și în special pentru conținutul de C și N, este necesar să se mărească numărul de probe de sol prelevate pe un câmp. Practicile obișnuite de a combina câteva subprobe pentru formarea unei probe medii nu dau un rezultat de încredere, iar efectuarea analizelor de laborator clasice pe toate probele necesită timp și nu este viabilă din punct de vedere economic, ceea ce face dificil pur și simplu de a intensifica practicile existente de cartografiere a solului. Astfel, o tehnică eficientă care să permită prelevarea rapidă și densă spațial la costuri mai mici este necesară pentru obținerea de informații detaliate despre proprietățile solului la nivel de câmp, local, dar și pentru monitorizarea la nivel de landșaft a zonelor geografice largi [41].

În acest scop, analiza solului prin utilizarea *spectroscopiei de absorbție în regiunea infraroșu apropiat (NIRS)*, în continuare denumită metoda NIRS, este considerată o alternativă de a îmbunătăți sau de a înlocui parțial metodele convenționale de analiză în laborator a solului. Metoda este rapidă, rentabilă, nedistructivă, nu are nevoie de substanțe chimice periculoase și mai mulți constituenți pot fi estimați simultan [3; 17; 26; 35; 36]. Această tehnică analitică implică măsurarea reflectanței difuze în regiunea infraroșu apropiat (NIR) a spectrului electromagnetic, definită ca lungimi de undă între 780 și 2500 nm, și corelarea acesteia cu proprietățile chimice și fizice ale solului [9; 39]. Spectrele reflectanței difuze a solului rezultă de la îndoirea, răsucirea, întinderea sau forfecarea diferitor legături chimice (de exemplu CH, OH, NH) sub radiația din domeniul infraroșu apropiat, care conține informații utile despre compoziția chimică a solului, în special despre materia organică a solului [40].

Gradul de studiere a temei abordate. Cercetările propuse care au la bază utilizarea metodei NIRS pentru analiza solului sunt noi pentru Republica Moldova, dar această practică

este utilizată pe larg în Germania de către Universitatea Tehnică din München (Prof. Urs Schmidhalter), precum și de alte universități și instituții de cercetare din lume.

O serie de studii au demonstrat potențialul NIRS de a estima proprietățile solului, precum textura solului [1; 5; 6; 12; 17; 18; 26; 33; 41], conținutul carbonului total, carbonului organic din sol (COS), materiei organice din sol (MOS), azotului (N) total și organic, sau pH-ul solului [5; 10; 11; 20; 21; 23; 24; 27; 28; 29; 30; 31; 36; 38; 42].

Luând în considerație că în Republica Moldova lipsesc informații spațiale despre sol, fie din cauza infrastructurii oficiale limitate sau lipsa acestora, fie și a resurselor extrem de limitate pentru efectuarea cercetărilor pedologice extinse, este necesară abordarea acestui subiect și documentarea stării fertilității solului. Avantajele metodei NIRS, oferă o posibilă soluție viabilă cu cheltuieli rezonabile pentru a îmbunătăți situația. Totodată, cunoașterea detaliată a conținutului de MOS este imperativă pentru a face față provocărilor de atenuare și adaptare la schimbările climatice, având în vedere importanța stocării MOS în sol [16].

Datele spectrale ale solurilor cenușii și cernoziomurilor din zona de Nord a Moldovei acumulate prin acest studiu este un prim pas în crearea unei biblioteci spectrale a proprietăților solurilor la nivel național, cu folosirea unui protocol uniformizat pentru analizele chimice și spectrale, pe modelul bazei de date LUCAS a solurilor Uniunii Europene [19; 28; 32], precum și a altor modele de baze de date și biblioteci spectrale a solurilor din lume [7; 25; 37]. Totodată, această inițiativă va permite extinderea domeniului de aplicare a metodei NIRS și dezvoltarea practicilor agriculturii de precizie în Republica Moldova. Datele vor permite, de asemenea, o abordare diferențiată a managementului solului, luând în considerare particularitățile fertilității solului specifice locației. Ca urmare, va fi posibilă realizarea unei hărți digitale a solului pentru diferite regiuni ale Moldovei prin utilizarea unei noi metode de analiză a solului. Aceasta va servi drept bază inițială pentru un viitor sistem de monitorizare a calității solului în Republica Moldova, fapt ce va permite o mai bună armonizare a agriculturii Moldovei cu cerințele practicilor agricole de producere a alimentelor în Europa.

Scopul cercetării constă în studierea potențialului spectroscopiei de absorbție în regiunea infraroșu apropiat (NIRS) în estimarea indicatorilor agrofizici și agrochimici ai fertilității solului pe cernoziomurile și solurile cenușii din zona de Nord a Moldovei, pentru evaluarea și monitorizarea stării de calitate a acestora în timp.

Obiectivele cercetării: studierea evoluției în timp a fertilității solului și a factorilor cu impact asupra situației actuale în sectorul agricol; determinarea indicatorilor agrofizici și agrochimici principali ai fertilității solului prin metoda NIRS; estimarea preciziei modelului de predicție în dependență de variația tipului de sol și dimensiunea arealului geografic studiat;

analiza comparativă a indicatorilor agrofizici și agrochimici ai cernoziomurilor și solurilor cenușii din zona de Nord a Moldovei; evaluarea ponderii rotației culturilor, sistemelor de lucrare și fertilizare a solului în asolament asupra circuitului de MOS în sol, precum și în formarea nivelului de producție a diferitor culturi; studierea posibilității de utilizare a metodei NIRS în cartografierea variabilității spațiale a solului, la nivel de câmp sau gospodărie agricolă, în scopul sporirii preciziei în producerea agricolă și reducerii impactului negativ asupra mediului ambiant.

Ipoteza științifică. Spectroscopia NIR poate fi utilizată cu succes ca un instrument analitic rapid și cost-efectiv pentru monitorizarea managementului terenurilor agricole și evaluarea stării de calitate a solurilor cenușii și cernoziomurilor Republicii Moldova, sub influența agrotehnicii zonale aplicate de fermieri.

Metodologia cercetărilor științifice. Cercetările au fost efectuate conform metodelor de cercetare aprobate și recomandate în domeniul științei solului. S-au efectuat cercetări în teren și laborator, bazate pe descrieri morfologice, estimări spectroscopice, analize chimice de laborator, prelucrarea statistică a rezultatelor. Analizele indicatorilor agrochimici în probele de sol au fost efectuate în laboratorul Catedrei de Nutriție a Plantelor (*Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Wissenschaftszentrum Weihenstephan*) din cadrul Universității Tehnice din München, Germania, prin metode standard adoptate la nivel internațional. Analiza texturii solului a fost efectuată în laboratorul Departamentului Fizica solului al Centrului Bavarez de Stat de Cercetare în Agricultură (LfL – *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft*, Germania), în baza analizei standardizate KÖHN în conformitate cu standardul german DIN ISO 11277. Analiza spectrală a fost efectuată în laboratorul Centrului de Științe Agricole Hans Eisenmann (*HEZ – Hans Eisenmann-Zentrum für Agrarwissenschaften Weihenstephan*), din cadrul Universității Tehnice din München (Germania). Datele spectrale și rezultatelor obținute au fost analizate și procesate cu utilizarea software-ului Unscrambler®X 10.5 (CAMO Software AS) și Microsoft Excel 2010.

Aprobarea rezultatelor științifice. Rezultatele cercetărilor efectuate la tema tezei de doctor au fost prezentate, discutate și aprobate la ședințele Consiliului științific al IP ICCO „Selecția”, la ședințele Catedrei de Fitotehnie a Facultății de Agronomie din cadrul Universității Agrare de Stat din Moldova; la Colocviul Științific ”*Orientări actuale în cercetarea doctorală*” din 7 decembrie 2017, mun. Bălți; la Conferința științifică cu participare internațională „*Tradiție și inovare în cercetarea științifică*”, ediția a X-a, din 8 octombrie 2021; seminarul științific internațional în cadrul proiectului „*Sprijinirea schimbului de informații și a dezvoltării capacităților în domeniul cercetării agricole*” în cadrul Programului de parteneriat FAO-Turcia pentru alimentație și agricultură (FTPP II) din 12 octombrie 2022; precum și la ședințele Catedrei de Nutriție a Plantelor din cadrul Universității Tehnice din München (Germania).

SINTEZA CAPITOLELOR

Capitolul 1. **FERTILITATEA SOLULUI ȘI METODELE DE EVALUARE (DISTRUCTIVE ȘI NEDISTRUCTIVE)** reprezintă o sinteză a literaturii de specialitate în domeniul evaluării și monitorizării fertilității solului, fiind argumentată necesitatea determinării principalelor indicatori ai acesteia. Din toți indicatorii solului, materia organică poate fi manipulată în cea mai mare măsură. O atenție deosebită se acordă potențialului metodelor alternative, nedistructive de analiză a solului, în special, metodei NIRS, ca un instrument rapid și cost-efectiv pentru caracterizarea cu precizie a variabilității în câmp, pentru monitorizarea pe termen lung a modificării proprietăților solului sub influența agrotehnicii zonale aplicate.

2. CONDIȚIILE ȘI METODELE DE CERCETARE

2.1. Condițiile meteorologice

Anul agricol 2015-2016 a fost secetos, cu insuficiență de umiditate (-47,5 mm comparativ cu media multianuală), în special în primăvara (-10,3 mm) și vara (-45,3 mm) anului 2016. Anul agricol 2016-2017 a fost călduros, suma precipitațiilor fiind 444,6 mm, cu o repartizare neuniformă pe parcursul anului, cele mai secetoase fiind lunile iunie, iulie și septembrie. Anul agricol 2017-2018, s-a caracterizat printr-o perioadă cu deficit de precipitații în toamna anului 2017 și o perioadă secetoasă în primăvara anului 2018 (-21,8 mm).

2.2. Arealul studiat și prelevarea profilelor de sol

Cercetările științifice au fost efectuate pe terenurile agricole a 10 raioane din zona de Nord a Republicii Moldova, și anume: Briceni, Ocnîța, Dondușeni, Edineț, Drochia, Glodeni, Rîșcani, Florești, Soroca, Sîngerei, precum și pe câmpurile experimentale ale Institutului de Cercetări pentru Culturile de Cîmp „Selecția” din mun. Bălți. În urma studierii celor mai caracteristice subtipuri ale solurilor cenușii și cernoziomurilor din fiecare raion, au fost prelevate 84 profilele de sol. De asemenea, 36 profile de sol au fost prelevate de pe câmpul Nr. 3 al experienței polifactoriale de lungă durată din cadrul ICCC „Selecția”, care are ca scop optimizarea sistemelor de rotație a culturilor, de lucrare și fertilizare a solului în vederea reducerii cheltuielilor de producere, restabilirii efective a fertilității solului și adaptării la schimbările climatice. În experiență se studiază: ***două scheme de alternare a culturilor:*** (1) *cu ierburi perene și leguminoase:* Orz de toamnă → Lucerna+raigraș anul I de viață → Lucernă+raigraș anul II de viață → Lucernă+raigraș anul III de viață → Grâu de toamnă → Sfeclă de zahăr → Porumb la boabe; (2) *fără ierburi perene și leguminoase:* Mazăre la boabe → Grâu de toamnă → Floarea-soarelui → Porumb la masă verde → Grâu de toamnă → Sfeclă de zahăr → Porumb la boabe; ***două sisteme de lucrare a solului:*** (1) îmbinarea arăturii și afânării

solului; și (2) afânarea solului; și **trei sisteme de fertilizare a solului:** (a) fără îngrășăminte (martor absolut); (b) îngrășăminte organice; (c) îngrășăminte organice + minerale. Concomitent cercetările se petrec în semănăturile permanente a grâului de toamnă, orzului de toamnă, sfeclei pentru zahăr, florii soarelui și a porumbului pentru boabe pe fonduri analogice de lucrare și fertilizare a solului. În experiență se exclude folosirea substanțelor chimice în combaterea bolilor, dăunătorilor și buruienilor.

Profilele de sol au fost prelevate cu ajutorul unui burghiu Humax (Martin Burch AG, Switzerland), care le extrage în tuburi de plastic la adâncimea solului de 0-50 cm și 50-100 cm. Din orizonturile genetice ale celor 120 profile de sol au fost prelevate în total 554 probe de sol, care au fost uscate și cernute până la 2 mm.

2.3. Analiza spectroscopică de absorbție în regiunea infraroșu apropiat

Fiecare probă de sol a fost turnată într-un vas Petri și amplasată în celula cu sticlă de cuarț, iar lumina reflectată a fost măsurată de spectrofotometrul 6500 NIR Systems, echipat cu modul de transport vertical (Foss, NIR System, Silver Spring, Md). Măsurările reflectanței s-au produs la intervalele 400-700 nm (lumină vizibilă) și 700-2500 nm (regiunea infraroșu apropiat) lungimi de undă, cu 2 nm rezoluție spectrală, iar spectrele Vis-NIR fiind obținute ca absorbantă aparentă ($\log(1/\text{reflectanța})$). Scanarea, achiziția și colectarea datelor spectrale a fost efectuată utilizând software-ul ISIScan©.

În baza *analizei componentelor principale* (PCA) efectuată cu datele spectrale a 554 de probe de sol, probe reprezentative din variațiile spectrale observate s-au selectat pentru *setul de calibrare*. Probele pentru *setul de validare* au fost selectate în mod aleatoriu și diferă de cele utilizate pentru calibrare. În total, 234 probele de sol au fost supuse analizelor de determinare a proprietăților chimice și fizice prin metode clasice standard în laborator, ca date de referință.

2.4. Analizele chimice de referință

Conținutul C și N total a fost determinat prin metoda spectrometriei în masă (ANCA-MS), folosind spectrofotometrul în masă cu raportul izotopului în flux continuu Europa 20-20x după arderea la 1000°C în analizorul CN Europa ANCA-GSL. C organic a fost determinat prin metodă spectrometriei în masă ANCA-MS, după îndepărtarea carbonaților. Carbonații au fost îndepărtați prin metoda fumegării acide, ulterior, conținutul fiind calculat prin diferența C total și C organic. pH-ul solului a fost măsurat într-o soluție de sol și 0,01 M CaCl₂ la un raport de 1:2,5. Textura solului (fracțiile de argilă < 0.002 mm, praf 0.002-0.06 mm și nisip 0.06-2 mm) – prin metoda sedimentării, cu aparatul automat de măsurare SEDIMAT 4–12, pe baza analizei standardizate KÖHN conform standardului german DIN ISO 11277.

3. EFICACITATEA METODEI DE ANALIZĂ SPECTROSCOPICĂ DE ABSORBȚIE ÎN REGIUNEA INFRAROȘU APROPIAT

3.1. Compoziția chimică și fizică a datelor de referință

Probele de sol selectate pentru crearea modelelor de calibrare se caracterizează printr-o gamă variată în ceea ce privește conținutul de N total, C total, carbonați și pH-ul solului, și o variație moderată în ceea ce privește compoziția granulometrică. Aceasta a oferit posibilitatea testării influenței diversității solurilor asupra abilității metodei NIRS de a estima aceste proprietăți ale solului.

3.2. Procesarea datelor spectrale

Spectrele de absorbție neprelucrate (brute) ale celor 554 de probe de sol sunt ilustrate în figura 3.1. După formă, curbele spectrele sunt similare pentru toate probele de sol, deși, se observă o intensitate diferită de absorbție a unor spectre în regiunile luminii vizibile (Vis) și infraroșu apropiat (NIR) ale spectrului electromagnetic. Spectrele brute au fost supuse unui proces de transformare (figura 3.2) și atenuare, pentru a asigura o acuratețe și precizie mai bună a modelelor de regresie. Transformarea optimă a datelor spectrale s-a dovedit a fi *transformare derivativă de gradul 1 cu atenuarea Savitzky-Golay* de ordinul 2 polinomial și fereastra de căutare din 11 puncte de netezire (5 puncte în stânga și 5 puncte în dreapta), în cadrul comenzii „*Transform > Derivative > SG*” din software-ul Unscrambler®X 10.5 [16].

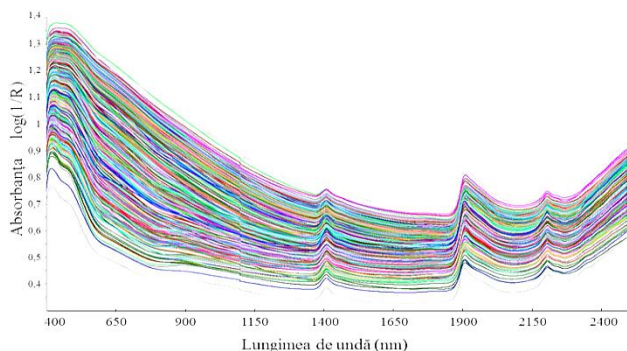


Fig. 3.1. Spectrele absorbantei brute în regiunile Vis și NIR a probelor de sol [16]

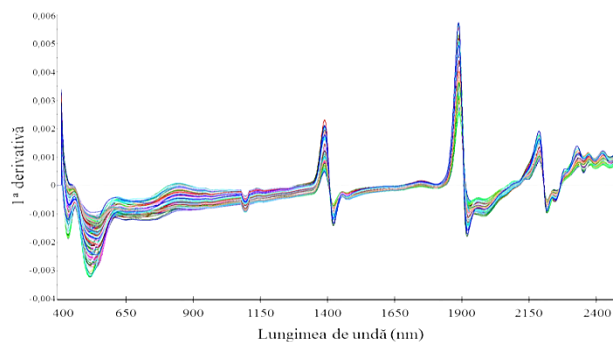


Fig. 3.2. Spectrele probelor de sol după procesul de transformare [13; 16]

Spectrele de absorbție ale probelor de sol au avut maxime de absorbție la cca. 1400, 1900 și 2200 nm, considerate a fi lungimi de undă importante pentru predicția C și N în sol. Astfel, în studiul acestei teze a fost utilizat doar intervalul spectral NIR de la 1110 la 2490 nm.

3.3. Crearea modelelor de predicție

Predicția proprietăților solului folosind reflectanța spectrală este realizată în baza unor modele statistice de calibrare. În elaborarea modelelor de calibrare a fost aplicat algoritmul de

regresie a celor mai mici pătrate parțiale (PLSR), care corelează datele spectrale ale solului cu datele de referință ale acestuia obținute prin metode clasice, și extrage informațiile despre indicatorii solului din spectrele de absorbție din regiunea NIR [13; 14]. Calibrarea cu algoritmul PLSR pentru modelarea predictivă a fost efectuat în cadrul comenzii „*Tasks → Analyze → PLSR*” din software-ul Unscrambler®X 10.5.

La etapa de calibrare, a fost aplicată o procedură internă de validare încrucișată (cross-validare) completă pentru optimizare, urmată de testarea și validarea modelului în baza setului de validare. Modelele au fost evaluate în baza: (1) *erorii medii pătrate de predicție* (RMSEP), care este folosit pentru măsurarea diferenței dintre valorile măsurate și prezise/estimate de model, (2) *coeficientului de determinare* (R^2), care reprezintă relația dintre valorile proprietăților solului estimate prin metoda NIRS și valorile de referință obținute prin analizele chimice clasice, și a (3) *raportului dintre performanță și deviere*, folosit pentru estimarea preciziei modelului [10]. Valoarea RPD reprezintă raportul dintre devierea standard (SD) a datelor de referință analizate prin metode standard pentru setul de validare la RMSEP. Cu cât valoarea RPD este mai mare, cu atât este mai mare probabilitatea ca modelele create să estimeze cu exactitate concentrațiile chimice ale probelor de sol. RMSE ar trebui să fie mai mic decât SD, iar RPD ar trebui, în mod ideal, să fie ≥ 4 [10]. Modelele de predicție cu cea mai mică valoare RMSEP, cel mai mare RPD și cel mai mare R^2 obținut la etapa validării au fost selectate și aplicate în predicția indicatorilor solului: N_{total} , C_{total} , $C_{organic}$, carbonați, pH-ul și textura solului pe tot setul probelor de sol.

3.3.1. Calibrarea și modelele de predicție la nivel zonal

Pentru crearea modelelor de calibrare universale la nivel zonal și predicția proprietăților țintă a solului, setul de date din 234 probe a fost împărțit în 137 de probe pentru setul de calibrare și 97 de probe – setul de validare. Ecuația de predicție a fost elaborată în baza setului de calibrare și a fost validată pe setul de validare [14].

Rezultatele obținute prin aplicarea tehnicii PLSR de calibrare sunt prezentate în figura 3.3, unde graficele de dispersie reflectă relația liniară între valorile de referință ale N_{total} , $C_{organic}$, $C_{carbonați}$, pH-ului, fracțiilor de argilă și nisip măsurate prin metode clasice față de valorile prezise prin metoda NIRS, la etapa de calibrare (albastru) și validare (roșu). Modelul ce oferă o potrivire bună, va genera un grafic în care punctele sunt aproape într-o linie dreaptă prin origine și cu panta (*slope*) aproape de valoarea 1 [14].

Conform graficelor prezentate, s-a constatat că majoritatea punctelor au căzut în vecinătatea liniei 1:1 pentru N_{total} , $C_{organic}$, $C_{carbonați}$, pH-ul solului și fracția de argilă (<0.002 mm), ceea ce indică o potrivire reușită; iar pentru fracția de nisip (0,06-2 mm) panta liniei de

regresie (*slope*) a fost semnificativ diferită de linia ideală 1:1. Calibrarea NIRS pentru conținutul fracției de nisip a demonstrat o dispersie mai mare a valorilor de la linia 1:1.

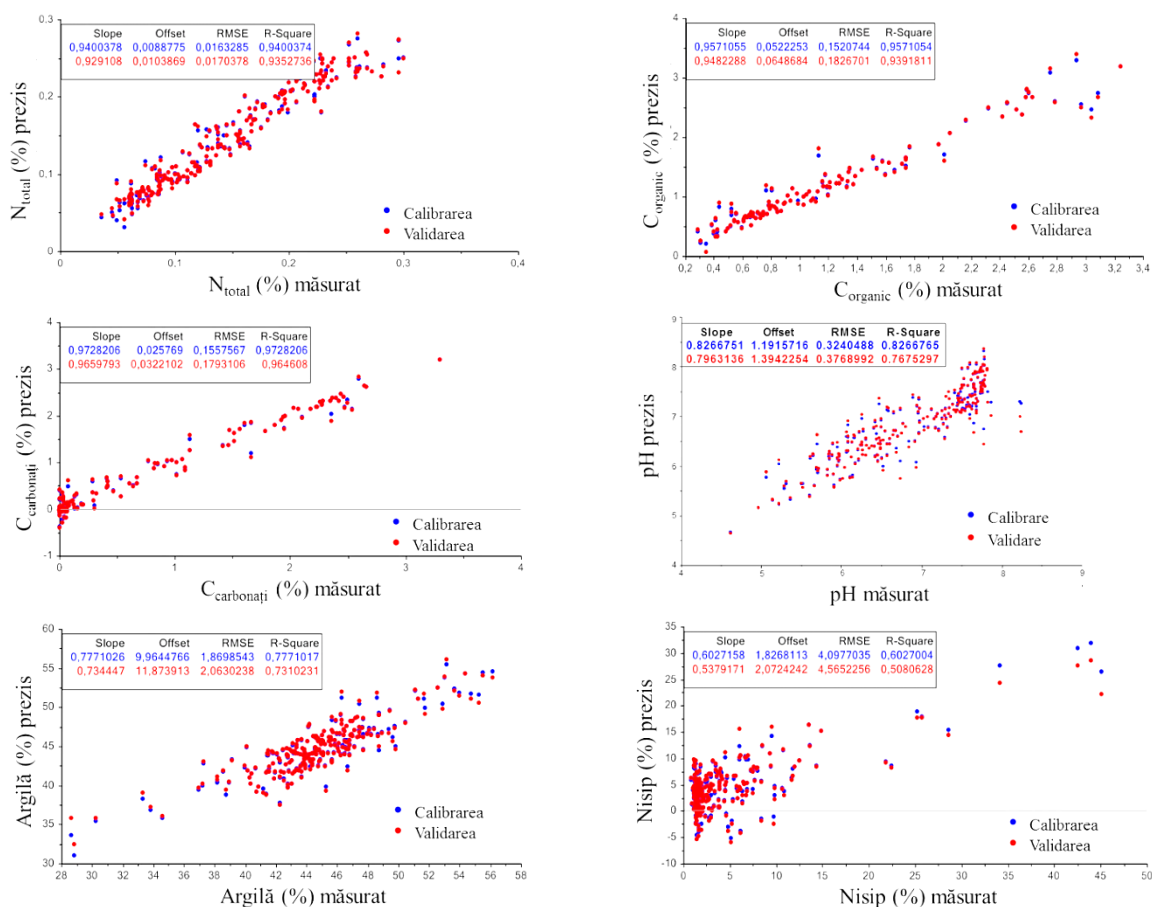


Fig. 3.3. Graficele dispersiei valorilor măsurate față de valorile prezise ale conținutului de N_{total}, C_{organic}, carbonaților, pH-ului și a fracțiilor de argilă și nisip a solului [13]

Performanța de predicție a modelelor de calibrare cu folosirea algoritmului PLSR și rezultatele validării modelelor pentru proprietățile solului investigate este prezentată în tabelul 3.1. Rezultatele obținute indică existența unei corelații puternice între spectrele NIR și indicatorii chimici măsuțați ai solului, însă o corelație slabă pentru unele fracții ale texturii solului [13].

Tabelul 3.1. Parametrii statistici ai modelului de calibrare și performanța predicției (validarea)

Indicatorii solului	Nr. de factori PLS	Calibrarea			Validarea		
		RMSE	R ²	RPD	RMSEP	R ²	RPD
N total, %	5	0,02	0,94	4,38	0,02	0,94	3,87
C total, %	7	0,22	0,92	3,64	0,24	0,90	3,17
C organic, %	5	0,15	0,96	5,75	0,18	0,94	4,60
C carbonați, %	6	0,16	0,97	5,41	0,18	0,96	4,32
pH (CaCl ₂)	9	0,32	0,83	2,34	0,38	0,77	2,16
Argilă (<0.002 mm), %	9	1,87	0,78	2,83	2,06	0,73	1,41
Praf (0.002-0.06 mm), %	10	2,71	0,66	1,85	3,22	0,52	1,20
Nisip (0.06-2 mm), %	9	4,10	0,60	1,58	4,57	0,51	1,04

Pentru N_{total} , C_{total} , $C_{organic}$, **carbonații și pH-ul solului**, performanța calibrării la etapa de validare a urmat o tendință similară ca și în validarea-încrucișată. Deși valorile R^2 au fost mai mici și valorile RMSEP mai mari decât valorile corespunzătoare din setul de calibrare, performanța predictivă nu s-a diferențiat mult. Astfel, cu o precizie excelentă s-a prezis conținutul de carbonați ($R^2 = 0,96$ și $RPD = 4,3$) și conținutul de C organic ($R^2 = 0,94$ și $RPD = 4,6$). O precizie bună de predicție s-a obținut pentru conținutul de C_{total} și N_{total} ($R^2 = 0,90-0,94$ și $RPD > 3$), iar o precizie moderată – pentru pH-ul solului ($R^2 = 0,77$ și $RPD = 2,2$). Aceasta se datorează faptului că pH-ul solului nu are un răspuns spectral direct în regiunea NIR.

Pentru **textura solului**, validarea modelelor de calibrare a generat o precizie de predicție bună pentru conținutul fracției de argilă, după cum evidențiază parametrii statistici obținuți ($R^2=0,73$ și $RPD=1,41$), însă o predicție slabă pentru fracția de praf ($R^2=0,52$ și $RPD=1,20$) și fracția de nisip ($R^2=0,51$ și $RPD=1,04$). Rezultatele obținute au dovedit că a existat o corelație slabă între datele spectrale NIR și valorile măsurate a unor fracții ale texturii solului [13]. Spectrele NIR depind de dimensiunea particulelor materialelor analizate. Acest lucru permite predicția texturii probelor analizate, fapt confirmat de rezultatele reușite a mai multor oameni de știință din lume [1; 5; 6; 17; 33].

Rezultatele obținute în studiul acestei teze au fost în concordanță cu cele raportate în alte studii privind potențialul metodei NIRS în predicția N_{total} , C_{total} , $C_{organic}$, carbonaților și pH-lui în diverse tipuri de sol [5; 10; 11; 17; 20; 21; 29; 42], precum și pe solurile de cernoziom [12; 30; 38]. Potrivit literaturii de specialitate, estimarea cu precizie a $C_{organic}$, C_{total} , N_{total} și carbonaților, precum și a conținutului fracției de argilă, se datorează faptului că acești indicatori au o influență directă asupra spectrelor în baza legăturilor moleculare, a compoziției fizice sau a transmisiei și reflexiei luminii [5; 20; 42]. Așa cum, pH-ului solului nu are un răspuns primar în regiunea NIR, predicția lui are o precizie slabă [42].

În figura 3.4 sunt prezentate graficele de suprapunere a valorilor prezise și măsurate ale conținuturilor de N_{total} , $C_{organic}$, carbonați, pH-lui, fracțiilor de argilă și nisip. Aceste grafice ne arată că majoritatea valorilor prezise din spectrele NIR au fost aproape identice cu cele măsurate, însă se atestă și o deviere considerabilă între acestea.

Cu toate că, pentru fracțiile texturii solului s-a obținut o predicție mai slabă, pentru conținutul de carbonați, $C_{organic}$, C_{total} și N_{total} s-a evidențiat o corelație puternică dintre acești indicatori ai solului și spectrele NIR, obținându-se un coeficient de determinare $R^2 \geq 0,90$ și o deviație foarte mică la validare [13; 14], ceea ce indică o predicție excelentă. Prin urmare, modelul cu 137 de mostre în setul de calibrare este robust, chiar și atunci când se utilizează diferite tipuri și subtipuri de sol, precum și straturi de sol prelevate la adâncimi diferite [16].

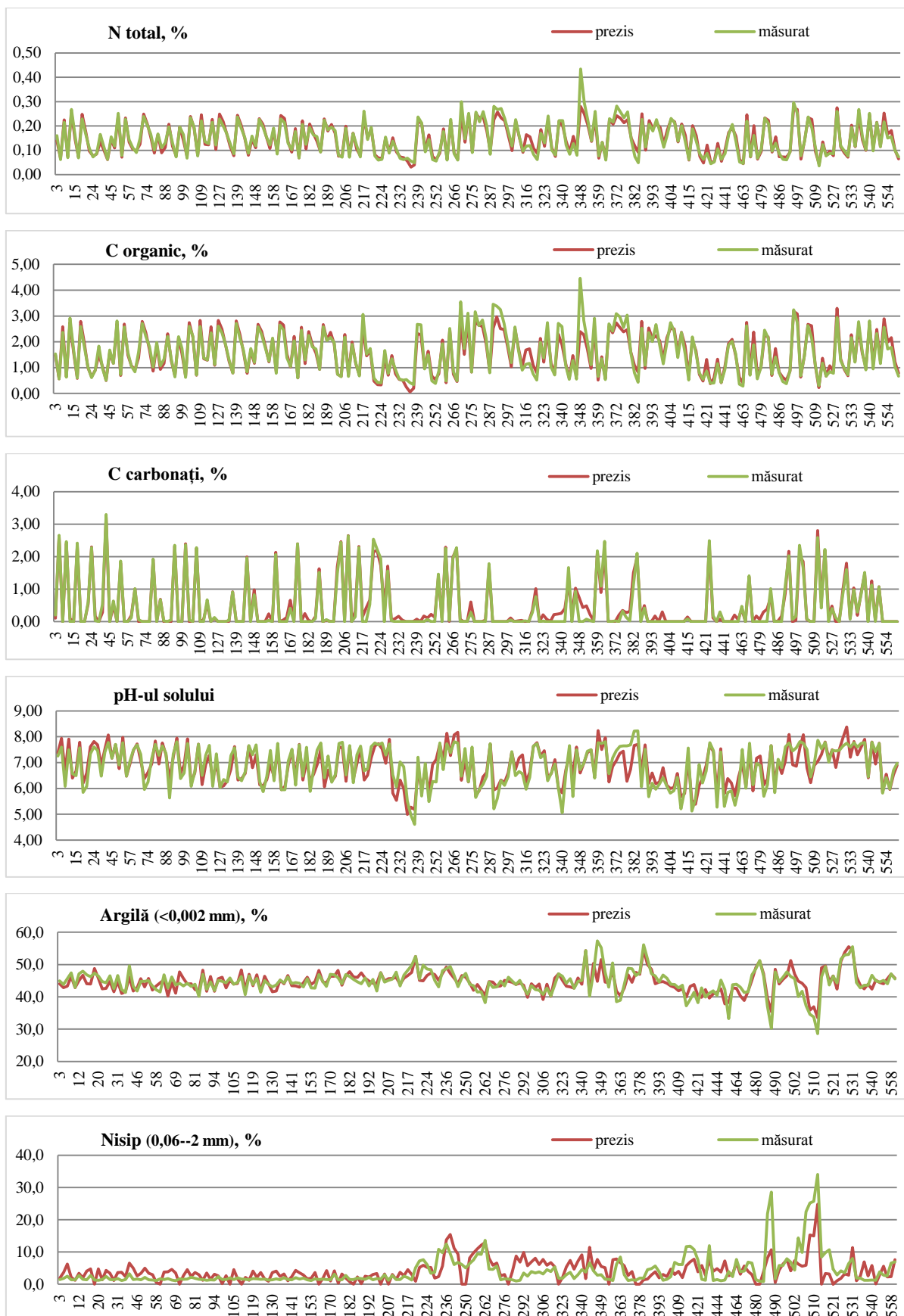


Fig. 3.4. Graficele de suprapunere a valorilor prezise și măsurate ale N_{total} , $C_{organic}$, carbonați, a pH-ului și fracțiilor de argilă și nisip a solului [13]

3.3.2. Calibrarea și modelele de predicție la nivel local

O serie de cercetări [18; 27; 31; 38; 40] au demonstrat că precizia estimării NIR a proprietăților solului este influențată de dimensiunea arealului geografic din care au fost prelevate probele de sol, și că modelarea la nivel de câmp oferă cea mai mare precizie. În acest context, s-a decis separarea probelor de sol prelevate pe câmpurile experimentale a ICCC „Selecția”, de cele prelevate pe terenurile din raioanele zonei de Nord, care reprezintă o varietate de subtipuri de soluri cenușii și cernoziomuri.

Pentru a investiga precizia predicției, au fost create noi modele de calibrare și predicție pe un set de probe mai mic (211 probe de sol), a unui singur subtip de sol – cernoziomul tipic. În modelarea predictivă au fost folosite 56 probe pentru setul de calibrare, iar setul de validare a constituit 29 probe pentru predicția pH-ului, N_{total} , C_{total} , $C_{organic}$ și carbonaților; și 34 probe pentru predicția fracțiilor texturii solului. Calibrarea la nivel local și validarea modelului de predicție a urmat aceleași proceduri aplicate ca și în cazul calibrării universale la nivel zonal, descrisă în subcapitolul 3.3.1. Graficele de dispersie din figura 3.5 reflectă relația liniară dintre valorile prezise prin metoda NIRS și cele de referință măsurate prin metode de clasice, la etapele de calibrare și validare a modelării predictive.

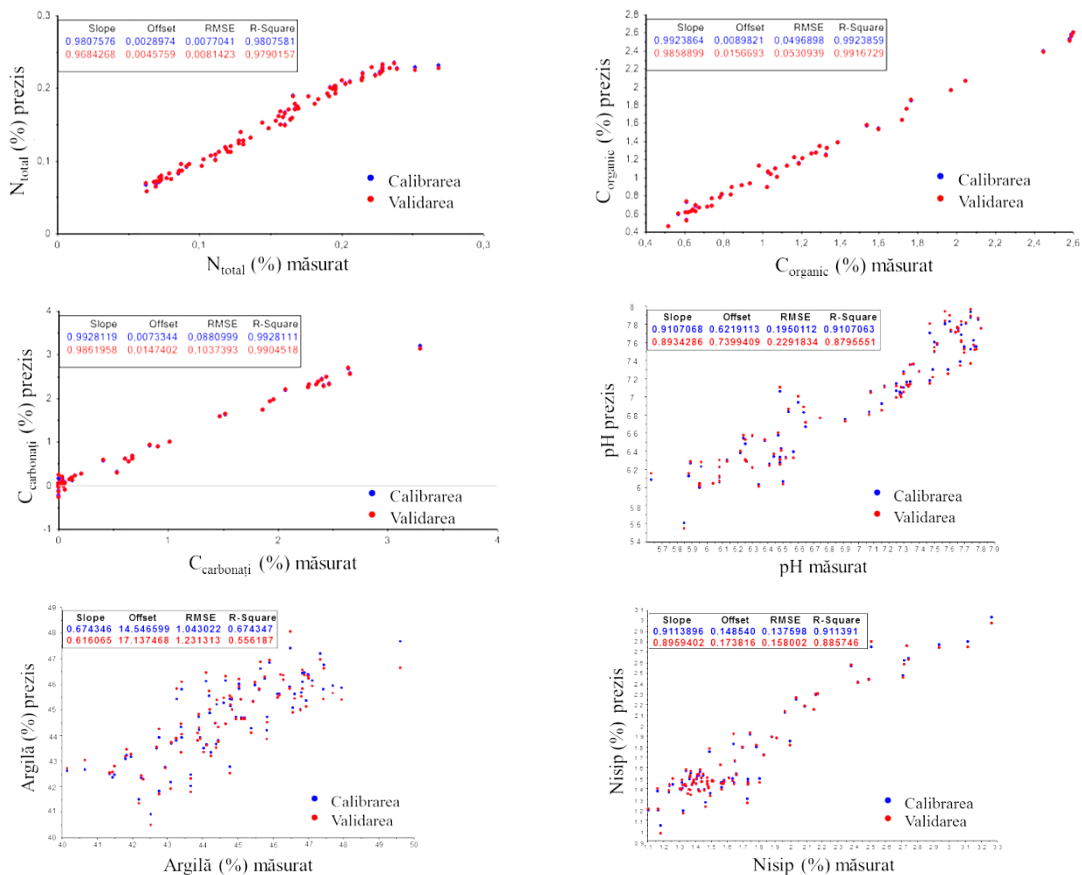


Fig. 3.5. Graficele dispersiei valorilor măsurate față de valorile prezise ale N_{total} , $C_{organic}$, carbonaților, pH-ului și fracției de argilă și nisip în solul experienței polifactoriale a ICCC „Selecția”

Conform graficelor prezentate, pentru valorile indicatorilor chimici ai solului, în special N_{total} , $C_{organic}$ și $C_{carbonați}$, se constată o potrivire reușită cu linia 1:1, cu excepția pH-ului solului [14]. Pentru fracția de nisip (0,06-2 mm), majoritatea punctelor au căzut în vecinătatea liniei 1:1 cu câteva valori ce deviază, iar pentru fracțiile de argilă (< 0.002 mm) și praf (0,002-0,06 mm) panta liniei de regresie (*slope*) a fost semnificativ diferită de linia ideală 1:1. Calibrările NIRS locale au generat o dispersie mai mică a valorilor fracției de nisip și o dispersie mai mare a valorilor fracțiilor de argilă și praf, de la linia 1:1, comparativ cu calibrările universale zonale.

Analiza statistică a modelelor la etapa calibrării și rezultatele validării modelelor de predicție a proprietăților solului investigate sunt prezentate în tabelul 3.5. Conform parametrilor statistici, calibrarea a fost excelentă pentru N_{total} , C_{total} , $C_{organic}$ și carbonați ($R^2 \geq 0,98$; $RPD \geq 7$), a avut succes pentru pH-ul solului și fracția de nisip ($R^2 = 0,91$; $RPD \geq 3$), și succes moderat pentru fracția de argilă și praf ($R^2 \geq 0,67$; $RPD = 2$) [14].

Tabelul 3.7. Parametrii statistici ai modelului de calibrare și performanța predicției (validarea) [14]

Indicatorii solului	Nr. de factori	Calibrare			Validare		
		RMSE	R^2	RPD	RMSEP	R^2	RPD
N total, %	1	0,01	0,98	7,24	0,01	0,98	6,87
C total, %	6	0,06	0,99	10,10	0,07	0,98	7,15
C organic, %	2	0,05	0,99	14,01	0,05	0,99	13,42
C carbonați, %	4	0,09	0,99	10,66	0,10	0,99	8,94
pH (CaCl ₂)	6	0,20	0,91	3,25	0,23	0,88	3,09
Argilă (<0.002 mm), %	7	1,04	0,67	1,9	1,23	0,56	1,3
Praf (0.002-0.06 mm), %	7	1,07	0,71	2,0	1,27	0,61	1,3
Nisip (0.06-2 mm), %	6	0,14	0,91	3,4	0,16	0,89	2,8

Rezultatele obținute au demonstrat că a existat o corelație puternică dintre spectrele NIR și indicatorii mășurați ai solului [14]. În rezultatul validării, conținutul de carbonați, $C_{organic}$, C_{total} și N_{total} s-a prezis cu o precizie excelentă ($R^2 \geq 0,98$ și $RPD > 6$), iar pH-ul solului s-a prezis cu o precizie bună ($R^2 \geq 0,88$ și $RPD \geq 3$) [14]. Valorile RMSEP pentru C_{total} , $C_{organic}$, și carbonați au fost mai mici la divizarea întregului set de date după tipul de sol.

Pentru textura solului, calibrarea la nivel local nu a asigurat îmbunătățirea preciziei de predicție a conținutului de argilă, ba din contra, a înrăutățit situația, cu excepția conținutului fracțiilor de nisip și praf. La validarea calibrării locale pentru conținutul de nisip s-a obținut o precizie moderată de predicție ($R^2=0,89$ și $RPD=2,8$), comparativ cu predicția slabă ($R^2=0,51$ și $RPD=1,04$) la calibrarea universală zonală. Calibrarea PLSR la nivel local pentru fracția de argilă a redus performanța modelului predictiv în rezultatul validării, obținându-se un $R^2=0,56$ și $RPD = 1,3$; ceea ce indică o precizie slabă de predicție, comparativ cu predicția moderată la calibrarea zonală.

Graficele de suprapunere prezentate în figura 3.6, ne arată că majoritatea valorilor N_{total} , $C_{organic}$, carbonaților, pH-ului și fracțiilor de argilă și nisip prezise din datele spectrale NIR au fost identice cu valorile măsurate, cu o mică deviere [14].

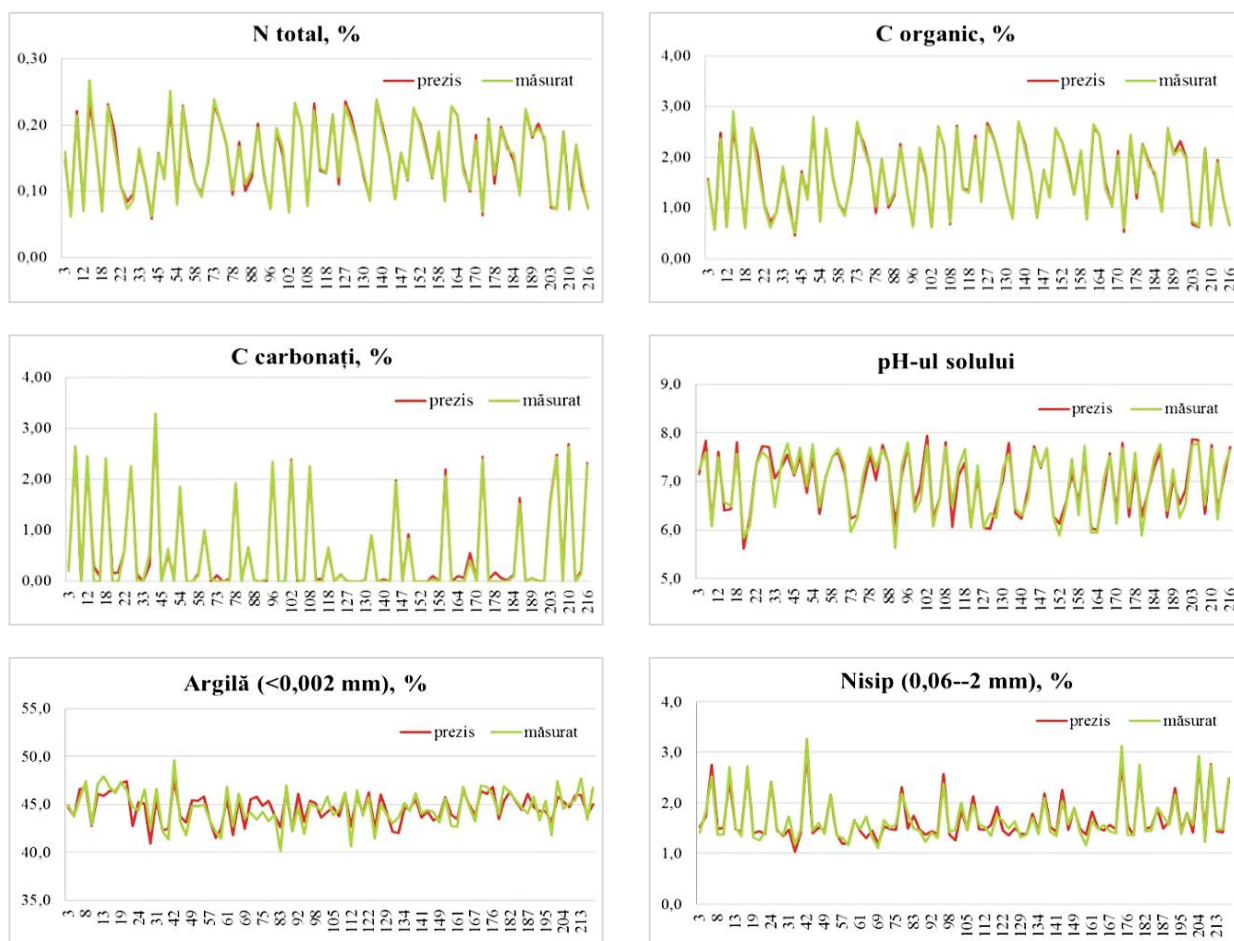


Fig. 3.6. Graficele de suprapunere a valorilor prezise și măsurate ale N_{total} , $C_{organic}$, carbonaților, pH-ului și fracțiilor de argilă și nisip în solul experienței polifactoriale a ICCC „Selecția” [14]

Divizarea întregului set de probe de sol în subgrupuri mai omogene, în cazul dat după tipul de sol, a asigurat îmbunătățirea preciziei predicției conținutului de C organic, carbonați, C și N total, pH-ul solului și, în special, a fracției de nisip. Astfel, calibrările locale sau specifice bazate pe tipul de sol și practicile agricole asigură o precizie mai mare comparativ cu calibrarea universală zonală, iar aceasta demonstrează că performanța modelului de predicție este influențată direct de variabilitatea solurilor și a tipurilor de sol folosite în crearea acestuia [14].

Rezultatele acestui studiu confirmă că metoda NIRS poate fi utilizată cu succes în predicția diferitor proprietăți chimice și fizice în solurile cenușii și cernoziomurile Republicii Moldova. Astfel, metoda NIRS ar putea servi în calitate de instrument analitic rapid în evaluarea managementului agricol al solului aplicat de fermieri și monitorizarea fertilității solului [14].

4. ANALIZA COMPARATIVĂ A FERTILITĂȚII SOLURILOR DIN ZONA DE NORD A MOLDOVEI DUPĂ DIFERIȚI INDICATORI

Pentru studierea modificărilor în starea de calitate a terenurilor agricole din zona de Nord a Moldovei, au fost prelevate în total 84 profile de sol, dintre care 71 profile ale cernoziomurilor (tipice, obișnuite, argiloiluviale, levigate și carbonatice) și 13 profile de soluri cenușii.

Cernoziomurile tipice cercetate. Conținutul mediu de carbon organic al solului (în continuare COS) în profilele cernoziomului tipic cercetat din zona de Nord constituie între 2,8-2,0% în stratul arabil 0-25 cm, și ajunge la 1,1-0,5% în stratul 75-100 cm de sol (figura 4.1). Conținutul azotului total în solurile cercetate este direct proporțional cu conținutul de COS (figura 4.1) și variază pe profilele solurilor cercetate de la 0,28% în stratul de sol 0-50 cm până la 0,05% în stratul 50-100 cm [15].

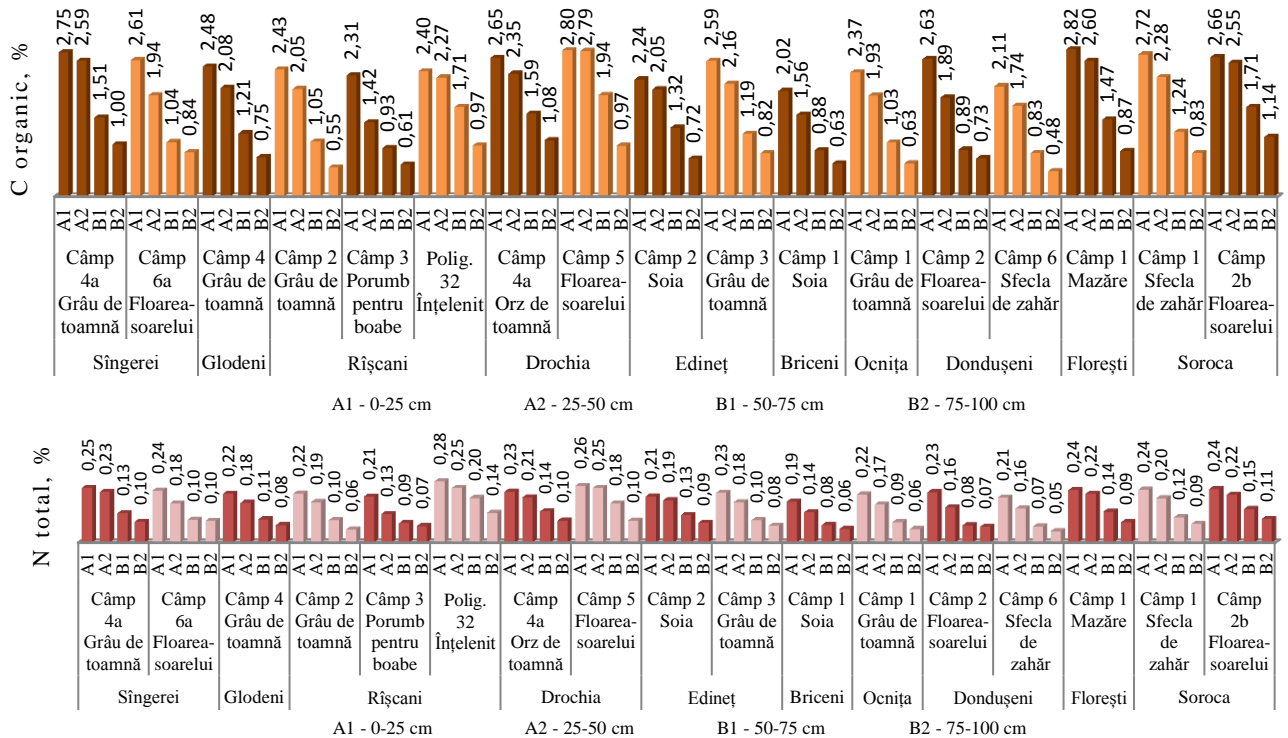
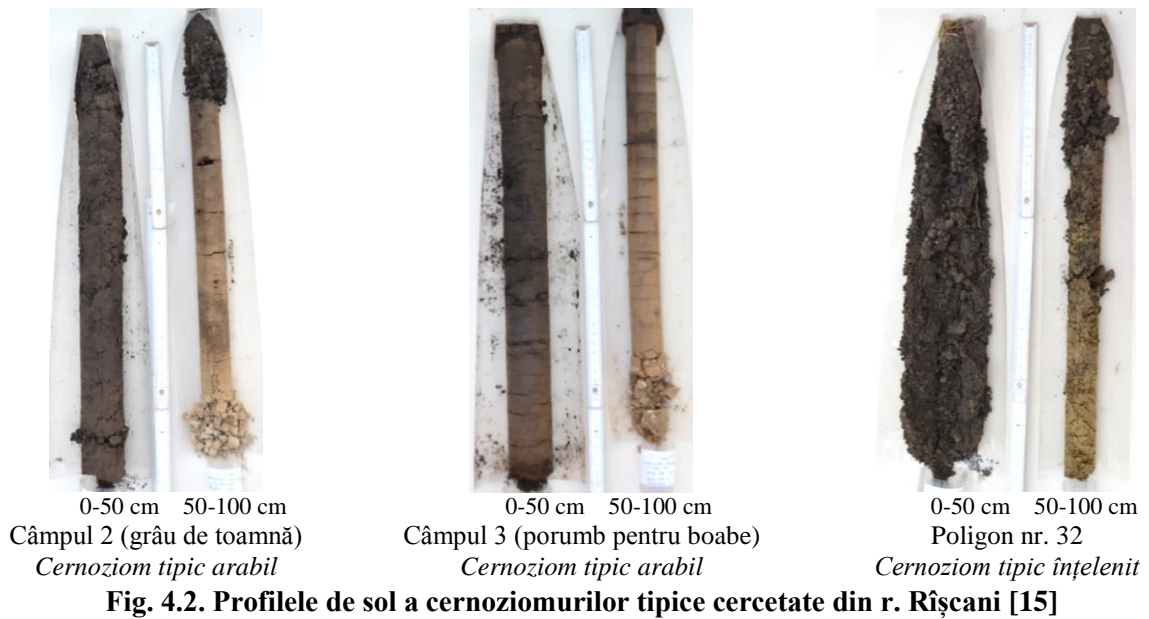


Fig. 4.1. Conținutul de C organic și N total al cernoziomurilor tipice din zona de Nord [15]

În figura 4.2 sunt ilustrate câteva profilele a cernoziomurilor tipice arabile și înțelenite. Cernoziomurile arabile studiate au profile de sol ce diferă vizual de cel înțelenit. Profilul de sol prelevat din câmpul nr. 2 cultivat cu grâu de toamnă are orizont arabil afânat, care devine slab compact până la compact în stratul subarabil, structura este glomerulară, spre deosebire de profilul de sol al câmpului nr. 3 sub porumb pentru boabe, cu un orizont superior slab compact și devine compact în cel inferior [15].



Compararea rezultatelor obținute de către cercetătorii A. Ursu [34], V. Cerbari și T. Balan [4] pe cernoziomurile înțelenite în studiile anterioare, cu rezultatele obținute pe cernoziomurile tipice arabile din raioanele zonei de Nord a Moldovei cercetate în acest studiu, a evidențiat tendința reducerii rezervelor de MOS cu cca 2% în stratul 0-50 cm de sol, sub influența unui management agricol, bazat pe lucrări agricole intensive și lipsa unui aport suficient de resturi vegetale și de gunoi de grajd [15]. Potrivit rezultatelor experiențelor în câmp de lungă durată cu asolamente și culturi permanente pe cernoziom tipic din stepa Bălților, efectuate de cercetătorii ICCO „Selecția”, citați de M. Ilușca [15], au demonstrat că rezervele inițiale de COS în stratul de sol 0-40 cm, au fost restabilite în decurs de 31 de ani de înțelenire la varianta nefertilizată și 25-30 de ani la varianta fertilizată. În același timp, datele experienței de câmp, constată că o calitate mai bună a MOS poate fi asigurată printr-o diversitate mai mare de culturi din asolament, iar includerea de leguminoase perene în rotație îmbogățește solul cu COS și cu N [2].

Cernoziomurile obișnuite cercetate. Conținutul mediu de COS în profilele subtipului cercetat variază de la 3,2% în stratul arabil 0-25 cm până la 0,6% în stratul de sol 75-100 cm (figura 4.3).

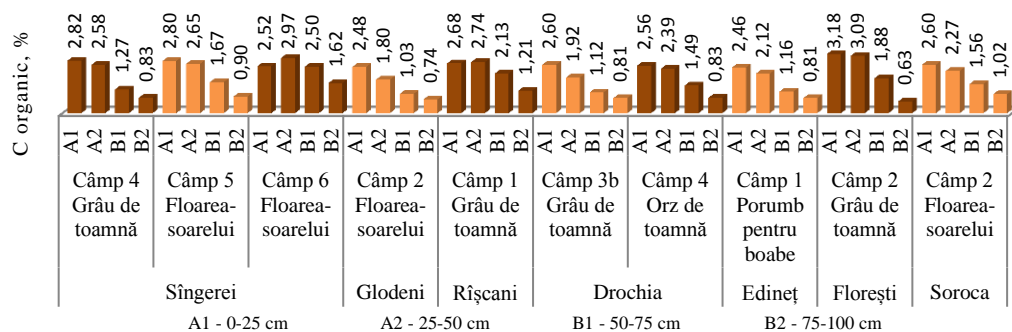


Fig. 4.3. Conținutul de C organic al cernoziomurilor obișnuite din zona de Nord

Analiza comparativă a rezultatelor obținute de către V. Dokucaev [43], V. Kovda [44], V. Cerbari [4], A. Ursu [34], pe cernoziomurile obișnuite virgine, cu rezultatele obținute pe cernoziomurile obișnuite arabile din raioanele zonei de Nord a Moldovei cercetate în acest studiu, a arătat că totuși există o tendință de reducere a conținutului de MOS cu cca 1% în stratul arabil 0-30 cm de sol, ca rezultat al practicilor agricole aplicate, caracterizate preponderent prin lucrări agricole intensive și un aport insuficient de resturi vegetale și de gunoi de grajd.

Cernoziomurile argiloiluviale cercetate. Conținutul mediu de COS în profilele subtipului cercetat variază de la 2,8-1,6% în stratul arabil 0-25 cm până la 1,0-0,2% în stratul de sol 75-100 cm (figura 4.4).

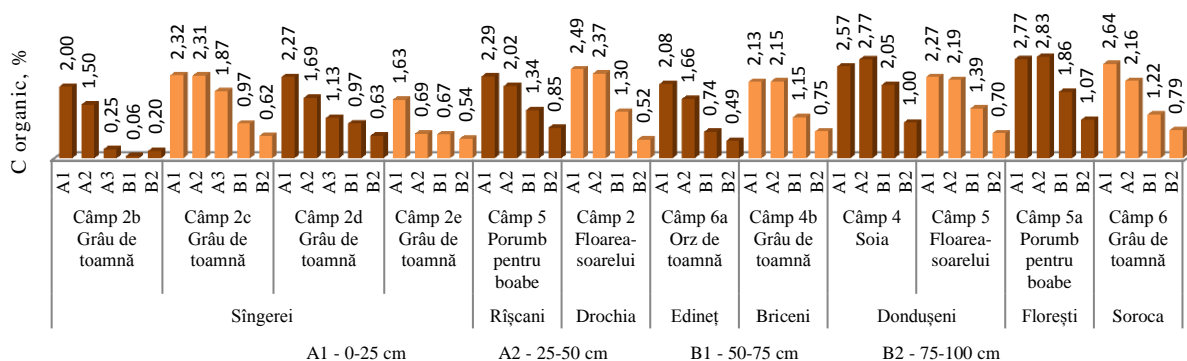


Fig. 4.4. Conținutul de C organic al cernoziomurilor argiloiluviale din zona de Nord

Cernoziomurile levigate cercetate. Conținutul mediu de COS în profilele subtipului cercetat variază de la cca 3-2% în stratul arabil 0-25 cm până la 1,3-0,6% în stratul de sol 75-100 cm (figura 4.5).

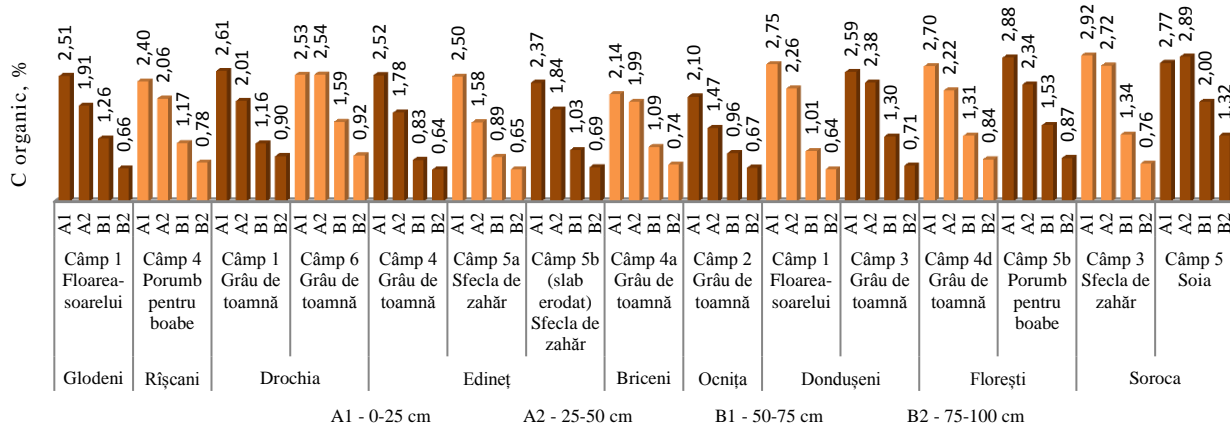


Fig. 4.5. Conținutul de C organic al cernoziomurilor levigate din zona de Nord

Cernoziomurile carbonatice cercetate. Conținutul mediu de COS în profilul subtipului cercetat variază de la 2,7-2,3% în stratul arabil 0-25 cm până la 1,3-0,4% în stratul de sol 75-100 cm de sol (figura 4.6).

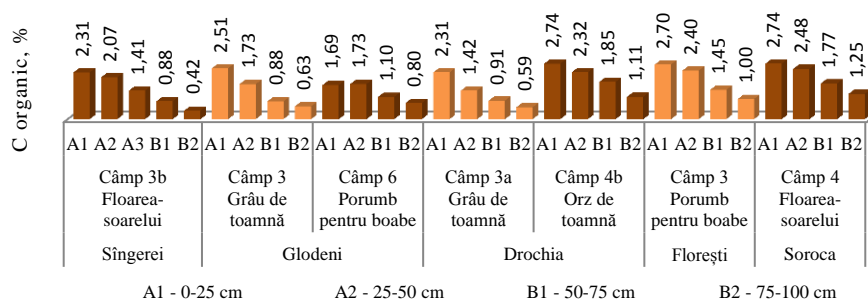


Fig. 4.6. Conținutul de C organic al cernoziomurilor carbonatice din zona de Nord

Solurilor cenușii arabile și virgine cercetate. Pentru a determina schimbările în starea de calitate a solurilor cenușii tipice arabile din Zona de Nord a Republicii, sub influența agrotehnicii zonale, în comparație cu cele virgine, au fost prelevate 3 profile de sol cenușiu virgin format sub vegetația ierboasă și lemnoasă din păduri și 10 profile de sol cenușiu arabil.

Conținutul mediu de COS în profilele solurilor cenușii tipice cercetate variază de la 2,5-1,6% în stratul arabil 0-25 cm și până sub 1% în stratul de sol 75-100 cm (figura 4.7). În

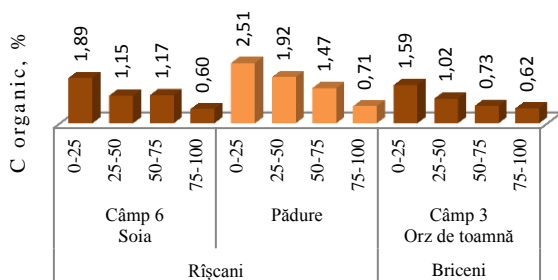


Fig. 4.7. Conținutul de C organic al solurilor cenușii tipice din zona de Nord

orizontul superior al solului cenușiu tipic virgin, conținutul de COS ajunge până la 3% și scade lent cu fiecare orizont genetic ajungând la 0,7% spre adâncimea de 75-100 cm de sol. Conținutul de COS în stratul arabil 0-25 cm al solurilor arabile, comparativ cu același strat al solului virgin, s-a micșorat cu cca 1,0-1,5%.

Conținutul mediu de COS în profilele solului cenușiu molic cercetat variază de la 3,3-1,5% în stratul arabil 0-25 cm până sub 1% în stratul de sol 75-100 cm (figura 4.8). Conținutul de COS în stratul arabil 0-25 cm al solurilor arabile, comparativ cu același strat al solurilor virgine, s-a micșorat cu cca 1%. Totuși, valorile conținutului de COS în fâșia forestieră sunt mai mari cu cca 0,1-0,3% față de câmpul folosit la arabil.

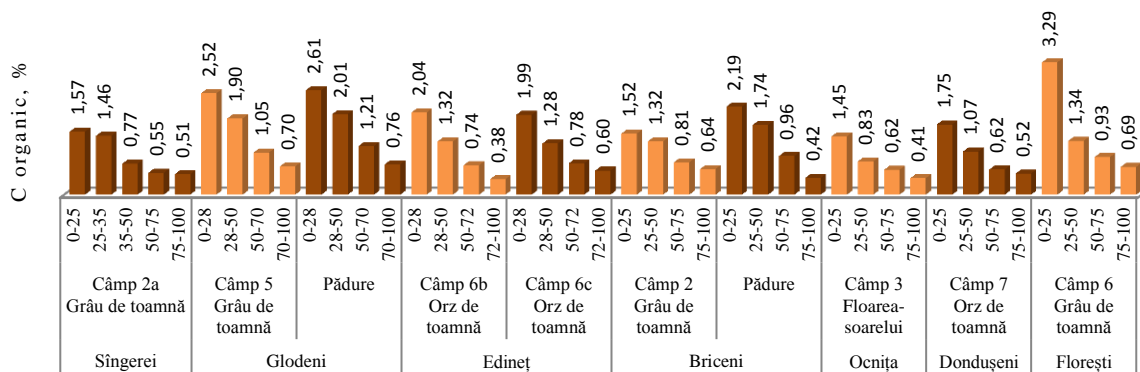


Fig. 4.8. Conținutul de C organic al solurilor cenușii molice din zona de Nord

Mentținerea unor valori aproape de nivelul solurilor virgine, ne vorbește despre aplicarea unui management rațional al terenului, care nu contribuie la scăderea bruscă a conținutului de COS în stratul arabil de sol. Profilele solurilor cenușii molice prelevate în r. Sîngerei, Ocnîța și Dondușeni au înregistrat cele mai mici valori a conținutului de COS. Valorificarea solurilor cenușii tipice și molice a condus la reducerea considerabilă a rezervelor de humus și înrăutățirea proprietăților și potențialului productiv în unele regiuni.

5. STUDIAREA VARIABILITĂȚII ORIZONTALE A PROPRIETĂȚILOR SOLULUI

Variabilitatea orizontală în cadrul aceluiași câmp poate fi cauzată fie de procesul de eroziune a solului, fie de diferite tipuri și subtipuri de sol în cadrul terenului individual. Pentru studierea variabilității orizontale în cadrul câmp, în unele raioane din zona de Nord au fost selectate câmpuri agricole, de pe care s-au prelevat mai multe profile de sol.

Câmpul nr.1 (Sg-F1), situat pe teritoriul com. Biliceni Vechi (r. Sîngerei), datorită amplasării terenului în pantă, este supus procesului de eroziune, iar cultivarea porumbului pentru boabe a creat zone vizibile cu diferit grad de creștere și dezvoltare a plantelor, care au și devenit puncte de interes pentru prelevarea profilelor de sol (figura 5.1 și 5.2). Evaluarea stării terenului în timp (figura 5.1) în perioada 2006-2020, a scos în evidență tendința degradării câmpului prin eroziunea solului, ca rezultat al folosirii terenului la arabil. Ortofoto din iunie 2020, arată un grad avansat de degradare a terenului, fapt ce demonstrează exploatarea lui fără implementarea măsurilor de protecție antierozionale și fitoameliorative de menținere/sporire a fertilității solului.

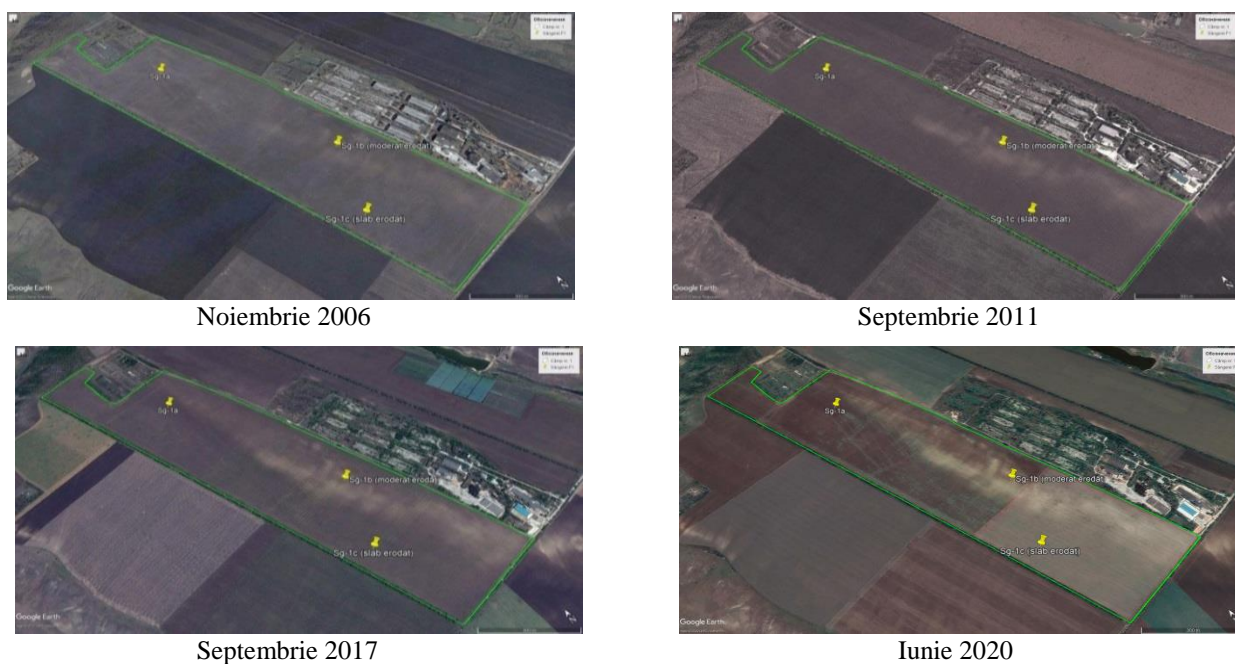


Fig. 5.1. Ortofoto câmpul nr. 1, cu indicarea punctelor de prelevare a profilelor de sol



0-50 cm 50-100 cm



Sg-1a – Cernoziom tipic (suprafață plană)



0-50 cm 50-100 cm



Sg-1b – Cernoziom tipic (moderat erodat)



0-50 cm 50-100 cm



Sg-1c – Cernoziom tipic (slab erodat)

Fig. 5.2. Profile de cernoziom tipic arabil și pozițiile de prelevare pe câmpul nr. 1, r. Sîngerei

Deși, pentru textura solului nu s-a evidențiat vreo diferență între punctele de prelevare; totuși, pentru conținutul de N total, humus, carbonați și pH-ul solului s-a înregistrat o variabilitate esențială în cadrul câmpului, precum și pe întreg profilul solului (tab. 5.1).

Tabelul 5.1. Indicatorii agrochimici ai solului pe câmpul nr. 1, r. Sîngerei

Profil de sol	Tipul solului	Strat de sol, cm	pH (CaCl ₂)	N total, %	Humus, %	C:N	CaCO ₃ , %	Argilă, <0,002	Praf, 0,002-0,06
Sg-F1a	Cernoziom tipic (suprafață plană)	0-27	6,3	0,24	4,39	10,7	1,2	46,6	51,4
		27-50	6,3	0,20	3,50	10,3	2,4	49,0	50,4
		50-70	6,5	0,15	2,52	9,7	3,5	47,6	52,4
		70-100	7,0	0,12	1,88	8,8	5,0	47,9	52,6
Sg-F1b	Cernoziom tipic (moderat erodat)	0-27	7,2	0,19	2,86	8,8	5,6	52,5	48,5
		27-50	7,7	0,08	0,83	5,9	17,9	45,1	46,6
		50-70	7,7	0,07	0,59	5,0	18,2	45,0	46,4
		70-100	7,5	0,07	0,58	5,0	14,4	46,6	46,9
Sg-F1c	Cernoziom tipic (slab erodat)	0-30	6,7	0,21	3,71	10,5	1,1	47,4	51,7
		30-50	7,0	0,15	2,49	9,6	3,3	48,1	50,9
		50-70	7,6	0,12	1,82	8,9	6,1	46,9	52,5
		70-100	7,9	0,09	1,23	7,7	14,3	48,3	49,1

Procesul de eroziune a solului, favorizat de un management inadecvat al acoperirii solului pe terenul aflat în pantă și lipsa măsurilor de conservare și protejare corespunzătoare, a creat o redistribuire a solului, astfel încât solul din pozițiile umerilor (punctul de prelevare „1a”) a fost îndepărtat și depus în zonele depresionare (pozițiile taluzului), cauzând pierderi nete de sol. Odată cu solul îndepărtat s-a pierdut și fertilitatea solului, creându-se o variație a proprietăților fizice și chimice ale solului. Astfel, pe întreg profilul de sol Sg-F1a, prelevat de pe suprafața plană a câmpului, carbonații practic lipsesc, pH-ul este practic neutru. Conținutul de humus în stratul arabil constituie peste 4% și scade treptat cu adâncimea, ajungând sub 2% în stratul de până la 1 m. În profilul de sol Sg-F1b, stratul arabil are un conținut moderat de carbonați (5,6%), care crește exponențial în stratul subarabil, datorită îndepărtării orizontului humifer și expunerii la suprafață a orizonturilor inferioare, cu un conținut mare de carbonați (>14%). pH-ul solului a crescut, iar conținutul de humus a scăzut odată cu creșterea conținutului de carbonați. În stratul arabil, conținutul de humus a fost sub 3% și a scăzut brusc sub 1% în orizonturile inferioare, inclusiv în stratul subarabil. Profilul de sol Sg-F1c este slab erodat și are un conținut de humus mai mare, constituind sub 4% în stratul arabil, cu o scădere treptată în straturile inferioare (peste 1% la adâncimea de 1 m), comparativ cu profilul Sg-F1b.

Variabilitatea spațială mare a nivelului de fertilitate a solului în cadrul câmpurilor agricole individuale, creează condiții în care practicile obișnuite de a combina câteva subprobe, pentru formarea unei probe comune, nu dau un rezultat de încredere și nu reflectă situația reală a stării de calitate a solului în câmp. În acest context, schema și procedura de prelevare a probelor de sol joacă un rol crucial în furnizarea datelor de încredere pentru cartografierea digitală a solului și creșterea eficienței acestuia în implementarea practicilor agriculturii de precizie.

6. EVALUAREA PRACTICILOR AGRICOLE DE MANAGEMENT A SOLULUI

6.1. Influența rotației culturilor, sistemului de lucrare și fertilizare a solului asupra indicatorilor fertilității solului

Rezultatele obținute în experiența polifactorială de lungă durată realizată în cadrul câmpurilor experimentale ale IP ICCC „Selecția” confirmă rolul fundamental al rotației culturilor, lucrărilor agricole și fertilizării atât în circuitul MOS, cât și în formarea nivelului de producție. Astfel, aplicarea gunoiului de grajd a contribuit la majorarea conținutului de materie organică a solului și azot total în sol (tab.6.1), în ambele verigi ale asolamentului, pe fondul afânării solului comparativ cu arătura cu plug cu cormană.

Folosirea suplimentară a îngrășămintelor minerale pe fondul aplicării gunoiului de grajd în asolamentul cu ierburi perene contribuie la reducerea conținutului de MOS și N total pe fondul afânării solului, dar la majorarea lor pe fondul arăturii cu plug cu cormană, în deosebi pentru stratul de sol 0-50 cm. În lipsa ierburilor perene în asolament, folosirea suplimentară a îngrășămintelor minerale pe fondul îngrășămintelor organice în asolament la fel contribuie la acumularea materiei organice și azotului total pe întreg profilul solului.

Datele prezentate confirmă încă odată că rezultate optime se obțin la respectarea rotației culturilor, în special la includerea leguminoaselor perene și graminee în asolament, cu lucrarea minimă a solului și fertilizarea cu îngrășămintele organice și doze mici de îngrășămintele minerale în cadrul rotației culturilor.

6.2. Producția culturilor de câmp în experiența polifactorială

Producția grâului de toamnă a fost semnificativ mai mare la amplasarea culturii după amestec de lucerna cu raigras, anul 3 de viață după prima coasă, comparativ cu amplasarea grâului de toamnă după porumb la siloz (tab. 6.2), indiferent de sistemul de lucrare al solului. În medie, pentru anii de studiu 2016-2018, sporul de producție pe martorul absolut la amplasarea grâului de toamnă în asolament cu ierburi perene a constituit 2,89 t/ha pe fondul îmbinării arăturii și afânării solului în asolament și 2,40 t/ha pe fondul afânării solului.

Nivelul de producție rămâne practic același în asolamentul cu ierburi perene pe fondul postacțiunii gunoiului de grajd (în medie 5,69 t/ha), dar la amplasarea grâului de toamnă după porumb la siloz nivelul de producție scade, asigurând un spor de producție în medie de 1,47 t/ha pe fondul lucrării combinate a solului și 1,34 t/ha pe fondul afânării.

Tabelul 6.1. Indicatorii agrochimici pe profilul solului 0-100 cm în experiența polifactorială cu studierea acțiunii și interacțiunii lucrării și fertilizării solului în asolamentul cu și fără ierburi perene, anul 2016

Lucrarea solului	Sistem de fertilizare	Strat, cm	Asolament 1 – cu ierburi perene (Orz de toamnă)					Asolament 2 – fără ierburi perene (Mazăre pentru boabe)				
			N total, %	Humus, %	CaCO ₃ , %	pH (CaCl ₂)	C/N	N total, %	Humus, %	CaCO ₃ , %	pH (CaCl ₂)	C/N
Afânare	Martor	0-26	0,24	4,76	0,0	6,3	11,3	0,24	4,74	0,0	6,2	11,4
		26-38	0,20	3,92	0,0	6,6	11,4	0,22	4,33	0,0	6,4	11,3
		38-50	0,15	2,78	0,0	7,0	11,0	0,17	3,28	0,0	6,6	11,1
		50-100	0,11-0,08	2,01-1,29	6,6-17,1	7,5-7,7	10,4-9,4	0,12-0,08	2,27-1,27	1,4-19,5	7,1-7,8	10,9-9,2
	Gunoi de grajd	0-27	0,24	4,81	0,0	6,3	11,5	0,24	4,74	0,0	6,3	11,5
		27-37	0,22	4,45	0,0	6,4	11,5	0,22	4,24	0,0	6,4	11,3
		37-50	0,16	3,20	0,0	6,7	11,3	0,17	3,23	0,0	6,9	11,1
		50-100	0,12-0,08	2,16-1,23	1,7-18,9	7,3-7,7	10,7-8,9	0,12-0,08	2,17-1,24	5,5-17,5	7,4-7,8	10,6-9,3
	Gunoi de grajd + NPK	0-29	0,25	4,81	0,0	6,3	11,3	0,24	4,77	0,0	6,3	11,4
		29-39	0,21	4,08	0,0	6,5	11,4	0,21	4,18	0,0	6,5	11,4
		39-50	0,15	2,88	0,0	6,7	11,1	0,16	3,13	0,0	6,8	11,2
		50-100	0,11-0,08	2,00-1,25	1,4-18,7	7,3-7,7	10,5-8,8	0,11-0,08	1,97-1,25	4,7-16,9	7,3-7,7	10,6-9,4
Arătură	Martor	0-28	0,25	4,81	0,0	6,2	11,4	0,24	4,72	0,0	6,2	11,5
		28-40	0,20	3,98	0,0	6,3	11,3	0,19	3,82	0,0	6,3	11,4
		40-50	0,16	2,97	0,0	6,8	11,0	0,15	2,82	0,0	6,5	11,1
		50-100	0,12-0,08	2,18-1,22	1,7-18,7	7,2-7,8	10,9-9,0	0,11-0,08	2,01-1,24	1,4-18,5	7,0-7,7	10,6-8,8
	Gunoi de grajd	0-28	0,24	4,70	0,0	6,4	11,4	0,24	4,75	0,0	6,3	11,5
		28-36	0,18	3,59	0,0	6,6	11,4	0,19	3,70	0,0	6,4	11,2
		36-50	0,13	2,59	0,0	6,9	11,2	0,14	2,70	0,0	6,7	10,9
		50-100	0,10-0,07	1,93-1,09	2,7-20,3	7,5-7,8	10,7-8,7	0,09-0,08	1,73-1,25	5,5-22,0	7,5-7,6	10,7-8,9
	Gunoi de grajd + NPK	0-29	0,24	4,72	0,0	6,4	11,5	0,24	4,74	0,0	6,3	11,4
		29-39	0,22	4,40	0,0	6,4	11,6	0,20	4,01	0,0	6,3	11,4
		39-50	0,16	3,18	0,0	6,7	11,4	0,15	2,86	0,0	6,7	11,1
		50-100	0,10-0,08	1,90-1,22	2,6-19,7	7,3-7,7	10,6-8,8	0,10-0,08	1,92-1,24	2,0-19,3	7,2-7,6	10,9-9,1

Tabelul 6.2. Producția grâului de toamnă în veriga asolamentelor cu și fără ierburi leguminoase și graminee pe diferite fonduri de fertilizare, anii 2016-2018, t/ha

Anii	Asolament cu amestec de ierburi perene			Asolament fără amestec de ierburi perene			DL ₀₅ , t/ha	Spor de producție de la asolament cu ierburi perene		
	martor	gunoi de grajd	gunoi de grajd + NPK	martor	gunoi de grajd	gunoi de grajd + NPK		martor	gunoi de grajd	gunoi de grajd + NPK
Îmbinarea arăturii și afânării solului în asolament										
2016	6,37	6,22	5,90	2,87	4,29	5,42	0,29	+3,50	+1,93	+0,48
2017	4,93	5,12	5,32	3,20	3,42	5,30	0,26	+1,73	+1,70	+0,02
2018	6,04	5,73	6,45	2,59	4,94	5,81	0,42	+3,45	+0,79	+0,64
Media	5,78	5,69	5,89	2,89	4,22	5,51		+2,89	+1,47	+0,38
Afânare										
2016	5,94	6,27	6,08	3,02	4,26	5,45	0,29	+2,92	+2,01	+0,63
2017	4,79	5,11	5,33	3,07	3,89	5,22	0,26	+1,72	+1,22	+0,11
2018	5,25	5,30	6,08	2,70	4,51	6,35	0,42	+2,55	+0,79	-0,27
Media	5,33	5,56	5,83	2,93	4,22	5,67		+2,40	+1,34	+0,16

Cel mai mic spor de producție în boabe la grâul de toamnă amplasat după amestecul de ierburi perene a fost determinat pe fondul postacțiunii gunoiului de grajd și acțiunii directe a îngrășămintelor minerale, constituind în medie 0,38 t/ha la lucrarea combinată a solului și 0,16 t/ha la afânarea solului.

Folosirea suplimentară a îngrășămintelor minerale pe fondul postacțiunii îngrășămintelor organice nu sporește semnificativ nivelul de producție la boabe comparativ cu postacțiunea gunoiului de grajd în asolamentul cu ierburi perene, dar conduce la o creștere considerabilă în asolamentul fără ierburi perene, indiferent de sistemul de lucrare a solului. Aceasta mărturisește despre o posibilitate reală de reducere a dozelor de îngrășămintele minerale la includerea lucernei în asolament.

În baza datelor prezentate în acest capitol, putem afirma că prioritatea asolamentului cu amestec de ierburi perene privind producția obținută la toate culturile din veriga asolamentului, se manifestă pe fondul fertilizării organice (sau postacțiunii îngrășămintelor organice), dar în deosebi pe martorul absolut și dispare la aplicarea suplimentară a îngrășămintelor minerale pe fondul postacțiunii îngrășămintelor organice. Totodată, într-un asolament în care este exclusă prezența ierburilor perene, este necesar de introdus o cantitate mai mare de îngrășămintele minerale, în special de azot, pentru a satisface necesarul plantelor în elemente nutritive esențiale pentru creștere și dezvoltare. Aceasta implică după sine și cheltuieli mai mari de surse nerenovabile de energie și materii prime, precum și cheltuieli economice mai mari pentru gospodărie.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

1. Validarea modelelor de calibrare zonale, pe un set de date cu o gamă largă de variație (diverse tipuri și subtipuri de sol), a avut succes în predicția indicatorilor agrochimici ai solului, cu excepția pH-lui solului, pe când predicția texturii solului (fracțiile de argilă, praf și nisip) a avut o performanță slabă. Cu o precizie excelentă s-a prezis conținutul de carbonați ($R^2 = 0,96$ și $RPD = 4,3$) și conținutul de carbon organic ($R^2 = 0,94$ și $RPD = 4,6$). O precizie bună de predicție s-a obținut pentru conținutul de azot total ($R^2 = 0,94$ și $RPD = 3,9$) și carbon total ($R^2 = 0,90$ și $RPD = 3,2$). O precizie moderată s-a obținut pentru pH-ul solului ($R^2 = 0,77$ și $RPD = 2,2$) și pentru fracția de argilă ($R^2 = 0,73$ și $RPD = 1,4$); iar pentru fracția de praf și nisip predicția a avut o performanță slabă (R^2 egal cu 0,52 și 0,51, corespunzător, $RPD < 2$). Rezultatele obținute mărturisesc despre o corelație slabă între datele spectrale NIR și valorile măsurate a unor fracții ale texturii solului.

2. Validarea modelelor de calibrare locale, pe un set de date cu gamă mai îngustă de variație (un singur subtip de sol), a asigurat o performanță predictivă mai bună a indicatorilor solului, decât calibrarea universală zonală, obținându-se o precizie excelentă a conținutul de carbonați, C organic, C și N total ($R^2 \geq 0,98$ și $RPD > 6$); și o predicție moderată pentru pH-ul solului ($R^2 = 0,88$ și $RPD > 3$). Pentru textura solului, calibrarea și validarea la nivel local a asigurat o îmbunătățire a preciziei de predicție pentru fracția de nisip, pentru care valorile parametrilor statistici au fost semnificativ mai mari ($R^2 = 0,89$ și $RPD=2,8$), ce indică o precizie moderată, comparativ cu predicția slabă la calibrarea universală zonală. Pentru fracția de praf îmbunătățirea a fost nesemnificativă ($R^2 = 0,61$ și $RPD=1,3$), iar pentru fracția de argilă, performanța modelului predictiv s-a redus semnificativ cu un $R^2 = 0,56$ și $RPD < 2$, ce indică o precizie slabă de predicție, comparativ cu calibrarea universală zonală. O posibilă cauză a acestor rezultate ar putea fi devierea standard mai mică și gama mai îngustă a setului de calibrare local.

3. Indicatorii cheie ai fertilității solului au fost estimați cu o precizie înaltă, fapt ce confirmă că metoda NIRS poate fi utilizată cu succes în predicția diferitor proprietăți chimice și fizice în solurile cenușii și cernoziomurile Republicii Moldova. Astfel, metoda NIRS ar putea servi în calitate de instrument analitic rapid în evaluarea managementului agricol al solului aplicat de fermieri și monitorizarea fertilității solului [14].

4. Compararea indicatorilor cernoziomurilor înțelenite cercetate în studii anterioare, cu indicatorii cernoziomurilor arabile cercetate în acest studiu, a evidențiat tendința reducerii rezervelor de MOS cu cca 2% în stratul 0-50 cm de sol, sub influența unui management agricol, bazat pe lucrări agricole intensive și lipsa unui aport suficient de resturi vegetale și de gunoi de grajd [15]. Totodată, conținutul de MOS în stratul arabil 0-30 cm al solurilor cenușii arabile

(3,2%-2,8%) s-a micșorat cu cca 1,0-1,5%, comparativ cu conținutul de MOS în același strat al solurilor virgine de pădure (cca 4,4%).

5. În asolamentul cu ierburi perene, la aplicarea gunoiului de grajd, afânarea solului a contribuit la majorarea conținutului de MOS, variind de la 3,20 la 4,81% în stratul 0-50 cm de sol, comparativ cu arătura, unde conținutul de MOS a variat de la 2,59 la 4,70% în același strat, iar folosirea suplimentară a îngrășămintelor minerale pe fondul aplicării gunoiului de grajd contribuie la reducerea conținutului de MOS pe fondul afânării solului (variind între 2,88-4,08%), dar la majorarea de MOS pe fondul arăturii cu plug cu cormană (variind între 3,18-4,40%), în deosebi pentru stratul 30-50 cm de sol. Aceeași tendință se observă și în asolamentul fără ierburi perene, doar că folosirea suplimentară a îngrășămintelor minerale pe fondul îngrășămintelor organice în asolament la fel contribuie la acumularea MOS, constituind în stratul 0-50 cm de sol între 3,13-4,77% la afânarea solului și 2,86-4,74% la aplicarea arăturii.

6. Eficiența asolamentului cu amestec de ierburi perene asupra producției agricole obținute la toate culturile din veriga asolamentului, se manifestă și pe fondul fertilizării organice (sau postacțiunii îngrășămintelor organice), cu un spor de producție în medie de 1,4 t/ha boabe de grâu, dar în deosebi pe martorul absolut cu un spor de producție de cca 3 t/ha boabe de grâu, și dispare la aplicarea suplimentară a îngrășămintelor minerale pe fondul postacțiunii îngrășămintelor organice, sporul de producție constituind în medie doar 0,2-0,4 t/ha. Astfel, ameliorarea fertilității solului contribuie atât la reducerea cheltuielilor de producere legate de folosirea inputurilor industriale costisitoare, cât și la ameliorarea stării mediului ambiant.

RECOMANDĂRI

1. Pentru îmbunătățirea preciziei modelelor predictive în baza spectrelor NIR și tehnicii multivariabile PLSR, se recomandă gruparea datelor heterogene complexe pe baza claselor taxonomice ale solului și a similitudinii spectrale, luând în considerație că fiecare tip de sol conține caracteristici spectrale specifice în regiunea NIR. În acest context este necesară studierea modelelor de predicție în baza fiecărui tip sau subtip de sol pentru testarea nivelului de precizie și elaborarea modelelor de calibrare stabile și robuste.

2. Analiza NIRS poate fi un instrument util în spectroscopia imagistică (IS), care folosește senzori hiperspectrali aeropurtați sau prin satelit pentru a spațializa informațiile spectrale și a produce hărți digitale cu rezoluție fină ale proprietăților fizice și chimice ale solului. Ulterior, acestea pot fi folosite în implementarea tehnologiilor agriculturii de precizie cu eficacitate maximă în ceea ce privește utilizarea optimă a inputurilor (îngrășămintele, erbicide, pesticide etc.), prin ajustarea acestora cu nevoile reale ale plantelor în câmp, și sporirea nivelului de producție a culturilor.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. BILGILI, A.V.; VAN ES, H.M.; AKBAS, F.; DURAK, A.; HIVELY, W.D. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. In: *Journal of Arid Environments*. 2010, vol. 74(2), pp. 229-238. ISSN 0140-1963.
2. BOINCEAN, B.; DENT, D. Managementul durabil și rezilient al solurilor de cernoziom. Chișinău: Prut, 2020. 244 p. ISBN 978-9975-54-519-8.
3. BROWN, D.J.; SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G.; MAYES, M.D.; REINSCH, T.G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. In: *Geoderma*. 2006, vol. 132(3-4), pp. 273-290. ISSN 0016-7061.
4. CERBARI, V. Monitoringul calității solurilor Republicii Moldova: (baza de date, concluzii, prognozare, recomandări). Chișinău, Pontos, 2010. – 476 p. ISBN 978-9975-51-138-4.
5. CHANG, C.; LAIRD, D.; MAUSBACH, M.; HURBURGH, JR.C. Near-infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analysis of soil properties. In: *Soil Science Society of America Journal*. 2001, vol. 65, pp. 480-490.
6. CURCIO, D.; CIRAOLLO, G.; D'ASAROA, F.; MINACAPILLIA, M. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. In: *Procedia Environmental Sciences*. 2013, vol. 19, pp. 494-503.
7. DEMATTÊ, J.A. et al. The Brazilian soil spectral library (BSSL): A general view, application and challenges. In: *Geoderma*. 2019, vol. 354, 113793.
8. GEESING, D.; DIACONO, M.; SCHMIDHALTER, U. Site-specific effects of variable water supply and nitrogen fertilisation on winter wheat. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2014, vol. 177, pp. 509-523.
9. HE, Y.; SONG, H. Prediction of soil content using near-infrared spectroscopy. In: *SPIE Newsroom*. 2006, 10.1117/2.1200604.0164, 3 p.
10. HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U. An Evaluation of Different NIR-Spectral Pre-Treatments to Derive the Soil Parameters C and N of a Humus-Clay-Rich Soil. In: *Sensors*. 2021, vol. 21(4), 1423.
11. HEINZE, S.; VOHLAND, M.; JOERGENSEN, R.; LUDWIG, B. Usefulness of near-infrared spectroscopy for the prediction of chemical and biological soil properties in different long-term experiments. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2013, vol. 176, pp. 520-528.
12. ILIEVA, R.; FILCHEVA, E.; ILIEV, I.; TODOROVA, M. Destructive and undestructive methods for studying organic matter of soils in Bulgaria. In: *Soil Water Journal*. 2013, vol. 2, 1183.
13. ILUȘCA, M. Potențialul metodei NIRS în determinarea texturii solurilor din zona de Nord a Republicii Moldova. In: *Tradiție și inovare în cercetarea științifică*. Ediția 10, Vol. I, 8 oct. 2021, Bălți. Bălți: USARB, 2021, pp. 183-189. ISBN 978-9975-50-271-9.
14. ILUȘCA, M. Estimarea preciziei modelului NIRS de predicție în funcție de tipul de sol. In: *Revista de Știință, Inovare, Cultură și Artă „Akademos”*. 2022, nr. 2(65), pp. 93-98. ISSN 1857-0461. DOI: 10.52673/18570461.22.2-65.08
15. ILUȘCA, M. Analiza comparativă a cernoziomurilor tipice din zona de Nord a Moldovei după diferiți indicatori. In: *Știința Agricolă*. 2022, nr. 2, pp. 3-11.
16. ILUȘCA, M.; BUCHHART, C.; HEIL, K.; BOINCEAN, B.; SCHMIDHALTER, U. Soil fertility assessment by Near Infrared Reflectance Spectroscopy in the North of Republic of Moldova. (în ediție pentru 2023)
17. ISLAM, K.; SINGH, B.; MCBRATNEY, A. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. In: *Australian Journal of Soil Research*. 2003, vol. 41(6), pp. 1101-1114.

18. KUANG, B.; MOUAZEN, A. Calibration of visible and near infrared spectroscopy for soil analysis at the field scale on three European farms. In: *European Journal of Soil Science*. 2011, vol. 62(4), pp. 629-636.
19. LUCAS: *Land Use and Coverage Area frame Survey Project*. European Soil Data Centre (ESDAC), Joint Research Centre. European Commission web page. Last updated 25/09/2022 [cited on 24.09.2022]. Available online: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas>
20. LUDWIG, B.; KHANNA, P.; BAUHUS, J.; HOPMANS, P. Near infrared spectroscopy of forest soils to determine chemical and biological properties related to soil sustainability. In: *Forest Ecology and Management*. 2002, vol. 171(1-2), pp. 121-132. ISSN 0378-1127.
21. MUNAWAR, A.; YUNUS, Y.; SATRIYO, P. Calibration models database of near infrared spectroscopy to predict agricultural soil fertility properties. In: *Data in brief*. 2020, vol. 30, 105469, 12 p.
22. SCHMIDHALTER, U.; MAIDL, F.; HEUWINKEL, H.; DEMMEL, M.; AUERNHAMMER, H.; NOACK, P.; ROTHMUND, M. Precision Farming - Adaptation of land use management to small scale heterogeneity. In: *Perspectives for Agroecosystem Management*, P.Schröder, J. Pfadenhauer and J.C. Munch (Eds.). Elsevier, 2008, pp. 121-199.
23. SELIGE, T.; SCHMIDHALTER, U. Topsoil mapping using hyperspectral airborne data and multivariate regression modeling. In: *Precision Agriculture '05*, ed. J.V. Stafford. Wageningen Academic Publishers, 2005, pp. 537-545.
24. SELIGE, T.; BÖHNER, J.; SCHMIDHALTER, U. High resolution topsoil mapping using hyper spectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. In: *Geoderma*. 2006, vol. 136(1-2), pp. 235-244.
25. SHEPHERD, K.; FERGUSON, R.; HOOVER, D.; VAN EGMOND, F.; SANDERMAN, J.; GE, Y. A global soil spectral calibration library and estimation service. In: *Soil Security*. 2022, vol. 7, 100061. ISSN 2667-0062. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100061>.
26. SORENSEN, L.; DALSGAARD, S. Determination of clay and other soil properties by near infrared spectroscopy. In: *Soil Science Society of America Journal*. 2005, vol. 69, pp. 159-167.
27. STENBERG, B.; VISCARRA-ROSSEL, R.A., MOUAZEN, A.; WETTERLIND, J. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. In: *Advances in Agronomy*. Academic Press, Waltham, MA, 2010, vol. 107, pp. 163-215.
28. STEVENS, A.; NOCITA, M.; TOTH, G.; MONTANARELLA, L.; VAN WESEMAEL, B. Prediction of soil organic carbon at the European scales by visible and near infrared reflectance spectroscopy. In: *PLOS ONE*. 2013, vol. 8(6), 13 p.
29. TERHOEVEN-URSELMANS, T.; SCHMIDT, H.; JOERGENSEN, R.G.; LUDWIG, B. Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment. In: *Soil Biology and Biochemistry*. 2008, vol. 40(5), pp. 1178-1188. ISSN 0038-0717.
30. TODOROVA, M. Influence of Soil Type on Determination of Soil Organic Carbon by Near Infrared Reflectance Spectroscopy. In: *Soil Science Agrochemistry and Ecology (Bulgaria)*. 2014.
31. TODOROVA, M.; ATANASSOVA, S. Near infrared spectra and soft independent modelling of class analogy for discrimination of Chernozems, Luvisols and Vertisols. In: *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2016, vol. 24(3), pp. 271-280.
32. TÓTH, G.; JONES, A.; MONTANARELLA, L. The LUCAS topsoil database and derived information on the regional variability of cropland topsoil properties in the European Union. In: *Environmental monitoring and assessment*. 2013, vol. 185, pp. 7409-7425.

33. TÜMSAVAŞ, Z.; TEKIN, Y.; ULUSOY, Y.; MOUAZEN, A. Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. In: *Biosystems Engineering*. 2019, vol. 177, pp. 90-100. ISSN 1537-5110
34. URSU, A. *Solurile Moldovei*. Chişinău: Ştiinţa, 2011. 324 p. ISBN 978-9975-67-572-7.
35. VAN VUUREN, J.A.J.; MEYER, J.H.; CLAASSES, A.S. Potential use of near infrared reflectance monitoring in precision agriculture. In: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2006, vol 37(15-20), pp. 2171-2184.
36. VISCARRA ROSSEL, R.A.; WALVOORT, D.; MCBRATNEY, A.; JANIK, L.; SKJEMSTAD, J. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. In: *Geoderma*. 2006, vol. 131(1-2), pp. 59-75.
37. VISCARRA ROSSEL, R.V.; BEHRENS, T.; BEN-DOR, E.; BROWN, D.J.; DEMATTÊ, J.A.; SHEPHERD, K. et al. A global spectral library to characterize the world's soil. In: *Earth-Science Reviews*. 2016, vol. 155, pp. 198-230.
38. VOHLAND, M.; LUDWIG, B.; SEIDEL, M.; HUTENGES, C. Quantification of soil organic carbon at regional scale: Benefits of fusing vis-NIR and MIR diffuse reflectance data are greater for in situ than for laboratory-based modelling approaches. In: *Geoderma*. 2022, vol. 405, 115426.
39. WETTERLIND, J. *Improved farm soil mapping using near infrared reflectance spectroscopy*: doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Skara. SLU Repro, Uppsala, 2009. 73 p.
40. WETTERLIND, J.; STENBERG, B.; VISCARRA ROSSEL, R. Soil analysis using visible and near infrared spectroscopy. In: *Methods in molecular biology* (Clifton, N.J.). 2013, nr. 953, pp. 95-107.
41. WETTERLIND, J.; PIKKI, K.; STENBERG, B.; SÖDERSTRÖM, M. Exploring the predictability of soil texture and organic matter content with a commercial integrated soil profiling tool. In: *European Journal of Soil Science*. 2015, vol. 66, pp. 631-638.
42. ZORNOZA, R.; GUERRERO, C.; MATAIX-SOLERA, J.; SCOW, K.M.; ARCENEGUI, V.; MATAIX-BENEYTO, J. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. In: *Soil Biology and Biochemistry*. 2008, vol. 40(7), pp. 1923-1930.
43. ДОКУЧАЕВ, В. *Русский чернозем*: Отчет Императорскому вольному экономическому обществу: С почвенной картой и 12-ю рисунками в тексте / В.В. ДОКУЧАЕВ. Санкт-Петербург: Типография Деклерона и Евдокимова, 1883. 376 с.
44. КОВДА, В.А.; САМОИЛОВА, Е.М. *Русский чернозем – 100 лет после Докучаева*. Москва, Наука, 1983. 304 с.

LISTA PUBLICAȚIILOR ȘTIINȚIFICE LA TEMA TEZEI

- *Articole în reviste științifice din bazele de date SCOPUS*

BOINCEAN, B.; KASSAM, A.H.; BASCH, G.; REICOSKY, D.C.; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, E.J.; REYNOLDS, T.; **ILUȘCA, M.**; CEBOTARI, M.; RUSNAC, G.; CUZEAC, V.; BULAT, L.; PASAT, D.; STADNIC, S.; GAVRILAȘ, S.; BOAGHII, I. Towards Conservation Agriculture Systems in Moldova. In: *AIMS Agriculture and Food*. 2016, nr. 1(4), pp. 369-386. ISSN 2471-2086. DOI: 10.3934/agrfood.2016.4.369

- *Articole în reviste științifice internaționale*

ILUȘCA, M.; BUCHHART, C.; HEIL, K.; BOINCEAN, B.; SCHMIDHALTER, U. Soil fertility assessment by Near Infrared Reflectance Spectroscopy in the North of Republic of Moldova. (*în ediție*)

- *Articole în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, categoria B*

ILUȘCA, M. Estimarea preciziei modelului NIRS de predicție în funcție de tipul de sol. In: *Revista de Știință, Inovare, Cultură și Artă „Akademos”*. 2022, nr. 2(65), pp. 93-98. ISSN 1857-0461. DOI: 10.52673/18570461.22.2-65.08

ILUȘCA, M. Analiza comparativă a cernoziomurilor tipice din zona de Nord a Moldovei după diferiți indicatori. In: *Știința Agricolă*. 2022, nr. 2, pp. 3-11. ISSN 2587-3202.

- *Articole în lucrările conferințelor și altor manifestări științifice*

ILUȘCA, M. Evaluarea fertilității solului în Republica Moldova. In: *Orientări actuale în cercetarea doctorală*. Ediția 7, 7 decembrie 2017, Bălți. Bălți, Republica Moldova: Tipografia "Indigou Color", 2017, pp. 75-76.

ILUȘCA, M. Potențialul metodei NIRS în determinarea texturii solurilor din zona de Nord a Republicii Moldova. In: *Tradiție și inovare în cercetarea științifică*. Ediția 10, Vol. I, 8 octombrie 2021, Bălți. Bălți: Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți, 2021, pp. 183-189. ISBN 978-9975-50-271-9.

ADNOTARE

Ilușca Marina „Evaluarea fertilității solurilor în Republica Moldova (cu folosirea analizei spectrale)”, teză de doctor în științe agricole, Chișinău, 2023

Structura tezei: introducere, 6 capitole, concluzii generale și recomandări, 120 pagini de text de bază, bibliografie din 220 surse, 24 tabele, 46 figuri, 22 anexe. Rezultatele obținute sunt publicate în 6 lucrări științifice.

Cuvinte-cheie: fertilitatea solului, materia organică a solului, textura solului, agricultura de precizie, NIRS, spectru, predicție, calibrare, variabilitate spațială, tip de sol, monitorizare.

Scopul lucrării: studierea potențialului spectroscopiei de absorbție în regiunea infraroșu apropiat (NIRS) în estimarea indicatorilor agrofizici și agrochimici ai fertilității solului pe cernoziomurile și solurile cenușii din zona de Nord a Moldovei, pentru evaluarea și monitorizarea stării de calitate a acestora în timp.

Obiectivele cercetării: stabilirea rolului indicatorilor fertilității solului, în special, a materiei organice a solului în asigurarea unei dezvoltări durabile a sectorului agricol; determinarea indicatorilor agrofizici și agrochimici ai fertilității solului prin metoda NIRS; estimarea preciziei modelului de predicție în dependență de variația tipului de sol și dimensiunea arealului geografic studiat; studierea posibilității de utilizare a metodei NIRS în cartografierea variabilității spațiale a solului, la nivel de câmp sau gospodărie agricolă, în scopul sporirii preciziei în producerea agricolă și reducerii impactului negativ asupra mediului ambiant; evaluarea aptitudinii utilizării datelor spectrale în evaluarea și monitorizarea impactului managementului agricol în timp asupra calității solurilor.

Noutatea și originalitatea științifică. A fost efectuată analiza comparativă a stării de calitate a solurilor cenușii și cernoziomurilor din zona de Nord a Moldovei, în baza studierii profilelor de sol extrase volumetric până la adâncimea de 1 m. Pentru prima dată a fost efectuată estimarea spectroscopică a indicatorilor fertilității solului, prin metoda NIRS, fiind una rapidă, cost-efectivă și alternativă la analizele clasice de laborator. A fost studiată variabilitatea orizontală și verticală la nivel regional și în cadrul câmpului individual, cu evaluarea impactului managementului agricol asupra calității solului și amplificării proceselor de degradare.

Rezultatul obținut care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante constă în *argumentarea potențialului spectroscopiei de absorbție în regiunea infraroșu apropiat* ca instrument în evaluarea și monitorizarea fertilității solului, *ceea ce a condus la elaborarea modelelor* statistice de predicție pentru estimarea proprietăților agrochimice și agrofizice a solului, *fapt care a permis* colectarea și analiza unui număr mare de probe pentru a obține o informație detaliată privind heterogenitatea orizontală și verticală a solului la nivel regional și local.

Semnificația teoretică: Cercetările științifice efectuate au contribuit la fundamentarea și aprofundarea cunoștințelor în domeniul statisticii multivariabile, pentru a modela relația dintre datele spectrale și proprietățile solului, cu o precizie rezonabilă. Analiza evoluției în timp a stării de calitate a solurilor în Republica Moldova a confirmat necesitatea extinderii practicilor de management durabil și rezilient a solurilor de cernoziom.

Valoarea aplicativă: Rezultatele obținute vor servi drept bază inițială pentru instituirea unui sistem complex de monitorizare a calității solului în timp și spațiu, în Republica Moldova, prin utilizarea metodelor alternative și cost-efective de analiză a solului. Informația privind heterogenitatea fertilității solului poate fi folosită în cartografierea digitală a câmpului ca un instrument în managementul culturilor de câmp specific locației, în scopul utilizării raționale a resurselor de sol din gospodărie, cu reducerea cheltuielilor de producere și a impactului negativ asupra mediului ambiant.

Implementarea rezultatelor științifice: Rezultatele cercetărilor au fost implementate în procesul didactic la Universitatea Agrară de Stat din Moldova, la Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți, precum și de Agenția Națională de Relații Funciare și Cadastru.

ANNOTATION

Ilușca Marina: Soil fertility assessment in the Republic of Moldova (using spectral analysis)
PhD thesis in agricultural sciences, Chisinau, 2023

Thesis structure: Introduction, 6 chapters, Conclusions and recommendations; 120 pages of text, Bibliography of 220 sources, 24 tables, 46 figures, 22 annexes. The obtained results are published in 6 scientific papers.

Keywords: soil fertility, soil organic matter, soil texture, precision agriculture, NIRS, prediction, calibration, spatial variability, soil type, monitoring.

Purpose: To study the potential of near infrared reflection spectroscopy (NIRS) in the estimation of agrophysical and agrochemical indicators of soil fertility on Chernozem and Dark Grey Soils in the North of Moldova, for the assessment and monitoring of their quality.

Objectives: Establishing the role of soil fertility indicators, in particular, soil organic matter in ensuring a sustainable development of the agricultural sector; determining the agrophysical and agrochemical indicators of soil fertility by the NIRS method; estimating the prediction model accuracy based on the soil type variation and size of the geographical area studied; studying the possibility of using the NIRS method in mapping the spatial variability of the soil at field or farm level in order to increase precision in agricultural production and reduce the negative impact on the environment; assessing the suitability of spectral data for use in monitoring the impact of agricultural management practices on soil quality.

Scientific novelty and originality: The comparative analysis of the quality status of Chernozem and Dark Grey soils in the North of Moldova was carried out, based on the study of volumetrically extracted soil profiles up to a 1m depth. For the first time, the spectroscopic estimation of soil fertility indicators was carried out using the NIRS method: a quick, cost-effective alternative to conventional laboratory analyses. Horizontal and vertical variability at the regional level and within the individual field was studied, with the assessment of the agricultural management impact on soil quality and the amplification of degradation processes.

The obtained result that contributes to the solution of an important scientific problem consists in *arguing* the potential of *near infrared reflectance spectroscopy* as a tool for soil fertility assessment and monitoring, *which led to the development* of statistical prediction models for the estimation of agrochemical and agrophysical soil properties and *which allowed* the collection and analysis of a large number of soil samples to obtain detailed information on the horizontal and vertical soil variability at regional and local levels.

Theoretical significance: The scientific research carried out has contributed to the foundation and deepening of knowledge in the field of multivariable statistics to model the relationship between spectral data and soil properties with reasonable accuracy. The analysis of the evolution over time of the state of soil quality in the Republic of Moldova has highlighted the role and importance of extending sustainable and resilient soil management practices on Chernozem soils.

Application value: The obtained results will serve as an initial basis for the establishment of a complex system for monitoring soil quality in time and space in the Republic of Moldova through application of alternative, cost-effective methods in soil analysis which, in turn, will support farmers with good advice. Information on the soil fertility heterogeneity can be used in digital field mapping as a tool in site-specific field crop management with the aim of rational use of farm's soil resources, reducing production costs and the negative impact on the environment.

Results implementation: The research results were implemented in the teaching process at the State Agrarian University of Moldova, at the Alecu Russo Balti State University, as well as by the National Agency for Land Relations and Cadastre.

АННОТАЦИЯ

Илушка Марина «Оценка плодородия почв в Республике Молдова (с применением спектрального анализа)», диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук, Кишинёв, 2023 г.

Структура: введение, 6 глав, выводы и рекомендации, 120 страниц основного текста, библиография из 220 источников, 24 таблиц, 46 графиков, 22 приложений.

Ключевые слова: плодородие, органическое вещество почвы, механический состав почвы, точное земледелие, БИКС, прогноз, калибровка, пространственная изменчивость, тип почвы, мониторинг.

Цель работы: изучение возможностей спектроскопии поглощения в ближней инфракрасной области (БИКС) при оценке агрофизических и агрохимических показателей плодородия почв на черноземах и сероземах северной части Молдовы, для оценки и мониторинга их качественного состояния во времени.

Задачи работы: установление роли показателей плодородия почв, в частности органического вещества почв, в обеспечении устойчивого развития аграрного сектора; определение агрофизических и агрохимических показателей плодородия почвы методом БИКС; оценка точности прогностической модели в зависимости от вариации типа почвы и размера изучаемой географической области; изучение возможности использования метода БИКС при картографировании неоднородности почвы на уровне поля или фермы с целью повышения точности сельскохозяйственного производства и снижения негативного воздействия на окружающую среду; оценка пригодности спектральных данных для использования в мониторинге воздействия систем земледелия и ведения хозяйств на качество почвы с течением времени.

Новизна и научная оригинальность: Проведен сравнительный анализ качественного состояния сероземов и черноземов в северной части Молдовы на основе изучения объемно извлеченных почвенных профилей до глубины 1 м. Впервые проведена спектроскопическая оценка показателей плодородия почв методом БИКС, который является быстрым, экономичным и альтернативным классическим лабораторным анализам. Изучена горизонтальная и вертикальная изменчивость почв с оценкой влияния агротехники на качество почвы и усиление деградационных процессов.

Полученный результат, способствующий решению важной научной задачи, заключается в обосновании перспективности спектроскопии БИК как инструмента оценки и мониторинга плодородия почв, что привело к разработке моделей статистического прогноза для определения свойств почвы, что позволило собрать и анализировать подробную информацию о горизонтальной и вертикальной неоднородности почв на региональном и локальном уровнях.

Теоретическая значимость работы: Проведенные научные исследования способствовали формированию и углублению знаний в области многомерной статистики для моделирования взаимосвязи между спектральными данными и свойствами почвы с достаточной точностью. Анализ эволюции состояния качества почвы в Республике Молдова с течением времени выявил роль и значимость расширения методов устойчивого управления почвами.

Практическая значимость работы: Полученные результаты послужат исходной основой для создания комплексной системы мониторинга качества почвы во времени и пространстве в Республике Молдова путем использования альтернативных и экономически эффективных методов анализа почвы. Информация о неоднородности почвенного плодородия может быть использована в цифровом полевом картографировании как инструмент технологии точного земледелия с целью рационального использования земельных ресурсов фермы, снижения себестоимости продукции и негативного воздействия на окружающую среду.

Внедрение полученных результатов: Результаты исследования были внедрены в учебный процесс в Государственном аграрном университете Молдовы, в Бельцком государственном университете им. Алеку Руссо, а также Агентством Земельных отношений и Кадастра Республики Молдова.

ILUȘCA MARINA

**EVALUAREA FERTILITĂȚII SOLURILOR
ÎN REPUBLICA MOLDOVA (CU FOLOSIREA
ANALIZEI SPECTRALE)**

411.01 – AGROTEHNICA

Rezumatul tezei de doctor în științe agricole

Aprobat spre tipar: 14.03.2023

Hârtie ofset. Tipar ofset.

Coli de tipar.: ...

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Tiraj 30 ex.

Comanda nr. 48

Centrul Editorial-Poligrafic al Universității Pedagogice de Stat „Ion Creangă” din
Chișinău, str. Ion Creangă, nr. 1, MD-2069