

Violeta-Carolina NICULESCU • Iulian VOICEA • Diana Ionela POPESCU (STEGĂRUȘ)

GHID DE BUNE PRACTICI

*Soluții științifice
pentru o agricultură durabilă
și alimente sigure*

PENTRU AGRICULTURĂ REZILIENTĂ ȘI OBȚINEREA DE ALIMENTE SIGURE

TRANSFERUL CONTAMINANȚILOR PE LANȚUL
SOL-PLANTĂ-PRODUS ȘI EVALUAREA
CALITĂȚII ALIMENTELOR

*Instrument practic pentru monitorizarea
contaminanților și evaluarea siguranței alimentelor*

PESTICIDE (reziduuri frecvente)



Imidacloprid
Acetamiprid
Lambda-cihalotrin
Clorpirifos
Tebuconazol
Azoxistrobin
Pirimicarb
Mancozeb
Glifosat
2,4-D

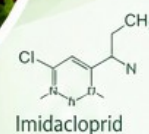
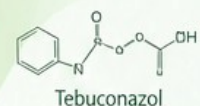
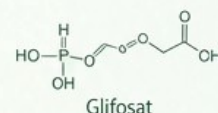
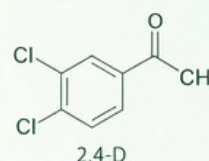


PRODUS ALIMENTAR (calitate și siguranță)



Cd Pb As
Hg Ni Cu Zn

ELEMENTE POTENȚIAL TOXICE
(metale și metaloizi)



SOL SĂNĂTOS



PLANTE SĂNĂTOASE



ALIMENTE SIGURE



OAMENI SĂNĂTOȘI



MEDIU PROTEJAT

ȘTIINȚĂ • EVIDENȚE • SOLUȚII • PENTRU VIITOR

Violeta-Carolina Niculescu • Iulian Voicea • Diana Ionela Popescu (Stegăruș)

GHID DE BUNE PRACTICI PENTRU AGRICULTURĂ REZILIENTĂ ȘI OBȚINEREA DE ALIMENTE SIGURE

**Transferul contaminanților pe lanțul sol-
plantă-produs și evaluarea calității
alimentelor**

ISBN 978-973-0-45028-6

Râmnicu Vâlcea
2026

AUTORI

Violeta-Carolina Niculescu¹

Iulian Voicea²

Diana Ionela Popescu (Stegăruș)¹

¹ Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice - ICSI Râmnicu Vâlcea, Str. Uzinei nr. 4, Râmnicu Vâlcea, România

² Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Mașini și Instalații Destinate Agriculturii și Industriei Alimentare - INMA București, Str. Ion Ionescu de la Brad nr. 6, Sector 1, București, România

INFORMAȚII PRIVIND PROIECTUL

Proiect: ADER cod 6.3.7: „Măsurile de aplicabilitate privind investigarea distribuției contaminanților organoclorurați și organofosforici pe lanțul sol-plantă-legumă/fruct-produs finit, urmărind diferite tipuri de soluri din arii variate”

Program: Planul sectorial pentru cercetare-dezvoltare din domeniul agricol
- Plan sectorial ADER 2023-2026

Autoritate contractantă: Ministerul Agriculturii și Dezvoltării Rurale

Coordonator: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice - I.C.S.I. Râmnicu Vâlcea (INC-DTCI-ICSI Râmnicu Vâlcea)

Partener: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Mașini și Instalații Destinate Agriculturii și Industriei Alimentare - INMA București

Contract de finanțare: nr. 6.3.7, încheiat la data de 20.07.2023

Perioada de implementare: 20.07.2023 - 31.12.2026

Valoarea totală a proiectului: 1.700.000 lei

Pagina oficială a proiectului: <https://www.icsi.ro/ader637/>

Prezentul ghid reprezintă un rezultat al proiectului ADER cod 6.3.7 și valorifică rezultatele activităților de cercetare, monitorizare, analiză și evaluare desfășurate în cadrul proiectului. Ghidul urmărește transferul rezultatelor științifice către practica agricolă, cu accent pe investigarea contaminanților în sistemul sol-plantă-produs, evaluarea transferului către partea comestibilă și susținerea producției de alimente sigure.

PREFAȚĂ

Siguranța alimentelor reprezintă una dintre componentele fundamentale ale unei agriculturi durabile și reziliente. Într-un context caracterizat de schimbări climatice, intensificarea activităților agricole, presiuni asupra resurselor de sol și apă și apariția unor noi surse de contaminare, evaluarea calității produselor agricole nu mai poate fi realizată exclusiv la nivelul produsului finit. Este necesară o abordare integrată, care să urmărească parcursul contaminanților de la sursă, prin sol și plantă, până la produsul destinat consumului.

Ghidul de bune practici pentru agricultură rezilientă și obținerea de alimente sigure: transferul contaminanților pe lanțul sol-plantă-produs și evaluarea calității alimentelor a fost elaborat în cadrul activităților de cercetare desfășurate prin proiectul ADER 6.3.7 - „Măsuri de aplicabilitate privind investigarea distribuției contaminanților organoclorurați și organofosforici pe lanțul sol-plantă-legumă/fruct-produs finit”.

Ghidul valorifică rezultatele experimentale și experiența acumulată în activitățile de caracterizare a contaminanților, de evaluare a transferului acestora în sistemul sol-plantă și de investigare a reziduurilor de pesticide în produsele finite. O atenție deosebită a fost acordată atât contaminanților anorganici, inclusiv elementelor potențial toxice, cât și reziduurilor de pesticide, pentru care abordarea multireziduală și evaluarea expunerii cumulative devin din ce în ce mai importante. Un element central l-a reprezentat trecerea de la o abordare bazată exclusiv pe concentrația contaminantului la o evaluare integrată a mobilității, biodisponibilității, transferului, acumulării în partea comestibilă a plantei și expunerii consumatorului. În acest mod, datele analitice au putut fi transformate în informații relevante pentru luarea deciziilor și pentru aplicarea unor măsuri de prevenire sau intervenție. Ghidul urmărește, de asemenea, să evidențieze faptul că un agroecosistem nu trebuie evaluat printr-o singură determinare sau printr-un singur indicator. Caracteristicile solului, sursa și calitatea apei de irigare, fertilizantii și amendamentele utilizate, specia și cultivarul cultivat, practicile fitosanitare, momentul recoltării, condițiile de depozitare și procesare și, în final, caracteristicile produsului alimentar trebuie analizate ca elemente ale aceluiași sistem. În acest context, recomandările formulate în ghid sunt orientate către un *model de monitorizare bazat pe risc*, care urmărește identificarea timpurie a situațiilor problematice, confirmarea acestora prin metode analitice adecvate, identificarea surselor, aplicarea măsurilor corective și verificarea eficienței intervențiilor.

Prin structura sa, ghidul se adresează cercetătorilor, specialiștilor din laboratoarele de analiză, fermierilor și operatorilor din sectorul agroalimentar, precum și tuturor celor implicați în monitorizarea calității solurilor, culturilor și produselor agricole. Ghidul poate constitui, de asemenea, un suport pentru dezvoltarea unor programe de monitorizare adaptate condițiilor locale și pentru fundamentarea unor viitoare activități de cercetare și transfer tehnologic. Datele obținute prin metode analitice avansate dobândesc valoare aplicativă atunci când pot contribui la prevenirea contaminării, la alegerea unor practici agricole adecvate și la protejarea calității produselor destinate consumului. În acest sens, mesajul fundamental al ghidului poate fi sintetizat astfel: „**Siguranța alimentelor începe în sol, dar trebuie controlată până la produsul destinat consumului**”.

Acest principiu stă la baza întregii abordări propuse: *prevenire* → *monitorizare* → *detectare* → *evaluare* → *intervenție* → *verificare* → *reevaluare*. Elaborarea acestui ghid reprezintă, astfel, nu doar o sinteză a unor rezultate științifice, ci și un pas către transformarea acestora în instrumente practice pentru o agricultură mai rezilientă, un mediu mai bine protejat și obținerea unor alimente sigure pentru consumator.

Violeta-Carolina Niculescu

Editor

Râmnicu Vâlcea, 2026

Cuprins

1. INTRODUCERE	9
2. AGRICULTURA REZILIENTĂ ȘI REZILIENȚA AGROECOSISTEMELOR.....	12
2.1. Conceptul de agricultură rezilientă	12
2.2. Reziliența agroecosistemelor	13
2.3. Solul - componentă centrală a rezilienței agricole	14
2.4. Reziliența și transferul contaminanților în sistemul sol-plantă	14
2.5. Principalii factori care afectează reziliența sistemelor agricole	15
2.6. Practici agricole pentru creșterea rezilienței	16
2.7. Prevenirea contaminării ca principiu al agriculturii reziliente	17
2.8. Agricultură rezilientă și siguranța alimentelor	18
2.9. Principii pentru dezvoltarea unor agroecosisteme reziliente	18
3. CONTAMINANȚII ÎN SISTEMUL SOL-PLANTĂ-PRODUS	20
3.1. Importanța contaminării solului pentru agricultură și siguranța alimentelor	20
3.2. Principalele categorii de contaminanți relevanți pentru agroecosisteme	20
3.2.1. Elemente și metaloizi potențial toxici.....	21
3.2.2. Pesticide și produși de transformare.....	21
3.2.3. Contaminanți organici persistenți	22
3.2.4. Contaminanți emergenți	22
3.3. Sursele contaminanților în agroecosisteme	22
3.4. Comportamentul contaminanților în sol	23
3.5. Concentrația totală, mobilitatea și biodisponibilitatea	24
3.6. Absorbția și translocarea contaminanților în plante	25
3.7. Factori care controlează transferul sol-plantă	26
3.8. De la plantă la produsul agricol și produsul alimentar	26
3.9. Contaminarea și siguranța alimentelor - abordare bazată pe risc	27
3.10. Implicații pentru managementul agroecosistemelor.....	27
3.11. Model conceptual al transferului contaminanților	28
4. TRANSFERUL CONTAMINANȚILOR PE LANȚUL SOL-PLANTĂ-PRODUS: MECANISME, INDICATORI ȘI EVALUARE CANTITATIVĂ	30
4.1. Conceptul de transfer al contaminanților	31
4.1.1. Definirea transferului în sistemul sol-plantă-produs	31
4.1.2. Transferul nu este un proces liniar.....	32
4.1.3. Diferența dintre contaminarea solului și contaminarea produsului.....	32

4.1.4. Relevanța pentru proiectul ADER 6.3.7.....	33
4.2. Interacțiunea contaminant-sol și biodisponibilitatea	33
4.2.1. Solul ca regulator al transferului.....	33
4.2.2. Concentrația totală versus fracția disponibilă	34
4.2.3. Rolul pH-ului.....	34
4.2.4. Materia organică și carbonul organic	34
4.2.5. Textura, argila și capacitatea de schimb cationic	35
4.2.6. Rizosfera - interfața activă sol-plantă.....	35
4.2.7. Biodisponibilitatea ca indicator pentru evaluarea riscului	35
4.3. Absorbția contaminanților de către plante	36
4.3.1. Absorbția - prima etapă biologică a transferului	36
4.3.2. Influența speciei și cultivarului.....	36
4.3.3. Absorbția nu înseamnă automat acumulare în produs	37
4.3.4. Rolul rizosferei și al microorganismelor.....	37
4.3.5. Transferul multielement.....	37
4.3.6. Diferențele între sisteme de cultură.....	37
4.4. Translocarea și bioacumularea în organele vegetale.....	38
4.4.1. De la rădăcină la partea aeriană	38
4.4.2. Rădăcina ca barieră biologică	38
4.4.3. Distribuția în organele plantei.....	38
4.4.4. Bioacumularea și factorii fiziologici	39
4.4.5. Dovezi din agroecosistemele românești	39
4.4.6. De ce organul comestibil este punctul critic.....	40
4.5. Factorii de transfer și indicatorii cantitativi.....	40
4.5.1. Factorul de Transfer (TF)	40
4.5.2. De ce alegerea solului de referință este esențială	41
4.5.3. Aplicarea TF în studiile ADER	42
4.5.4. Factorul de Bioacumulare (BAF/BCF)	42
4.5.5. Factorul de Translocare	43
4.5.6. Legătura dintre TF și TF_{trans}	43
4.5.7. Relația dintre concentrația din sol și concentrația din plantă.....	44
4.5.8. Corelația nu este echivalentă cu transferul	46
4.5.9. Tabel comparativ al indicatorilor	46
4.5.10. TF mare nu înseamnă automat risc alimentar mare	47

4.5.11. Integrarea indicatorilor într-o evaluare multicriterială.....	48
4.5.12. Recomandări metodologice pentru utilizarea TF	50
4.5.13. Mesaj pentru practicieni	50
4.6. Influența speciei, cultivarului și condițiilor de cultivare.....	52
4.6.1. Influența speciei vegetale	52
4.6.2. Influența cultivarului și a genotipului	53
4.6.3. Organul vegetal și partea efectiv consumată.....	53
4.6.4. Influența condițiilor de cultivare.....	53
4.6.5. Câmp deschis versus seră	54
4.6.6. Influența irigației și fertilizării	54
4.6.7. Factorii care trebuie integrați în evaluarea transferului.....	55
4.6.8. Implicații pentru agricultura rezilientă	58
4.7. Dovezi experimentale din agroecosistemele românești	58
4.7.1. Variabilitatea transferului între culturi.....	59
4.7.2. Diferențele dintre culturile de câmp și cele din seră	60
4.7.3. Exemplul dovlecelului: efectul regiunii și al condițiilor de cultivare	61
4.7.4. De ce monitorizarea trebuie făcută pe regiuni.....	62
4.7.5. Ce ne arată concret rezultatele românești?	62
4.7.6. Implicații pentru ghidul de bune practici	64
4.8. Transferul reziduurilor de pesticide și persistența contaminării	65
4.8.1. De la aplicarea pesticidului la reziduul din produs.....	65
4.8.2. Monitorizarea multireziduală în fructe și legume	67
4.8.3. Conformitatea cu limitele maxime de reziduuri	69
4.8.4. Originea geografică și practicile agricole	69
4.8.5. Persistența contaminării în sol	70
4.8.6. Rolul procesării după recoltare	70
4.8.7. Recomandări de bune practici pentru managementul reziduurilor de pesticide...	71
4.9. De la contaminarea individuală la contaminarea multireziduală	72
4.9.1. Ce înseamnă contaminare multireziduală?.....	72
4.9.2. Dovezi experimentale din monitorizarea produselor comercializate în România..	74
4.9.3. Complexitatea reziduală și Indicele de pericol.....	75
4.9.4. Numărul de pesticide versus impactul fiecărei substanțe	77
4.9.5. Vulnerabilitatea populației	77
4.9.6. De la „conform cu LMR” la „profil de expunere”	78

4.9.7. Instrumentele statistice pentru caracterizarea contaminării complexe	79
4.9.8. Recomandări de bune practici pentru contaminarea multireziduală	80
4.9.9. Conexiunea cu agricultura rezilientă	80
4.10. De la concentrația contaminantului la expunerea consumatorului	81
4.10.1. Lanțul concentrație-expunere-risc	81
4.10.2. Rolul masei corporale și al categoriei de consumator	83
4.10.3. Interpretarea HQ și HI	84
4.10.4. Complexitatea profilului de reziduuri și expunerea cumulativă	84
4.10.5. De ce copiii necesită o evaluare distinctă?	85
4.10.6. Incertitudinea și variabilitatea evaluării expunerii	85
4.10.7. De la evaluarea punctuală la monitorizarea bazată pe risc	86
4.10.8. Incertitudinea evaluării expunerii	86
4.10.9. De la evaluarea punctuală la monitorizarea bazată pe risc	86
4.10.10. Recomandări de bune practici	88
4.11. Puncte de control pe lanțul sol-plantă-produs	89
4.11.1. Controlul surselor de contaminare	90
4.11.2. Caracterizarea terenului și a solului	90
4.11.3. Biodisponibilitatea - un punct de control esențial	91
4.11.4. Apa de irigare - punct de control transversal	91
4.11.5. Controlul fertilizanților, amendamentelor și materialelor organice	91
4.11.6. Rizosfera - interfața critică sol-plantă	92
4.11.7. Alegerea culturii și a cultivarului	92
4.11.8. Monitorizarea plantei și a organului comestibil	93
4.11.9. Recoltarea și manipularea produsului	93
4.11.10. Depozitarea și procesarea - bariere suplimentare, nu substitut pentru prevenție	93
4.11.11. Controlul reziduurilor de pesticide	94
4.11.12. Contaminarea multireziduală - de la conformitate la evaluarea cumulativă....	94
4.11.13. Produsul finit - punctul de verificare a eficienței sistemului	95
4.11.14. Punctele de control integrate	95
4.11.15. Prioritizarea punctelor de control	96
4.11.16. De la monitorizare la intervenție	97
4.11.17. Sistemul de feedback - componentă a agriculturii reziliente	97
4.11.18. Matrice orientativă de decizie	98
4.11.19. Principii operaționale pentru punctele de control	99

4.12. Recomandări de bune practici pentru controlul transferului contaminanților și obținerea de alimente sigure	100
4.12.1. <i>Prevenirea contaminării trebuie să fie prioritară remedierii</i>	101
4.12.2. <i>Caracterizarea solului trebuie să depășească determinarea concentrației totale</i>	101
4.12.3. <i>Biodisponibilitatea trebuie utilizată ca indicator central al transferului</i>	101
4.12.4. <i>Managementul proprietăților solului trebuie adaptat contaminantului</i>	102
4.12.5. <i>Apa de irigare trebuie inclusă în programul de control</i>	102
4.12.6. <i>Fertilizanții, amendamentele și materialele organice trebuie controlate</i>	102
4.12.7. <i>Alegerea culturii trebuie să țină cont de capacitatea de acumulare</i>	103
4.12.8. <i>Monitorizarea trebuie orientată către partea comestibilă a plantei</i>	103
4.12.9. <i>Utilizarea pesticidelor trebuie integrată în managementul riscului</i>	103
4.12.10. <i>Monitorizarea pesticidelor trebuie să țină cont de multireziduuri</i>	104
4.12.11. <i>Monitorizarea trebuie să fie bazată pe risc</i>	104
4.12.12. <i>Rezultatele analitice trebuie transformate în decizii de management</i>	105
4.12.13. <i>Recoltarea, depozitarea și procesarea fac parte din controlul siguranței alimentelor</i>	105
4.12.14. <i>Trasabilitatea trebuie integrată în sistemul de monitorizare</i>	105
4.12.15. <i>Monitorizarea trebuie să fie adaptivă</i>	106
4.12.16. <i>Matrice operațională de bune practici</i>	106
4.12.17. <i>Cele 10 reguli esențiale ale ghidului</i>	107
5. PROTOCOL PRACTIC DE MONITORIZARE ȘI EVALUARE A SIGURANȚEI PE LANȚUL SOL-PLANTĂ-PRODUS	108
5.1. <i>Scopul și principiile protocolului</i>	108
5.2. <i>Etapa I - Evaluarea inițială a terenului</i>	109
5.2.1. <i>Identificarea și caracterizarea parcelei</i>	109
5.2.2. <i>Istoricul terenului ca instrument de screening</i>	109
5.3. <i>Etapa II - Evaluarea apei și a materialelor utilizate în agricultură</i>	110
5.3.1. <i>Apa de irigare</i>	110
5.3.2. <i>Fertilizanți, amendamente și materiale organice</i>	110
5.3.3. <i>Trasabilitatea materialelor</i>	110
5.4. <i>Etapa III - Monitorizarea culturii</i>	111
5.4.1. <i>Alegerea plantei și a organului vegetal</i>	111
5.4.2. <i>Corelarea probelor de plantă cu probele de sol</i>	111
5.4.3. <i>Factorul de transfer</i>	111

5.5. Etapa IV - Monitorizarea reziduurilor de pesticide	112
5.5.1. <i>Planul de monitorizare</i>	112
5.5.2. <i>Screeningul multirezidual</i>	112
5.5.3. <i>Evaluarea conformității</i>	112
5.6. Etapa V - Evaluarea expunerii consumatorului	112
5.6.1. <i>Stabilirea datelor de intrare</i>	113
5.6.2. <i>Alegerea scenariului de expunere</i>	113
5.6.3. <i>Estimarea expunerii</i>	114
5.6.4. <i>Evaluarea individuală și cumulativă</i>	114
5.6.5. <i>Verificarea și documentarea rezultatului</i>	114
5.6.6. <i>Interpretarea pentru management</i>	115
5.7. Etapa VI - Clasificarea operațională și luarea deciziei	115
5.8. Etapa VII - Identificarea sursei și măsurile corective	116
5.9. Etapa VIII - Verificarea eficienței intervenției	116
5.10. Fișa de monitorizare a unei parcele	117
5.11. Arbore decizional pentru evaluarea riscului	117
6. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE	119
6.1. <i>Principalele concluzii ale ghidului</i>	119
6.2. <i>Contribuția rezultatelor obținute în cadrul proiectului ADER 6.3.7</i>	120
6.3. <i>De la monitorizare la agricultură rezilientă</i>	121
6.4. <i>Recomandări pentru implementarea programelor de monitorizare</i>	122
6.5. <i>Mesaj final al ghidului</i>	123
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	124
ANEXE	130

1. INTRODUCERE

Agricultura contemporană se află în fața unor provocări complexe generate de schimbările climatice, degradarea resurselor naturale, presiunea asupra terenurilor agricole, utilizarea intensivă a inputurilor și apariția unor noi riscuri pentru calitatea și siguranța produselor agroalimentare. În acest context, dezvoltarea unor sisteme agricole reziliente, capabile să mențină productivitatea și calitatea producției în condiții variabile de mediu, reprezintă o direcție prioritară pentru asigurarea securității alimentare și pentru protejarea sănătății populației.

Reziliența agroecosistemelor nu trebuie analizată exclusiv prin prisma capacității de a menține producția agricolă, ci și prin capacitatea sistemului sol-plantă de a limita acumularea și transferul unor substanțe cu potențial toxic către produsele destinate consumului uman sau animal. Calitatea solului, proprietățile fizico-chimice ale acestuia, practicile agricole, caracteristicile culturilor și condițiile de mediu interacționează permanent și determină disponibilitatea, mobilitatea și transferul contaminanților în lanțul agroalimentar.

Contaminanții prezenți în sol pot proveni din surse naturale sau antropice și pot include metale și metaloizi, reziduuri de pesticide, compuși organoclorurați și organofosforici, precum și alte substanțe care, în anumite condiții, pot afecta sănătatea ecosistemelor și siguranța produselor agricole. Prezența unui contaminant în sol nu implică în mod automat transferul acestuia către plantă sau acumularea în partea comestibilă a acesteia. Transferul este controlat de o serie de factori care includ forma chimică și biodisponibilitatea contaminantului, proprietățile solului, pH-ul, conținutul de materie organică, capacitatea de schimb ionic, umiditatea, caracteristicile sistemului radicular, specia și cultivarului, precum și practicile de fertilizare și irigare.

Prin urmare, evaluarea siguranței produselor agricole necesită o abordare integrată, care să urmărească dinamica contaminanților de-a lungul întregului lanț *sol-plantă-produs*. O astfel de abordare permite identificarea etapelor în care poate apărea un risc, evaluarea factorilor care favorizează transferul și fundamentarea unor măsuri de prevenire sau reducere a contaminării.

În același timp, evaluarea calității și siguranței alimentelor nu se poate limita la etapa de producție agricolă. Procesele ulterioare de recoltare, depozitare, condiționare și procesare pot modifica distribuția și concentrația anumitor contaminanți și pot influența caracteristicile nutriționale și funcționale ale produselor. Unele operații tehnologice pot conduce la reducerea concentrației unui contaminant, în timp ce altele pot favoriza concentrarea acestuia prin îndepărtarea apei sau a unor fracții ale materiei prime. Din acest motiv, evaluarea riscului trebuie realizată, atunci când este relevant, atât pentru materia primă agricolă, cât și pentru produsul procesat.

În acest context, ghidul urmărește să ofere un cadru integrat pentru înțelegerea, monitorizarea și gestionarea factorilor care pot influența calitatea și siguranța produselor agroalimentare.

Prin integrarea informațiilor privind solul, planta, produsul agricol și produsul finit, ghidul propune o abordare bazată pe principiul „*de la sol la aliment sigur*”, în care prevenirea contaminării și gestionarea riscurilor sunt considerate componente esențiale ale agriculturii reziliente și ale securității alimentare.

Scopul principal al ghidului este de a furniza principii și recomandări de bună practică pentru reducerea riscurilor asociate contaminanților în sistemele agricole și agroalimentare, prin înțelegerea și evaluarea proceselor de transfer pe lanțul *sol-plantă-produs* și prin integrarea măsurilor de prevenire, monitorizare și control.

Obiective specifice

Ghidul urmărește:

- identificarea principalelor surse și categorii de contaminanți relevanți pentru sistemele agricole și produsele agroalimentare;
- prezentarea principalilor factori care controlează mobilitatea și biodisponibilitatea contaminanților în sol;
- explicarea mecanismelor și factorilor care influențează transferul contaminanților din sol către plante și produsele agricole;
- evidențierea factorilor agronomici, pedologici și de mediu care pot favoriza sau limita acumularea contaminanților;
- prezentarea unor metode și strategii pentru monitorizarea solului, plantelor și produselor agroalimentare;

- furnizarea unui cadru pentru evaluarea calității și siguranței alimentelor;
- evidențierea influenței operațiilor de procesare asupra concentrației și distribuției contaminanților;
- identificarea unor măsuri de prevenire și reducere a transferului contaminanților;
- prezentarea unor alternative tehnologice și practici agricole durabile care pot contribui la creșterea rezilienței agroecosistemelor;
- formularea unor recomandări practice fundamentate pe rezultate experimentale și pe principiile actuale de bună practică.

În ansamblu, ghidul urmărește să contribuie la dezvoltarea unei perspective integrate asupra relației dintre sănătatea solului, funcționarea agroecosistemului, calitatea producției agricole și siguranța alimentelor, oferind un instrument de sprijin pentru luarea unor decizii fundamentate și pentru promovarea unor practici agricole și tehnologice durabile.

2. AGRICULTURA REZILIENTĂ ȘI REZILIENȚA AGROECOSISTEMELOR

2.1. Conceptul de agricultură rezilientă

Sistemele agricole sunt sisteme complexe, dinamice și puternic dependente de interacțiunea dintre componentele biologice, fizice, chimice, climatice și socio-economice. Capacitatea acestora de a menține producția, funcțiile ecologice și calitatea produselor în condiții de perturbare reprezintă o componentă esențială a sustenabilității pe termen lung. În literatura de specialitate, conceptul de reziliență este asociat cu capacitatea unui sistem de a absorbi perturbările, de a se adapta la condiții în schimbare, de a se reorganiza și, atunci când este necesar, de a evolua către noi stări funcționale (Darnhofer, 2010; Pret et al., 2025).

În agricultură, reziliența nu trebuie redusă la capacitatea unei culturi de a rezista unui anumit factor de stres. Ea reprezintă o proprietate emergentă a întregului sistem agricol și include capacitatea fermierilor și a agroecosistemelor de a anticipa și gestiona șocurile climatice, degradarea resurselor, fluctuațiile disponibilității apei și nutrienților, presiunile biologice și alte perturbări care pot afecta productivitatea și stabilitatea producției (Altieri et al., 2015; Darnhofer, 2010).

Din această perspectivă, agricultura rezilientă presupune dezvoltarea unor sisteme de producție capabile să mențină funcțiile esențiale ale agroecosistemului, concomitent cu conservarea resurselor naturale și reducerea vulnerabilității la factori de stres. Diversificarea culturilor, menținerea biodiversității, conservarea solului, utilizarea eficientă a resurselor și integrarea unor practici agroecologice reprezintă elemente importante ale acestei abordări (Altieri et al., 2015; Altieri, 2018).

În condițiile actuale, reziliența agricolă trebuie analizată și din perspectiva **siguranței alimentelor**. Un sistem agricol nu poate fi considerat pe deplin rezilient dacă este capabil să mențină producția, dar generează produse cu niveluri inacceptabile de contaminanți. Astfel, capacitatea de a preveni introducerea, acumularea și transferul contaminanților către produsele agricole trebuie considerată o componentă a rezilienței agroecosistemului.

Această perspectivă este susținută de literatura recentă privind contaminarea terenurilor agricole, care evidențiază faptul că acumularea metalelor și metaloizilor în

sol poate afecta simultan funcționarea ecosistemului, productivitatea agricolă și siguranța alimentelor (Hou et al., 2020).

2.2. Reziliența agroecosistemelor

Agroecosistemele sunt sisteme socio-ecologice în care procesele naturale sunt influențate în mod direct de intervenția umană. Solul, plantele, microorganismele, apa și atmosfera interacționează continuu, iar practicile agricole modifică aceste interacțiuni. În consecință, reziliența agroecosistemului depinde nu numai de caracteristicile individuale ale componentelor sale, ci și de conectivitatea și capacitatea acestora de a răspunde la perturbări.

Abordarea agroecologică subliniază importanța diversității biologice, a reciclării resurselor, a eficienței utilizării acestora și a interacțiunilor ecologice pentru creșterea stabilității și rezilienței sistemelor agricole (Altieri, 2018). Diversitatea culturilor și integrarea unor practici precum rotația culturilor, culturile de acoperire, agroforesteria și utilizarea rațională a resurselor organice pot contribui la îmbunătățirea funcțiilor solului și la reducerea vulnerabilității sistemelor agricole la factorii de stres (Altieri et al., 2015).

Reziliența agroecosistemelor este strâns legată de sănătatea solului, deoarece solul asigură o serie de funcții esențiale pentru producția agricolă și pentru funcționarea ecosistemelor. Printre acestea se numără ciclul nutrienților, transformarea și stocarea carbonului, reglarea apei, menținerea structurii solului și susținerea biodiversității edafice (Kibblewhite et al., 2008; Lehmann et al., 2020).

Prin urmare, sănătatea solului trebuie considerată o proprietate funcțională și dinamică, nu doar o caracteristică determinată printr-un singur indicator. Evaluarea sa trebuie să integreze proprietăți fizice, chimice și biologice și să țină cont de capacitatea solului de a-și îndeplini funcțiile în raport cu utilizarea și condițiile locale (Kibblewhite et al., 2008; Lehmann et al., 2020). Literatura recentă continuă să evidențieze rolul central al sănătății solului în tranziția către sisteme agroalimentare durabile și reziliente (Mponela et al., 2026).

2.3. Solul - componentă centrală a rezilienței agricole

Solul reprezintă principalul suport fizic și biologic al producției agricole și, în același timp, o interfață esențială între mediul înconjurător și plante. Proprietățile solului controlează disponibilitatea apei și nutrienților, dezvoltarea sistemului radicular și, într-o măsură importantă, mobilitatea și biodisponibilitatea contaminanților.

Proprietăți precum pH-ul, conținutul de materie organică, textura, capacitatea de schimb cationic, conținutul de oxizi și hidroxizi de Fe și Mn, mineralogia argilei și activitatea microbiologică pot modifica speciația, mobilitatea și disponibilitatea elementelor potențial toxice (Kim et al., 2015; Zhao et al., 2015). În consecință, concentrația totală a unui contaminant în sol nu oferă întotdeauna suficiente informații pentru estimarea cantității disponibile pentru plante.

Conceptul de *biodisponibilitate* este esențial în evaluarea riscului. În cazul metalelor și metaloizilor, fracția biodisponibilă este influențată de interacțiunile dintre contaminant și fazele solide ale solului, de complexarea cu materia organică, de activitatea ionilor și de condițiile fizico-chimice din rizosferă (Kim et al., 2015). Evaluarea biodisponibilității poate furniza informații mai relevante privind riscul de preluare de către plante decât simpla determinare a concentrației totale.

În acest context, managementul sănătății solului trebuie să urmărească simultan menținerea productivității, conservarea funcțiilor ecologice și reducerea condițiilor care favorizează mobilizarea contaminanților. Practicile care contribuie la îmbunătățirea structurii, a conținutului de materie organică, a retenției apei și a activității biologice pot susține reziliența solului, însă efectul lor asupra mobilității contaminanților trebuie evaluat în funcție de tipul de contaminant și de caracteristicile locale ale solului.

2.4. Reziliența și transferul contaminanților în sistemul sol-plantă

Relația dintre sănătatea solului și siguranța alimentelor este deosebit de importantă în cazul terenurilor agricole expuse contaminării. Contaminanții din sol pot proveni din surse naturale, dar și din activități industriale, miniere, trafic, depuneri atmosferice, irigații, fertilizare, utilizarea unor amendamente sau aplicarea produselor de protecție a plantelor (Hou et al., 2020).

Prezența unui contaminant în sol nu înseamnă însă că acesta va fi transferat în mod proporțional către plantă. Transferul este rezultatul interacțiunii dintre proprietățile contaminantului, caracteristicile solului și particularitățile fiziologice ale plantei. În cazul elementelor potențial toxice, pH-ul, materia organică, textura și capacitatea de schimb ionic pot controla puternic fracția disponibilă pentru absorbția radiculară (Kim et al., 2015; Rizwan et al., 2017).

La nivelul plantei, absorbția și translocarea sunt influențate de specia chimică a elementului, de mecanismele de transport, de sistemul radicular, de stadiul de dezvoltare și de mecanismele fiziologice de detoxifiere și compartimentare. Aceste procese explică de ce aceeași concentrație de contaminant în sol poate conduce la niveluri diferite de acumulare în diferite specii sau chiar în diferite soiuri ale aceleiași specii (Rizwan et al., 2017).

Studiile asupra interfeței sol-plantă evidențiază faptul că acumularea contaminanților în țesuturile vegetale este dependentă atât de proprietățile solului, cât și de caracteristicile plantei. În cazul legumelor, de exemplu, absorbția și translocarea elementelor potențial toxice pot varia considerabil între rădăcini, frunze, tulpini și organele destinate consumului (Gupta et al., 2019).

În consecință, evaluarea riscului pentru siguranța alimentelor trebuie să depășească determinarea contaminării solului și să urmărească efectiv lanțul sol-plantă-produs.

2.5. Principalii factori care afectează reziliența sistemelor agricole

Răspunsul unui agroecosistem la perturbări este influențat de un ansamblu de factori care acționează simultan. Printre cei mai importanți se numără: degradarea fizică, chimică și biologică a solului; reducerea conținutului de materie organică; eroziunea și pierderea stratului fertil; compactarea solului; dezechilibrele nutriționale; utilizarea necorespunzătoare a îngrășămintelor; utilizarea excesivă sau necorespunzătoare a produselor de protecție a plantelor; acumularea contaminanților în sol; utilizarea unei ape de irigare de calitate necorespunzătoare; reducerea biodiversității; simplificarea excesivă a sistemelor de cultură; seceta, temperaturile

extreme și precipitațiile intense; introducerea unor inputuri cu compoziție insuficient caracterizată.

Acești factori sunt interdependenți. De exemplu, schimbarea regimului hidric poate modifica mobilitatea unor contaminanți, în timp ce modificarea pH-ului poate influența semnificativ solubilitatea și biodisponibilitatea anumitor elemente. În același timp, modificarea materiei organice poate avea efecte diferite în funcție de natura contaminantului și de proprietățile solului.

Prin urmare, strategiile de creștere a rezilienței trebuie să fie contextuale și integrate, iar măsurile de management trebuie fundamentate pe caracteristicile specifice ale solului, culturii și contaminantului.

2.6. Practici agricole pentru creșterea rezilienței

Literatura de specialitate indică o serie de practici care pot contribui la creșterea rezilienței agroecosistemelor și la îmbunătățirea funcțiilor solului. Printre acestea se numără diversificarea culturilor, rotația culturilor, utilizarea culturilor de acoperire, reducerea perturbării mecanice a solului, menținerea reziduurilor vegetale și aplicarea unor surse adecvate de materie organică (Altieri et al., 2015; Kibblewhite et al., 2008).

Un principiu important este acela că practicile agricole trebuie evaluate nu numai în raport cu efectul lor asupra producției, ci și prin prisma efectelor asupra funcțiilor solului și asupra riscurilor pentru mediu și sănătatea umană.

Aplicarea materiei organice sau a unor amendamente poate îmbunătăți unele proprietăți ale solului și poate modifica biodisponibilitatea contaminanților. Cu toate acestea, utilizarea acestor materiale trebuie precedată de caracterizarea compoziției lor, deoarece unele materiale organice sau amendamente pot conține contaminanți și pot deveni surse secundare de poluare (Hou et al., 2020).

În cazul solurilor contaminate, strategiile de remediere sau de reducere a biodisponibilității trebuie selectate în funcție de contaminant, caracteristicile solului și utilizarea terenului. Literatura actuală evidențiază potențialul unor abordări biologice, inclusiv fitoremedierea și bioremedierea microbiană, ca alternative sau componente ale unor strategii integrate de gestionare a terenurilor contaminate (Hou et al., 2020; Naidu et al., 2025).

În acest context, principiul fundamental trebuie să fie „prevenirea înainte remedierii”. Limitarea introducerii contaminanților în agroecosistem este, în general, preferabilă intervenției ulterioare asupra unui sol deja contaminat.

2.7. Prevenirea contaminării ca principiu al agriculturii reziliente

Prevenirea reprezintă una dintre cele mai eficiente componente ale unei strategii de management al riscurilor. Pentru contaminanții persistenți, acumularea în sol poate genera riscuri pe termen lung și poate limita utilizarea agricolă a terenului.

O strategie preventivă trebuie să înceapă cu identificarea surselor potențiale de contaminare și evaluarea calității inputurilor agricole. Îngrășămintele, amendamentele, materialele organice, apa de irigare și produsele utilizate pentru protecția plantelor trebuie gestionate astfel încât să fie minimizat riscul introducerii unor contaminanți în sistem.

Monitorizarea reprezintă a doua componentă. Evaluarea periodică a solului, a plantelor și, atunci când este necesar, a produselor agricole permite identificarea din timp a tendințelor de acumulare și stabilirea unor măsuri corective.

În cazul metalelor și metaloizilor, simpla determinare a concentrației totale poate fi completată prin evaluarea fracțiilor mobile sau biodisponibile. Metodele de extracție chimică și tehnici precum Gradienti difuzivi în pelicule subțiri (Diffusive Gradients in Thin Films-DGT) pot furniza informații suplimentare privind fracțiile labile și potențial disponibile pentru plante (Senila & Kovacs, 2024).

Astfel, managementul riscului poate fi structurat în trei niveluri: **PREVENIRE → MONITORIZARE → INTERVENȚIE**.

Prevenirea urmărește reducerea introducerii contaminanților în agroecosistem. **Monitorizarea** urmărește identificarea modificărilor concentrațiilor, mobilității și transferului contaminanților. **Intervenția** urmărește reducerea biodisponibilității, limitarea transferului către plante sau eliminarea/controlul sursei atunci când este identificat un risc.

2.8. Agricultura rezilientă și siguranța alimentelor

Siguranța alimentelor trebuie considerată o proprietate care se construiește de-a lungul întregului lanț agroalimentar și nu exclusiv în etapa de procesare. Calitatea și siguranța produsului finit sunt influențate de condițiile în care materia primă este produsă, recoltată, transportată, depozitată și procesată.

În cazul contaminanților din sol, plantele pot reprezenta o verigă de transfer către lanțul alimentar. Studiile asupra sistemului sol-plantă evidențiază faptul că factorii care controlează biodisponibilitatea în sol și mecanismele de absorbție și translocare ale plantei determină în mare măsură concentrația contaminanților în produsele agricole (Rizwan et al., 2017; Gupta et al., 2019).

În consecință, o abordare eficientă a siguranței alimentelor trebuie să includă monitorizarea și controlul riscurilor încă din etapa de producție primară. Evaluarea solului, a apei de irigare, a inputurilor agricole și a produselor recoltate permite identificarea unor puncte critice înainte ca riscul să ajungă la consumator.

Această abordare este în concordanță cu perspectiva actuală asupra sistemelor agroalimentare, în care sănătatea solului, sănătatea plantelor, calitatea alimentelor și sănătatea umană sunt considerate componente interconectate ale unui sistem complex.

2.9. Principii pentru dezvoltarea unor agroecosisteme reziliente

Dezvoltarea rezilienței agroecosistemelor poate fi fundamentată pe următoarele principii:

1. Cunoașterea resursei sol - caracterizarea proprietăților fizice, chimice și biologice relevante.
2. Prevenirea contaminării - controlul surselor și al calității inputurilor agricole.
3. Monitorizarea bazată pe risc - prioritizarea contaminanților și a zonelor cu potențial ridicat de acumulare.
4. Evaluarea biodisponibilității - atunci când concentrația totală nu este suficientă pentru estimarea riscului.
5. Abordarea lanțului sol-plantă-produs - evaluarea transferului până la produsul destinat consumului.

6. Diversificarea sistemelor agricole - utilizarea rotației, diversificării și a altor practici care cresc stabilitatea agroecosistemului.
7. Menținerea sănătății solului - conservarea materiei organice, structurii, biodiversității și funcțiilor biologice.
8. Utilizarea eficientă a resurselor - în special apă, nutrienți și materie organică.
9. Intervenția preventivă și timpurie - aplicarea măsurilor înainte ca un contaminant să ajungă în produsul alimentar.
10. Decizii fundamentate pe date - utilizarea monitorizării și a rezultatelor analitice pentru adaptarea practicilor agricole.

Prin urmare, agricultura rezilientă nu trebuie privită ca un set rigid de tehnologii, ci ca un sistem adaptativ de management, în care practicile sunt ajustate în funcție de caracteristicile agroecosistemului, de condițiile climatice, de riscurile identificate și de obiectivul final de obținere a unor produse agricole sigure și de calitate.

În cadrul prezentului ghid, această abordare este sintetizată prin relația:
SĂNĂTATEA SOLULUI → FUNCȚIONAREA AGROECOSISTEMULUI → TRANSFERUL SOL-PLANTĂ → CALITATEA PRODUSULUI → SIGURANȚA ALIMENTELOR

Această succesiune reprezintă cadrul conceptual pentru capitolele următoare, în care vor fi analizate sursele și comportamentul contaminanților, mecanismele de transfer pe lanțul sol-plantă-produs, metodele de monitorizare și evaluare, precum și măsurile de prevenire și reducere a riscurilor.

3. CONTAMINANȚII ÎN SISTEMUL SOL-PLANTĂ-PRODUS

3.1. Importanța contaminării solului pentru agricultură și siguranța alimentelor

Solul reprezintă una dintre principalele resurse naturale pentru producția agricolă și, în același timp, un compartiment important pentru acumularea, transformarea și transportul contaminanților în mediul terestru. Poluarea solului poate afecta funcțiile ecosistemice, biodiversitatea edafică, productivitatea agricolă și calitatea resurselor de apă și poate reprezenta o sursă indirectă de expunere a populației prin intermediul produselor agroalimentare (FAO&UNEP, 2021; Hou et al., 2020).

Contaminanții ajunși în sol nu rămân în mod necesar localizați în punctul de introducere. În funcție de proprietățile lor și de caracteristicile mediului, aceștia pot fi reținuți în matricea solului, transformați, mobilizați către apă, preluați de microorganisme și plante sau transferați ulterior către lanțurile trofice. Astfel, solul poate funcționa simultan ca rezervor, filtru, tampon și sursă secundară de contaminare (FAO & UNEP, 2021).

În cazul terenurilor agricole, această dinamică are o importanță deosebită deoarece contaminanții pot ajunge în culturile destinate consumului uman sau animal. Transferul lor către plante nu este însă un proces direct și proporțional cu concentrația totală din sol. Mobilitatea și biodisponibilitatea contaminanților sunt controlate de proprietățile fizico-chimice și biologice ale solului, de caracteristicile contaminantului și de particularitățile speciei vegetale (Hou et al., 2020; Kim et al., 2015).

Prin urmare, evaluarea riscului pentru siguranța alimentelor trebuie să depășească simpla determinare a concentrației totale a contaminanților în sol și să urmărească comportamentul acestora pe întregul traseu sol-plantă-produs.

3.2. Principalele categorii de contaminanți relevanți pentru agroecosisteme

Contaminanții de interes pentru sistemele agricole pot fi grupați, în funcție de natura și comportamentul lor, în mai multe categorii.

3.2.1. Elemente și metaloizi potențial toxici

Elementele potențial toxice reprezintă una dintre cele mai importante categorii de contaminanți ai solurilor agricole. Printre elementele de interes pentru siguranța alimentelor se numără cadmiul (Cd), plumbul (Pb), mercurul (Hg), arsenul (As), cromul (Cr) și nichelul (Ni), la care se pot adăuga, în funcție de contextul geochimic și agricol, cuprul (Cu), zincul (Zn), cobaltul (Co), manganul (Mn) și alte elemente. Termenul „elemente potențial toxice” este preferabil în multe situații termenului generic „metale grele”, deoarece include și metaloizi, precum arsenul, și reflectă faptul că toxicitatea unui element depinde de concentrație, specie chimică, biodisponibilitate și organismul expus.

Elementele potențial toxice prezintă o particularitate importantă față de numeroși contaminanți organici: ele nu pot fi degradate în elemente mai puțin toxice prin procese biologice convenționale. Ele pot însă suferi procese de speciație, adsorbție/desorbție, precipitare/dizolvare, complexare, oxidare-reducere și redistribuire între diferite compartimente ale solului (Hou et al., 2020). Din acest motiv, managementul lor trebuie să urmărească nu doar reducerea concentrației totale, ci și controlul mobilității și biodisponibilității.

3.2.2. Pesticide și produși de transformare

Produsele de protecție a plantelor constituie o categorie distinctă de contaminanți deoarece sunt introduse intenționat în agroecosistem pentru combaterea organismelor dăunătoare. După aplicare, substanțele active pot fi reținute în sol, degradate, transformate în produși de metabolizare sau transportate către apă și alte compartimente ale mediului (Sarker et al., 2024).

Persistența și mobilitatea pesticidelor depind de structura chimică a substanței active, solubilitate, volatilitate, coeficientul de partiție, adsorbția pe materia organică și mineralele solului, precum și de condițiile de temperatură, umiditate și activitate microbiologică. În anumite condiții, reziduurile de pesticide pot persista suficient de mult pentru a deveni relevante pentru monitorizarea mediului și a produselor agricole. Evaluarea trebuie să țină cont atât de substanța activă, cât și de produșii de transformare atunci când aceștia prezintă toxicitate sau persistență relevante (Sarker et al., 2024).

3.2.3. Contaminanți organici persistenți

Compuși organoclorurați și alte substanțe organice persistente pot reprezenta o problemă particulară în terenurile cu istoric agricol sau industrial. Unele dintre aceste substanțe prezintă persistență ridicată, lipofilicitate și tendința de a se acumula în materia organică și în organisme (Jiang et al., 2024).

Prezența unor contaminanți organici persistenți poate fi asociată atât utilizării istorice a unor substanțe, cât și transportului atmosferic și depunerilor. În cazul acestora, istoricul terenului poate reprezenta un indicator important pentru evaluarea riscului.

3.2.4. Contaminanți emergenți

În ultimii ani, atenția științifică s-a extins către contaminanți emergenți, inclusiv produse farmaceutice, produse de îngrijire personală, compuși per- și polifluoroalchilici (PFAS), plastifianți, microplastice și nanomateriale (Carter et al., 2026).

În sistemele agricole, acești contaminanți pot ajunge în sol prin utilizarea apei recuperate, a nămolurilor, composturilor, digestatelor și altor materiale provenite din fluxuri de reciclare sau valorificare. Într-un context de economie circulară, această problemă devine deosebit de importantă deoarece reutilizarea resurselor poate reduce consumul de materii prime și deșeurile, dar poate introduce simultan contaminanți în agroecosistem dacă materialele utilizate nu sunt caracterizate și controlate corespunzător (W. Huang et al., 2024).

Literatura recentă indică faptul că riscul trebuie analizat pe întregul sistem circular, de la materialul utilizat ca input, la sol, cultură, produse agricole și, ulterior, consumator (W. Huang et al., 2024).

3.3. Sursele contaminanților în agroecosisteme

Sursele contaminării solurilor agricole pot fi naturale sau antropice. Sursele naturale includ procese geologice și pedogenetice, alterarea mineralelor și aportul de elemente din materialul parental. În aceste situații, anumite elemente pot apărea în concentrații ridicate fără ca activitatea agricolă să fie sursa principală. Sursele antropice pot fi mult mai diverse și includ: activități miniere și metalurgice; emisii

industriale și depuneri atmosferice; utilizarea combustibililor și emisiile provenite din trafic; fertilizanți minerali; amendamente și materiale organice; composturi și digestate; nămoluri provenite din stațiile de epurare; apă de irigație contaminată; produse de protecție a plantelor; depozitarea necorespunzătoare a deșeurilor; utilizarea anterioară a terenului (Wan et al., 2024).

În cazul elementelor potențial toxice, sursele agricole și industriale pot contribui la acumularea progresivă în stratul superficial al solului. Hou et al. (2020) evidențiază faptul că aporturile provenite din activități industriale, irigații, fertilizanți și alte surse antropice pot contribui la contaminarea terenurilor agricole (Hou et al. 2020).

Un principiu important pentru agricultura rezilientă este, prin urmare, *identificarea sursei înaintea aplicării unei măsuri de remediere*. Dacă sursa contaminării continuă să funcționeze, intervențiile asupra solului pot avea eficiență limitată sau temporară.

3.4. Comportamentul contaminanților în sol

După introducerea în sol, contaminanții sunt supuși unor procese fizice, chimice și biologice care le determină distribuția și disponibilitatea. Pentru elementele potențial toxice, procesele relevante includ: **adsorbție ↔ desorbție; precipitare ↔ dizolvare; complexare ↔ disociere; oxidare ↔ reducere; imobilizare ↔ remobilizare**. Aceste procese determină distribuția contaminantului între faza solidă a solului, soluția solului și faza biologică (Yu et al., 2023).

Pentru contaminanții organici, procesele de sorbție, volatilizare, fotodegradare, degradare chimică și biodegradare pot controla persistența și mobilitatea. Interacțiunile cu materia organică sunt deosebit de importante pentru compușii hidrofobi, care pot prezenta afinitate ridicată pentru fracția organică a solului (Yu et al., 2023).

În cazul elementelor potențial toxice, proprietățile solului au un rol determinant. pH-ul, conținutul de materie organică, textura, capacitatea de schimb cationic, conținutul și natura mineralelor argiloase și prezența oxizilor și hidroxizilor de fier și mangan pot modifica semnificativ mobilitatea și disponibilitatea elementelor (Kim et al., 2015; Hou et al., 2020).

Un exemplu important îl reprezintă pH-ul. Modificarea pH-ului poate influența încărcarea suprafețelor minerale, solubilitatea unor compuși și competiția dintre ioni pentru siturile de adsorbție. Ca urmare, o modificare a pH-ului poate conduce, în funcție de element și de tipul de sol, la creșterea sau diminuarea fracției disponibile pentru plante (Yu et al., 2023).

Condițiile redox sunt, de asemenea, importante, în special în solurile saturate cu apă. Schimbarea stării de oxidare a fierului și manganului poate conduce la dizolvarea sau formarea unor faze minerale care controlează retenția unor contaminanți.

Prin urmare, contaminantul trebuie analizat nu doar ca o concentrație cu valoare numerică, ci ca o specie chimică aflată într-un sistem dinamic.

3.5. Concentrația totală, mobilitatea și biodisponibilitatea

Una dintre cele mai importante distincții în evaluarea contaminării solului este aceea dintre **concentrația totală și fracția biodisponibilă**.

Concentrația totală reprezintă cantitatea totală a unui element sau compus determinată într-o probă, în funcție de metoda analitică utilizată. Aceasta este utilă pentru caracterizarea gradului general de contaminare și pentru comparații cu valori de referință sau limite aplicabile. Totuși, concentrația totală nu indică în mod direct proporția contaminantului care poate fi mobilizată, absorbită de plante sau transferată către organisme. În consecință: **Concentrația totală nu este echivalentă cu biodisponibilitatea!**

Biodisponibilitatea reprezintă, într-un sens general, fracția unui contaminant care poate interacționa cu organismele vii și poate participa la procese biologice. În cazul contaminanților din sol, această fracție este dependentă de proprietățile solului, de specia chimică a contaminantului și de organismul considerat (Kim et al., 2015).

Pentru elementele potențial toxice, evaluarea speciației și a fracțiilor mobile sau labile poate furniza informații suplimentare față de determinarea concentrației totale. Metodele de extracție chimică și tehnicile de evaluare a fracțiilor labile pot fi utilizate pentru estimarea potențialului de transfer către plante (Senila & Kovacs, 2024).

Această distincție este esențială pentru prezentul ghid deoarece riscul asociat unui contaminant trebuie analizat prin relația: **Concentrație totală → mobilitate →**

biodisponibilitate → *absorbție* → *acumulare* → *expunere*, și nu exclusiv prin concentrația totală măsurată în sol.

3.6. Absorbția și translocarea contaminanților în plante

Plantele reprezintă una dintre principalele căi prin care contaminanții din sol pot pătrunde în lanțul alimentar. Absorbția are loc în principal prin sistemul radicular, dar, pentru anumite substanțe, poate avea loc și prin depunere sau absorbție foliară.

La nivelul rizosferei, interacțiunile dintre rădăcini, microorganisme, materia organică și soluția solului modifică disponibilitatea contaminanților. Exudatele radiculare pot modifica pH-ul și condițiile chimice locale și pot influența solubilitatea și mobilitatea anumitor elemente.

După absorbția în rădăcină, contaminanții pot fi:

- ✓ reținuți în rădăcini;
- ✓ legați de pereții celulari;
- ✓ complexați cu molecule organice;
- ✓ depozitați în vacuole;
- ✓ transportați către părțile aeriene;
- ✓ translocați către organele reproductive sau de depozitare.

Gradul de translocare diferă semnificativ între elemente și între speciile vegetale. În cazul contaminanților emergenți, studiile arată că absorbția și distribuția în plantă sunt influențate de proprietățile contaminantului, specia vegetală, interacțiunile microbiene și condițiile de mediu (Pullagurala et al., 2018).

Pentru elementele potențial toxice, comportamentul este, de asemenea, dependent de mecanismele fiziologice ale plantei. Unele specii pot limita transportul către părțile aeriene, în timp ce altele pot acumula cantități semnificative în organele recoltate.

Prin urmare, **specia și cultivarul plantei reprezintă factori importanți ai transferului**, iar rezultatele obținute pentru o cultură nu trebuie extrapolate automat la alte culturi.

3.7. Factori care controlează transferul sol-plantă

Transferul contaminanților de la sol către plante este rezultatul interacțiunii dintre trei categorii principale de factori:

A. Proprietățile solului: pH; materie organică; capacitate de schimb cationic; textură; conținut de argilă; oxizi și hidroxizi de Fe și Mn; umiditate; potențial redox; activitate microbiologică.

B. Proprietățile contaminantului: specia chimică; solubilitate; mobilitate; stabilitate; afinitatea pentru materia organică; capacitatea de complexare; coeficientul de partiție; persistență.

C. Caracteristicile plantei: specie; cultivar/genotip; sistem radicular; stadiu de dezvoltare; organ vegetal; capacitate de acumulare; mecanisme de detoxifiere și compartimentare.

Această interacțiune explică variabilitatea ridicată a transferului observată în studiile experimentale. Două culturi cultivate în același sol pot prezenta niveluri diferite de acumulare a aceluiași contaminant, iar aceeași cultură poate prezenta niveluri diferite în funcție de proprietățile solului.

În cazul legumelor, de exemplu, diferențele dintre rădăcini și părțile aeriene pot fi importante, iar distribuția contaminanților în organele comestibile trebuie evaluată separat (Gupta et al., 2019).

3.8. De la plantă la produsul agricol și produsul alimentar

Din perspectiva siguranței alimentelor, simpla demonstrare a absorbției unui contaminant de către plantă nu este suficientă. Trebuie determinat dacă acesta ajunge în partea destinată consumului și în ce concentrație. Riscul poate fi diferit pentru: rădăcinoase; frunze; fructe; semințe; cereale; tuberculi; tulpini sau alte organe consumate.

De asemenea, trebuie făcută distincția între contaminarea externă a suprafeței produsului și acumularea internă prin absorbție. Operațiile de recoltare, spălare, curățare și procesare pot modifica ulterior concentrația contaminantului în produs.

În acest context, lanțul relevant pentru evaluarea siguranței poate fi reprezentat astfel: **SOL → RIZOSFERĂ → RĂDĂCINĂ → PLANTĂ → ORGAN COMESTIBIL → PRODUS AGRICOL → PRODUS PROCESAT → CONSUMATOR.**

Această perspectivă este în concordanță cu abordările recente de evaluare a siguranței alimentelor în sistemele agricole și circulare, în care transferul contaminanților trebuie urmărit de la sursă până la produsul destinat consumului (W. Huang et al., 2024).

3.9. Contaminarea și siguranța alimentelor - abordare bazată pe risc

Prezența unui contaminant într-o probă de sol sau într-un produs agricol nu trebuie interpretată izolat. Evaluarea riscului trebuie să țină cont de: concentrația contaminantului; forma chimică și biodisponibilitatea; matricea în care este prezent; partea plantei în care se acumulează; frecvența consumului; cantitatea consumată; caracteristicile populației expuse; toxicitatea contaminantului; eventualele efecte cumulative sau interactive.

În cazul contaminanților chimici, evaluarea riscului presupune, în esență, combinarea informațiilor privind **hazardul** cu cele privind **expunerea**. Pentru sistemele agricole, acest principiu conduce la o abordare bazată pe risc:

**Identificarea sursei → caracterizarea contaminantului → evaluarea solului →
evaluarea transferului → evaluarea produsului → estimarea expunerii →
managementul riscului**

O asemenea abordare este mai robustă decât utilizarea unui singur indicator, deoarece integrează atât comportamentul contaminantului în mediu, cât și expunerea potențială a consumatorului.

3.10. Implicații pentru managementul agroecosistemelor

Înțelegerea comportamentului contaminanților pe lanțul sol-plantă-produs permite trecerea de la o abordare reactivă, bazată pe intervenția după apariția contaminării, la o abordare preventivă și predictivă.

În acest sens, managementul contaminanților trebuie să urmărească simultan:

- ✓ controlul surselor de contaminare;
- ✓ monitorizarea proprietăților solului;
- ✓ evaluarea mobilității și biodisponibilității;
- ✓ selectarea culturilor și, atunci când este posibil, a cultivarelor cu risc redus de acumulare;
- ✓ managementul fertilizării și amendamentelor;
- ✓ controlul calității apei de irigare;
- ✓ monitorizarea produsului agricol;
- ✓ evaluarea efectelor procesării;
- ✓ aplicarea unor măsuri de reducere a riscului atunci când este necesar.

Literatura recentă privind managementul contaminării cu elemente potențial toxice susține din ce în ce mai mult trecerea de la strategiile centrate exclusiv pe îndepărtarea contaminantului către strategii care urmăresc *controlul activității și biodisponibilității contaminantului la interfața sol-apă-rădăcină și de-a lungul traseului către organul comestibil* (Fang et al., 2026). Această abordare este deosebit de relevantă pentru terenurile agricole cu contaminare redusă sau moderată, unde îndepărtarea completă a solului sau tratamentele intensive pot fi dificil de aplicat fără întreruperea producției agricole. În astfel de situații, reducerea transferului către plante și menținerea funcțiilor solului pot reprezenta obiective mai realiste și mai sustenabile.

3.11. Model conceptual al transferului contaminanților

Pe baza mecanismelor prezentate, transferul contaminanților poate fi conceptualizat ca un proces în mai multe etape:

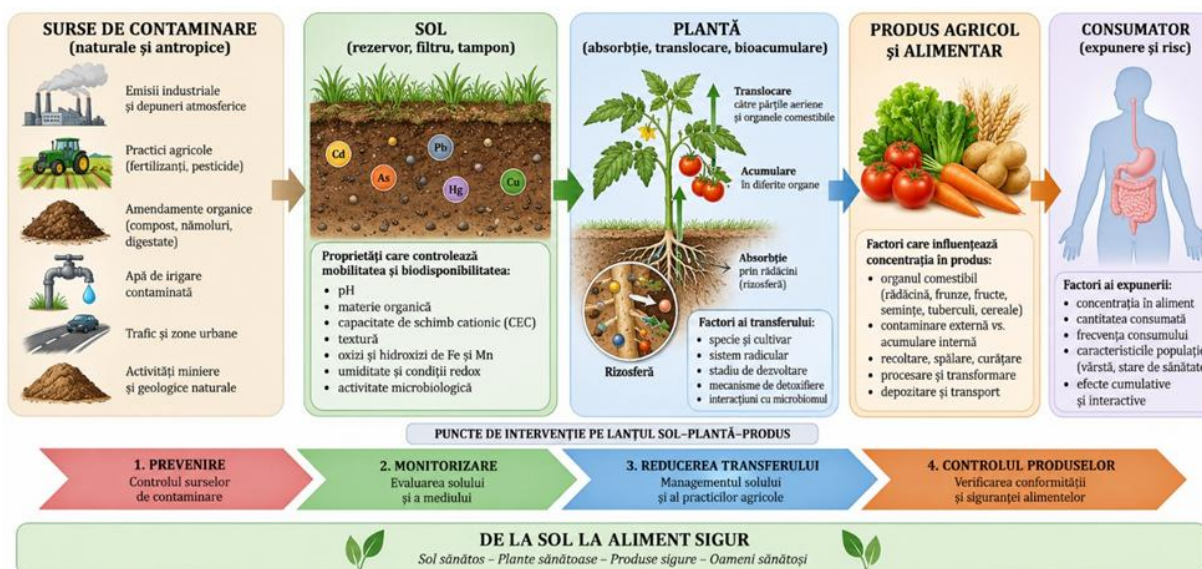


Figura 1. Model conceptual al transferului contaminanților de la sursă la aliment și principalele puncte de control

În fiecare etapă există posibilitatea de a interveni pentru prevenirea sau reducerea riscului. Această abordare stă la baza conceptului de „*de la sol la aliment sigur*” și va fi dezvoltată în capitolele următoare prin analiza factorilor de transfer, a indicatorilor cantitativi, a strategiilor de monitorizare și a măsurilor de reducere a riscului.

Un principiu fundamental care rezultă din această abordare este:

”Siguranța produsului alimentar începe cu managementul sursei și cu sănătatea solului și trebuie verificată până la produsul destinat consumului”

În consecință, monitorizarea trebuie concepută ca un proces integrat, în care datele privind solul, planta și produsul alimentar sunt interpretate împreună și utilizate pentru fundamentarea deciziilor agricole și tehnologice.

4. TRANSFERUL CONTAMINANȚILOR PE LANȚUL SOL-PLANTĂ-PRODUS: MECANISME, INDICATORI ȘI EVALUARE CANTITATIVĂ

Transferul contaminanților pe lanțul *sol-plantă-produs* reprezintă una dintre componentele centrale ale evaluării siguranței alimentelor în agroecosistemele expuse contaminării. Într-un sistem agricol, contaminantul nu se deplasează, în general, într-o manieră simplă și directă de la sol către produsul alimentar. Între sursa inițială de contaminare și consumator se desfășoară o succesiune de procese fizice, chimice și biologice care determină dacă un contaminant va rămâne imobilizat în sol, va deveni disponibil în soluția solului, va fi absorbit de plantă, va fi translocat către organele comestibile și, ulterior, va contribui la expunerea alimentară.

Această succesiune poate fi reprezentată conceptual astfel:

Sursă de contaminare → sol → mobilitate/speciere → biodisponibilitate → rizosferă → absorbție → translocare → bioacumulare → organ comestibil → produs agricol → procesare → produs alimentar → expunerea consumatorului.

Fiecare dintre aceste etape constituie, în același timp, o posibilă *barieră* sau un posibil *punct de amplificare a riscului*. De exemplu, un contaminant poate fi prezent în concentrație ridicată în sol, dar puternic imobilizat și, prin urmare, transferul către plantă să fie limitat. Invers, o concentrație totală moderată poate deveni relevantă dacă o fracție importantă este mobilă și biodisponibilă.

Prin urmare, evaluarea transferului trebuie să combine caracterizarea contaminantului cu caracterizarea solului, a plantei și a condițiilor de cultivare. Această abordare este susținută de studiile care arată că transferul și acumularea contaminanților sunt controlate simultan de factori intrinseci ai contaminantului și de factori extrinseci precum pH-ul, materia organică, proprietățile solului, vârsta culturii și biomasa vegetală (W. Huang et al., 2024).

4.1. Conceptul de transfer al contaminanților

4.1.1. Definirea transferului în sistemul sol-plantă-produs

În sensul prezentului ghid, transferul contaminantului reprezintă *procesul prin care un contaminant prezent în mediul de producție agricolă ajunge, prin intermediul unor mecanisme fizico-chimice și biologice, în țesuturile plantei și, în final, în produsul agricol sau alimentar.*

Conceptul trebuie diferențiat de simpla prezență a contaminantului. Detectarea unei substanțe într-un sol nu demonstrează automat că aceasta va fi preluată de plantă. În mod similar, detectarea contaminantului într-o rădăcină nu demonstrează că acesta va ajunge în frunze, fructe sau semințe.

Prin urmare, transferul trebuie analizat pe niveluri succesive:

1. prezența contaminantului în sol;
2. mobilizarea și disponibilitatea contaminantului;
3. contactul cu sistemul radicular;
4. absorbția de către plantă;
5. transportul intern;
6. translocarea către organele vegetale;
7. acumularea în partea comestibilă;
8. persistența sau transformarea în timpul procesării;
9. expunerea consumatorului.

Această distincție este esențială deoarece concentrația totală din sol reprezintă doar punctul de plecare al analizei, nu rezultatul final al transferului.

În cazul elementelor potențial toxice, mobilitatea și disponibilitatea sunt influențate de procese precum adsorbția și desorbția, schimbul ionic, complexarea, precipitarea și dizolvarea. Prin urmare, două soluri care conțin aceeași concentrație totală a unui element pot genera niveluri diferite de acumulare în plante (Hou et al., 2020; Kim et al., 2015).

Pentru contaminanții organici, comportamentul este determinat suplimentar de proprietăți precum hidrofobicitatea, solubilitatea, masa moleculară, afinitatea pentru carbonul organic al solului și persistența. W. Huang et al. (2024) arată că acești factori

intrinseci trebuie analizați împreună cu caracteristicile mediului agricol atunci când se evaluează transferul către culturi.

4.1.2. *Transferul nu este un proces liniar*

O eroare frecventă în interpretarea datelor de monitorizare este presupunerea că: *o concentrație mai mare în sol conduce la concentrație mai mare în plantă, deci risc alimentar mai mare*. Relația reală este mult mai complexă.

Într-un agroecosistem, contaminantul poate:

- rămâne adsorbit pe particulele minerale;
- fi complexat de materia organică;
- fi precipitat într-o fază minerală;
- fi mobilizat în soluția solului;
- fi transformat microbiologic;
- fi absorbit de rădăcină;
- fi reținut în rădăcină;
- fi transportat către organele aeriene;
- fi diluat ca urmare a creșterii biomasei;
- fi acumulat preferențial într-un anumit organ;
- fi degradat sau transformat înainte de recoltare.

Prin urmare, transferul trebuie privit ca un sistem dinamic, nu ca o simplă relație de proporționalitate între concentrația din sol și cea din plantă. Această perspectivă este deosebit de importantă pentru agricultura rezilientă, deoarece permite identificarea etapelor în care intervenția agronomică poate reduce transferul.

4.1.3. *Diferența dintre contaminarea solului și contaminarea produsului*

Din punct de vedere al siguranței alimentelor, obiectivul final al monitorizării nu este numai identificarea contaminării solului, ci determinarea probabilității ca aceasta să conducă la *contaminarea produsului destinat consumului*. Astfel, un teren poate prezenta (McGrath & Zhao, 2015):

- ✓ contaminare ridicată a solului + transfer redus;
- ✓ contaminare moderată a solului + transfer ridicat;
- ✓ contaminare ridicată + acumulare ridicată în organul comestibil;

- ✓ contaminare localizată + transfer foarte variabil între culturi.

Această variabilitate explică de ce evaluarea trebuie realizată în relație cu terenul-cultura-contaminantului, și nu exclusiv pe baza unei valori medii pentru sol.

4.1.4. Relevanța pentru proiectul ADER 6.3.7

Această abordare a reprezentat fundamentul metodologic al investigațiilor efectuate în cadrul proiectului, care a urmărit distribuția contaminanților pe lanțul *sol-plantă-legumă/fruct-produs finit*.

În studiul publicat de Paun et al. (2025), realizat în cadrul proiectului ADER 6.3.7 și al altui proiect asociat, analiza solurilor și a legumelor a evidențiat *decuplarea element-specifică dintre concentrația din sol și concentrația din plantă*. Cu alte cuvinte, elementele nu au prezentat același comportament de transfer. Zn și Cu au prezentat factori de transfer mai ridicați, în concordanță cu rolul lor fiziologic, în timp ce Pb și Cd au prezentat transfer limitat; Li a prezentat o variabilitate spațială importantă (Paun et al., 2025). Aceste rezultate pot oferi o demonstrație experimentală foarte importantă pentru principiul formulat mai sus: *"Concentrația contaminantului în sol nu poate fi utilizată, în mod izolat, pentru a estima concentrația care va ajunge în produsul agricol"*.

4.2. Interacțiunea contaminant-sol și biodisponibilitatea

4.2.1. Solul ca regulator al transferului

Solul nu trebuie considerat un simplu suport fizic pentru plante. Din punct de vedere al contaminării, acesta reprezintă un *sistem geochimic complex*, capabil să rețină, să mobilizeze, să transforme și să redistribuie contaminanții. Un contaminant introdus în sol poate fi distribuit între: soluția solului; particulele minerale; fracția argiloasă; materia organică; oxizii și hidroxizii de Fe și Mn; fazele minerale secundare; microorganisme; agregatele de sol. Distribuția între aceste compartimente determină în mare măsură cât de accesibil este contaminantul pentru rădăcini (Hou et al., 2020). Hou et al. (2020) subliniază rolul fundamental al proprietăților solului în controlul contaminării cu elemente potențial toxice și în determinarea disponibilității acestora pentru plante (Hou et al., 2020).

4.2.2. Concentrația totală versus fracția disponibilă

Unul dintre cele mai importante principii pentru evaluarea transferului este diferențierea dintre: concentrația totală și fracția mobilă/biodisponibilă. *Concentrația totală* reprezintă cantitatea de contaminant determinată într-o probă printr-o procedură analitică specifică. Ea este importantă pentru caracterizarea gradului de contaminare și pentru identificarea surselor, dar nu descrie neapărat fracția accesibilă organismelor. *Biodisponibilitatea* este un concept mai apropiat de procesul biologic. Kim et al. (2015) subliniază că definiția operațională a biodisponibilității poate varia în funcție de organism și metodă și că pentru elementele metalice există mai multe abordări experimentale și geochemice pentru estimarea fracției disponibile (Kim et al., 2015). În consecință, două soluri cu aceeași concentrație totală pot prezenta riscuri diferite pentru plante.

4.2.3. Rolul pH-ului

pH-ul este unul dintre principalii factori care controlează mobilitatea elementelor în sol. Modificarea pH-ului poate influența: sarcina suprafețelor minerale; solubilitatea compușilor; adsorbția și desorbția; specia chimică; complexarea; competiția dintre ioni. În general, acidifierea poate crește mobilitatea anumitor elemente, însă efectul este *element-specific* și depinde de proprietățile solului. Prin urmare, nu trebuie utilizată o regulă simplificată de tipul „*pH scăzut = transfer crescut pentru toate elementele*”! În studiul realizat de Paun et al. (2025), solurile analizate au fost predominant neutre până la slab acide, iar variațiile locale ale proprietăților solului au fost asociate cu diferențe în mobilitatea și acumularea elementelor (Paun et al., 2025).

4.2.4. Materia organică și carbonul organic

Materia organică poate avea efecte aparent opuse asupra contaminanților. Pe de o parte, grupările funcționale ale substanțelor humice pot lega anumite elemente și pot reduce fracția liberă disponibilă pentru absorbție. Pe de altă parte, compușii organici dizolvați pot favoriza mobilizarea anumitor contaminanți și transportul acestora prin profilul de sol. Pentru contaminanții organici, carbonul organic al solului are un rol major în sorbția compușilor hidrofobi. În acest caz, interacțiunea contaminant-materie

organică poate reduce concentrația în soluția solului, dar poate genera un rezervor persistent de contaminare. De aceea, materia organică nu trebuie interpretată simplist ca factor „protector” sau „favorizant”, ci în funcție de natura contaminantului și de forma chimică în care acesta se găsește (W. Huang et al., 2024).

4.2.5. Textura, argila și capacitatea de schimb cationic

Conținutul de argilă și capacitatea de schimb cationic (CEC) influențează retenția elementelor ionice. Solurile cu suprafață specifică și CEC mai ridicate pot reține mai eficient anumite specii cationice. Această retenție poate reduce concentrația imediat disponibilă în soluția solului, dar poate reprezenta simultan un rezervor de contaminare pe termen lung. În consecință: ***imobilizarea temporară nu este echivalentă cu eliminarea contaminantului.***

Modificarea condițiilor de mediu poate produce ulterior desorbția și remobilizarea acestuia.

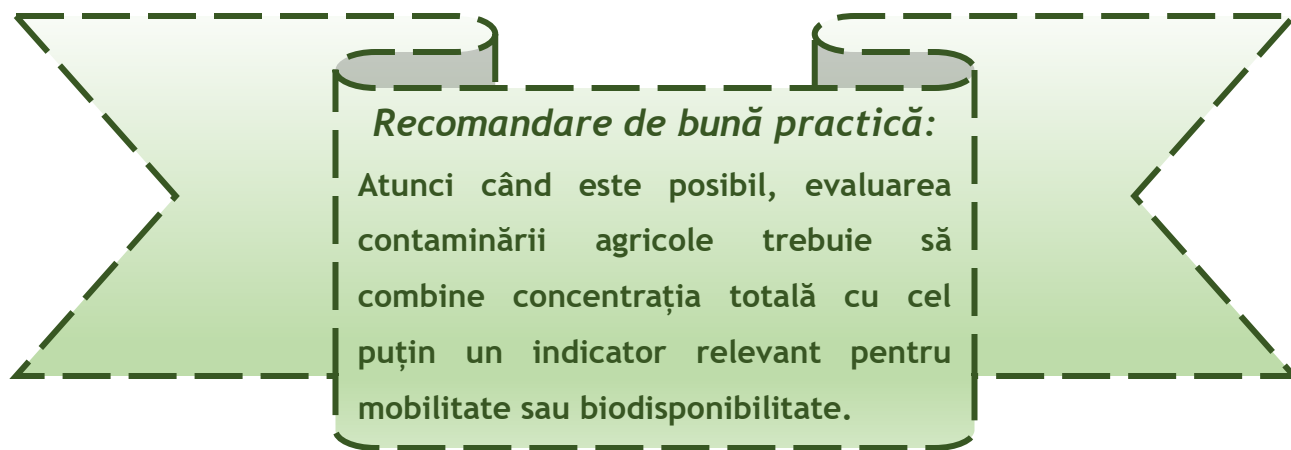
4.2.6. Rizosfera - interfața activă sol-plantă

Zona imediat adiacentă rădăcinilor, denumită rizosferă, are proprietăți diferite față de solul în vrac. Activitatea rădăcinilor poate modifica: pH-ul local; potențialul redox; concentrația ionilor; concentrația liganzilor organici; activitatea microorganismelor; mobilitatea elementelor. Prin urmare, pentru evaluarea transferului, este relevantă nu numai caracterizarea solului general, ci și înțelegerea condițiilor din zona efectiv explorată de rădăcini (Hinsinger et al., 2009).

4.2.7. Biodisponibilitatea ca indicator pentru evaluarea riscului

Într-o abordare modernă a riscului, întrebarea nu este doar: „***Cât contaminant există în sol?***”, ci: „***Ce fracție este disponibilă pentru interacțiunea cu planta și care este probabilitatea ca aceasta să ajungă în produsul comestibil?***”

Această schimbare de paradigmă de la ***concentrație totală la disponibilitate funcțională*** este deosebit de importantă pentru deciziile privind managementul terenurilor contaminate și alegerea culturilor. Kim et al. (2015) arată că metodele de estimare a biodisponibilității pot include extracții chimice selective, măsurarea activității ionice și modele geochimice. Alegerea metodei trebuie făcută în funcție de contaminant și de obiectivul evaluării (Kim et al., 2015).



4.3. Absorbția contaminanților de către plante

4.3.1. Absorbția - prima etapă biologică a transferului

Absorbția reprezintă etapa prin care contaminantul disponibil în rizosferă trece în sistemul radicular și devine parte a sistemului biologic al plantei. Procesul este influențat de: concentrația contaminantului în soluția solului; specia chimică; proprietățile membranei radiculare; transportorii membranari; pH; exudatele radiculare; microorganismele; disponibilitatea altor elemente; caracteristicile genetice ale plantei. Pentru elementele potențial toxice, absorbția poate avea loc prin transportori specifici sau prin căi utilizate și de elementele esențiale. Această similitudine explică de ce elementele esențiale, precum Zn și Cu, pot prezenta mecanisme de absorbție și transport diferite de cele ale elementelor neesențiale (S. Huang et al., 2024).

În studiul românesc publicat de Paun et al. (2025), Zn și Cu au prezentat în general transferuri mai ridicate decât Pb și Cd, ceea ce a fost asociat cu absorbția fiziologică activă a elementelor esențiale și cu mecanismele de excludere pentru elementele toxice neesențiale.

4.3.2. Influența speciei și cultivarului

Plantele nu răspund uniform la aceeași contaminare. Diferențele dintre specii și chiar dintre cultivare ale aceleiași specii pot fi asociate cu: arhitectura sistemului radicular; lungimea și densitatea rădăcinilor; capacitatea de absorbție; transpirația; rata de creștere; capacitatea de sechestrare; transportul xilematic și floematic; producerea de compuși chelatori. Această variabilitate are o implicație practică

importantă: *alegerea culturii reprezintă o măsură de management al riscului*. Într-un teren cu contaminare cunoscută, aceeași concentrație de contaminant în sol poate conduce la niveluri diferite în produs în funcție de cultura cultivată (Paun et al., (2025).

4.3.3. Absorbția nu înseamnă automat acumulare în produs

Un contaminant poate fi absorbit de rădăcină și ulterior: reținut în rădăcină; imobilizat în peretele celular; sechestrat în vacuole; complexat cu molecule organice; translocat către partea aeriană. Prin urmare, există cel puțin trei niveluri care trebuie diferențiate: *absorbție* → *translocare* → *acumulare în organul comestibil* (Clemens, 2006).

Confundarea acestor procese poate conduce la supraestimarea sau subestimarea riscului alimentar.

4.3.4. Rolul rizosferei și al microorganismelor

Interacțiunea dintre rădăcini și microorganisme poate modifica disponibilitatea contaminanților. Microorganismele pot: modifica pH-ul; produce liganzi; transforma compuși; modifica condițiile redox; mobiliza sau imobiliza elemente (S. Huang et al., 2024). Prin urmare, planta trebuie analizată ca parte a unui *sistem sol-rădăcină-microbiom*, nu ca un organism izolat.

4.3.5. Transferul multielement

În condiții naturale, plantele nu sunt expuse unui singur element. În studiul Paun et al. (2025), au fost analizate concomitent Li, Cu, Mn, Sr și Zn, alături de alte elemente urmărite în probele vegetale. Rezultatele au evidențiat comportamente distincte și relații sol-plantă neliniare pentru mai multe elemente. Acest rezultat este important pentru proiect deoarece demonstrează că evaluarea trebuie să fie *multielement*, atunci când obiectivul este caracterizarea realistă a agroecosistemului (Paun et al., (2025).

4.3.6. Diferențele între sisteme de cultură

Condițiile de cultivare pot modifica semnificativ absorbția. Studiul realizat pe legume românești a evidențiat diferențe între sistemele *în câmp și în seră*. Pentru ceapă, de exemplu, au fost observate intervale diferite ale concentrațiilor elementelor între cele două sisteme, iar pentru unele elemente valorile maxime au fost mai ridicate în probele provenite din sere (Paun et al., (2025). Aceste diferențe pot reflecta:

compoziția mediului de cultură; istoricul fertilizării; utilizarea pesticidelor sau a produselor pe bază de cupru; microclimatul; regimul hidric; disponibilitatea elementelor. Prin urmare, *sistemul de cultură trebuie inclus ca variabilă explicativă în evaluarea transferului.*

4.4. Translocarea și bioacumularea în organele vegetale

4.4.1. De la rădăcină la partea aeriană

După absorbție, contaminantul poate fi transportat prin sistemul vascular al plantei. Translocarea este controlată de: forma chimică a contaminantului; legarea de liganzi; mobilitatea în xilem; mobilitatea în floem; transpirație; cerințele metabolice ale plantei; mecanismele de detoxifiere. Prin urmare, contaminantul poate avea o distribuție foarte neuniformă în plantă (S. Huang et al., 2024).

4.4.2. Rădăcina ca barieră biologică

Rădăcina poate funcționa ca o barieră de protecție între sol și organele aeriene. Contaminantul poate fi: adsorbit pe suprafața rădăcinii; legat de pereții celulari; complexat; sechestrat intracelular; transportat către partea aeriană. Dacă translocarea este limitată, concentrația din rădăcină poate fi mult mai mare decât cea din frunze sau fructe (S. Huang et al., 2024).

Această situație este relevantă pentru interpretarea analizelor: *o concentrație ridicată în rădăcină nu trebuie extrapolată automat către partea comestibilă.*

4.4.3. Distribuția în organele plantei

Distribuția contaminantului depinde de tipul plantei și de organul analizat. Pentru culturile alimentare, este esențial să se diferențieze: rădăcini; frunze; tulpini; fructe; bulbi; tuberculi; semințe/boabe. Această diferențiere are consecințe directe asupra evaluării expunerii. De exemplu, acumularea într-o rădăcină neconsumată nu are aceeași semnificație ca acumularea în fruct sau frunză consumată direct (Guerrieri et al., 2024).

4.4.4. Bioacumularea și factorii fiziologici

Bioacumularea este rezultatul net al proceselor de: **absorbție + transport + retenție - eliminare/transformare/diluție**. Planta poate răspunde la contaminare prin mecanisme de detoxifiere și compartimentare, inclusiv: complexarea cu molecule organice; legarea de pereții celulari; sechestrarea în vacuole; limitarea transportului către organele tinere; modificarea distribuției între organe. Aceste mecanisme contribuie la caracterul **element-specific și specie-specific** al transferului (Gupta et al., 2019).

4.4.5. Dovezi din agroecosistemele românești

Rezultatele obținute în studiul Paun et al. (2025) sunt deosebit de utile pentru acest ghid deoarece oferă exemple concrete privind diferențierea transferului între elemente și culturi (Paun et al., 2025). În cazul dovlecelului, de exemplu, Zn a prezentat acumulare moderată, în timp ce Cd a rămas la niveluri foarte reduse, sugerând un transfer limitat. Pb a prezentat în general acumulare redusă, dar cu valori mai ridicate în anumite zone afectate de activități antropice. Li și Sr au prezentat mobilitate moderată către țesuturile comestibile. Studiul a evidențiat, de asemenea, diferențe între culturile în câmp și cele din seră. În cazul cepei, Zn, Cu și Mn au fost printre elementele cel mai constant acumulate, în timp ce Pb, Cd, Hg și As au fost detectate în general la niveluri reduse. Pentru Sr și Fe s-a observat un **decuplaj sol-plantă**, concentrațiile ridicate din sol nefiind însoțite de o acumulare proporțională în bulbi (Paun et al., 2025).

Aceste observații demonstrează un aspect fundamental pentru interpretarea datelor:

Transferul nu este o proprietate numai a contaminantului; este o proprietate emergentă a combinației contaminant-sol-plantă-condiții de cultivare!

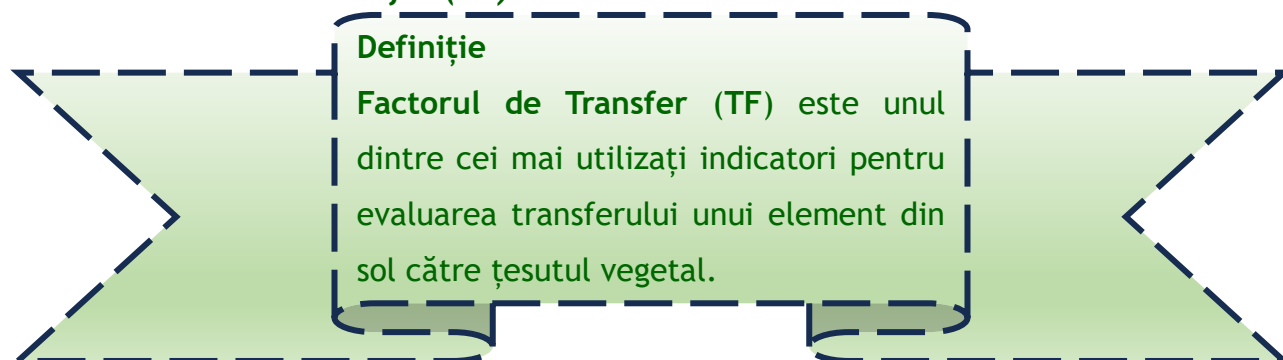
4.4.6. De ce organul comestibil este punctul critic

Din perspectiva siguranței alimentelor, endpoint-ul relevant nu este concentrația contaminantului în întreaga plantă, ci **concentrația în partea care intră efectiv în lanțul alimentar**. Această abordare permite trecerea de la: **contaminarea mediului la contaminarea produsului** și, ulterior, la **expunerea consumatorului**. În acest context, studiul este relevant deoarece a urmărit explicit acumularea elementelor în **culturi vegetale comestibile**, iar autorii au subliniat implicațiile directe ale bioacumulării pentru expunerea alimentară și siguranța alimentelor (Paun et al., 2025).

4.5. Factorii de transfer și indicatorii cantitativi

Descrierea mecanismelor de transfer oferă cadrul conceptual necesar pentru înțelegerea comportamentului contaminanților, însă evaluarea comparativă a diferitelor elemente, culturi și condiții de cultivare necesită utilizarea unor indicatori cantitativi. Aceștia permit exprimarea eficienței aparente a transferului, compararea siturilor investigate și identificarea combinațiilor contaminant-cultură pentru care este necesară o monitorizare suplimentară. Un indicator cantitativ trebuie însă interpretat în contextul sistemului în care a fost calculat. O valoare ridicată a unui factor de transfer nu reprezintă, în sine, dovada unui risc alimentar ridicat, după cum o valoare redusă nu exclude existența unui risc atunci când concentrația absolută a contaminantului în produs este importantă. În cadrul studiilor privind transferul sol-plantă sunt utilizați mai mulți indicatori, dintre care cei mai relevanți pentru prezentul ghid sunt **Factorul de transfer (TF)**, **Factorul de Bioacumulare (BAF/BCF)** și **Factorul de Translocare (TF_{trans})**.

4.5.1. Factorul de Transfer (TF)



În forma sa simplificată:

$$TF = \frac{C_{plantă}}{C_{sol}} \quad (1)$$

unde: $C_{plantă}$ = concentrația contaminantului în țesutul vegetal; C_{sol} = concentrația contaminantului în sol; concentrațiile trebuie exprimate pe aceeași bază de raportare.

În cazul în care atât solul, cât și materialul vegetal sunt raportate pe masă uscată, TF devine un indicator adimensional.

Interpretarea generală este:

- $TF < 1$ - concentrația în plantă este mai mică decât concentrația de referință din sol;
- $TF \approx 1$ - concentrațiile sunt de același ordin de mărime;
- $TF > 1$ - concentrația în plantă depășește concentrația de referință din sol.

Este important însă ca *aceste praguri să nu fie interpretate drept praguri universale de siguranță*. TF este un indicator relativ al transferului și nu reprezintă o limită toxicologică. Literatura de specialitate recomandă utilizarea factorilor de transfer împreună cu caracteristicile solului, proprietățile contaminantului și concentrațiile absolute din plante (Gupta et al., 2019; Kim et al., 2015).

O precizare metodologică importantă!

În practică, formula TF poate fi calculată utilizând concentrația contaminantului din: solul de suprafață; solul din zona radiculară; rizosferă; o anumită adâncime; o fracție extractabilă a solului. De aceea, *TF-urile raportate în două studii nu sunt întotdeauna direct comparabile*, chiar dacă formula matematică este aceeași.

De aceea, trebuie întotdeauna specificat: *ce probă de sol reprezintă numitorul, ce parte a plantei reprezintă numărătorul și pe ce bază de masă sunt exprimate concentrațiile*.

4.5.2. De ce alegerea solului de referință este esențială

Un exemplu simplificat ilustrează importanța acestei alegeri. Dacă: $C_{sol}=10$ mg/kg și $C_{plantă}=2$ mg/kg, atunci: $TF=0,20$. Dar dacă aceeași plantă este comparată cu un sol având: $C_{sol}=4$ mg/kg, rezultă: $TF=0,50$. Concentrația din plantă este identică în ambele

situații, însă factorul de transfer este diferit. Prin urmare, *TF nu trebuie interpretat izolat, ci împreună cu concentrațiile absolute.*

Acest aspect este deosebit de important pentru monitorizarea agroecosistemelor, unde concentrațiile contaminanților pot prezenta variații spațiale importante.

4.5.3. Aplicarea TF în studiile ADER

Studiul realizat de Paun et al. (2025) oferă un exemplu direct de utilizare a TF pentru evaluarea transferului elementelor din sol către legume cultivate în diferite regiuni ale României (Paun et al., 2025). Autorii au calculat factorii de transfer pentru mai multe elemente și culturi, iar analiza a evidențiat comportamente diferite în funcție de element, cultură și regiune. Materialul suplimentar al studiului include valorile medii ale TF și erorile standard pentru combinațiile investigate. În cazul dovlecelului, de exemplu, factorii de transfer au evidențiat comportamente distincte pentru Li, Sr, Zn, Cu, Pb și Cd, confirmând caracterul element-specific al transferului.

Această abordare este foarte relevantă deoarece permite trecerea de la simpla raportare a concentrațiilor la o evaluare comparativă a *eficienței transferului sol-plantă*.

4.5.4. Factorul de Bioacumulare (BAF/BCF)

Un al doilea indicator utilizat pentru caracterizarea acumulării contaminanților în plante este factorul de bioacumulare (BAF). În literatura privind sistemul sol-plantă, termenii factor de bioacumulare (BAF) și factor de bioconcentrare (BCF) sunt uneori utilizați interschimbabil, deși, în sens strict, BAF poate include aportul contaminantului prin mai multe căi de expunere, în timp ce BCF se referă la acumularea rezultată din transferul direct din mediul de expunere (Ali et al., 2013). În funcție de definiția adoptată, acesta poate fi exprimat ca raport între concentrația contaminantului în organism și concentrația disponibilă în mediul de expunere.

Într-o formă simplificată pentru sistemul sol-plantă:

$$BAF = \frac{C_{plantă}}{C_{mediu}} \quad (2)$$

unde C_{mediu} reprezintă concentrația contaminantului în mediul extern relevant pentru expunerea plantei.

Această expresie poate deveni matematic identică cu TF atunci când se utilizează aceeași definiție a concentrației din mediu. De aceea, ***BAF și TF nu trebuie tratate automat ca indicatori diferiți***. Terminologia și formulele utilizate în literatura de specialitate variază, iar compararea studiilor trebuie făcută numai după verificarea definiției operaționale.

4.5.5. Factorul de Translocare

Un indicator distinct este **Factorul de Translocare**, care descrie deplasarea contaminantului din rădăcină către partea aeriană:

$$TF_{\text{trans}} = \frac{C_{\text{parte aeriană}}}{C_{\text{rădăcină}}} \quad (3)$$

unde: $C_{\text{parte aeriană}}$ = concentrația contaminantului în partea aeriană a plantei; $C_{\text{rădăcină}}$ = concentrația contaminantului în rădăcina plantei.

Interpretarea este:

- $TF_{\text{trans}} < 1$ - o proporție mai mare este reținută în rădăcină;
- $TF_{\text{trans}} \approx 1$ - distribuție relativ apropiată între rădăcină și partea aeriană;
- $TF_{\text{trans}} > 1$ - contaminantul este transferat predominant către partea aeriană.

Și în acest caz, indicatorul trebuie interpretat cu prudență. Un $TF_{\text{trans}} > 1$ indică o translocare relativ eficientă, dar nu demonstrează că produsul este nesigur pentru consum. Pentru aceasta trebuie cunoscută concentrația efectivă în organul comestibil și trebuie realizată evaluarea expunerii.

4.5.6. Legătura dintre TF și TF_{trans}

Cei doi indicatori răspund unor întrebări diferite:

TF: *Cât de eficient trece contaminantul din sol în plantă?*

TF_{trans} : *După ce contaminantul a fost absorbit, cât de eficient este transportat din rădăcină către partea aeriană?*

Această distincție poate fi reprezentată prin: SOL → RĂDĂCINĂ → PARTE AERIANĂ → ORGAN COMESTIBIL cu: TF = sol → plantă și TF_{trans} = rădăcină → parte

aeriană. iar pentru siguranța alimentelor este necesară încă o etapă: **parte aeriană** → **organ comestibil** (Figura 2).

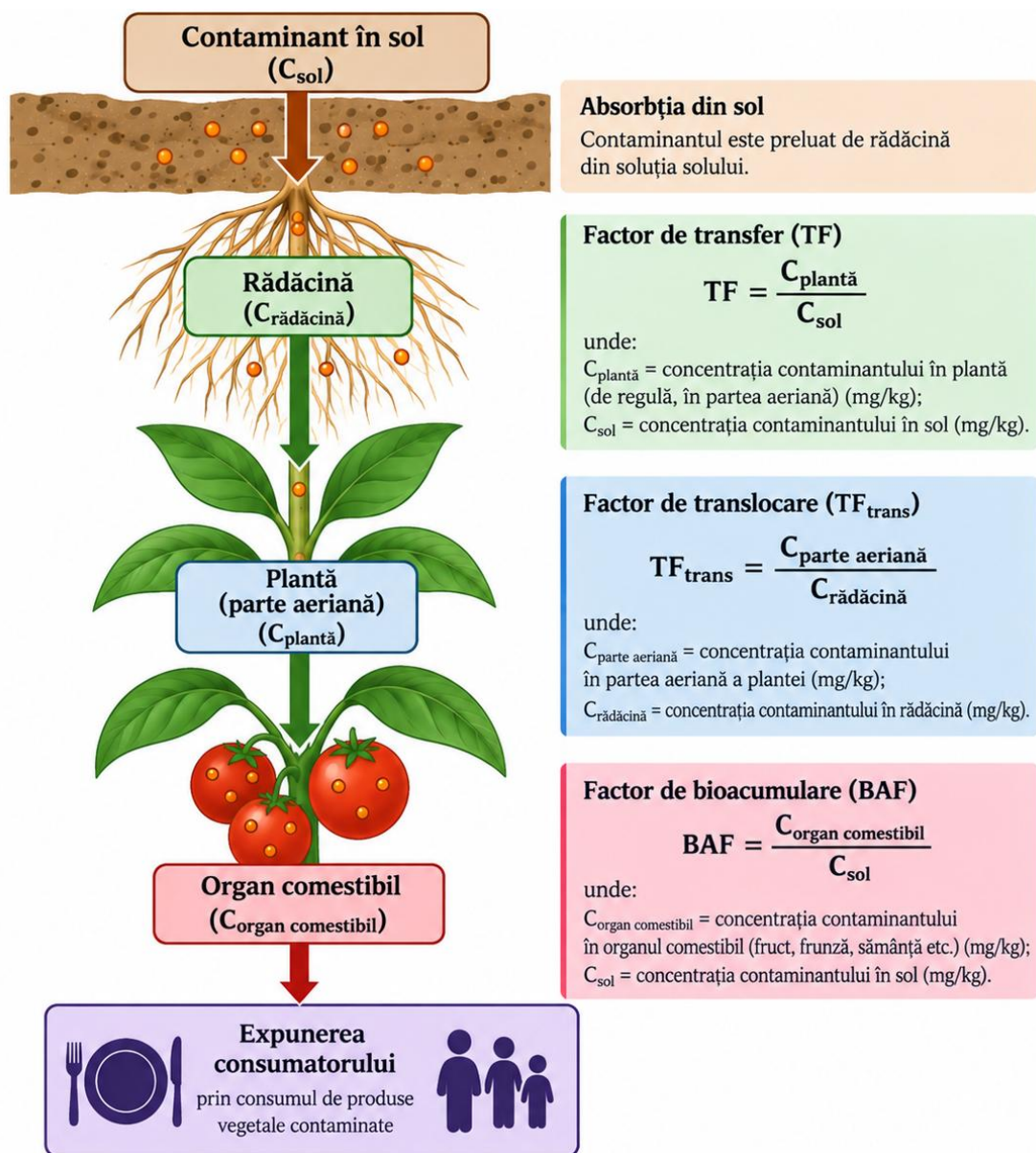


Figura 2. Reprezentarea conceptuală a principalelor etape ale transferului și a indicatorilor cantitativi utilizați pentru caracterizarea acestuia.

4.5.7. Relația dintre concentrația din sol și concentrația din plantă

O abordare mai avansată presupune analizarea relației dintre C_{sol} și $C_{plantă}$. În forma cea mai simplă, se poate testa relația:

$$C_{plantă} = a + bC_{sol} \quad (4)$$

unde: a reprezintă interceptul; respectiv valoarea estimată a concentrației în plantă atunci când concentrația în sol este zero; b reprezintă panta relației liniare, care exprimă variația concentrației în plantă în raport cu variația concentrației în sol; $C_{plantă}$ reprezintă concentrația contaminantului în plantă; C_{sol} reprezintă concentrația contaminantului în sol.

În cazul unei relații strict proporționale, ne-am aștepta ca:

$$C_{plantă} = TF \times C_{sol} \quad (5)$$

Dar sistemele reale sunt rareori perfect liniare. În studiul Paun et al. (2025), pentru mai multe elemente, inclusiv Fe, Zn, Sr, Mn, Cu și Li, au fost observate relații sol-plantă curbiliniare, ceea ce indică faptul că modificarea concentrației din sol nu determină întotdeauna o creștere proporțională a concentrației din plantă (Paun et al., 2025). Acest rezultat are o consecință metodologică importantă:



În funcție de date, pot fi necesare: regresii liniare; regresii polinomiale; modele logaritmice; modele neliniare; modele mixte; metode multivariate.

4.5.8. Corelația nu este echivalentă cu transferul

Un coeficient de corelație ridicat între concentrația unui element în sol și concentrația sa în plantă indică asocierea statistică dintre cele două variabile, dar nu demonstrează mecanismul de transfer. De exemplu, o corelație poate apărea deoarece: ambele variabile sunt influențate de un al treilea factor; există diferențe regionale; există efecte ale tipului de sol; există efecte ale culturii; există diferențe între sistemele de cultivare. De aceea, analiza statistică trebuie combinată cu interpretarea geochemică și fiziologică. Acest principiu este important, deoarece analiza multielement realizată în agroecosistemele românești a evidențiat diferențe regionale și efecte asociate condițiilor de cultivare, nu doar relații simple între concentrația din sol și cea din plantă.

4.5.9. Tabel comparativ al indicatorilor

Evaluarea transferului contaminanților în sistemul sol-plantă nu trebuie bazată pe un singur indicator. Concentrația măsurată în plantă oferă informația directă asupra nivelului de contaminare, în timp ce indicatorii calculați prin raportarea concentrațiilor între diferite compartimente permit caracterizarea transferului, acumulării și translocării. Utilizarea simultană a acestor indicatori permite diferențierea între concentrația contaminantului în sol, eficiența aparentă a transferului către plantă, distribuția internă a contaminantului și, atunci când este cazul, implicațiile pentru expunerea consumatorului. Indicatorii trebuie interpretați în raport cu matricea analizată, organul vegetal, baza de raportare și scenariul de expunere; niciunul dintre aceștia nu constituie, în mod individual, un prag de siguranță alimentară (Tabelul 1).

Tabelul 1. Principalii indicatori utilizați pentru evaluarea transferului contaminanților în sistemul sol-plantă

Indicator	Ce caracterizează	Interpretare principală	Limitare
TF - Factor de transfer	Transferul aparent al contaminantului din sol către plantă	Valori mai mari indică un transfer relativ mai ridicat în condițiile analizate	Depinde de solul de referință, organul vegetal analizat și baza de raportare; nu reprezintă un prag de siguranță
BAF - Factor de bioacumulare	Acumularea contaminantului în organism în raport cu	Exprimă acumularea relativă în raport cu	Definiția și mediul de referință pot varia între

Indicator	Ce caracterizează	Interpretare principală	Limitare
	mediul extern de expunere	concentrația din mediul de expunere	studii; trebuie precizată matricea utilizată
BCF - Factor de bioconcentrare	Concentrarea contaminantului în organism în raport cu mediul de expunere, în sens strict	Permite evaluarea concentrării relative față de mediul extern	În literatura privind plantele, BCF și BAF sunt uneori utilizate interschimbabil; definiția trebuie precizată explicit
TF_{trans} - Factor de translocare	Translocarea internă a contaminantului de la rădăcină către partea aeriană	Valori mai mari indică o translocare relativ mai accentuată către partea aeriană	Nu indică direct riscul alimentar și nu înlocuiește determinarea concentrației în organul comestibil
C_{plantă} - Concentrația contaminantului în plantă	Nivelul absolut al contaminantului în țesutul vegetal analizat	Reprezintă concentrația efectiv măsurată în plantă sau într-un organ vegetal	Nu descrie singură originea contaminării sau mecanismul de transfer
C_{organ comestibil} - Concentrația în organul comestibil	Nivelul contaminantului în partea destinată consumului	Reprezintă parametrul direct relevant pentru evaluarea expunerii alimentare	Trebuie interpretată în raport cu produsul, consumul și valorile-limită aplicabile
HI - Indice de pericol cumulativ	Expunerea cumulativă la mai mulți contaminanți, atunci când agregarea este justificată	Integrează contribuția mai multor contaminanți în cadrul unui scenariu de expunere definit	Depinde de scenariul de expunere, valorile toxicologice de referință și gruparea contaminanților; nu este aplicabil automat tuturor contaminanților

4.5.10. TF mare nu înseamnă automat risc alimentar mare

Să presupunem cele două situații anterioare:

Situația A: $C_{sol}=2$ mg/kg, $C_{plantă}=1$ mg/kg și $TF=0,5$.

Situația B: $C_{sol}=100$ mg/kg, $C_{plantă}=20$ mg/kg și $TF=0,2$.

În situația B, TF este mai mic, dar concentrația absolută din plantă este de 20 de ori mai mare. Prin urmare: **TF este un indicator al eficienței relative a transferului, nu un indicator direct al siguranței alimentului.**

Pentru evaluarea siguranței trebuie luate în considerare simultan:

1. concentrația în sol;
2. biodisponibilitatea;
3. TF;
4. concentrația în organul comestibil;
5. cantitatea consumată;

6. *frecvența consumului;*
7. *masa corporală;*
8. *toxicitatea contaminantului;*
9. *expunerea cumulativă, atunci când sunt prezenți mai mulți contaminanți.*

4.5.11. Integrarea indicatorilor într-o evaluare multicriterială

Un scenariu de evaluare poate fi construit astfel (Figura 3):

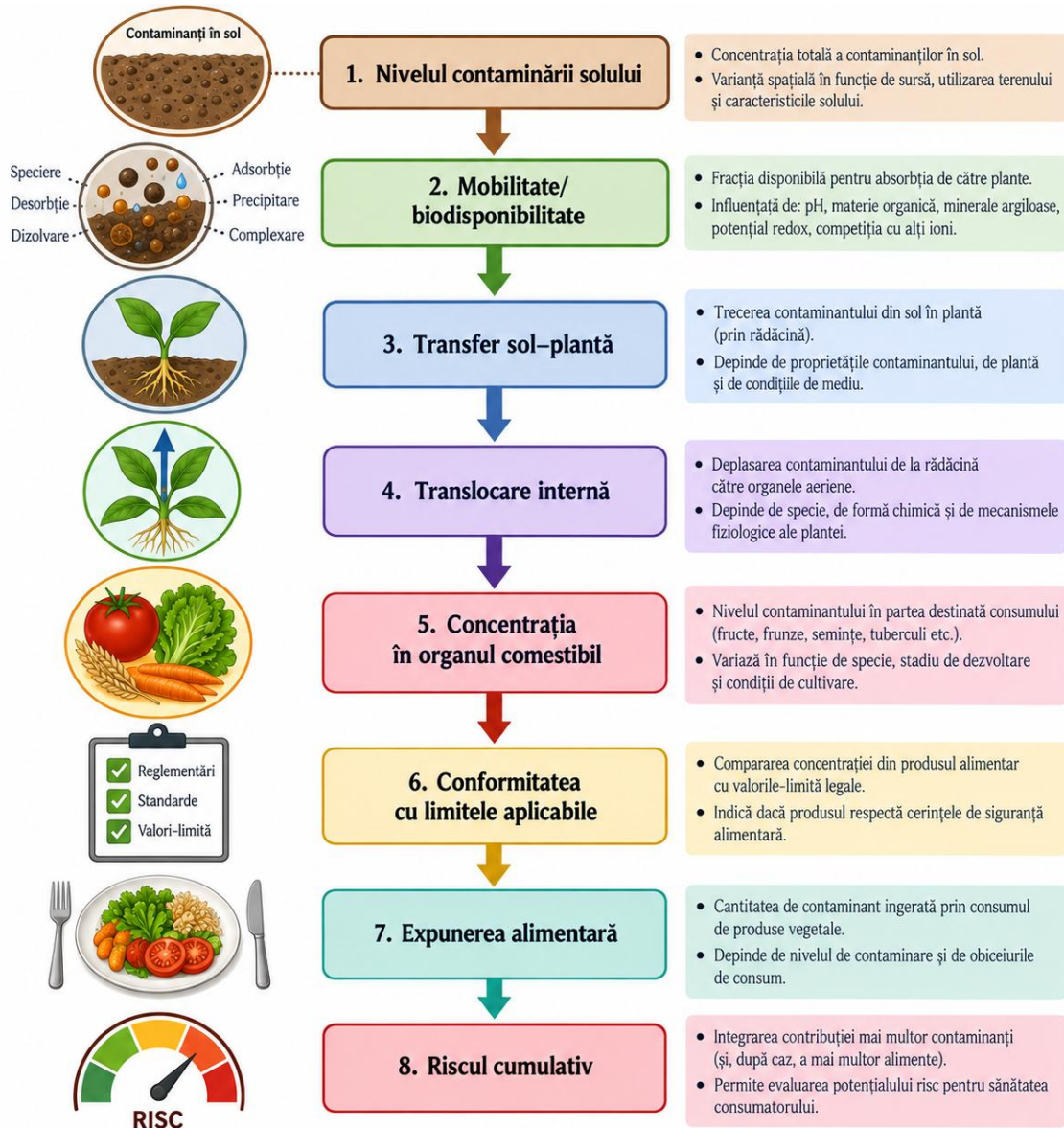


Figura 3. Schema integrată de evaluare a contaminării și a riscului alimentar pe lanțul sol-plantă-produs, de la contaminarea solului până la expunerea consumatorului și riscul cumulativ

Interpretarea rezultatelor analitice nu trebuie realizată prin examinarea izolată a concentrației contaminantului în sol sau a unui singur indicator de transfer. Pentru aceeași concentrație în sol, comportamentul contaminantului poate varia în funcție de mobilitate, biodisponibilitate, proprietățile solului, caracteristicile plantei și capacitatea de acumulare în organul comestibil. Din acest motiv, evaluarea transferului trebuie să coreleze cel puțin nivelul contaminării solului, factorul de transfer (TF) și concentrația contaminantului în partea destinată consumului. Matricea prezentată în Tabelul 2 oferă un instrument practic pentru interpretarea integrată a acestor trei componente.

Tabelul 2. Matrice practică pentru interpretarea transferului

Situație	Contaminare sol	TF	Concentrație în organ comestibil	Interpretare
I	redușă	reduș	redușă	Risc redus, monitorizare de rutină
II	ridică	reduș	redușă	Contaminant predominant imobilizat; monitorizare și reevaluare periodică
III	redușă	ridicat	moderată/ridică	Biodisponibilitate/absorbție importantă; necesită investigații
IV	ridică	ridicat	ridică	Situație prioritară pentru management și evaluarea siguranței
V	ridică	variabil	variabil	Necesită evaluare specifică pe cultură și element
VI	moderată	ridicat	ridică	Poate reprezenta un risc important chiar fără contaminare extremă a solului

Combinațiile dintre nivelul contaminării solului, intensitatea aparentă a transferului și concentrația din organul comestibil permit identificarea unor situații care necesită monitorizare de rutină, reevaluare periodică sau investigații și măsuri de management mai aprofundate. În particular, o concentrație ridicată în sol nu conduce în mod obligatoriu la o concentrație ridicată în produs, după cum o contaminare moderată a solului nu exclude acumularea importantă în organul comestibil. Prin urmare, TF trebuie interpretat împreună cu concentrația absolută din organul comestibil, deoarece un factor de transfer ridicat nu reprezintă, în sine, un indicator al neconformității sau al riscului alimentar. Evaluarea finală trebuie să țină cont de contaminantul analizat, cultura și organul vegetal, condițiile de cultivare, valorile-

limită aplicabile și, atunci când este relevant, de expunerea consumatorului. Tabelul 2 trebuie considerat o matrice orientativă de prioritizare și nu o clasificare legislativă a riscului. Categoriile „redus”, „moderat” și „ridicat” sunt utilizate pentru organizarea interpretării rezultatelor și pentru orientarea monitorizării, iar decizia finală trebuie fundamentată pe date analitice, criterii toxicologice și cerințele legislative aplicabile.

4.5.12. Recomandări metodologice pentru utilizarea TF

Pentru obținerea unor rezultate comparabile și reproductibile, se recomandă:

1. *utilizarea aceleași baze de raportare pentru sol și plantă;*
2. *precizarea explicită a adâncimii de prelevare a solului;*
3. *definirea clară a zonei considerate „sol rizosferic”;*
4. *analizarea separat a organelor comestibile;*
5. *raportarea atât a concentrațiilor absolute, cât și a TF;*
6. *utilizarea replicatelor și estimarea incertitudinii;*
7. *raportarea mediilor împreună cu abaterea standard/eroarea standard sau intervalele de încredere;*
8. *evitarea comparării directe a TF provenite din metodologii diferite;*
9. *interpretarea TF împreună cu pH, materie organică, textură și alți parametri relevanți ai solului;*
10. *completarea evaluării cu o analiză de expunere atunci când obiectivul este siguranța alimentelor.*

Studiul realizat pe legumele provenite din diferite regiuni ale României (Paun et al., 2025) arată foarte bine necesitatea acestei abordări integrate: transferul a fost dependent de element, cultură, regiune și sistem de cultivare, iar pentru unele elemente au fost observate diferențe importante între culturile în câmp și cele din seră.

4.5.13. Mesaj pentru practicieni

NU INTERPRETAȚI TF IZOLAT!

Un factor de transfer ridicat indică o **eficiență relativă ridicată a transferului**, dar nu reprezintă o limită de siguranță. Pentru evaluarea riscului trebuie analizate împreună: *concentrația în sol + biodisponibilitatea + TF + concentrația în organul comestibil + expunerea consumatorului.*

În cazul pesticidelor, contaminantul poate ajunge pe sau în plantă prin: aplicare directă; absorbție radiculară; depunere atmosferică; transport din sol; irigare; tratamente post-recoltare; contaminare în timpul depozitării sau distribuției.

În consecință, pentru pesticide, lanțul trebuie extins conceptual de la: *sol* → *plantă* la: *aplicare/sursă* → *sol/apă/aer* → *plantă* → *recoltare* → *depozitare* → *procesare* → *produs alimentar* (Figura 4).

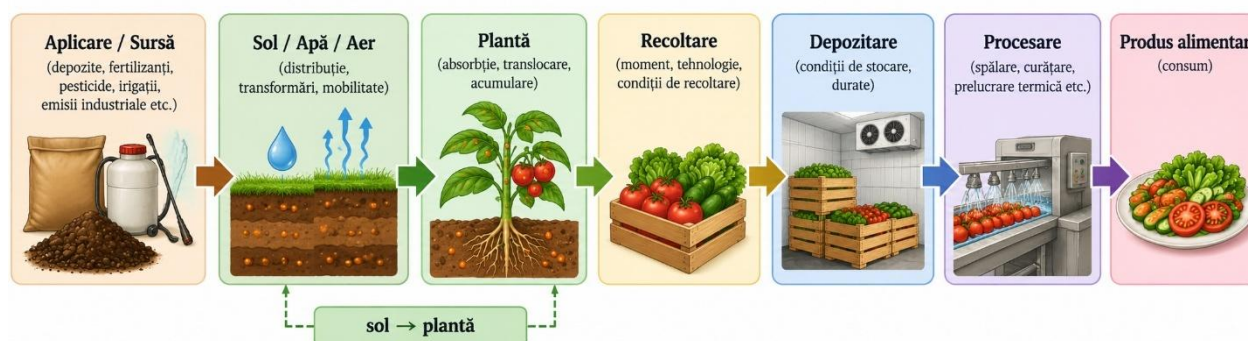


Figura 4. Succesiunea etapelor de transfer și transformare a contaminanților pe lanțul sursă-sol/apă/aer-plantă-produs alimentar, cu evidențierea transferului sol-plantă și a etapelor post-recoltare

Această perspectivă este importantă deoarece reziduurile detectate în produsele alimentare nu pot fi întotdeauna atribuite exclusiv transferului din sol. Studiul de supraveghere realizat pe produse comercializate în România a inclus 620 de probe de fructe și legume, provenite din numeroase categorii de produse și origini geografice, și a urmărit determinarea multireziduală a pesticidelor prin LC-MS/MS și evaluarea conformității cu limitele maxime admise (Popescu et al., 2025). Prin urmare, pentru pesticidele organoclorurate și organofosforice investigate, evaluarea trebuie să considere nu numai transferul sol-plantă, ci și persistența, degradarea, remobilizarea și contribuția etapelor post-recoltare.

4.6. Influența speciei, cultivarului și condițiilor de cultivare

Transferul unui contaminant din sol către plantă nu este un proces uniform. Chiar în condiții comparabile de contaminare a solului, concentrația finală din țesuturile vegetale poate varia considerabil în funcție de specia cultivată, genotip/cultivar, organul analizat, stadiul de dezvoltare și condițiile de cultivare. Din acest motiv, evaluarea riscului pe lanțul sol-plantă-produs trebuie să țină cont de interacțiunea dintre caracteristicile solului și particularitățile biologice ale culturii. Literatura arată că speciile vegetale pot prezenta capacități diferite de absorbție și acumulare, iar diferențele sunt determinate de arhitectura sistemului radicular, mecanismele de transport membranar, transpirație, metabolism și capacitatea de detoxifiere sau sechestrare intracelulară a contaminanților. Pentru contaminanții emergenți, de exemplu, au fost raportate diferențe importante între speciile de plante, iar influența genotipului și a stării fiziologice a plantei poate modifica substanțial absorbția și acumularea în partea comestibilă (Christou et al., 2019).

4.6.1. Influența speciei vegetale

Specia vegetală reprezintă unul dintre principalii determinanți biologici ai transferului contaminanților. Plantele diferă prin: arhitectura și adâncimea sistemului radicular; suprafața și densitatea rădăcinilor; capacitatea de absorbție a apei și nutrienților; activitatea transportorilor membranari; rata transpirației; compoziția și activitatea rizosferei; capacitatea de complexare și sechestrare intracelulară; repartizarea contaminantului între rădăcină, frunze, tulpină, fruct și semințe.

În cazul legumelor, diferențele dintre grupele botanice și tipurile de organe consumate pot avea consecințe directe asupra expunerii alimentare. Legumele cu frunze tind să prezinte o capacitate mai mare de acumulare a anumitor elemente în țesuturile comestibile decât legumele fructifere, deși această tendință nu este universală și trebuie interpretată pentru fiecare contaminant în parte (Gupta et al., 2019).

Prin urmare, *nu este suficientă caracterizarea contaminării solului*. Într-un program de evaluare a siguranței alimentelor trebuie precizată și cultura cultivată pe acel sol.

4.6.2. Influența cultivarului și a genotipului

Diferențele dintre cultivare ale aceleiași specii pot determina variații semnificative ale acumulării contaminanților. Aceste diferențe pot fi asociate cu: eficiența absorbției radiculare; expresia transportorilor pentru elemente nutritive și analogii lor chimici; capacitatea de retenție în rădăcini; mecanismele de translocare către organele aeriene; producerea de liganzi și compuși de complexare; compartimentarea intracelulară; răspunsul la stresul indus de contaminant. În cazul elementelor potențial toxice, selecția unor genotipuri cu capacitate redusă de acumulare poate constitui o măsură preventivă importantă pentru limitarea transferului către lanțul alimentar. Literatura evidențiază, de exemplu, existența unor diferențe genetice între cultivare în ceea ce privește acumularea elementelor și recomandă integrarea caracteristicilor genotipice în strategiile de management al contaminării (Rizwan et al., 2017). Este important însă ca efectul cultivarului să nu fie presupus în absența unor date experimentale. În cazul unui program de monitorizare, comparațiile între cultivare trebuie realizate în condiții de sol, fertilizare, irigare și maturitate cât mai comparabile.

4.6.3. Organul vegetal și partea efectiv consumată

Un alt nivel important de variabilitate îl reprezintă distribuția contaminantului în diferitele organe ale plantei. Concentrația determinată în rădăcină nu poate fi utilizată automat pentru estimarea concentrației din fruct, frunză sau sămânță. În general, contaminanții pot rămâne predominant localizați în sistemul radicular. Pentru contaminanții emergenți, literatura indică frecvent o acumulare mai ridicată în rădăcini decât în părțile aeriene, însă distribuția depinde de proprietățile contaminantului și de caracteristicile plantei (Pullagurala et al., 2018).

Din perspectiva siguranței alimentelor, indicatorul relevant este, în primul rând, **concentrația în partea comestibilă**, nu concentrația maximă în întreaga plantă.

4.6.4. Influența condițiilor de cultivare

Condițiile de cultivare modifică simultan proprietățile solului, disponibilitatea contaminanților și fiziologia plantei. Principalii factori sunt: pH-ul solului; conținutul de materie organică; textura și conținutul de argilă; capacitatea de schimb cationic;

regimul hidric; temperatura; fertilizarea; amendamentele; calitatea apei de irigare; densitatea culturii; sistemul de cultură; durata și intensitatea cultivării. Efectul acestor factori nu este întotdeauna liniar. De exemplu, modificarea pH-ului poate reduce mobilitatea unui element în anumite condiții, dar poate crește mobilitatea altuia. În mod similar, materia organică poate imobiliza anumite elemente prin adsorbție și complexare, dar poate favoriza mobilitatea unor contaminanți organici.

De aceea, formularea „*un anumit amendament reduce transferul contaminantului*” trebuie evitată ca regulă generală. Recomandarea trebuie legată de contaminant, tipul de sol și condițiile experimentale.

4.6.5. Câmp deschis versus seră

Sistemul de cultivare poate introduce diferențe importante în comportamentul contaminanților. În sere, aplicarea repetată a fertilizanților, amendamentelor și produselor fitosanitare, împreună cu irigarea controlată și reciclarea limitată a elementelor prin recoltare, poate modifica în timp proprietățile solului și poate favoriza acumularea unor elemente. Prin urmare, rezultatele obținute în seră nu trebuie extrapolate automat la câmp, iar comparațiile câmp-seră trebuie să includă caracterizarea solului și a practicilor agricole.

Literatura recentă indică faptul că sistemele intensive de producție protejată pot deveni zone de acumulare a unor elemente potențial toxice, în special ca urmare a aporturilor repetate (Sanad et al., 2026).

În același timp, condițiile de seră pot diminua anumite surse de variabilitate climatică și pot fi utile pentru identificarea mecanismelor de transfer. Din punct de vedere al ghidului de bune practici, cele două sisteme trebuie tratate ca scenarii agricole distincte.

4.6.6. Influența irigației și fertilizării

Apa de irigare trebuie considerată simultan ca *factor agronomic și posibilă sursă de contaminare*. Calitatea apei poate introduce direct elemente sau compuși care ulterior devin disponibili pentru plante. În mod similar, fertilizanții și amendamentele pot modifica: concentrația totală a contaminantului din sol; pH-ul; capacitatea de

schimb cationic; conținutul de materie organică; activitatea microbiologică; speciația chimică; disponibilitatea pentru rădăcină.

Prin urmare, fertilizarea trebuie analizată nu numai prin prisma aportului de nutrienți, ci și prin efectul asupra *biodisponibilității contaminanților*. Evaluarea preliminară a solului și a apei de irigare reprezintă una dintre măsurile recomandate pentru reducerea riscului de acumulare a elementelor potențial toxice în legume (Gupta et al., 2019).

4.6.7. Factorii care trebuie integrați în evaluarea transferului

Pe baza mecanismelor prezentate, transferul sol-plantă poate fi privit ca rezultatul interacțiunii a patru componente majore: **PROPRIETĂȚILE SOLULUI + PROPRIETĂȚILE CONTAMINANTULUI + CARACTERISTICILE PLANTEI + MANAGEMENTUL AGRICOL → TRANSFER → CONCENTRAȚIA ÎN PARTEA COMESTIBILĂ** (Figura 5).

Transferul contaminanților din sol către partea comestibilă a plantei este un proces complex, rezultat din interacțiunea dintre proprietățile solului, caracteristicile contaminantului, proprietățile plantei și practicile de management agricol. Concentrația totală a unui contaminant în sol nu este, în sine, suficientă pentru a estima cantitatea care poate fi preluată de plantă. Procesul este condiționat în primul rând de forma chimică, solubilitatea, mobilitatea și afinitatea contaminantului pentru componentele solului, precum și de proprietăți precum pH-ul, conținutul de materie organică, textura, capacitatea de schimb cationic, umiditatea și condițiile redox. Aceste caracteristici determină fracția biodisponibilă, respectiv fracția contaminantului accesibilă sistemului radicular (Guerrieri et al., 2024).

Odată disponibil, contaminantul poate fi absorbit la nivelul rădăcinilor și ulterior translocat către organele aeriene și, în funcție de specie și de particularitățile fiziologice ale plantei, către organul comestibil. Specia, cultivarului/genotipul, arhitectura sistemului radicular, stadiul de dezvoltare, rata transpirației și particularitățile organului vegetal pot determina diferențe importante în acumularea contaminanților chiar în condiții similare de sol (S. Huang et al., 2024; Guerrieri et al., 2024).

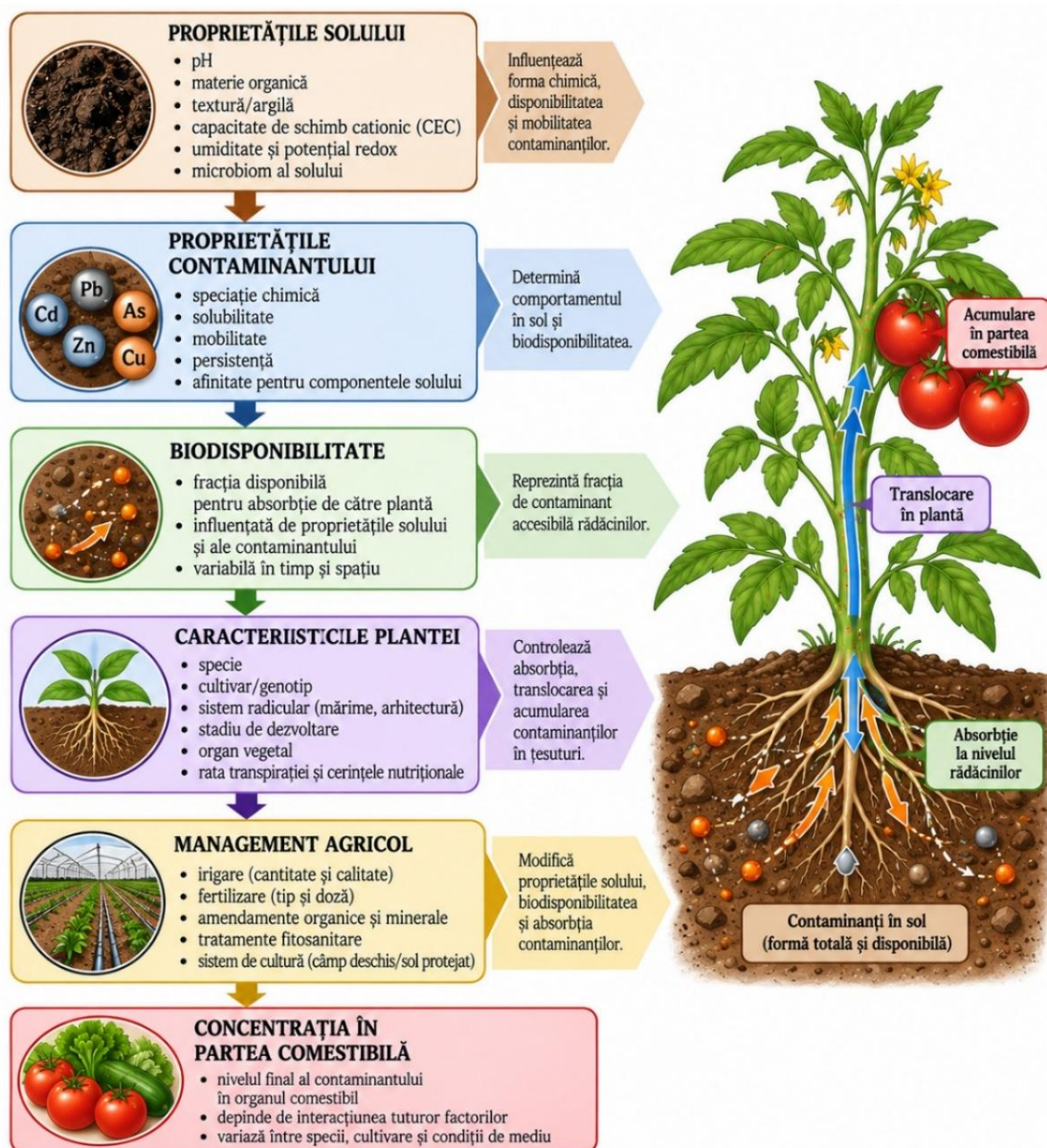


Figura 5. Factorii care controlează transferul contaminanților din sol către partea comestibilă a plantei

Managementul agricol poate modifica atât disponibilitatea contaminanților în sol, cât și procesul de absorbție de către plante (Tabelul 3). Calitatea și cantitatea apei de irigare, tipul și doza fertilizanților, utilizarea amendamentelor organice sau minerale, tratamentele fitosanitare și sistemul de cultură pot influența proprietățile solului și, implicit, transferul către plantă. În consecință, evaluarea riscului pentru siguranța alimentelor trebuie să integreze atât caracterizarea contaminării solului și a

biodisponibilității, cât și determinarea concentrației contaminantului în organul destinat consumului. Prin urmare, concentrația măsurată în partea comestibilă reprezintă rezultatul final al unei succesiuni de procese fizico-chimice, biologice și agronomice, iar interpretarea acesteia trebuie realizată în raport cu sursa contaminării, condițiile de mediu, caracteristicile culturii și limitele aplicabile pentru produsul alimentar.

Tabelul 3. Factori prioritari pentru monitorizarea transferului contaminanților sol-plantă

Factor monitorizat	De ce este relevant	Implicație pentru transfer	Acțiune recomandată
pH-ul solului	Controlează speciația și adsorbția	Poate crește sau reduce mobilitatea contaminantului	Determinare periodică
Materia organică	Influențează adsorbția, complexarea și activitatea microbiană	Poate favoriza imobilizarea sau, în anumite condiții, mobilizarea	Determinarea C organic
Textura și conținutul de argilă	Controlează suprafața de adsorbție și retenția	Influențează disponibilitatea contaminantului	Analiză granulometrică
CEC	Controlează retenția ionilor	Influențează disponibilitatea cationilor	Determinare CEC
Umiditatea/regimul hidric	Influențează difuzia și transportul în soluția solului	Poate modifica disponibilitatea și absorbția	Monitorizarea regimului hidric
Specia contaminantului	Determină solubilitatea și interacțiunea cu solul și rădăcina	Controlează fracția biodisponibilă	Speciație, când este relevantă
Specia/cultivarul plantei	Determină capacitatea de absorbție și translocare	Poate genera diferențe importante între culturi	Monitorizare diferențiată pe cultură
Organul vegetal	Distribuția contaminantului diferă între organe	Concentrația în partea comestibilă poate fi diferită de cea din rădăcină sau frunze	Analiza părții comestibile
Apa de irigare	Poate constitui sursă de contaminanți și modifică regimul hidric	Poate crește aportul și transferul contaminanților	Controlul calității apei
Fertilizarea și amendamentele	Modifică pH-ul, CEC, competiția ionică și aportul de elemente	Pot crește sau reduce transferul	Evidența tipului, dozei și momentului aplicării
Sistemul de cultură	Influențează microclimatul și regimul de aport	Pot exista diferențe între câmp și spații protejate	Monitorizare diferențiată

NOTE: Sursa - elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate (Gupta et al., 2019; Kim et al., 2015; Christou et al., 2019) și a rezultatelor experimentale obținute în cadrul proiectului (Paun et al., 2025). Recomandările de monitorizare reprezintă o sinteză operațională elaborată pentru prezentul ghid.

4.6.8. Implicații pentru agricultura rezilientă

Din perspectiva agriculturii reziliente, selecția culturii nu trebuie făcută exclusiv pe criterii de productivitate. În terenurile cu antecedente de contaminare sau cu proprietăți care favorizează mobilitatea anumitor contaminanți, alegerea speciei și, atunci când există informații suficiente, a cultivarului poate deveni o măsură preventivă de reducere a transferului către lanțul alimentar. Această abordare presupune trecerea de la întrebarea: „*Este solul contaminat?*” la o întrebare mai relevantă pentru siguranța alimentelor: „*În condițiile concrete ale acestui agroecosistem, cât din contaminant poate ajunge în partea comestibilă a culturii?*”

Această diferențiere este esențială deoarece două terenuri cu concentrații totale similare ale unui contaminant pot conduce la niveluri diferite în produsul agricol, în funcție de biodisponibilitate, specie, cultivar și tehnologia de cultură. În consecință, managementul riscului trebuie construit pe lanțul causal sol → biodisponibilitate → plantă → parte comestibilă, și nu exclusiv pe concentrația totală din sol.

Mesaj-cheie pentru bune practici

Specia și cultivarului nu sunt variabile secundare în evaluarea contaminării. Ele pot modifica semnificativ transferul și distribuția contaminanților în plantă. Pentru producția de alimente sigure, alegerea culturii trebuie corelată cu caracteristicile solului, contaminantul dominant și tehnologia de cultivare.

4.7. Dovezi experimentale din agroecosistemele românești

Evaluarea transferului contaminanților trebuie susținută, pe cât posibil, de date obținute în condiții reale de cultivare. În acest context, rezultatele experimentale obținute în agroecosisteme din România oferă un exemplu relevant privind variabilitatea transferului elementelor din sol către plante și demonstrează de ce evaluarea riscului nu poate fi bazată exclusiv pe concentrația totală a unui contaminant în sol. Un studiu

realizat în 2024 pe legume cultivate în diferite regiuni ale României a urmărit simultan concentrațiile unor elemente potențial relevante pentru siguranța alimentelor și relația acestora cu solurile de cultură. Au fost analizate 190 de probe de legume și 38 de probe de sol, provenite din 19 locații, fiind investigate cinci culturi: ceapă (*Allium cepa* L.), usturoi (*Allium sativum* L.), salată verde (*Lactuca sativa* L.), castravete (*Cucumis sativus* L.) și dovlecel (*Cucurbita pepo* L.). Au fost urmărite Li, Cu, Mn, Sr și Zn, alături de alte elemente potențial toxice determinate în cadrul caracterizării multielementale (Paun et al., 2025).

4.7.1. Variabilitatea transferului între culturi

Rezultatele au evidențiat un comportament specific elementului și culturii, ceea ce confirmă faptul că aceeași condiție de mediu nu conduce obligatoriu la aceeași acumulare în toate plantele. În plus, relațiile dintre concentrațiile din sol și cele din plante nu au fost întotdeauna proporționale, indicând existența unor mecanisme de reglare biologică și a unor factori de mediu care decuplează concentrația totală din sol de concentrația din țesutul vegetal (Paun et al., 2025). Acest rezultat este deosebit de important pentru interpretarea factorului de transfer (TF). Un TF ridicat nu trebuie atribuit automat unei concentrații mari în sol, după cum un TF redus nu înseamnă că solul este lipsit de contaminanți. Transferul reprezintă rezultatul interacțiunii dintre proprietățile solului, forma chimică a elementului, specie, organ vegetal și condițiile de cultivare (Tabelul 4).

Tabelul 4. Exemple de comportament al elementelor în relația sol-plantă observate în agroecosistemele românești

Element	Tendință generală observată	Interpretare pentru evaluarea riscului
Li	Variabilitate spațială pronunțată; transfer moderat pentru anumite culturi	Necesită monitorizare regională; concentrația din sol nu este suficientă pentru predicția acumulării
Zn	Transfer și acumulare mai evidente în anumite culturi, inclusiv dovlecel	Elementul trebuie evaluat simultan prin concentrația din sol și partea comestibilă
Cu	Variabilitate între regiuni și sisteme de cultură; pot apărea valori extreme localizate	Valorile extreme pot indica surse locale sau practici agricole specifice
Mn	Diferențe clare între culturi și condiții de cultivare	Necesită interpretare în raport cu proprietățile solului și necesarul fiziologic al plantei

Element	Tendință generală observată	Interpretare pentru evaluarea riscului
Sr	Mobilitate moderată și posibilă translocare către țesuturile comestibile	Comportamentul trebuie corelat cu pH-ul și disponibilitatea Ca
Pb	În general, transfer limitat, dar cu creșteri locale	Zonele cu fond geochimic/antropic ridicat trebuie investigate separat
Cd	Transfer redus în unele dintre culturile investigate	Nu trebuie considerat neglijabil fără caracterizarea solului și a produsului
As, V, Hg	În general, concentrații/transfer reduse în condițiile investigate, cu excepții locale	Monitorizarea trebuie păstrată în zone cu potențiale surse locale

Sursa: sinteză pe baza rezultatelor raportate de Paun et al. (2025). Interpretările reprezintă tendințe observate în setul de date investigat și nu constituie reguli universale pentru toate agroecosistemele.

4.7.2. Diferențele dintre culturile de câmp și cele din seră

Una dintre componentele relevante ale studiului a fost comparația între plantele cultivate în câmp deschis și seră. Analiza statistică a fost realizată separat pentru combinațiile specie-element, tocmai pentru a evita mascarea unor diferențe biologice importante prin agregarea tuturor culturilor într-un singur set de date. Pentru comparații au fost utilizate teste Mann-Whitney U, după identificarea unor distribuții nenormale pentru mai multe dintre elementele analizate.

Pentru majoritatea perechilor specie-element pentru care au fost identificate diferențe semnificative, acumularea în plantele cultivate în câmp a fost mai mare decât în plantele cultivate în seră. Exemplele raportate includ:

- ✓ Mn în usturoi - valoarea mediană în câmp a fost de aproximativ trei ori mai mare decât în seră;
- ✓ Zn în castravete - acumulare mai ridicată în plantele cultivate în câmp;
- ✓ Cd în dovlecel - valori mediane mai mari în câmp;
- ✓ Co în usturoi - acumulare mai mare în câmp;
- ✓ Cu în castravete - diferența a fost asociată în special cu un punct extrem foarte ridicat în grupul de câmp;
- ✓ V în dovlecel - au fost observate valori extreme în grupul de seră, ilustrând faptul că efectul sistemului de cultură nu este uniform pentru toate elementele.

Aceste rezultate sunt importante deoarece demonstrează că sistemul de cultivare trebuie înregistrat ca variabilă de monitorizare. Nu este suficientă menționarea culturii și a locației; pentru interpretarea corectă a transferului trebuie cunoscut dacă planta a fost cultivată în câmp sau în condiții protejate.

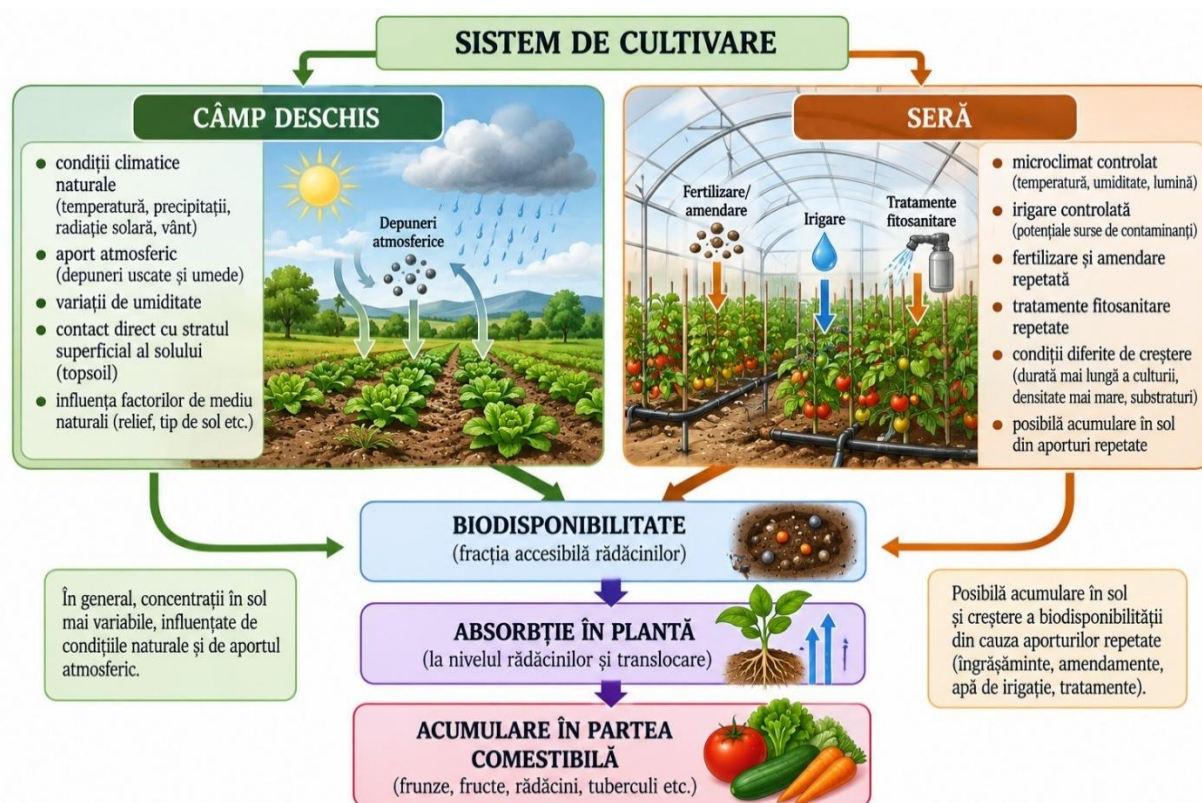


Figura 6. Influența sistemului de cultivare asupra acumulării contaminanților

Mesajul figurii: sistemul de cultură poate modifica expunerea plantei la contaminanți și, implicit, concentrația din produs, dar direcția și intensitatea efectului sunt element- și specie-dependente.

4.7.3. Exemplul dovlecelului: efectul regiunii și al condițiilor de cultivare

Dovlecelul reprezintă un exemplu relevant pentru caracterul spațial și element-specific al transferului. În probele investigate, Zn a prezentat acumulare moderată, concentrațiile raportate situându-se în intervalul 7,32-31,0 mg/kg, cu valori în general ceva mai mari în probele provenite din câmp decât în cele din seră. În schimb, Cd a prezentat concentrații foarte reduse, între 0 și 0,021 mg/kg, indicând un transfer limitat în condițiile investigate (Paun et al., 2025).

Pentru Pb au fost observate valori cuprinse între 0,022 și 3,33 mg/kg, iar valorile cele mai ridicate au fost asociate cu dovleceii cultivați în zone cu influență industrială din Dolj, Vrancea și Ialomița. Pentru Ni au fost observate acumulări mai importante în anumite regiuni, în special Ialomița și Bacău. În același timp, Sr și Li au prezentat

mobilitate moderată către țesuturile comestibile, în timp ce V și As au prezentat niveluri de transfer reduse în majoritatea probelor (Paun et al., 2025). Un rezultat important pentru managementul agricol a fost observarea unui gradient vertical al concentrațiilor în sol, cu valori în general mai ridicate în stratul superficial de 5 cm decât la 15 cm. Acest comportament poate contribui la diferențele dintre plantele de câmp și cele cultivate în seră și subliniază importanța definirii corecte a adâncimii de prelevare a solului. Regiunile Ialomița, Bacău și București au prezentat, pentru anumite elemente, valori mai ridicate ale acumulării în dovlecel, în timp ce Olt, Mehedinți și Tulcea au prezentat niveluri mai reduse în setul investigat. Prin urmare, riscul poate avea o componentă geografică pronunțată chiar în interiorul aceleiași țări.

4.7.4. De ce monitorizarea trebuie făcută pe regiuni

Rezultatele obținute susțin necesitatea unei abordări de tip „site-specific”, deoarece agregarea tuturor probelor la nivel național poate ascunde zone cu acumulări neobișnuit de mari. Într-un sistem de monitorizare, este recomandabil ca fiecare probă de produs agricol să fie asociată cu: localizarea geografică; tipul și proprietățile solului; adâncimea de prelevare; cultura și, dacă este disponibil, cultivarului; sistemul de cultură; istoricul fertilizării; istoricul aplicării produselor fitosanitare; sursa apei de irigare; condițiile meteorologice relevante; concentrația contaminantului în sol; concentrația contaminantului în partea comestibilă. Această abordare permite trecerea de la simpla cartografiere a concentrațiilor la identificarea unor zone și practici cu risc crescut.

4.7.5. Ce ne arată concret rezultatele românești?

Rezultatele experimentale pot fi sintetizate în cinci concluzii aplicabile agriculturii reziliente:

- 1. Transferul este element-specific.** Li, Zn, Cu, Mn, Sr, Pb, Cd și celelalte elemente nu se comportă identic în sistemul sol-plantă.
- 2. Transferul este specie-specific.** Aceeași regiune și același tip de sol pot conduce la niveluri diferite de acumulare în ceapă, usturoi, salată, castravete și dovlecel.

3. Sistemul de cultivare contează. Diferențele câmp-seră au fost semnificative pentru mai multe combinații specie-element, dar direcția efectului nu a fost identică pentru toate elementele.

4. Există variație spațială și posibile hotspoturi. Unele regiuni au prezentat acumulări mai mari pentru anumite elemente, ceea ce indică necesitatea monitorizării geografice.

5. Concentrația din sol nu este un predictor suficient. Relațiile sol-plantă au prezentat un caracter element-specific și, în anumite situații, neliniar. Evaluarea trebuie să includă biodisponibilitatea și concentrația efectivă din partea comestibilă.

Tabelul 5 sintetizează modul în care rezultatele analitice obținute în cadrul monitorizării solului și plantelor pot fi transformate în decizii agricole și acțiuni de control. Interpretarea nu trebuie realizată pe baza unui singur parametru, deoarece o concentrație ridicată în sol nu implică în mod automat o acumulare ridicată în plantă, iar o concentrație redusă în sol nu exclude posibilitatea unei acumulări semnificative în partea comestibilă. În acest context, factorul de transfer (TF) oferă informații comparative privind transferul contaminantului din sol către plantă, dar nu reprezintă, în sine, un indicator de siguranță alimentară și nu trebuie utilizat ca prag decizional independent.

Tabelul 5. De la rezultatul analitic la decizia agricolă

Rezultat observat	Interpretare	Acțiune recomandată
Concentrație ridicată în sol + TF ridicat	Probabilitate crescută de transfer	Restricționarea/reevaluarea culturii și investigații suplimentare
Concentrație ridicată în sol + TF redus	Biodisponibilitate/absorbție limitată în condițiile actuale	Monitorizare periodică; nu se presupune absența riscului
Concentrație redusă în sol + acumulare ridicată în plantă	Posibilă biodisponibilitate ridicată sau altă sursă	Verificarea apei, fertilizanților și altor aporturi
Diferențe mari câmp-seră	Influență a sistemului de cultivare	Monitorizare separată a celor două sisteme
Valori extreme într-o singură locație	Posibil hotspot local	Reprelevare și identificarea sursei
Diferențe între regiuni pentru aceeași cultură	Influență geochimică/agricolă locală	Cartografiere și monitorizare regională
TF diferit între elemente	Mecanisme diferite de absorbție/translocare	Evaluare contaminant-specifică
Concentrație ridicată în partea comestibilă	Relevanță directă pentru siguranța alimentelor	Evaluare față de limitele/reglementările aplicabile

Corelarea dintre concentrația contaminantului în sol, TF, concentrația în partea comestibilă și caracteristicile amplasamentului permite identificarea unor situații care necesită monitorizare suplimentară sau investigații specifice. De exemplu, asocierea unei concentrații ridicate în sol cu un TF ridicat indică o probabilitate mai mare de transfer către plantă și justifică o evaluare aprofundată a culturii și a sursei contaminării. În schimb, un TF redus în condițiile unei contaminări ridicate a solului poate indica o disponibilitate sau o absorbție limitată în condițiile investigate, fără a permite însă concluzia că riscul este absent.

Diferențele între locații, regiuni sau sisteme de cultivare pot furniza informații suplimentare privind influența condițiilor pedoclimatice, a practicilor agricole și a surselor locale de contaminare. Valorile extreme observate într-o singură locație trebuie, atunci când este posibil, confirmate prin reprelevare și corelate cu istoricul terenului, apa de irigare, fertilizantii, amendamentele și alte surse potențiale. În mod similar, diferențele dintre elemente reflectă comportamente diferite în ceea ce privește mobilitatea, biodisponibilitatea, absorbția și translocarea.

În etapa finală a evaluării, concentrația contaminantului în partea comestibilă reprezintă parametrul cu relevanță directă pentru siguranța alimentelor. Aceasta trebuie interpretată prin raportare la limitele și cerințele legislative aplicabile produsului și contaminantului respectiv, precum și, atunci când este relevant, în cadrul unei evaluări a expunerii. Prin urmare, tabelul propune o schemă operațională de trecere de la rezultatul analitic la acțiunea agricolă, fără a constitui o clasificare oficială a riscului.

4.7.6. Implicații pentru ghidul de bune practici

Datele experimentale românești susțin o schimbare importantă de paradigmă: *monitorizarea solului trebuie conectată direct la monitorizarea produsului agricol.*

Un program eficient nu ar trebui să se limiteze la: „Analizăm solul și stabilim dacă este contaminat.” ci să urmărească succesiv: Sol → biodisponibilitate → cultură → transfer → parte comestibilă → produs → expunere.

În cazul în care este identificată o contaminare a solului, decizia privind utilizarea terenului trebuie să ia în considerare cultura planificată, nu numai nivelul contaminantului. Același sol poate prezenta un profil de risc diferit pentru o cultură cu

acumulare redusă față de una care transferă eficient contaminantul în partea comestibilă. Această abordare este compatibilă cu principiile agriculturii reziliente: riscul nu este eliminat doar prin reacție după apariția contaminării în produs, ci este anticipat și gestionat la nivelul agroecosistemului.

Concluzie: rezultatele obținute în agroecosistemele românești demonstrează că transferul sol-plantă este *spațial, biologic și element-specific*. Din acest motiv, o strategie de siguranță alimentară bazată exclusiv pe concentrația totală din sol sau exclusiv pe analiza produsului este incompletă. Cea mai robustă abordare este integrarea celor două niveluri într-un sistem de monitorizare și management al riscului pe întregul lanț sol-plantă-produs.

4.8. Transferul reziduurilor de pesticide și persistența contaminării

Pesticidele ocupă o poziție particulară în evaluarea lanțului sol-plantă-produs deoarece, spre deosebire de elementele anorganice, comportamentul lor este puternic dependent de structura chimică, persistență, solubilitate, coeficientul de partiție, afinitatea pentru materia organică și modul de aplicare. În plus, unele substanțe sunt sistemice și pot fi translocate în interiorul plantei, în timp ce altele rămân predominant la suprafața organelor vegetale.

Utilizarea pesticidelor reprezintă o componentă importantă a producției agricole moderne, însă aplicarea repetată poate conduce la apariția reziduurilor în plante, sol și alte componente ale agroecosistemului. Persistența și mobilitatea acestor compuși depind atât de proprietățile substanței active, cât și de caracteristicile mediului și de practicile agricole (Tudi et al., 2021; Raffa & Chiampo, 2021).

4.8.1. De la aplicarea pesticidului la reziduul din produs

După aplicarea unui produs fitosanitar, substanța activă poate urma mai multe căi (Figura 7):

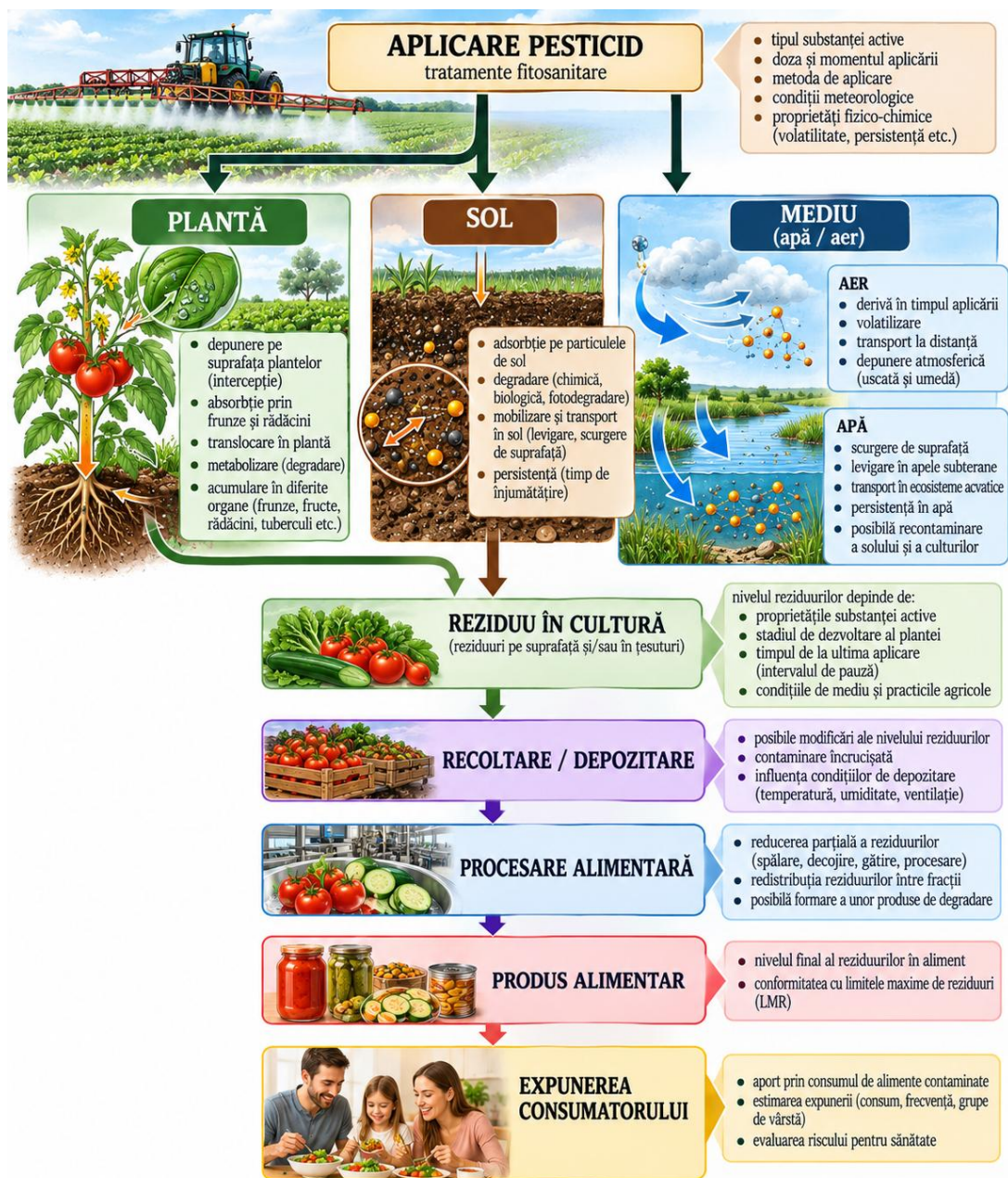


Figura 7. Principalele căi de transfer și persistență a reziduurilor de pesticide de la aplicarea fitosanitară la produsul alimentar

Această schemă evidențiază faptul că evaluarea contaminării cu pesticide nu trebuie limitată la momentul aplicării fitosanitare, ci trebuie urmărită pe întregul traseu al reziduului, de la aplicare până la consum. După aplicare, substanța activă poate urma căi diferite în funcție de proprietățile sale fizico-chimice și de condițiile de

mediu. O parte poate fi interceptată și absorbită de plantă, unde poate fi translocată și distribuită în diferite organe, în timp ce o altă parte ajunge pe sau în sol, unde poate fi adsorbită, degradată, mobilizată sau transportată către alte compartimente ale mediului. În același timp, procesele de volatilizare, depunere atmosferică, scurgere și transport prin apă pot contribui la redistribuirea contaminantului. Nivelul reziduului prezent în cultură la momentul recoltării reprezintă rezultatul integrat al acestor procese, fiind influențat de substanța activă utilizată, doza și frecvența aplicării, intervalul dintre ultimul tratament și recoltare, stadiul de dezvoltare al plantei și condițiile de mediu. Din acest motiv, informația privind tratamentul fitosanitar trebuie corelată cu rezultatul analitic obținut pentru produsul recoltat. Etapele ulterioare recoltării nu trebuie neglijate. Depozitarea și procesarea pot modifica nivelul și distribuția reziduurilor, prin degradare, îndepărtarea unei fracții a contaminantului, redistribuirea acestuia între diferitele componente ale produsului sau, în anumite situații, concentrarea reziduului într-o fracție alimentară. Prin urmare, evaluarea trebuie să țină cont de forma în care produsul este efectiv comercializat și consumat.

În etapa finală, rezultatul relevant pentru siguranța alimentelor este concentrația reziduului în produsul destinat consumului, care trebuie interpretată în raport cu limita maximă de reziduuri (LMR) aplicabilă și, atunci când evaluarea o impune, cu nivelul și durata expunerii consumatorului. În cazul prezenței simultane a mai multor substanțe active, simpla verificare individuală a fiecărui reziduu nu descrie întotdeauna complexitatea profilului de expunere, motiv pentru care monitorizarea multireziduală și evaluarea cumulativă pot furniza informații suplimentare.

Astfel, lanțul „*aplicare → mediu → cultură → recoltare → depozitare/procesare → produs alimentar → consumator*” reprezintă o succesiune de puncte de control, iar monitorizarea eficientă trebuie să integreze atât informațiile privind utilizarea pesticidelor, cât și rezultatele analitice obținute la nivelul produsului alimentar.

4.8.2. Monitorizarea multireziduală în fructe și legume

Un exemplu relevant pentru România este studiul realizat pe produse horticoale disponibile pe piața românească, în care au fost analizate 620 de probe, utilizând extracția QuEChERS și LC-MS/MS. Au fost investigate 74 de substanțe pesticide, ceea ce

permite o evaluare multireziduală mai apropiată de realitatea expunerii consumatorului decât analiza unui singur compus (Popescu et al., 2025).

Cele mai frecvent identificate combinații au fost asociate cu anumite categorii de produse. De exemplu, boscalidul și azoxistrobinul au fost frecvent întâlnite în mere și căpșuni, iar difenoconazolul și acetamipridul au fost predominante în castraveți și tomate (Popescu et al., 2025).

Aceste rezultate demonstrează că profilul contaminării este dependent simultan de produs și de substanța activă. Prin urmare, un program de monitorizare eficient trebuie să includă suficiente substanțe active pentru a surprinde utilizarea reală a produselor fitosanitare.

Tabelul 6 prezintă câteva exemple de reziduuri de pesticide evidențiate în produsele horticole analizate în cadrul studiului de supraveghere realizat pe lanțul de aprovizionare din România. Distribuția reziduurilor a variat în funcție de tipul produsului, iar anumite substanțe active au fost identificate cu o frecvență mai mare în anumite categorii de fructe și legume. De exemplu, boscalidul a fost frecvent evidențiat în probele de mere, azoxistrobinul în căpșuni, difenoconazolul în castraveți, iar acetamipridul în tomate. În cazul citricelor, imazalilul a reprezentat unul dintre compușii identificați, cu o variabilitate importantă a concentrațiilor.

Tabelul 6. Exemple de reziduuri identificate în produse horticole din lanțul de aprovizionare din România

Produs	Reziduuri frecvent evidențiate	Observație
Mere	Boscalid	Detectare frecventă
Căpșuni	Azoxistrobin	Detectare frecventă
Castraveți	Difenoconazol	Printre compușii predominanți
Tomate	Acetamiprid	Printre compușii predominanți
Citrice	Imazalil	Variabilitate importantă a concentrațiilor
Diverse fructe/legume	Multiple substanțe active	Necesitatea abordării multireziduale

Sursa: (Popescu et al., 2025).

Aceste observații evidențiază caracterul dependent de produs al profilului de reziduuri și justifică utilizarea unor programe de monitorizare multireziduală, în care mai multe substanțe active sunt urmărite simultan. Prezența unui reziduu în probele analizate nu trebuie însă interpretată, în sine, ca dovadă de neconformitate. Evaluarea

trebuie realizată pe baza concentrației determinate, a limitei maxime de reziduuri (LMR) aplicabile produsului și substanței respective, precum și, atunci când este relevant, prin luarea în considerare a expunerii la mai multe reziduuri.

În acest sens, rezultatele prezentate în tabel trebuie privite ca exemple ale complexității profilului de contaminare, nu ca o clasificare a produselor în funcție de nivelul de risc. Ele susțin necesitatea trecerii de la o abordare bazată pe identificarea unui singur pesticid la o strategie de supraveghere multireziduală și orientată către evaluarea expunerii consumatorului (Popescu et al., 2025).

4.8.3. Conformitatea cu limitele maxime de reziduuri

Pentru evaluarea siguranței alimentelor, rezultatele analitice trebuie comparate cu *Limitele Maxime de Reziduuri (LMR/MRL)* aplicabile fiecărei combinații pesticid-produs. Regulamentul (CE) nr. 396/2005 stabilește cadrul european pentru limitele maxime de reziduuri de pesticide în sau pe produsele alimentare și furajere de origine vegetală și animală (Regulamentul (CE) nr. 396/2005). În studiul realizat pe cele 620 de probe, majoritatea reziduurilor s-au încadrat în limitele europene, însă a fost identificat un subset de probe care s-au apropiat de valorile-limită sau au prezentat situații care necesitau atenție suplimentară (Popescu et al., 2025). Un exemplu îl constituie imazalilul în citrice, pentru care au fost raportate concentrații între 0,058 și 3,855 mg/kg, în apropierea LMR de 4 mg/kg pentru anumite produse. Studiul a evidențiat, de asemenea, variații asociate originii geografice, în special pentru produse importate.

Important: depășirea unei LMR nu trebuie echivalată automat cu apariția unui efect toxic la consumator. LMR reprezintă un criteriu de conformitate stabilit în cadrul evaluării utilizării autorizate a pesticidului și trebuie interpretată împreună cu evaluarea expunerii și toxicologia substanței.

4.8.4. Originea geografică și practicile agricole

Lanțurile moderne de aprovizionare introduc o componentă suplimentară de variabilitate: originea produsului. Diferențele dintre țări sau regiuni pot reflecta: produsele fitosanitare autorizate; dozele și frecvența de aplicare; intervalele pre-recoltare; condițiile climatice; presiunea diferiților dăunători; practicile de depozitare și transport; nivelul de control și monitorizare.

Analiza realizată pe piața românească a identificat variații ale profilului reziduurilor în funcție de produs și origine și a utilizat instrumente statistice, inclusiv ANOVA și K-means clustering, pentru identificarea unor tipare regionale și comerciale. Această abordare oferă un avantaj important pentru monitorizarea bazată pe risc: nu toate produsele și toate sursele de aprovizionare necesită neapărat aceeași intensitate de monitorizare.

4.8.5. Persistența contaminării în sol

O parte dintre pesticide poate persista în sol după recoltarea culturii. Persistența depinde de proprietățile moleculei și de condițiile de mediu, inclusiv: temperatură; umiditate; pH; conținut de materie organică; activitate microbiologică; radiație solară; proprietăți de adsorbție/desorbție. Prin urmare, aplicarea repetată a unor pesticide poate conduce la apariția unei contaminări reziduale a solului, care poate deveni relevantă pentru culturile succesive.

În anumite situații, contaminantul poate fi degradat rapid, în timp ce în alte cazuri poate persista și poate fi mobilizat ulterior. Din acest motiv, istoricul tratamentelor fitosanitare reprezintă o informație importantă pentru caracterizarea riscului unui teren.

4.8.6. Rolul procesării după recoltare

Transferul nu se încheie în momentul recoltării. Produsele agricole pot fi: spălate; sortate; decojite; tăiate; uscate; blanșate; fierte; pasteurizate; procesate în sucuri, piureuri, conserve sau alte produse.

Aceste operații pot determina scăderea, redistribuirea sau, în anumite cazuri, concentrarea aparentă a reziduurilor. Prin urmare, concentrația din materia primă nu poate fi transferată automat asupra produsului procesat. Revizuirea realizată de Popescu et al. (2024) arată că metodele convenționale, precum spălarea și înmuierea, pot reduce reziduurile, dar eficiența este limitată și dependentă de pesticid și de matrice (Popescu et al., 2024). Tehnologiile de procesare potențial mai eficiente includ tratamente termice și tehnologii non-termice, însă unele dintre acestea se află încă în etapa experimentală (Tabelul 7).

Tabelul 7. Măsuri post-recoltare pentru reducerea reziduurilor de pesticide

Măsură	Principiu	Eficiență generală	Observație
Spălare cu apă	Îndepărtarea contaminantului de la suprafață	Limitată-moderată	Depinde de proprietățile pesticidului
Înmuiere	Creșterea timpului de contact cu apa	Variabilă	Nu garantează eliminarea reziduurilor
Decoajire	Eliminarea stratului superficial	Poate fi ridicată pentru reziduuri de suprafață	Pierdere posibilă de componente nutritive
Blanșare/fierbere	Degradare și/sau transfer în apă	Variabilă	Depinde de stabilitatea termică și hidrosolubilitate
Procesare termică	Temperatură + timp	Variabilă	Poate reduce sau redistribui reziduurile
Ozon	Oxidare	Potențial ridicată pentru anumite substanțe	Necesită controlul procesului
Plasma rece	Procese oxidative/reactive	Promițătoare	Tehnologie emergentă
Ultrasunete	Cavitație și transfer de masă	Promițătoare	Necesită optimizare
Presiune înaltă	Efect fizico-chimic în procesare	Potențială	Mai ales pentru aplicații industriale

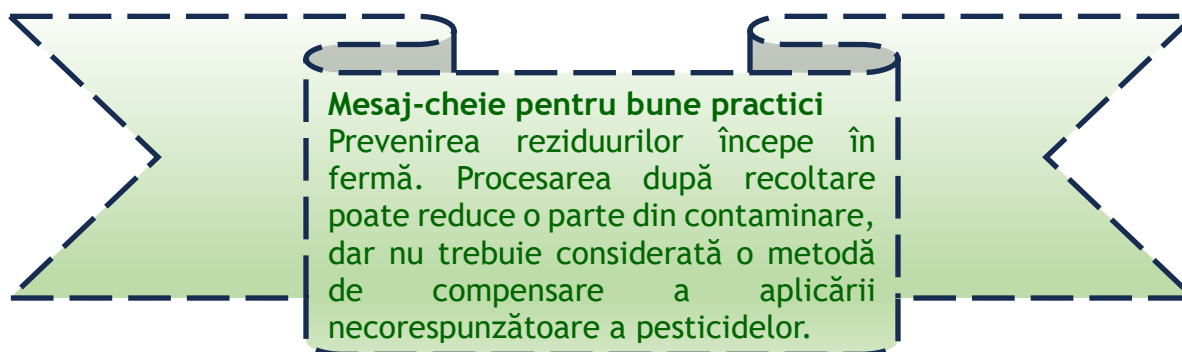
Sursa: (Popescu et al. 2024) și literatura citată în această lucrare.

4.8.7. Recomandări de bune practici pentru managementul reziduurilor de pesticide

Pentru reducerea riscului, se recomandă:

- ✓ *Utilizarea numai a produselor fitosanitare autorizate pentru cultura și utilizarea respectivă.*
- ✓ *Respectarea strictă a dozei recomandate și a numărului maxim de aplicări.*
- ✓ *Respectarea intervalului pre-recoltare.*
- ✓ *Evitarea aplicării repetate a substanțelor cu persistență ridicată fără o justificare agronomică.*
- ✓ *Menținerea unui registru al tratamentelor fitosanitare pentru fiecare parcelă.*
- ✓ *Corelarea tratamentelor cu presiunea reală a bolilor și dăunătorilor, prin monitorizare și intervenție țintită.*
- ✓ *Includerea analizelor multireziduale în programele de verificare.*
- ✓ *Acordarea unei atenții suplimentare produselor provenite din lanțuri de aprovizionare cu profil de risc diferit.*

- ✓ *Evaluarea produsului după recoltare, nu numai a condițiilor de cultivare.*
- ✓ *Utilizarea procesării post-recoltare ca măsură suplimentară de reducere a expunerii, nu ca substitut pentru bunele practici agricole.*



4.9. De la contaminarea individuală la contaminarea multireziduală

Monitorizarea tradițională a reziduurilor de pesticide este construită, în principal, în jurul relației *pesticid-produs alimentar-limită maximă de reziduuri (LMR)*. Această abordare este indispensabilă pentru controlul conformității, dar nu descrie în totalitate situațiile în care un produs conține simultan mai multe substanțe active.

În condițiile agriculturii moderne, aplicarea succesivă sau concomitentă a mai multor produse fitosanitare poate conduce la apariția unor profiluri multireziduale. În aceste situații, evaluarea fiecărei substanțe separat poate subestima complexitatea expunerii, deoarece consumatorul este expus amestecului de reziduuri prezent în aliment (Popescu et al., 2024; ADER 6.3.7, 2026).

4.9.1. Ce înseamnă contaminare multireziduală?

Prin *contaminare multireziduală* se înțelege *prezența simultană a două sau mai multe reziduuri de pesticide în aceeași probă de produs alimentar*.

Este importantă diferențierea între:

- numărul de reziduuri - câte substanțe active sunt detectate;
- concentrația fiecărui reziduu;
- potența toxicologică a fiecărei substanțe;
- contribuția fiecărui compus la expunerea cumulativă;
- eventualele mecanisme comune de acțiune toxicologică.

Astfel, două probe care conțin câte patru pesticide pot avea profiluri de risc foarte diferite (Figura 8).

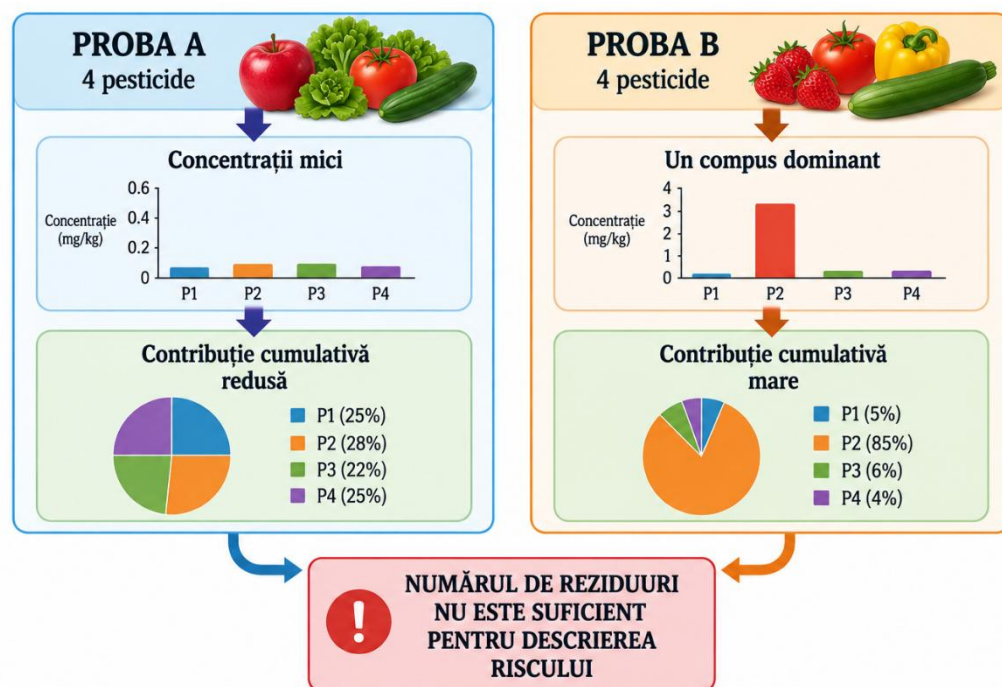


Figura 6. Numărul de reziduuri nu este suficient pentru descrierea riscului: importanța nivelului de concentrație și a contribuției relative a fiecărui pesticid.

Figura 8. Numărul reziduurilor nu este, în sine, un indicator suficient al expunerii cumulative

Figura 8 ilustrează de ce numărul de reziduuri detectate nu poate fi utilizat, în mod izolat, pentru caracterizarea riscului asociat unei probe. Deși ambele probe conțin câte patru pesticide, profilurile lor sunt diferite: în Proba A, concentrațiile individuale sunt reduse și contribuția fiecărui compus la expunerea cumulativă este relativ uniformă, în timp ce în Proba B un singur compus are o contribuție dominantă. În consecință, interpretarea trebuie să țină cont nu numai de numărul de reziduuri, ci și de nivelul concentrațiilor, proprietățile toxicologice ale substanțelor și contribuția acestora la expunerea cumulativă. Atunci când există o bază toxicologică adecvată pentru gruparea substanțelor, evaluarea cumulativă poate furniza o caracterizare mai relevantă a expunerii decât simpla numărare a reziduurilor detectate.

4.9.2. Dovezi experimentale din monitorizarea produselor comercializate în România

Rezultatele studiului de monitorizare multireziduală realizat pe produse disponibile pe piața românească evidențiază complexitatea profilurilor de contaminare, fiind identificate și cuantificate 74 de pesticide în 620 de probe (Popescu et al., 2025). Această complexitate arată de ce caracterizarea expunerii nu trebuie redusă la simpla numărare a substanțelor detectate. În funcție de concentrația fiecărui reziduu și de proprietățile sale toxicologice, probe cu același număr de pesticide pot prezenta contribuții diferite la expunerea cumulativă (Figura 8). Dintr-un set inițial de 230 de probe de fructe și legume, provenite din mai multe regiuni geografice și comercializate pe piața din România, au fost investigate 397 de substanțe pesticide, dintre care 31 de substanțe active au fost evidențiate în probele analizate. Dintre probele incluse în analiza statistică și în evaluarea expunerii, 59% au prezentat contaminare multireziduală, respectiv au conținut cel puțin două reziduuri de pesticide (ADER 6.3.7, 2026).

Acest rezultat este relevant pentru evaluarea siguranței alimentelor deoarece evidențiază faptul că expunerea consumatorului poate implica simultan mai multe substanțe active, iar caracterizarea contaminării nu trebuie limitată la detectarea unui singur reziduu. În consecință, numărul de reziduuri trebuie interpretat împreună cu concentrația fiecărui compus și, atunci când există o bază toxicologică adecvată, cu contribuția acestora la expunerea cumulativă (ADER 6.3.7, 2026).

Probele au fost evaluate în funcție de tipul produsului, originea geografică și complexitatea profilului de reziduuri, atât la nivelul ansamblului de fructe și legume, cât și pentru categorii individuale de produse. Citricele au fost analizate distinct, având în vedere particularitățile profilului de reziduuri asociate acestui grup de produse și importanța tratamentelor aplicate înainte și după recoltare. Etapele de depozitare, manipulare și procesare pot, la rândul lor, influența nivelul reziduurilor din produsele horticole și trebuie luate în considerare în evaluarea expunerii consumatorului (ADER 6.3.7, 2026; Popescu et al., 2024).

4.9.3. Complexitatea reziduală și Indicele de pericol

Pentru cuantificarea expunerii cumulative a fost utilizat *Indicele de pericol (Hazard Index-HI)*, calculat separat pentru adulți și copii.

Expunerea alimentară a fost estimată printr-o abordare deterministă, bazată pe recomandările Autorității Europene pentru Siguranța Alimentară (EFSA). Valorile dozei zilnice estimate (Estimated Daily Intake - EDI) au fost calculate pe baza concentrațiilor de pesticide determinate analitic, a consumului zilnic de alimente și a greutateii corporale considerate pentru două categorii de populație: adulți (70 kg) și copii (15 kg). Doza zilnică estimată (EDI) reprezintă cantitatea estimată de pesticid ingerată zilnic prin consumul alimentului analizat, raportată la unitatea de masă corporală:

$$EDI_i = \frac{C_i \times IR}{BW} \quad (6)$$

unde: EDI_i = doza zilnică estimată pentru pesticidul i (mg/kg corp/zi); C_i = concentrația pesticidului i în produsul alimentar (mg/kg); IR = rata zilnică de consum a produsului alimentar (kg/zi); BW = masa corporală (kg).

Prin urmare, EDI exprimă cantitatea de pesticid ingerată zilnic raportată la masa corporală a consumatorului. Pentru aceeași concentrație a unui reziduu în aliment, valoarea EDI va fi mai mare la o persoană cu o masă corporală mai mică sau la un nivel mai ridicat de consum alimentar.

Pentru evaluarea riscului non-cancerigen asociat expunerii la fiecare pesticid, se utilizează indicele de pericol individual (Hazard Quotient - HQ):

$$HQ_i = \frac{EDI_i}{ADI_i} \quad (7)$$

unde: HQ_i = indicele de pericol individual pentru pesticidul i ; EDI_i = doza zilnică estimată pentru pesticidul i (mg/kg corp/zi); ADI_i = doza zilnică acceptabilă (Acceptable Daily Intake - ADI) pentru pesticidul i (mg/kg corp/zi), stabilită pe baza evaluărilor toxicologice relevante, inclusiv a celor realizate de EFSA.

HQ reprezintă raportul dintre expunerea estimată și doza zilnică acceptabilă. Valoarea sa trebuie interpretată în contextul metodologiei și al valorii ADI utilizate și nu reprezintă, în sine, o măsurătoare directă a probabilității apariției unui efect toxic.

Indicele de pericol cumulativ

Atunci când într-o probă sunt identificate mai multe reziduuri de pesticide, expunerea poate fi evaluată prin indicele de pericol cumulativ (Hazard Index - HI). În abordarea utilizată în studiul prezentat, HI este calculat ca suma indicilor de pericol individuali:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i \quad (8)$$

unde: HI = indicele de pericol cumulativ; HQ_i = indicele de pericol individual asociat pesticidului i ; n = numărul reziduurilor de pesticide incluse în evaluarea probei.

Un $HI > 1$ poate fi utilizat ca valoare de screening care indică necesitatea unei evaluări suplimentare, în cadrul ipotezelor și limitărilor modelului utilizat. Nu trebuie însă interpretat ca o probabilitate directă de apariție a unui efect toxic.

Rezultatele evaluării expunerii cumulative evidențiază o asociere între complexitatea profilului de reziduuri și valoarea indicelui de pericol cumulativ (HI) în scenariul analizat. Pentru populația pediatrică, valoarea medie a HI a fost de aproximativ 0,059 pentru probele în care a fost identificat un singur reziduu, în timp ce pentru probele care conțineau patru sau mai multe reziduuri, valoarea medie a crescut până la aproximativ 0,412 (ADER 6.3.7, 2026). Aceste rezultate sunt sintetizate în Tabelul 8.

Tabelul 8. Relația dintre complexitatea reziduală și expunerea cumulativă

Complexitatea probei	HI mediu - copii	Interpretare
1 reziduu	≈ 0,059	Expunere estimată redusă în scenariul analizat
2-3 reziduuri	Intermediar	Creștere a expunerii cumulative
≥4 reziduuri	≈ 0,412	Expunere cumulativă mai ridicată
Probe individuale cu profiluri deosebite	Poate depăși 1	Necesită evaluare individuală

Sursa: (ADER 6.3.7, 2026). Valorile reprezintă rezultatele scenariului de expunere utilizat în studiul respectiv și nu trebuie extrapolate automat la întreaga populație. Interpretarea HI depinde de substanțele incluse în evaluare, de valorile toxicologice de referință utilizate și de ipotezele privind consumul alimentar și masa corporală.

Tabelul 8 evidențiază faptul că numărul de reziduuri poate fi asociat cu o creștere a expunerii cumulative, dar nu constituie, în sine, un indicator suficient pentru caracterizarea riscului. Concentrația fiecărui reziduu și contribuția sa la expunerea totală trebuie luate în considerare, astfel încât două probe cu același număr de pesticide pot prezenta valori diferite ale HI. Această diferență poate fi deosebit de importantă în cazul unor probe individuale cu profiluri de reziduuri neobișnuite, pentru care valoarea HI poate depăși 1 în scenariul de expunere evaluat. Prin urmare, valorile prezentate în tabel trebuie interpretate ca rezultate ale scenariului specific de expunere utilizat în studiu și nu ca valori reprezentative pentru întreaga populație. Ele ilustrează utilitatea evaluării cumulative și susțin necesitatea unei analize individualizate a probelor cu profiluri multireziduale complexe. În interpretarea HI trebuie avut în vedere și faptul că agregarea indicilor individuali este justificată numai atunci când substanțele incluse sunt evaluate în cadrul unei abordări toxicologice adecvate.

4.9.4. Numărul de pesticide versus impactul fiecărei substanțe

Un rezultat important este că *numărul de reziduuri nu a explicat singur magnitudinea expunerii cumulative*. Acest aspect este esențial pentru interpretarea monitorizării. O probă cu cinci reziduuri nu este obligatoriu mai problematică decât una cu trei reziduuri. Dacă unul dintre cele trei reziduuri are o contribuție mult mai mare la expunere, proba cu trei pesticide poate avea un HI mai mare. Analiza de corelație a identificat câțiva compuși cu contribuții importante la expunerea cumulativă, între care: difenoconazol; cyflufenamid; imazalil; boscalid; azoxistrobin. Coeficienții de corelație raportați pentru acești compuși au fost, respectiv, aproximativ 0,687; 0,663; 0,662; 0,488 și 0,387.

Prin urmare, monitorizarea trebuie să răspundă la două întrebări distincte: „*Câte reziduuri sunt prezente?*” și „*Care dintre ele contribuie cel mai mult la expunerea cumulativă?*”

4.9.5. Vulnerabilitatea populației

Evaluarea cumulativă trebuie realizată în funcție de caracteristicile populației expuse. În studiul analizat, scenariul pentru copii a indicat o vulnerabilitate relativ mai

mare decât cel pentru adulți. Au fost identificate patru probe pentru care HI a depășit valoarea de screening 1 în scenariul destinat copiilor, în timp ce pentru adulți nu au fost observate astfel de depășiri. Acest rezultat demonstrează necesitatea unei abordări specifice populației. Aceeași concentrație a unui pesticid în aliment poate genera niveluri diferite de expunere în funcție de: masa corporală; consumul zilnic; categoria de vârstă; frecvența consumului; tipul produsului; profilul de contaminare.

Totuși, valorile HI obținute trebuie interpretate în contextul ipotezelor de consum utilizate în model. Autorii subliniază că scenariul determinist și informațiile privind consumul limitează extrapolarea rezultatelor la populația generală și recomandă utilizarea unor date mai largi și a evaluărilor probabilistice pentru caracterizarea variabilității și incertitudinii.

4.9.6. De la „conform cu LMR” la „profil de expunere”

Această distincție este foarte importantă pentru ghid.

Conformitatea cu LMR răspunde în principal la întrebarea: *Este concentrația fiecărui reziduu individual în limitele regulamentare pentru produsul respectiv?*

Evaluarea cumulativă răspunde la o întrebare diferită: *Care este contribuția totală a reziduurilor prezente la expunerea consumatorului?*

Cele două abordări nu se exclud, ci se completează (Figura 9).

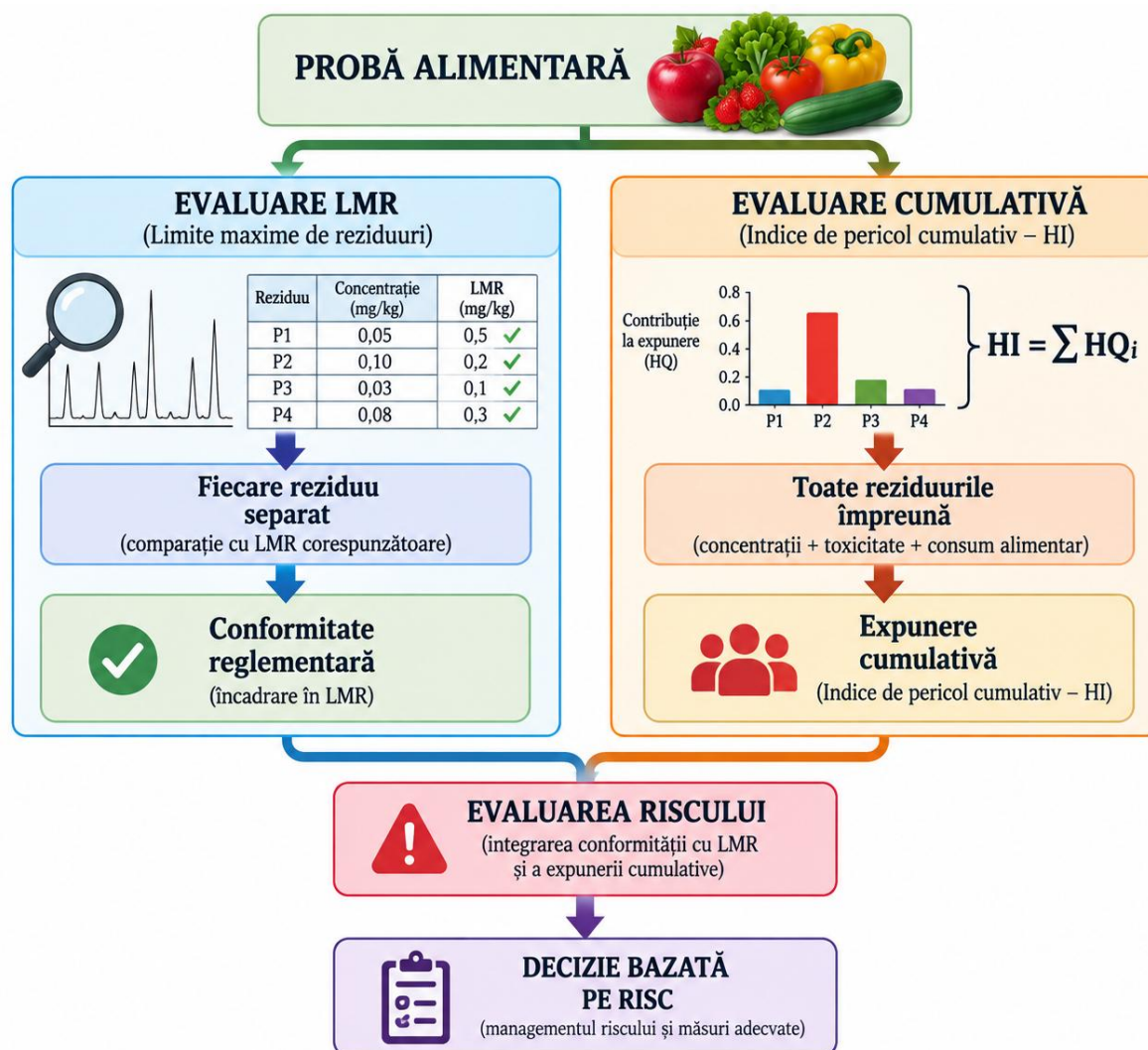


Figura 9. Complementaritatea dintre controlul conformității cu LMR și evaluarea expunerii cumulative.

4.9.7. Instrumentele statistice pentru caracterizarea contaminării complexe

Atunci când numărul de substanțe și probe crește, analiza descriptivă devine insuficientă. Astfel, pot fi utilizate: analiza corelațiilor; analiza co-apariției reziduurilor; analiza componentelor principale (PCA); analiza clusterelor prin K-means. Aceste instrumente au permis identificarea unor rețele de co-apariție și patru arhetipuri distincte de contaminare, evidențiind faptul că profilurile de reziduuri nu sunt aleatorii (Popescu et al., 2025).

Pentru un sistem modern de monitorizare, această abordare permite trecerea de la: „*Ce pesticide au fost detectate?*” la: „*Ce combinații de pesticide apar împreună și care dintre aceste combinații generează cele mai importante scenarii de expunere?*”

4.9.8. Recomandări de bune practici pentru contaminarea multireziduală

Pe baza rezultatelor disponibile (Popescu et al., 2025), se recomandă:

1. Utilizarea metodelor multireziduale, nu doar determinarea unor substanțe individuale.
2. Raportarea atât a numărului de reziduuri, cât și a concentrației fiecăruia.
3. Identificarea substanțelor care au cea mai mare contribuție la expunerea cumulativă.
4. Completarea verificării LMR cu o evaluare a expunerii cumulative, atunci când datele disponibile permit.
5. Acordarea unei atenții speciale grupurilor vulnerabile, în special copiilor.
6. Utilizarea instrumentelor multivariate pentru identificarea profilurilor și surselor potențiale de contaminare.
7. Integrarea originii geografice și a tipului de produs în prioritizarea monitorizării.
8. Repetarea monitorizării în timp pentru identificarea unor tipare persistente, nu doar a unor evenimente izolate.
9. Utilizarea rezultatelor pentru orientarea strategiilor de protecție integrată a culturilor și reducerea tratamentelor inutile.

Mesaj-cheie pentru bune practici

Prezența mai multor reziduuri într-un aliment trebuie evaluată ca profil de contaminare, nu ca o simplă listă de pesticide. Numărul de reziduuri este important, dar contribuția individuală a fiecărei substanțe și vulnerabilitatea consumatorului determină în mare măsură expunerea cumulativă.

4.9.9. Conexiunea cu agricultura rezilientă

Din perspectiva agriculturii reziliente, problema multireziduală trebuie abordată în amonte, prin reducerea necesității utilizării repetate și nejustificate a pesticidelor.

Un sistem agricol rezilient nu urmărește numai obținerea unei recolte fără dăunători, ci și: monitorizarea dăunătorului → intervenție țintită → utilizarea rațională a pesticidului → respectarea intervalului pre-recoltare → monitorizarea reziduurilor → evaluarea expunerii → feedback către practicile agricole (Popescu et al., 2025).

Astfel, datele de monitorizare a alimentelor pot deveni un instrument de îmbunătățire a tehnologiei agricole, nu doar un instrument de control la finalul lanțului.

4.10. De la concentrația contaminantului la expunerea consumatorului

Determinarea concentrației unui contaminant în sol sau în produsul agricol reprezintă doar primul nivel al evaluării riscului. Pentru siguranța alimentelor este necesară o etapă suplimentară: estimarea cantității de contaminant la care este expus efectiv consumatorul. Această diferențiere este fundamentală deoarece riscul alimentar depinde simultan de: concentrația contaminantului în aliment; cantitatea de aliment consumată; frecvența consumului; masa corporală a consumatorului; durata expunerii; biodisponibilitatea contaminantului; categoria de populație evaluată.

Prin urmare: **Concentrația contaminantului este o proprietate a alimentului; expunerea este o proprietate a interacțiunii dintre aliment și consumator!**

4.10.1. Lanțul concentrație-expunere-risc

Relația poate fi reprezentată simplificat astfel (Figura 10):



Figura 10. Schema conceptuală pentru trecerea de la concentrația contaminantului din aliment la evaluarea expunerii consumatorului.

Figura evidențiază succesiunea logică prin care o concentrație determinată analitic într-un produs alimentar este transformată într-o estimare a expunerii consumatorului și, ulterior, într-o evaluare a riscului. Concentrația contaminantului reprezintă punctul de plecare, însă aceasta nu poate fi interpretată independent de

cantitatea de aliment consumată. Prin corelarea concentrației cu rata de consum se estimează cantitatea zilnică ingerată, iar raportarea acesteia la masa corporală permite caracterizarea expunerii individuale.

Nivelul expunerii trebuie interpretat în funcție de scenariul de consum și de categoria de populație evaluată. Pentru aceeași concentrație a unui contaminant în aliment, expunerea estimată poate diferi între copii și adulți ca urmare a diferențelor de masă corporală și de consum alimentar. În cazul evaluărilor pe termen lung, durata și frecvența expunerii reprezintă, de asemenea, elemente importante pentru caracterizarea expunerii.

În etapa următoare, doza estimată este comparată cu valorile toxicologice de referință corespunzătoare contaminantului și tipului de efect evaluat, cum sunt doza zilnică acceptabilă (ADI), doza zilnică tolerabilă (TDI) sau alte valori de referință relevante. Pentru pesticide, raportarea expunerii la ADI permite calcularea indicelui de pericol individual (HQ), iar în cazul unei expuneri la mai multe substanțe, contribuțiile individuale pot fi integrate într-un indice de pericol cumulativ (HI), atunci când gruparea substanțelor este justificată toxicologic (EFSA, 2022).

Prin urmare, concentrația contaminantului în aliment constituie doar primul nivel al evaluării. Caracterizarea riscului necesită integrarea concentrației, consumului alimentar, masei corporale, duratei expunerii și valorilor toxicologice de referință. Această abordare permite trecerea de la simpla raportare a unui rezultat analitic la o evaluare orientată către expunerea reală sau estimată a consumatorului și către fundamentarea măsurilor de management al riscului.

4.10.2. Rolul masei corporale și al categoriei de consumator

Masa corporală reprezintă un parametru important deoarece expunerea exprimată raportat la kilogram corp poate fi diferită pentru persoane care consumă aceeași cantitate de contaminant, dar au mase corporale diferite. Această diferență este relevantă în special pentru evaluarea separată a adulților și copiilor. Într-un scenariu în care cantitatea de contaminant ingerată este aceeași, expunerea raportată la masa corporală va fi mai mare pentru persoana cu masa corporală mai mică. În plus, diferențele dintre copii și adulți nu se limitează la masa corporală. Tipul și cantitatea

alimentelor consumate, frecvența consumului și structura dietei pot modifica semnificativ scenariul de expunere (EFSA, 2022).

În cadrul studiului analizat în proiect, aceste diferențe au fost suficient de importante pentru ca patru probe să depășească valoarea de screening $HI = 1$ în scenariul pentru copii, în timp ce pentru adulți nu au fost observate astfel de depășiri. Acest rezultat trebuie interpretat ca semnal pentru evaluare suplimentară în scenariul respectiv, și nu ca dovadă automată a unui efect toxic asupra copiilor.

4.10.3. Interpretarea HQ și HI

Indicatorii indice de pericol individual (HQ) și indice de pericol cumulativ (HI), definiți în secțiunea 4.9, permit raportarea expunerii estimate la valorile toxicologice de referință. În interpretarea simplificată, valorile subunitare indică o expunere estimată sub valoarea toxicologică de referință utilizată în scenariul respectiv, în timp ce valorile care ating sau depășesc unitatea justifică o evaluare suplimentară. Aceste valori nu trebuie însă interpretate ca praguri universale de efect toxic și nici ca probabilități directe de apariție a unui efect asupra sănătății (EFSA, 2020, EFSA, 2022).

În cazul expunerii la mai multe pesticide, HI poate fi utilizat pentru caracterizarea expunerii cumulative numai în condițiile unei ipoteze toxicologice adecvate. Nu este justificată agregarea automată a tuturor pesticidelor detectate într-o probă doar pentru că acestea sunt prezente simultan.

4.10.4. Complexitatea profilului de reziduuri și expunerea cumulativă

Prezența mai multor reziduuri într-o probă nu trebuie interpretată exclusiv prin numărul acestora. Pentru caracterizarea expunerii cumulative sunt relevante: concentrația fiecărui reziduu; contribuția fiecărei substanțe la expunerea totală; proprietățile toxicologice ale substanțelor; existența unor efecte comune sau a unei baze toxicologice pentru evaluarea cumulativă; categoria de populație analizată; scenariul de consum utilizat (ADER 6.3.7, 2026).

Rezultatele proiectului ADER 6.3.7 indică o asociere între creșterea complexității profilului de reziduuri și creșterea valorilor HI în scenariul analizat pentru copii, însă relația nu este strict determinată de numărul de pesticide. Unele probe cu același

număr de reziduuri pot avea valori diferite ale HI deoarece contribuția individuală a compușilor diferă.

4.10.5. De ce copiii necesită o evaluare distinctă?

Copiii reprezintă o categorie pentru care scenariile de expunere trebuie analizate separat, deoarece raportarea dozei la masa corporală poate conduce la valori mai mari ale expunerii, iar structura consumului alimentar diferă de cea a adulților (ADER 6.3.7, 2026).

În consecință, un program de monitorizare construit exclusiv pe baza unui „consumator mediu” poate să nu surprindă toate scenariile relevante. Pentru produsele consumate frecvent de copii sau în cantități importante raportat la masa corporală, este justificată utilizarea unor scenarii specifice de expunere.

Rezultatul obținut în cadrul proiectului - identificarea unor probe pentru care HI a depășit 1 în scenariul pediatric, fără depășiri corespunzătoare în scenariul adult - demonstrează utilitatea acestei diferențieri (ADER 6.3.7, 2026). Acest rezultat trebuie interpretat în limitele ipotezelor de consum și ale valorilor toxicologice utilizate.

4.10.6. Incertitudinea și variabilitatea evaluării expunerii

Estimarea expunerii nu reprezintă o valoare absolută, ci rezultatul unui model construit pe baza unor date și ipoteze. Principalele surse de variabilitate și incertitudine includ: variația concentrațiilor contaminanților între probe; variabilitatea consumului alimentar; masa corporală; frecvența consumului; originea și sezonul produsului; reprezentativitatea probelor; performanța metodei analitice; limitele de detecție și cuantificare; valorile toxicologice de referință; ipotezele utilizate pentru scenariul de expunere (EFSA, 2022, ADER 6.3.7, 2026).

Din acest motiv, o valoare precum $HI = 0,8$ trebuie interpretată ca rezultat al unui anumit scenariu de expunere și nu ca o valoare universală și invariabilă (ADER 6.3.7, 2026).

Pentru evaluări avansate, variabilitatea și incertitudinea pot fi caracterizate prin abordări probabilistice, inclusiv simulări Monte Carlo și distribuții de probabilitate pentru concentrații, consum alimentar și masa corporală. Aceste abordări permit o reprezentare mai realistă a variabilității expunerii în populație.

4.10.7. De la evaluarea punctuală la monitorizarea bazată pe risc

Integrarea rezultatelor analitice cu informațiile privind consumul, vulnerabilitatea și profilul de contaminare permite trecerea de la o monitorizare pur descriptivă la o monitorizare bazată pe risc (EFSA, 2020). În acest context, prioritizarea poate ține cont de: produsele cu profil multirezidual; produsele consumate frecvent; produsele importante în alimentația copiilor; regiuni sau surse asociate repetat cu concentrații ridicate; substanțele cu contribuție importantă la expunerea cumulativă; combinațiile de contaminanți care necesită o evaluare toxicologică suplimentară; apariția repetată a unor profile de contaminare în timp (EFSA, 2020; ADER 6.3.7, 2026).

4.10.8. Incertitudinea evaluării expunerii

Orice estimare a expunerii conține incertitudini. Principalele surse sunt: variabilitatea concentrației contaminantului; variabilitatea consumului alimentar; diferențele de masă corporală; frecvența consumului; originea produsului; sezonul; metodele analitice; limitele de detecție și cuantificare; presupunerile privind biodisponibilitatea; ipotezele toxicologice; reprezentativitatea probelor (EFSA, 2020). Din acest motiv, un rezultat numeric de tip $HI = 0,8$ nu trebuie prezentat ca o valoare absolută și invariabilă. În evaluările avansate, incertitudinea poate fi caracterizată prin analize probabilistice, simulări Monte Carlo și distribuții de probabilitate pentru consum, concentrație și masa corporală. Se recomandă, de asemenea, utilizarea unor seturi de date mai mari și a evaluărilor probabilistice pentru o caracterizare mai robustă a variabilității și incertitudinii (ADER 6.3.7, 2026).

4.10.9. De la evaluarea punctuală la monitorizarea bazată pe risc

Evaluarea riscului nu trebuie privită ca o etapă izolată, ci ca un instrument pentru orientarea monitorizării și a măsurilor de management. Integrarea informațiilor privind contaminarea, caracteristicile produsului, consumul alimentar și vulnerabilitatea populației permite trecerea de la o monitorizare uniformă la una bazată pe risc.

În această abordare, rezultatele obținute în sol și plantă sunt utilizate pentru identificarea situațiilor care necesită investigații suplimentare, iar rezultatul analizei produsului alimentar reprezintă punctul de legătură cu evaluarea expunerii consumatorului.

Prioritizarea monitorizării poate avea în vedere: produse cu profil multirezidual; produse consumate frecvent; produse relevante pentru grupele vulnerabile; regiuni sau surse pentru care au fost observate rezultate repetat ridicate; contaminanți cu contribuție importantă la expunere; combinații de contaminanți pentru care există o bază toxicologică pentru evaluarea cumulativă; situații în care rezultatele de screening indică necesitatea unei evaluări aprofundate.

În cazul pesticidelor, evaluarea cumulativă trebuie realizată numai atunci când există o fundamentare toxicologică adecvată pentru gruparea substanțelor. EFSA utilizează în acest scop conceptul de Cumulative Assessment Groups (CAGs), bazat pe efecte toxicologice comune, și subliniază că evaluarea cumulativă nu este echivalentă cu simpla însumare a tuturor pesticidelor detectate (EFSA, 2020).

Prin urmare, monitorizarea bazată pe risc trebuie să urmărească nu numai ce contaminant este prezent, ci și unde apare, la ce concentrație, cât de biodisponibil este, cât ajunge în partea comestibilă și ce expunere poate genera.

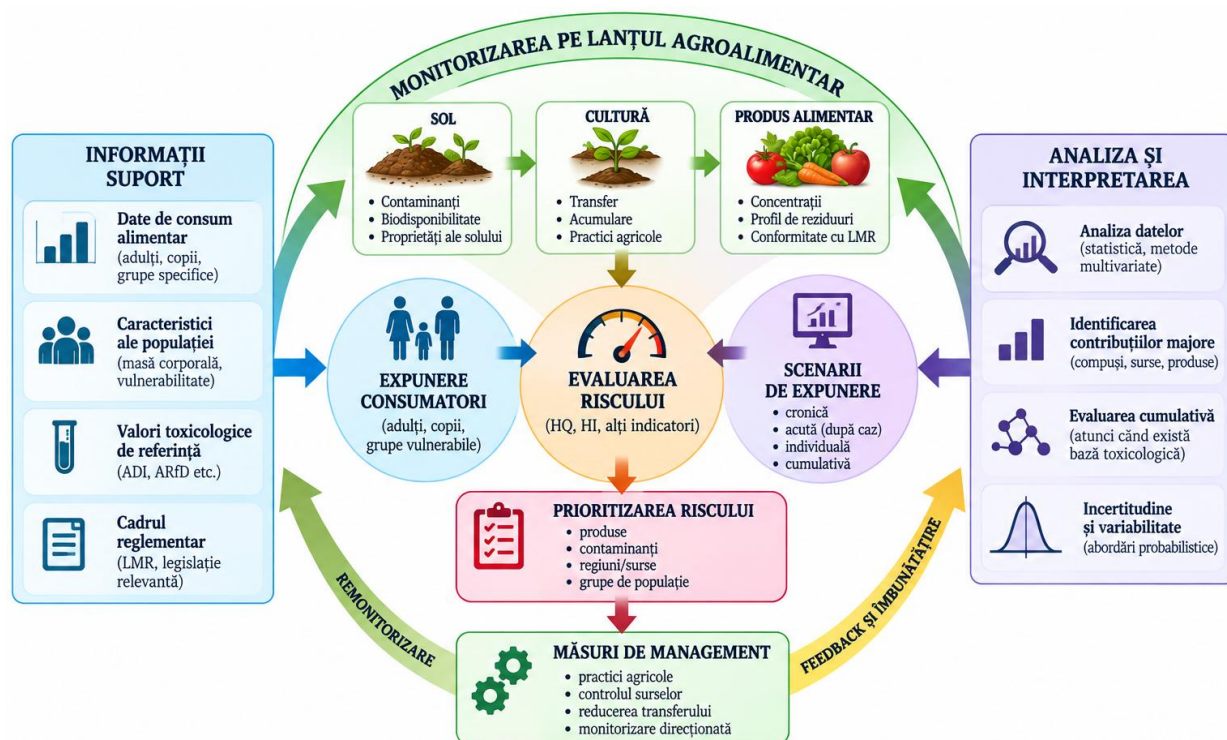


Figura 9. Integrarea monitorizării contaminanților și a evaluării expunerii într-un sistem de management al riscului

4.10.10. Recomandări de bune practici

Pentru o evaluare realistă a siguranței alimentelor, rezultatele analitice trebuie interpretate în contextul produsului consumat și al populației expuse. În acest scop se recomandă:

1. *Determinarea concentrației contaminantului în partea efectiv consumată, nu numai în organele vegetale utilizate pentru caracterizarea transferului.*
2. *Corelarea concentrației cu datele de consum, deoarece aceeași concentrație poate conduce la expuneri diferite în funcție de cantitatea consumată.*
3. *Utilizarea masei corporale corespunzătoare populației evaluate, cu separarea scenariilor pentru adulți și copii atunci când diferențele sunt relevante.*
4. *Utilizarea valorii toxicologice de referință corespunzătoare contaminantului și tipului de expunere. Pentru pesticide, evaluarea cronică utilizează în principal ADI, iar evaluarea acută poate utiliza ARfD; aceste valori nu trebuie interschimbate. JMPR integrează în evaluările sale toxicologia, comportamentul reziduurilor și estimarea expunerii dietare cronice și acute. World Health Organization*
5. *Evaluarea multireziduală a probelor, atunci când există mai multe reziduuri detectate.*
6. *Identificarea compușilor care contribuie semnificativ la expunere, fără a utiliza exclusiv numărul de reziduuri ca indicator al riscului.*
7. *Separarea conformității regulamentare de evaluarea riscului pentru sănătate. Conformitatea cu o LMR reprezintă o cerință de reglementare, în timp ce evaluarea expunerii urmărește caracterizarea potențialului de risc pentru populația analizată.*
8. *Menționarea explicită a ipotezelor și incertitudinilor, inclusiv cele asociate concentrațiilor măsurate, consumului, masei corporale, reprezentativității probelor și valorilor toxicologice de referință.*
9. *Utilizarea abordărilor probabilistice, atunci când volumul și calitatea datelor permit caracterizarea variabilității și incertitudinii.*
10. *Utilizarea rezultatelor evaluării expunerii pentru orientarea măsurilor preventive, astfel încât monitorizarea să genereze un feedback către practicile agricole.*

Mesaj-cheie pentru bune practici

Concentrația unui contaminant în aliment reprezintă punctul de plecare al evaluării, nu o măsură directă a riscului. Interpretarea trebuie să integreze concentrația, consumul, masa corporală, tipul și durata expunerii, toxicologia contaminantului și, atunci când este justificat, expunerea cumulativă.

4.11. Puncte de control pe lanțul sol-plantă-produs

Evaluarea transferului contaminanților pe lanțul sol-plantă-produs permite identificarea etapelor în care contaminarea poate fi prevenită, limitată sau verificată. Spre deosebire de subcapitolul 4.10, care tratează transformarea rezultatelor analitice în estimări de expunere, prezentul subcapitol este orientat către managementul practic al contaminării. În cadrul ghidului, un punct de control reprezintă o etapă a lanțului agroalimentar în care prezența unui contaminant, mobilitatea sau biodisponibilitatea acestuia ori transferul către compartimentul următor poate fi monitorizat și, atunci când este posibil, influențat printr-o măsură de management.

Conceptul trebuie diferențiat de „punctul critic de control” utilizat în sens strict în sistemele HACCP. În lanțul sol-plantă-produs, perspectiva este extinsă către producția primară și etapele din amonte, înainte ca produsul să intre în circuitul alimentar.

Literatura recentă susține o abordare integrată a solurilor agricole contaminate, în care managementul trebuie să țină cont simultan de contaminant, proprietățile solului, cultură și siguranța produsului. Pentru contaminarea cu metale și metaloizi, abordările moderne combină controlul biodisponibilității, selecția culturilor și strategii de remediere sau bioremediere, mai degrabă decât să se bazeze pe o singură intervenție. (Mai et al., 2025; Naidu et al., 2025).

Lanțul de control poate fi reprezentat astfel: *SURSA → SOL → APĂ ȘI INPUTURI → RIZOSFERĂ → PLANTĂ → ORGAN COMESTIBIL → RECOLTARE → DEPOZITARE → PROCESARE → PRODUS ALIMENTAR → CONSUMATOR.*

Principiul de bază este: *Cu cât o sursă de contaminare sau o cale de transfer este identificată mai devreme, cu atât sunt disponibile mai multe opțiuni de prevenire sau limitare a contaminării produsului.*

4.11.1. Controlul surselor de contaminare

Primul nivel de control îl reprezintă identificarea sursei și, atunci când este posibil, reducerea sau eliminarea aportului de contaminanți. Sursele pot fi naturale sau antropice și pot include: istoricul industrial sau agricol al terenului; activități miniere și metalurgice; depuneri atmosferice; trafic; fertilizanți și amendamente; composturi și digestate; nămoluri și alte materiale reciclate; apă de irigare; produse de protecție a plantelor; deșeuri și materiale secundare insuficient caracterizate.

În contextul economiei circulare, această etapă devine deosebit de importantă. Utilizarea apei recuperate, a composturilor, digestatelor, biosolizilor sau altor materiale reciclate poate aduce beneficii agronomice, dar poate reprezenta și o cale de introducere a unor contaminanți în agroecosistem.

Pentru contaminanții emergenți, sursele pot include produse farmaceutice, microplastice și substanțe per- și polifluoroalchilate (PFAS), iar literatura recentă evidențiază încă lacune privind comportamentul lor în sol și transferul către culturi. (Carter et al., 2026).

Prin urmare, *prevenirea la sursă trebuie să reprezinte prima opțiune de management, înaintea intervențiilor asupra solului sau produsului.*

4.11.2. Caracterizarea terenului și a solului

Solul constituie un punct de control major deoarece proprietățile sale influențează mobilitatea, speciația și biodisponibilitatea contaminanților. În funcție de contaminant și de obiectivul evaluării, caracterizarea poate include: concentrația totală; pH; materia organică; textura și conținutul de argilă; capacitatea de schimb cationic; oxizii și hidroxizii de Fe și Mn; umiditatea; condițiile redox; fracțiile mobile sau labile; istoricul utilizării terenului. Controlul riscului trebuie să integreze concentrația contaminantului cu comportamentul său în sol și cu probabilitatea de transfer către cultură. Reglarea unor proprietăți ale solului, inclusiv a pH-ului, poate modifica biodisponibilitatea anumitor metale, iar eficiența intervenției este dependentă de caracteristicile contaminantului și ale solului (Mai et al., 2025).

Concentrația totală este, prin urmare, esențială pentru caracterizare și screening, dar nu este întotdeauna suficientă pentru predicția transferului către plantă.

4.11.3. Biodisponibilitatea - un punct de control esențial

În anumite situații, evaluarea fracției mobile sau biodisponibile poate furniza informații suplimentare față de concentrația totală. Atunci când este justificat, pot fi utilizate: extracții chimice selective; determinarea fracțiilor labile; gradienti difuzivi în pelicule subțiri (Diffusive Gradients in Thin Films - DGT); analize de speciație; modele de predicție a transferului.

DGT este deosebit de relevant pentru evaluarea unor elemente potențial toxice în solurile agricole, deoarece permite caracterizarea fracțiilor labile și poate furniza informații corelate cu disponibilitatea elementelor pentru culturi. O analiză recentă arată că DGT a prezentat, în numeroase studii, o capacitate bună de predicție a transferului unor elemente către plante în comparație cu determinarea exclusivă a concentrației totale. (Senila & Kovacs, 2024).

Prin urmare, *în situațiile în care concentrația totală nu explică suficient transferul, biodisponibilitatea trebuie introdusă ca nivel suplimentar de caracterizare.*

4.11.4. Apa de irigare - punct de control transversal

Apa de irigare poate reprezenta simultan: *aport extern de contaminanți → modificarea umidității solului → modificarea mobilității → influențarea rizosferei → absorbție radiculară → transfer către produs*. În funcție de originea și istoricul sursei, monitorizarea poate include: elemente potențial toxice; pesticide; contaminanți organici persistenti; produse farmaceutice; indicatori de salinitate; alți contaminanți relevanți.

Importanța acestui punct de control crește în sistemele care utilizează resurse de apă recuperată sau alte surse cu potențial de contaminare.

4.11.5. Controlul fertilizanților, amendamentelor și materialelor organice

Amendamentele și materialele organice pot îmbunătăți proprietățile fizice și chimice ale solului, dar efectul lor asupra contaminanților trebuie evaluat specific. Înainte de utilizare se recomandă, după caz: identificarea originii materialului; caracterizarea compoziției; verificarea contaminanților relevanți; stabilirea dozei de aplicare; evaluarea aportului cumulativ în cazul aplicărilor repetate.

În cazul amelioratorilor proveniți din reziduuri agroalimentare, efectele asupra sănătății solului depind de caracteristicile materialului, proprietățile solului și condițiile de aplicare.

Prin urmare, *originea circulară a unui material nu constituie, în sine, o garanție privind absența contaminanților.*

4.11.6. Rizosfera - interfața critică sol-plantă

Rizosfera reprezintă zona în care procesele fiziologice ale plantei interacționează cu proprietățile fizico-chimice și biologice ale solului. Activitatea rădăcinilor și a microorganismelor poate modifica local: pH-ul; speciația; complexarea; solubilitatea; mobilitatea; biodisponibilitatea contaminanților. Aceste procese contribuie la diferențele dintre solul din rizosferă și solul în vrac și trebuie luate în considerare atunci când se interpretează transferul sol-plantă. În plus, mecanismele de absorbție și transport diferă între elemente și specii vegetale. Sistemele de transport implicate în absorbție, translocare și distribuție sunt specifice elementului și plantei (S. Huang et al., 2024). Pentru contaminanții emergenți, variabilitatea proprietăților chimice și a răspunsului plantelor face dificilă definirea unor reguli universale de transfer (Carter et al., 2026).

4.11.7. Alegerea culturii și a cultivarului

Specia și genotipul pot influența semnificativ absorbția, translocarea și distribuția contaminanților. În condiții în care contaminarea solului este moderată și cultivarea rămâne posibilă, managementul poate include: alegerea unor culturi cu transfer mai redus către organul comestibil; utilizarea unor cultivari cu comportament documentat; evitarea culturilor care acumulează preferențial contaminantul în partea consumată; utilizarea unor sisteme de cultură care reduc contactul produsului cu solul. Totuși, alegerea culturii nu trebuie tratată ca o regulă universală. S. Huang et al. (2024) arată că sistemele de transport și distribuție a metalelor diferă în funcție de element și specie vegetală, iar aceste diferențe pot influența acumularea în organele comestibile. Strategiile de selecție a culturilor pot face parte din managementul integrat al solurilor contaminate, dar trebuie corelate cu nivelul și natura contaminării (Naidu et al., 2025).

4.11.8. Monitorizarea plantei și a organului comestibil

Monitorizarea plantei permite verificarea efectivă a rezultatului transferului sol-plantă. Este importantă diferențierea între: rădăcină; tulpină; frunză; fruct; bulb; tubercul; sămânță; alte organe; organul efectiv consumat. Pentru evaluarea siguranței alimentelor, concentrația din partea comestibilă prezintă relevanță directă deoarece reprezintă compartimentul care contribuie efectiv la expunerea alimentară. Distribuția contaminanților între organele plantelor este dependentă de natura contaminantului și de specie. Metalele pot prezenta acumulare predominantă în rădăcini sau frunze, dar pot ajunge și în fructe și semințe, iar pesticidele și alți contaminanți pot prezenta distribuții diferite în funcție de proprietățile lor chimice (Guerrieri et al., 2024).

4.11.9. Recoltarea și manipularea produsului

După recoltare trebuie diferențiată contaminarea internă, rezultată din absorbția și translocarea contaminantului, de contaminarea externă, rezultată din contactul sau depunerea contaminantului pe suprafața produsului. Sursele de contaminare externă pot include: solul; echipamentele agricole; recipientele; suprafețele de lucru; apa de spălare; manipularea; transportul. Această diferențiere este importantă deoarece măsurile de control sunt diferite: contaminarea internă este legată în principal de procesele de absorbție și translocare, în timp ce contaminarea externă poate fi influențată prin igienă, manipulare și controlul contactului cu sursele contaminante.

4.11.10. Depozitarea și procesarea - bariere suplimentare, nu substitut pentru prevenție

Operațiile post-recoltare pot modifica concentrația și distribuția contaminanților. În funcție de natura contaminantului și de proces pot apărea: degradare; transfer în faza apoasă; îndepărtare prin decojire; redistribuire între fracții; concentrare prin deshidratare; formarea unor produși de transformare. Prin urmare, efectul procesării trebuie determinat pentru fiecare contaminant și proces, fără a presupune că orice operație tehnologică reduce automat expunerea. Pentru pesticide, evaluarea riscului trebuie să țină cont de comportamentul reziduurilor și de transformările care pot apărea între recoltare și consum. Evaluările JMPR includ explicit

informații privind comportamentul reziduurilor, studiile de procesare și estimarea expunerii dietare (FAO & WHO, 2026).

Procesarea poate constitui o barieră suplimentară, dar nu trebuie considerată substitut pentru prevenirea contaminării la sursă și pentru aplicarea corectă a practicilor agricole.

4.11.11. Controlul reziduurilor de pesticide

În cazul pesticidelor, controlul trebuie să acopere întregul traseu de la alegerea produsului fitosanitar până la produsul recoltat. Principalele măsuri sunt: utilizarea produsului autorizat pentru cultura și utilizarea respectivă; respectarea dozei; respectarea numărului maxim de aplicări; respectarea intervalului pre-recoltare; evitarea aplicărilor inutile; monitorizarea presiunii reale a bolilor și dăunătorilor; păstrarea evidenței tratamentelor; utilizarea monitorizării multireziduale atunci când profilul de risc o justifică; analiza produsului recoltat; evaluarea expunerii atunci când profilul de contaminare justifică acest lucru. Evaluările internaționale ale reziduurilor integrează în prezent toxicologia, comportamentul reziduurilor, limitele maxime de reziduuri și expunerea dietară cronică și acută (FAO & WHO, 2026).

4.11.12. Contaminarea multireziduală - de la conformitate la evaluarea cumulativă

Prezența mai multor pesticide într-o probă trebuie interpretată dincolo de simpla numărare a reziduurilor. Pentru o probă multireziduală sunt relevante: identitatea substanțelor; concentrația fiecăreia; contribuția la expunere; proprietățile toxicologice; existența unor efecte comune; grupa de evaluare cumulativă relevantă, atunci când aceasta este definită. Prin urmare: *Numărul de reziduuri reprezintă un indicator al complexității profilului de contaminare, dar nu este, în sine, o măsură suficientă a riscului.* La nivel european, EFSA utilizează Cumulative Assessment Groups (CAGs) pentru substanțe care pot fi evaluate împreună pe baza unor efecte toxicologice comune. Evaluarea cumulativă urmărește astfel să caracterizeze expunerea la combinații relevante de pesticide și nu presupune automat însumarea tuturor substanțelor detectate într-o probă (EFSA, 2022). Această distincție este importantă și pentru interpretarea rezultatelor proiectului: existența unui profil multirezidual trebuie

să determine caracterizarea profilului, iar evaluarea cumulativă trebuie aplicată atunci când există o justificare toxicologică și metodologică.

4.11.13. Produsul finit - punctul de verificare a eficienței sistemului

Produsul finit reprezintă punctul în care poate fi verificat rezultatul integrat al etapelor anterioare. Programul de monitorizare poate include, în funcție de profilul de risc: elemente potențial toxice; pesticide; produși de transformare relevanți; contaminanți organici persistenți; contaminanți emergenți; alți indicatori relevanți pentru produs. Pentru contaminanții emergenți, prezența analitică nu trebuie echivalată automat cu existența unui risc alimentar demonstrat. Pentru multe clase de contaminanți există încă incertitudini privind relația dintre sursă, concentrația din sol, transferul către plantă, acumularea în organul comestibil și relevanța expunerii umane (Carter et al., 2026). Rezultatul analitic trebuie interpretat în raport cu calitatea datelor, relevanța expunerii și nivelul de certitudine al dovezilor.

4.11.14. Punctele de control integrate

Tabelul 9 sintetizează principalele puncte de control identificate pe lanțul sol-plantă-produs, de la caracterizarea terenului și controlul surselor de contaminare până la verificarea produsului destinat consumului și, după caz, evaluarea expunerii. Pentru fiecare etapă sunt indicate principalul risc asociat, parametrii sau indicatorii care pot fi utilizați pentru monitorizare și direcția principală de management. Această structurare permite corelarea rezultatelor analitice cu acțiuni concrete de prevenire, limitare sau verificare a transferului contaminanților. În acest mod, monitorizarea nu este considerată o succesiune de determinări independente, ci o componentă a unui sistem integrat de control, în care informația obținută la o etapă poate fundamenta intervențiile la etapele următoare.

Tabelul 9. Puncte de control pe lanțul sol-plantă-produs

Etapa	Principalul risc	Parametri/indicatori	Acțiuni de management
Istoricul terenului	Contaminare preexistentă	Istoric utilizare, surse locale	Evaluare preliminară
Sol	Acumulare și mobilizare	C, pH, MO, CEC, textură	Management adaptat contaminantului
Fracția biodisponibilă	Transfer potențial crescut	Fracții mobile/labile, DGT	Caracterizare suplimentară
Apă de irigare	Aport extern	PTE, pesticide, după caz	Controlul sursei
Inputuri	Introducerea contaminanților	Compoziție, origine	Utilizarea materialelor caracterizate
Rizosferă	Modificarea biodisponibilității	pH, umiditate, redox	Management adaptat solului
Cultură	Absorbție și translocare	TF, BAF/BCF, concentrații tisulare	Alegerea culturii/cultivarului
Organ comestibil	Transfer către aliment	Concentrația în partea consumată	Monitorizare
Recoltare	Contaminare externă	Igiena echipamentelor	Prevenirea contactului cu surse
Depozitare	Redistribuire/concentrare	Temperatură, umiditate, timp	Condiții controlate
Procesare	Reducere/concentrare/transformare	Analize înainte/după procesare	Validarea procesului
Produs finit	Expunere alimentară	Contaminanți/reziduuri	Verificarea conformității
Expunere	Expunere individuală/cumulativă	EDI, HQ, HI, după caz	Evaluare specifică populației

Sursa: Senila și Kovacs (2024).

4.11.15. Prioritizarea punctelor de control

Nu toate punctele de control prezintă aceeași importanță. Prioritizarea trebuie realizată pe baza unei combinații între: hazardul contaminantului; concentrația și distribuția acestuia; mobilitatea și biodisponibilitatea; probabilitatea transferului către plantă; acumularea în organul comestibil; nivelul și frecvența consumului; vulnerabilitatea populației; posibilitatea de intervenție; persistența contaminantului; nivelul de incertitudine al dovezilor. Pentru contaminanții emergenți este necesară o precauție suplimentară, deoarece literatura actuală evidențiază încă lacune privind relația dintre contaminarea solului, transferul către culturi și relevanța pentru siguranța alimentelor (Carter et al., 2026).

În consecință, prioritizarea nu trebuie realizată exclusiv pe baza concentrației măsurate, ci prin combinarea hazardului, expunerii potențiale, transferului și posibilității de intervenție.

4.11.16. De la monitorizare la intervenție

Un sistem eficient de control trebuie să stabilească nu numai ce se măsoară, ci și ce acțiune urmează unui rezultat relevant. Se recomandă următoarea logică: *MONITORIZARE → DETECTARE → CONFIRMARE → IDENTIFICAREA SURSEI → EVALUAREA TRANSFERULUI → EVALUAREA PRODUSULUI → MĂSURĂ CORECTIVĂ → REMONITORIZARE.*

Exemple:

- *dacă solul prezintă concentrații crescute → se evaluează mobilitatea și biodisponibilitatea;*
- *dacă biodisponibilitatea este crescută → se investighează factorii care favorizează mobilizarea;*
- *dacă transferul către plantă este crescut → se reevaluează cultura și practicile de management;*
- *dacă organul comestibil prezintă concentrații relevante → se evaluează produsul și expunerea;*
- *dacă este identificat un profil multirezidual de pesticide → se caracterizează contribuția compușilor relevanți;*
- *dacă problema se repetă → se investighează sursa și se revizuieste tehnologia agricolă.*

4.11.17. Sistemul de feedback - componentă a agriculturii reziliente

Un sistem de monitorizare devine cu adevărat util atunci când rezultatele sale sunt reintegrate în procesul de producție. În agricultura rezilientă, managementul contaminanților poate fi privit ca un proces ciclic (Figura 12):

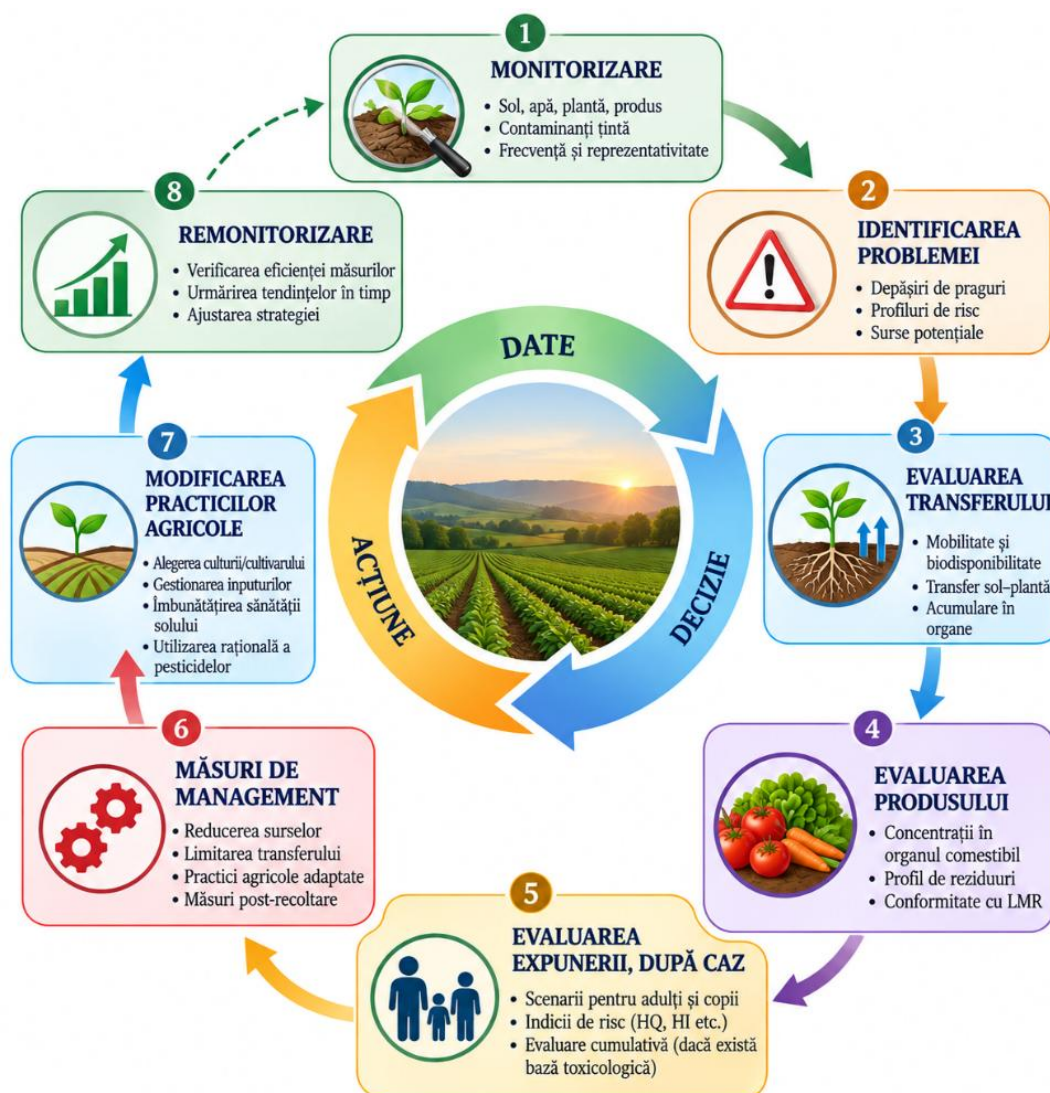


Figura 12. Circuitul de feedback pentru managementul contaminanților în agricultura rezilientă.

O astfel de abordare este compatibilă cu strategiile moderne de management al solurilor agricole contaminate, care combină intervenții asupra solului cu selecția culturilor, bioremedierea și alte soluții integrate (Naidu et al., 2025). Prin urmare, rezultatul unei analize trebuie valorificat nu numai ca informație privind starea actuală, ci și ca feedback pentru îmbunătățirea ciclului agricol următor.

4.11.18. Matrice orientativă de decizie

Rezultatul monitorizării trebuie să reprezinte punctul de plecare pentru o acțiune proporțională cu natura și amploarea problemei identificate. Interpretarea nu trebuie

realizată pe baza unui singur parametru, ci prin corelarea concentrației contaminantului cu biodisponibilitatea, transferul către plantă, acumularea în organul comestibil și, atunci când este relevant, expunerea potențială. Tabelul 10 sintetizează principalele situații care pot fi identificate în cadrul monitorizării și direcția de acțiune corespunzătoare, de la monitorizarea de rutină și investigațiile suplimentare până la reevaluarea practicilor agricole și a surselor de contaminare. Matricea are caracter operațional și orientativ, fiind destinată sprijinirii procesului de decizie; aceasta nu înlocuiește limitele regulamentare, evaluările toxicologice sau deciziile autorităților competente.

Tabelul 10. Relația dintre rezultatul monitorizării și acțiunea recomandată

Situația identificată	Acțiune recomandată
Contaminant absent sau la nivel redus	Monitorizare de rutină
Contaminant prezent, biodisponibilitate redusă	Monitorizare periodică și prevenirea aporturilor suplimentare
Concentrație totală crescută	Evaluarea fracției mobile/biodisponibile
Biodisponibilitate crescută	Identificarea factorilor de mobilizare
Transfer crescut sol-plantă	Reevaluarea culturii și a managementului
Acumulare în organul comestibil	Analiza produsului și evaluarea expunerii
Reziduuri multiple de pesticide	Caracterizarea profilului multirezidual și, dacă este justificat, evaluare cumulativă
Un contaminant dominant în expunere	Prioritizarea măsurilor asupra sursei respective
Rezultat de screening cu expunere potențial relevantă	Evaluare individuală aprofundată
Repetarea contaminării	Revizuirea tehnologiei și a surselor de contaminare

Notă: Matricea are caracter orientativ și nu înlocuiește limitele regulamentare, valorile toxicologice de referință, evaluările de risc sau deciziile autorităților competente

4.11.19. Principii operaționale pentru punctele de control

Din perspectiva utilizatorului final al ghidului, managementul contaminanților poate fi sintetizat în zece principii:

- 1. Cunoaște terenul înainte de cultivare.**
- 2. Identifică și controlează sursa contaminării.**
- 3. Nu interpreta concentrația totală fără contextul biodisponibilității.**
- 4. Controlează calitatea apei de irigare și a inputurilor.**
- 5. Adaptează cultura și tehnologia la riscul identificat.**
- 6. Monitorizează partea efectiv comestibilă a plantei.**
- 7. Previne contaminarea în timpul recoltării și manipulării.**

8. **Utilizează procesarea ca barieră suplimentară, nu ca substitut pentru prevenție.**
9. **Pentru pesticide, caracterizează profilul multirezidual și evaluează cumulativ expunerea atunci când există o justificare toxicologică și metodologică.**
10. **Transformă rezultatele monitorizării în măsuri de management pentru ciclul agricol următor.**

Mesaj-cheie pentru bune practici

Managementul contaminanților trebuie să înceapă la sursă și să continue prin controlul solului, apei, inputurilor și transferului către plantă, cu verificarea finală a organului comestibil și a produsului alimentar. Monitorizarea devine eficientă atunci când rezultatele analitice sunt transformate în măsuri preventive și într-un mecanism de feedback pentru practicile agricole.

4.12. Recomandări de bune practici pentru controlul transferului contaminanților și obținerea de alimente sigure

Controlul contaminanților pe lanțul sol-plantă-produs trebuie abordat ca un proces integrat de prevenire, monitorizare, evaluare și intervenție. Concentrația unui contaminant în sol nu reprezintă, în sine, o estimare completă a riscului pentru produsul alimentar, deoarece transferul către plantă este controlat de biodisponibilitate, proprietățile solului, specia chimică a contaminantului, caracteristicile fiziologice ale plantei și condițiile de cultivare. Cercetările recente evidențiază, de asemenea, importanța monitorizării concomitente a solului, apei, plantei și produsului alimentar, precum și necesitatea integrării datelor de contaminare cu evaluarea expunerii consumatorului (Carter et al., 2026; Li et al., 2026; Naidu et al., 2025).

Rezultatele obținute în agroecosistemele investigate în cadrul activităților de cercetare ale echipei ICSI-INMA confirmă această abordare. În studiul privind transferul Li și al altor elemente trasoare în legume cultivate în România, concentrațiile din sol și cele din țesuturile vegetale nu au prezentat întotdeauna o relație directă, fiind evidențiată o decuplare specifică elementului între sol și plantă. În același timp, Zn și Cu au prezentat factori de transfer mai mari decât elementele potențial toxice Pb și Cd, iar transferul Li a prezentat o variabilitate spațială importantă (Paun et al., 2025).

În cazul pesticidelor, studiul realizat pe produse horticole comercializate în România a evidențiat necesitatea monitorizării multireziduale: din 620 de probe au fost identificate și cuantificate 74 de substanțe pesticide, iar profilurile de contaminare au variat în funcție de produs și de originea geografică (Popescu et al., 2025).

4.12.1. Prevenirea contaminării trebuie să fie prioritară remedierii

Prima măsură de bună practică este *identificarea și controlul surselor de contaminare înainte de înființarea culturii*. Pentru terenurile destinate producției alimentare trebuie analizate, după caz: istoricul utilizării terenului; activitățile industriale și miniere din proximitate; traficul și depunerile atmosferice; calitatea apei de irigare; utilizarea anterioară a pesticidelor; fertilizanții și amendamentele aplicate; gunoiul de grajd și composturile; nămolurile sau alte materiale provenite din tratarea apelor; contaminarea provenită din culturile anterioare.

Pentru contaminanții metalici, prevenirea este deosebit de importantă deoarece aceștia nu pot fi degradați, iar managementul trebuie să urmărească în principal limitarea mobilității și a transferului către culturile alimentare (Naidu et al., 2025).

În consecință, un teren destinat producției alimentare trebuie considerat o verigă de control al siguranței alimentelor, nu doar un suport pentru cultură.

4.12.2. Caracterizarea solului trebuie să depășească determinarea concentrației totale

Determinarea concentrației totale a unui contaminant constituie un prim indicator, dar nu este suficientă pentru predicția transferului către plantă. Caracterizarea trebuie să includă, în funcție de contaminant și obiectivul studiului: pH; materie organică/carbon organic; capacitate de schimb cationic; textură; umiditate; condiții redox; concentrația totală; fracția mobilă sau biodisponibilă, atunci când există metode adecvate.

4.12.3. Biodisponibilitatea trebuie utilizată ca indicator central al transferului

Pentru evaluarea riscului de contaminare a culturilor, trebuie diferențiată prezența contaminantului în sol de fracția accesibilă sistemului radicular. Biodisponibilitatea este controlată de interacțiunile dintre contaminant și componentele solului, în special: pH; materie organică; minerale și oxizi de Fe/Mn;

capacitate de schimb cationic; specia chimică; activitate microbiologică; umiditate și condiții redox. În studiul realizat în România, Paun et al. (2025) au observat că solurile analizate au fost predominant neutre până la slab acide, iar condițiile de sol au influențat semnificativ mobilitatea și absorbția elementelor.

Bună practică: atunci când concentrația totală indică o posibilă problemă, decizia de management trebuie fundamentată pe evaluarea mobilității/biodisponibilității și pe determinarea concentrației în organul comestibil.

4.12.4. Managementul proprietăților solului trebuie adaptat contaminantului

Modificarea proprietăților solului poate reduce biodisponibilitatea anumitor contaminanți, dar intervenția trebuie adaptată contaminantului și caracteristicilor terenului. Aplicarea amendamentelor nu trebuie considerată automat o metodă de „detoxifiere”. Eficiența trebuie demonstrată prin monitorizarea simultană a: contaminantului în sol; fracției biodisponibile; concentrației în plantă; concentrației în organul comestibil. Această abordare este în concordanță cu literatura recentă privind remedierea solurilor agricole contaminate, care recomandă evaluarea succesului intervențiilor prin prisma siguranței culturilor, nu numai prin reducerea concentrației contaminantului în sol (Naidu et al., 2025).

4.12.5. Apa de irigare trebuie inclusă în programul de control

Apa poate constitui o sursă directă de contaminare și un vector de redistribuire a contaminanților în agroecosistem. Se recomandă: caracterizarea sursei de apă; monitorizarea periodică a parametrilor relevanți; evaluarea apei atunci când sunt utilizate surse alternative sau ape recuperate; corelarea rezultatelor analizelor de apă cu cele ale solului și plantelor; intensificarea monitorizării atunci când apar modificări ale calității apei.

4.12.6. Fertilizânții, amendamentele și materialele organice trebuie controlate

Materialele utilizate pentru fertilizarea și ameliorarea solului pot aduce beneficii agronomice, dar pot reprezenta și surse secundare de contaminare. În funcție de origine și destinație, acestea trebuie evaluate pentru: elemente potențial toxice; reziduuri de pesticide; contaminanți organici persistenți; antibiotice și alte produse farmaceutice, atunci când sursa o justifică; contaminanți emergenți. Carter (2026) subliniază faptul

că apele uzate, biosolidele, gunoiul de grajd și agroplasticele pot reprezenta căi de introducere a contaminanților emergenți în solurile agricole.

Recomandare: originea, compoziția și utilizarea materialelor aplicate pe terenurile destinate producției alimentare trebuie documentate și controlate.

4.12.7. Alegerea culturii trebuie să țină cont de capacitatea de acumulare

Speciile și cultivarurile diferă în ceea ce privește absorbția și translocarea contaminanților. Diferențele sunt asociate cu: arhitectura sistemului radicular; mecanismele de transport membranar; rata transpirației; capacitatea de complexare și sechestrare; metabolismul plantei; durata ciclului de vegetație; distribuția contaminantului între organele plantei. Rezultatele lui Paun et al. (2025) pentru ceapă, usturoi, salată, castravete și dovlecel demonstrează caracterul dependent de element și de cultură al transferului sol-plantă. În aceeași investigație, Zn și Cu au prezentat transferuri mai ridicate, în timp ce Pb și Cd au rămas sub limitele europene pentru probele investigate.

Bună practică: în cazul terenurilor cu contaminare cunoscută, alegerea culturii trebuie să includă și criteriul comportamentului acesteia față de contaminantul respectiv.

4.12.8. Monitorizarea trebuie orientată către partea comestibilă a plantei

Din perspectiva siguranței alimentelor, determinarea contaminantului în organul destinat consumului este mai relevantă decât măsurarea exclusivă în sol sau în biomasa vegetală totală. Programul de monitorizare trebuie să diferențieze, atunci când este relevant: rădăcini; frunze; tulpini; fructe; bulbi; tuberculi; semințe.

Această abordare este justificată de faptul că transferul și translocarea sunt dependente de element, specie și organ vegetal (Paun et al., 2025).

4.12.9. Utilizarea pesticidelor trebuie integrată în managementul riscului

Aplicarea pesticidelor trebuie realizată conform principiilor managementului integrat al dăunătorilor și condițiilor autorizate de utilizare. Pentru reducerea riscului de reziduuri sunt esențiale: utilizarea numai atunci când este necesară; alegerea substanței active adecvate; respectarea dozei; respectarea numărului de aplicări;

respectarea intervalului dintre tratament și recoltare; documentarea tuturor tratamentelor; monitorizarea reziduurilor.

Studiul realizat de Popescu et al. (2025) pe 620 de probe comercializate în România a identificat 74 de pesticide, iar boscalid, azoxistrobin, difenoconazol și acetamiprid s-au numărat printre substanțele frecvent detectate în anumite categorii de produse. Aceste rezultate demonstrează utilitatea programelor de **screening multirezidual**, în locul verificării izolate a unui număr redus de substanțe.

4.12.10. Monitorizarea pesticidelor trebuie să țină cont de multireziduuri

Prezența simultană a mai multor reziduuri trebuie interpretată prin raportare la expunerea cumulativă, nu numai prin numărarea substanțelor detectate. Această recomandare este susținută atât de literatura internațională, cât și de rezultatele obținute în cadrul proiectului. În studiul nostru recent, realizat pe 230 de probe de fructe și legume, au fost investigate 397 de substanțe pesticide, dintre care 31 de substanțe active au fost evidențiate. 59% dintre probe au conținut cel puțin două reziduuri, iar indicele de risc cumulativ a crescut de la aproximativ 0,059 pentru probele cu un singur reziduu la aproximativ 0,412 pentru probele cu cel puțin patru reziduuri (ADER 6.3.7, 2026). Important, rezultatele au arătat că *numărul de reziduuri nu reprezintă singur un predictor suficient al riscului*. Contribuția individuală a substanțelor la expunerea cumulativă a fost diferită, iar difenoconazolul, cyflufenamida, imazalilul, boscalidul și azoxistrobinul s-au numărat printre principalii contributori identificați în analiza multivariată (ADER 6.3.7, 2026). Această concluzie este concordantă cu literatura privind evaluarea cumulativă a reziduurilor de pesticide, care recomandă identificarea substanțelor care contribuie predominant la riscul cumulativ (Yang et al., 2024).

4.12.11. Monitorizarea trebuie să fie bazată pe risc

Un sistem eficient de monitorizare trebuie să integreze trei niveluri:

Nivelul 1 - Screening: Identificarea rapidă a terenurilor, culturilor sau loturilor cu potențial risc.

Nivelul 2 - Confirmare analitică: Determinarea cantitativă a contaminanților prin metode validate.

Nivelul 3 - Evaluarea riscului: Integrarea concentrației cu: biodisponibilitatea; transferul sol-plantă; organul comestibil; consumul alimentar; caracteristicile consumatorului; toxicitatea contaminantului; expunerea cumulativă.

Această abordare este susținută de cercetările recente privind monitorizarea integrată a contaminanților în sistemele agricole (Li et al., 2026; Carter et al., 2026).

4.12.12. Rezultatele analitice trebuie transformate în decizii de management

Monitorizarea este utilă numai dacă rezultatul analitic poate conduce la o decizie. Se recomandă următorul flux: *DETECTARE → CONFIRMARE → IDENTIFICAREA SURSEI → EVALUAREA TRANSFERULUI → EVALUAREA EXPUNERII → INTERVENȚIE → VERIFICAREA EFICIENȚEI.*

În funcție de rezultat, intervenția poate consta în: eliminarea sau reducerea sursei; modificarea practicilor de fertilizare; schimbarea sursei de apă; modificarea proprietăților solului; schimbarea culturii; modificarea strategiei fitosanitare; separarea loturilor; intensificarea monitorizării; remedierea terenului. Pentru contaminarea cu metal(loid)e, Naidu et al. (2025) subliniază necesitatea unor strategii integrate care să includă managementul solului, selecția culturii, bioremedierea și, atunci când este justificat, intervenții bazate pe microbiom sau tehnologii avansate.

4.12.13. Recoltarea, depozitarea și procesarea fac parte din controlul siguranței alimentelor

Controlul contaminării nu se încheie în momentul recoltării. Trebuie prevenite: contaminarea încrucișată; contactul produsului cu suprafețe contaminate; amestecarea loturilor cu istorice diferite; condițiile necorespunzătoare de depozitare; manipularea neigienică; transferul reziduurilor între loturi. De asemenea, procesarea trebuie inclusă în evaluarea finală. Studiul nostru de sinteză privind strategiile de diminuare a reziduurilor a arătat că spălarea și înmuierea convențională determină, în general, reduceri limitate, în timp ce unele tehnologii de procesare sau tratamente emergente pot avea o eficiență mai mare (Popescu et al., 2024).

4.12.14. Trasabilitatea trebuie integrată în sistemul de monitorizare

Pentru fiecare lot destinat consumului ar trebui să poată fi urmărite, în măsura aplicabilă: *teren → cultură → cultivar → fertilizare/amendare → irigare →*

tratamente fitosanitare → recoltare → depozitare → procesare → produs finit.

Trasabilitatea permite corelarea unui rezultat analitic cu condițiile care l-au generat și facilitează identificarea sursei în cazul unei neconformități. În cazul monitorizării științifice, această abordare permite construirea unor baze de date capabile să coreleze caracteristicile solului și practicile agricole cu transferul contaminanților în produs.

4.12.15. Monitorizarea trebuie să fie adaptivă

Frecvența și amploarea monitorizării trebuie ajustate în funcție de istoricul și rezultatele anterioare. O intensitate mai mare a monitorizării este justificată pentru: terenuri cu istoric de contaminare; zone aflate în proximitatea unor surse industriale; culturi cu capacitate ridicată de acumulare; utilizarea unor surse de apă cu risc; aplicarea repetată a unor pesticide; rezultate apropiate de valorile-limită; detectarea multireziduurilor; modificări importante ale condițiilor de cultivare. Astfel, sistemul de control trebuie să funcționeze ca un ciclu: **MONITORIZARE → EVALUARE → INTERVENȚIE → VERIFICARE → RECONFIGURAREA MONITORIZĂRII.**

4.12.16. Matrice operațională de bune practici

Etapă	Riscul principal	Bună practică	Indicator de verificare
Selectarea terenului	contaminare preexistentă	evaluarea istoricului și analiza solului	caracterizarea solului
Caracterizarea solului	biodisponibilitate ridicată	determinarea parametrilor fizico-chimici	pH, materie organică, fracție mobilă
Fertilizare	introducerea contaminanților	utilizarea materialelor caracterizate	buletin/certificat de analiză
Irigare	contaminare secundară	controlul calității apei	analiză apă
Alegerea culturii	bioacumulare	selecția culturii/cultivarului	TF, concentrație în organul comestibil
Protecția plantelor	reziduuri	IPM și respectarea utilizării autorizate	registruul tratamentelor
Recoltare	contaminare încrucișată	separarea și identificarea loturilor	trasabilitate
Depozitare	redistribuire/degradare	controlul condițiilor	temperatură/umiditate
Procesare	modificarea reziduurilor	validarea procesului	analiză înainte/după
Produs finit	expunerea consumatorului	control analitic	concentrație/MRL
Multireziduuri	risc cumulativ	evaluarea expunerii cumulative	HI/HQ/EDI
Sol contaminat	transfer persistent	management/remediere	sol + plantă + produs

4.12.17. Cele 10 reguli esențiale ale ghidului

Pentru utilizarea practică a ghidului de către producători, laboratoare și operatorii din lanțul agroalimentar, recomandările pot fi sintetizate astfel:

- 1. Cunoaște terenul înainte de cultivare.***
- 2. Nu interpreta concentrația totală fără a considera biodisponibilitatea.***
- 3. Verifică apa de irigare și toate sursele externe de contaminare.***
- 4. Utilizează numai fertilizanți, amendamente și materiale organice adecvate și caracterizate.***
- 5. Alege cultura și, atunci când este posibil, cultivarurile ținând cont de capacitatea lor de acumulare.***
- 6. Utilizează pesticidele conform principiilor managementului integrat și condițiilor autorizate.***
- 7. Monitorizează organul comestibil, nu numai solul și planta.***
- 8. Asigură trasabilitatea de la parcelă până la produsul finit.***
- 9. Evaluează multireziduurile prin prisma expunerii cumulative, nu doar prin numărul de substanțe detectate.***
- 10. Transformă rezultatul analitic într-o decizie de management și verifică eficiența intervenției.***

5. PROTOCOL PRACTIC DE MONITORIZARE ȘI EVALUARE A SIGURANȚEI PE LANȚUL SOL-PLANTĂ-PRODUS

5.1. Scopul și principiile protocolului

Monitorizarea contaminanților în sistemul sol-plantă-produs trebuie să urmărească întregul traseu al contaminantului, de la sursă până la produsul destinat consumului. În acest context, analiza de laborator nu reprezintă etapa finală a procesului, ci furnizează informația necesară pentru identificarea sursei, evaluarea transferului, estimarea expunerii și fundamentarea măsurilor de management. Protocolul propus în prezentul ghid are ca obiectiv furnizarea unui instrument practic pentru: caracterizarea inițială a terenului; identificarea surselor potențiale de contaminare; evaluarea solului și a apei de irigare; controlul fertilizanților, amendamentelor și materialelor organice; evaluarea mobilității și biodisponibilității contaminanților; monitorizarea transferului sol-plantă; evaluarea contaminanților în organul comestibil; monitorizarea reziduurilor de pesticide; evaluarea profilurilor multireziduale; estimarea expunerii consumatorului, atunci când datele disponibile permit; stabilirea măsurilor corective; verificarea eficienței intervențiilor.

Principiul fundamental este reprezentat de trecerea de la o abordare punctuală:
„Ce concentrație de contaminant există în probă?”
la o abordare integrată:

„De unde provine contaminantul, cât este de mobil, cât se transferă în plantă, cât ajunge în partea comestibilă și ce implicații are pentru produs și consumator?”

Protocolul prezentat în continuare trebuie considerat un instrument de bune practici pentru screening, monitorizare și fundamentarea deciziilor, fără a substitui cerințele legislative, procedurile oficiale de control sau evaluările toxicologice efectuate de autoritățile competente.

5.2. Etapa I - Evaluarea inițială a terenului

5.2.1. Identificarea și caracterizarea parcelei

Prima etapă a monitorizării constă în definirea clară a unității agricole investigate. Pentru fiecare parcelă se recomandă înregistrarea următoarelor informații: codul parcelei; localizarea și coordonatele geografice; suprafața; tipul și unitatea de sol; caracteristicile topografice relevante; cultura și cultivarului; culturile precedente; istoricul fertilizării; istoricul amendării; sursa apei de irigare; istoricul tratamentelor fitosanitare; materialele organice utilizate; sursele potențiale de contaminare din vecinătate; eventualele contaminări istorice cunoscute.

Pentru monitorizarea repetată, punctele de prelevare trebuie, pe cât posibil, georeferențiate și păstrate constante. Această abordare permite compararea rezultatelor în timp și identificarea tendințelor de acumulare sau reducere.

Atunci când parcela este eterogenă, aceasta trebuie împărțită în unități de monitorizare distincte. Zonele cu textură, drenaj, utilizare istorică sau potențiale surse de contaminare diferite nu trebuie obligatoriu tratate ca o singură unitate.

5.2.2. Istoricul terenului ca instrument de screening

Istoricul terenului reprezintă unul dintre cele mai simple instrumente de priorizare a monitorizării. Se recomandă o atenție sporită în cazul terenurilor: cu utilizare agricolă intensivă; caracterizate prin aplicarea repetată a pesticidelor; amendate cu gunoi de grajd, compost, nămoluri sau alte materiale organice; irigate cu ape de origine incertă; aflate în vecinătatea unor surse industriale; situate în zone cu trafic intens; asociate unor activități industriale istorice; pentru care există date anterioare privind contaminarea; caracterizate prin particularități geochimice locale.

Istoricul nu reprezintă o dovadă de contaminare. El trebuie utilizat pentru stabilirea priorității și a intensității programului de monitorizare. În cazul contaminanților emergenți, această etapă devine și mai importantă deoarece sursele pot fi asociate cu utilizarea apelor uzate, a biosolidelor, a gunoiului de grajd sau a altor materiale care pot introduce în agroecosistem compuși care nu sunt incluși în programele convenționale de monitorizare (Carter et al., 2026; Li et al., 2026).

5.3. Etapa II - Evaluarea apei și a materialelor utilizate în agricultură

5.3.1. Apa de irigare

Apa de irigare trebuie considerată o posibilă sursă de contaminare, în special atunci când rezultatele obținute în plante nu pot fi explicate prin caracteristicile solului. În funcție de sursă și de nivelul de risc, programul analitic poate include: pH; conductivitate electrică; materie organică; elemente potențial toxice; ioni majori; reziduuri de pesticide; contaminanți emergenți; alți indicatori specifici sursei.

Prelevarea trebuie realizată, pe cât posibil, în punctul în care apa este introdusă efectiv în sistemul de irigare. Pentru sursele cu variabilitate sezonieră, monitorizarea trebuie adaptată acestei variabilități.

5.3.2. Fertilizanți, amendamente și materiale organice

Fertilizarea și amendarea modifică proprietățile chimice și fizice ale solului și, implicit, disponibilitatea anumitor contaminanți. Pentru fiecare material introdus pe parcelă trebuie înregistrate: denumirea; producătorul/furnizorul; originea; lotul; data aplicării; suprafața tratată; doza; scopul aplicării; analizele de calitate disponibile.

În cazul materialelor organice și al produselor provenite din fluxuri secundare, este necesară o evaluare suplimentară a calității și a eventualului aport de contaminanți. Studiile recente privind utilizarea amendamentelor derivate din reziduuri agroalimentare evidențiază necesitatea evaluării simultane a beneficiilor agronomice și a efectelor asupra proprietăților solului (Caldara et al., 2026).

5.3.3. Trasabilitatea materialelor

Pentru fiecare material se recomandă o fișă simplificată:

Parametru	Informație
Material	denumire/tip
Furnizor	producător
Origine	sursă
Lot	cod
Data aplicării	data
Suprafață	ha
Doză	kg/ha sau t/ha
Scop	fertilizare/amendare
Analize	parametri disponibili
Observații	informații suplimentare

Această evidență permite corelarea ulterioară a eventualelor modificări ale solului sau plantelor cu materialele utilizate.

5.4. Etapa III - Monitorizarea culturii

5.4.1. Alegerea plantei și a organului vegetal

Monitorizarea trebuie orientată în primul rând către organul vegetal care intră efectiv în lanțul alimentar. În funcție de cultură, acesta poate fi: frunza; fructul; bulbul; tuberculul; rădăcina; semințele; alte organe consumate. Această abordare este esențială deoarece acumularea contaminanților poate varia puternic între organele aceleiași plante. Studiul realizat de Paun et al. (2025) a evidențiat diferențe dependente de specie și element, confirmând faptul că relația dintre contaminarea solului și acumularea în plantă nu este universală.

5.4.2. Corelarea probelor de plantă cu probele de sol

Pentru fiecare probă vegetală trebuie identificată proba de sol corespunzătoare. Se recomandă înregistrarea: codului parcelei; punctului de prelevare; adâncimii; datei; speciei; cultivarului; organului vegetal; stadiului de dezvoltare; condițiilor de cultivare. Această corelare permite calcularea factorilor de transfer și interpretarea relației dintre contaminarea solului și acumularea în plantă.

5.4.3. Factorul de transfer

Factorul de transfer reprezintă un indicator comparativ și nu constituie o limită de siguranță. Valoarea sa trebuie interpretată împreună cu: proprietățile solului; forma chimică a contaminantului; metoda de extracție; specia vegetală; organul vegetal; condițiile de cultivare. Atunci când este disponibilă, informația privind fracția mobilă sau biodisponibilă poate îmbunătăți interpretarea transferului (Kim et al., 2015; Senila și Kovacs, 2024).

5.5. Etapa IV - Monitorizarea reziduurilor de pesticide

5.5.1. Planul de monitorizare

Programul de monitorizare a pesticidelor trebuie stabilit în funcție de: cultura analizată; istoricul tratamentelor; substanțele active utilizate; produs; perioada dintre tratament și recoltare; originea produsului; istoricul de neconformități; probabilitatea apariției reziduurilor multiple

5.5.2. Screeningul multirezidual

În cazul în care capacitatea laboratorului permite, se recomandă utilizarea unei metode multireziduale capabile să investigheze simultan un număr relevant de substanțe active. Monitorizarea trebuie să permită: identificarea reziduurilor; confirmarea și cuantificarea acestora; compararea cu valorile legislative aplicabile; identificarea probelor cu mai multe reziduuri; prioritizarea probelor pentru evaluarea cumulativă.

5.5.3. Evaluarea conformității

Pentru fiecare reziduu identificat trebuie verificată valoarea legală aplicabilă combinației: **substanță activă × produs alimentar**. În Uniunea Europeană, cadrul principal este Regulamentul (CE) nr. 396/2005 privind limitele maxime de reziduuri de pesticide în sau pe produsele alimentare și furajele de origine vegetală și animală (European Commission, 2005). Valorile LMR/MRL trebuie verificate în forma legislativă în vigoare la momentul evaluării, deoarece acestea pot fi modificate. Conformitatea individuală cu LMR/MRL nu trebuie confundată cu evaluarea expunerii cumulative.

5.6. Etapa V - Evaluarea expunerii consumatorului

Evaluarea expunerii consumatorului reprezintă etapa în care rezultatele obținute în urma analizelor produsului alimentar sunt puse în relație cu modul de consum și cu caracteristicile populației evaluate. Această etapă se aplică atunci când natura contaminantului, nivelul determinat și datele disponibile justifică o astfel de evaluare. În cadrul prezentului protocol, evaluarea expunerii are rol de instrument de orientare și prioritizare, nu de înlocuire a evaluărilor oficiale de risc realizate conform metodologiilor și cerințelor autorităților competente.

Principalele informații necesare sunt: concentrația contaminantului determinată în partea efectiv consumată a produsului; tipul și cantitatea produsului consumat; frecvența consumului, atunci când aceasta este relevantă; masa corporală a populației evaluate; categoria de consumator; valoarea toxicologică de referință corespunzătoare contaminantului și tipului de expunere; informațiile privind incertitudinea și reprezentativitatea datelor.

5.6.1. Stabilirea datelor de intrare

Înainte de efectuarea evaluării se verifică dacă datele disponibile sunt suficiente și adecvate pentru scenariul analizat. Se recomandă: utilizarea concentrației determinate în organul sau produsul efectiv consumat; verificarea unităților de măsură și, dacă este necesar, conversia acestora într-o formă compatibilă cu datele de consum; identificarea categoriei de consumator pentru care se realizează evaluarea; utilizarea unor date de consum adecvate populației și produsului analizat; utilizarea masei corporale corespunzătoare scenariului evaluat; identificarea valorii toxicologice de referință relevante pentru contaminant; consemnarea sursei și a perioadei pentru datele de consum utilizate.

Pentru copii și alte categorii vulnerabile, atunci când datele disponibile permit, se recomandă construirea unui scenariu distinct, deoarece consumul raportat la masa corporală poate diferi de cel al populației adulte.

5.6.2. Alegerea scenariului de expunere

Scenariul de expunere trebuie definit înainte de calculul și documentat în fișa de evaluare. În funcție de obiectivul studiului, acesta poate fi: individual, pentru un anumit contaminant și produs; pe categorie de produs, atunci când sunt disponibile date pentru mai multe produse similare; pentru adulți sau copii; cronic, pentru expunerea pe termen lung; acut, atunci când natura contaminantului și datele disponibile justifică o astfel de evaluare; cumulativ, numai atunci când există o bază toxicologică și metodologică adecvată pentru gruparea contaminanților. Pentru pesticide, evaluarea cumulativă nu trebuie realizată prin simpla însumare a tuturor substanțelor detectate. Gruparea trebuie să fie fundamentată pe efecte toxicologice comune și pe metodologia relevantă de evaluare cumulativă.

5.6.3. Estimarea expunerii

Pe baza datelor de intrare se estimează expunerea pentru scenariul definit. Calculul propriu-zis al EDI, precum și utilizarea indicatorilor HQ și HI, sunt prezentate în Capitolul 4, unde sunt descrise și principiile de interpretare ale acestora. În cadrul protocolului, utilizatorul trebuie să consemneze cel puțin: contaminantul evaluat; produsul alimentar; concentrația utilizată; datele de consum; categoria de consumator; masa corporală utilizată; valoarea toxicologică de referință; tipul expunerii; indicatorul utilizat; rezultatul obținut; ipotezele principale ale scenariului.

Nu se recomandă introducerea unei valori de expunere într-un tabel de protocol fără precizarea scenariului din care aceasta a rezultat.

5.6.4. Evaluarea individuală și cumulativă

În cazul unui singur contaminant, evaluarea urmărește compararea expunerii estimate cu valoarea toxicologică de referință corespunzătoare. Atunci când într-un produs sunt identificate mai multe substanțe, se verifică mai întâi dacă există o justificare toxicologică pentru evaluarea cumulativă. Dacă această condiție este îndeplinită, se poate utiliza metodologia corespunzătoare pentru caracterizarea expunerii cumulative. În cazul pesticidelor, EFSA recomandă o abordare bazată pe grupuri de evaluare cumulativă (Cumulative Assessment Groups - CAGs), constituite pe baza unor efecte toxicologice comune, și nu pe simpla numărare sau însumare a tuturor reziduurilor detectate (EFSA, 2020).

5.6.5. Verificarea și documentarea rezultatului

Rezultatul evaluării trebuie verificat înainte de interpretare. Se recomandă controlul: unităților de măsură; conversiilor efectuate; datelor de consum; masei corporale; valorii toxicologice de referință; numărului de contaminanți incluși; scenariului de expunere; eventualelor valori lipsă sau rezultate sub limita de cuantificare; ipotezelor utilizate în calcul.

Rezultatul trebuie însoțit de o scurtă descriere a incertitudinilor și limitărilor. În special, trebuie avut în vedere faptul că expunerea estimată depinde de reprezentativitatea probelor, variabilitatea concentrațiilor în produse, comportamentul alimentar și caracteristicile populației.

5.6.6. Interpretarea pentru management

În cadrul prezentului ghid, rezultatul evaluării expunerii trebuie utilizat în primul rând pentru identificarea situațiilor care necesită atenție suplimentară și pentru orientarea monitorizării și a măsurilor de management. În funcție de rezultat, se poate recomanda: menținerea monitorizării de rutină; repetarea determinării pentru confirmarea rezultatului; extinderea numărului de probe; investigarea unei surse potențiale de contaminare; monitorizarea mai atentă a anumitor produse sau regiuni; evaluarea distinctă a unor categorii de consumatori; caracterizarea suplimentară a unui profil multirezidual; reevaluarea practicilor agricole sau a inputurilor utilizate.

Rezultatul unei evaluări de screening nu trebuie interpretat izolat și nu constituie, prin el însuși, o decizie de conformitate sau neconformitate. Orice concluzie privind siguranța alimentului trebuie raportată la cadrul legislativ aplicabil, la metodologia utilizată, la valorile de referință relevante și la incertitudinile evaluării.

Legătura cu Capitolul 4: Metodologia de calcul și principiile de interpretare a EDI, HQ și HI sunt prezentate în Capitolul 4. În prezentul protocol, acești indicatori sunt utilizați exclusiv ca instrumente operaționale pentru caracterizarea situației analizate și pentru orientarea etapelor ulterioare de monitorizare și management.

5.7. Etapa VI - Clasificarea operațională și luarea deciziei

Pentru transformarea rezultatelor analitice în acțiuni poate fi utilizată următoarea matrice (Tabelul 11):

Tabelul 11. Matrice orientativă pentru prioritizarea acțiunilor de monitorizare

Situație	Sol	Transfer	Organ comestibil/produs	Acțiune
A	conform	redus/normal	conform	monitorizare de rutină
B	modificare/contaminare	redus	conform	monitorizare intensificată
C	contaminare	detectabil	conform	intervenție agronomică și monitorizare
D	contaminare	ridicat	neconform	investigarea sursei și măsuri corective
E	conform	-	profil multirezidual	evaluare cumulativă, după caz
F	contaminare	necunoscut	necunoscut	investigație suplimentară

Categoriile sunt operaționale și orientative și nu constituie categorii de risc stabilite prin legislație. Un rezultat nefavorabil în sol nu trebuie interpretat automat ca neconformitate a produsului. În mod similar, un produs conform din punct de vedere al LMR nu exclude necesitatea unei evaluări suplimentare atunci când există un profil multirezidual relevant.

5.8. Etapa VII - Identificarea sursei și măsurile corective

Identificarea sursei trebuie realizată prin integrarea mai multor categorii de informații: *istoricul terenului + distribuția spațială + proprietățile solului + apa + materiale aplicate + tratamente fitosanitare + rezultatele din plantă + monitorizarea repetată*. Se recomandă evitarea atribuirii unei surse pe baza unei singure determinări. Măsurile corective pot include: eliminarea sau reducerea sursei; modificarea sursei de apă; controlul materialelor utilizate; adaptarea fertilizării; utilizarea unor amendamente adecvate; schimbarea culturii/cultivarului; management integrat al dăunătorilor; reducerea tratamentelor chimice atunci când este posibil; strategii de imobilizare sau fitoremediere, dacă sunt adecvate; separarea loturilor; monitorizare suplimentară. În cazul elementelor potențial toxice, strategiile de remediere trebuie adaptate contaminantului și proprietăților solului; nu există o metodă universală aplicabilă tuturor situațiilor (Naidu et al., 2025).

5.9. Etapa VIII - Verificarea eficienței intervenției

Aplicarea unei măsuri corective nu reprezintă dovada eficienței acesteia. Eficiența trebuie verificată printr-un nou program de monitorizare. Se recomandă compararea: *situație inițială → intervenție → monitorizare post-intervenție → tendință temporală*. Pentru comparații corecte, trebuie păstrate, pe cât posibil: punctele de prelevare; metodele analitice; tipurile de probe; unitățile de exprimare; condițiile de interpretare.

Monitorizarea multianuală poate fi deosebit de relevantă pentru culturile perene. Prin urmare, monitorizarea trebuie concepută ca un **sistem de feedback**: *monitorizare → interpretare → intervenție → verificare → ajustare*.

5.10. Fișa de monitorizare a unei parcele

Pentru implementarea protocolului se recomandă utilizarea unei fișe standardizate (Tabelul 12):

Tabelul 12. Model de fișă de monitorizare a parcelei

Secțiune	Informații
Identificare	cod parcelă, localizare, suprafață, coordonate
Sol	tip, pH, materie organică, textură, CEC
Istoric	culturi, surse potențiale, contaminări cunoscute
Apă	sursă, parametri de calitate
Fertilizanți	produs, origine, lot, doză
Amendamente	tip, origine, lot, doză
Cultură	specie, cultivar, stadiu
Pesticide	substanță activă, doză, data aplicării
Sol	cod probă, adâncime, data
Plantă	cod probă, organ, data
Contaminanți	concentrații
Biodisponibilitate	metodă și rezultate
Transfer	TF/BAF
Pesticide	reziduuri și concentrații
Conformitate	raportare la valorile aplicabile
Expunere	EDI/HQ/HI, după caz
Decizie	monitorizare/intervenție/investigație
Măsură corectivă	descriere
Verificare	data și rezultatele reevaluării

Fișa trebuie să permită urmărirea unui rezultat analitic până la parcela și cultura de origine. În acest mod, rezultatul de laborator devine parte dintr-un sistem de trasabilitate și management, nu o valoare izolată.

5.11. Arbore decizional pentru evaluarea riscului

Procesul de evaluare poate fi sintetizat prin următorul arbore decizional. Arborele decizional nu trebuie aplicat rigid. Intensitatea monitorizării trebuie adaptată nivelului de risc, istoricului terenului, tipului de contaminant și incertitudinii asociate datelor. Pentru o parcelă bine caracterizată și cu rezultate repetat conforme, poate fi suficient un program de monitorizare periodică. Apariția unei contaminări, a unui transfer neobișnuit în organul comestibil sau a unui profil multirezidual complex justifică însă trecerea către o etapă de investigare aprofundată.

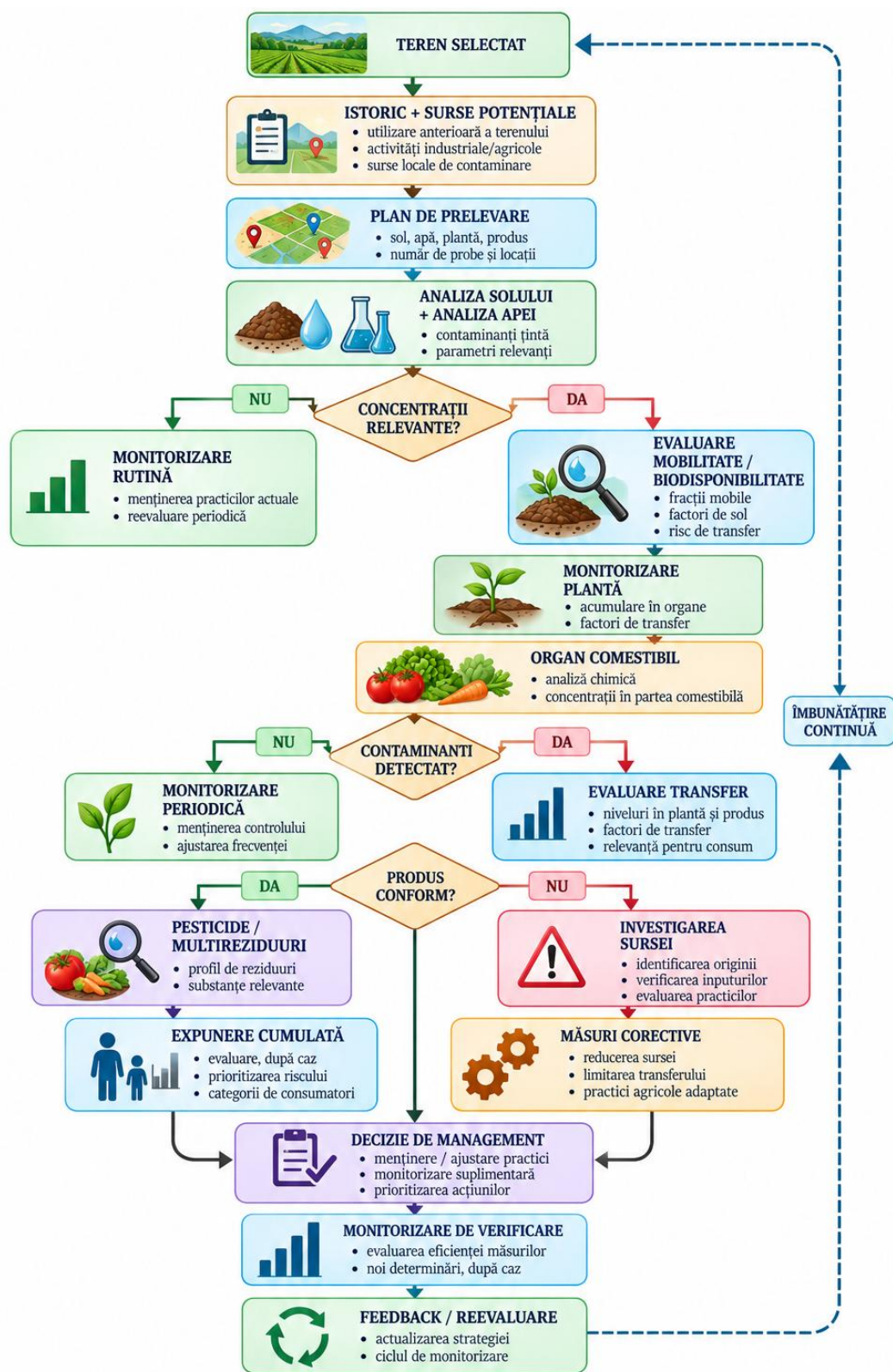


Figura 13. Arbore decizional pentru monitorizarea și evaluarea riscului pe lanțul sol-plantă-produs

6. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE

6.1. Principalele concluzii ale ghidului

Agricultura rezilientă presupune capacitatea agroecosistemelor de a menține funcțiile productive și ecologice în condițiile unor presiuni variabile, inclusiv ale contaminării solului, apei și produselor agricole. În acest context, siguranța alimentelor nu poate fi abordată exclusiv la nivelul produsului finit, ci trebuie construită de-a lungul întregului lanț sursă-sol-plantă-produs-consumator. Analiza realizată în cadrul prezentului ghid conduce la câteva concluzii fundamentale.

Solul trebuie considerat o componentă centrală a siguranței alimentelor, deoarece contaminarea acestuia poate constitui o sursă persistentă de expunere pentru culturi și poate influența calitatea produselor agricole pe perioade îndelungate. În consecință, identificarea și caracterizarea surselor de contaminare reprezintă un punct de plecare esențial pentru orice program de monitorizare. Evaluarea contaminării nu poate fi însă bazată exclusiv pe concentrația totală a contaminantului în sol. Mobilitatea, specia chimică și biodisponibilitatea sunt influențate de proprietăți precum pH-ul, conținutul de materie organică, textura și capacitatea de schimb cationic. Din această perspectivă, caracterizarea transferului către plante trebuie să coreleze proprietățile solului cu datele privind acumularea contaminanților în plante.

Transferul sol-plantă este dependent atât de natura contaminantului, cât și de sistemul biologic investigat. Rezultatele obținute în cadrul proiectului au evidențiat diferențe între elemente și culturi și au demonstrat că aceeași condiție de contaminare a solului nu conduce în mod obligatoriu la același nivel de acumulare în toate plantele. Această observație are o consecință practică importantă: evaluarea trebuie orientată către cultura analizată și către organul vegetal destinat consumului, nu numai către caracterizarea solului. În același timp, apa de irigare și materialele introduse în sol trebuie integrate în sistemul de monitorizare. Fertilizanții, amendamentele, composturile și alte materiale organice pot modifica proprietățile solului și, implicit, disponibilitatea contaminanților. Aceste materiale pot reprezenta, de asemenea, surse suplimentare de contaminare atunci când nu sunt caracterizate și controlate corespunzător.

În cazul pesticidelor, monitorizarea multireziduală este necesară pentru caracterizarea adecvată a profilului de contaminare. Rezultatele obținute pentru produsele horticole investigate în România au evidențiat diversitatea substanțelor active detectabile și variația profilului de contaminare în funcție de produs și origine. Prin urmare, determinarea unui singur pesticid nu este suficientă pentru caracterizarea unor situații complexe de contaminare. Conformitatea individuală a reziduurilor nu epuizează problematica expunerii consumatorului. Atunci când într-un produs sunt prezente mai multe reziduuri, evaluarea poate necesita, după caz, luarea în considerare a mecanismelor toxicologice comune și a expunerii cumulative. Rezultatele obținute în cadrul proiectului indică o asociere între complexitatea profilului de reziduuri și nivelul expunerii cumulative estimate. Această relație nu trebuie însă interpretată simplist, deoarece numărul de substanțe detectate nu constituie, în sine, o măsură suficientă a riscului.

În ansamblu, monitorizarea trebuie să fie orientată către decizie și acțiune. O analiză de laborator își valorifică pe deplin utilitatea atunci când rezultatul poate fi corelat cu o măsură concretă, precum continuarea monitorizării, identificarea sursei de contaminare, modificarea practicilor agricole, extinderea investigațiilor asupra produsului sau verificarea eficienței unei intervenții. Astfel, monitorizarea devine parte a unui ciclu de evaluare și management, în care rezultatele analitice fundamentează acțiunile ulterioare și contribuie la prevenirea reapariției contaminării.

În consecință, prezentul ghid propune trecerea de la o monitorizare bazată pe determinări izolate la un sistem integrat de monitorizare și management al riscului.

6.2. Contribuția rezultatelor obținute în cadrul proiectului ADER 6.3.7

Rezultatele obținute în cadrul proiectului ADER 6.3.7 au permis fundamentarea recomandărilor prezentului ghid pe date experimentale provenite din agroecosisteme și produse relevante pentru România. Un prim set de rezultate a fost obținut prin caracterizarea relației sol-plantă pentru elemente majore și de urmă, inclusiv Li, Sr, Zn, Cu, Mn, Fe, Pb și Cd. Studiul a inclus probe de sol și țesut vegetal provenite din mai multe regiuni agricole și culturi horticole. Rezultatele au evidențiat variații regionale și

comportamente specifice elementului, precum și diferențe între culturi. Aceste rezultate susțin trei recomandări fundamentale ale ghidului:

1. monitorizarea trebuie să fie corelată spațial;
2. concentrația totală din sol trebuie interpretată în contextul proprietăților solului;
3. evaluarea trebuie să includă planta și, în special, organul comestibil.

Un al doilea set de rezultate a fost obținut prin monitorizarea reziduurilor de pesticide în fructe și legume (620 de probe și 74 de compuși pesticidici) și a evidențiat diferențe între produsele analizate și originea acestora. Aceste rezultate au fundamentat recomandarea privind utilizarea screeningului multirezidual.

O altă direcție de cercetare a vizat evaluarea strategiilor de reducere a reziduurilor după recoltare. Rezultatele arată că spălarea, înmuierea, manipularea și procesarea pot influența concentrația reziduurilor, însă eficiența depinde de substanța activă și de procesul aplicat. Prin urmare, controlul siguranței alimentelor nu se încheie în momentul recoltării.

Analiza multivariată a profilurilor de pesticide a permis trecerea de la simpla raportare a concentrațiilor la caracterizarea complexității contaminării și a expunerii cumulative. Această abordare completează monitorizarea convențională și poate contribui la prioritizarea probelor care necesită evaluări suplimentare. În ansamblu, rezultatele proiectului au demonstrat necesitatea unei abordări integrate: **SOL → TRANSFER → PLANTĂ → PRODUS → EXPUNERE → DECIZIE.**

6.3. De la monitorizare la agricultură rezilientă

Agricultura rezilientă nu trebuie definită numai prin capacitatea de a suporta un factor de stres, ci și prin capacitatea sistemului agricol de a: identifica precoce factorii de risc; preveni introducerea contaminanților; detecta modificările relevante; adapta practicile agricole; limita transferul către cultura destinată consumului; verifica eficiența intervențiilor; utiliza rezultatele monitorizării pentru îmbunătățirea practicilor viitoare. Această abordare este compatibilă cu principiile managementului adaptiv al agroecosistemelor. Un sistem agricol rezilient trebuie, prin urmare, să fie capabil să răspundă atât unei contaminări deja existente, cât și unor modificări ale condițiilor de mediu sau ale practicilor agricole. În cazul contaminanților persistenți,

reziliența presupune reducerea transferului către plante și prevenirea expunerii consumatorului, chiar și atunci când eliminarea rapidă a contaminantului din sol nu este posibilă. În cazul pesticidelor, reziliența presupune reducerea dependenței de intervenții chimice prin prevenție, monitorizare și management integrat al dăunătorilor. În cazul contaminanților emergenți, reziliența presupune capacitatea de a adapta programul de monitorizare atunci când apar noi surse sau noi dovezi privind comportamentul și toxicitatea acestora.

6.4. Recomandări pentru implementarea programelor de monitorizare

Pentru fermieri, se recomandă:

- păstrarea istoricului parcelei;
- documentarea tuturor materialelor introduse în sol;
- monitorizarea calității apei de irigare;
- utilizarea responsabilă a pesticidelor;
- păstrarea evidenței tratamentelor;
- monitorizarea periodică a solului;
- includerea organului comestibil în evaluare;
- păstrarea trasabilității loturilor.

Pentru laboratoare, se recomandă:

- utilizarea unor metode validate;
- aplicarea procedurilor QA/QC;
- utilizarea unor limite de detecție și cuantificare adecvate obiectivului;
- corelarea probelor de sol și plantă;
- raportarea clară a unităților și bazei de exprimare;
- documentarea incertitudinii de măsurare;
- utilizarea unor metode multireziduale pentru programele de screening al pesticidelor.

Pentru operatorii din lanțul agroalimentar, se recomandă:

- menținerea trasabilității;
- verificarea furnizorilor;
- monitorizarea loturilor cu risc crescut;

- aplicarea procedurilor pentru produsele neconforme;
- integrarea informațiilor provenite din monitorizarea materiilor prime și a produsului finit.

Pentru autorități și organismele de control, se recomandă prioritizarea monitorizării în funcție de:

- istoricul contaminării;
- tipul culturii;
- originea produsului;
- rezultatele anterioare;
- profilul contaminanților;
- probabilitatea apariției reziduurilor multiple;
- caracteristicile regionale ale agroecosistemului.

Pentru cercetare, este necesară dezvoltarea unor baze de date integrate care să permită corelarea: *sol-apă-plantă-produs-contaminant-practică agricolă-expunere*.

6.5. Mesaj final al ghidului

Siguranța alimentelor reprezintă rezultatul interacțiunii dintre caracteristicile solului, sursele de contaminare, practicile agricole, capacitatea plantelor de a prelua și transloca contaminanții, procesele post-recoltare și comportamentul consumatorului. Din această perspectivă, *siguranța nu poate fi verificată exclusiv la sfârșitul lanțului alimentar; ea trebuie construită și monitorizată de-a lungul întregului sistem*. Abordarea integrată este necesară atât pentru contaminanții anorganici, cât și pentru reziduurile de pesticide. Relațiile dintre contaminarea solului și acumularea în plante sunt dependente de element, specie și condițiile locale, iar profilurile multireziduale de pesticide necesită o evaluare care să depășească analiza individuală a substanțelor.

Prin urmare, prezentul ghid propune ca principiu general: **„Siguranța alimentelor începe în sol, dar trebuie controlată până la produsul destinat consumului.”**

Acest model transformă monitorizarea dintr-o activitate exclusiv analitică într-un instrument de management al agroecosistemului, capabil să susțină agricultura rezilientă, protecția mediului și producerea de alimente sigure.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- ADER. (2026). *Măsurile de aplicabilitate privind investigarea distribuției contaminanților organoclorurați și organofosforici pe lanțul sol-plantă-legumă/fruct-produs finit, urmărind diferite tipuri de soluri din arii variate* (Proiect ADER 6.3.7, Planul sectorial ADER 2023-2026). Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice - ICSI Râmnicu Vâlcea. <https://www.icsi.ro/ader637/>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: The science of sustainable agriculture* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429495465>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G., Gilroy, S., & Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 233-266. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159>
- Caldara, M., Di Gregorio, L., Sarvi, M., et al. (2026). Impacts on soil health of soil improvers derived from agri-food processing residues: A systematic review with a focus on European field studies. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 26, 2858-2883. <https://doi.org/10.1007/s42729-026-03037-7>
- Carter, L. J., Ben Mordechay, E., Chefetz, B., Chen, Z., Cui, X., Gan, J., Li, H., Moores, A., & Gao, X. (2026). Contaminants of emerging concern in agricultural soils: Current understanding, overlooked issues, and future priorities. *Plants, People, Planet*, 8(3), 792-810. <https://doi.org/10.1002/ppp3.70158>
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11), 1707-1719. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>

Christou, A., Papadavid, G., Dalias, P., Fotopoulos, V., Michael, C., Bayona, J. M., Piña, B., & Fatta-Kassinos, D. (2019). Ranking of crop plants according to their potential to uptake and accumulate contaminants of emerging concern. *Environmental Research*, 170, 422-432. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.048>

Darnhofer, I. (2010). Strategies of family farms to strengthen their resilience. *Environmental Policy and Governance*, 20(4), 212-222. <https://doi.org/10.1002/eet.547>

European Commission. (2005). *Regulation (EC) No 396/2005 of the European Parliament and of the Council of 23 February 2005 on maximum residue levels of pesticides in or on food and feed of plant and animal origin and amending Council Directive 91/414/EEC*. *Official Journal of the European Union*, L 70, 1-16.

European Food Safety Authority. (2009). *General principles for the collection of national food consumption data in the view of a pan-European dietary survey*. *EFSA Journal*, 7(12), 1435. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.1435>

European Food Safety Authority. (2020). *Cumulative dietary risk characterisation of pesticides that have chronic effects on the thyroid*. *EFSA Journal*, 18(4), 6088. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6088>

European Food Safety Authority. (2022). *The 2020 European Union report on pesticide residues in food*. *EFSA Journal*, 20(3), 7215. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7215>

Fang, L., Chi, J., Liu, K., Kappler, A., Zhu, Y.-G., Leach, J. E., Fettrow, S., Ran, Q., Chen, K., Borch, T., & Li, F. (2026). Managing metal(loid) contamination for safe rice production. *Nature Reviews Earth & Environment*, 7, 546-561. <https://doi.org/10.1038/s43017-026-00804-z>

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & United Nations Environment Programme. (2021). *Global assessment of soil pollution: Report*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), & World Health Organization (WHO). (2026). *Pesticide residues in food: Report 2025: Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues*. <https://doi.org/10.4060/cd9620en>

Guerrieri, N., Mazzini, S., & Borgonovo, G. (2024). Food plants and environmental contamination: An update. *Toxics*, 12(5), 365. <https://doi.org/10.3390/toxics12050365>

- Gupta, N., Ram, H., & Kumar, B. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration—A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2927-2942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.047>
- Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321(1-2), 117-152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. W., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 366-381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>
- Huang, S., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2024). Metal transport systems in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 75, 1-25. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-062923-021424>
- Huang, W., Focker, M., van Dongen, K. C. W., & van der Fels-Klerx, I. (2024). Factors influencing the fate of chemical food safety hazards in the terrestrial circular primary food production system—A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(2), e13324. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13324>
- Jiang, L., Lv, J., Jones, K. C., Yu, S., Wang, Y., Gao, Y., Wu, J., Luo, L., Shi, J., Li, Y., Yang, R., Fu, J., Bu, D., Zhang, Q., & Jiang, G. (2024). Soil's hidden power: The stable soil organic carbon pool controls the burden of persistent organic pollutants in background soils. *Environmental Science & Technology*, 58(19), 8490-8500. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00028>
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kim, R.-Y., Yoon, J.-K., Kim, T.-S., Yang, J. E., Owens, G., & Kim, K.-R. (2015). Bioavailability of heavy metals in soils: Definitions and practical implementation—A critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, 37, 1041-1061. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y>

- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Li, J., Yan, Q., Du, B., & Feng, G. (2026). An integrated review of pesticides and antibiotics in agricultural environments: Occurrence, cross-media transport, and plant uptake. *Foods*, 15(8), 1436. <https://doi.org/10.3390/foods15081436>
- Mai, X., Tang, J., Tang, J., Zhu, X., Yang, Z., Liu, X., Zhuang, X., Feng, G., & Tang, L. (2025). Research progress on the environmental risk assessment and remediation technologies of heavy metal pollution in agricultural soil. *Journal of Environmental Sciences*, 149, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.045>
- McGrath, S. P., & Zhao, F. J. (2015). Concentrations of metals and metalloids in soils that have the potential to lead to exceedance of maximum limit concentrations of contaminants in food and feed. *Soil Use and Management*, 31(Suppl. 1), 34-45. <https://doi.org/10.1111/sum.12080>
- Mponela, P., Chimonyo, V. G. P., Chiduwa, M., Kachali, R., Grevulo-Minofu, J., Kawanga, C., Lopez-Ridaura, S., & others. (2026). Soil-health frameworks in agri-food systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 46, 34. <https://doi.org/10.1007/s13593-026-01111-z>
- Naidu, R., Biswas, B., Nuruzzaman, M., et al. (2025). Bioremediation of heavy metal(loid)s in agricultural soils and crops. *Nature Reviews Bioengineering*, 3, 1005-1018. <https://doi.org/10.1038/s44222-025-00345-y>
- Nwankwo, C. E. I., Okeke, E. S., Umeoguaju, F. U., et al. (2025). Addressing emerging contaminants in agriculture affecting plant-soil interaction: A review on bio-based and nano-enhanced strategies for soil health and global food security. *Discover Toxicology*, 2, 4. <https://doi.org/10.1007/s44339-025-00018-w>
- Paun, N., Zgavarogea, R., Niculescu, V.-C., Nasture, A. M., Voicea, I., & Popescu (Stegăruș), D. I. (2025). From soil to plate: Lithium and other trace metals uptake in vegetables under variable soil conditions. *Toxics*, 13, 956. <https://doi.org/10.3390/toxics13110956>

Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & van der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11(11), 789-799. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>

Popescu (Stegăruș), D. I., Năsture, A.-M., Niculescu, V.-C., Oprița (Cioară), C. M., & Șuțan (Ionescu), N. A. (2025). Pesticide surveillance in fruits and vegetables from Romanian supply: A data-driven approach. *Journal of Xenobiotics*, 15(4), 104. <https://doi.org/10.3390/jox15040104>

Popescu (Stegăruș), D. I., Oprița (Cioară), C. M., Tămaian, R., & Niculescu, V.-C. (2024). Consumer safety and pesticide residues: Evaluating mitigation protocols for greengrocery. *Journal of Xenobiotics*, 14, 1638-1669. <https://doi.org/10.3390/jox14040088>

Pret, V., Falconnier, G. N., Affholder, F., Corbeels, M., Chikowo, R., & Descheemaeker, K. (2025). Farm resilience to climatic risk: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 45, Article 10. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00998-w>

Pullagurala, V. L. R., Rawat, S., Adisa, I. O., Hernandez-Viezcás, J. A., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2018). Plant uptake and translocation of contaminants of emerging concern in soil. *Science of the Total Environment*, 636, 1585-1596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.375>

Raffa, C. M., & Chiampo, F. (2021). Bioremediation of agricultural soils polluted with pesticides: A review. *Bioengineering*, 8(7), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8070092>

Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K.-H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>

Rizwan, M. S., Ali, S., Adrees, M., Ibrahim, M., Tsang, D. C. W., Zia-ur-Rehman, M., Zahir, Z. A., Rinklebe, J., Tack, F. M. G., & Ok, Y. S. (2017). A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere*, 182, 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.013>

Sanad, H., Moussadek, R., Spaccini, R., Paradiso, R., Oued Lhaj, M., Zouahri, A., Dakak, H., & Mouhir, L. (2026). Trace metal accumulation in horticulture production systems (HPS) of Mediterranean agro-ecosystems: Origins, impacts on soil health, water

resources, and plant uptake with sustainable mitigation strategies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 10, 1803164. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2026.1803164>

Sarker, A., Kim, D., & Jeong, W.-T. (2024). Environmental fate and sustainable management of pesticides in soils: A critical review focusing on sustainable agriculture. *Sustainability*, 16(23), 10741. <https://doi.org/10.3390/su162310741>

Senila, M., & Kovacs, E. (2024). Use of diffusive gradients in thin-film technique to predict the mobility and transfer of nutrients and toxic elements from agricultural soil to crops—An overview of recent studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 25430-25447. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33602-5>

Tudi, M., Ruan, H. D., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>

Yang, M., Wang, Y., Yang, G., Wang, Y., Liu, F., & Chen, C. (2024). A review of cumulative risk assessment of multiple pesticide residues in food: Current status, approaches and future perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104340. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104340>

Yu, H., Li, C., Yan, J., Ma, Y., Zhou, X., Yu, W., Kan, H., Meng, Q., Xie, R., & Dong, P. (2023). A review on adsorption characteristics and influencing mechanism of heavy metals in farmland soil. *RSC Advances*, 13, 3505-3519. <https://doi.org/10.1039/D2RA07095B>

Wan, Y., Liu, J., Zhuang, Z., Wang, Q., & Li, H. (2024). Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies. *Toxics*, 12(1), 63. <https://doi.org/10.3390/toxics12010063>

Zhao, F.-J., Ma, Y., Zhu, Y.-G., Tang, Z., & McGrath, S. P. (2015). Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 49(2), 750-759. <https://doi.org/10.1021/es5047099>

Zgavarogea, I. R., Paun, N., Sandru, C., Niculescu, V.-C., Nasture, A. M., Pruteanu, A. M., Istrate, I.-A., & Botoran, O.-R. (2026). Multiyear soil-fruit transfer dynamics of macro- and trace elements in raspberry (*Rubus idaeus* L.) under field conditions. *Plants*, 15(7), 1107. <https://doi.org/10.3390/plants15071107>

ANEXE

ANEXA 1. Model de plan de prelevare. Instrument pentru planificarea și documentarea prelevării probelor de sol, apă, plantă și produs agricol.

ANEXA 2. Fișa de monitorizare a parcelei. Fișă pentru înregistrarea datelor generale ale parcelei, istoricului terenului și caracteristicilor fizico-chimice ale solului.

ANEXA 3. Fișa de evaluare a transferului și a riscului. Instrument pentru centralizarea rezultatelor analitice, evaluarea transferului sol-plantă și, după caz, estimarea expunerii consumatorului și formularea acțiunilor recomandate.

ANEXA 4. Registrul tratamentelor fitosanitare. Instrument pentru evidența tratamentelor aplicate culturilor și pentru corelarea acestora cu rezultatele analitice privind reziduurile de pesticide.

ANEXA 5. Set minim recomandat de indicatori analitici. Listă orientativă a parametrilor recomandați pentru caracterizarea solului, apei de irigare, plantelor și produselor agricole, în funcție de obiectivul evaluării și sursele potențiale de contaminare.

ANEXA 6. Listă de verificare pentru producția de alimente sigure. Checklist operațional pentru verificarea principalelor condiții necesare monitorizării și controlului contaminanților pe lanțul sol-plantă-produs.

ANEXA 7. Fișa de acțiune corectivă și verificare. Instrument pentru documentarea rezultatelor relevante, investigarea surselor, stabilirea măsurilor corective, reverificarea eficienței și închiderea sau continuarea acțiunii.

ANEXA 1. MODEL DE PLAN DE PRELEVARE

Data: _____

1 INFORMAȚII GENERALE

Obiectivul prelevării:	
Cultură / produs:	
Localizare (localitate, județ):	
Coordonate GPS (opțional):	
Suprafața terenului (ha):	
Sistem de cultură:	
Data prelevării:	
Responsabil prelevare:	

2 TIPURI DE PROBE ȘI OBIECTIVE

Tip probă	Obiectiv	Număr probe	Observații
 Sol	Evaluarea contaminării și a biodisponibilității		0–20 cm
 Apă	Evaluarea aportului extern și a calității apei		Sursă / irigare
 Plantă	Evaluarea transferului și acumulării		Organ(e) specific(e)
 Organ comestibil / produs	Evaluarea siguranței alimentului		Partea consumată

3 STRATEGIA DE PRELEVARE

Tip prelevare:	☐ aleatorie ☐ stratificată ☐ sistematică ☐ direcționată (pe risc)
Criterii de stratificare (dacă este cazul):	_____
Număr de subzone:	_____
Număr de probe compozite / probe individuale:	_____
Adâncime prelevare sol:	☐ 0–20 cm ☐ 20–40 cm ☐ alte adâncimi: _____
Metodă de prelevare:	☐ manuală ☐ mecanică (sondă)
Interval între puncte de prelevare:	_____

4 SCHEMA DE PRELEVARE (localizarea punctelor de prelevare pe teren)

Legendă:

- Probă sol
- Probă apă
- ▲ Probă plantă
- Probă organ comestibil / produs



5 DESCRIEREA PUNCTELOR DE PRELEVARE

Cod probă	Tip probă	Coordonate GPS	Descriere locație (ex. colț teren, centru, margine, sursă de apă)	Adâncime (cm)	Observații
P1					
P2					
P3					
P4					
P5					
P6					
P7					
P8					
...					

6 ECHIPAMENTE ȘI MATERIALE

Echipament / material	Disponibil (✓)	Echipament / material	Disponibil (✓)
Sondă pentru sol		Etichete impermeabile	
Recipient eșantion sol		Marker permanent	
Recipient eșantion apă		GPS / dispozitiv mobil	
Recipient eșantion plantă/produs		Hărți / plan teren	
Pungi/recipiente sterile		Ladă frigorifică / elemente de răcire	
Mănuși de unică folosință		Fișe de teren	

7 ETICHETARE ȘI TRANSPORT

Codificare probe:	_____
Informații pe etichetă:	☐ cod probă ☐ localizare ☐ tip probă ☐ adâncime (pentru sol) ☐ data și ora prelevării ☐ numele prelevatorului
Condiții de transport:	☐ temperatură ambiantă ☐ refrigerat (4 °C)
Termen de livrare la laborator:	_____

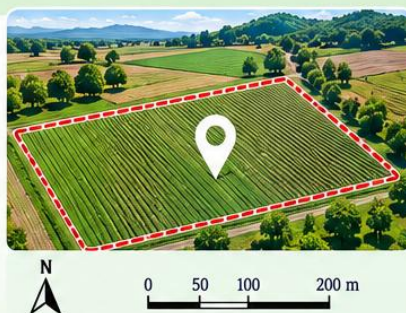
8 OBSERVAȚII ȘI ALTE INFORMAȚII



ANEXA 2. FIȘA DE MONITORIZARE A PARCELEI

A2.1. DATE GENERALE

Cod parcelă:
Localitate/Județ:
Suprafață: (ha)
Cultura:
Soi/cultivar:
Sistem de cultură: ☐ câmp ☐ solar ☐ seră
Data evaluării:
Responsabil prelevare:



A2.2. ISTORICUL TERENULUI

Aspect verificat	DA	NU	Necunoscut	Observații
Istoricul terenului este disponibil	☐	☐	☐	
Au existat activități industriale în proximitate	☐	☐	☐	
Există trafic rutier semnificativ	☐	☐	☐	
Au fost utilizate produse fitosanitare	☐	☐	☐	
Au fost utilizate amendamente/materiale organice	☐	☐	☐	
Au fost utilizate nămoluri/biosolide	☐	☐	☐	
Există surse potențiale de contaminare a apei	☐	☐	☐	
Sunt disponibile analize istorice	☐	☐	☐	



Surse industriale



Trafic rutier



Utilizare
produse fitosanitare



Amendamente
și materiale organice



Nămoluri/biosolide
Surse de apă
(irigare)

A2.3. CARACTERIZAREA SOLULUI

Parametru	Rezultat	Unitate	Data analizei
pH			
Materie organică			
Carbon organic			
CEC			
Textură			
Carbonate			
N total			
P			
K			
Fe			
Mn			
Zn			
Cu			
Cd			
Pb			
Ni			
Cr			
Co			
As			
Hg			
Sr			
Li			
Alți contaminanți			



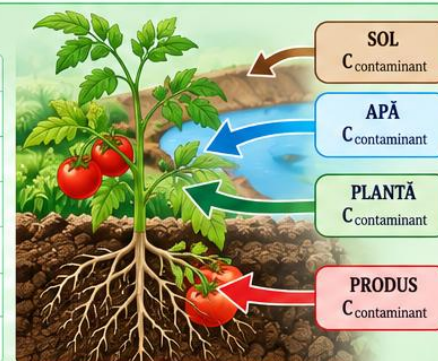


ANEXA 3. FIȘA DE EVALUARE A TRANSFERULUI ȘI A RISCULUI



A3.1. REZULTATE ANALITICE

Matrice	Contaminant	Concentrație	Unitate	Metodă	Observații
Sol					
Apă					
Rădăcină					
Frunză					
Fruct/bulb/tubercul					
Produs finit					



A3.2. EVALUAREA TRANSFERULUI

$$TF = \frac{C_{\text{plantă}}}{C_{\text{sol}}}$$

C_{sol}:

C_{plantă}:

TF:

Organ vegetal analizat:

Observație

Valoarea TF se interpretează numai în contextul:

- proprietăților solului;
- contaminantului;
- speciei și cultivarului;
- condițiilor de cultivare;
- organului vegetal analizat;
- metodologiei de prelevare și analiză.



A3.3. EVALUAREA EXPUNERII

Parametru	Valoare	Unitate	Sursa/justificare
Concentrație în produs			
Rată de consum			
Masă corporală			
EDI			
ADI			
HQ			
HI, dacă este aplicabil			



A3.4. REZULTATUL EVALUĂRII

- ☐ Nu sunt necesare acțiuni suplimentare
- ☐ Se recomandă monitorizare periodică
- ☐ Se recomandă monitorizare intensificată
- ☐ Se recomandă repetarea analizei
- ☐ Se recomandă investigarea sursei

- ☐ Se recomandă evaluarea suplimentară a biodisponibilității
- ☐ Se recomandă evaluarea produsului finit
- ☐ Se recomandă aplicarea unor măsuri corective
- ☐ Se recomandă reevaluarea după intervenție

Justificare:

.....

.....





ANEXA 4. REGISTRUL TRATAMENTELOR FITOSANITARE

A4.0. REGISTRUL TRATAMENTELOR FITOSANITARE

Data aplicării	Cultura	Produs comercial	Substanță activă	Doză (ex. L/ha, kg/ha)	Suprafață tratată (ha)	Operator	Observații



A4.1. SINTEZA TRATAMENTELOR

Număr total de tratamente:

Data ultimului tratament:

Substanțe active utilizate:

Data recoltării:

Interval între ultimul tratament și recoltare: zile



A4.2. CORELAREA CU REZULTATELE ANALITICE

Pentru fiecare substanță detectată se verifică:

Element	Verificare (DA / NU)
Substanța activă a fost utilizată?	DA / NU
Tratamentul este înregistrat?	DA / NU
Momentul aplicării este compatibil?	DA / NU
Intervalul până la recoltare este cunoscut?	DA / NU
Produsul este susceptibil la contaminare?	DA / NU
Există alte surse posibile?	DA / NU
Este necesară o investigație suplimentară?	DA / NU



Notă: identificarea unui reziduu nu trebuie atribuită automat ultimului tratament fitosanitar înregistrat. Pot exista surse multiple, contaminare din mediu, transfer din alte produse sau alte mecanisme de expunere.

ANEXA 5. SET MINIM RECOMANDAT DE INDICATORI ANALITICI

A5.1. SOL

Caracterizare fizico-chimică

- pH;
- materie organică;
- carbon organic;
- textură;
- capacitate de schimb cationic;
- carbonat;
- azot total;
- fosfor;
- potasiu.

Elemente potențial toxice și elemente de interes

În funcție de obiectivi și de sursele potențiale:



Atunci când există justificare, determinarea concentrației totale poate fi completată cu evaluarea fracției mobile sau biodisponibile.



A5.2. APĂ DE IRIGARE

Setul analitic se stabilește în funcție de sursa apei și de riscurile identificate.

Poate include:



pH;



conductivitate;



nitrați;



Cd

Pb

Cr

Ni

Cu

Zn

As

Hg

Sr

Li

elemente potențial toxice;



contaminanți specifici sursei;



indicatori microbiologici, atunci când obiectivul și cadrul aplicabil o impun.



A5.3. PLANTE ȘI PRODUSE AGRICOLE



Pentru contaminanții anorganici:



concentrații totale;



după caz, forme/specii chimice relevante;



după caz, indicatori de biodisponibilitate.

Pentru pesticide:



screening multirezidual;



identificare și cuantificare;



verificarea LMR aplicabile;



evaluarea profilului multirezidual;



evaluarea cumulativă atunci când este justificată.





ANEXA 6. LISTĂ DE VERIFICARE PENTRU PRODUCȚIA DE ALIMENTE SIGURE

„Este parcela pregătită pentru producția de alimente sigure?”

Nr.	Criteriu	DA	NU	N/A	Observații
1	Istoricul parcelei este cunoscut	☐	☐	☐	
2	Sursele potențiale de contaminare au fost identificate	☐	☐	☐	
3	Solul a fost caracterizat	☐	☐	☐	
4	pH-ul și materia organică sunt cunoscute	☐	☐	☐	
5	Elementele relevante au fost investigate	☐	☐	☐	
6	Biodisponibilitatea a fost evaluată când este justificat	☐	☐	☐	
7	Apa de irigare a fost evaluată	☐	☐	☐	
8	Fertilizanții sunt identificați și documentați	☐	☐	☐	
9	Amendamentele/materialele organice sunt documentate	☐	☐	☐	
10	Cultura este adecvată condițiilor parcelei	☐	☐	☐	
11	Tratamentele fitosanitare sunt înregistrate	☐	☐	☐	
12	Intervalul dintre tratament și recoltare este documentat	☐	☐	☐	
13	Organul comestibil este inclus în monitorizare	☐	☐	☐	
14	Probele de plantă sunt corelate cu probele de sol	☐	☐	☐	
15	Screeningul multirezidual este aplicat când este justificat	☐	☐	☐	
16	Rezultatele sunt comparate cu cerințele aplicabile	☐	☐	☐	
17	Expunerea consumatorului este evaluată când este necesar	☐	☐	☐	
18	Loturile sunt trasabile	☐	☐	☐	
19	Există o procedură pentru rezultate neconforme	☐	☐	☐	
20	Eficiența măsurilor corective este verificată	☐	☐	☐	



Interpretare

Această listă de verificare reprezintă un instrument operațional al ghidului și nu constituie o procedură de certificare și nici nu înlocuiește cerințele legislative, controalele oficiale sau sistemele de management al siguranței alimentelor.





ANEXA 7. FIȘA DE ACȚIUNE CORECTIVĂ ȘI VERIFICARE

Element	Date
Cod parcelă/lot	
Data identificării	
Contaminant	
Matrice	
Concentrație determinată	
Metoda analitică	
Sursa suspectată	
Investigație efectuată	
Măsură corectivă	
Responsabil	
Termen de realizare	
Data reverificării	
Rezultatul reverificării	
Măsura a fost eficientă?	☐ DA ☐ NU
Acțiuni suplimentare	

A7.1. Ciclul de gestionare

