



UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI
ȘCOALA DOCTORALĂ



Domeniul de doctorat: Mine, Petrol și Gaze

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

*Analiza critică a siturilor contaminate rezultate din
activitatea minieră, cu exeplicare în perimetrele miniere
închise din Valea Jiului*

Coordonator de doctorat:

Prof.univ.dr.ing. RADU Sorin Mihai

Doctorand:

Ing. IONIȚĂ Mădălina-Flavia

PETROȘANI

- 2024 -

CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

ABREVIERI ȘI SIMBOLURI

INTRODUCERE

CAPITOLUL I – GENERALITĂȚI PRIVIND CONCEPTUL DE SIT CONTAMINAT

**CAPITOLUL II – CARACTERISTICI GENERALE ALE BAZINULUI
CARBONIFER AL VĂII JIULUI**

**CAPITOLUL III – INVENTARIEREA SITURILOR CONTAMINATE LA NIVEL
INTERNAȚIONAL**

**CAPITOLUL IV – INVENTARIEREA SITURILOR CONTAMINATE LA NIVEL
NAȚIONAL ȘI REGIONAL**

**CAPITOLUL V – EVALUAREA GRADULUI DE CONTAMINARE A SOLULUI
RECOLTAT DE PE HALDELE DE STERIL INACTIVE DIN VALEA JIULUI**

**CAPITOLUL VI – MĂSURI DE REMEDIERE ȘI GESTIONARE A SITURILOR
CONTAMINATE CU METALE GRELE**

CONCLUZII

CONTRIBUȚII PROPRII

PROPUNERI ȘI RECOMANDĂRI

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

ANEXA 1

ANEXA 2

ANEXA 3

ANEXA 4

CUVINTE CHEIE

Contaminare sol, inventariere sit contaminat, exploatare minieră, halde de steril, metale grele, grad de contaminare, fitoremediere.

Lucrarea de doctorat intitulată „*Analiza critică a siturilor contaminate rezultate din activitatea minieră cu exemplificare în perimetrele miniere închise din Valea Jiului*” se încadrează în domeniul fundamental Științe inginerești precum și în domeniul de doctorat Mine Petrol și Gaze, domeniul de competență științifică a conducătorului de doctorat domnul prof.univ.dr.ing. Radu Sorin Mihai.

În România, cercetările cu privire la analiza siturilor contaminate reprezintă un domeniu în curs de dezvoltare și implementare. Astfel că, în momentul de față Agenția Națională de Protecția Mediului nu furnizează date exacte cu privire la siturile contaminate în urma acțiunilor miniere. În cadrul procesului de armonizare a politicilor naționale cu cele ale Uniunii Europene și de transpunere și implementare a normelor și reglementărilor UE, problema poluării apelor de suprafață, a solului și apelor subterane este unul dintre aspectele fundamentale ale protecției mediului ce trebuie tratat cu responsabilitate de către toți participanții în acest proces.

În cadrul lucrării de doctorat, scopul principal al cercetărilor teoretice și experimentale privește realizarea unei analize critice privind siturile contaminate rezultate din activitatea minieră, cu exemplificare în perimetrele miniere închise din Valea Jiului și soluții de fitoremediere a acestora.

Necesitatea lucrării este în concordanță cu Strategia Națională și Planul Național de acțiune pentru gestionarea siturilor contaminate, și va aborda probleme legate de contaminarea solului ca urmare a activităților industriale desfășurate pe siturile miniere, pentru eliminarea sau limitarea (potențialelor) riscuri pentru sănătatea umană și mediu.

Datele obținute din analiza solului prelevat de pe siturile contaminate din arealul bazinului carbonifer al Văii Jiului vor putea fi integrate într-o bază de date cu inventarierea siturilor contaminate la nivel local și regional.

Lucrarea cuprinde 4 obiective specifice respectiv:

Obiectivul 1: Inventarierea siturilor contaminate la nivel internațional, național și regional;

Obiectivul 2: Evaluarea gradului de contaminare a solului recoltat de pe haldele de steril inactive din Valea Jiului;

Obiectivul 3: Măsuri de remediere și gestionare a siturilor contaminate cu metale grele;

Obiectivul 4: Soluții testate în laborator privind fitoremedierea haldelor de steril din Valea Jiului.

Prezenta lucrare este structurată în șase capitole distincte, fiecare abordând aspecte esențiale ale problematicii siturilor contaminate, urmate de o serie de concluzii, contribuții proprii, sugestii și recomandări, iar la final este prezentată bibliografia utilizată pentru documentarea și elaborarea tezei. În cele ce urmează, am realizat o succintă trecere în revistă a celor șase capitole din structura tezei.

În **CAPITOLUL I**, intitulat **GENERALITĂȚI PRIVIND CONCEPTUL DE SIT CONTAMINAT**, am abordat în detaliu definiția și clasificarea siturilor contaminate, precum și metodologiile utilizate pentru evaluarea și remedierea acestora. Am început prin a defini siturile contaminate ca fiind acele locații unde solul, apa subterană, sau alte elemente ale mediului au fost afectate negativ de prezența unor substanțe periculoase rezultate din diverse activități industriale. Clasificarea acestor situri a fost realizată pe baza tipului și gradului de contaminare, sursei poluării, și riscului potențial pentru sănătatea umană și mediul înconjurător.

În continuare, am detaliat procedurile și criteriile utilizate în evaluarea siturilor contaminate, accentuând importanța evaluărilor preliminare și a investigațiilor detaliate. Aceste evaluări sunt esențiale pentru a determina extinderea contaminării și pentru a prioritiza intervențiile necesare.

Pe lângă aspectele tehnice, acest capitol a evidențiat și cadrul legislativ internațional care reglementează gestionarea siturilor contaminate. Am analizat o serie de politici și reglementări adoptate de organizații internaționale, cum ar fi Uniunea Europeană și Agenția pentru Protecția Mediului din Statele Unite, care stabilesc standarde stricte pentru prevenirea și controlul contaminării mediului. Aceste reglementări nu numai că impun obligații legale pentru industriile responsabile, dar oferă și ghiduri pentru implementarea celor mai bune practici în evaluarea și remedierea siturilor contaminate.

Prin urmare, acest capitol oferă o bază comprehensivă pentru înțelegerea complexității și importanței gestionării siturilor contaminate, subliniind atât aspectele teoretice, cât și pe cele practice și legislative.

În **CAPITOLUL II**, intitulat **CHARACTERISTICI GENERALE ALE BAZINULUI CARBONIFER AL VĂII JIULUI**, am structurat informația astfel încât să ofer o imagine cuprinzătoare și detaliată asupra arealului zonei studiate. Acest capitol este dedicat analizării diferitelor aspecte geografice și climatice ale Văii Jiului, pentru a înțelege mai bine contextul natural în care se află bazinul carbonifer și pentru a fundamenta studiile ulterioare asupra impactului activităților industriale din zonă.

În primul subcapitol, am detaliat relieful și geologia Văii Jiului. Valea Jiului este caracterizată printr-un relief variat, cu munți, dealuri și văi adânci, care influențează distribuția și accesibilitatea resurselor minerale. Structura geologică este complexă, formată din diverse tipuri de roci sedimentare, metamorfice și magmatice, care contribuie la bogăția resurselor de cărbune din zonă. Analiza geologică include și informații despre principalele formațiuni de cărbune și condițiile geologice care au favorizat acumularea acestor resurse.

Subcapitolul următor este dedicată datelor climatice, unde am prezentat informații despre temperatură, precipitații, evapotranspirație și regimul eolian. Climatul în Valea Jiului este temperat-continental, cu variații semnificative de temperatură între anotimpuri. Am inclus date statistice privind temperaturile medii anuale, extremele termice, precum și distribuția sezonieră a precipitațiilor. De asemenea, am abordat fenomenul de evapotranspirație, esențial pentru înțelegerea balanței hidrice și a disponibilității apei în sol.

Regimul eolian și direcția predominantă a vânturilor sunt, de asemenea, analizate în acest capitol. Vânturile din Valea Jiului au un impact semnificativ asupra dispersiei poluanților atmosferici și asupra microclimatului local. Datele colectate indică direcțiile predominante ale vânturilor și vitezele medii anuale, oferind o bază pentru evaluarea riscurilor legate de poluarea aerului.

Hidrografia Văii Jiului este o altă componentă esențială a acestui capitol, unde am descris principalele cursuri de apă, râuri și pâraie care străbat această zonă.

În final, am analizat solurile regăsite în Valea Jiului, oferind informații despre tipurile de soluri, structura și compoziția lor chimică și fizică. Am inclus date despre fertilitatea solurilor, capacitatea de retenție a apei și vulnerabilitatea la eroziune. Aceste caracteristici sunt esențiale pentru planificarea utilizării terenurilor și pentru implementarea măsurilor de remediere în zonele afectate de activitățile miniere.

Astfel, acest capitol oferă o descriere detaliată și integrată a caracteristicilor naturale ale bazinului carbonifer al Văii Jiului, furnizând un context solid pentru analizarea impactului activităților industriale asupra mediului și pentru dezvoltarea strategiilor de remediere și conservare.

În **CAPITOLUL III**, intitulat **INVENTARIEREA SITURILOR CONTAMINATE LA NIVEL INTERNAȚIONAL**, am efectuat o analiză amplă și detaliată a siturilor contaminate la nivel global, concentrându-ne în mod special pe situația din cadrul Uniunii Europene. Această cercetare teoretică a avut ca scop identificarea și cuantificarea siturilor contaminate, precum și evaluarea stadiului de remediere al acestora.

În prima parte a capitolului, am prezentat metodologia folosită pentru colectarea și analiza datelor referitoare la siturile contaminate. Am utilizat surse variate, inclusiv rapoarte oficiale ale agențiilor de protecție a mediului, studii academice și baze de date internaționale. Această abordare ne-a permis să obținem o imagine cât mai completă asupra numărului și distribuției geografice a siturilor contaminate.

Am identificat un număr impresionant de 85.000 de situri contaminate în cadrul Uniunii Europene, rezultate din diverse activități industriale, precum industria chimică, metalurgică, extracția și prelucrarea minereurilor, depozitarea deșeurilor și multe altele. Aceste activități au dus la contaminarea solului, apei subterane și a altor componente ale mediului, prezentând riscuri semnificative pentru sănătatea umană și pentru ecosisteme.

O parte semnificativă a acestor situri contaminate au fost deja remediate sau se află în curs de remediere, datorită eforturilor susținute ale guvernelor naționale, organizațiilor internaționale și sectorului privat. Am discutat despre diversele tehnici și strategii de remediere aplicate, care includ metode fizice, chimice și biologice. De asemenea, am evidențiat importanța evaluării riscurilor și prioritizării intervențiilor în funcție de gravitatea contaminării și impactul potențial asupra mediului și sănătății publice.

În continuare, am comparat politicile și practicile de remediere adoptate în diferite țări și am evidențiat exemple de succes, precum și provocările întâmpinate în procesul de remediere a acestor situri afectate.

Capitolul se încheie cu o discuție despre importanța cooperării internaționale și schimbului de bune practici în gestionarea siturilor contaminate. Am subliniat necesitatea unor politici coerente și a unei finanțări adecvate pentru a aborda în mod eficient problema siturilor contaminate la nivel global. De asemenea, am menționat rolul esențial al educației și al conștientizării publice în promovarea unor practici durabile și responsabile din punct de vedere ecologic.

Astfel, acest capitol oferă o perspectivă comprehensivă asupra stării siturilor contaminate la nivel internațional, evidențiind atât progresul realizat până în prezent, cât și provocările rămase în gestionarea și remedierea acestora. Această analiză constituie o bază solidă pentru dezvoltarea unor strategii eficiente de protecție a mediului și de promovare a durabilității.

În **CAPITOLUL IV**, intitulat **INVENTARIEREA SITURILOR CONTAMINATE LA NIVEL NAȚIONAL ȘI REGIONAL**, am analizat în detaliu situația actuală a siturilor contaminate din România, atât la nivel național, cât și regional. La nivel național, au fost inventariate un total de 210 situri contaminate, fiecare având origini diferite. Județul Hunedoara a fost identificat ca având cel mai mare număr de situri contaminate, cu un total de 41 de situri afectate, reflectând un istoric industrial complex.

În ceea ce privește cercetările efectuate la nivel regional, m-am concentrat pe arealul Văii Jiului, fiind o zonă cu o lungă tradiție în exploatarea resurselor minerale. Studiul actual al activităților miniere din Valea Jiului a relevat existența a 14 exploatări miniere de-a lungul timpului, dintre care, în prezent, doar din două exploatări miniere se mai extrage substanța minerală utilă, respectiv Vulcan și Livezeni, iar celelalte două exploatări miniere, Lupeni și Lonea, se află în plin proces de închidere, reflectând o tranziție industrială și o schimbare în dinamica economică a regiunii.

O parte semnificativă a cercetării mele s-a concentrat pe inventarierea haldelor de steril generate de aceste exploatări miniere. Din cele 14 exploatări miniere, am identificat un total de 49 de halde de steril. Analiza stadiului acestor halde a arătat că 51,03% au fost ecologizate, 18,36% sunt încă active, iar 30,61% sunt inactive.

În cadrul tezei de doctorat, m-am concentrat în mod special pe haldele de steril inactive. Aceste halde pot reprezenta un pericol semnificativ pe termen lung pentru mediu și sănătatea umană dacă nu sunt gestionate și remediate corespunzător.

Prin urmare, acest capitol oferă o perspectivă detaliată asupra stării siturilor contaminate din România, cu un accent pe siturile rezultate în urma activității miniere desfășurate în Valea Jiului. Acest capitol subliniază importanța gestionării proactive și a intervențiilor bine planificate pentru a proteja mediul și sănătatea publică, contribuind la un viitor mai sigur și mai durabil pentru comunitățile afectate de activitățile miniere.

În cadrul **CAPITOLUL V**, intitulat **EVALUAREA GRADULUI DE CONTAMINARE A SOLULUI RECOLTAT DE PE HALDELE DE STERIL INACTIVE DIN VALEA JIULUI**, cercetările s-au desfășurat pe cele 14 halde de steril inactive, rezultate din activitatea minieră, situate de la vest la est pe cuprinsul Văii Jiului.

Un prim pas a fost să realizez o cartare a suprafețelor ce urmează a fi analizate. Conform Ordinului de Ministru nr. 184/1997 (pentru aprobarea Procedurii de realizare a bilanțurilor de mediu), s-au stabilit 17 pct de prelevare.

Prima campanie de prelevare a probelor de sol de pe haldele de steril, a fost realizată în luna iunie a anului 2022, iar cea de-a doua în anul 2023 în aceeași lună.

S-au prelevat probe de sol în conformitate cu cerințele și prevederile standardului (STAS 7184/1:1984). Probele de sol au fost supuse analizelor chimice în Laboratorul de Mediu al Universității din Petroșani rezultând depășiri în toate probele analizate ale concentrațiilor normale admise în sol (Ordinului 756/1997), a mai multor metale grele. S-a constatat că în haldele de steril din partea vestică a Văii Jiului au fost identificate metalele grele precum: (Cr (total), Cu, Ni), iar în partea estică au fost identificate metalele grele (Cr (total), Cu, Ni, Zn, Co și Pb);

Pentru a surprinde cât mai fidel această contaminare, s-a determinat gradul de contaminare a solului prelevat de pe aceste halde de steril prin cinci metode consacrate în acest sent, astfel:

I. Metoda indicelui de geoacumulare (Igeo) a metalelor grele, a constat în utilizarea valorilor determinate în cele 17 puncte de prelevare de pe haldele de steril inactive în intervalul 2022-2023. Din calcule a rezultat că nivelul de poluare cauzat de haldele de steril se încadrează în intervalul 0-1, ceea ce îmi indică un sol nepoluat spre poluat moderat; Valorile cele mai mari ale indicelui de geoacumulare au fost identificate pentru Ni pe haldele de steril Funicular Vechi - Uricani, Bloc 0 - Lupeni, Defor - Petrila, care au depășit 0,80 încadrându-se astfel în clasa de nivel 0-1.

II. Metoda factorului de contaminare (FC), prin intermediul acestei metode s-a calculat inițial indicele de contaminare (IC) pentru fiecare metal greu prezent în probele de sol. Din studiile efectuate în perioada 2022-2023 valorile cele mai mari valori au fost la: Cr (total) pe halda de steril Puț 7 Vest (halda veche) – Vulcan, la Cu cea mai mare valoare a fost înregistrată pe halda de steril Funicular vechi – Uricani, iar la Ni, Zn și Co cele mai mari valori înregistrate au fost pe halda de steril Ramura 1,2,3 și 4 – Petrila;

III. Metoda factorului de contaminare total (FCT), metodă care a permis normalizarea valorilor indicelui de contaminare pentru fiecare metal greu. Din calcule a rezultat că, halda de steril Funicular vechi – Uricani are un factor de contaminare total de 2,69 în anul de studiu 2022 și ușor mai crescut de 2,82 în anul de studiu 2023;

IV. Metoda coeficientului de corelație Pearson, metodă care a permis să determinăm dacă există o asociere între concentrațiile de metale grele în probele de steril din diverse puncte de prelevare ale haldei. S-a constatat că, în perioada celor doi ani de studiu, când concentrațiile Zn, Co și ale Pb sunt mari în materialul steril, concentrațiile metalelor grele Cu și Cr scad, ceea ce ne indică că există interacțiuni între acestea care pot conduce la formarea unor compuși insolubili sau la absorbția lor pe particulele solului, care reduce disponibilitatea altor elemente.

V. Metoda izoliniilor de concentrații a metalelor grele din sol, este o metodă utilizată pentru trasarea liniilor de contur în vederea unirii punctelor de aceeași concentrație a unui metal greu, care a condus la realizarea hărților care ne indică distribuția geografică a

poluanților. După trasarea izoliniilor s-a realizat calculul procentului de variație, care este esențial pentru analiza izoliniilor de concentrații. Această metodă oferă o determinare clară și cuantificabilă a schimbărilor de concentrații ale metalelor grele în sol. Utilizând această metodă am constatat că valorile concentrațiilor metalelor grele în anul de studiu 2023 se modifică pe suprafața de influență la nivelul platoului, ceea ce îmi indică o mobilitate ridicată a acestor metale grele care poate fi cauzată de: pH, vegetație, activitate microbiană, procesele de oxidare a materialului steril, precipitații și infiltrarea apei în corpul haldei, toți acești factori contribuie la dizolvarea compușilor chimici favorizând mobilitatea metalelor grele;

Utilizarea celor cinci metode de evaluare a *gradului de contaminare (GC)* a solului cu metale grele, a condus la identificarea haldelor de steril care afectează solul ca urmare a depozitării materialului steril. Astfel, au fost identificate în partea vestică halda de steril Funicular Vechi-Uricani și în partea estică halda de steril Ramura 1,2,3 și 4 – Perila, acestea au un grad de contaminare al solului mult mai ridicat față de celelalte halde de steril inactive.

În cadrul **CAPITOLUL VI**, intitulat **MĂSURI DE REMEDIERE ȘI GESTIONARE A SITURILOR CONTAMINATE CU METALE GRELE**, s-au analizat dintre multitudinea măsurilor de remediere și gestionare a siturilor contaminate cu metale grele cele mai rapide metode de fitoremediere, și anume: fitostabilizarea, fitoextracția, fitodegradarea și fitovolatilizarea. Aceste tehnici implică utilizarea unor specii de plante capabile să remedieze solurile contaminate cu metale grele prin diferite mecanisme.

Pentru testarea eficienței acestor metode, au fost selectate specii de plante cu capacități specifice de fitoremediere. În laborator s-au aplicat două metode principale: fitostabilizarea și fitoextracția. S-au ales câte trei specii de plante cu capacități diferite de decontaminare a solurilor: plante hiperacumulatoare, plante fitostabilizatoare și plante fitoextractoare.

Astfel, s-au pregătit 27 vase de vegetație în care a fost pus sol prelevat de pe halda de steril Funicular Vechi - Uricani, sol prelevat de pe halda de steril Ramura 1,2,3 și 4 - Petrila și sol probă martor. Aceste două halde de steril au fost selectate datorită diferențelor în conținutul de metale grele între partea vestică și cea estică a bazinului minier al Văii Jiului.

S-au ales plante autohtone, capabile să se dezvolte în apropierea acestor depozite de steril minier, luând în considerare factorii limitativi, ecologici și de vegetație. Plantele hiperacumulatoare selectate au fost: gălbenele (*Calendula officinalis*), mărgăritărel (*Alyssum spp*) și violetă (*Viola calaminaris*). Plantele fitoextractoare alese au fost: lupin (*Lupinus spp*), sunătoare (*Hypericum perforatum*), muștar (*Brassica spp.*), iar plantele fitostabilizatoare alese au fost: trifoi (*Trifolium spp*), mei (*Panicum miliacum*), grâu (*Triticum aestivum*).

Rezultatele experimentului au arătat că, în solul de pe halda de steril Funicular Vechi - Uricani, planta fitoextractoare muștar (*Brassica spp.*) s-a dezvoltat optim. În solul de pe halda de steril Ramura 1,2,3 și 4 - Petrila, planta a avut o bună dezvoltare, iar în solul probă martor a răsărit un singur exemplar. Același comportament a fost observat și pentru planta fitostabilizatoare grâu (*Triticum aestivum*). Specia de plantă mei (*Panicum miliacum*) nu a răsărit în niciunul dintre vase. Celelalte plante au răsărit, dar nu s-au dezvoltat la fel de bine precum cele menționate anterior.

Analiza critică a rezultatelor a indicat că metoda de fitoremediere poate fi adaptată în funcție de specificul fiecărui corp de haldă, ținând cont de concentrația de metale grele și de factorii de vegetație și limitativi ai speciilor de plante utilizate.

Astfel că, fitoremedierea haldelor de steril din bazinul minier al Văii Jiului se dovedește a fi o metodă eficientă și economică, mai ales în contextul lipsei unei strategii de reabilitare ecologică după încetarea activităților miniere. Aceasta poate conduce, în timp, la stabilizarea și eliminarea metalelor grele din mediu, contribuind astfel la reducerea riscurilor pentru sănătatea umană și mediul înconjurător.

În urma activităților de cercetare desfășurate în cadrul tezei de doctorat cu titlul „*Analiza critică a siturilor contaminate rezultate din activitatea minieră, cu exemplificare în perimetrele miniere închise din Valea Jiului*”, s-a conturat **concluzia finală** conform căreia haldele de steril rezultate din activitatea minieră desfășurată în Valea Jiului constituie un pericol semnificativ pentru sănătatea umană și mediul înconjurător. Deși concentrațiile metalelor grele din probele de sol analizate nu ating în mod direct pragurile de alertă stabilite de reglementările în vigoare, vechimea haldelor și condițiile specifice ale acestora contribuie la creșterea mobilității acestor metale.

În timp, procesele de oxidare, eroziune și alte mecanisme naturale pot facilita migrarea metalelor grele, sporind astfel riscul de contaminare a solurilor și apelor din zonele adiacente. Această migrare potențială a contaminanților subliniază necesitatea implementării unor măsuri riguroase de monitorizare și gestionare a acestor situri, pentru a preveni efectele negative pe termen lung asupra mediului și sănătății umane.

Ca urmare a cercetărilor efectuate pe parcursul studiilor doctorale s-au adus **următoarele contribuții proprii:**

- ✓ indentificare haldelor de steril din Valea Jiului;
- ✓ cartarea haldelor de steril inactive;
- ✓ prelevarea probelor de sol de pe cele 14 halde de steril inactive;
- ✓ determinarea metalelor grele din probele de sol în Laboratorul de Mediu al Universității din Petroșani;
- ✓ determinarea gradului de contaminare cu metale grele a solului utilizând cinci metode consacrate, și anume: metoda indicelui de geoacumulare (I_{geo}), metoda factorului de contaminare (FC), metoda factorului de contaminare total (FCT), metoda coeficientului de corelație Pearson, metoda izoliniilor de concentrații pentru metalelor grele din sol;
- ✓ analiza variației gradului de contaminare pentru doi ani de studiu (2022-2023);
- ✓ identificarea factorilor ecologici, limitativi și de vegetație a plantelor care vor fi utilizate în tehnicile de fitoremediere, și anume: plante fitostabilizatoare, fitoextractoare și hiperacumulatoare;
- ✓ identificarea și testarea în laborator a speciilor de plante pretabile a fi utilizate în metoda de fitoremediere;
- ✓ propuneri de metode de fitoremediere a haldelor de steril studiate în vederea reducerii concentrațiilor de metale grele din sol.

În urma finalizării prezentei tezei de doctorat, s-au formulat următoarele **propuneri și recomandări**:

1. Monitorizare și remediere sistematică: Având în vedere concentrațiile de metale grele (Cr total, Cu, Ni, Zn, Co și Pb) care depășesc limitele admise în solurile haldelor de steril studiate, starea ecologică a acestor zone este potențial periclitată. Întrucât riscurile ambientale asociate activităților miniere nu dispar odată cu încetarea acestora, ci dimpotrivă, se pot accentua în lipsa unui control și monitorizări sistematice, se recomandă monitorizarea și remedierea constantă a acestor halde de steril.

2. Utilizarea tehnologiei de fitoremediere: Pentru izolarea metalelor grele din haldele de steril, se recomandă utilizarea metodei de fitoextracție cu muștar (*Brassica spp.*). Aceasta s-a dovedit eficientă în experimentele de laborator și are un potențial ridicat pentru extragerea metalelor grele din sol. De asemenea, specia grâu (*Triticum aestivum*) ar putea fi potrivită pentru imobilizarea metalelor grele datorită proprietăților sale fitostabilizatoare.

3. Implementare experimentală în condiții de teren: Pentru a valida eficiența modelului experimental de fitoremediere, este esențial să se implementeze aceste metode în condiții reale de teren. Aplicarea fitoremedierii cu muștar și/sau grâu ar trebui să fie urmată de tratarea adecvată a biomasei plantelor, inclusiv compactarea, combustia și gazeificarea, procese care ar putea genera energie electrică și termică.

4. Metode combinate de fitoremediere: Datorită faptului că valorile metalele grele din solurile studiate nu depășesc pragurile de intervenție, se poate utiliza o metodă combinată de fitoremediere. Plantele ar trebui utilizate în proporții diferite, în funcție de nivelul de contaminare specific fiecărei halde de steril, suprafața acesteia și mobilitatea metalelor grele.

5. Testarea pretabilității plantelor pentru alte materiale sterile: Este recomandat să se testeze pretabilitatea plantelor alese pentru fitoremediere și pentru alte tipuri de materiale sterile rezultate din diverse activități industriale. Aceasta va permite extinderea aplicabilității tehnologiei de fitoremediere și în alte contexte.

6. Supravegherea continuă a lucrărilor de fitoremediere: Este esențială supravegherea continuă a lucrărilor de fitoremediere și a potențialului de fitoextracție al plantelor alese. Monitorizarea constantă va asigura eficiența procesului și va permite ajustarea metodelor utilizate în funcție de rezultatele obținute.

7. Valorificarea ulterioară a haldeor de steril: După stabilizarea și remedierea haldelor de steril, acestea ar putea fi valorificate ulterior în diverse moduri, cum ar fi transformarea în zone de agrement, utilizarea în producerea de biomasă, în agricultură sau pentru creșterea animalelor. Aceasta nu doar că ar contribui la ameliorarea mediului, dar ar putea aduce și beneficii economice comunității locale.

Implementarea acestor propuneri și recomandări va contribui semnificativ la reducerea riscurilor ecologice și la protejarea sănătății umane, asigurând totodată o utilizare durabilă și benefică a terenurilor afectate de activitățile miniere din Valea Jiului.

Bibliografia reprezintă partea finală a acestei lucrări științifice, cuprinzând o listă exhaustivă a autorilor și titlurilor cărților citate, articolelor publicate în reviste de specialitate, precum și standardele și rapoartele de referință naționale și internaționale.

Aceste surse au fost citate pe parcursul textului și au constituit baza documentării realizate în cadrul cercetării. Bibliografia oferă o imagine detaliată a literaturii de specialitate consultate și asigură credibilitatea și rigorile academice ale lucrării, facilitând totodată verificarea și aprofundarea informațiilor prezentate.