



**UNIVERSITATEA
BABEȘ-BOLYAI**

**FACULTATEA DE ȘTIINȚA
ȘI INGINERIA MEDIULUI**



**UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI,
FACULTATEA DE ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MEDIULUI
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚA MEDIULUI**

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**UTILIZAREA VEGETAȚIEI CA BIOINDICATOR AL
CALITĂȚII FACTORILOR DE MEDIU AER ȘI SOL**

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC,

Prof. univ. dr. ing. Alexandru OZUNU

STUDENT DOCTORAND,

ing. Levente LEVEI

Cluj - Napoca

2023

CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

CUVINTE CHEIE	4
ABREVIERI	5
REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT ÎN LIMBA ROMÂNĂ	7
REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT ÎN LIMBA ENGLEZĂ	8
1. INTRODUCERE	9
2. CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND BIOMONITORIZAREA POLUĂRII CU METALE ..	11
2.1. Poluarea aerului și solului	12
2.1.1. Poluarea cu metale	13
2.2. Riscul asupra sănătății umane	17
2.3. Biomonitorizarea poluării cu metale	19
2.3.1. Biomonitorizarea folosind plante erbacee	24
2.3.2. Biomonitorizarea folosind frunze de arbori	26
2.3.3. Biomonitorizarea folosind mușchi și licheni	30
3. OBIECTIVE	35
4. MATERIALE ȘI METODE	36
4.1. Zone de studiu	36
4.2. Analize chimice	38
4.2.1. Prelevare și pregătire probe	38
4.2.2. Mineralizare probe	39
4.2.3. Determinarea metalelor	39
4.2.4. Determinarea pulberilor în suspensie	40
4.3. Controlul calității rezultatelor	40
5. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND UTILIZAREA PLANTELOR ERBACEE LA BIOMONITORIZARE POLUĂRII SOLULUI CU METALE	41
5.1. Pătlagina (<i>Plantago major</i>)	42
5.1.1. Prelevare și analiză probe de pătlagină și sol	43
5.1.2. Rezultate și discuții	43
5.1.3. Concluzii	50
5.2. Raigras peren (<i>Lolium perenne</i>)	50
5.2.1. Prelevare și analiză probe de raigras și sol	51
5.2.2. Rezultate și discuții	51
5.2.3. Concluzii	58
5.3. Păpădia (<i>Taraxacum officinale</i>)	58
5.3.1. Prelevare și analiză probe de păpădie și sol	59

5.3.2. Rezultate și discuții.....	59
5.3.3. Concluzii.....	68
5.4. Podbal (<i>Tussilago farfara</i>).....	66
5.4.1. Prelevare și analiză probe de podbal și sol.....	66
5.4.2. Rezultate și discuții.....	66
5.4.3. Concluzii.....	73
6. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND UTILIZAREA FRUNZELOR DE CONIFERE ȘI FOIOASE CA BIOMONITORI AI POLUĂRII AERULUI.....	74
6.1. Tuia.....	74
6.1.1. Prelevare și analiză probe tuia și particule în suspensie	75
6.1.2. Rezultate și discuții.....	75
6.1.3. Concluzii.....	78
6.2. Plop.....	78
6.2.1. Prelevare și analiză probe de frunze de plop și particule în suspensie	79
6.2.2. Rezultate și discuții.....	80
6.2.3. Concluzii.....	87
6.3. Biomonitorizarea simultană cu frunzele de plop și de tuia.....	87
6.3.1. Prelevare probe.....	88
6.3.2. Rezultate și discuții.....	89
6.3.3. Concluzii.....	95
7. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND BIOMONITORIZAREA ACTIVĂ CU MUȘCHI A POLUĂRII AERULUI CU METALE.....	96
7.1. Pregătirea și expunerea săculețului cu mușchi.....	97
7.2. Rezultate și discuții.....	99
7.2.1 Acumularea metalelor în mușchii vitali și devitalizați	99
7.2.2. Biomonitorizarea cu mușchi vitali unor zone cu trafic diferit.....	109
7.3. Concluzii.....	113
8. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND RISCUL ASUPRA SĂNĂTĂȚII UMANE CAUZAT DE CONSUMUL DE ALIMENTE POLUATE CU METALE ȘI INHALAREA DE AER POLUAT.....	114
8.1. Riscul asupra sănătății a consumului de produse vegetale poluate cu metale	116
8.1.1. Prelevare și analiză probe	116
8.1.2. Rezultate și discuții.....	116
8.1.3. Concluzii.....	120
8.2. Riscul asupra sănătății a consumului de produse animale (lapte) poluate cu metale.....	121
8.2.1. Prelevare și analiză probe	121
8.2.2. Rezultate și discuții.....	122
8.2.3. Concluzii.....	125

8.3. Riscul asupra sănătății a inhalării de aer poluat cu PM10	126
8.3.1. <i>Analiză și prelucrare date</i>	126
8.3.2. <i>Rezultate și discuții</i>	127
8.3.3. <i>Concluzii</i>	130
9. CONCLUZII GENERALE.....	131
10. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE VIITOR.....	134
10.1. Contribuții personale.....	134
10.2. Perspective de viitor.....	135
LISTA PUBLICAȚIILOR ȘI PARTICIPĂRILOR LA MANIFESTĂRI ȘTIINȚIFICE	136
LISTA TABELELOR.....	139
LISTA FIGURILOR.....	140
BIBLIOGRAFIA	142

CUVINTE CHEIE

Biomonitorizarea poluării cu metale

Transferul sol-plantă al metalelor

Bioacumularea metalelor

Concentrația PM10 în aer

Metoda săculețului de mușchi

Riscul asupra sănătății umane

1. INTRODUCERE

Organismul uman este într-un permanent schimb de substanțe cu mediul înconjurător, de aceea calitatea factorilor de mediu (apă, aer, sol) este un indicator al calității vieții. Acest lucru este cu atât mai important cu cât expunerea la poluare crește probabilitatea de a dezvolta diferite patologii (Roba et al., 2016; Miclean et al., 2018; Miclean et al., 2019).

Solul este considerat o resursă naturală finită, o componentă esențială în producerea de hrană, combustibili și fibre, precum și furnizorul unui număr important de servicii ecosistemice. Totodată, solul este atât sursă cât și receptor final pentru numeroși poluanți. Aerul este de asemenea, o componentă indispensabilă vieții, fiind o verigă importantă în ciclul carbonului, apei și azotului dar și sursă pentru un număr mare de poluanți.

Metalele sunt poluanți larg răspândiți și persistenți în mediu, cu potențial toxic chiar și la nivele reduse de expunere (Drava et al., 2016). Evaluarea poluării cu metale se poate efectua direct, prin determinarea conținutului de metale și compararea valorilor obținute cu valorile limită prevăzute în legislație sau cu valori de referință pentru o anumită zonă, sau indirect, prin biomonitorizare (Pavlovic et al., 2017). Determinările fizico-chimice oferă o imagine cantitativă a dispersiei poluanților în mediu dar biomonitorizarea oferă informații despre efectele poluanților asupra organismelor vii și despre tendința de evoluție pe termen lung a ecosistemelor (Ajtai et al., 2020; Rai, 2016).

În acest context, teza de doctorat prezintă diferite metode de biomonitorizare a poluării aerului și solului în zone urbane și industriale și identificarea riscului asupra sănătății umane în urma expunerii la alimente și aer contaminat. Au fost identificate specii de plante erbacee, foioase și conifere care pot fi utilizate ca biomonitori activi ai calității aerului și solului, a fost determinat conținutul de metale în sol, aer și biomonitori și a fost studiat transferul metalelor între sol și biomonitor precum și, între aer și biomonitor. De asemenea, a fost biomonitorizată poluarea aerului folosind metoda săculețului cu mușchi și a fost evaluat riscul de apariție a unor efecte negative asupra sănătății populației prin consum de legume, fructe și lapte și prin inhalarea aerului poluat cu particule în suspensie și metale.

2. CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND BIOMONITORIZAREA POLUĂRII CU METALE

Biomonitorizarea este una dintre abordările alternative ale monitorizării poluării mediului și reprezintă folosirea organismelor vii sau a răspunsului lor pentru a determina calitatea sau schimbările intervenite în mediul înconjurător sub influența activităților antropice. Biomonitorizarea este pasivă dacă se folosesc organisme vii native din zona de studiu sau activă, dacă organismele vii sunt transplantate din habitatul lor natural în zona de studiu (Levei et al., 2020a; Swislawski et al., 2021; Wolterbeek, 2002; Conti & Cecchetti, 2001; Asgari & Amini, 2011; Schreck et al., 2016).

Acumularea metalelor prin suprafața foliară sau prin rădăcină este guvernată de mecanisme diferite. Absorbția prin rădăcină este influențată de specia de plantă, chimia metalului, tipul de sol, granulația solului, activitatea microbiană, capacitatea de schimb cationic, conținutul de materie organică și pH-ul solului. Acumularea metalelor prin frunze este guvernată de chimia metalului, caracteristicile suprafeței frunzei, compoziția cuticulei, maturitatea frunzelor, vârsta frunzei (Levei et al., 2021). Depunerea poluanților din aer pe suprafața frunzelor depinde de forma coronamentului (densitatea ramurilor și a frunzelor), sarcina electromagnetică a suprafeței frunzei, structura frunzei (forma, înclinația frunzei, aria, morfologia, grosimea stratului de ceară de pe frunze) și densitatea stomatelor (Levei et al., 2020c; Wroblewska & Jeong, 2021; Rodriguez-Santamaria et al., 2022; Shahid et al., 2017). Astfel, frunzele aciculare ale coniferelor pot capta mai eficient particulele în suspensie decât cele ale speciilor de foioasele. Rugozitatea și grosimea frunzelor tinere diferă de cele ale frunzelor senescente. Frunzele tinere au cuticule mai subțiri și mai permeabile iar stratul de ceară epicuticulară este mai subțire, de aceea frunzele tinere acumulează cantități mai ridicate de metale (Shahid et al., 2017). Metalele acumulate prin rădăcină sunt sechestrate în rădăcini sau în vacuolele celulare prin precipitarea metalelor sub formă de săruri insolubile, translocarea în părțile supraterane fiind limitată, cu excepția plantelor hiperacumulatoare (Levei et al., 2017).

Nivelul de sensibilitatea și tipul de răspuns la poluarea cu metale diferă de la specie la specie. Plantele sensibile la poluanți care prezintă diferite simptome vizibile (cloroza frunzei, căderea frunzelor, scăderea biomasei) în prezența unor concentrații fitotoxice de metale se pot folosi ca bioindicatori în timp ce, plantele care tolerează cantități ridicate de poluanți, ca biomonitori. Alegerea biomonitorului trebuie să țină cont nu doar de prezența sa în zona poluată ci și de

specificitatea sa. Astfel, plantele erbacee pot acumula metale predominant din sol, în timp ce arborii și mușchii, predominant din aer (Wolterbeek, 2002; Levei et al., 2018). Alți factori care pot influența acumularea metalelor în plante sunt macro- și microclimatul zonei studiate, aciditatea, altitudinea, prezența elementelor nutritive, umiditatea, etc.

Cea mai aplicată metodă de biomonitorizare activă a poluării este metoda săculețului cu mușchi (Stefanut et al., 2019; Ares et al., 2014). Metoda se bazează pe folosirea unor specii de mușchi transplantate din zone nepoluate în zona de studiu pentru un anumit interval de timp. Metoda săculețului cu mușchi este o alternativă simplă, ieftină și ușor de aplicat în orice zonă geografică indiferent de gradul de antropizare și permite obținerea unor date despre poluarea aerului cu metale pe diferite intervale de timp bine stabilite (Anicic et al., 2009; Hu et al., 2018; Stefanut et al., 2019). Spre deosebire de metodele instrumentale care măsoară concentrația de metale din particulele în suspensie de diferite dimensiuni pe intervale scurte de timp (de la minute la 24 de ore) și oferă informații despre concentrațiile instantanee sau cel mult zilnice ale metalelor, metoda săculețului cu mușchi oferă informații despre concentrația medie a metalelor, pe intervale lungi de timp (Levei et al., 2020b; Vukovic et al., 2016). Mușchii din genul *Sphagnum* sunt cei mai folosiți pentru săculeții cu mușchi datorită capacității lor ridicate de a acumula metale, dar prezența lor este endemică și protejată, fiind astfel necesară identificarea altor genuri sau specii de mușchi pentru aplicarea la scară largă a acestei metode (Milicevic et al., 2017). Alternative posibile pentru genul *Sphagnum* sunt *Hypnum cupressiforme* (Milicevic et al., 2017) sau *Hylocomium splendens* (Ștefănuț et al., 2019). Cantitatea de metale reținute în săculeții de mușchi depinde de modul de pregătire (specia de mușchi, vital sau devitalizat, forma săculețului, raportul dintre cantitatea de mușchi și suprafața săculețului, dimensiunea ochiurilor materialului din care este făcut săculețul, etc.), modul de expunere (înălțime, durată, grade de mobilitate) al săculețului cu mușchi dar și de caracteristicile zonei de studiu.

3. OBIECTIVE

Obiectivul general al tezei este biomonitorizarea calității solului și aerului în zone urbane și industriale folosind specii de plante erbacee, conifere, foioase și mușchi. În acest sens a fost studiată capacitatea unor specii de plante erbacee și lemnoase de a acumula metale din sol și aer. De asemenea, pentru biomonitorizarea calității aerului în zonele urbane în care vegetația lipsește a fost aplicată metoda săculețului de mușchi.

Obiectivele specifice ale tezei sunt:

1. *Biomonitorizarea pasivă a poluării solului cu metale folosind specii de plante erbacee.*

Pentru realizarea acestui obiectiv au fost corelate concentrațiile de metale cu potențial toxic din sol cu cele din frunzele de pătlagină, păpădie, podbal și raigras colectate din zone urbane și industriale cu diferite grade de poluare.

2. *Biomonitorizarea pasivă a poluării aerului cu metale și particule în suspensie folosind specii de conifere și foioase.* Pentru realizarea acestui obiectiv au fost corelate concentrațiile de particule în suspensie și metale din aer cu cele din frunzele de tuia și plop din zone urbane.

3. *Biomonitorizarea activă a poluării aerului cu metale și particule în suspensie folosind metoda săculețului de mușchi cu mușchi vitali și devitalizați.* Pentru realizarea acestui obiectiv a fost studiat modul optim de pregătire a săculeților de mușchi și modul de acumulare a metalelor în mușchii vitali și cei devitalizați. De asemenea, a fost biomonitorizată poluarea aerului cu particule în suspensie și metale pe o perioadă de 6 luni, rezultatele biomonitorizării fiind corelate cu intensitatea traficului rutier.

4. *Evaluarea riscului de sănătate prin consum de alimente contaminate cu metale și a inhalării de aer cu concentrații ridicate de pulberi în suspensie.* Pentru realizarea acestui obiectiv a fost evaluat riscul carcinogenic și non-carcinogenic pentru diferite grupe de populație prin consumul de produse alimentare vegetale (legume și fructe) și animale (lapte) contaminate cu metale și prin expunerea la aer poluat cu particule în suspensie (PM10).

4. MATERIALE ȘI METODE

Au fost alese cinci zone de studiu situate în partea de vest și nord-vest a României după cum urmează: orașele Cluj-Napoca și Copșa Mică și zonele miniere Baia-Mare, Arieș și Certej.

Conținutul de metale din probele de sol, aer, vegetale și alimente s-a determinat prin spectrometrie de emisie optică cu plasmă cuplată inductiv (ICP-OES) folosind echipamentul 5300 Optima DV (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA) sau prin spectrometrie de masă cu plasmă cuplată inductiv (ICP-MS) folosind echipamentul ELAN DRC II (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA), în funcție de concentrația metalului.

Pulberile în suspensie, PM10, PM2,5 și PM1 au fost măsurate cu numărătorul optic de particule portabil 831 Aerocet (Met One Instruments, Washington, US).

Concentrația zilnică de PM10 a fost determinată gravimetric prin colectarea particulelor de PM10 timp de 24 de ore pe filtre de fibră de sticlă cu diametrul de 150 mm (MG227/1/60, Sartorius, Gottingen, Germania) preconditionate la masă constantă folosind un prelevator DHA-80 (Digitel Elektronik GmbH, Burs, Austria) cu un debit de 500 L/min. După prelevare, filtrele au fost condiționate, iar concentrația de PM10 determinată gravimetric folosind balanța analitică.

CONTRIBUȚII PERSONALE

5. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND UTILIZAREA PLANTELOR ERBACEE LA BIOMONITORIZAREA POLUĂRII SOLULUI CU METALE

Poluarea solului în zonele miniere și zonele urbane a fost biomonitorizată folosind frunzele de pătlagină (*Plantago major*), raigras peren (*Lolium perenne*), păpădie (*Taraxacum officinale*) și podbal (*Tussilago farfara*) (Figura 1).



Pătlagina
(*Plantago major*)



Raigras peren
(*Lolium perenne*)



Păpădia
(*Taraxacum officinale*)



Podbal
(*Tussilago farfara*)

Figura 1. Specii de plante erbacee folosite la biomonitorizarea poluării solului (sursa: ISA, 2023)

Pătlagina este larg răspândită atât în zonele urbane cât și în cele industriale, crește în medii sărace în nutrienți și este ușor de recunoscut, fapt pentru care este un potențial biomonitor al poluării cu metale. Rezultatele obținute evidențiază capacitatea moderată a pătlaginii de a acumula Zn, Cu, Cd, Ni, Cr și Pb din sol ($TF < 0,5$) Dependența relativ liniară a concentrației de Pb și Zn din sol și plantă recomandă utilizarea pătlaginii pentru biomonitorizarea poluării moderate a solului cu Pb și Zn.

Raigrasul este larg răspândit în special în zonele periurbane și fânațe, dar poate fi întâlnit și în zonele industriale intens poluate. Deși acumulează cantități importante de metale, în special Pb, factorul de transfer nu a depășit valoarea de 0,5 decât în câteva cazuri. Dependența liniară între concentrația de metale în raigras și sol a fost observată doar în cazul Zn pe tot domeniul de concentrație studiat și pentru Cu și Pb la concentrații sub 1000, respectiv 2000 mg/kg. Acest fapt sugerează că raigrasul poate fi folosit pentru biomonitorizarea poluării cu Zn în cazul solurilor puternic poluate și a biomonitorizării Cu și Pb în cazul solurilor moderat contaminate.

Păpădia nu hiperacumulează nici unul din metalele studiate, dar poate fi utilizată ca biomonitor al poluării cu Zn, Pb și Ni în zonele urbane, unde concentrația acestor elemente este moderat-ridicată și există o corelație liniară între concentrația de metale în frunzele de păpădie și în sol. La concentrații mai ridicate de metale intervin mecanismele fiziologice de excludere care protejează planta de efectele toxice.

Podbalul are o toleranță ridicată la concentrații mari de metale toxice a căror absorbție o limitează, factorul de transfer al metalelor fiind în general sub 0,5, independent de conținutul acestora în sol. Concentrația de Cu, Pb și Zn în podbal variază linear cu concentrația acestor metale în sol ceea ce arată că acesta poate fi utilizat ca bioindicator al poluării moderate a solului cu Cu, Pb și Zn.

6. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND UTILIZAREA FRUNZELOR DE CONIFERE ȘI FOIOASE CA BIOMONITORI AI POLUĂRII AERULUI

6.1. Tuia

Cedru alb (*Thuja occidentalis*) numit popular și tuia este o specie de conifere din familia Cupressaceae, de dimensiuni mici sau mijlocii, folosit frecvent ca arbore ornamental sau gard viu. Pentru a evalua potențialul frunzelor de tuia de a fi utilizate în biomonitorizarea poluării aerului cu Cu, Pb, Zn, Ni a fost determinată concentrația de metale în frunzele de tuia și concentrația de particule în suspensie din diferite zone ale orașului Cluj-Napoca și Copșa Mică, iar rezultatele obținute au fost comparate cu intensitatea traficului.

Concentrația de Pb și Cr în frunzele de tuia din zonele cu trafic redus și trafic intens a fost comparabilă, dar concentrația de Cu, Zn și Ni a fost de două (2) ori mai mare în zonele cu trafic intens decât în cele cu trafic redus. Acest fapt sugerează că frunzele de tuia sunt buni bioindicatori ai poluării cu Cu, Zn și Ni. Concentrația de metale în frunzele de tuia a crescut în ordinea $Pb < Cr < Ni < Cu < Zn$ atât în Cluj-Napoca cât și în Copșa Mică. Particulele cu diametrul cuprins între 2,5-10 μm au fost fracția majoră a TSP, urmate de PM1 și PM1-2,5 atât în zonele cu trafic intens, cât și în zonele cu trafic redus. Concentrația particulelor în suspensie din aer în orașul Cluj-Napoca a fost corespunzătoare, PM10 fiind mai ridicată în zonele cu trafic intens comparativ cu cele cu trafic redus, ceea ce confirmă faptul că traficul reprezintă o sursă importantă de particule în suspensie și de metale.

6.2. Plop

Plopul (*Populus spp.*) este o specie de foioase aparținând familiei Salicaceae, potrivită pentru biomonitorizarea poluării aerului, datorită sensibilității ridicate a frunzelor la poluarea cu metale (Yalaltdinova et al., 2018). Plopul este un arbore cu creștere rapidă, are un sistem radicular extins, este rezistent la secetă, furtuni și vreme rece, produce biomasă în cantități ridicate, rezistă în zonele sărace în nutrienți, și tolerează cantități ridicate de metale (Chandra & Kang, 2016; He et al., 2012). Plopul acumulează metalele prin sistemul radicular și frunze, și le depozitează în frunze prin procesul de translocare (Lepp & Madejon, 2007; Unterbrunner et al., 2007).

În punctele de prelevare, factorul de îmbogățire a PM10 în Co, Mn, Ni și Fe a fost mai mic decât 10, indicând lipsa de îmbogățire, prezența acestor metale fiind cel mai probabil legată de

scoarța terestră și nu de surse antropice. Factorul de îmbogățire a Cu, Pb și Zn a fost <100, indicând o îmbogățire moderată, aceste metale având origine mixtă, naturală și antropică, în timp ce factorul de îmbogățire a Cd a fost 230, indicând o îmbogățire ridicată și, prin urmare, originea antropică a acestuia. Concentrația de metale în frunzele de plop a variat de la metal la metal însă nivelul fitotoxic nu a fost atins pentru nici unul dintre metalele analizate. În toate zonele studiate, concentrația de Cu a fost scăzută, iar cea de Cd ridicată, în acord cu conținutul de metale în PM10. Concentrația de Pb a fost scăzută (<3 mg/kg) în frunzele de plop, fiind cu mult sub nivelul toxic (>20 mg/kg) (Hajar et al., 2014). O posibilă cauză a conținutului scăzut de Pb în frunze ar putea fi absorbția preferențială a Pb prin sistemul radicular și nu prin frunze, precum și translocarea redusă a Pb în frunze (Madejon et al., 2004). Concentrația totală medie de metale în frunzele de plop este alcătuită din 46% Zn, 23% Fe, 14% Mn și 12% Al. Deși metalele emise de diferite surse de poluare se pot lega cu ușurință de particulele din aer și apoi se depun pe suprafața frunzelor, acumularea lor în frunzele de plop depinde atât de condițiile meteorologice cât și de fiziologia fiecărui arbore. Concentrațiile mari de Zn determinate în frunzele de plop se pot explica prin aceea că plopul este un bun acumulator de Zn ceea ce îl recomandă nu doar pentru biomonitorizare ci și pentru utilizarea lui ca barieră naturală pentru reținerea Zn.

Valorile moderate obținute pentru factorul de îmbogățire a Cu, Pb și Zn în PM10 precum și valorile mari pentru factorul de îmbogățire a Cd în PM10 arată că, cel mai probabil, Cd are origine antropică, în timp ce celelalte metale au origine mixtă. Traficul și arderea deșeurilor sunt principala sursă de Cu și Zn, praful este sursa de Fe, Pb, Mn, Co iar poluarea solului este sursa de Pb, Cu, Ni în frunzele de plop.

7. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND BIOMONITORIZAREA ACTIVĂ CU MUȘCHI A POLUĂRII AERULUI CU METALE

Pentru a evalua / biomonitoriza poluarea aerului cu metale (Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Ni, Cr) în orașul Cluj-Napoca s-a determinat concentrația de metale în săculeții cu mușchi expuși timp de 7 luni în diferite zone ale orașului. Concentrația de metale din mușchi a fost corelată cu cea de PM10 și metale în PM10, precum și cu nivelul de trafic din zonele biomonitorizate. De asemenea, au fost comparate rezultatele obținute folosind atât mușchi vitali cât și devitalizați. Cu excepția unui punct de biomonitorizare situat într-o zonă rezidențială cu trafic redus, factorul relativ de bioacumulare (RAF) a fost supraunitar la Cu în mușchii vitali indicând o acumulare considerabilă a Cu. Pentru celelalte elemente valorile factorului relativ de bioacumulare au diferit de la probă la probă, atât pentru mușchii vitali cât și pentru cei devitalizați, dar pentru fiecare din metalele studiate $RAF > 0,5$ în cel puțin una din probe (Figura 2), iar factorul de acumulare cumulat este supraunitar în toate probele, indicând o acumulare considerabilă a metalelor.

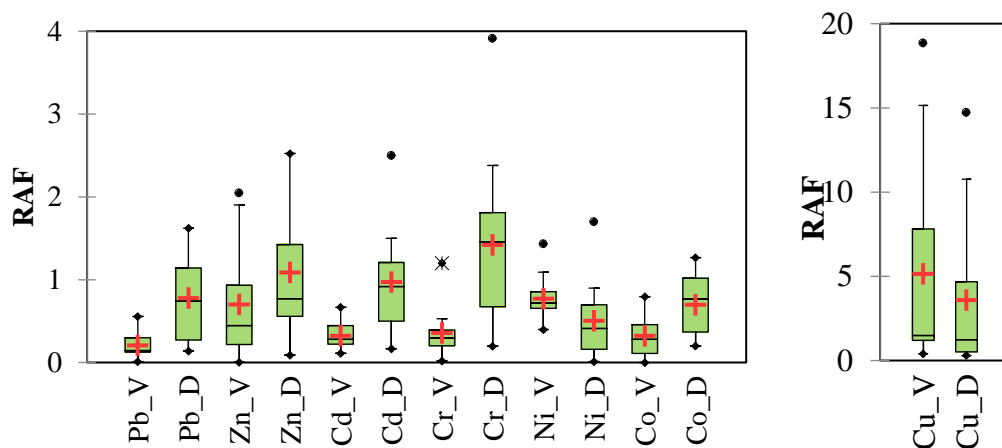


Figura 2. Factorul relativ de acumulare (RAF) pentru săculeții cu mușchi vitali (V) și devitalizați (D) (•Minim/Maxim, +Medie, —Mediana, * Extremă)

Cuprul și Zn reprezintă 75% din totalul metalelor bioacumulate în săculeții cu mușchi. Îmbogățirea ridicată a Cu, moderată a Zn, Cd, Ni și lipsa îmbogățirii în Pb, Cr și Co în mușchi arată că gazele de eșapament (Co, Cr, Ni) au o pondere mai scăzută în poluarea aerului decât emisiile datorate uzurii sistemului de rulare (Cu, Zn). Corelația dintre numărul de vehicule care tranzitează zona biomonitorizată și concentrația de TSP, PM10, PM2,5 și PM1 a confirmat faptul că traficul este o sursă importantă de pulberi în suspensie în zonele urbane, dar nu există o corelație liniară

între concentrația de metale în mușchi și concentrația de particule în suspensie. Mecanismul principal de acumulare a metalelor în mușchi este prin adsorbție, fenomenele fiziologice având doar un rol secundar. Absorbția preferențială a unor elemente în defavoarea altora se datorează competiției între elemente în procesul de schimb cationic dintre suprafața mușchilor și peretele celular. Concentrațiile diferite de metal în mușchii expuși în diferite zone ale orașului arată existența unor fluctuații locale ale concentrației de particule în suspensie în aer și a compoziției acestor particule. Concentrația de metale acumulate în mușchi a permis diferențierea zonelor cu trafic intens de cele cu trafic redus. Metoda săculețului cu mușchi este potrivită pentru evaluarea pe termen lung la o rezoluție spațială ridicată a distribuției metalelor în aerul ambiental și este o alternativă atractivă la metodele instrumentale de monitorizare a calității aerului.

8. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND RISCUL ASUPRA SĂNĂTĂȚII UMANE CAUZAT DE CONSUMUL DE ALIMENTE POLUATE CU METALE ȘI INHALĂRII DE AER POLUAT

8.1. Riscul asupra sănătății cauzat de consumul de produse vegetale poluate cu metale

Legumele și fructele reprezintă o sursă importantă de carbohidrați, vitamine, fibre și elemente esențiale pentru dieta umană. Dacă sunt cultivate în zone poluate, ele pot acumula elemente toxice din sol sau aer, iar prin consumul lor, elementele toxice ajung în organismul uman generând efecte adverse (Demkova et al., 2017). Riscul asupra sănătății umane cauzat de consumul de produse vegetale poluate cu metale, legume și fructe cultivate în gospodării în două localități din județul Maramureș, situate în vecinătatea haldelor de steril a fost evaluat prin calculul coeficientului de hazard țintă (THQ). Riscul estimat se bazează pe presupunerea unui aport zilnic estimat calculat pentru consumul zilnic de 100 g de cartofi, 250 g de legume și 65 g de fructe la o persoană de 70 kg.

Coeficientul de hazard țintă (figura 3) este mai ridicat la legume decât la fructe și cartofi, fiind subunitar pentru toate clasele de vegetale și toate metalele cu excepția Pb în legume. Valoarea THQ cumulat pentru toate vegetalele scade în ordinea Pb>Cd>Cu>Zn, fiind subunitar pentru Cd (0,59), Cu (0,36) și Zn (0,18) și supraunitar pentru Pb (1,2), ceea ce arată existența riscului de îmbolnăvire în urma consumului de legume contaminate. Consumul de cartofi și fructe cultivate în zone poluate nu prezintă risc de îmbolnăvire.

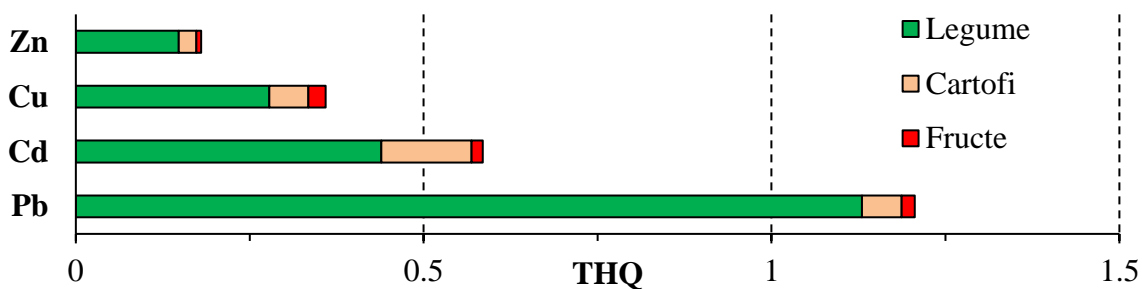


Figura 3. Coeficientul de hazard țintă (THQ) datorat consumului de legume, cartofi și fructe

Indicele de risc cancerigen total (TCR) mai mare de 1×10^{-4} a indicat existența unui risc ridicat de dezvoltare a unor patologii neoplazice prin consumul îndelungat de vegetale contaminate. Reducerea la jumătate a consumului zilnic de legume contaminate nu reduce riscul de dezvoltare a unor patologii cronice (HI scade de la 2,33 la 1,33) și nici a patologiilor neoplazice (TCR scade de la $8,71 \times 10^{-4}$ la $4,36 \times 10^{-4}$). Este posibil ca riscul estimat să fie subevaluat având în vedere că studiul nu a inclus toate elementele prezente în dieta populației.

8.2. Riscul asupra sănătății cauzat de consumului de lapte produs în zone poluate

Alimentele de origine animală cum sunt lactatele au o pondere importantă în dieta umană, în special în cea a copiilor, datorită conținutului bogat în proteine, vitamine și minerale (Lucey, 2015). Deși laptele este un element important în coșul zilnic, datele cu privire la prezența unor elemente esențiale și toxice în laptele produs de micii fermieri sunt limitate. Sol → furaj → animal → lapte → consumator este un exemplu de lanț trofic prin care metalele toxice pot fi transferate indirect din sol în diferite ierburi folosite ca hrană pentru animale și apoi, în organismul uman. Evaluarea riscului potențial asupra sănătății umane cauzat de consumul de lapte produs în zone poluate s-a realizat prin analiza conținutului de metale din probe de lapte provenit de la vaci crescute în ferme familiale din zona postminieră Baia Mare.

Laptele local produs în zone postminiere contaminate conține concentrații reduse de Cu și Zn și ridicate de Pb și Cd. Aportul mediu zilnic și aportul mediu săptămânal estimate sunt mai mici decât valorile stabilite drept tolerabile. Valoarea coeficientului de hazard țintă (THQ) a fost subunitară atât pentru adulți cât și pentru copii la toate metalele studiate, fapt ce indică lipsa riscului asupra sănătății umane prin consum de lapte produs în zonele contaminate. Valoarea medie a THQ

scade în ordinea $Zn > Cd \geq Cu > Pb$ pentru toate grupele de populație, și nu diferă semnificativ la bărbați și femei, dar este mai ridicată la copii.

Valorile medii ale indicelui de risc carcinogenic sunt mai mari la Cd atât la adulți cât și la femei, în timp ce la Pb sunt mici la adulți și ușor mai mari la copii decât limita acceptabilă de risc (1×10^{-6}). Indicele de risc cancerigen total a fost peste limita acceptabilă, fapt ce indică prezența riscului de dezvoltare a unor patologii neoplazice în urma consumului pe termen lung de lapte. Deși organismul uman are mecanisme specializate prin care reacționează la prezența unor elemente toxice, acestea fiind eliminate parțial prin excreție, o atenție deosebită trebuie acordată calității alimentelor în special la copii.

8.3. Riscul asupra sănătății prin expunerea la aer poluat cu PM10

În ultimii ani, episoadele de poluare a aerului, în special cu particule fine și ultrafine sunt din ce în ce mai frecvente, fiind raportate depășiri ale concentrațiilor maxime admise, în special în orașele mari (Gruszecka-Kosowska, 2018). Poluarea aerului afectează negativ sănătatea umană, în special tractul respirator și sistemul cardiovascular ducând la o creștere a mortalității și morbidității populației expuse (Levei et al., 2020; Chalvatzaki et al., 2019). Metalele sunt adsorbite pe suprafața particulelor în suspensie care, prin inhalare, pot determina inflamația tractului respirator precum și alterarea ADN (Gruszecka-Kosowska, 2018).

Indicele de risc (HQ) calculat pe baza mediei măsurărilor zilnice ale concentrației de PM10 realizate de Agenția de Protecție a Mediului în Cluj-Napoca în perioada 2009-2019 și a concentrației limită stabilite de Directiva 2008/50/CE (scenariul optimist) prezintă valori între 0,2 și 1,1, indicând un risc potențial în perioada 2009-2010 și lipsa riscului în ceilalți ani. În scenariul pesimist, HQ calculat pe baza percentilei de 90 a concentrațiilor zilnice de PM10 măsurate variază între 0,2 și 1,6 și arată existența câtorva luni în fiecare an, în special în sezonul rece, în care valoarea de prag este depășită. HQ calculat pe baza valorii de referință stabilite de WHO variază între 0,4-2,1 pentru scenariul optimist și, 0,5-3,2 pentru scenariul pesimist, indicând risc potențial în lunile reci (Octombrie-Martie), respectiv risc în aproape toate lunile din perioada studiată.

Valorile supraunitare ale HQ arată că apariția efectelor negative asupra sănătății populației sunt probabile chiar și la concentrații ale PM10 sub valorile limită stabilite de legislație. În general, indicele de risc a fost mai ridicat pentru stațiile de monitorizare din urban și suburban decât la cele de tip industrial și tip trafic. Datele scenariului optimist arată că probabilitatea ca locuitorii orașului

Cluj-Napoca să dezvolte patologii cronice asociate cu PM10 sunt reduse, dar în scenariul pesimist probabilitatea crește. Expunerea simultană la PM10 și la alți poluanți existenți în aerul ambiant crește semnificativ probabilitatea de apariție a unor patologii respiratorii și cardiovasculare.

Riscul asupra sănătății a fost calculat pe baza unor presupuneri în ceea ce privește comportamentul locuitorilor și numărul de ore petrecute în zona studiată, neglijând unele comportamente individuale. De asemenea, media concentrației de PM10 de la cele 4 stații de monitorizare a fost considerată ca fiind reprezentativă pentru întregul oraș. Cu toate aceste limitări ale studiului, rezultatele pot sta la baza elaborării unor măsuri de reducere a poluării și a dezvoltării unor politici de sănătate publică. Una din măsurile de reducere a impactului sănătății asupra organismului uman este reducerea numărului de ore petrecute în mediul urban în favoarea unor zone curate.

9. CONCLUZII GENERALE

Teza de doctorat prezintă o serie de studii de biomonitorizare pasivă și activă a poluării cu metale în diferite zone industriale și urbane folosind plante erbacee, frunze de conifere, frunze de foioase și săculeți cu mușchi. De asemenea, a fost evaluat riscul de apariție a unor boli cronice și neoplazice ca urmare a consumului unor produse vegetale și animale contaminate în zona minieră Baia-Mare precum și riscul reprezentat de poluarea aerului cu particule în suspensie în zona urbană Cluj-Napoca.

În prima parte a tezei de doctorat este prezentată o trecere în revistă a literaturii de specialitate cu privire la poluarea aerului și solului cu metale, metodele de biomonitorizare a poluării cu metale precum și evaluarea riscului asupra sănătății umane prin expunere la metale în urma ingestiei de alimente contaminate și expunerea la aer poluat. Studiul literaturii științifice a permis identificarea unor specii de plante cu potențial de biomonitorizare dar și lipsa unor metode standardizate de biomonitorizare care să permită compararea rezultatelor diferitelor studii. Se remarcă numărul foarte redus de studii de biomonitorizare existente la nivel național cât și lipsa studiilor de biomonitorizare activă a poluării aerului cu metale asociate cu particule în suspensie.

În partea a doua a tezei de doctorat este prezentată contribuția originală și anume: obiectivele tezei de doctorat, metodologia de lucru, zonele studiate, precum și rezultatele experimentale obținute. Astfel, în urma studiilor efectuate s-a demonstrat că metodele de biomonitorizare pasivă

a poluării solului cu metale folosind plante erbacee, a poluării aerului cu particule în suspensie și metale folosind frunze de tuia și plop, precum și cele de biomonitorizare activă folosind săculeți cu mușchi reprezintă alternative viabile pentru metodele instrumentale de evaluare a calității aerului.

Pentru biomonitorizarea pasivă a poluării solului din zonele miniere Arieș, Certej, Baia Mare și zona urbană Cluj-Napoca, dintre plantele erbacee larg cunoscute ca fiind rezistente în medii sărace în nutrienți s-au studiat pătlagina, raigrasul, păpădia și podbalul. Nici una dintre aceste plantele nu hiperacumulează metale iar relația dintre concentrația de metal din plante și sol este specifică fiecărei specii de plante, proprietății solului și tipului de metal. Pătlagina (*Plantago major*) este un biomonitor potrivit pentru solurile moderat poluate cu metale. La concentrații mai ridicate intervin procesele de excludere care limitează absorbția metalelor din sol și blochează translocarea din rădăcină în frunze. Raigrasul (*Lolium perenne*) acumulează cantități importante de metale din sol, în special Pb. Dependența liniară între concentrația de metale în raigras și sol în cazul Zn, pe domenii largi de concentrație, iar pentru Cu și Pb la concentrații de sub 1000, respectiv 2000 mg/kg, permite utilizarea sa pentru biomonitorizarea poluării cu Zn, Cu și Pb. Păpădia comună (*Taraxacum officinale*) poate fi utilizată ca biomonitor al poluării cu Zn, Pb și Ni deoarece există o corelație liniară între concentrația de metale în frunzele de păpădie și în sol. Podbalul (*Tussilago farfara*) acumulează cantități ridicate de Cu, Pb, Zn, Cd, Cr și Ni, dar numai în cazul Cu, Pb, Zn și Cd dependența este liniară.

Poluarea aerului cu metale asociate pulberilor în suspensie totale (TSP) și cu particule de diferite dimensiuni (PM10, PM2,5, PM1) în zona urbană Cluj-Napoca și zona industrială Copșa Mică a fost biomonitorizată pasiv cu ajutorul frunzelor de tuia (*Thuja occidentalis*) și plop (*Populus nigra*). Concentrația de particule în suspensie în orașul Cluj-Napoca a fost mai mare în zonele cu trafic intens decât în cele cu trafic redus, ceea ce sugerează că traficul este o sursă importantă de particule în suspensie și de metale asociate cu acestea. Frunzele de tuia sunt potrivite pentru biomonitorizarea poluării aerului cu Zn, Cu și Ni iar frunzele de plop pentru biomonitorizarea Zn, Fe, Mn, Al, Pb, Cu, Ni, Co și Cd. Frunzele de tuia prelevate din zone cu trafic intens au avut concentrații mai mari de Cu, Zn și Ni, decât cele prelevate din zone cu trafic redus, iar concentrația de Pb și Cr a fost comparabilă în cele două zone. Rezultatele obținute au indicat o creștere a concentrației de metale din frunze de plop proporțional cu creșterea concentrației de PM10 în aerul ambiant. În orașul Cluj-Napoca, traficul, incinerarea deșeurilor, eroziunea solurilor contaminate și resuspendarea prafului sunt cele mai importante surse antropice de metale. În orașul Copșa Mică

principalele surse de metale sunt poluarea istorică datorată industriei metalurgice care se suprapune peste poluarea actuală, mult mai redusă, datorată traficului. Indicele de acumulare a metalelor arată capacitatea ambelor specii de a acumula metale, fiind observată acumularea preferențială a Cu și Cd de către plop și a Cu și Ni de către tuia. Ambele specii sunt potrivite pentru biomonitorizarea zonelor industriale intens poluate cu metale.

Biomonitorizarea activă a poluării aerului folosind metoda săculețului cu mușchi a confirmat prezența poluării cu metale a aerului în orașul Cluj-Napoca. Îmbogățirea ridicată în Cu, moderată în Zn, Cd, Ni și lipsa îmbogățirii în Pb, Cr și Co în mușchi arată că gazele de eșapament (Co, Cr, Ni) au o pondere mai scăzută în poluarea aerului decât emisiile cauzate de uzura sistemului de rulare (Cu, Zn). Corelația dintre numărul de vehicule care tranzitează zona biomonitorizată și concentrația de TSP, PM10, PM2,5 și PM1 a confirmat faptul că traficul este o sursă importantă de pulberi în suspensie în zonele urbane, fără a fi observată o relație liniară între concentrația metalelor în mușchi și concentrația de particule în suspensie. Metoda săculețului cu mușchi este potrivită pentru biomonitorizarea pe termen lung a poluării aerului cu particule în suspensie în zonele urbane care nu dispun de vegetație spontană.

Datorită capacității de absorbție a metalelor din sol și apa subterană, vegetalele cultivate în zone intens poluate cu metale pot acumula cantități importante de metale toxice. Consumul îndelungat de produse vegetale și animale contaminate cu metale determină creșterea riscului de apariție atât a unor patologii non-carcinogene cât și a unor patologii neoplazice. Evitarea consumului pe termen lung al alimentelor cu conținut de metale toxice, chiar și sub limitele maxime admise, poate scădea riscul de acumulare a metalelor toxice în organism și reduce apariția unor patologii cronice.

Un alt factor care crește riscul de apariție a unor boli cronice este poluarea aerului cu particule în suspensie, în special cu PM10. Calitatea aerului în orașul Cluj-Napoca s-a îmbunătățit în ultimul deceniu, concentrația de PM10 a scăzut sub limitele admise în majoritatea zilelor iar probabilitatea ca locuitorii orașului Cluj-Napoca să dezvolte patologii cronice asociate cu PM10 sunt reduse. Expunerea cumulată la PM10 și la alți poluanți din aer pot crește probabilitatea de apariție a unor efecte adverse asupra sănătății umane. Reducerea traficului prin implementarea unui transport în comun eficient, utilizarea mijloacelor de transport ecologice, reabilitarea infrastructurii de transport, eliminarea arderilor de deșeuri și folosirea unor combustibili cu emisii scăzute pentru încălzirea locuințelor pot conduce la reducerea poluării aerului.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Ajtai N., Stefanie H, Botezan C., Ozunu A., Radovici A., Dumitrache R., Iriza-Burcă A., Diamandi A., Hirtl M., 2020, Support tools for land use policies based on high resolution regional air quality modelling. *Land Use Pol.* 95, 103909.
- Anicic M., Tomasevic M., Tasic M., Rajsic S., Popovic A., Frontasyeva M.V., Lierhagen S., Steinnes E., 2009, Monitoring of trace element atmospheric deposition using dry and wet moss bags: Accumulation capacity versus exposure time. *J. Hazard. Mater.* 71, 182–188.
- Asgari A.K., Amini H., 2011, Biomonitoring of trace element in air and soil pollution by using *Acacia*. *Res. J. Agric. Sci.* 7, 115- 124.
- Chalvatzaki E., Chatoutsidou S.E., Lehtomaki H., Almeida S.M., Eleftheriadis K., Hanninen O., Lazaridis M., 2019, Characterization of human health risks from particulate air pollution in selected European cities. *Atmosphere* 10, 96.
- Chandra R., Kang H., 2016, Mixed heavy metal stress on photosynthesis, transpiration rate and chlorophyll content in poplar hybrids. *Forest Sci. Technol.* 12, 55–61.
- Conti M.E., Cecchetti G., 2001, Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment a review. *Environ. Pollut.* 114, 471-492.
- Demkova L., Arvay J., Bobulska L., Tomas J., Stanovic R., Losak T., Harangozo L., Vollmannova A., Bystricka J., Musilova J., Jobbágy J., 2017, Accumulation and environmental risk assessment of heavy metals in soil and plants of four different ecosystems in a former polymetallic ores mining and smelting area (Slovakia). *J. Environ. Sci. Health A.* 52, 479–490.
- Drava G., Brignole D., Giordani P., Minganti V., 2016, Urban and industrial contribution to trace elements in the atmosphere as measured in holm oak bark. *Atmos. Environ.* 144, 370-375.
- Gruszecka-Kosowska A., 2018, Assessment of the Krakow inhabitants' health risk caused by the exposure to inhalation of outdoor air contaminants. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 32, 485–499.
- Hajar E.W.I., Sulaiman A.Z.B., Sakinah A.M.M., 2014, Assessment of heavy metals tolerance in leaves, stems and flowers of *Stevia rebaudiana* plant. *Procedia Environ. Sci.* 20, 386–393.
- Hu R., Yan Y., Zhou X., Wang Y., Fang Y., 2018, Monitoring heavy metal contents with *Sphagnum Junghuhnianum* moss bags in relation to traffic volume in Wuxi (China). *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 374.

- Lepp N.W., Madejón P., 2007, Cadmium and zinc in vegetation and litter of a voluntary woodland that has developed on contaminated sediment-derived soil. *J. Environ. Qual.* 36, 1123–1131.
- Levei L., Andrei M.L., Hoaghia M.A., Ozunu A., 2017, Assessment of metals content in dandelion (*Taraxacum officinale*) leaves grown on mine tailings. *AIP Conference Proceedings*, 1917, 020001.
- Levei L., Cadar O., Babalau-Fuss V., Kovacs E., Torok I.A., Levei E.A., Ozunu A., 2021, Use of black poplar leaves for the biomonitoring of air pollution in an urban agglomeration. *Plants*, 10, 548.
- Levei L., Cadar O., Kovacs E., Torok I., Ozunu A., 2020c, Biomonitoring of atmospheric metal pollution using northern white-cedar (*Thuja Occidentalis*) leaves. *AIP Conference Proceedings*, 2206, 020001.
- Levei L., Hoaghia M.A., Roman M., Marmureanu L., Moisa C., Levei E.A., Ozunu A., Cadar O., 2020b, Temporal trend of PM10 and associated human health risk over the past decade in Cluj-Napoca City. *Appl. Sci.* 10 (15), 5331.
- Levei L., Hoaghia M.A., Roman M., Marmureanu L., Moisa C., Levei E.A., Ozunu A., Cadar O., 2020b, Temporal trend of PM10 and associated human health risk over the past decade in Cluj-Napoca City. *Appl. Sci.* 10 (15), 5331.
- Levei L., Kovacs E., Hoaghia M.A., Ozunu A., 2018, Accumulation of heavy metals in plantago major grown in urban and post-industrial areas. *Studia UBB Chemia*, 63(1), 87-98.
- Levei L., Török A.I., Cadar O., Levei E.A., Ozunu A., 2020a, Biomonitoring of air pollution by moss bags in Cluj-Napoca city, Romania. *Proceedings of 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, pp. 313–320.
- Lucey J.A. 2015, Raw milk consumption: risks and benefits. *Nutr. Today.* 50, 189–193.
- Miclean M., Cadar O., Levei L., Roman R., Ozunu A., 2019, Metals (Pb, Cu, Cd, Zn) transfer along food chain and health risk assessment through raw milk consumption from free range cows. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 16(21), 4064.

- Miclean M., Cadar O., Levei L., Senila L., Ozunu A., 2018, Metal contents and potential health risk assessment of crops grown in a former mining district (Romania). *J. Environ. Sci. Health B*, 53(9), 595-601.
- Pavlovic M., Rakic T., Pavlovic D., Kostic O., Jaric S., Mataruga Z., Pavlovic P., Mitrovi M., 2017, Seasonal variations of trace element contents in leaves and bark of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum L.*) in urban and industrial regions in Serbia. *Arch. Biol. Sci.* 69, 201-214.
- Rai P.K., 2016, Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicol. Environ. Safe.* 129, 120–136.
- Roba C., Rosu C., Pistea I., Ozunu A., Baciuc C., 2016, Heavy metal content in vegetables and fruits cultivated in Baia Mare mining area (Romania) and health risk assessment. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 6062-6073.
- Rodriguez-Santamaria K., Zafra-Mejía C.A., Rondón-Quintana H.A., 2022, Macro-morphological traits of leaves for urban tree selection for air pollution biomonitoring: a review. *Biosensors* 12, 812.
- Schreck E., Sarret G., Oliva P., Calas A., Sobanska S., Guedron S., Barraza F., Point D., Huayta C., Couture R.M., Prunier J., Henry M., Tisserand D., Goix S., Chincheros J., Uzu G., 2016, Is *Tillandsia capillaris* an efficient bioindicator of atmospheric metal and metalloid deposition? Insights from five months of monitoring in an urban mining area. *Ecol. Indic.* 67, 227–237.
- Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Niazi N.K., 2017, Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *J. Hazard. Mater.* 325, 36-58.
- Stefanut S., Öllerer K., Manole A., Ion M.C., Constantin M., Banciu C., Maria G.M., Florescu L.I., 2019, National environmental quality assessment and monitoring of atmospheric heavy metal pollution A moss bag approach. *J. Environ. Manage.* 248, 109224.
- Swislawski P., Nowak A., Rajfur M., 2021, Is your moss alive during active biomonitoring study. *Plants*, 10, 2389.
- Unterbrunner R., Puschenreiter M., Sommer P., Wieshammer G., Tlustoš P., Zupan M., Wenzel M.M., 2007, Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe. *Environ. Pollut.* 148, 107–114.
- Wolterbeek, B. 2002, Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives. *Environ. Pollut.* 120, 11–21.

- Wroblewska K., Jeong B.R., 2021, Effectiveness of plants and green infrastructure utilization in ambient particulate matter removal. *Environ. Sci. Eur.* 33, 110.
- Yalaltdinova A., Kim J., Baranovskaya N., Rikhvanov L., 2018, *Populus nigra* L. as a bioindicator of atmospheric trace element pollution and potential toxic impacts on human and ecosystem. *Ecol. Indic.* 95, 974–983.