

UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI DIN CLUJ-NAPOCA
INSTITUTUL DE STUDII DOCTORALE

FACULTATEA DE ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MEDIULUI
SCOALA DOCTORALA: ȘTIINTA MEDIULUI

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Cuantificarea emisiilor de poluanți în atmosfera prin măsurători in-situ și modelarea dispersiilor în România și Rwanda. Evaluare de risc

Cuvinte cheie: *Vulnerabilitate, Impacturi, Riscuri, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, Măsurători in-situ, Modelare a dispersiei, AERMOD, ISCST3, Trafic urban, Iazul de decantare, Eroziune eoliană, Kigali, Rwanda, Moldova Nouă, România.*

Conducator de doctorat

Prof. univ. dr. ing. Alexandru OZUNU

Doctorand

Elisephane IRANKUNDA

Cluj-Napoca

2024

Contents

Rezumat	iv
Recunoștințe	viii
1 Introducere Generală și Structura Tezei	1
1.1 Context și Descrierea Tezei	1
1.2 Definiția Problemei	3
1.2.1 Situația la Nivel Internațional	3
1.2.2 Situația la Nivel Național, România	7
1.2.3 Situația la nivel național, Rwanda	10
1.3 Lacune în Cercetare	13
1.4 Obiectivele Studiului	15
1.4.1 Obiectiv General	15
1.4.2 Obiective Specifice	15
1.5 Întrebări de Cercetare	17
1.6 Semnificația Studiului	17
1.7 Rezultatele Cercetării Derivate din Teză	18
1.7.1 Publicații în Reviste de Specialitate cu Recenzare	18
1.7.2 Prezentări la Conferințe Internaționale	19
1.8 Structura Tezei	21
2 Metodologie: Măsurare In-Situ și Modelare a Dispersiei Poluanților Aerieni	22
2.1 Rețelele Rutiere ale Orașului Kigali, Rwanda	22
2.1.1 Introducere	22
2.1.2 Măsurători și Calibrări ale Instrumentelor	24
2.2 Iazul de decantare de la Moldova Nouă, România	25
2.2.1 Descrierea Zonei de Studiu	26
2.2.2 Monitorizarea In-Situ și Calibrarea Instrumentelor	26
2.3 Configurări și Modelare	28
2.3.1 Domeniu de Modelare	28
2.3.2 Factori de Emisie	30

2.4	Analiză statistică	35
2.5	Evaluarea performanței modelului	35
2.6	Impactele și riscurile expunerii personale la poluanții din aer	38
3	Discuție Generală a Rezultatelor Tezei și Direcțiilor Viitoare	40
3.1	Descoperiri Generale	40
3.1.1	Monitorizarea In-situ	40
3.1.2	Modelarea Dispersiei	41
3.1.3	Dispersia în Topografie Complexă	42
3.1.4	Evaluarea Performanței Modelului	42
3.1.5	Înțelegerea Incertitudinilor Modelului	43
3.1.6	Evaluarea Impactului și Riscurilor	44
3.2	Răspuns la Întrebările de Cercetare	44
3.3	Concluzii Generale	47
3.4	Contribuțiile Originale ale Tezei	49
3.5	Limitări ale Studiului	51
3.6	Recomandări pentru Lucrări Viitoare	52
4	Prezentarea și Interpretarea Analizei Datelor	53
	References	62

Rezumat

Criza globală a calității aerului se intensifică din cauza emisiilor atât din procese naturale, cum ar fi erupțiile vulcanice și secetele extreme, cât și din cauza activităților umane, inclusiv traficul rutier, iazul de decantare ale minelor, operațiunile industriale și arderea terenurilor agricole și a pădurilor. Aceste emisii afectează mediul și sănătatea umană, poluarea aerului contribuind la șapte milioane de decese anual. În timp ce literatura existentă recunoaște efectele extinse ale poluării aerului, există lacune semnificative în înțelegerea mecanismului de dispersie a poluanților atmosferici, în special în medii topografice complexe afectate de eroziunea eoliană. Mai mult, studiile privind traficul urban adesea lipsesc neincluzând și neglijând factori precum tipurile de combustibil ale vehiculelor, categoriile de vehicule și caracteristicile fizice ale drumurilor. Acest lucru evidențiază necesitatea unei investigații suplimentare și a unei evaluări atente a variațiilor nivelurilor de poluare în timp și spațiu pentru a identifica și prioritiza zonele cu poluare atmosferică ridicată (puncte hotspot). În prezent, nu există un consens asupra unei abordări standard pentru caracterizarea și cartografierea acestor puncte hotspot, care pot varia în funcție de sursă, tipul de poluant și intervalul de timp. Prin urmare, această teză își propune să abordeze aceste lacune prin realizarea unei explorări profunde a dinamicii calității aerului, oferind o analiză nuanțată a provocărilor privind calitatea aerului și încercând să dezvolte un protocol pentru detectarea punctelor hotspot de poluare atmosferică în medii urbane utilizând modelarea dispersiei și metodele de monitorizare conform studiilor de caz din orașul Kigali, capitala Rwandei, și Moldova Nouă, oras situat în sud-vestul României.

Studiul compară rezultatele modelării dispersiei din modelele AERMOD și ISCST3 cu măsurătorile simultane în situ în timp real ale materiei particulare cu un diametru de 10 micrometri sau mai mic (PM_{10}), materiei particulare cu un diametru de 2,5 micrometri

sau mai mic ($PM_{2,5}$), dioxidului de sulf (SO_2), dioxidului de azot (NO_2) și nivelurile de monoxid de carbon (CO) pe tot parcursul anului 2021. Fiabilitatea modelelor a fost evaluată folosind măsurători statistice și diagrame Taylor. Caracterizarea surselor potențiale suplimentare a fost realizată prin diagrame polare tridimensionale bivariate sub perspectiva dispersiei. Studiul a examinat modul în care topografia complexă afectează dispersia poluanților atmosferici folosind diferite modele digitale de elevație (DEMs) din punct de vedere al modelării. Studiul a elaborat o metodă sistematică pentru a evalua efectul eroziunii eoliene asupra emisiilor de PM_{10} , luând în considerare fluxurile orizontale și verticale, originare din iazurile de decantare de la Moldova Nouă. În plus, studiul a implementat metodologia de Evaluare Integrată a Impactului și Riscului (IIRA) pentru a evalua zonele vulnerabile, impacturile, riscurile și probabilitățile de expunere personală la poluanții atmosferici periculoși.

Hărțile de dispersie spațio-temporale și tendințele de variație pentru poluanții atmosferici considerați au fost identificate în ambele studii de caz. În Kigali, tendințele indică emisii mai scăzute în timpul orelor de prânz și o creștere în timpul dimineții și al serii, evidențiind rolul semnificativ al traficului urban. Medii anuale pentru poluanții atmosferici au fost următoarele: concentrațiile de PM_{10} au variat între 44 și 56 $\mu g\ m^{-3}$, nivelurile de $PM_{2,5}$ au variat între 25 și 48 $\mu g\ m^{-3}$, NO_2 a avut o medie de 20,35 $\mu g\ m^{-3}$, CO a variat între 527,7 și 721,6 $\mu g\ m^{-3}$, iar SO_2 a avut o medie între 34,8 și 62,0 $\mu g\ m^{-3}$. Modelarea dispersiei a relevat niveluri semnificative de concentrație, identificându-se un punct hotspot într-o anumită intersecție, în timp ce comportamentul lor de dispersie este influențat în principal de condițiile atmosferice și de topografia locală. Studiul a identificat zone potențial vulnerabile în oraș influențate de densitatea mare a populației, trafic și emisii casnice, cu o probabilitate ridicată de expunere personală cuprinsă între 0,12 și 0,3. Metoda IIRA a evaluat în mod cuantitativ impactul și riscul prin măsurători în situ. Rezultatele indică faptul că impactul expunerii personale pentru PM_{10} și NO_2 se încadrează în limitele permise (100-350), în timp ce SO_2 și CO pot provoca disconfort (350-500), iar $PM_{2,5}$ prezintă amenințări atât pentru sănătatea umană, cât și pentru ecosistem (700-1000). Evaluarea riscului a condus la concluzia că sunt recomandate măsuri preventive pentru $PM_{2,5}$ (200-350), măsuri de monitorizare pentru SO_2 și CO (100-200), iar riscul minim este asociat cu PM_{10} și NO_2 (mai puțin de 100).

În Moldova Nouă, concentrațiile de PM_{10} prezintă fluctuații orare, atingând un

maxim în timpul serii și scăzând în primele ore ale dimineții, cu o medie anuală de $29,3 \mu\text{g m}^{-3}$ la stația CS5 și $20,9 \mu\text{g m}^{-3}$ la stația CS3. Direcția și viteza vântului afectează semnificativ concentrațiile, cu vânturi dinspre sud-est contribuind la niveluri mai mari în apropierea iazurilor de decantare și vânturi dinspre nord-vest asociate cu emisiile urbane în orașul Moldova Veche. Prin perspectiva modelării dispersiei, Moldova Nouă prezintă o concentrație semnificativă de PM_{10} cu punct Hotspot în apropierea iazurilor de decantare. Analiza sugerează iazurile de decantare ca surse probabile de emisii, în special în timpul acumulării vânturilor dinspre sud-est. Dispersia sa, se extinde în orașul Moldova Nouă și în Serbia, țara învecinată. Valorile cheie ale punctelor hotspot includ un flux anual orizontal de $63 \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ și un flux vertical anual de $3 \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, prin modelare, AERMOD estimând concentrații medii zilnice și anuale de $563,7 \mu\text{g m}^{-3}$ și, respectiv, $115,5 \mu\text{g m}^{-3}$.

Prin măsuratori statistice și diagrame Taylor pentru a evalua performanța modelelor de calitate a aerului în prezicerea concentrațiilor de poluanți, rezultatele indică faptul că atât modelele AERMOD, cât și ISCST3, arata cu exactitate concentrațiile de poluanți, dar cu AERMOD, s-a obținut o performanță ușor superioară. În plus, evaluarea a informat alegerea DEM-urilor, influențând acuratețea modelului. Studiul subliniază impactul semnificativ al terenului complex asupra dispersiei poluanților atmosferici, cu DEM-uri de înaltă rezoluție precum SRTM3 și GTOPO30, care prezintă o acuratețe superioară în modelare. Modelele de dispersie evidențiază rolul reliefului ridicat sau al dealurilor în împiedicarea fluxului de aer, ducând la acumularea poluanților atmosferici în zonele mai joase. Studiul a identificat incertitudini în timpul evaluării modelelor de dispersie a poluanților atmosferici utilizate. Aceste incertitudini provin din variațiile concentrațiilor de poluanți în spațiu și timp, discrepanțele potențiale în calcularea factorilor de emisie, limitările în captarea tuturor surselor locale de poluare de către modele, incertitudinile în datele meteorologice și discrepanțele între AERMOD și ISCST3 care evidențiază capacitățile și algoritmi lor diferiți în evaluarea dispersiei poluanților atmosferici peste terenuri complexe.

Concluziile generale ale studiului subliniază importanța cadrului comprehensiv de modelare, utilizând modele de dispersie a poluanților atmosferici, în special în regiunile în care monitorizarea în situ este dificilă sau pur și simplu imposibilă. Aceste perspective sunt inestimabile pentru informarea luării deciziilor în regiunile similare care se confruntă cu provocări de mediu în special în cel urban și minier în același timp, facilitând deciziile

de informare ale oficialilor, planificatorilor urbani și părților interesate în sănătatea publică și a atenua impactul negativ al poluării aerului.

Cuvinte cheie: *Vulnerabilitate, Impacturi, Riscuri, $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO , Măsuratori in-situ, Modelare a dispersiei, AERMOD, ISCST3, Trafic urban, Iazul de decantare, Eroziune eoliană, Kigali, Rwanda, Moldova Nouă, România.*

Recunoștințe

Aș dori să-mi exprim sincerele mulțumiri distinsului meu conducător de doctorat, **Prof. univ. dr. ing. Alexandru OZUNU**, a cărui îndrumare constantă, idei neprețuite și sprijin neclintit au fost esențiale în finalizarea cu succes a acestei teze. Profesorule, expertiza dumneavoastră, încurajarea și dedicarea au fost o sursă de inspirație pe parcursul acestei călătorii academice. Prin urmare, sunt cu adevărat norocos să fi avut privilegiul de a lucra sub îndrumarea dumneavoastră. Îi mulțumesc de asemenea membrilor comisiei mele de îndrumare a tezei, Assoc. Prof. dr. ing. Török Zoltán, Prof. univ. dr. ing. Baciú Laurențiu Călin și Dr. Horațiu Ioan ȘTEFĂNIE, pentru comentariile și sfaturile utile.

Aș dori să mulțumesc Guvernului României prin Ministerul Afacerilor Externe, care mi-a oferit o bursă pentru a-mi concentra studiile la Universitatea Babeș-Bolyai Cluj-Napoca, Facultatea de Științe și Inginerie Ambientală. De asemenea, aș dori să apreciez sprijinul financiar din partea Fundației Centrului Național APELL pentru Managementul Dezastrelor (Fundația Centrul Național APELL pentru Managementul Dezastrelor CN-APELL).

Sunt recunoscător Guvernului Rwandei prin Ministerul Mediului și Agenția Meteorologică a Rwandei pentru furnizarea datelor privind calitatea aerului și meteorologiei. Sunt de asemenea recunoscător Rețelei Naționale de Monitorizare a Calității Aerului din România (RNMCA) pentru furnizarea datelor privind calitatea aerului.

Nu în ultimul rând, sunt foarte recunoscător soției mele, Debora, pentru sprijinul ei neîncetat, grijă și încurajare în această călătorie. Sunt de asemenea foarte recunoscător părinților mei, fratelui și surorilor pentru rugăciunile și încurajările lor continue în studiile mele.

Chapter 1

Introducere Generală și Structura Tezei

1.1 Context și Descrierea Tezei

De decenii întregi, poluarea aerului a fost o problemă ambientală la nivel mondial. Un raport privind calitatea aerului realizat de Organizația Mondială a Sănătății (OMS) arată că mai mult de șapte milioane de decese la nivel mondial, împărțite în aproximativ 4,2 milioane și 3,8 milioane în fiecare an, sunt cauzate de expunerea la poluarea aerului ambiental și la cea interioară, respectiv (WHO, 2016). Conform WHO (2021), aproximativ 92% din populația globală trăiește în regiuni unde concentrația de poluare aeriană depășește ghidurile internaționale de calitate a aerului ale OMS, iar aproximativ 99% din populația mondială respiră aer poluat.

Expoziția personală la niveluri ridicate sau pe termen lung ale poluanților atmosferici afectează sănătatea în diferite moduri (Brunekreef & Holgate, 2002; Wong et al., 2001), dar mult mai mult ca o povară pentru un grup vulnerabil de persoane cum ar fi copiii, femeile însărcinate și persoanele cu boli respiratorii de lungă durată (WHO, 2016). Studiile privind sănătatea umană au arătat că poluanții atmosferici cresc bolile respiratorii, mortalitatea și morbiditatea (Backes et al., 2013; Bavaria et al., 2014; Gibson et al., 2013; Tecer, 2009). În plus, expunerea umană la poluanții atmosferici a fost identificată ca fiind responsabilă pentru decesele premature cauzate de cancerul pulmonar (Cohen et al., 2017), bolile pulmonare și infecțiile cardiace (Samet et al., 2000), și creșterea frecvenței bolilor precum atacurile de cord, accidentele vasculare cerebrale, astmul și bronșita cronică (Cropper et al., 2012). Mai mult, mai multe studii au demonstrat că poluanții atmosferici contribuie în mod semnificativ la procesele atmosferice care duc

la impacte asupra mediului. Acestea includ precipitația acidă, cunoscută sub numele de ploaie acidă (Terán et al., 2021), încălzirea globală (Kaplan & Vidyashankar, 2012), schimbările climatice (Collins et al., 2013) și variabilitățile meteorologice incidente asupra reducerii vizibilității în atmosferă (Peters et al., 2013; Raupach et al., 2007).

Organizațiile Internaționale Globale și Europene, cum ar fi: OMS, Agenția de Protecție a Mediului din Statele Unite (US-EPA), Comisia Economică pentru Europa a Națiunilor Unite (UNECE), Uniunea Europeană (UE), Agenția Europeană de Mediu (EEA), Programul Națiunilor Unite pentru Mediu (UNEP) și altele, au vizat problemele de mediu legate de poluarea aerului prin elaborarea de politici de mediu pentru o mai bună calitate a aerului. Acesta din urmă, în Europa, se bazează pe Directiva 2008/1/EC a Parlamentului European care vizează integrarea prevenirii și controlului poluării aerului (Directive, 2008). Conform EEA (2020), care este centrul de date privind poluarea aerului din Europa, emisiile de poluanți atmosferici au scăzut de-a lungul multor decenii, rezultând într-o îmbunătățire semnificativă a calității aerului în statele membre. Cu toate acestea, concentrațiile de poluanți atmosferici sunt încă prea ridicate, iar efectele lor persistă din cauza ritmului rapid de creștere în transport, încălzirea rezidențială și procesele de industrializare. Poluanții atmosferici critici, inclusiv particulele de materie (PM), dioxidul de azot (NO_2) și ozonul la nivelul solului (O_3), sunt cei mai îngrijorători poluanți din Europa și continuă să aibă un impact semnificativ asupra sănătății europenilor (EEA, 2020).

Factori precum: climatologia locală, condițiile meteorologice (în special radiația solară incidentă și umiditatea), caracteristicile topografice, geografice și ulterior condițiile de scară locală, și caracteristicile sursei de poluanți atmosferici (cum ar fi: înălțimea coșului, dimensiunea plumei și rata de emisii, printre altele) contribuie la starea calității aerului dintr-un loc particular (Rouhi et al., 2013). Poluanții pot fi ridicați pe o distanță lungă, chiar și la sute de kilometri de sursă, dispersați în aer și apoi coborâți la sol sau supuși proceselor de transformare chimică care duc la formarea de alți poluanți atmosferici în atmosferă (Ajtai et al., 2012; Gibson et al., 2013a; Macdonald, 2003). Metodologia de monitorizare în situ poate cuantifica concentrația de poluanți atmosferici într-un caz de studiu particular ca suficient. Dar atunci când zonele țintă nu sunt gestionabile pentru instrumentele de monitorizare în situ sau când poluanții atmosferici din surse diferite nu sunt tehnic ușor de eșantionat prin metoda de monitorizare la fața locului sau în apropierea acestuia, modelarea dispersiei poluanților atmosferici poate fi folosită ca metodă alternativă (EPA, 2009; O'Shaughnessy & Altmaier, 2011).

Datorită potențialului actual de emisii de poluanți atmosferici în zonele urbane rezidențiale, populațiile socio-economic expuse și regiunile cu date limitate privind calitatea aerului, în special în țările cu venituri mici și medii, devine clar că studiile privind calitatea aerului sunt esențiale pentru evaluarea politicilor de reducere a impactului. Această teză investighează influența emisiilor din trafic asupra calității aerului din Kigali, capitala Rwandei. În plus, examinează impactul emisiilor din iazul de decantare rezultate din activitățile miniere din partea de sud-vest a României asupra calității aerului din orașul Moldova Nouă. Studiul implică cuantificarea emisiilor de poluanți atmosferici prin metodologii de monitorizare în situ și de modelare a dispersiei. Compară, de asemenea, datele de măsurare în situ cu rezultatele modelării dispersiei folosind măsuri statistice și diagrame Taylor pentru evaluarea performanței modelului. Studiul a caracterizat, de asemenea, inventarele potențiale de emisii folosind diagrame polare tridimensionale bivariate din perspectiva dispersiei. A investigat influența caracteristicilor topografice complexe asupra dispersiei poluanților atmosferici sub diferite modele de elevație digitală (DEMs). Cercetarea a implementat o abordare sistematică pentru analizarea și cuantificarea influenței eroziunii eoliene asupra ratelor de emisii de PM_{10} în iazul de decantare din Moldova Nouă. Această analiză a cuprins atât fluxurile orizontale, cât și cele verticale, cu accent pe acele emisii din iazul de decantare din Moldova Nouă. În cele din urmă, studiul a folosit metodologia Integrată de Evaluare a Impactului și a Riscului (IIRA) pentru a evalua zonele vulnerabile și probabilitățile, impacturile și riscurile expunerii personale la poluanții atmosferici periculoși.

1.2 Definiția Problemei

1.2.1 Situația la Nivel Internațional

Impactul activităților umane asupra schimbărilor continue în mediul înconjurător, cu efecte negative asupra sănătății umane și a ecosistemului, rămâne o preocupare științifică urgentă. Aceste efecte complexe generează provocări semnificative pentru conștientizarea publică, pentru oamenii de știință din domeniul mediului și pentru factorii de decizie politici. În plus, relația dintre poluanții atmosferici și tema mai largă a schimbărilor climatice continuă să fie subiectul unor dezbateri internaționale, cu multe aspecte care necesită încă înțelegere comprehensivă. Conform WHO (2021), sarcina globală a bolilor asociate cu expunerea umană la poluarea aerului este estimată să cauzeze milioane de

decese anual. OMS a furnizat îndrumări privind calitatea aerului pentru a ajuta guvernele și alte părți interesate să reducă expunerea umană la poluanții aerului și efectele acestora începând cu anul 1987, ceea ce a dus în prezent la o îmbunătățire considerabilă, dar PM, O₃, SO₂ și NO₂ rămân în continuare printre principalele cauze care afectează sănătatea umană (WHO, 2016).

Cu multe decenii în urmă, problema mediului în Europa a pornit de la creșterea consumului de energie, dezvoltarea economică rapidă și urbanizare. Din anii 1970, problema poluării aerului în Europa a fost o problemă încărcată. Dar în 1996, UE a adoptat un plan nou și ambițios pentru a reduce emisiile de poluanți pe aproape întreg continentul stabilind obiective de limitare a calității aerului și implementându-le prin activități de monitorizare pe teren împreună cu raportarea și gestionarea calității aerului în toate statele membre ale UE (Bagayev & Lochard, 2017; Năstase et al., 2018). UE a inițiat programul de societate mai curată monitorizând poluanții atmosferici în sectoarele industriale, de transport urban și rezidențial (Korkmaz et al., 2020) în statele membre ale sale, unde controlul poluării atmosferice și urmărirea emisiilor sunt gestionate și controlate de Agenția Europeană de Mediu. Conform EEA (2020), în Europa, nivelurile de poluare a aerului s-au diminuat de-a lungul multor decenii, rezultând într-o îmbunătățire considerabilă a calității aerului în întreaga regiune. Cu toate acestea, concentrația este încă prea mare pentru PM, NO₂ și O₃, iar efectele acestora persistă. Cu toate eforturile depuse în Europa, Guttikunda et al. (2014) a indicat că până în 2030 rata de creștere estimată în sectoare precum industria, transportul, construcțiile și producția de energie ar crește poluarea, rezultând în efecte asupra sănătății umane în orașele statelor membre ale UE.

Urbanizarea rapidă și creșterea populației se numără printre principalele factori care accelerează emisiile de poluanți în atmosferă prin activitățile umane. Schwela (2012) a indicat proiecția statistică a ratei de creștere a populației urbane de la 1940 până în 2040 pentru fiecare continent în comparație cu rata de creștere a populației urbane la nivel mondial, așa cum este prezentat în Figura 1.1. Rezultatele indică faptul că rata de creștere a populației urbane din Africa ar fi mai mare decât în alte continente. Conform Organizației Națiunilor Unite (ONU), aceleași rezultate au fost găsite. Africa experimentează cea mai rapidă creștere a populației din lume. Se prevede că se va dubla între 2017 și 2050 (UN, 2017). Creșterea rapidă a populației în Africa este legată de industrializarea și urbanizarea mai rapide, ceea ce agravează calitatea aerului (UN, 2017).

Modelele de dispersie a poluanților atmosferici în Europa au fost tot mai des folosite

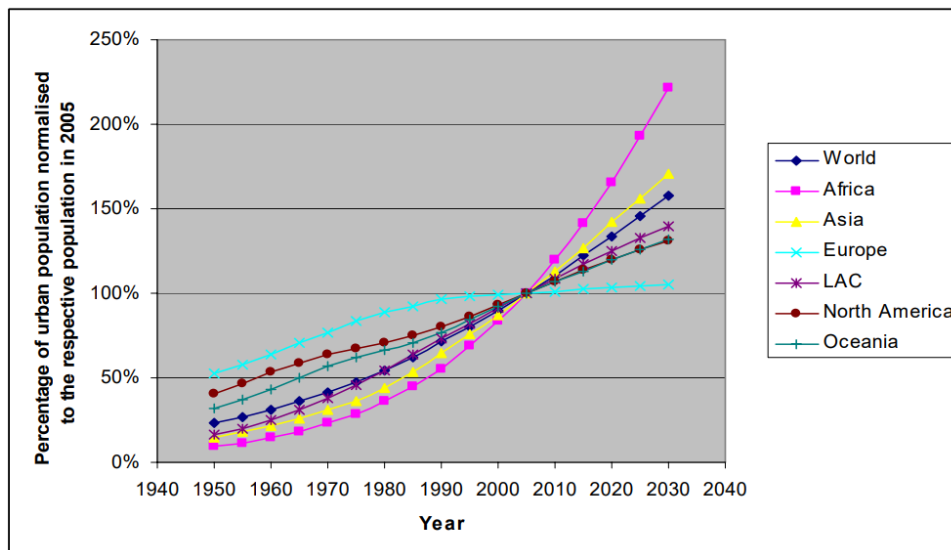


Figure 1.1: Rata de creștere a populației urbane la nivel mondial începând din 1940 până în 2040 (Schwela, 2012)

pentru a simula concentrațiile de poluanți atmosferici, dar în trecut, evaluarea calității aerului se bază doar pe măsurători de teren. Totuși, recent s-a acordat mai multă atenție modelelor de calitate a aerului pentru a valida seturile existente de date de monitorizare pe teren. Aplicarea modelului de dispersie a poluanților atmosferici pentru sarcini de gestionare a calității aerului, inclusiv evaluări ale calității aerului, planificare și prognozare, a fost recomandată în mod puternic în 2008 de directiva europeană privind calitatea aerului ambiental și aerul curat pentru Europa (Thunis et al., 2015). În afara metodologiei de monitorizare in-situ, au fost identificate lacune în cercetarea modelelor de calitate a aerului la nivel mondial. Prin urmare, Tabelul 1.1 rezumă câteva recenzii de literatură care au folosit modele de dispersie a poluanților atmosferici (AERMOD) pentru a simula nivelul de concentrație al poluanților atmosferici în anumite locații din întreaga lume.

Table 1.1: Rezumatul exemplu al revizuirilor consultate ale literaturii folosind modelul de dispersie a plumei gaussiene, AERMOD, în Europa, Africa, Asia și America

References	Country Location	Pollutants AERMOD
		Application

Matacchiera et al. (2019)	U.K.	Landfill	CH ₄	Run and determine the influences of meteorological conditions on greenhouse gases.
Tripathy et al. (2019)	U.S./ Allegheny	Industrial	PM _{2.5} , BC	Predicting pollutant concentration level
Dinçer et al. (2020)	Turkey	Industrial	Odour pollution	Predicting odour level
Teggi et al. (2018)	Italy	Complex source	Pesticides	Simulating ground-level pollutant concentration and deposition flux
Tezel-Oguz et al. (2020)	Turkey	Traffic emission	NO _x	Predicting and validating the field monitoring datasets.
Adeniran et al. (2019)	Nigeria	Industrial	SO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂	To model the impact of industrial activities on the environment
Liu-Cong et al. (2019)	Atlanta	Traffic emission	PM _{2.5}	Spatial distribution and the impact of traffic emissions on the environment
Tyovenda et al. (2021)	Nigeria	Industrial	NO ₂ , CO	Modelling pollutant concentration level
Gibson et al. (2013)	Canada	Line source	SO ₂ , PM _{2.5} , NO _x	Model evaluation by comparing output with the existing datasets.
Mentese et al. (2020)	Turkey	Urban area	VOCs, CO, CO ₂ , PM _{2.5}	Predicting the annual concentration levels
Langner & Klemm (2011)	German	Urban and rural	SO ₂ , SF ₆ , NO, NO ₂	Prediction of the concentration level and model validation

Haq et al. (2019)	Pakistan	Point source	SF ₆	Predicting pollutants concentration level and model validation
Askariyeh et al. (2017)	US/Texas	Near road	SF ₆	Predicting pollutant concentration levels and model validation across the roadside
Mutlu (2020)	Turkey	Industrial	PM ₁₀	Predicting air pollutant concentration level and validation of the model
Abdel-Rahman (2008)	Egypt	Industrial	Dust plume	Theoretical approach for stack height emissions
Al-Fadhli et al. (2019)	Kuwait	Industrial	NO ₂ , SO ₂	Predicting pollutants concentration level
X. Zou et al. (2020)	Togo	Traffic emission	SO ₂ , PM, NO _x	Simulation of pollutants concentration levels
Ma et al. (2013)	China	Industrial/Urban	PM ₁₀	Predicting air pollutant concentration level and validation of the model

1.2.2 Situația la Nivel Național, România

În România, un efort considerabil în reducerea poluării aerului este remarcabil începând cu aderarea României la UNECE la 14 decembrie 1955 și la UE la 1 ianuarie 2007, ca stat membru. Conform Năstase et al. (2018), de când România s-a alăturat UE, s-au observat îmbunătățiri semnificative în calitatea aerului, unde între 1990 și 2014 concentrația anuală a CO a scăzut cu 76%, SO_x cu 60%, NO_x cu 87%; și CO₂ a scăzut cu 41% din 2007 până în 2014. Conform Anuarului Statistic al României-2019 (INS, 2019), diferite proiecte privind calitatea aerului, laboratoare de observare a atmosferei, construcția și reconstrucția instituțiilor de mediu și modernizarea au fost implementate pentru excelente scopuri ecologice și de mediu, inclusiv aer curat. Cu toate acestea, acestea se opun creșterii populației urbane, așa cum este prezentat în Figura 1.2 (INS, 2019). Tabelul 1.2 rezumă rezultatele statistice ale populației urbane și a raportului

persoanelor în vârstă pentru câțiva ani anteriori în România (INS, 2021).

Informațiile prezentate în Figura 1.2 au fost confirmate și prin cercetările privind calitatea aerului efectuate de Roba et al. (2014), menționând că în orașele populate ale României, nivelurile de concentrare a particulelor (PM) sunt mai semnificative decât în zonele rurale. Un studiu privind poluarea aerului în orașul Iași, situat în nord-estul României, a confirmat că poluarea aerului rămâne o problemă ambientală de prim rang în orașele românești, unde emisiile din trafic sunt principalul contribuitor la degradarea calității aerului (Banica et al., 2017). Studiul concluzionează că dispersia aerului în mediul clădirilor și străzilor cauzează o creștere a concentrației de poluanți în Iași (Banica et al., 2017). Studiul privind calitatea aerului efectuat în zonele metropolitane ale României de Rosu & Banica (2018) a concluzionat că creșterea în zonele urbane din România a menționat tendințe similare în toate marile orașe din Europa de Est, unde traficul și emisiile casnice sunt principalii contribuitori la poluarea aerului. Banica et al. (2017) continuă să afirme că congestia de trafic și poluarea aerului urban au devenit o imagine comună a vieții urbane, deoarece cele mai mari orașe europene nu erau încă pregătite pentru problema ambientală asociată.

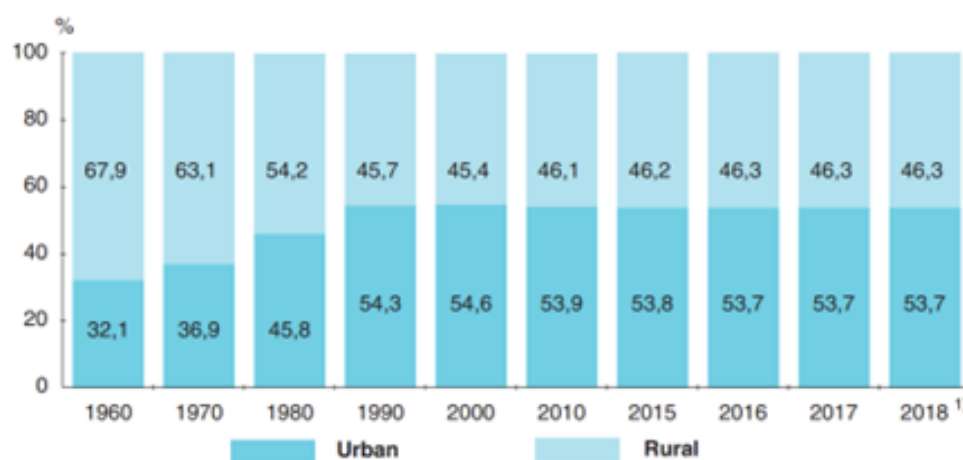


Figure 1.2: Clasificarea populației pe zone în perioada 1960-2018 în România (2018¹⁾: date provizorii din anul 2018) (INS, 2019)

Analiza traiectoriei poluanților atmosferici în iazul Transilvaniei din România realizată de Bodor et al. (2020) a concluzionat că poluanții precum PM₁₀, SO₂, NO_x, CO și O₃ sunt asociate cu masele de aer cu mișcare lentă în regiunea Transilvaniei, în direcții sudice și nord-vestice, iar dispersia lor este afectată în principal de condițiile la scară locală. Conform Sechel & Mariasiu (2022), România a impus utilizarea vehiculelor electrice pentru reducerea emisiilor din trafic, numărul vehiculelor electrice în uz crescând exponențial în țară. Comisia Europeană subliniază utilizarea vehiculelor electrice și

a mijloacelor alternative pentru niveluri mai scăzute de emisii, dar se confruntă cu vânzările de vehicule second-hand, care cresc în statele membre, inclusiv în România, unde majoritatea vehiculelor înregistrate sunt hibride (Sechel & Mariasiu, 2022). Conform INS

Table 1.2: Statistical structure of the elderly (65 years and over), age group, and urban population in Romania (INS, 2021).

Year of Census	Urban Population (%)	Increase of Elderly (%)
2021	56.3	0.4
2020	56.4	0.4
2019	56.4	0.3
2018	56.4	0.3

(Institutul Național de Statistică), comunicat de presă nr. 104/27 aprilie 2021, numărul persoanelor vârstnice (în vârstă de 65 de ani și peste) în 2021 a crescut cu 0,4% față de anul precedent, 2020. În 2021, INS a concluzionat că 56,3% din populația română locuiește în zone urbane. Prin urmare, în zonele urbane au fost introduse mai multe măsuri de reducere a poluării aerului, inclusiv spălarea străzilor, plantarea de copaci în apropierea drumurilor pentru minimizarea PM și a monoxidului de carbon emis de emisiile din traficul urban.

Rețeaua Națională de Monitorizare a Calității Aerului (RNMCA) din România a stabilit peste 100 de stații de monitorizare a calității aerului (Năstase et al., 2018) în scopuri de bună calitate a aerului, unde selecția punctelor de monitorizare, calibrările și validările datelor se conformează protocolului Agenției Europene de Mediu (www.eea.europa.eu). Punctele de monitorizare includ stații de calitate a aerului urbane (trafic), industriale, suburbane și regionale. Toate seturile de date privind calitatea aerului monitorizate în întreaga țară sunt puse la dispoziția comunității, cercetătorilor sau părților interesate după ce sunt certificate de Laboratorul Național de Referință pentru Calitatea Aerului (LNRCA) al Agenției Naționale pentru Protecția Mediului din România. Sistemul de calitate a aerului și studiile legate de calitatea aerului menționate mai sus concluzionează disponibilitatea datelor privind calitatea aerului și a indicele calității aerului (AQI) în România AQI (2022). Au fost identificate câteva studii care evaluează dispersia poluanților atmosferici în zonele urbane din România ca lacune de cercetare. Tabelul 1.3 rezumă literatura consultată care a utilizat AERMOD pentru a valida datele de monitorizare de teren existente din România.

Table 1.3: Rezumatul de exemple ale recenziilor literare folosind modelul de dispersie a norului gaussian, AERMOD, pentru diferite poluanți și situri din România.

References	Country	Location	Pollutants	AERMOD Application
Mihăiescu et al. (2011)	Romania	Industrial	PM ₁₀ , NO _x	Simulating pollutants concentration levels
Ajtai et al. (2012)	Romania	Plant	SO ₂	Simulating pollutants concentration levels
Simona et al. (2019)	Romania	Tailings ponds	PM ₁₀	Predicting pollutant concentration around tailings ponds of Moldovan Nouă.
Raischi et al. (2017)	Romania	Tailings ponds	PM ₁₀	Predicting pollutant concentration around tailings ponds of Moldovan Nouă.
Barbulescu & Barbes (2017)	Romania	Buildings	CO	Validation and prediction of pollutant concentration level
Corches & Popa (2013)	Romania	Industrial	CO, NO _x	An impact assessment by predicting pollutant concentration levels
Dunea et al. (2017)	Romania	Urban area	PM _{2.5}	Predicting air pollutant levels and model validation
Vujic et al. (2019)	Romania	Industrial	SO ₂	Model validation and prediction of air pollutants

1.2.3 Situația la nivel național, Rwanda

Potrivit lui Schwela (2012), Africa are o creștere rapidă a populației la nivel mondial, proiectată să crească cu mai mult de 200% între 2012 și 2050, cu o rată anuală de 3,3 până la 3,7 la sută. Rata rapidă de creștere a populației din Africa a fost și va continua să fie cea mai mare din lume (Schwela, 2012). Studiul realizat de Sigman et al. (2012) a indicat că în Africa, în următorii 40 de ani, creșterea ratei de mortalitate, suprapoluarea apei, și

condițiile proaste de igienă (Sigman et al., 2012) din cauza poluării aerului (Lacey et al., 2017) și a schimbărilor climatice (Silva et al., 2017) sunt discutabile și ridică mai multe preocupări ale cercetătorilor. În Africa Subsahariană, locul Rwanda, cercetarea realizată de Heft-Neal et al. (2018) în 2015 a indicat că expunerea la PM a dus la aproximativ 400.000 de decese în această regiune. Potrivit lui Taghian et al. (2024), Aproximativ 3.477 de decese (cu un interval de incertitudine de 95% între 2.500 și 4.600) au avut loc în Rwanda în 2019 din cauza bolilor cardiovasculare (BCV) legate de poluarea aerului. Între aceste decese, aproximativ 689 (interval de incertitudine: 283–1.300) au fost atribuite BCV asociate cu poluarea aerului ambiental, în timp ce aproximativ 2.788 (interval de incertitudine: 1.800–3.800) de decese au fost legate de BCV cauzate de poluarea aerului din gospodăria (Taghian et al., 2024). În Rwanda, poluarea aerului reprezintă al doilea cel mai semnificativ factor de risc pentru deces prematur după malnutriție, contribuind la peste 8% din decesele din 2017 (Taghian et al., 2024). Un studiu recent a evidențiat că impactul economic al problemelor de sănătate legate de poluarea aerului în Rwanda în 2019 a fost echivalent cu 1,9% din PIB-ul națiunii (Taghian et al., 2024). În plus, poluarea cu $PM_{2.5}$ afectează semnificativ abilitățile cognitive, rezultând într-o pierdere estimată de 18,5 milioane de puncte ale coeficientului de inteligență (IQ) la copiii rwandezi cu vârste sub 10 ani în 2019 (Taghian et al., 2024).

În Africa, proiectele de calitate a aerului se confruntă cu provocări persistente dincolo de domeniul evaluărilor calității aerului și a riscurilor pentru sănătate. Datele insuficiente privind calitatea aerului rămân o piedică principală, provenind în principal din lipsa fondurilor pentru stabilirea și menținerea stațiilor de monitorizare a calității aerului, amplificată de o lipsă de cunoștințe despre poluarea aerului (WHO, 2019). Puținele date sparse privind calitatea aerului în Figura 1.3 indică faptul că poluarea aerului ambiental depășește ghidul limită al OMS, în special pentru poluanții PM_{10} și $PM_{2.5}$ (WHO, 2019).

Rwanda, o țară situată în estul Africii, cuprinde o suprafață de 26.338 de kilometri pătrați și experimentează în prezent o urbanizare rapidă și o creștere demografică accelerată, ajungând la 12,6 milioane de locuitori în 2020 (Kalisa et al., 2018). În ceea ce privește calitatea aerului, problema principală constă în lipsa datelor privind calitatea aerului, împreună cu o deficiență în stațiile și standardele de monitorizare a calității aerului. Această inadecvare reprezintă problema de bază în studiile demografice și de calitate a aerului din Rwanda. Potrivit lui WHO (2018) și Brauer et al. (2012), aproximativ 3000 de decese au fost legate de poluarea aerului ambiental, identificate prin seturile de date satelitare. Cu toate acestea, există o absență semnificativă de studii

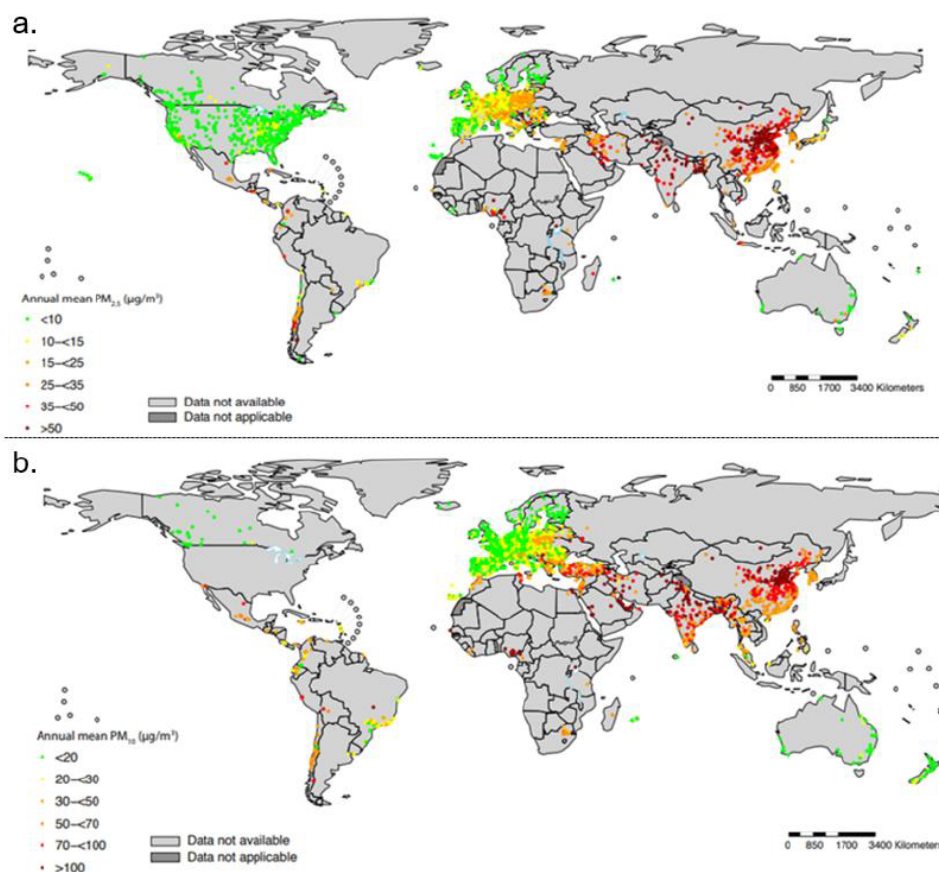


Figure 1.3: Harta monitorizării actuale a calității aerului și nivelele de concentrație ambientală pentru $PM_{2.5}$ (a) și PM_{10} (b) între 2010 și 2016 (WHO, 2019).

care să valideze aceste seturi de date estimate prin observații terestre. Conform lui O’Shaughnessy & Altmaier (2011) și EPA (2009), atunci când poluanții atmosferici din surse diverse nu sunt ușor de eșantionat tehnic prin metoda de monitorizare pe loc sau în apropierea locului, modelele de dispersie a poluanților atmosferici pot fi folosite ca metodă alternativă. Prin urmare, în afara problemelor legate de stațiile și datele de monitorizare a calității aerului, în Rwanda, până în prezent, nu s-a efectuat nicio studiu de cuantificare a concentrațiilor de poluanți atmosferici prin modelare a dispersiei sau a evaluării riscurilor corespunzătoare lor.

Autoritatea Rwandeză pentru Managementul Mediului (REMA) are responsabilitatea de a formula, executa și valida strategii și planuri dedicate protecției, conservării, promovării și gestionării mediului în Rwanda. Această mandată este ferm conturat în legea nr. 63/2013 din 27/08/2013, care elucidează misiunea și operațiunile REMA în întreaga țară. Cu toate eforturile guvernului Rwandez de a identifica sursele semnificative de poluare a aerului și de a îmbunătăți supravegherea națională a calității aerului, în special în Kigali, capitala țării, poluarea aerului ambiental rămâne o

amenințare tot mai mare pentru sănătatea umană, progresul economic și capitalul uman din țară (Fisher et al., 2021; Taghian et al., 2024). Prin urmare, există o imperativă critică de a înțelege tendințele schimbătoare ale poluării aerului ambiental. În 2017, REMA a colaborat cu Ministerul Educației din Rwanda pentru a iniția proiectul de monitorizare a calității aerului și a schimbărilor climatice. Obiectivul principal al acestui proiect a fost să stabilească un sistem de monitorizare a calității aerului la nivel național și să consolideze abilitățile și capacitățile oamenilor de știință rwandezi și a personalului din instituțiile de învățământ partenere. Această inițiativă își propune să abordeze problemele de mediu privind calitatea aerului și variabilitatea climatică din Rwanda (REMA, 2022). Prin urmare, prin colaborarea dintre Ministerul Afacerilor Externe al României, Ministerul Educației din Rwanda și Ministerul Mediului din Rwanda, s-au asigurat fonduri pentru această teză de doctorat. Scopul este de a introduce o soluție pentru a aborda problema identificată a calității aerului și efectele sale asupra sănătății în Rwanda.

1.3 Lacune în Cercetare

După revizuirea literaturii, au fost identificate lacune importante în studiile privind calitatea aerului:

- În timp ce există un interes global crescând în înțelegerea inventarelor de emisii de poluanți aerieni în țările în curs de dezvoltare, catalizat de factori precum arderea biomasei, urbanizarea rapidă și fenomenele naturale, persistă o lacună semnificativă în ceea ce privește impactul subtil al topografiei locale asupra acestor emisii. Abordarea acestei lacune este vitală, deoarece împiedică înțelegerea cuprinzătoare a modului în care factorii geografici modelează în mod complex dinamica poluanților aerieni. Este necesară o cercetare urgentă pentru a explora și clarifica modurile specifice în care diversele topografii influențează transportul, distribuția și concentrația poluanților aerieni în diferite regiuni, în special în țările în curs de dezvoltare, pentru a dezvolta inventare de emisii mai precise și strategii de reducere.
- La nivel global, cercetarea limitată s-a îndreptat către studii cuprinzătoare privind calitatea aerului axate pe monitorizarea pe termen scurt la marginea drumului a emisiilor de trafic. Aceste studii adesea nu iau în considerare influența potențială a

emisiilor din apropiere și a altor surse afectate prin circulațiile atmosferice, ducând la măsurători incomplete. În mod semnificativ, există o lipsă considerabilă de revizuirii specifice ale literaturii care să examineze în mod exhaustiv emisiile de trafic, cuprinzând aspecte precum categoriile de vehicule, utilizarea combustibililor fosili în transport, caracteristicile drumurilor și sursele potențiale de emisii la marginea drumului.

- În ciuda atenției evidente acordate monitorizării in-situ a materiilor particulare (PM_{10} și $PM_{2.5}$) în Africa, există o lipsă semnificativă în literatură în ceea ce privește informațiile comprehensive privind tendințele pentru alți poluanți aerieni cruciali, și anume CO, SO₂ și NO₂. În timp ce Figura 1.3 evidențiază lacunele existente, accentul s-a concentrat în principal pe materia particulată, lăsând o lipsă semnificativă de date comprehensive și analize de tendință pentru acești poluanți adiționali. Această lacună subliniază necesitatea unor strategii de monitorizare mai extinse și mai incluzive care să cuprindă un spectru mai larg de poluanți aerieni, facilitând astfel o înțelegere mai holistică a dinamicii calității aerului în regiunile africane.
- În timp ce există cunoștințe istorice privind efectele potențiale ale activităților miniere asupra mediului și sănătății, cercetarea recentă dedicată înțelegerii cuprinzătoare a impactului mediului al activităților miniere asupra calității aerului este insuficientă. Există o nevoie crucială de cercetare care să cuantifice ratele de emisii de poluanți prin integrarea monitorizării in-situ, a modelării dispersiei și a evaluărilor fluxurilor relevante atât verticale, cât și orizontale influențate de eroziunea vântului. Această lacună evidențiază necesitatea investigațiilor actualizate și detaliate în relația intricate dintre activitățile miniere, calitatea aerului, eroziunea vântului și alte perspective meteorologice.
- Cercetarea curentă evidențiază necesitatea unei investigații cuprinzătoare a variațiilor spațio-temporale în nivelurile de poluare pentru a identifica și prioritiza punctele fierbinți ale poluării aerului în cadrul mediilor urbane. Cu toate acestea, există o lacună semnificativă în absența unei metodologii acceptate universal pentru definirea și delimitarea acestor puncte fierbinți. Aceste puncte fierbinți pot varia în ceea ce privește sursele lor, poluanții și momentul. Prin urmare, există o nevoie urgentă de cercetare suplimentară menită să dezvolte o metodologie standardizată care să identifice și să delimiteze în mod precis punctele fierbinți ale poluării aerului,

luând în considerare acești factori variabili.

- În ciuda interesului crescut în utilizarea modelelor de dispersie precum AERMOD și ISCST3 pentru dispersia globală a poluanților aerieni, există o lacună semnificativă în evaluarea sistematică a acestor modele în ceea ce privește adaptabilitatea și performanța lor pe diverse modele digitale de elevație (DEM). Lipsa cercetării comprehensive care evaluează riguros modul în care aceste modele se comportă atunci când sunt confruntate cu DEM-uri variate, în special aplicarea de metrice statistice pentru a evalua performanța modelului, este evidentă. Umplerea acestei lacune este crucială pentru îmbunătățirea fiabilității și preciziei acestor modele în simularea dispersiei poluanților aerieni la nivel global. Acest lucru servește ca un ghid important pentru modelatori pentru a obține rezultate precise, asistând astfel factorii de decizie și părțile interesate în luarea deciziilor informate privind managementul calității aerului și strategiile de reducere.

1.4 Obiectivele Studiului

1.4.1 Obiectiv General

Având în vedere accentul global pe protecția mediului și lacunele identificate în studiile privind calitatea aerului, această teză de doctorat își propune să analizeze distribuțiile spațiale și temporale ale poluanților aerieni $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 și CO utilizând măsurători in-situ și tehnici de modelare a dispersiei în România și Rwanda. În plus, își propune să evalueze impactul și riscurile expunerii personale la astfel de poluanți aerieni. Studiul complet urmărește să ofere o înțelegere profundă a dinamicii calității aerului, contribuind astfel la strategii de management mai eficiente și oferind recomandări de politică pentru reducerea poluanților aerieni periculoși.

1.4.2 Obiective Specifice

Pentru a atinge obiectivul general de mai sus, avem următoarele obiective specifice:

1. Realizarea unei revizui cuprinzătoare a literaturii privind modelarea calității aerului și metodele de monitorizare in-situ pentru a crea o resursă exhaustivă pentru viitorii cercetători și studenți.

2. Analizarea datelor de monitorizare in-situ a $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 și CO din fundalul urban al orașului Kigali, Rwanda.
3. Analizarea datelor de monitorizare in-situ a PM_{10} din iazul de decantare Moldova Nouă influențate de eroziunea vântului în sud-vestul României.
4. Descrierea principiilor fundamentale și a tehnicilor de ultimă generație pentru aplicarea modelării dispersiei poluanților aerieni.
5. Cuantificarea factorilor de emisie ai $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 și CO legați de contribuția volumului de trafic urban, diverse categorii de vehicule și atributelor fizice specifice care influențează fluxul de trafic în Kigali.
6. Dezvoltarea și aplicarea unei metode sistemice care analizează și cuantifică efectele eroziunii vântului asupra ratei de emisie, fluxurilor orizontale și verticale ale PM_{10} din iazul de decantare Moldova Nouă.
7. Previzionarea concentrațiilor la nivelul solului și a modelelor de dispersie a $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 și CO în fundalul urban al orașului Kigali.
8. Previzionarea concentrațiilor la nivelul solului și a modelelor de dispersie a PM_{10} în iazul de decantare Moldova Nouă.
9. Evaluarea și analiza impactului caracteristicilor topografice locale complexe asupra tendințelor de dispersie a poluanților aerieni prin diferite modele digitale de elevație (DEM-uri).
10. Analizarea și compararea rezultatelor modelate cu datele monitorizate in-situ ale poluanților aerieni, utilizând metrici statistice pentru evaluarea performanței modelului și diagrame Taylor.
11. Identificarea surselor potențiale de poluanți aerieni în domeniul de modelare folosind diagrame polare bivariate tridimensionale în perspectiva modelării dispersiei și a circulației atmosferice.
12. Cuantificarea indicatorilor de calitate a mediului pentru poluanții aerieni periculoși într-un mediu urban de fundal.
13. Identificarea zonelor de vulnerabilitate (puncte fierbinți) prin evaluarea cu probabilitate mare a expunerii personale la poluanții aerieni periculoși.

14. Aplicarea metodologiei integrate de evaluare a impactului și riscului (IIRA) pentru a evalua impactul și riscul expunerii personale la PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 și CO.

1.5 Întrebări de Cercetare

Întrebarea de cercetare a acestui studiu se învârtă în jurul explicării de ce și cum să aplicăm modelele de dispersie a poluanților aerieni pentru evaluarea și gestionarea riscurilor ambientale în zonele urbane de trafic și miniere. Prin urmare, acest studiu va explora următoarele întrebări:

- Care sunt factorii cei mai critici care influențează calitatea aerului în medii urbane și cum afectează acești factori selecția modelelor adecvate de dispersie a poluanților aerieni?
- Care sunt considerațiile tehnice și comune cheie pentru aplicarea cu succes a modelelor de dispersie a poluanților aerieni în contextul mediilor urbane de trafic și miniere?

1.6 Semnificația Studiului

Studiul intitulat *Cuantificarea Emisiilor de Poluanți Aerieni Prin Măsurători In-Situ și Modelare a Dispersiei în România și Rwanda. Evaluarea Riscului* este de o importanță semnificativă prin integrarea monitorizării in-situ și a modelării dispersiei pentru a cuantifica precis emisiile de poluanți aerieni în ambele țări. Această abordare holistică nu numai că îmbunătățește înțelegerea noastră a dinamicii spațiale și temporale a poluării aerului, dar oferă și date vitale cruciale pentru formularea politicilor și respectarea reglementărilor. Accentul cercetării asupra evaluării riscului este deosebit de pertinent pentru evaluarea impactului potențial asupra sănătății legat de calitatea aerului, în timp ce comparația interțări oferă insights în variațiile regionale. Descoperirile studiului sunt destinate să informeze strategiile de management al mediului, să susțină obiectivele de dezvoltare durabilă și să ofere o contribuție științifică substanțială la înțelegerea dinamicii calității aerului și a tehnicilor de cuantificare a emisiilor. Prin avansurile în tehnici de monitorizare și modelare, această cercetare contribuie semnificativ la sănătatea publică și la sustenabilitatea mediului, având ca scop stabilirea unei înțelegeri robuste a acestor metodologii pentru a sprijini viitoarele monitorizări ale calității aerului, modelarea

dispersiei, cercetările epidemiologice și formularea de politici. Descoperirile ghidează în mod încredințat factorii de decizie în formularea liniilor directoare privind calitatea aerului, strategiile de planificare urbană și reglementările. În plus, acest studiu stimulează colaborarea bilaterală între România și Rwanda, îmbunătățind capacitatea instituțională în cercetarea avansată și contribuind la eforturile globale de reducere a efectelor adverse ale poluării aerului.

1.7 Rezultatele Cercetării Derivate din Teză

1.7.1 Publicații în Reviste de Specialitate cu Recenzare

1. Capitolul 4:

Elisephane Irankunda, Zoltán Török, Alexandru Mereuță, Jimmy Gasore și Alexandru Ozunu. 2024. Prima și extensivă cartografiere a calității aerului pentru particulele fine ($PM_{2.5}$) în orașul Kigali, Rwanda. **Acest articol este în pregătire.**

2. Capitolul 5:

Elisephane Irankunda, Zoltán Török, Alexandru Mereuță, Jimmy Gasore, Egide Kalisa, Beatha Akimpaye, Theobald Habineza, Olivier Shyaka, Gaston Munyampundu și Alexandru Ozunu. 2022. Comparăția între datele monitorizate în situ și rezultatele modelate ale dioxidului de azot (NO_2): studiu de caz, rețelele de drumuri din orașul Kigali, Rwanda. *Heliyon* 8, 12 (Decembrie 2022), e12390. **Doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12390, Jurnal Web of Science (WoS), IF = 4 (2023).**

Elisephane Irankunda, Zoltán Török, Alexandru Mereuță, Alexandru Ozunu, Jimmy Gasore, Egide Kalisa, Beatha Akimpaye, Theobald Habineza, Olivier Shyaka și Gaston Munyampundu. 2022. Identificarea surselor potențiale de SO_2 în Kigali-Rwanda. *Bulletin of Romanian Chemical Engineering Society* 9, 1 (2022), 131–142. **(Jurnal index BDI, ISSN2360-4697, ID:2777075576)**

3. Capitolul 6:

Elisephane Irankunda, Zoltán Török, Alexandru Mereuță, Jimmy Gasore și Alexandru Ozunu. 2024. Evaluarea modelului AERMOD pentru modelarea dispersiei particulelor fine (PM_{10}) în topografia complexă a orașului Kigali-Rwanda. *Environmental Engineering and Management Journal*, 23 (2), 979 - 992, **Jurnal**

Web of Science (WoS), IF = 1.1 (2023).

4. Capitolul 7:

Zoltán Török, **Elisephane Irankunda***, și Alexandru Ozunu. 2024. Modelarea dispersiei PM₁₀ prin eroziunea vântului din bălțile de decantare ale mineritului la Moldova Nouă, România. Environ Monit Assess 196, 1 (Ianuarie 2024), 59. Doi.org/10.1007/s10661-023-12199-1, Jurnal Web of Science (WoS), IF=3.1 (2023), * autor corespondent.

Elisephane Irankunda, Carmen Roba, Horațiu Ioan Ștefănie, Zoltán Török și Alexandru Ozunu. 2024. Evaluarea impactului ambiental al poluării cu praf provenită din bălțile de decantare de la Moldova Nouă, România. **Acest articol este în pregătire.**

5. Capitolul 8:

Elisephane Irankunda, Zoltán Török, și Alexandru Ozunu 2024. Evaluarea poluării aerului urban și expunerea asociată la riscuri și impacturi prin metode de analiză computațională: un studiu de caz în Kigali, Rwanda. **Trimis pentru publicare în jurnalul Web of Science (WoS).**

1.7.2 Prezentări la Conferințe Internaționale

1. **Irakunda, E.** et al. 2022. IDRiM 2022 - A 12-a Conferință Internațională a Societății Internaționale pentru MANAGEMENTUL INTEGRAT AL RISCURILOR DE DEZASTRU. Găzduită de Universitatea Babeș-Bolyai din Cluj-Napoca, 21-23 septembrie 2022. *Modelul de dispersie AERMOD pentru evaluarea riscului de poluare a aerului mediului Viz PM₁₀ din bălțile de decantare de la Moldova Nouă, România.*
2. **Irakunda, E.** et al. 2022. SICHEM2022 Societatea de Inginerie Chimică din România Societatea Chimică Română Academia de Științe Tehnice – Secția de Inginerie Chimică și Universitatea POLITEHNICA din București Facultatea de Inginerie Chimică și Biotehnologii, 17-18 noiembrie 2022, București, ROMÂNIA. *Identificarea surselor potențiale de SO₂ și compararea rezultatelor de modelare cu datele de monitorizare in-situ: studiu de caz, rețelele de drumuri din Kigali-Rwanda.*
3. **Irakunda, E.** et al. 2022. Conferința Internațională despre Calitatea Aerului în Africa (ICAQ'AFRICA2022) găzduită online de CERN, Centrul European de

Cercetare Nucleară, în perioada 11-14 octombrie 2022. *Modelarea identificării surselor de CO: Studiu de caz, Rețeaua de drumuri (RN) din orașul Kigali, Rwanda.*

4. **Irakunda, E.** et al. 2022. Zilele Studenților Doctoranzi Facultatea de Inginerie Alimentară, Turism și Protecția Mediului "Aurel Vlaicu" Universitatea din Arad, A Doua Ediție, 25 noiembrie 2022. *Compararea datelor de monitorizare in-situ și a rezultatelor modelate ale materiei particulare (PM_{10}) pentru evaluarea riscului ambiental: Studiu de caz, bălțile închise de decantare Moldova Nouă – România.*
5. **Irakunda, E.** et al. 2023. "Gheorghe Asachi" Universitatea Tehnică din Iași, România, a 6-a Conferință Internațională a Școlii Doctorale, 17 - 19 mai 2023, Iași, România. Excelență în Studiile Doctorale prin Inovație, Convergență și Interdisciplinaritate. *Identificarea surselor potențiale de NO_2 și compararea rezultatelor de modelare cu datele de monitorizare in-situ: Studiu de caz, Rețelele de drumuri din Kigali-Rwanda.*
6. **Irakunda, E.** et al. 2023. "Zilele Academiei Române de Științe Tehnice (ZASTR)" pe 5-6 octombrie 2023 la Universitatea Transilvania din Brașov. *Evaluarea modelării dispersiei monoxidului de carbon (CO) în topografia complexă a orașului Kigali, Rwanda.*

1.8 Structura Tezei

În afara bibliografiei și a anexelor, această teză are trei părți principale: **Partea I** – Introducere generală și revizuiți ale literaturii (**Capitolele 1 și 2**), **Partea II** – Contribuții personale (**Capitolele 3 – 8**), și **Partea III** – Concluzie generală (**Capitolul 9**).

Capitolul 1 oferă o impresie generală a tezei, obiectivele și conceptele lacunelor de cercetare identificate la nivel național și internațional. **Capitolul 2** oferă revizuiți ale literaturii descrise privind poluanții aerieni atmosferici și modelele de dispersie a poluanților aerieni. **Capitolul 3** detaliază Materialul și Metodologia aplicată specifică pentru cele două cazuri de studiu, orașele Kigali-Rwanda și Moldova Nouă-România. **Capitolul 4** descrie cartografierea materiei particulare ($PM_{2.5}$ și PM_{10}) prin distribuții spațiale și temporale prin aplicarea modelelor de dispersie a poluanților aerieni și a metodologiilor de monitorizare in-situ în orașul Kigali-Rwanda. **Capitolul 5** detaliază caracterizarea și cuantificarea surselor potențiale de poluanți gazoși (NO_2 , CO și SO_2) prin monitorizare in-situ și modelare a dispersiei în orașul Kigali-Rwanda. **Capitolul 6** detaliază evaluarea influenței topografiei complexe a orașului Kigali-Rwanda asupra comportamentului dispersiei materiei particulare (PM_{10}) folosind modelul de dispersie AERMOD. **Capitolul 7** compară datele de monitorizare in-situ și rezultatele modelării dispersiei materiei particulare (PM_{10}) prin eroziunea vântului din mineritul Bazelor de Decantare Moldova Nouă-România. **Capitolul 8** oferă evaluarea impactului și a riscului de expunere personală la poluanții aerieni. În timp ce, **Capitolul 9** oferă rezumatul general, concluziile, contribuțiile, răspunsul la întrebările de cercetare și perspectivele viitoare.

Bibliografia conține toate materialele consultate, inclusiv cărți, articole de cercetare din diferite reviste, site-uri științifice și alte informații web. Ultima parte a acestei teze este anexa care conține grafice suplimentare ale rezultatelor și căile de modelare, certificate și premii de la conferințele internaționale la care am participat.

Chapter 2

Metodologie: Măsurare In-Situ și Modelare a Dispersiei Poluanților Aerieni

2.1 Rețelele Rutiere ale Orașului Kigali, Rwanda

2.1.1 Introducere

Rețeaua rutieră din Kigali, capitala Rwandei, joacă un rol crucial în dezvoltarea urbană și conectivitatea orașului. Ca unul dintre cele mai rapid crescute orașe din Africa de Est, Kigali (Figura 2.2) a cunoscut îmbunătățiri semnificative în infrastructura sa rutieră în ultimele decenii. Rețeaua rutieră a orașului Kigali este un component critic al sistemului de transport al orașului, contribuind la dezvoltarea sa economică, socială și culturală (Figura 2.3). Pentru a aborda efectele emisiilor de trafic asupra stării calității aerului din

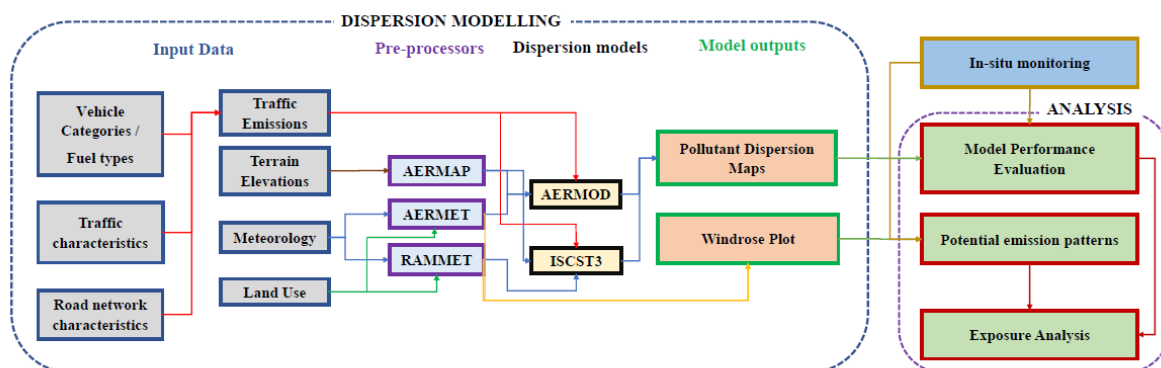


Figure 2.1: Cadru metodologic pentru rețeaua rutieră stradală a orașului Kigali, Rwanda

Kigali, a fost adoptat un cadru metodologic cu trei componente principale: modelarea

dispersiei, monitorizarea in-situ și analiza expunerii personale (Figura 2.1), așa cum este descris în secțiunile următoare ale acestui capitol.

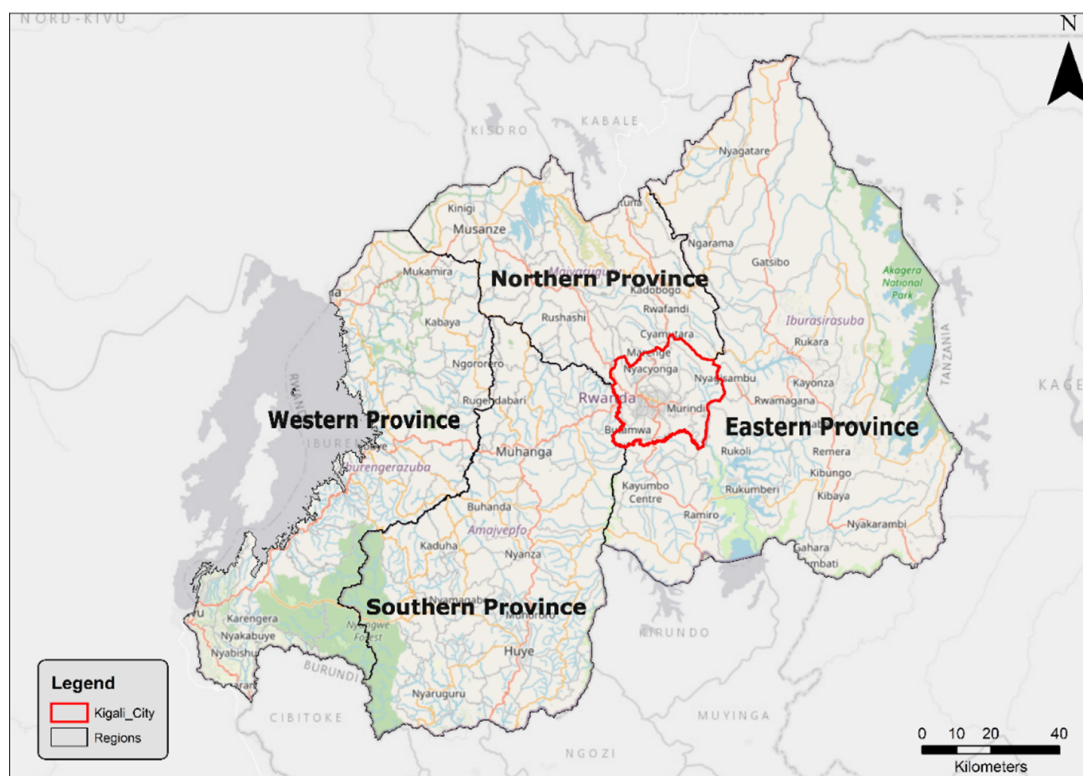


Figure 2.2: Kigali, capitala Rwandei, zona de studiu



Figure 2.3: O stradă aglomerată cu o coadă lungă de vehicule mari de-a lungul unei rute considerate specifice. Sursa: Fotografie realizată de Iradukunda (2021)

2.1.2 Măsurători și Calibrări ale Instrumentelor

Măsurătorile simultane și în timp real în situ ale poluanților aerieni cum ar fi $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , CO și SO_2 la cele șase site-uri considerate (receptori discreți) au fost realizate folosind instrumente de calitate a aerului multi-poluanti (RAMPs) cu cost redus și în timp real (Figurile 2.4 și 2.5) pe o perioadă de un an, 2021. RAMPs au fost produse de compania Sensever, acum deținută de Sensit-Technologies din Valparaiso, SUA. Numeroși cercetători au explicat metoda de calibrare a RAMPs (Malings et al., 2019, 2020; Subramanian et al., 2018, 2020; Zimmerman et al., 2018). RAMPs utilizează senzorul pasiv alpha sense ca senzor electrochimic pentru monitorizarea nivelurilor de concentrație a poluanților aerieni. $PM_{2.5}$, PM_{10} sunt măsurate folosind monitoare de PM de tip Met-One (NPMs) asociate cu fiecare RAMP.

NPMs sunt nefelometre echipate cu ciclone $PM_{2.5}$, PM_{10} , un încălzitor la intrare pentru a mitiga efectele umidității și o pompă cu un debit de 2 lpm. Semnalele brute ale acestor monitoare sunt detectate de patru ori pe minut și apoi tratate și mediate pentru a furniza date orare folosind modelul generalizat de calibrare (gRAMPs) al RAMPs stabilit în Pennsylvania, SUA (Pittsburgh) (Malings et al., 2019; Subramanian et al., 2020). Aceleași RAMPs au fost folosite și de Subramanian et al. (2020) în timpul evaluării impactului zilelor fără mașini în orașul Kigali din Rwanda. Subramanian et al. (2020) au demonstrat funcționarea acestor RAMPs în timp ce investigau performanța lor prin verificare locală cu alte date monitorizate la stația de calitate a aerului Mugogo a Observatorului Climatic al Rwandei situată în vârful muntelui Mugogo, la aproximativ 70 km de orașul Kigali. În 2018, Autoritatea de Management al Mediului din Rwanda (REMA), un departament al Ministerului Mediului din Rwanda, a instalat aceste stații de calitate a aerului în Rwanda cu scopul de a stabili un sistem național care furnizează date în timp real despre Indicele de Calitate a Aerului (AQI). Aceste date sunt prezentate atât în format numeric, cât și codificate pe culori și pot fi accesate pe acest site web: www.aq.rema.gov.rw. Primul raport detaliind exactitatea și metodele de calibrare a fost efectuat de Subramanian et al. (2020), care au utilizat aceleași stații pentru a evalua variabilitatea spațială și temporală a poluării aerului din Kigali. Proiectele de calitate a aerului sunt încă proaspete în Rwanda și necesită site-uri suplimentare de monitorizare in-situ care să acopere întreaga țară pentru a aborda informațiile naționale despre calitatea aerului și indicele.



Figure 2.4: Monitoare de calitate a aerului multi-poluanti (RAMPs) în laborator pentru ajustare și întreținere (stânga) și RAMP instalat pentru monitorizare in-situ la marginea drumului (dreapta). Fotografie realizată de Subramanian et al. (2020)



Figure 2.5: Autorul tezei efectuează întreținerea RAMP instalat la receptorul discret R3 (stânga) și la receptorul discret R6 (dreapta). Fotografia a fost realizată în timpul activității de monitorizare pe teren

2.2 Iazul de decantare de la Moldova Nouă, România

Pentru a aborda efectele activităților miniere și industriale asupra stării calității aerului din orașul Moldova Nouă - situat în sud-vestul României, a fost adoptat următorul cadru metodologic (Figura 2.6) cu trei componente principale: modelarea dispersiei,

monitorizarea în situație și analiza expunerii personale, care este descris în secțiunile următoare ale acestui capitol.

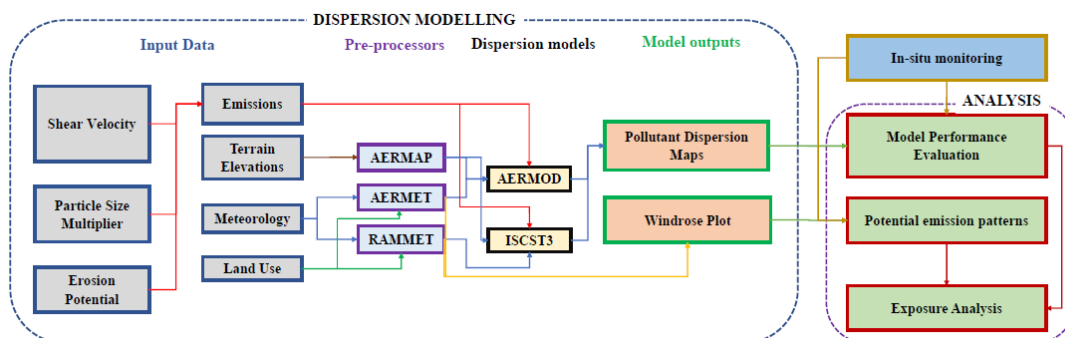


Figure 2.6: Cadru metodologic pentru iazul de decantare de la Moldova Nouă, România

2.2.1 Descrierea Zonei de Studiu

Orașul Moldova Nouă se află în județul Caraș-Severin (CS) din regiunea sud-vestică a României, așa cum este indicat în Figura 2.7, și are o suprafață de 8,514 km². În județul CS, în apropierea frontierei cu Serbia, lângă fluviul Dunărea în munții Locvei, se află amplasarea iazul de decantare de la Moldova Nouă (44° 42' N, 21° 38' E, altitudine 82 m), a doua zonă de studiu a cercetării noastre. Conform Simona et al. (2019) și Barbu et al. (2009), cu influența climatului mediteranean, orașul Moldova Nouă se confruntă cu un vânt intens, cald și uscat cunoscut sub numele de Coșava; direcția sa este în general dinspre sud-est spre nord-vest și, ocazional, regiunile estice ale României. Conform raportului de activitate al CS (CS, 2020), județul avea aproximativ 2,7 milioane de locuitori în 2019. Distribuția populației pe categorii era de aproximativ 14.00

2.2.2 Monitorizarea In-Situ și Calibrarea Instrumentelor

Rețeaua Națională de Monitorizare a Calității Aerului (RNMCA) din România a stabilit peste 100 de stații de monitorizare a calității aerului în conformitate cu scopurile bune de gestionare a calității aerului și mediului. Selecțiile punctelor de monitorizare, calibrările monitorului și validările datelor respectă regulamentele Agenției Europene de Mediu (EEA) și ale Centrului de Date privind Poluarea Aerului (www.eea.europa.eu). Instalarea instrumentelor RNMCA s-a concentrat pe zonele critice, inclusiv traficul urban, industriile, suburbiile și stațiile regionale, pentru a surprinde imaginea de ansamblu a teritoriului în ceea ce privește calitatea aerului. Toate seturile de date privind calitatea

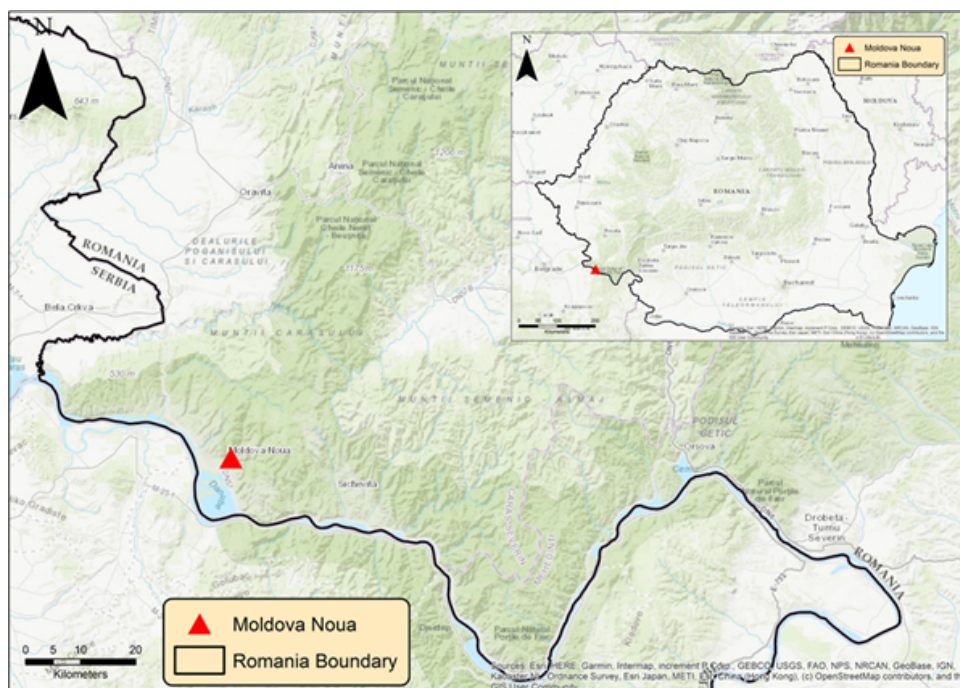


Figure 2.7: Amplasarea iazul de decantare de la Moldova Nouă



Figure 2.8: Stația de calitate a aerului CS5 (stânga) și stația de calitate a aerului CS3 (dreapta) a Rețelei Naționale de Monitorizare a Calității Aerului (RNMCA) folosite în timpul monitorizării in-situ în jurul iazul de decantare închise Moldova Nouă, România

aerului monitorate la nivel național sunt eliberate comunității, cercetătorilor sau părților interesate după ce sunt certificate de Laboratorul Național de Referință pentru Calitatea Aerului (LNRCA) al Agenției Naționale de Protecție a Mediului din România. În această teză, am utilizat datele PM_{10} monitorizate în județul CS de stațiile numărul 5 (CS5) și 3

(CS3) ale RNMCA (www.calitateaer.ro) (Figura 2.8). Stațiile CS5 și CS3 au fost integrate pentru a viza iazul de decantare Moldova Nouă și mediile înconjurătoare dominate de zonele rezidențiale urbane ale orașului Moldova Nouă.

2.3 Configurări și Modelare

AERMOD View versiunea 10.2.1 a software-ului Lakes Environment este un pachet complet de trei modele puternice și reputabile de dispersie a poluanților aerieni: AERMOD, CALPUFF și ISCST3, recunoscute și recomandate de US EPA pentru modelarea calității aerului. A fost instalat pe un computer desktop cu următoarele specificații:

- Procesor: Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1535M v5 @ 2.90GHz 2.90 GHz
- RAM instalată: 32.0 GB (31.6 GB utilizabilă)
- Tip de sistem: sistem de operare pe 64 de biți, procesor pe bază de x64
- Sistem de operare: Windows 10 Pro versiunea 22H2

Aceste modele de dispersie sunt utilizate pe scară largă pentru a modela concentrația și depunerea poluanților aerieni pentru diverse surse (punct, volum, suprafață și linie) din medii rurale și urbane, terenuri plate, înălțate și complexe. În această teză, am utilizat doar modelele AERMOD și ISCST3 ca model de dispersie a plumei gaussiene (secțiunea 2.6.5) pentru a evalua impactul traficului urban și a activităților industriale miniere asupra stării calității aerului din cazurile de studiu corespunzătoare.

2.3.1 Domeniu de Modelare

Domeniul de modelare a fost structurat pe baza obiectivelor și selecției noastre de zone de studiu. Pentru cazul de studiu al orașului Kigali - Rwanda, domeniul de modelare prezentat în Figura 2.9 a fost selectat ca o zonă circulară cu un rază de 6.5 km, proiectată folosind sistemul de coordonate UTM cu datumul World Geographical System 1984 (WGS84). Domeniul este situat în zona UTM 36 din emisfera de sud, includând locațiile rețelei rutiere și cele șase receptori discreți utilizați. Aceste concentrații de ieșire au fost modelate folosind algoritmi de calcul pentru terenuri simple și complexe. Pentru a asigura o durată rezonabilă de rulare a modelului, domeniul a fost divizat într-o rețea uniformă de receptori grilați cu un număr considerabil de receptori (447 receptori) împreună cu un

număr total de puncte 21 pentru X și Y, $x = 1320.71$ m, $y = 787.53$ m ca spațiere și $x = 26414.20$ m, $y = 15750.60$ m ca lungime.

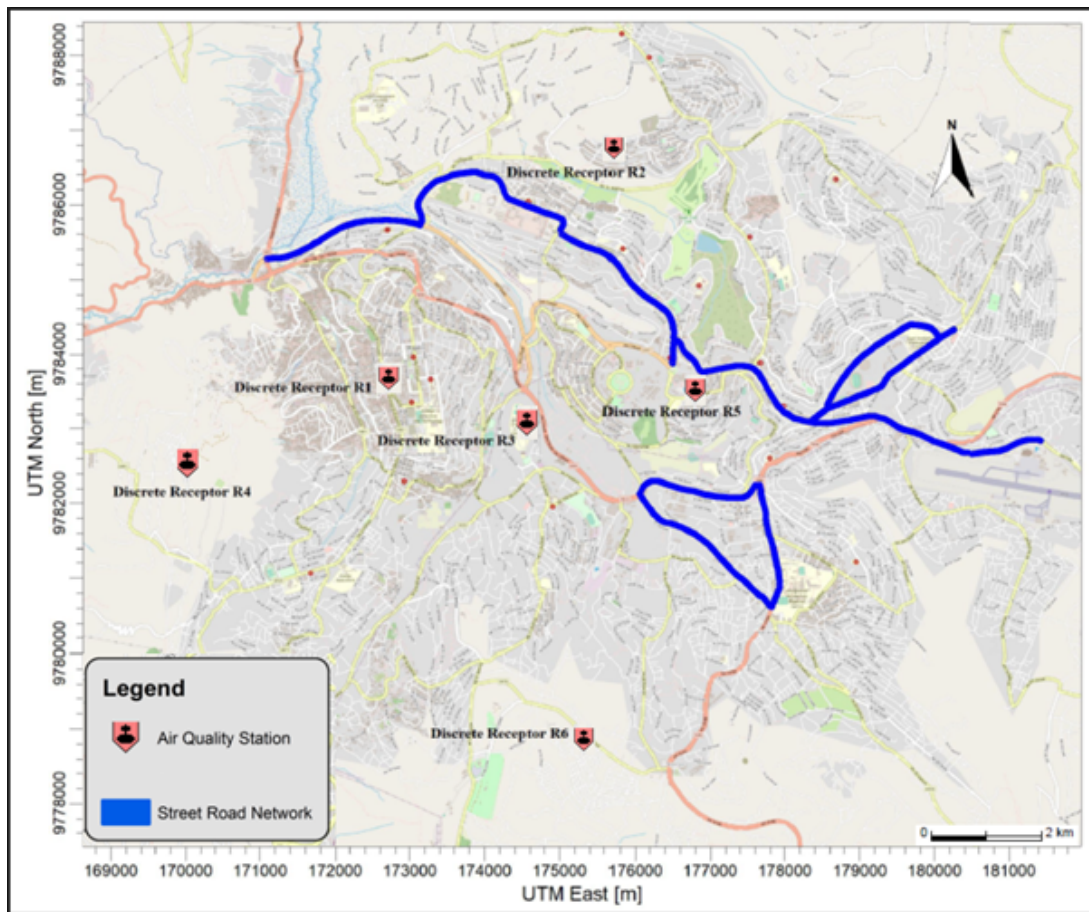


Figure 2.9: Domeniul de modelare pentru cazul de studiu al orașului Kigali, Rwanda

Pentru cazul de studiu al iazul de decantare închise Moldova Nouă, domeniul de modelare prezentat în Figura 2.10 a fost selectat ca un domeniu circular cu un rază de 5.5 km, proiectat folosind sistemul de coordonate UTM cu datumul World Geographical System 1984 (WGS84). Domeniul a fost structurat pentru a include locația stațiilor de calitate a aerului RNMCA considerate (CS5 și CS3). În același timp, calea de control a fost modelată pentru a fi o oră (1H), douăzeci și patru de ore (24H), lunar și concentrații maxime anuale de ieșire folosind algoritmi de calcul pentru terenuri simple și complexe. Pentru a asigura o durată rezonabilă de rulare a modelului, domeniul a fost divizat într-o rețea uniformă de receptori grilați cu un număr considerabil de receptori (441 receptori) împreună cu un număr total de puncte ($x = 21$, $y = 21$), spațiere ($x = 593.68$ m, $y = 596.58$ m) și lungime ($x = 11873.60$ m, $y = 11931.60$ m).

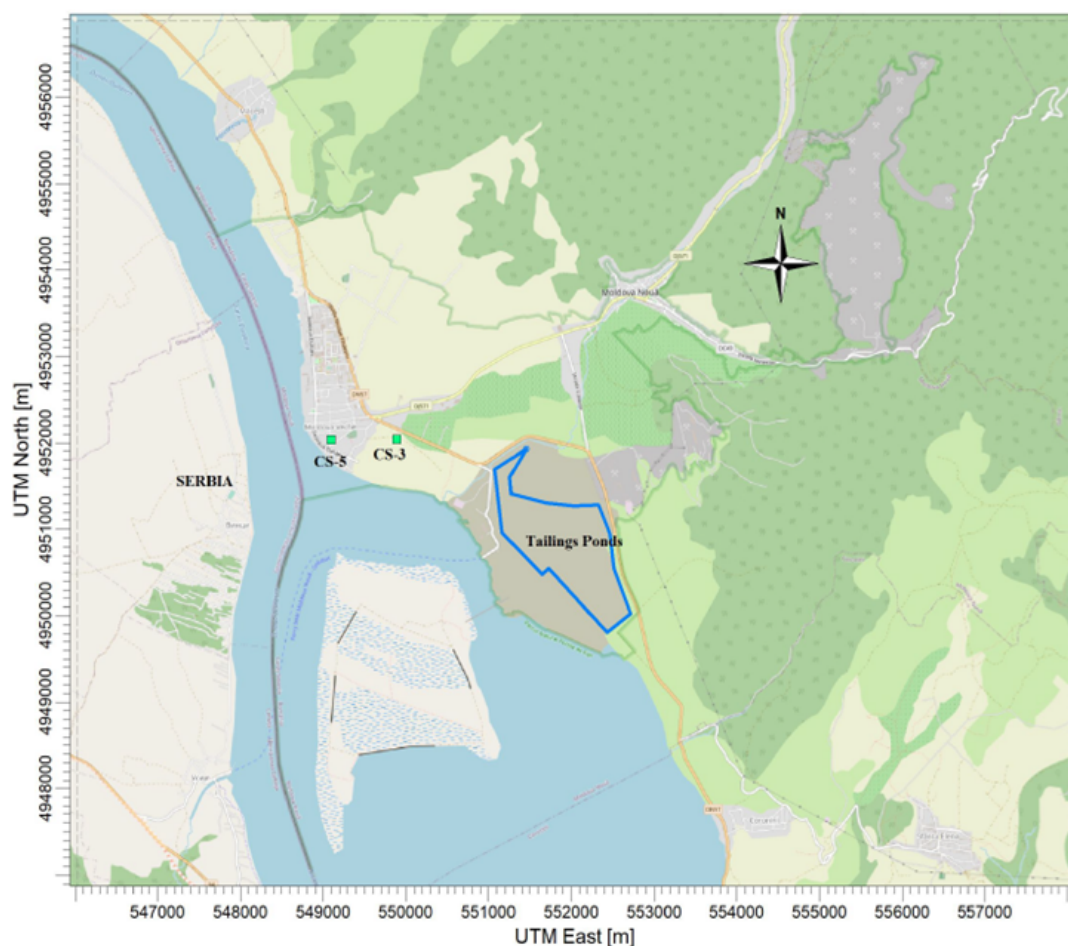


Figure 2.10: Domeniul de modelare pentru iazul de decantare închise Moldova Nouă

2.3.2 Factori de Emisie

2.3.2.1 Rețelele Rutiere ale Orașului Kigali, Rwanda

Pentru cazul de studiu al orașului Kigali, algoritmul metodei Tier-1 descris în ecuațiile (2.1) și (2.2) din Programul de Evaluare a Monitorizării Europene/ Agenția Europeană de Mediu (EMEP/EEA) pentru calculul factorilor de emisie au fost folosiți pentru a evalua factorii de emisie legați de trafic pentru poluanți. Datorită calității datelor disponibile privind mișcarea vehiculelor, am decis să folosim algoritmul Tier-1 în comparație cu alte algoritme disponibile Tier-2 și 3 (EEA, 2019; Ntziachristos & Samaras, 2021; Usabiaga et al., 2013). Volumul de trafic legat de datele privind mișcarea vehiculelor a fost obținut utilizând numărători manuale de vehicule, având în vedere zilele obișnuite de lucru, fără evenimente sau factori externi care afectează fluxul vehiculelor, și abordarea video pentru evaluarea fluxului de trafic. Seturile de date privind volumul de trafic curent ale orașului Kigali provin din Planul Director al Transporturilor între anii 2018 și 2050, departamentul Transporturilor. Seturile de date au fost înregistrate și stocate sub numele de fișier Raport

de Actualizare a Traficului Planul Director al Oraşului Kigali-2050 cu numărul de referinţă al proiectului C-RW000011 (BPMIS, 2019).

$$E_i = \sum_j \left(\sum_k (FC_{j,k} \times EF_{i,j,k}) \right) \quad (2.1)$$

Unde **E**, **FC** şi **EF** reprezintă emisia de poluanţi (g), consumul de combustibil (Kg) şi factorul de emisie al poluantului (g kg⁻¹), respectiv. Indicii: *i* reprezintă tipul de poluant, *j* reprezintă categoria vehiculului, iar *k* reprezintă categoria combustibilului.

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{i,j} \quad (2.2)$$

Unde **TE**, **N**, **M** şi **EF** reprezintă emisia totală a poluanţilor pentru perioada şi limitele spaţiale definite (g), numărul de vehicule din limitele spaţiale definite, distanţa medie parcursă pe categorie de vehicule în perioada specificată (km) şi factorul de emisie în masă pentru poluanţi (g km⁻¹), respectiv. Indicii: *i* reprezintă tipul de poluant, *j* reprezintă categoria vehiculului. În afară de alte poluanţi luaţi în considerare, calculul factorului de emisie pentru SO₂ presupune că tot conţinutul de sulf din combustibil este oxidat complet la SO₂ conform ecuaţiei (2.3) (Amouzouvi et al., 2020; Ntziachristos & Samaras, 2021).

$$E_{SO_2} = 2 \times \sum_k (V_{k,SO_2} \times FC_k) \quad (2.3)$$

Unde **V** reprezintă conţinutul de sulf în (g/g combustibil)

Aplicarea algoritmului Tier-1 în calculul factorilor de emisie legaţi de traficul urban necesită categorii de vehicule care circulă pe drumurile considerate. Drumurile evidenţiate în Figura 2.11 au fost selectate în principal pe baza evaluării volumului lor de trafic, influenţat semnificativ de congestie şi fluxul de trafic (consultaţi Figura 2.3).

2.3.2.2 Moldova Nouă-România

Pentru cazul de studiu al iazurilor de decantare închise Moldova Nouă (Figura 2.12), factorul de emisie se află printre parametrii de intrare necesari în scopuri de modelare. Dat fiind caracteristicile mediului înconjurător al zonei noastre de studiu, am folosit factorul

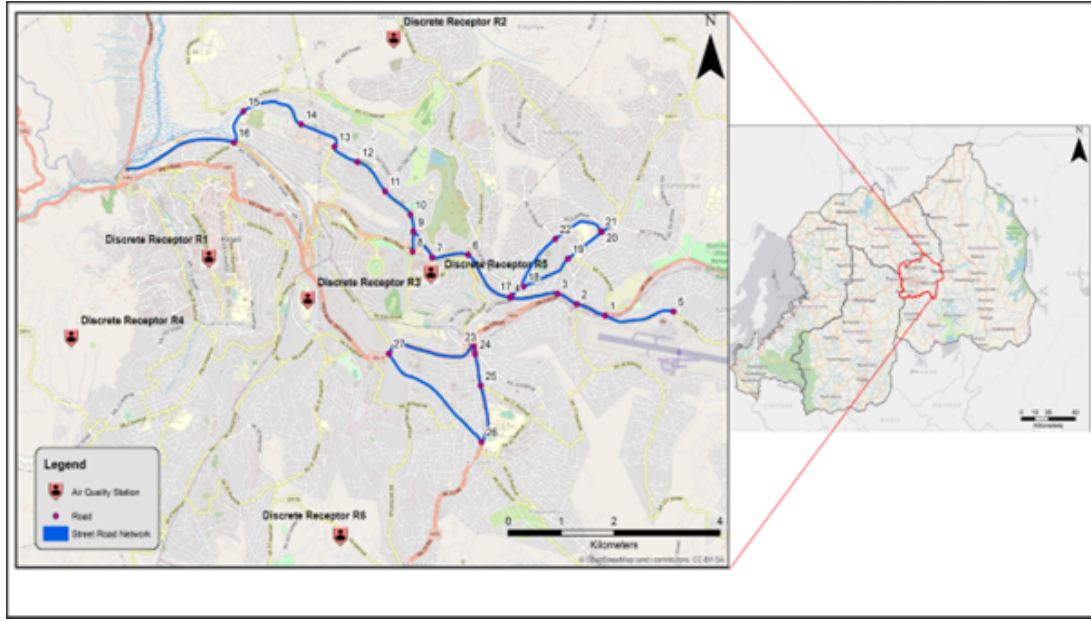


Figure 2.11: Domeniul de modelare, inclusiv rețelele rutiere și stațiile de calitate a aerului

de emisie calculat urmând abordarea directivă dezvoltată și recomandată de US EPA compilată la factorii de emisie a prafului fugar din activitățile de minerit la suprafață deschisă sub influența eroziunii de vânt a suprafeței expuse conform ecuației (2.4) (EPA, 1985, 2006, 2016; Wagner, 2013).

$$\begin{aligned}
 EF &= k \sum_{i=1}^N P_i \\
 P &= 58 (u_* - u_{*t})^2 + 25 (u_* - u_{*t}) \\
 P &= 0 \text{ for } u_* \leq u_{*t}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Unde **EF** reprezintă factorul de emisie (g m^{-2} pentru emisia de particule produse de vânt pe an, k reprezintă multiplicatorul de dimensiune al particulei și este egal cu 0.5 pentru PM_{10} . $\mathbf{P}_i$ reprezintă potențialul de eroziune corespunzător celei mai rapide mile observate (sau probabile) a vântului pentru perioada dintre numărul de perturbații pe an (N), $\mathbf{u}_*$ reprezintă viteza de forfecare în (m s^{-1}), iar $\mathbf{u}_{*t}$ reprezintă viteza de prag a forfecării în (m s^{-1}). Cantitatea masivă de PM_{10} transportată orizontal (flux orizontal) și vertical (flux vertical) de la suprafața iazul de decantare pe unitatea de timp ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) în atmosferă a fost estimată folosind modele matematice. În timpul vizitei de teren, aspectul fizic al iazul de decantare Moldova Nouă a fost împărțit în opt zone diferite (Tabelul 2.1) și Figura 2.13). S-a acordat multă atenție zonelor cu suprafața liberă și expusă a particulelor

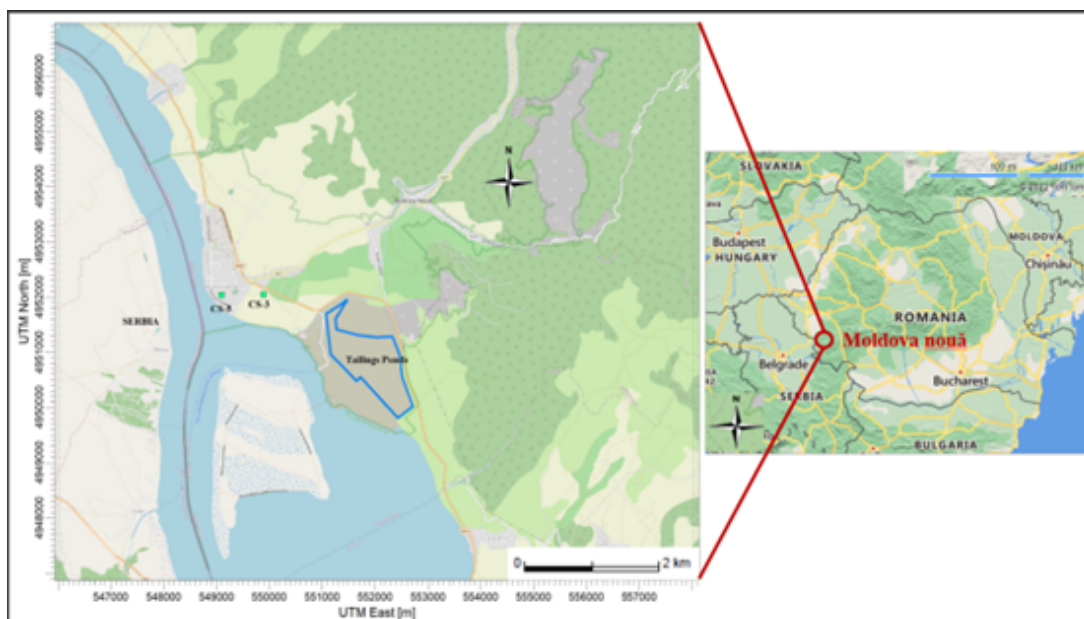


Figure 2.12: Locația iazul de decantare Moldova Nouă (Zona de Studiu a Cercetării) și stațiile de calitate a aerului (CS3 și CS5)

de praf și nisip (Z1, Z3, Z4, Z6 și Z7). În contrast, alte zone (Z2, Z5 și Z8) au fost excluse din cauza caracteristicilor lor fizice (fundal vegetație). Caracteristicile suprafeței și lățimii formelor rectangulare proiectate în zonele considerate, datele profilului de vânt și concentrația modelată în vecinătatea iazul de decantare au fost tratate ca intrări ale modelului matematic, întrebării (2.5).

Table 2.1: Zones characterizing the current physical status of the Moldova Nouă tailings ponds

Zone	Descriptions
Z1	Dump 1 with Wet Sterile
Z2	Dump 1 With Wet Sterile and Vegetation Area
Z3	Dry Sterile Dumpster
Z4	Sterile Dump, With Nearby Vegetation Area
Z5	Dump 2, With Vegetation
Z6	The Ground Base of Dump 1
Z7	Dump 3 With Wet Sterile
Z8	Dump 3 With Dry sterile

Conform lui Roney & White (2006) și Richards-Thomas & McKenna-Neuman (2020),

fluxul orizontal de PM_{10} poate fi obținut cu precizie ridicată prin utilizarea ecuației de abordare a modelului volum-cutie (2.5). Modelul volum-cutie afirmă: ”emisivitatea particulelor din aria de suprafață cunoscută este direct proporțională cu diferența dintre rata orizontală a particulelor de praf transportate înăuntru și în afară într-o cutie conceptualizată”.

$$E = \frac{1}{A_s} (m_o - m_i)$$

$$m_o = \int_0^z c u(z) w_s dz \quad (2.5)$$

Unde A_s și W_s reprezintă suprafața și lățimea locului considerat, respectiv. Unde m_o și m_i reprezintă rata orizontală a particulelor care părăsesc și intră în cutie, respectiv, în timp ce concentrația măsurată a poluanților din aer (c), profilul de viteză medie pe oră a vântului (u), monitorizat în orice poziție (z), au fost considerate intrări suplimentare ale modelului. Recenziile literaturii existente concluzionează motivul pentru care se consideră $m_i = 0$, presupunând că deșeurile din iazul de decantare de la Moldova Nouă sunt singura sursă de PM_{10} (Barbu et al., 2009; Popescu, 2016). Prin urmare, folosind diferența finită de integrală și aproximare (Houser & Nickling, 2001; McDowell et al., 2009; Richards-Thomas & McKenna-Neuman, 2020), fluxul orizontal de PM_{10} a fost calculat folosind modele matematice în ecuațiile (2.5). Fluxul vertical de PM_{10} a fost estimat urmând ghidul după Gillette & Passi (1988) și Gillett & Morales (1979), declarând că fluxul vertical de PM_{10} de la suprafețele solului este estimat pe baza vitezei de forfecare (u_*), pentru care reprezintă constanta Kármán ($k = 0.4$ pentru PM_{10}), și densitatea aerului prin ecuația (2.6).

$$F = -k \rho u_* \frac{dc}{dz} \quad (2.6)$$

Aceste ecuații (2.5) și (2.6) au fost utilizate de Houser & Nickling (2001), Wagner (2013), și Richards-Thomas & McKenna-Neuman (2020) pentru a estima fluxul vertical al particulelor grosiere de PM_{10} de la suprafața nisipoasă. Prin urmare, fluxul vertical ar trebui să fie legat de fluxul orizontal prin viteza de forfecare (Houser & Nickling, 2001).

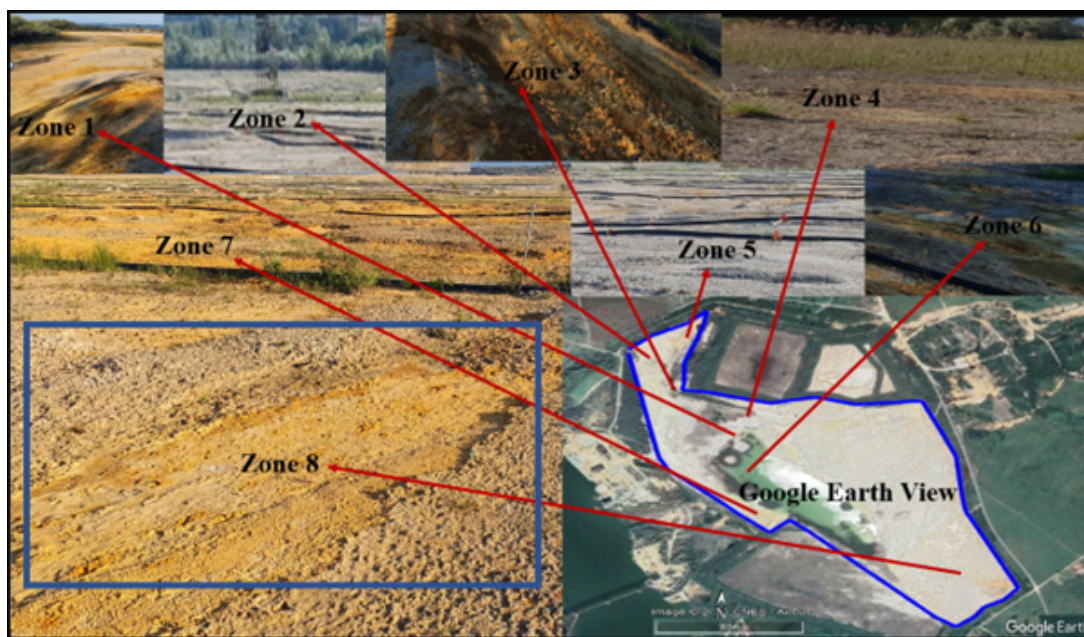


Figure 2.13: Imagini de la vizitele pe teren care arată zonele care caracterizează starea fizică a iazul de decantare de la Moldova Nouă

2.4 Analiză statistică

Analiza statistică pentru această teză a utilizat capacitățile versiunii R 4.2.2, care rulează pe platforma x86-64-w64-mingw32/x64, personalizată pentru Windows (64-bit). R este un limbaj de programare foarte apreciat, cunoscut în special pentru calculul statistic și analiza datelor. Folosind R Studio ca mediu de dezvoltare, această versiune oferă o gamă de instrumente optimizate pentru vizualizarea datelor, modelarea statistică și analiza. Pentru domeniul specific al analizei calității aerului, pachetul open-air din R stă drept o resursă esențială. Open-air se specializează în gestionarea seturilor de date privind calitatea aerului, oferind o suită de funcții și instrumente proiectate explicit în acest scop. Prin integrarea lui R și pachetul open-air, această cercetare efectuează analize cuprinzătoare, vizualizează structuri de date complexe precum remuestrirea în perioade medii zilnice (24 de ore) și efectuează modelarea statistică adaptată nuanțelor seturilor de date privind calitatea aerului (Carslaw & Ropkins, 2012).

2.5 Evaluarea performanței modelului

Analiza statistică care a luat în considerare diferite metrice prezentate în ecuațiile (2.7) și (2.8) a fost utilizată pentru a evalua și compara rezultatele modelului și observațiile in-situ. Prin urmare, s-au luat în considerare în această teză deviația fracționară (FB),

deviația medie (MB), fracția de predicții în cadrul factorului de două (FAC2) Chang & Hanna (2004), eroarea pătratică medie normalizată (NMSE), deviația geometrică medie (MG), deviația medie normalizată (NMB), și varianța geometrică (VG) (Barton et al., 2010; Gibson et al., 2013; Hanna et al., 2001) pentru a înțelege în totalitate intuiția legată de încrederea între cele două modele utilizate AERMOD și ISCST3 în estimarea concentrațiilor de poluanți atmosferici.

C_p și C_o reprezintă nivelul de concentrare al valorilor prezise și observate, respectiv, iar σ reprezintă deviația standard. Bias-ul sistematic al modelului indică supraestimarea și subestimarea inferată observațiilor in-situ și este indicat de indicii MG, FB, MB și NMB. Dispersia casuală oferă măsura generală a cât de strâns sunt indicate rezultatele modelate de către VG și NMSE. FAC2 semnifică măsura robustă a raportului, care propune o fracțiune de date între 0.5 și 2.0. Indicele de acord pentru modelul perfect ar putea avea MG, VG și FAC2 echivalente cu 1.0 și 0.0 pentru indicii FB și NMSE (Chang & Hanna, 2004; Gibson et al., 2013). Mai multe detalii și aplicații practice legate de ecuațiile matematice ale acestor indici statistici folosiți au fost făcute de către Chang & Hanna (2004), Haq et al. (2019), și (Barton et al., 2010). Atât rezultatele modelării, cât și datele monitorizate in-situ au fost luate în considerare și folosite pentru a evalua nivelul de expunere umană la poluanții aerului care duc la efecte și riscuri asupra sănătății. Evaluarea a fost făcută ca o comparație de bază între rezultatele studiului și limitele globale de calitate a aerului ale OMS pentru a identifica dacă locuitorii din Kigali sunt expuși la PM_{2.5} periculoși. Prin urmare, aceste rezultate pot fi aplicate pentru a stabili standardele și ghidurile de calitate a aerului ale țării corespunzătoare.

Pentru cazul de studiu al bălților de decantare închise de la Moldova Nouă, am aplicat câteva indicii statistice suplimentare diferite (sistemul de ecuații (2.8)) pentru a evalua consistența și performanța modelului AERMOD în simularea dispersiei PM₁₀. Metricile, inclusiv fracția de predicții în cadrul unui factor de două (FAC2), deviația medie (MB), eroarea medie brută (MGE), deviația medie normalizată (NMB), eroarea medie brută normalizată (NMGE), coeficientul de eficiență (COE), indicele de acord (IOA), și diagrama Taylor care indică deviația standard (SD) a valorilor observate și modelate, eroarea medie pătratică (RMSE), și coeficientul de corelație Pearson (R). Cercetătorii au aplicat și au detaliat formulele și interpretarea fizică a acestor indicii (Khazini et al., 2022; Mohan et al., 2011; Omidvarborna et al., 2018; Srivastava et al., 2021; Verma et al., 2017; B. Zou et al., 2010).

În plus, metricile MB și NMB măsoară bias-ul eficient al modelului ca marker al

supraestimării și subestimării modelului interconectate cu datele monitorizate in-situ. SD, R, MGE, NMGE și NMSE arată măsuri de dispersie aleatoare și bias sistematic. FAC2 este măsura robustă a raportului care implică fracțiunea de date în intervalul 0.5-2.0 (Davison, 2023; Srivastava et al., 2021). COE și IOA confirmă calitatea modelului între -1 și +1, o valoare apropiată de +1 implicând un model mai bun în performanță, în timp ce -1 înseamnă că estimările modelului se abat de la observații conducând la estimări slabe ale observațiilor. (Legates & McCabe, 2013; Willmott et al., 2012). Indicele de acord pentru modelul perfect ar putea avea MB, MGE, NMB și NMGE echivalente cu 0.0 și indicii FAC2, R și NMSE echivalente cu 1.0 (Chang & Hanna, 2004; Gibson et al., 2013).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{FB} = \frac{\overline{(C_o - C_p)}}{0.5 \overline{(C_o + C_p)}} \\ \text{MG} = \text{Exp}(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p}) \\ \text{NMSE} = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\overline{(C_o C_p)}} \\ \text{FAC2} = \text{fraction of data that satisfy } 0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0 \\ \text{VG} = \text{Exp}(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p})^2 \\ \text{MB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (C_{pi} - C_{oi}) \\ \text{NMB} = \frac{\sum_{i=1}^n |C_{pi} - C_{oi}|}{\sum_{i=1}^n C_{oi}} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
MGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (C_{pi} - C_{oi}) \\
NMGE = \frac{\sum_{i=1}^n |C_{pi} - C_{oi}|}{\sum_{i=1}^n C_{oi}} \\
R = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{pi} - \overline{C_p}}{\sigma_{C_p}} \right) \left(\frac{C_{oi} - \overline{C_o}}{\sigma_{C_o}} \right) \\
COE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |C_{pi} - C_{oi}|}{\sum_{i=1}^n |C_{oi} - \overline{C_o}|} \\
IOA = \begin{cases} 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |C_{pi} - C_{oi}|}{2 \sum_{i=1}^n |C_{oi} - \overline{C_o}|}, & \text{when } \sum_{i=1}^n |C_{pi} - C_{oi}| \leq 2 \sum_{i=1}^n |C_{oi} - \overline{C_o}| \\ \frac{\sum_{i=1}^n |C_{pi} - C_{oi}|}{2 \sum_{i=1}^n |C_{oi} - \overline{C_o}|} - 1.0, & \text{when } \sum_{i=1}^n |C_{pi} - C_{oi}| > 2 \sum_{i=1}^n |C_{oi} - \overline{C_o}| \end{cases}
\end{array} \right. \quad (2.8)$$

2.6 Impactele și riscurile expunerii personale la poluanții din aer

Pentru evaluarea impactului și riscului asociat cu poluanții aerieni monitorizați în situație ambientală, s-a folosit Metodologia Integrată de Evaluare a Impactului și Riscului (IIRA), o abordare cantitativă utilizată pentru evaluarea impactului și riscului mediului, în special în contextul poluării mediului. Metodologia dezvoltată și aplicată de Robu et al. (2007) și Ștefănescu et al. (2013) a fost utilizată în mod specific în acest articol pentru a evalua impactul și riscul asociat poluanților aerieni ambientali monitorizați in-situ în zona de studiu. Metodologia IIRA cuprinde următorii parametri:

- *Impactul Ambiental (EI_i)*: Acest parametru reprezintă impactul unui factor ambiental specific (poluant aerian) (i). Este determinat de mărimea (concentrația) factorului ambiental și unitatea sa de importanță (IU_i). Este dat de ecuația (2.10), care descrie relația dintre mărimea și unitatea de importanță în calculul impactului ambiental.

- *Riscul Ambiental* (ER_i): Acest parametru ia în considerare atât magnitudinea EI_i , cât și probabilitatea de apariție (P_i), iar ecuația ((2.11)) arată cum este calculat riscul ambiental ca produs al impactului ambiental și probabilitatea de apariție.

Parametrul indicator de calitate (Q_i) a fost utilizat și calculat ca raport între concentrația maximă admisibilă recomandată a factorului ambiental (MAC_i) și concentrația corespunzătoare monitorizată in-situ (CO_i), așa cum este indicat în ecuația (2.9), care prezintă formula de calcul a parametrului indicator de calitate.

Este important de remarcat că valorile pentru MAC_i folosite în acest capitol au fost obținute din raportul actual al Organizației Mondiale a Sănătății privind concentrațiile maxime admisibile pentru poluanții aerieni, inclusiv particulele (PM_{10} și $PM_{2.5}$), dioxidul de azot (NO_2), dioxidul de sulf (SO_2), și monoxidul de carbon (CO) (OMS, 2021).

$$Q_i = \frac{MAC_i}{CO_i} \quad (2.9)$$

$$EI_i = \frac{IU_i}{Q_i} \quad (2.10)$$

$$ER_i = EI_i \cdot P_i \quad (2.11)$$

Tehnica de evaluare pentru determinarea IU_i și P_i pentru fiecare poluant aerian urmează principiile stabilite de Ștefănescu et al. (2013) și Robu et al. (2007), care cuantifică în mod sistematic importanța și probabilitatea asociate factorilor de mediu în aer, apă de suprafață și sol.

Metoda matricei de importanță evaluează IU_i și cuantifică importanța fiecărui factor de mediu. Această metodă permite o evaluare sistematică a semnificației fiecărui factor în ceea ce privește impactul general. Valorile de importanță pot fi atribuite pe baza expertizei, aportului stakeholderilor sau altor criterii relevante. Similar, probabilitatea de apariție (P_i) primește o valoare între 0 și 1, unde 0 reprezintă o probabilitate zero sau neglijabilă, iar 1 reprezintă o probabilitate certă sau maximă. Valorile specifice atribuite P_i depind de natura factorilor de mediu și de contextul specific al studiului. În cazul proiectului de poluare ambientală discutat în studiu, probabilitatea (P_i) a fost cuantificată ca fiind 0.27, indicând o probabilitate moderată de apariție.

Unitatea de importanță (IU_i) a fost determinată ca fiind 273.97, reflectând semnificația sau ponderea atribuită poluanților țintiți. Aceste valori au fost determinate pe baza metodologiei stabilite de Ștefănescu et al. (2013) și Robu et al. (2007) pentru evaluarea importanței și probabilității factorilor de mediu.

Chapter 3

Discuție Generală a Rezultatelor Tezei și Direcțiilor Viitoare

3.1 Descoperiri Generale

3.1.1 Monitorizarea In-situ

În Kigali, concentrațiile medii anuale de PM_{10} au variat între 44 și 56 $\mu g\ m^{-3}$, nivelurile de $PM_{2.5}$ au variat între 25 și 48 $\mu g\ m^{-3}$ la receptorii R1 prin R6, iar media anuală a NO_2 a fost de 20,35 $\mu g\ m^{-3}$ (R4), 16,07 $\mu g\ m^{-3}$ (R2) și 15,46 $\mu g\ m^{-3}$ (R3). Media anuală a CO a fost de 527,7 $\mu g\ m^{-3}$ (R2), 618,2 $\mu g\ m^{-3}$ (R3) și 721,6 $\mu g\ m^{-3}$ (R6). Media anuală a SO_2 a fost de 59,8 $\mu g\ m^{-3}$ (R3), 62,0 $\mu g\ m^{-3}$ (R6) și 34,8 $\mu g\ m^{-3}$ (R2). Tendințele arată că orele prânzului au emisii mai mici, indicând contribuții semnificative din traficul urban, în special în zilele lucrătoare. Variațiile lunare sugerează poluarea persistentă a aerului, influențată de factori precum circulația atmosferică în timpul sezonului uscat și fenomenul de curățare atmosferică. În ansamblu, factori suplimentari, inclusiv rutele de trafic neasfaltate, influențele caracteristicilor topografice complexe și zonele urbane rezidențiale, contribuie la creșterea poluării aerului în orașul Kigali.

În Moldova Nouă, monitorizarea in-situ a concentrațiilor de PM_{10} relevă variații orare cu o creștere în orele serii (13:00 - 23:00) și o scădere în orele dimineții (00:00 - 06:00 AM până la prânz). Concentrația medie anuală a PM_{10} este de 29,3 $\mu g\ m^{-3}$ la stația CS5 și de 20,9 $\mu g\ m^{-3}$ la stația CS3. Variațiile lunare arată niveluri mai mari de PM_{10} în octombrie, noiembrie și decembrie. Sfârșiturile de săptămână prezintă concentrații mai scăzute, în timp ce viteza și direcția vântului influențează concentrațiile, cu vânturile din sud-est asociate cu nivele mai mari în apropierea iazurilor și vânturile nord-vestice legate

de emisiile urbane în orașul Moldova Veche. Viteza medie anuală a vântului ajunge la 4,87 m/s, cu viteze ale vânturilor în vecinătatea iazurilor de până la 12,80 m/s. Viteza de tăiere este de 0,15 m/s, iar viteza de tăiere a pragului este de 0,005 m/s. Fluxul orizontal și vertical anual al PM_{10} este de $63,3 \mu g m^{-2} s^{-1}$ și $3,0 \mu g m^{-2} s^{-1}$, cu valori maxime la $598,61 \mu g m s^{-2} s^{-1}$ și $28,11 \mu g m^{-2} s^{-1}$, respectiv.

3.1.2 Modelarea Dispersiei

În Kigali, modelarea dispersiei identifică un punct fierbinte de concentrație la coordonatele UTM X: 178654,94 m, Y: 9783542,26 m pentru $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, NO_2 și SO_2 . Utilizând modelele AERMOD și ISCST3, concentrațiile de NO_2 la acest punct au fost de $111,77 \mu g m^{-3}$ (AERMOD: zilnic $50,42 \mu g m^{-3}$, anual $72,26 \mu g m^{-3}$; ISCST3: zilnic $200,26 \mu g m^{-3}$, anual $72,26 \mu g m^{-3}$). Concentrațiile de CO au fost de $1118,0 \mu g m^{-3}$ (AERMOD: zilnic $507,0 \mu g m^{-3}$, anual $726,0 \mu g m^{-3}$; ISCST3: zilnic $1586,0 \mu g m^{-3}$, anual $726,0 \mu g m^{-3}$). Concentrațiile de SO_2 au fost de $106 \mu g m^{-3}$ (AERMOD: zilnic $53,4 \mu g m^{-3}$, anual $58,8 \mu g m^{-3}$; ISCST3: zilnic $135 \mu g m^{-3}$, anual $58,8 \mu g m^{-3}$). Modelarea ISCST3 a arătat niveluri zilnice la sol de $41,1 \mu g m^{-3}$ (PM_{10}) și $38,9 \mu g m^{-3}$ ($PM_{2.5}$), cu concentrații anuale de $14,7 \mu g m^{-3}$ (PM_{10}) și $13,9 \mu g m^{-3}$ ($PM_{2.5}$). Modelarea AERMOD a indicat niveluri zilnice la sol de $22,8 \mu g m^{-3}$ (PM_{10}) și $21,7 \mu g m^{-3}$ ($PM_{2.5}$), cu concentrații anuale de $10,2 \mu g m^{-3}$ (PM_{10}) și $9,7 \mu g m^{-3}$ ($PM_{2.5}$). Concluziile indică emisii locale și surse potențiale legate de trafic, condiții atmosferice și topografie, cu concentrații mai mari din vânturi sud-estice și nord-vestice.

În Moldova Nouă, rezultatele modelării indică un punct hotspot de PM_{10} în apropierea iazurilor de decantare la coordonatele UTM X: 552019,21 m, Y: 4950914,53 m. AERMOD arată o medie zilnică de $563,7 \mu g m^{-3}$ și o medie anuală de $115,5 \mu g m^{-3}$, în timp ce ISCST3 indică o medie zilnică de $37,4 \mu g m^{-3}$ și o medie anuală de $22,5 \mu g m^{-3}$. Calculațiile factorilor de emisie, conform US EPA AP-42 pentru eroziunea vântului în medii miniere, evidențiază emisiile de PM_{10} din iazurile de decantare. Influențele eroziunii vântului, în special din est și nord-vest la viteze variabile, sunt aliniate cu harta modelată de dispersie. Concentrații mai mari ($40, 50, 80 \mu g m^{-3}$) se corelează cu vânturile din sud-est, sugerând iazurile de decantare ca sursă probabilă. Concentrații mai scăzute ($10, 30, 50 \mu g m^{-3}$) la vânturi nord-vestice implică surse suplimentare din emisiile urbane și rezidențiale din orașul Moldova Veche, așa cum se poate observa în Figura 4.7.

3.1.3 Dispersia în Topografie Complexă

Influența topografiei complexe asupra dispersiei poluanților aerului a fost evaluată sub diferite Modele de Elevație Digitală (DEM), respectiv SRTM1 (30 m), SRTM3 (90 m), SRTM30 (900 m) și GTOPO30 (900 m). Performanța modelului prin indici statistici a fost de asemenea evaluată comparând rezultatele modelului pentru fiecare DEM cu observațiile de monitorizare in-situ. Rezultatele au concluzionat că modelarea zilnică a fost de $22 \mu\text{g m}^{-3}$ cu SRTM1 și $23 \mu\text{g m}^{-3}$ pentru alte DEM-uri, în timp ce cea anuală a fost de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ pentru toate DEM-urile. În comparație, indicii statistici au concluzionat că alegerea DEM-ului cu rezoluție mare influențează semnificativ exactitatea predicțiilor modelului, cu SRTM3 și GTOPO30 oferind cea mai bună performanță printre alte DEM-uri. Modelele de dispersie indică faptul că caracteristicile în pantă sau de deal ale topografiei complexe acționează ca bariere pentru fluxul de aer, rezultând acumularea poluanților în zonele joase.

3.1.4 Evaluarea Performanței Modelului

Studiul tezei a folosit diverse analize statistice pentru evaluarea performanței modelului, inclusiv bias fractional (FB), mean bias (MB), fraction of prediction within the factor of two (FAC2), normalized mean square error (NMSE), geometric mean bias (MG), normalized mean bias (NMB), geometric variance (VG), mean gross error (MGE), normalized mean gross error (NMGE), coefficient of efficiency (COE), index of agreements (IOA), și diagrama Taylor indicând deviația standard (SD) a valorilor de observație și modelate, eroarea medie pătratică medie (RMSE), și coeficientul de corelație Pearson (R). În cazul Kigali-Rwanda, PM_{10} și $\text{PM}_{2.5}$ au arătat o bună concordanță cu AERMOD și o concordanță moderată cu ISCST3, pe baza NMSE, FB și FAC2. Pentru NO_2 , s-a indicat o concordanță excelentă prin FB, NMSE și FAC2 cu AERMOD, în timp ce MG și VG au sugerat o concordanță moderată. ISCST3 a arătat o concordanță rezonabilă pentru NO_2 , dar o dezacordare bazată pe FAC2 și VG. CO a arătat o concordanță bună cu ISCST3 și o concordanță moderată cu AERMOD. SO_2 a fost în acord cu FB, NMSE, MG și VG, în timp ce FAC2 a fost de acord moderat cu ambele modele. În general, ISCST3 și AERMOD prezic concentrațiile de poluanți semnificativ și sunt de acord cu observațiile in-situ, cu AERMOD care se descurcă puțin mai bine. În cazul Moldova Nouă, NMB, NMGE, COE, IOA, SD, RMSE și R confirmați acordurile între observații și rezultatele modelului.

3.1.5 Înțelegerea Incertitudinilor Modelului

Dezacordul semnificativ identificat prin metrici statistice în evaluările modelului, AERMOD față de ISCST3, între datele de monitorizare in-situ și rezultatele modelării de dispersie pentru ambele cazuri de studiu poate fi atribuit mai multor factori:

Eroare de Măsurare: Datele de monitorizare a calității aerului pot fi susceptibile la inexactități rezultate din calibrarea instrumentelor, problemele de întreținere sau factorii de mediu. Incertitudinea în precizia măsurărilor poate duce în consecință la incertitudini în evaluarea performanței modelului.

Variabilitatea Spațială: Concentrațiile de poluanți atmosferici pot prezenta variații spațiale din cauza factorilor precum proximitatea față de sursele de emisii, caracteristicile terenului și condițiile meteorologice. Pot apărea incertitudini dacă modelul nu reușește să captureze adecvat această variație spațială.

Variabilitatea Temporală: Concentrațiile de poluanți atmosferici demonstrează, de asemenea, fluctuații temporale pe diferite scale de timp (de exemplu, diurne, sezoniere). Pot apărea incertitudini dacă modelul nu reprezintă în mod adecvat tendințele sau fluctuațiile temporale.

Inventarele de Emisii: Modelele depind adesea de inventarele de emisii pentru a estima sursele de poluare. Incertitudinile în inventarele de emisii, cum ar fi date incomplete sau inexacte despre sursele de emisii, pot introduce incertitudini în predicțiile modelului.

Procese de Transformare Chimică: Reacțiile chimice și procesele atmosferice pot modifica concentrațiile de poluanți în timp și spațiu. Pot apărea incertitudini dacă aceste procese nu sunt reprezentate sau înțelese pe deplin în model.

Date Meteorologice de Intrare: Modelele de calitate a aerului necesită în mod tipic date meteorologice (de exemplu, temperatură, viteză a vântului, stabilitate atmosferică) ca date de intrare. Incertitudinile în datele meteorologice, cum ar fi inexactitățile în prognozele meteo sau metodele de interpolare, pot afecta predicțiile modelului.

Sensibilitatea Modelului la Parametrii de Intrare: Diferite modele de calitate a aerului pot prezenta sensibilități diferite la parametrii de intrare, cum ar fi ratele de emisii, condițiile meteorologice și condițiile de limită. Înțelegerea sensibilității modelului la acești parametri poate ajuta la evaluarea incertitudinilor în predicțiile modelului.

Complexitatea Modelului și Asumpțiile: Complexitatea modelelor de calitate

a aerului și asumptiile pe care le implică despre procesele atmosferice pot introduce incertitudini. Simplificările sau parametrizările proceselor complexe pot duce la incertitudini în predicțiile modelului.

Interacțiunile dintre Poluanți: Poluanții pot interacționa între ei în atmosferă, ducând la reacții chimice intricate și formarea de poluanți secundari. Pot apărea incertitudini dacă aceste interacțiuni nu sunt pe deplin luate în considerare în model.

Incertitudinile în timpul procesului de modelare pot proveni din calcularea factorilor de emisie și instabilitatea atmosferică aleatorie care ar putea afecta meteorologia locală. Procesul de modelare s-ar putea să nu surprindă cuprinzător toate sursele locale potențiale de poluare, inclusiv traficul, emisiile rezidențiale, industriale, de praf și altele, în timp ce datele de monitorizare in-situ reflectă un spectru mai larg de scenarii de emisii. Procesul de modelare implică diverse asumptii și simplificări utilizând ecuații diferențiale matematice ale condițiilor atmosferice și de dispersie. Acest lucru poate duce la discrepanțe între datele de monitorizare in-situ și predicțiile modelului.

3.1.6 Evaluarea Impactului și Riscurilor

Utilizând metodele integrate de evaluare a impactului și riscurilor (IIRA), studiul a evaluat impactul și riscul ambiental asociat expunerii personale la poluanții aerului periculoși. Studiul a identificat zone potențial vulnerabile influențate de densitatea mare a populației, trafic și emisii casnice, cu o probabilitate ridicată de expunere personală cuprinsă între 0,12 și 0,3. IIRA a măsurat cantitativ impactul și riscul prin monitorizarea PM10, PM2.5, NO2, SO2 și CO pe teren. Rezultatele IIRA indică faptul că impactul expunerii personale la PM10 și NO2 se încadrează în limitele permisibile (100-350), în timp ce SO2 și CO pot cauza disconfort (350-500). În mod deosebit, PM2.5 prezintă riscuri atât pentru oameni, cât și pentru ecosistem (700-1000). Evaluarea riscului sub IIRA sugerează măsuri preventive pentru PM2.5 (200-350), acțiuni de monitorizare pentru SO2 și CO (100-200), și un risc neglijabil pentru PM10 și NO2 (mai mic de 100).

3.2 Răspuns la Întrebările de Cercetare

Teza oferă o perspectivă cuprinzătoare asupra modelării calității aerului și oferă soluții pentru întrebările generale de cercetare ale studiului. Ca rezultat, acest studiu original abordează următoarele întrebări de cercetare.

Care sunt factorii cei mai critici care influențează calitatea aerului în medii urbane și cum acești factori afectează selecția modelelor adecvate de dispersie a poluanților atmosferici?

Răspunsul: Studiile de caz prezentate în această teză au fost instrumentale în furnizarea unor explicații precise pentru cei mai critici factori care influențează poluarea aerului urban. Începem cu studiul de caz al orașului Kigali, unde modelarea principalelor poluanți precum PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂ și SO₂ s-a concentrat pe emisiile de trafic. Rezultatele modelării au evidențiat emisiile de trafic ca un factor semnificativ care contribuie la poluarea aerului în Kigali. Monitorizarea in-situ de la marginea drumului a confirmat acest factor pentru unele stații de calitate a aerului. Cu toate acestea, utilizând o abordare inovatoare de identificare a surselor dezvoltată în acest studiu, am dezvăluit că drumurile neasfaltate și emisiile rezidențiale au jucat, de asemenea, un rol semnificativ în degradarea calității aerului din Kigali, așa cum este evidențiat în capitolele 4 și 5. Acești factori cruciali au fost influențați de creșterea populației orașului, care a crescut cererea de utilizare a vehiculelor, rezultând în niveluri mai ridicate de trafic, consum crescut de energie și poluare asociată.

Pe de altă parte, în orașul Moldova Nouă, al doilea studiu de caz, monitorizarea in-situ a relevat faptul că, cu cât cineva se îndepărtează mai mult de iazurile de decantare, cu atât este mai expus la emisiile de trafic și rezidențiale, în plus față de emisiile din iazurile de decantare în sine. Prin urmare, emisiile provenite de la iazurile de decantare Moldova Nouă sunt factori critici atât în vecinătatea cât și în regiunea mai largă din jurul acestor iazuri, așa cum este evidențiat în capitolul 7. Este important să se observe că zonele urbane prezintă variații, iar investigațiile ar trebui să fie efectuate pe baza evidențelor științifice pentru a trage concluzii cu privire la factorii critici care influențează poluarea aerului urban. Factorii suplimentari care contribuie la variațiile calității aerului includ condițiile geografice și meteorologice din cele două cazuri de studiu, orașele Kigali și Moldova Nouă. Kigali este caracterizat de un teren colinar, așa cum este ilustrat în hărțile de elevație a terenului, care pot influența circulația atmosferică și modificările în stratul limită planetară. Prin urmare, această diversitate geografică duce la variații în dispersia aerului și la complexitatea monitorizării in-situ, ceea ce poate duce la date fluctuante de monitorizare in-situ, așa cum este evidențiat în capitolul 6. În studiul de caz al Moldovei Noi, mediul de fond este afectat semnificativ de poluarea aerului rezultată din operațiunile miniere începând cu anul 1974, precum și de factorii meteorologici

precum climatul mediteranean și prezența unui vânt puternic, cald și uscat cunoscut sub numele de Cosava. Acest vânt bate predominant dinspre sud-est spre nord-vest, afectând ocazional regiunile estice ale României. Aceste influențe sunt discutate în detaliu în Capitoul 7 al tezei, în special din perspectiva modelării dispersiei. Având în vedere informațiile disponibile despre inventarele de emisii, datele meteorologice și seturile de date privind utilizarea terenului în cele două cazuri de studiu, utilizarea modelelor de dispersie a poluanților atmosferici, în special AERMOD și ISCST3, a fost o alegere potrivită pentru modelarea calității aerului. Atât AERMOD, cât și ISCST3 sunt modele ușor de utilizat capabile să gestioneze dispersia poluanților atmosferici într-o varietate de terenuri, de la simple la complexe. Acestea încorporează teoria stratului limită planetar printr-algoritmi încorporați și sunt cunoscute pentru simplitatea și aplicabilitatea lor internațională, ceea ce le face foarte recomandate pentru astfel de operațiuni, așa cum este ilustrat în secțiunea 2.10 a acestei teze.

Care sunt considerațiile tehnice cheie și cele comune pentru aplicarea succesivă a modelelor de dispersie a poluanților atmosferici în cadrul mediilor urbane de trafic și miniere?

Răspunsul: Această teză analizează diferite tipuri de modele de dispersie a poluanților atmosferici, iar eficacitatea aplicării lor în zonele urbane depinde de modelul specific utilizat. În acest context, accentul cade pe AERMOD și ISCST3 ca modele de dispersie utilizate. Aspectele tehnice ale aplicării adecvate a modelelor de dispersie a poluanților atmosferici AERMOD și ISCST3 se învârt în jurul asigurării fiabilității datelor de intrare necesare pentru scopuri de modelare, așa cum este detaliat în Figurile 2.1 și 2.6. Considerațiile pentru aplicarea acestor modele implică, de asemenea, implementarea și supravegherea monitorizării in-situ pe termen lung și continuă, care joacă un rol crucial în validarea rezultatelor modelării. În funcție de complexitatea și variațiile condițiilor atmosferice, stratul limită planetar, climatul și vremea pot influența exactitatea și aplicabilitatea rezultatelor modelate.

Prin urmare, așa cum este discutat în secțiunea 2.5 a acestei teze, monitorizarea in-situ continuă este esențială pentru vizualizarea tendințelor și validarea rezultatelor modelării. În multe țări în curs de dezvoltare, provocarea principală constă în finanțarea insuficientă disponibilă pentru monitorizarea in-situ continuă sau finanțarea proiectelor de calitate a aerului. Pentru a aborda această problemă, este imperativ să implicăm

diferiți actori interesați, inclusiv guvernul, instituțiile și agențiile de cercetare, în eforturi colaborative pentru a depăși aceste provocări.

3.3 Concluzii Generale

Creșterea actuală a crizei globale a calității aerului, generată de activitățile industriale, minerit, transport și emisiile urbanizării, ridică preocupări semnificative din cauza impactului său profund asupra sănătății, incluzând probleme respiratorii și cardiovasculare. Este necesară o atenție urgentă pentru strategii cuprinzătoare de reducere a expunerii personale la poluarea aerului. Mai mult, contribuția poluării aerului la crizele de mediu, precum schimbările climatice, variabilitatea meteorologică, ploaia acidă și degradarea ecosistemelor, subliniază necesitatea unei acțiuni imediate din partea comunității științifice, a campaniilor de conștientizare publică și a factorilor de decizie politici. Această teză de doctorat investighează aspecte critice ale calității aerului, managementului mediului și riscurilor și impacturilor expunerii umane la poluanții atmosferici. Se concentrează pe două studii distincte: unul în Kigali, Rwanda, investigând calitatea aerului urban în contextul creșterii emisiilor generate de trafic, și celălalt în iazul de decantare Moldova Nouă din sud-vestul României, examinând dinamica calității aerului într-un mediu de minerit prin eroziune vântului.

Au fost efectuate campanii cuprinzătoare de monitorizare in-situ, implicând o rețea de stații de monitorizare a calității aerului și abordări de modelare a dispersiei, pentru ambele studii de caz. Metodele de colectare a datelor au inclus măsurători simultane în timp real ale $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 și CO , alături de parametri meteorologici locali și volumul de trafic în Kigali, Rwanda. În plus, au fost efectuate măsurători simultane în timp real ale PM_{10} din activitățile de minerit din România. Metodele de modelare au fost examinate prin aplicarea modelelor de dispersie a norilor Gaussian-plume, respectiv American Meteorological Society și Environmental Protection Agency Regulatory Models (AERMOD) versiunea 10.2.1 și Industry Source Complex Short-Term versiunea 3 (ISCST3). Fiabilitatea modelelor a fost evaluată folosind metrici statistice de evaluare a performanței modelelor. Caracterizarea inventarelor potențiale suplimentare de emisii de poluanți atmosferici a fost realizată prin funcții matematice care oferă reprezentări polare bidimensionale tridimensionale ale concentrației de poluanți sub perspectiva dispersiei. Influența caracteristicilor topografice asupra dispersiei poluanților atmosferici a fost examinată prin perspectiva modelării dispersiei sub diferite modele digitale de elevație

(DEM). Studiul a dezvoltat și aplicat o metodă sistematică care analizează și cuantifică efectele eroziunii vântului asupra ratei de emisie (fluxuri orizontale și verticale) de PM_{10} din iazul de decantare Moldova Nouă. Studiul propune utilizarea metodologiei de Evaluare Integrată a Impactului și Riscului (IIRA) pentru a evalua impactul și riscul expunerii umane la poluanții atmosferici.

Rezultatele includ hărți modelate ale dispersiei și identificarea tendințelor de variație spațială și temporală a concentrațiilor de poluanți atmosferici pentru ambele studii de caz. Rezultatele generale evidențiază provocări semnificative ale calității aerului în zonele urbane din Rwanda, în special datorită emisiilor de trafic, cu accent deosebit pe poluanții cum ar fi particulele ($PM_{2.5}$, PM_{10}), dioxidul de azot (NO_2), dioxidul de sulf (SO_2) și monoxidul de carbon (CO). Metricile statistice sugerează că alegerea DEM-ului cu rezoluție înaltă impactează semnificativ acuratețea predicțiilor modelului, în timp ce caracteristicile de creștere a altitudinii ale topografiei complexe creează bariere pentru fluxul de aer afectând acumularea de poluanți atmosferici în zonele joase. Studiul a identificat zone potențial vulnerabile influențate de densitatea mare a populației, trafic și emisii casnice, cu o probabilitate ridicată de expunere personală cuprinsă între 0,12 și 0,3. Rezultatele din reprezentările tridimensionale bivariate confirmă că deteriorarea calității aerului este influențată în primul rând de topografia locală, praf, trafic și emisii casnice în Rwanda. Rezultatele IIRA indică faptul că expunerea personală la PM_{10} și NO_2 rămâne în limite acceptabile (100-350), în timp ce nivelurile de SO_2 și CO pot cauza disconfort (350-500). În contrast, $PM_{2.5}$ prezintă riscuri semnificative atât pentru sănătatea umană, cât și pentru ecosistem (700-1000). Evaluarea riscurilor bazată pe IIRA sugerează necesitatea măsurilor preventive pentru $PM_{2.5}$ (200-350), monitorizarea continuă pentru SO_2 și CO (100-200), și un risc neglijabil pentru PM_{10} și NO_2 (mai puțin de 100) în Rwanda. În iazul de decantare Moldova Nouă din sud-vestul României, studiul elucidează impactul activităților de minerit asupra calității aerului locale, punând accentul pe PM_{10} . S-a observat că dispersia PM_{10} se extinde în orașul Moldova Nouă, apropiindu-se de granița cu Serbia. Concluziile studiului sugerează că acumularea de PM_{10} este cauzată în principal de adunarea masei de aer din cauza vânturilor puternice care trec peste depozitele de deșeuri și iazul de decantare încărcate, contribuind semnificativ la poluarea aerului în regiunea Moldova Nouă. Punctul fierbinte de PM_{10} a fost investigat în vecinătatea bazelelor de decantare, dezvăluind următoarele valori: o concentrație medie anuală de $115,5 \mu g m^{-3}$, un flux orizontal anual de $63,3 \mu g m^{-2} s^{-1}$, și un flux vertical anual de $3,0 \mu g m^{-2} s^{-1}$.

Această teză concluzionează că atât emisiile urbane de trafic în Rwanda, cât și activitățile de minerit din România exercită o influență semnificativă asupra calității aerului locale. Rezultatele subliniază necesitatea unor strategii și politici direcționate pentru gestionarea calității aerului în aceste regiuni, pledând pentru măsuri precum reducerea emisiilor și planificarea atentă a utilizării terenurilor. În plus, cercetarea subliniază rolul crucial al unor cadre cuprinzătoare de modelare și monitorizare a calității aerului pentru a facilita luarea deciziilor bazate pe dovezi. Studiul evidențiază impactul topografiei complexe asupra dispersiei poluanților atmosferici și subliniază aplicabilitatea practică a modelelor de dispersie în zonele în care monitorizarea in-situ este dificilă sau imposibilă. Această cercetare aduce contribuții valoroase pentru a informa integrarea modelelor în procesul decizional politic în regiuni similare. Prin furnizarea unei analize cuprinzătoare a provocărilor asociate emisiilor urbane de trafic și poluării legate de activitățile miniere, acest studiu îmbunătățește înțelegerea surselor și dinamicii poluanților atmosferici.

3.4 Contribuțiile Originale ale Tezei

În plus față de cele 7 articole științifice originale recenzate de către perechi, publicate pe baza acestei teze, obiectivele acestui studiu au fost realizate eficient, rezultând contribuții originale semnificative, concentrându-se pe lacunele identificate în cercetarea calității aerului prin abordări de monitorizare in-situ și modelare a dispersiei. Ca rezultat, au rezultat următoarele contribuții originale specifice din această teză.

- Această teză a adus o contribuție originală furnizând dovezi care să inspire și pe alți cercetători să abordeze lacunele în cercetarea calității aerului, în special în țările în curs de dezvoltare și în regiunile vulnerabile afectate global de poluarea aerului.
- Această teză a abordat lacunele identificate în cercetarea calității aerului anterior efectuată în regiunea Africii de Est, unde nicio cercetare anterioară nu introdusese modele de dispersie a poluanților atmosferici. Ca urmare, această teză contribuie la avansarea și aplicarea modelelor de dispersie a poluanților atmosferici în studiile privind calitatea aerului.
- Metodologia detaliată și aplicată din această teză a furnizat informații despre nivelurile de concentrație a poluanților atmosferici, sursele și contribuitorii potențiali la degradarea calității aerului într-un mediu urban. Aceste informații, la rândul lor,

servesc ca resurse de bază pentru factorii de decizie și factorii de decizie politici, permițându-le să stabilească măsuri de protecție și gestionare a mediului pentru a reduce expunerea publicului la poluanții atmosferici nocivi.

- În timp ce locația Rwandei în inima Riftului African de Est o expune la surse naturale de poluare a aerului, cum ar fi erupțiile vulcanice și furtunile de praf, această teză a adus o contribuție remarcabilă ca primul studiu din Africa care să evalueze impactul topografiei locale asupra dispersiei poluanților atmosferici. Acesta dezvăluie că caracteristicile de creștere a altitudinii sau de deal ale topografiei complexe servesc ca bariere pentru fluxul de aer, ducând la acumularea poluanților atmosferici în zonele joase. Prin urmare, această teză ajută la identificarea zonelor care necesită monitorizare in-situ și intervenții de gestionare, oferind informații valoroase pentru factorii de decizie politici, planificatorii urbani și managerii mediului regional.
- Această teză a utilizat monitorizarea in-situ pe termen lung și continuă realizată la diverse stații de calitate a aerului. Datele provenite din monitorizarea in-situ pot juca un rol crucial în asigurarea calității aerului și prioritizarea sănătății rezidenților din zonele respective. De asemenea, acestea servesc ca un aport valoros pentru stabilirea standardelor de calitate a aerului și formularea reglementărilor și politicilor de poluare în medii urbane și miniere.
- Cuantificarea factorilor de emisie a traficului pentru poluanții aerului $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO , NO_2 și SO_2 în acest studiu oferă o prezentare generală cuprinzătoare a contribuțiilor diferitelor categorii de vehicule, caracteristicile drumurilor și utilizarea energiei în sectorul transporturilor la emisiile de poluanți atmosferici. Prin urmare, informațiile derivate din acești factori de emisie estimativi ai traficului reprezintă o resursă valoroasă pentru factorii de decizie politici și factorii de decizie în formularea planurilor de dezvoltare urbană și strategiilor de îmbunătățire a drumurilor. Această teză introduce metodologia pentru cuantificarea factorilor de emisie ai străzilor și drumurilor, marcând prima sa aplicare în Rwanda. Ca urmare, teza contribuie la fundamentarea utilizării acestei metode stabilite în alte rețele de străzi și drumuri din oraș. Acest abordaj poate de asemenea să fie instrumental în stabilirea limitelor de expunere la marginea drumului pentru poluanții atmosferici.
- Rwanda, țările din Africa de Est și mai multe alte țări, împreună cu Organizația

Mondială a Sănătății (OMS), depind până în prezent de observațiile prin satelit și monitorizarea pe termen scurt pentru generarea rapoartelor privind calitatea aerului. Cu toate acestea, aceste rapoarte pot fi supuse subevaluării sau fluctuațiilor sau incertitudinilor suplimentare. Prin urmare, această teză, prin metodologia sa dezvoltată, subliniază necesitatea monitorizării in-situ pe termen lung și continuă și a modelării calității aerului ca componente esențiale în generarea unor rapoarte privind calitatea aerului mai precise și mai fiabile.

- Această teză a introdus o abordare sistematică pentru a cuantifica factorii de emisie în mediul de minerit, în special cei influențați de eroziunea vântului, pentru prima dată în iazul de decantare Moldova Nouă. Prin urmare, rezultatele oferă perspective valoroase pentru atenuarea deteriorării calității aerului rezultate din procesele miniere și pentru înțelegerea impactului mediului înconjurător al viitoarelor activități miniere.
- Urgența de a aborda riscurile și consecințele expunerii personale la poluanții atmosferici a fost printre obiectivele specifice ale acestei teze. Prin metodologia de Evaluare Integrată a Impactului și Riscului (IIRA) pentru prima dată în Africa, în special pentru a evalua impacturile și riscurile asociate expunerii personale la poluanții atmosferici. Concluziile tezei prezintă recomandări bazate pe dovezi, utile pentru rezidenți, factorii de decizie politici, părțile interesate și planificatorii urbani. Aceste recomandări servesc ca un ghid pentru implementarea unor măsuri strategice de atenuare în răspuns la riscurile identificate și efectele expunerii personale la poluanții atmosferici, provenind atât din surse naturale, cât și antropice.

3.5 Limitări ale Studiului

Acest studiu a contribuit la o înțelegere cuprinzătoare a cuantificării poluanților atmosferici prin combinarea monitorizării in-situ și modelării dispersiei în Kigali, Rwanda, și Moldova Nouă, România. Mai mult, acesta a abordat lacunele de cunoștințe prin demonstrarea aplicabilității modelelor de dispersie a poluanților atmosferici ca instrumente de suport, în special în zonele în care monitorizarea in-situ se dovedește complexă sau aproape imposibilă, o situație comună în țările în curs de dezvoltare. Cu toate acestea, merită menționat că studiul s-a confruntat cu limitări, în principal legate de numărul insuficient de stații de monitorizare a calității aerului. Prin urmare, ar fi fost

foarte valoros să se extindă zona de cercetare pentru a acoperi mai multe puncte simultane de monitorizare in-situ care să cuprindă atât zonele rurale, cât și cele urbane.

3.6 Recomandări pentru Lucrări Viitoare

Metodologia aplicată în acest studiu confirmă sugestiile ca îndrumare pentru lucrările viitoare de îmbunătățire a calității aerului în țările dezvoltate și în curs de dezvoltare, prin înțelegerea și prezentarea dispersiei poluanților atmosferici în atmosferă.

- Pentru cercetările viitoare atât în țările dezvoltate, cât și în cele în curs de dezvoltare, este recomandabil să se extindă abordarea utilizată pentru a cuprinde nu numai mediile urbane, ci și cele rurale. Această perspectivă mai largă poate investiga contribuțiile numeroaselor inventare locale de emisii. Datele provenite atât din zonele rurale, cât și din cele urbane pot oferi o înțelegere cuprinzătoare a calității aerului la nivel local și național, esențială pentru informarea dezvoltării reglementărilor privind calitatea aerului, a rapoartelor și a politicilor inovatoare pentru managementul mediului.
- În acest studiu, am investigat dispersia poluanților atmosferici folosind modelele AERMOD și ISCST3, accentuând impactul semnificativ al topografiei complexe asupra dispersiei poluanților. Recomandăm cu tărie ca cercetările viitoare să utilizeze modele specializate suplimentare, precum SERVEX, pentru a îmbunătăți în continuare înțelegerea în această domeniu.
- În acest studiu, modelele matematice au relevat că acumularea unei mase de aer vântoase deasupra iazurilor de decantare de la Moldova Nouă crește nivelurile de PM10 orizontal mai mult decât vertical. Cercetările viitoare ar trebui să încorporeze metode practice precum experimentele în tunelul de vânt pentru validare. Constrângerile logistice au ridicat probleme în monitorizarea surselor vizate, impunând o recomandare puternică pentru monitorizarea pe termen lung (cel puțin un an) în studiile viitoare pentru a valida rezultatele modelării.

Chapter 4

Prezentarea și Interpretarea Analizei Datelor

În acest capitol, este prezentată și disectată culmea rezultatelor extensive ale cercetării. Prin intermediul unei game cuprinzătoare de tabele și figuri, această secțiune se adâncește în rezultatele empirice obținute din experimentare riguroasă și colectare de date. Fiecare tabel și figură servește ca o reprezentare vizuală a descoperirilor de bază, oferind insights în modelele, tendințele și corelațiile din informațiile adunate. În plus, o analiză detaliată însoțește aceste vizuale, dezvăluind implicațiile și semnificația descoperirilor, stabilind astfel baza pentru o înțelegere subtilă a rezultatelor cercetării.

Table 4.1: Fiabilitatea modelului AERMOD prin intermediul indicilor statistici de evaluare a performanței modelului folosind SRTM3 (global 90m)

Station	FB	NMSE	MG	MB	NMB	VG	FAC2
A	0.10	0.01	1.11	-2.45	-0.10	1.01	0.90
B	0.69	0.53	2.05	-23.83	-0.51	1.67	0.49
C	0.69	0.53	2.04	-23.80	-0.51	1.67	0.49
D	0.46	0.23	1.60	-13.70	-0.38	1.25	0.62
E	0.50	0.27	1.67	-15.25	-0.40	1.30	0.60
F	0.71	0.58	2.10	-25.12	-0.52	1.74	0.48

Table 4.2: Statistici descriptive ale ratei de emisii și profilurilor de eroziune a vântului pe parcursul anului 2021 în iazurile de decantare din Moldova Nouă.

Parameter [unit]	Mean	SD	SE	CV	Min	Q1	Q2	Max
Wind speed U, [m s ⁻¹]	4.87	2.66	0.061	0.84	0.1	1	4.8	12.8
Shear Velocity U*, [m s ⁻¹]	0.15	0.13	0.003	0.84	0.005	0.05	0.23	0.6
Horizontal Flux E, [$\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$]	63.3	85.67	1.973	1.18	1.67	20.98	92.32	598.61
Vertical Flux F, [$\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$]	3	4.02	0.093	1.18	0.08	0.99	4.34	28.11

Table 4.3: Analiza IIRA și monitorizarea in-situ la fiecare stație (de la Stația A până la F) (- reprezintă concentrația lipsă)

Items	Pollutant	A	B	C	D	E	F
Environmental risk (ER)	PM ₁₀	71.9	88.2	87.5	69.1	72.4	92.1
	PM _{2.5}	123.4	230.0	229.6	179.9	187.6	236.3
	NO ₂	-	60.2	45.7	47.5	-	-
	SO ₂	-	64.4	110.6	-	-	114.7
	CO	-	97.6	114.3	-	-	133.4
Environmental impact (EI)	PM ₁₀	266.2	326.6	324.2	255.8	268.1	341.0
	PM _{2.5}	457.2	851.7	850.4	666.3	694.8	875.1
	NO ₂	-	223.0	169.4	176.1	-	-
	SO ₂	-	238.4	409.6	-	-	424.7
	CO	-	361.4	423.4	-	-	494.2
Environmental Quality Factor parameter (Q)	PM ₁₀	1.0	0.8	0.8	1.1	1.0	0.8
	PM _{2.5}	0.6	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3
	NO ₂	-	1.2	1.6	1.6	-	-
	SO ₂	-	1.1	0.7	-	-	0.6
	CO	-	0.8	0.6	-	-	0.6
In-situ monitored concentration (Co) in $\mu\text{g m}^{-3}$	PM ₁₀	43.7	53.6	53.3	42.0	44.0	56.0
	PM _{2.5}	25.0	46.6	46.6	36.5	38.0	47.9
	NO ₂	-	20.4	15.5	16.1	-	-
	SO ₂	-	34.8	59.8	-	-	62.0
	CO	-	5277.0	6182.0	-	-	7216.0

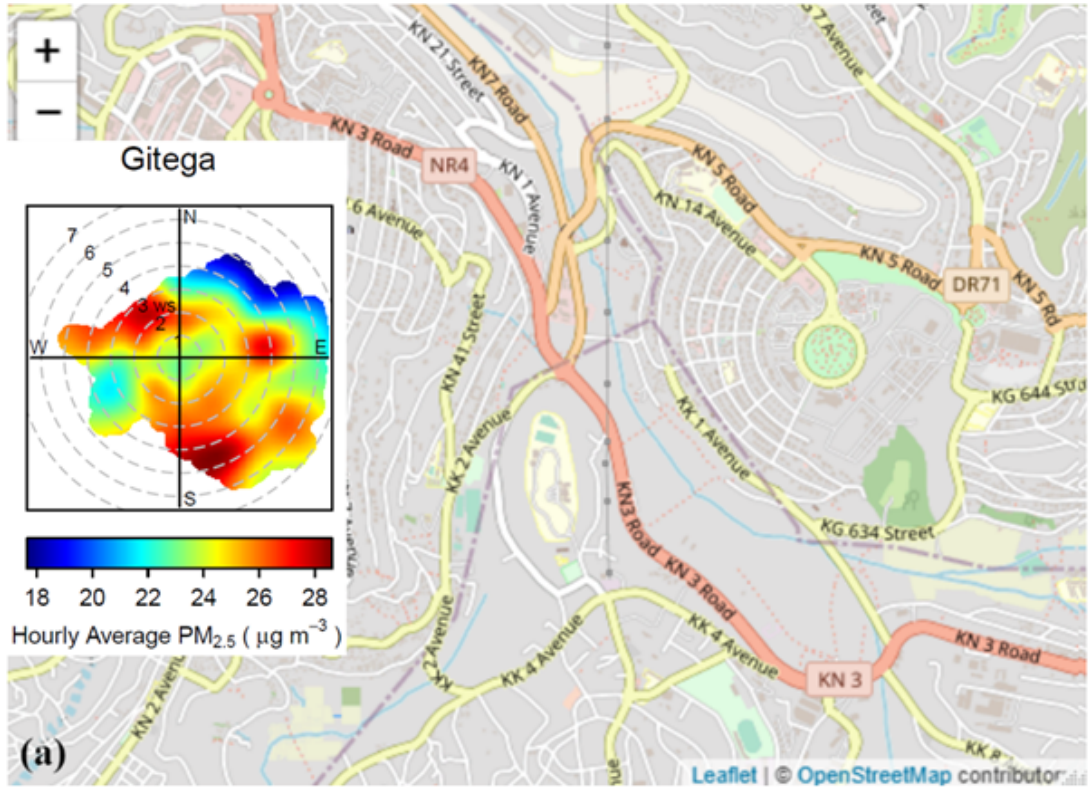


Figure 4.1: Exemplu: Cartografierea punctelor hotspot identificate de $PM_{2.5}$ în oraşul Kigali

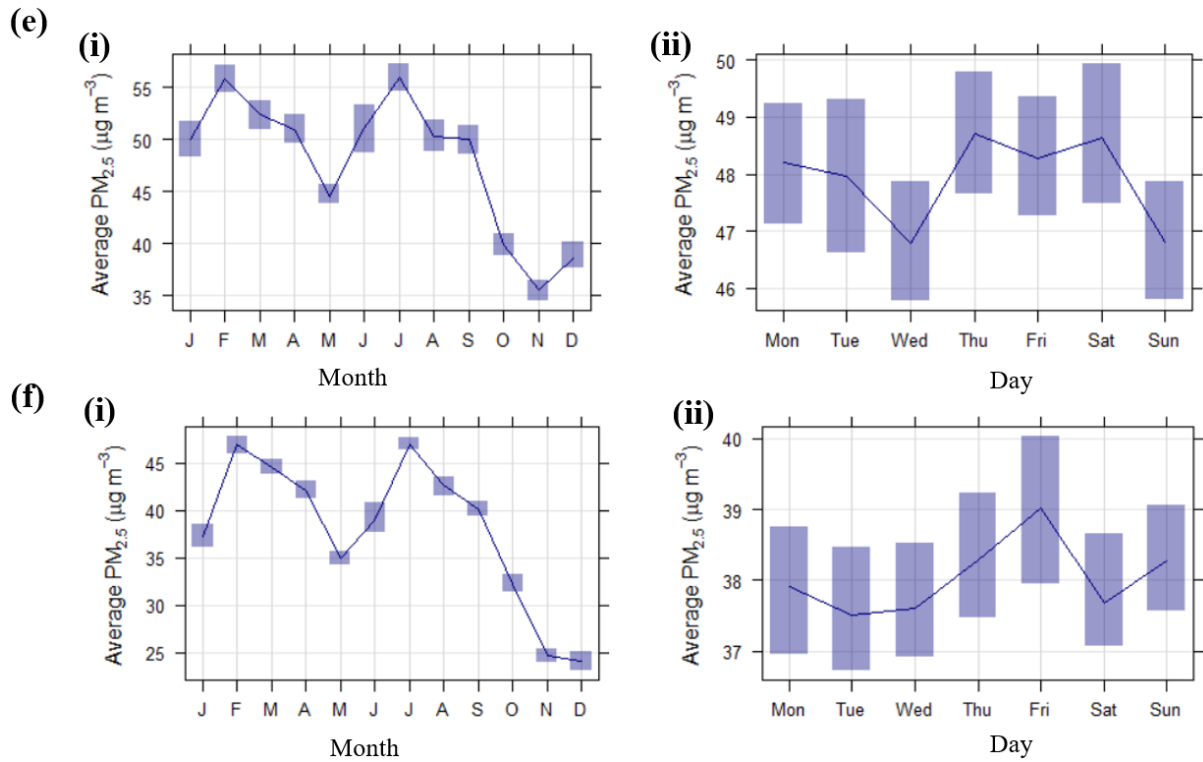


Figure 4.2: Tendinţe temporale netede ale $PM_{2.5}$ la receptorul discret R3.

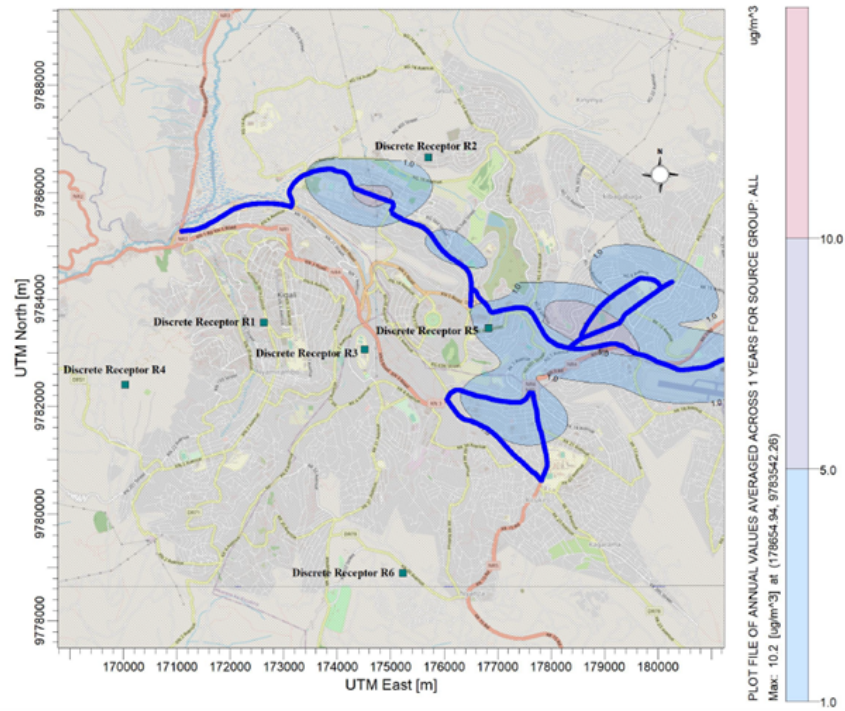


Figure 4.3: Hărți spațiale ale concentrației maxime anuale la nivelul solului pentru PM_{10} cu modelul de dispersie AERMOD.

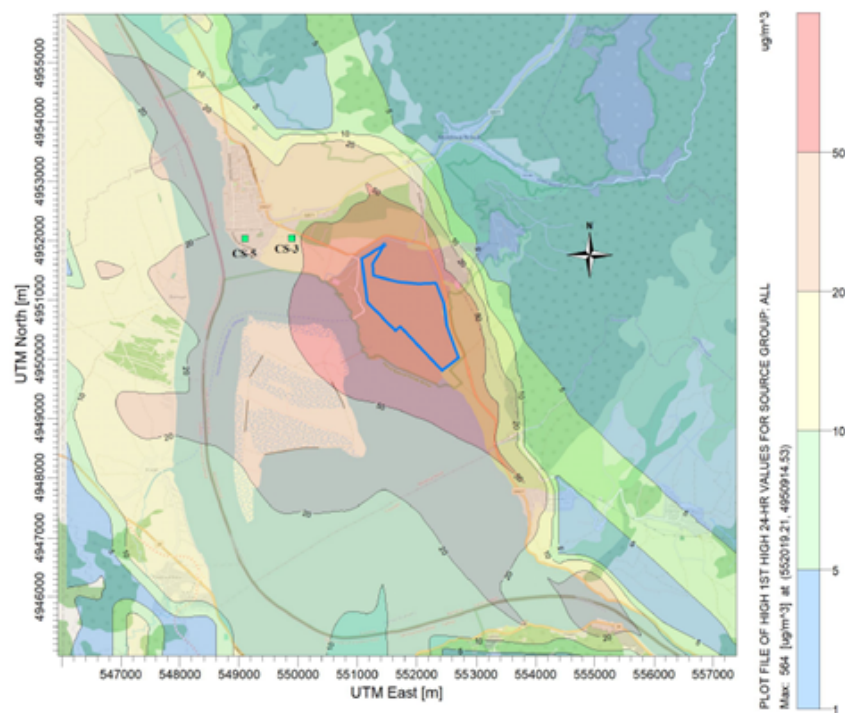


Figure 4.4: Hărți spațiale modelate ale dispersiei zilnice a concentrației maxime la nivelul solului de PM_{10} pentru anul 2021 cu modelul de dispersie AERMOD (Török et al., 2024)

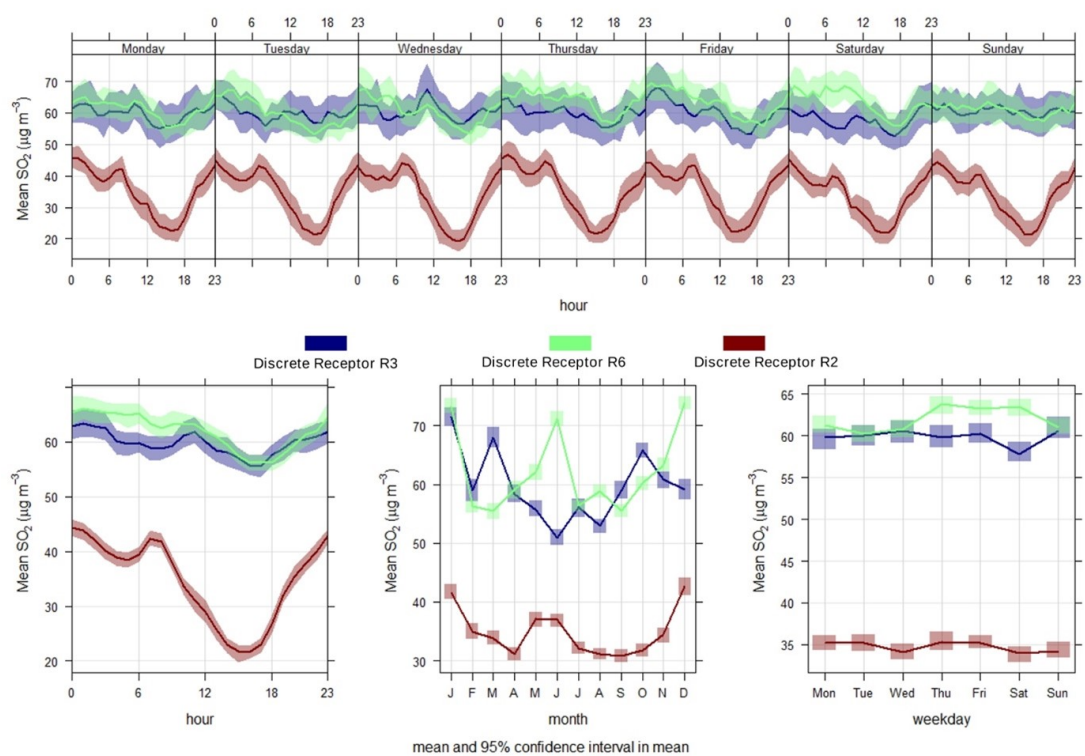


Figure 4.5: Trendurile de variație temporală a observațiilor in-situ pentru SO_2 pe parcursul anului 2021 (Irakunda et al., 2022)

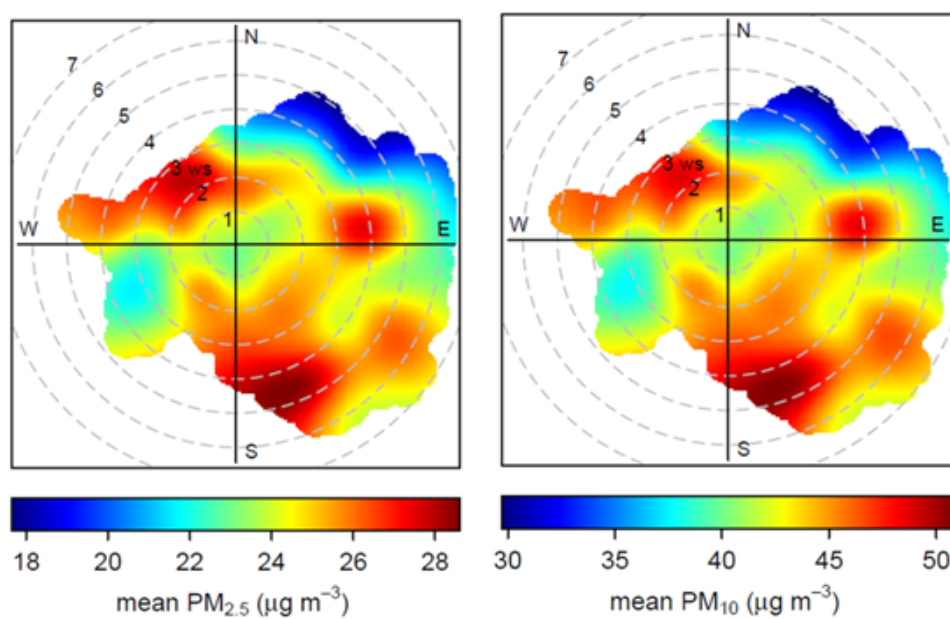


Figure 4.6: Grafice polare bivariate ale $\text{PM}_{2.5}$ și PM_{10} la receptorul discret R1

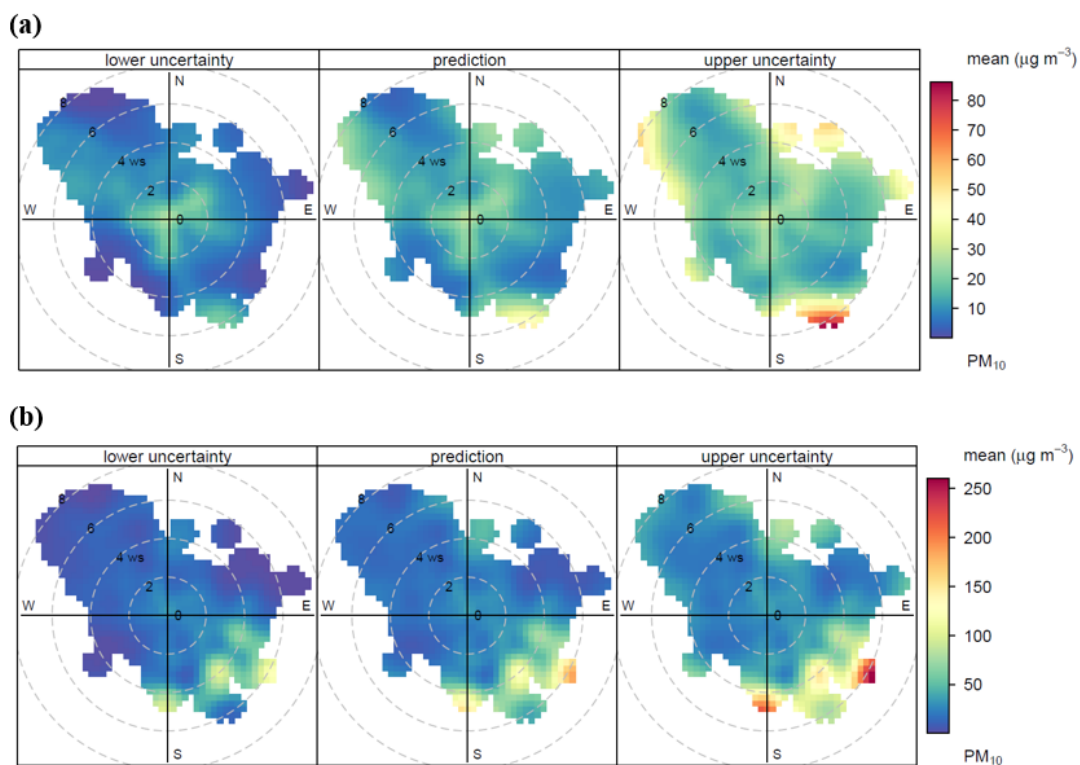


Figure 4.7: Dispersia poluării aerului la trei niveluri de incertitudine: inferior, mediu și superior pentru stația de calitate a aerului CS5 (a) și CS3 (b) (Török et al., 2024)

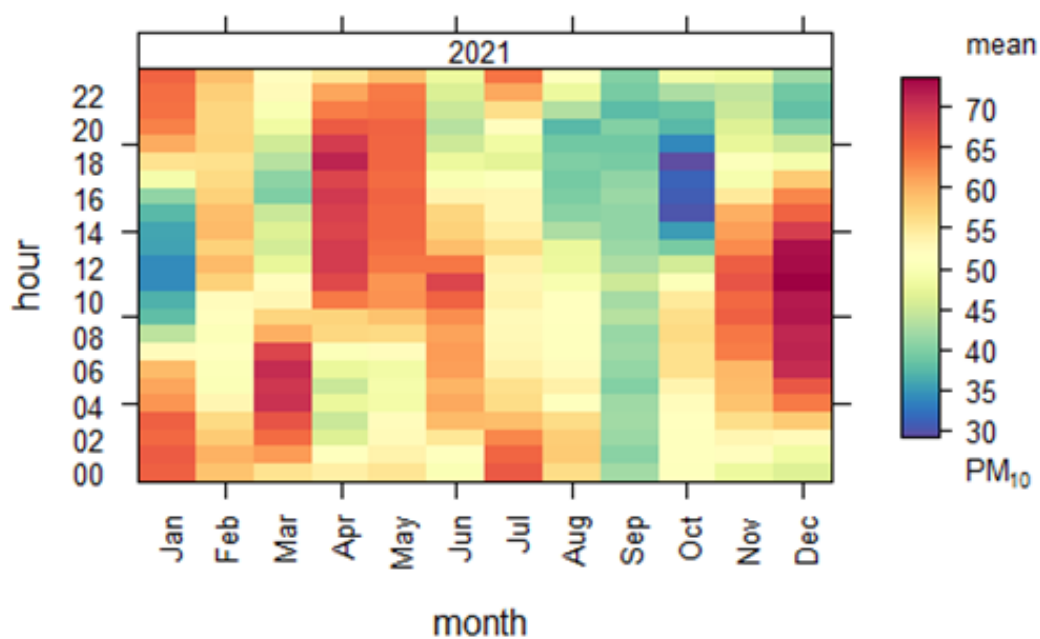


Figure 4.8: Harta termică a trendului de PM_{10} la receptorul discret R3.

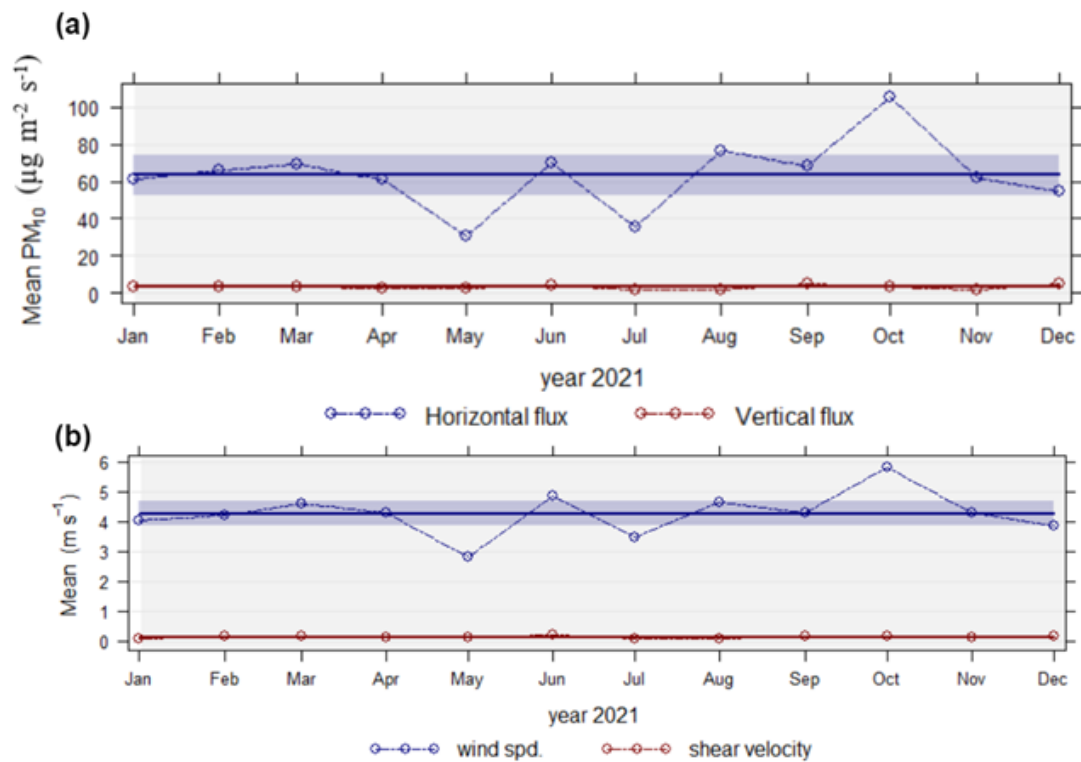


Figure 4.9: Trenduri de variație lunară a fluxurilor orizontale și verticale ale PM_{10} (a) și a vitezei de tăiere și viteză a vântului (b) pe parcursul anului 2021 în iazurile de decantare din Moldova Nouă (Török et al., 2024)

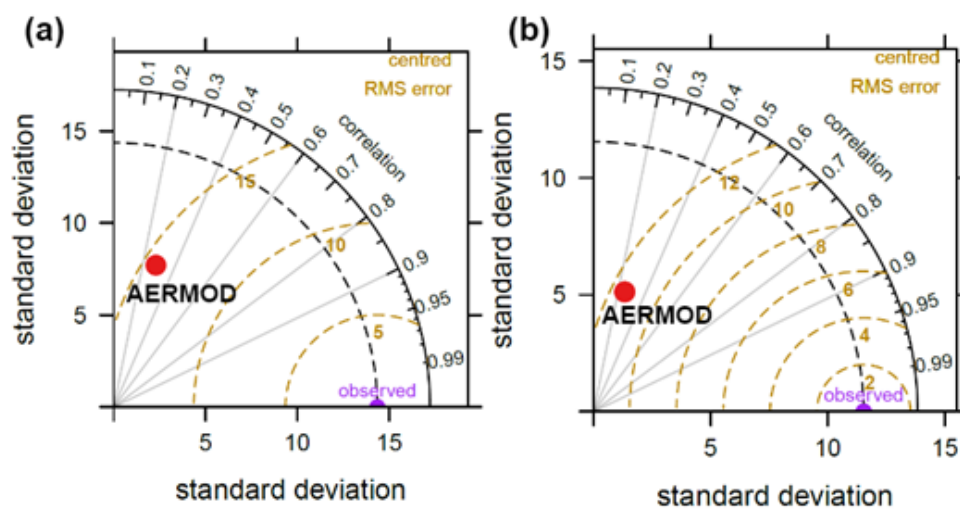


Figure 4.10: Diagrama Taylor pentru stațiile de calitate a aerului CS3 (a) și CS5 (b) (Török et al., 2024)

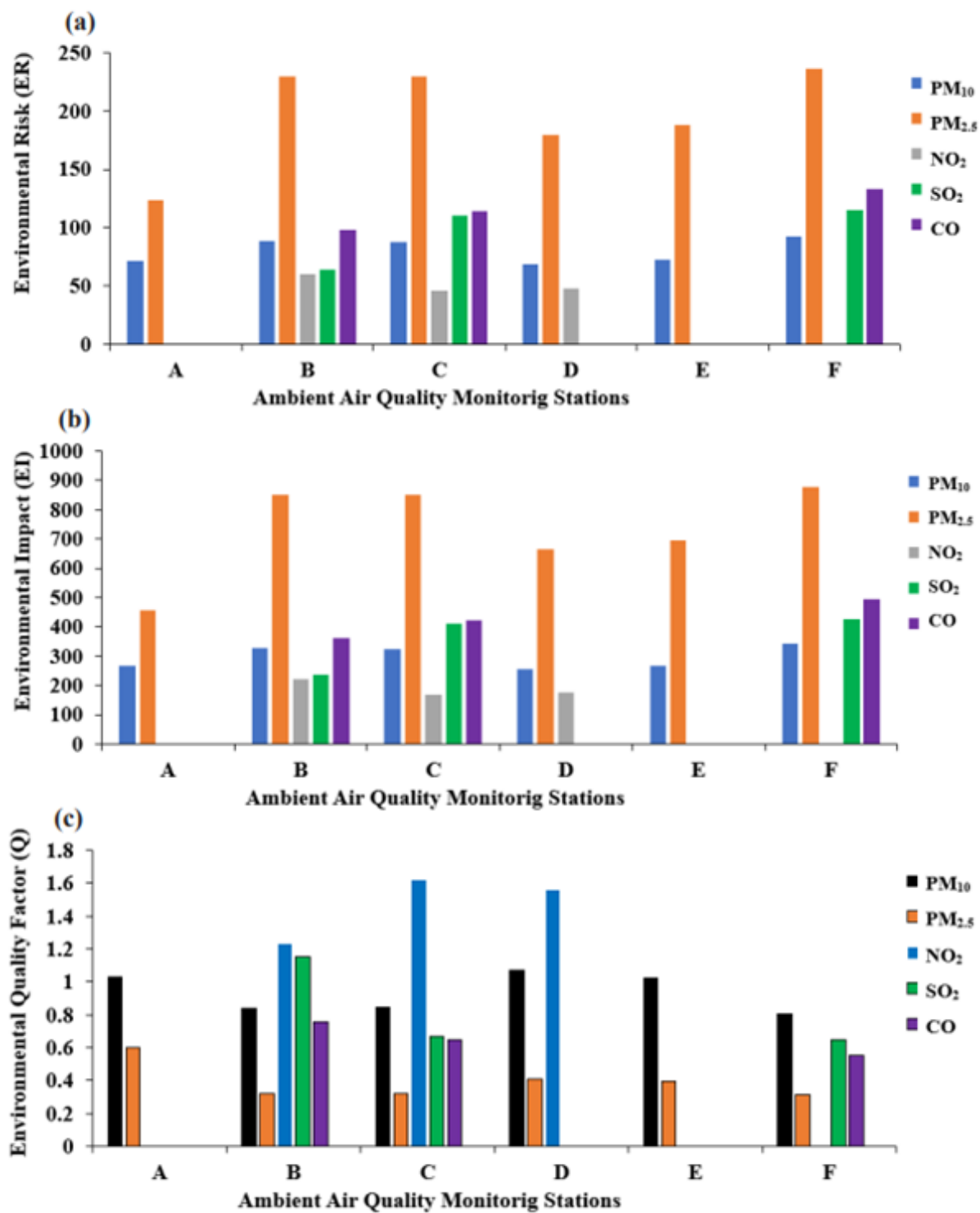


Figure 4.11: Evaluarea cantitativă a riscului ambiental (a), impactului (b) și factorului de calitate (c) pentru fiecare poluant atmosferic.

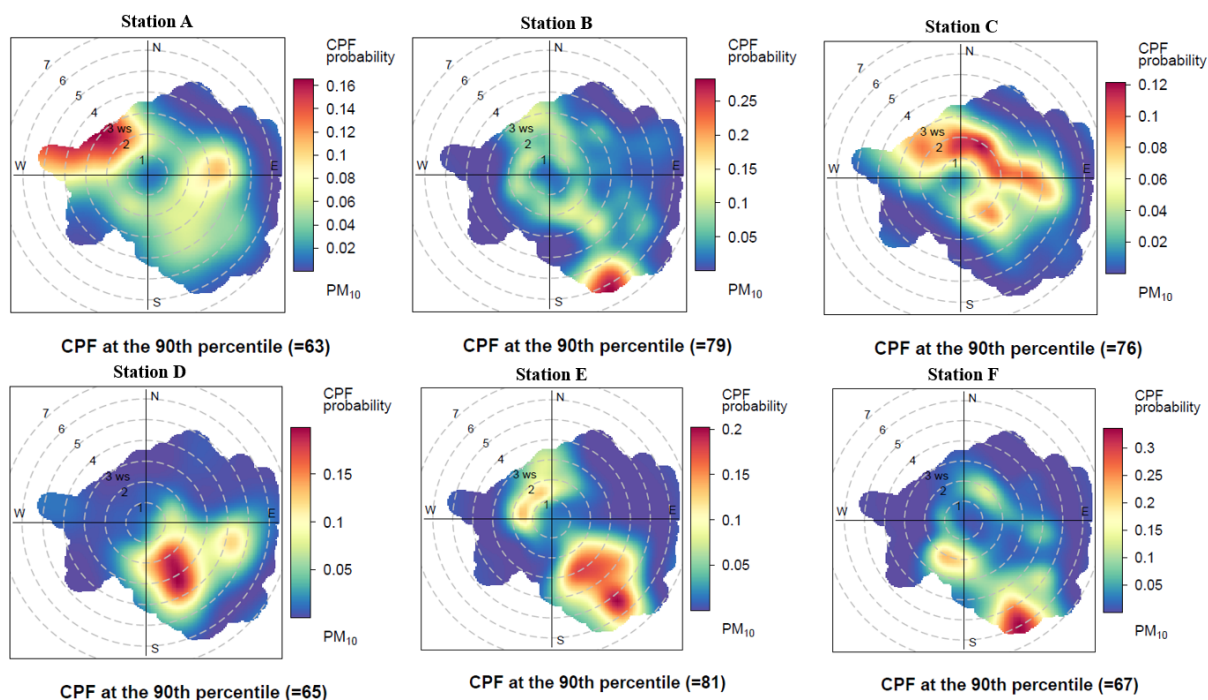


Figure 4.12: Funcțiile de probabilitate condiționată (CPF) pentru PM_{10}

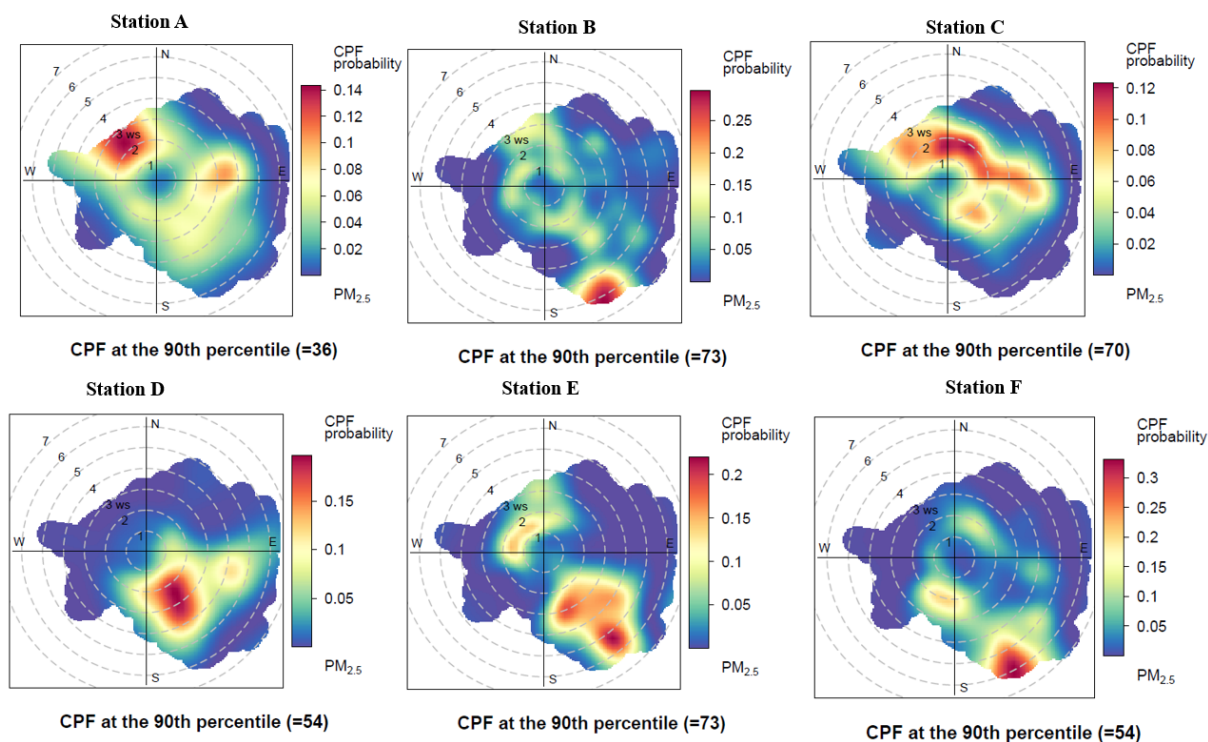


Figure 4.13: Funcțiile de probabilitate condiționată (CPF) pentru $PM_{2.5}$

References

- Abdel-Rahman, A. A. (2008). On the atmospheric dispersion and Gaussian plume model. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate, Corfu, Greece* (Vol. 26).
- Adeniran, J. A., Yusuf, R. O., Fakinle, B. S., & Sonibare, J. A. (2019). Air quality assessment and modelling of pollutants emission from a major cement plant complex in Nigeria. *Atmospheric Pollution Research*, 10(1), 257–266. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104218301612> doi: 10.1016/j.apr.2018.07.010
- Ajtai, N., Török, Z., & Ozunu, A. (2012). Air Quality Modelling of SO₂ Emissions Associated To Metallurgical Processes. *Studia Universitatis Babes-Bolyai, Chemia*, 57(1).
- Al-Fadhli, F. M., Alhajeri, N. S., Aly, A. Z., & Allen, D. T. (2019). The impact of power plant emission variability and fuel switching on the air quality of Kuwait. *Science of The Total Environment*, 672, 593–603. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719314524> doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.441
- Amouzouvi, Y. M., Dzagli, M. M., Sagna, K., Török, Z., Roba, C. A., Mereuță, A., ... Edjame, K. S. (2020). Evaluation of pollutants along the national road n2 in togo using the aermod dispersion model. *Journal of Health and Pollution*, 10(27), 200908.
- AQI. (2022). *Romania Air Quality Index (AQI) and Air Pollution information* — *AirVisual*. Retrieved from <https://www.iqair.com/romania>
- Askariyeh, M. H., Kota, S. H., Vallamsundar, S., Zietsman, J., & Ying, Q. (2017). AERMOD for near-road pollutant dispersion: Evaluation of model performance with different emission source representations and low wind options. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 392–402. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920917306326> doi: 10.1016/j.trd.2017.10.008
- Backes, C. H., Nelin, T., Gorr, M. W., & Wold, L. E. (2013). Early life exposure to air pollution: How bad is it? *Toxicology Letters*, 216(1), 47–53. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842741201380X> doi: 10.1016/j.toxlet.2012.11.007
- Bagayev, I., & Lochard, J. (2017). EU air pollution regulation: A breath of fresh air for Eastern European polluting industries? *Journal of Environmental Economics and Management*, 83, 145–163.

- Banica, A., Bobric, E., Cazacu, M., Timofte, A., Gurlui, S., & Breabă, I. (2017). Integrated assessment of exposure to traffic-related air pollution in Iasi city, Romania. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16, 2147–2163. doi: 10.30638/eemj.2017.222
- Barbu, S., Moisa, C., & Mircov, D. V. (2009). Cosava—a Banatean wind. *Research Journal of Agricultural Science*, 41(1), 365–371.
- Barbulescu, A., & Barbes, L. (2017). Modeling the carbon monoxide dissipation in Timisoara, Romania. *Journal of Environmental Management*, 204, 831–838. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479717301652> doi: 10.1016/j.jenvman.2017.02.047
- Barton, C. A., Zarzecki, C. J., & Russell, M. H. (2010). A Site-Specific Screening Comparison of Modeled and Monitored Air Dispersion and Deposition for Perfluorooctanoate. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(4), 402–411. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3155/1047-3289.60.4.402> doi: 10.3155/1047-3289.60.4.402
- Bavaria, J. E., Desai, N. D., Cheung, A., Petracek, M. R., Groh, M. A., Borger, M. A., & Schaff, H. V. (2014). The St Jude Medical Trifecta aortic pericardial valve: Results from a global, multicenter, prospective clinical study. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 147(2), 590–597. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022522313000329> doi: 10.1016/j.jtcvs.2012.12.087
- Bodor, Z., Bodor, K., Keresztesi, A., & Szép, R. (2020). Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM10 in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30), 38181–38199. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09838-2> doi: 10.1007/s11356-020-09838-2
- BPMIS. (2019). *Building Permits Management Information System. Transportation Masterplan Departement of Kigali city. the Upyear Traffic Report Kigali city Master Plan-2050, project reference number C-RW000011*. Retrieved from <https://bpmis.gov.rw/index.php?id=200018>
- Brauer, M., Amann, M., Burnett, R. T., Cohen, A., Dentener, F., Ezzati, M., ... Thurston, G. D. (2012). Exposure Assessment for Estimation of the Global Burden of Disease Attributable to Outdoor Air Pollution. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 652–660. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2025752> doi: 10.1021/es2025752
- Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233–1242. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673602112748> doi: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8
- Carslaw, & Ropkins, K. (2012). Openair—an r package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, 52–61.
- Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1-3). Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/s00703-003-0070-7> doi: 10.1007/s00703-003-0070-7

- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907–1918. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673617305056> doi: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., ... Booth, B. B. B. (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1029–1136. Retrieved from <https://research.monash.edu/en/publications/long-term-climate-change-projections-commitments-and-irreversibil>
- Corches, M. T., & Popa, M. (2013). Using Aermod Modelling System for Modelling Air Dispersion of Pollutants from a Steel Heat Treatment Plant. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 14(4), 1482–1489. Retrieved from <http://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000336189800002>
- Cropper, M., Gamkhar, S., Malik, K., Limonov, A., & Partridge, I. (2012). *The Health Effects of Coal Electricity Generation in India* (SSRN Scholarly Paper No. ID 2093610). Retrieved from <https://papers.ssrn.com/abstract=2093610> doi: 10.2139/ssrn.2093610
- CS. (2020). *Planul de Menținere a Calității Aerului pentru județul Caraș-Severin, 2020-2024*. Retrieved from <http://www.cjcs.ro/planul-de-mentinere-a-calitatii-aerului-in-cjcs-2020-2024.php>
- Davison, D. C. C. a. J. (2023). *The openair book*. Retrieved from <https://bookdown.org/david-carlsaw/openair/>
- DeWitt, H. L., Gasore, J., Rupakheti, M., Potter, K. E., Prinn, R. G., Ndikubwimana, J. d. D., ... Safari, B. (2019). Seasonal and diurnal variability in O₃, black carbon, and CO measured at the Rwanda Climate Observatory. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(3), 2063–2078. Retrieved from <https://acp.copernicus.org/articles/19/2063/2019/> doi: 10.5194/acp-19-2063-2019
- Dinçer, F., Dinçer, F. K., Sarı, D., Ceylan, O., & Ercan, O. (2020). Dispersion modeling and air quality measurements to evaluate the odor impact of a wastewater treatment plant in İzmir. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2119–2125. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104220301203> doi: 10.1016/j.apr.2020.05.018
- Directive, I. (2008). *Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control — European Environment Agency* [Policy Document]. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/directive-2008-1-ec>
- Dunea, D., Iordache, S., Bohler, T., Huber, F., & Leitner, P. (2017). Evaluating the Air Pollution Impact Using Environmental Monitoring, Dispersion Modeling and Volunteered Geographic Information Systems. *Revista De Chimie*, 68(4), 835–840. Retrieved from <http://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000400732400042>

- EEA. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories*. Publications Office. Retrieved from <https://data.europa.eu/doi/10.2800/293657>
- EEA. (2020). *Air quality standards. The European Union (EU) has developed an extensive body of legislation which establishes standards and objectives for a number of pollutants in air*. [Page]. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>
- EPA. (1985). Compilation of air pollution emission factors, AP-42. *Research Triangle Park: US Environmental Protection Agency*.
- EPA. (2006). *Volume I Chapter 13: Miscellaneous Sources. Section 13.2.2. AP 42, fifth ed.* Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0202.pdf>
- EPA. (2009). *Air Quality Dispersion Modeling Preferred and Recommended Models. AERMOD Implementation Guide, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, March 2009, Research Triangle Park, North Carolina. The USA*. Retrieved from <https://www.epa.gov/scram/air-quality/>
- EPA. (2016). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors* [Other Policies and Guidance]. Retrieved from <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
- Fisher, S., Bellinger, D. C., Cropper, M. L., Kumar, P., Binagwaho, A., Koudenoukpo, J. B., ... Landrigan, P. J. (2021). Air pollution and development in africa: impacts on health, the economy, and human capital. *The Lancet Planetary Health*, 5(10), e681–e688.
- Gibson, M. D., Heal, M. R., Li, Z., Kuchta, J., King, G. H., Hayes, A., & Lambert, S. (2013a). The spatial and seasonal variation of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in Cape Breton Highlands National Park, Canada, and the association with lichen abundance. *Atmospheric Environment*, 64, 303–311. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012009429> doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.068
- Gibson, M. D., Kundu, S., & Satish, M. (2013). Dispersion model evaluation of PM_{2.5}, NO_x and SO₂ from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model. *Atmospheric Pollution Research*, 4(2), 157–167. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104215303858> doi: 10.5094/APR.2013.016
- Gillett, D., & Morales, C. (1979). Environmental factors affecting dust emission by wind erosion. *Saharan dust*, 71–94.
- Gillette, D. A., & Passi, R. (1988). Modeling dust emission caused by wind erosion. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D11), 14233–14242.
- Guttikunda, S. K., Goel, R., & Pant, P. (2014). Nature of air pollution, emission sources, and management in the Indian cities. *Atmospheric environment*, 95, 501–510.
- Hanna, Egan, B. A., Purdum, J., & Wagler, J. (2001). Evaluation of the ADMS, AERMOD, and ISC3 dispersion models with the OPTEX, Duke Forest, Kincaid, Indianapolis and Lovett field datasets. *International Journal of Environment and*

- Pollution*, 16, 301. Retrieved from <http://www.inderscience.com/link.php?id=626>
doi: 10.1504/IJEP.2001.000626
- Haq, p. u., Amin, Nadeem, Q., Farooq, A., Irfan, N., Ahmad, M., & Ali, M. R. (2019). Assessment of AERMOD modeling system for application in complex terrain in Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 10(5), 1492–1497. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1309104219300765> doi: 10.1016/j.apr.2019.04.006
- Heft-Neal, S., Burney, J., Bendavid, E., & Burke, M. (2018). Robust relationship between air quality and infant mortality in Africa. *Nature*, 559(7713), 254–258.
- Houser, C. A., & Nickling, W. G. (2001). The emission and vertical flux of particulate matter <10. *Sedimentology*, 48(2), 255–267. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-3091.2001.00359.x> doi: 10.1046/j.1365-3091.2001.00359.x
- INS. (2019). *Romanian Statistical Year Book, 2019 (Anuarele Statistice ale României-2019)* — Institutul Național de Statistică (INS). Retrieved from <https://insse.ro/cms/ro/content/anuarele-statistice-ale-romaniei>
- INS. (2021). *Press release resident population of Romania — National Institute of Statistics*. Retrieved from <https://insse.ro/cms/en/tags/press-release-resident-population-romania>
- Iradukunda, I. (2021). Urban transport and climate change mitigation options to minimize Greenhouse Gas emissions and to promote sustainable use of public transport in Kigali, Rwanda. Retrieved from <https://ubrisa.ub.bw/handle/10311/2371>
- Irakunda, E., Török, Z., Mereuta, A., Ozunu, A., Gasore, J., Kalisa, E., ... Munyampundu, G. (2022). POTENTIAL SOURCE IDENTIFICATION OF SO₂ AND COMPARISON BETWEEN MODELLING RESULTS WITH IN-SITU MONITORING DATA: STUDY CASE, ROAD NETWORKS OF KIGALI-RWANDA. *Bulletin of Romanian Chemical Engineering Society*, 9(1), 131–142.
- Kalisa, E., Nagato, E. G., Bizuru, E., Lee, K. C., Tang, N., Pointing, S. B., ... Lacap-Bugler, D. C. (2018). Characterization and Risk Assessment of Atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ Particulate-Bound PAHs and NPAHs in Rwanda, Central-East Africa. *Environmental Science & Technology*, 52(21), 12179–12187. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b03219> doi: 10.1021/acs.est.8b03219
- Kaplan, R. M., & Vidyashankar, A. N. (2012). An inconvenient truth: Global warming and anthelmintic resistance. *Veterinary Parasitology*, 186(1), 70–78. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304401711007801> doi: 10.1016/j.vetpar.2011.11.048
- Khazini, L., Dehkharghanian, M. E., & Vaezihir, A. (2022). Dispersion and modeling discussion of aerosol air pollution caused during mining and processing of open-cast mines. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(2), 913–924. Retrieved from <https://link.springer.com/10.1007/s13762-021-03225-1> doi: 10.1007/s13762-021-03225-1
- Korkmaz, P., Gardumi, F., Avgerinopoulos, G., Blesl, M., & Fahl, U. (2020). A comparison of three transformation pathways towards a sustainable European society -

- An integrated analysis from an energy system perspective. *Energy Strategy Reviews*, 28, 100461. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20300158> doi: 10.1016/j.esr.2020.100461
- Lacey, F. G., Marais, E. A., Henze, D. K., Lee, C. J., Donkelaar, p. u., Aaron, Martin, R. V., ... Wiedinmyer, C. (2017). Improving present day and future estimates of anthropogenic sectoral emissions and the resulting air quality impacts in Africa. *Faraday Discussions*, 200, 397–412.
- Langner, C., & Klemm, O. (2011). A Comparison of Model Performance between AERMOD and AUSTAL2000. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(6), 640–646. Retrieved from <http://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000292359200005> doi: 10.3155/1047-3289.61.6.640
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (2013). A refined index of model performance: A rejoinder: A REFINED INDEX OF MODEL PERFORMANCE: A REJOINDER. *International Journal of Climatology*, 33(4), 1053–1056. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3487> doi: 10.1002/joc.3487
- Liu-Cong, Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., ... Kan, H. (2019). Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *New England Journal of Medicine*, 381(8), 705–715. Retrieved from <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364> doi: 10.1056/NEJMoa1817364
- Ma, J., Yi, H., Tang, X., Zhang, Y., Xiang, Y., & Pu, L. (2013). Application of AERMOD on near future air quality simulation under the latest national emission control policy of China: A case study on an industrial city. *Journal of Environmental Sciences*, 25(8), 1608–1617. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001074212602459> doi: 10.1016/S1001-0742(12)60245-9
- Macdonald, R. (2003). Theory and objectives of air dispersion modelling. *Modelling Air Emissions for Compliance*, 1–27.
- Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, A., Kumar, S. P. N., Zimmerman, N., Kara, L. B., ... R. Subramanian (2019). Development of a general calibration model and long-term performance evaluation of low-cost sensors for air pollutant gas monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(2), 903–920. Retrieved from <https://amt.copernicus.org/articles/12/903/2019/> doi: 10.5194/amt-12-903-2019
- Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, A., Saha, P. K., Robinson, A. L., Presto, A. A., & Subramanian, R. (2020). Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation. *Aerosol Science and Technology*, 54(2), 160–174. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2019.1623863> doi: 10.1080/02786826.2019.1623863
- Matacchiera, F., Manes, C., Beaven, R. P., Rees-White, T. C., Boano, F., Mønster, J., & Scheutz, C. (2019). AERMOD as a Gaussian dispersion model for planning tracer gas dispersion tests for landfill methane emission quantification. *Waste Management*, 87, 924–936. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18300734> doi: 10.1016/j.wasman.2018.02.007
- McDowell, D. L., Panchal, J., Choi, H.-J., Seepersad, C., Allen, J., & Mistree, F. (2009). *Integrated Design of Multiscale, Multifunctional Materials and Products*. Butterworth-Heinemann. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=7HUTc1hl3x0C&pgis=1>

- Mentese, S., Mirici, N. A., Elbir, T., Tuygun, G. T., Bakar, C., Otkun, M. T., & Oymak, S. (2020). A comprehensive assessment of ambient air quality in Çanakkale city: Emission inventory, air quality monitoring, source apportionment, and respiratory health indicators. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2282–2296. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104220301963> doi: 10.1016/j.apr.2020.07.005
- Mihăiescu, R., Mihăiescu, T., Ajtai, N., Török, Z., & Ozunu, A. (2011). Air quality modelling as a tool used in selecting technological alternatives for developing a new abrasive facility. *Advances in Environmental Sciences*, 3(2), 123–128.
- Mohan, M., Bhati, S., Sreenivas, A., & Marrapu, P. (2011). Performance Evaluation of AERMOD and ADMS-Urban for Total Suspended Particulate Matter Concentrations in Megacity Delhi. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(7), 883–894. Retrieved from <https://aaqr.org/articles/aaqr-11-05-0a-0065> doi: 10.4209/aaqr.2011.05.0065
- Mutlu, A. (2020). Air quality impact of particulate matter (PM₁₀) releases from an industrial source. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8), 547. Retrieved from <https://link.springer.com/10.1007/s10661-020-08508-7> doi: 10.1007/s10661-020-08508-7
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2021). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 – Upyear Oct. 2021. Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles*. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Năstase, G., Șerban, A., Năstase, A. F., Dragomir, G., & Brezeanu, A. I. (2018). Air quality, primary air pollutants and ambient concentrations inventory for Romania. *Atmospheric Environment*, 184, 292–303. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231018302656> doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.04.034
- Omidvarborna, H., Baawain, M., Al-Mamun, A., & Al-Muhtaseb, A. H. (2018). Dispersion and deposition estimation of fugitive iron particles from an iron industry on nearby communities via AERMOD. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11), 655. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/s10661-018-7009-4> doi: 10.1007/s10661-018-7009-4
- O’Shaughnessy, P. T., & Altmaier, R. (2011). Use of AERMOD to determine a hydrogen sulfide emission factor for swine operations by inverse modeling. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4617–4625. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231011005784> doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.061
- Peters, Andrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., ... Wilson, C. (2013). The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change*, 3(1), 4–6. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/nclimate1783> doi: 10.1038/nclimate1783
- Popescu, F. (2016). A performant state-of-art tool to assess cross-border impact of industrial activities. A transboundary air pollution case study. *Procedia Technology*, 22, 440–444.

- Raischi, Robert, S., Bălăceanu, C. M., Raischi, M., Dumitru, F. D., Moncea, M. A., ... Keresztesi, A. (2017). Air pollution analysis in Moldova Nouă waste dump. *ECOTERRA J. Environ. Res. Prot*, 14, 70–77.
- Raupach, M. R., Marland, G., Ciais, P., Quéré, C. L., Canadell, J. G., Klepper, G., & Field, C. B. (2007). Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(24), 10288–10293. Retrieved from <https://www.pnas.org/content/104/24/10288> doi: 10.1073/pnas.0700609104
- REMA. (2022). *Under supervision of the Ministry of Environment, from the Law n°63/2013 of 27/08/2013 determining the mission, organization and functioning of Rwanda Environment Management Authority (REMA)*. Retrieved from <https://www.rema.gov.rw/about>
- Richards-Thomas, T., & McKenna-Neuman, C. (2020). Wind Tunnel-Based Comparison of PM₁₀ Emission Rates for Volcanic Ash and Glaciogenic Aerosol Sources Within Iceland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(24). Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020JD033392> doi: 10.1029/2020JD033392
- Roba, C., Stefanie, H., Torok, Z., Kovacs, M., Rosu, C., & Ozunu, A. (2014). Determination Of Volatile Organic Compounds And Particulate Matter Levels In An Urban Area From Romania. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(9), 2261–2268. Retrieved from http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol13/no9/18_343_Roba.14.pdf doi: 10.30638/eemj.2014.252
- Robu, B. M., Căliman, F. A., Bețianu, C., & Gavrilăscu, M. (2007). Methods and procedures for environmental risk assessment. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 6(6). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Brindusa-Sluser/publication/299226484_Methods_and_procedures_for_environmental_risk_assessment/links/6017beac92851c2d4d0aa0ed/Methods-and-procedures-for-environmental-risk-assessment.pdf
- Roney, J. A., & White, B. R. (2006). Estimating fugitive dust emission rates using an environmental boundary layer wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 40(40), 7668–7685.
- Rosu, L., & Banica, A. (2018). Passenger car dependency and consequent air pollutants emissions in Iasi metropolitan area (Romania). *Environmental engineering and management journal*, 17. doi: 10.30638/eemj.2018.087
- Rouhi, M., Moradi, H., & Ghorban, M. (2013). Application of the AERMOD modeling system for air pollution dispersion in the South Pars oilfield. In *First International Symposium on Urban Development: Koya as a Case Study* (pp. 339–346). WIT Press. Retrieved from <http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=ISUD13-044-1> doi: 10.2495/ISUD130441
- Samet, J. M., Dominici, F., Curriero, F. C., Coursac, I., & Zeger, S. L. (2000). Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 U.S. Cities, 1987–1994. *New England Journal of Medicine*, 343(24), 1742–1749. Retrieved from <https://doi.org/10.1056/NEJM200012143432401> doi: 10.1056/NEJM200012143432401

- Schwela, D. (2012). Review of urban air quality in Sub-Saharan Africa region - air quality profile of SSA countries (English). Retrieved from <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail>
- Sechel, I. C., & Mariasiu, F. (2022). Efficiency of Governmental Policy and Programs to Stimulate the Use of Low-Emission and Electric Vehicles: The Case of Romania. *Sustainability*, 14(1), 45. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/45> doi: 10.3390/su14010045
- Sigman, R., Hilderink, H., Delrue, N., Braathen, N. A., & Leflaive, X. (2012). *OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction, Key Findings on Health and Environment*. Retrieved from https://www.oecd-ilibrary.org/environment/oecd-environmental-outlook-to-2050/health-and-environment_env_outlook-2012-9-en doi: 10.1787/env_outlook-2012-9-en
- Silva, R. A., West, J. J., Lamarque, J.-F., Shindell, D. T., Collins, W. J., Faluvegi, G., ... Naik, V. (2017). Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change. *Nature climate change*, 7(9), 647–651.
- Simona, Pana, E., Raischi, Holban, E., Zamfir, S., Raischi, M., & Deák, G. (2019). Analysis of air and soil quality regarding the cross-border impact risk of the mining tailings ponds in Moldova Nouă Area. *International Journal of Environmental Science and Development*, 10(6), 162.
- Srivastava, A., Kumar, A., & Elumalai, S. P. (2021). Evaluating Dispersion Modeling of Inhalable Particulates (PM₁₀) Emissions in Complex Terrain of Coal Mines. *Environmental Modeling & Assessment*, 26(3), 385–403. Retrieved from <https://link.springer.com/10.1007/s10666-021-09762-w> doi: 10.1007/s10666-021-09762-w
- Subramanian, R., Ellis, A., Torres-Delgado, E., Tanzer, R., Malings, C., Rivera, F., ... Mayol-Bracero, O. L. (2018). Air Quality in Puerto Rico in the Aftermath of Hurricane Maria: A Case Study on the Use of Lower Cost Air Quality Monitors. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2(11), 1179–1186. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsearthspacechem.8b00079> doi: 10.1021/acsearthspacechem.8b00079
- Subramanian, R., Kalisa, E., Gasore, J., Jaramillo, P., Malings, C., & Williams, N. J. (2020). *Air pollution in Kigali, Rwanda: Spatial and temporal variability, source contributions, and the impact of car-free Sundays — Clean Air Journal*. Retrieved from <https://www.cleanairjournal.org.za/article/view/8023>
- Taghian, G., Fisher, S., Chiles, T. C., Binagwaho, A., & Landrigan, P. J. (2024). The burden of cardiovascular disease from air pollution in rwanda. *Annals of Global Health*, 90(1).
- Tecer, L. H. (2009). A factor analysis study: Air pollution, meteorology, and hospital admissions for respiratory diseases. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 91(7), 1399–1411. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/02772240902732316> doi: 10.1080/02772240902732316
- Teggi, S., Costanzini, S., Ghermandi, G., Malagoli, C., & Vinceti, M. (2018). A GIS-based atmospheric dispersion model for pollutants emitted by complex source areas. *Science of The Total Environment*, 610–611, 175–190. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717318995> doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.196

- Terán, R., Garcia Bustos, K. A., Sanchez Vera, F. P., Colina Andrade, G. J., & Pacheco Tanaka, D. A. (2021). Acid precipitation followed by microalgae (*Chlorella vulgaris*) cultivation as a new approach for poultry slaughterhouse wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 335, 125284. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421006234> doi: 10.1016/j.biortech.2021.125284
- Tezel-Oguz, M. N., Sari, D., Ozkurt, N., & Keskin, S. S. (2020). Application of reduction scenarios on traffic-related NOx emissions in Trabzon, Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2379–2389. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104220301732> doi: 10.1016/j.apr.2020.06.014
- Thunis, P., Pisoni, E., Degraeuwe, B., Kranenburg, R., Schaap, M., & Clappier, A. (2015). Dynamic evaluation of air quality models over European regions. *Atmospheric Environment*, 111, 185–194. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231015300194> doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.04.016
- Török, Z., Elisephane, I., & Ozunu, A. (2024). Modelling the dispersion of particulate matter (pm10) via wind erosion from opencast mining—moldova nouă tailings ponds, romania. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1), 59.
- Tripathy, S., Tunno, B. J., Michanowicz, D. R., Kinnee, E., Shmool, J. L. C., Gillooly, S., & Clougherty, J. E. (2019). Hybrid land use regression modeling for estimating spatio-temporal exposures to PM2.5, BC, and metal components across a metropolitan area of complex terrain and industrial sources. *Science of The Total Environment*, 673, 54–63. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719314688> doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.453
- Tyovenda, A. A., Ayua, T. J., & Sombo, T. (2021). Modeling of gaseous pollutants (CO and NO2) emission from an industrial stack in Kano city, northwestern Nigeria. *Atmospheric Environment*, 253, 118356. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231021001746> doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118356
- UN. (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision — Multimedia Library - United Nations Department of Economic and Social Affairs. Key Findings and Advance and Tables*. New York, NY: UN DESA. Retrieved from <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>
- Usabiaga, J. J., Castells, M., Martínez, F. X., & Olcer, A. (2013). A Simulation Model for Road and Maritime Environmental Performance Assessment. *Journal of Environmental Protection*, 04(07), 683–693. Retrieved from <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/jep.2013.47079> doi: 10.4236/jep.2013.47079
- Verma, T., Shrivastva, B. K., & Sharma, S. K. (2017). Performance evaluation of AERMOD for Indian Geo-mining conditions. *Research Journal of Mining Volume*, 1(2), 88–99.
- Vujic, B. B., Marceta, U., Popescu, F., & Tot, B. (2019). Air Quality Monitoring and Modeling Near Coal Fired Power Plant. *Thermal Science*, 23(B), 4055–4065. Retrieved from <http://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000519751700036> doi: 10.2298/TSCI190611385V

- Wagner, L. E. (2013). A history of Wind Erosion Prediction Models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS). *Aeolian Research*, 10, 9–24. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875963712000389> doi: 10.1016/j.aeolia.2012.10.001
- WHO. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>
- WHO. (2018). *Global Health Observatory (GHO) data repository: Deaths by country*. Geneva, Switzerland: WHO; 2018. GHO — By category — Deaths - by country. Retrieved from <https://www.who.int>
- WHO. (2019). *Global Health Observatory (GHO) data: Exposure to ambient air pollution*. Geneva, Switzerland. Retrieved from <https://www.who.int/data/gho/data/themes/theme-details/GHO/air-pollution>
- WHO. (2021). *Global Air Quality Guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: Executive summary*. World Health Organization. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345334>
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088–2094. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2419> doi: 10.1002/joc.2419
- Wong, G. W. K., Ko, F. W. S., Lau, T. S., Li, S. T., Hui, D., Pang, S. W., ... Lai, C. K. W. (2001). Temporal relationship between air pollution and hospital admissions for asthmatic children in Hong Kong. *Clinical & Experimental Allergy*, 31(4), 565–569. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2222.2001.01063.x> doi: 10.1046/j.1365-2222.2001.01063.x
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., ... R. Subramanian (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), 291–313. Retrieved from <https://amt.copernicus.org/articles/11/291/2018/> doi: 10.5194/amt-11-291-2018
- Zou, B., Benjamin Zhan, F., Gaines Wilson, J., & Zeng, Y. (2010). Performance of AERMOD at different time scales. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(5), 612–623. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1569190X10000067> doi: 10.1016/j.simpat.2010.01.005
- Zou, X., Li, H., Liu, W., Wang, J., Cheng, H., Wu, X., ... Kang, L. (2020). Application of a new wind driving force model in soil wind erosion area of northern China. *Journal of Arid Land*, 12(3), 423–435. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0103-9> doi: 10.1007/s40333-020-0103-9
- Ștefănescu, L., Robu, B. M., & Ozunu, A. (2013). Integrated approach of environmental impact and risk assessment of Rosia Montana Mining Area, Romania. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 7719–7727. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/s11356-013-1528-x> doi: 10.1007/s11356-013-1528-x