

**MINISTERUL EDUCAȚIEI
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT:

**UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECTIE PENTRU
MONITORIZAREA DINAMICII APELOR SUBTERANE
URBANE**

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Constantin Radu GOGU

Student doctorand: ing. Alina RĂDUȚU

București, 2021

MULȚUMIRI

Teza de doctorat intitulată "Utilizarea tehnicilor de teledetecție pentru monitorizarea apelor subterane urbane" a fost elaborată în cadrul Departamentului de Hidraulică, Edilitate și Protecția Mediului al Universității Tehnice de Construcții București, în perioada 2016-2021. Această teză de doctorat a primit sprijin științific prin intermediul proiectului de cercetare INXCES-"INnovation for eXtreme Climatic EventS" finanțat de JPI Waters și prin intermediul proiectului de cercetare finanțat de Academia Română- WALLONIE-BRUXELLES "Cartografierea vulnerabilității intrinseci a acviferelor: experimentare și dezvoltare teoretică în România". În elaborarea acestei teze am fost sprijinită de mai multe persoane cărora vreau să le adresez cele mai sincere mulțumiri.

Doresc să îmi exprim recunoștința, respectul și să aduc mulțumiri speciale conducătorului meu științific, domnul prof.univ.dr.ing. Constantin-Radu Gogu, pentru încrederea, încurajarea, răbdarea și pentru îndrumarea pe parcursul cercetării doctorale.

Mulțumesc în mod deosebit membrilor comisiei de îndrumare doctorală, doamna prof. univ.dr.ing. Sanda Manea, domnul prof.univ.dr.ing. Ioan Bica, domnul prof. univ.dr. ing. Manole Șerbulea, pentru sugestiile și ideile de îmbunătățire a tezei. În mod special, doresc să îi multumesc doamnei prof. univ. dr. ing. Sanda Manea pentru discuțiile și ajutorul pe parcursul elaborării tezei.

Adresez mulțumiri membrilor comisiei de susținere a tezei de doctorat, pentru amabilitatea și disponibilitatea de a analiza și aprecia această lucrare:

- Prof.univ.dr.ing. Andrei Mugur Georgescu, președinte;
- Prof.univ.dr.ing. Constantin-Radu Gogu, conducător de doctorat;
- Prof.univ.dr.ing. Alexandru Badea, referent oficial;
- Dr.geolog. Guri Venvik, referent oficial;
- Prof.univ.dr.ing. Sanda Manea, referent oficial.

Mulțumesc domnului dr.fiz. Marius-Ioan Piso, Președintele Agenției Spațiale Române, pentru sprijinul permanent și pentru încrederea pe care mi le-a acordat. De asemenea, le adresez mulțumiri colegilor de la Agenția Spațială Română pentru încurajările și ajutorul pe care mi le-au oferit pe întreg parcursul elaborării tezei.

Doresc să le multumesc colegilor din cadrul proiectului INXCES, de la Institutul Geologic al Norvegiei, domnul dr. John Dehls și doamna dr. Guri Venvik pentru numeroasele discuții și întâlniri tehnice care au fost extrem de utile elaborării tezei.

În cadrul tezei, am beneficiat de un stagiu de o săptămână la Departamentul de Geologie al Universității din Namur, Belgia, timp în care am avut mai multe discuții fructuoase, legate de monitorizarea subsidenței urbane, cu profesori de la mai multe universități și instituții din Belgia, cărora doresc să le mulțumesc pentru disponibilitate: domnul prof.dr. Vincent Hallet (Universitatea din Namur), domnul prof.dr.ing. Alain Dassargues (Universitatea din Liege), domnul prof.dr. Xavier Devleeschouwer (Institutul Geologic al Belgiei) și domnul dr. Pierre-Yves Declerq.

Doresc să mulțumesc, de asemenea, corpului profesoral al Departamentului de Hidraulică, Edilitate și Protecția Mediului din cadrul Facultății de Hidrotehnică a Universității Tehnice de Construcții București pentru sfaturile și sugestiile exprimate de-a lungul elaborării acestei teze de doctorat. Mulțumiri deosebite le adresez colegilor de la Centrul de Cercetare Ingineria Apelor Subterane (UTCB), domnului dr. Dragoș Găitănuș, domnului drd.ing. Traian Ghibuș, doamnei dr.ing. Irina Moraru și domnului tehnician Alexandru Ivan.

Pentru realizarea anumitor detalii grafice am primit sfaturi din partea doamnei Fides Paraschiv, căreia doresc să îi multumesc pentru ajutor! Mulțumiri îi adresez și domnului ing. Corneliu Paraschiv pentru discuțiile tehnice utile pe care le-am purtat!

Nu în ultimul rând, sunt recunoscătoare și vreau să mulțumesc familiei și prietenilor mei pentru că m-au încurajat, m-au susținut și au fost întotdeauna alături de mine.

”Nu pentru că-n ceva e vreun merit al meu

Din pricina Numelui Său.”

(Psalm, Benone Burtescu)

CUPRINSUL TEZEI

REZUMAT	10
ABSTRACT	12
INTRODUCERE	14
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE ÎN MONITORIZAREA MEDIULUI SUBTERAN URBAN	17
1.1. UTILIZAREA DATELOR DE TELEDETECȚIE PENTRU MANAGEMENTUL APELOR SUBTERANE	17
1.1.1. Estimarea precipitațiilor	18
1.1.2. Estimarea evapotranspirației	19
1.1.3. Monitorizarea stratului de zăpadă	20
1.1.4. Estimarea umidității solului	20
1.1.5. Monitorizarea nivelului rezervoarelor de apă globale/ lacurilor (G-REALM).....	22
1.1.6. Estimarea diminuării globale a resurselor de apă subterană.....	23
1.1.7. Determinarea indicilor de vegetație.....	24
1.1.8. Estimarea temperaturii suprafeței terenului	25
1.1.9. Date multispectrale de teledetecție utilizate pentru determinarea parametrilor în conexiune cu ciclul hidrologic	25
1.1.10. Misiuni satelitare radar cu apertură sintetică (SAR)	27
1.1.11. Monitorizarea dinamicii apei subterane urbane prin tehnici satelitare	28
1.2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR LA NIVEL INTERNAȚIONAL, PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR ÎN MEDIUL URBAN	30
1.2.1. Caracterizarea deplasărilor pe verticală ale terenului în mediul urban	30
1.2.2. Monitorizarea zonelor urbane afectate de fenomene de subsidență, ca rezultat al pompării apei subterane	31
1.2.3. Distribuția geografică documentată și istoricul apariției fenomenelor de subsidență urbană la nivel internațional	41
1.2.4. Clasificarea zonelor urbane de subsidență considerând caracteristicile principale ale acestora.....	42
1.2.5. Metode clasice utilizate pentru monitorizarea deplasărilor	46
1.2.6. Metode InSAR și datele SAR utilizate pentru monitorizarea deplasărilor	48
1.2.7. Modelarea deplasărilor verticale.....	58
1.2.8. Comparații și corelații dintre diverse metode de monitorizare a deplasărilor pe verticală	62
1.2.9. Inițiative europene pentru monitorizarea deplasărilor verticale în zone urbane.....	64
1.3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR LA NIVEL NAȚIONAL PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR ÎN ZONE URBANE, CU UTILIZAREA TEHNICILOR INSAR	65
1.3.1. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului datorate dinamicii antropice.....	65
1.3.2. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului ca efect al lucrărilor miniere	66
1.3.3. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului în zone seismice.....	67
1.3.4. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului pentru patrimoniul cultural UNESCO	67
1.4. CONCLUZII ASUPRA STADIULUI ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE ÎN MONITORIZAREA MEDIULUI SUBTERAN URBAN.....	68
2. STUDII DE CAZ PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR TERENULUI ȘI CARACTERIZAREA MEDIULUI SUBTERAN URBAN ÎN MUNICIPIUL BUCUREȘTI, UTILIZÂND TEHNICI DE TELEDETECȚIE	70
2.1. PREZENTAREA GENERALĂ A ZONEI DE STUDIU: MUNICIPIUL BUCUREȘTI	70
2.2. SETURI DE DATE ȘI SOFTURI UTILIZATE PENTRU GENERAREA PRODUSELOR CARTOGRAFICE	72
2.3. GENERAREA HĂRȚII PSI A DEPLASĂRILOR TERENULUI PENTRU MUNICIPIUL BUCUREȘTI, PENTRU PERIOADA 2004-2010	73
2.3.1. Metodologie de prelucrare a datelor ENVISAT pentru generarea hărții deplasărilor pentru perioada 2004-2010.....	73
2.3.2. Harta PSI a deplasărilor terenului pentru municipiul București, pentru perioada 2004-2010	75
2.4. GENERAREA HĂRȚII PSI A DEPLASĂRILOR TERENULUI PENTRU MUNICIPIUL BUCUREȘTI, PENTRU PERIOADA 2014-2018	77

2.4.1.	Metodologie de prelucrare a imaginilor SAR Sentinel-1 pentru generarea hărții PSI de deplasare a terenului pentru perioada 2014-2018.....	77
2.4.2.	Harta PSI a deplasărilor terenului pentru municipiul București, pentru perioada 2014-2018	78
2.5.	GENERAREA HĂRȚII DETECTĂRII SCHIMBĂRILOR FOLOSIND IMAGINI SENTINEL-1 GRD	79
2.5.1.	Metodologia detectării schimbărilor.....	79
2.5.2.	Harta detectării schimbărilor	80
2.6.	ZONE DE INSTABILITATE A TERENULUI IDENTIFICATE ÎN INTERVALUL 2014-2018, PE BAZA HĂRȚII DE DEPLASARE PSI SENTINEL-1	81
2.7.	ANALIZE COMPARATIVE ÎNTRE REZULTATELE ACTUALULUI STUDIU ȘI REZULTATE PREZENTATE ÎN LUCRĂRI ANTERIOARE	84
2.8.	CONCLUZII GENERALE PRIVIND HĂRȚILE PSI DE DEPLASARE A TERENULUI GENERATE PENTRU MUNICIPIUL BUCUREȘTI	87
2.9.	UTILIZAREA COMBINATĂ A TEHNICII PSI ȘI A TEHNICII DE DETECTARE A SCHIMBĂRILOR PENTRU IDENTIFICAREA ZONELOR CU POTENȚIAL DE INSTABILITATE.....	88
2.9.1.	Analize comune pornind de la harta PSI a deplasărilor terenului și harta detectării schimbărilor pentru municipiul București, în perioada 2014-2018.....	89
2.9.2.	Concluzii privind utilizarea tehnicii PSI împreună cu detecția radar a modificărilor suprafeței terenului.....	91
3.	FENOMENE ȘI PROCESE DIN MEDIUL SUBTERAN URBAN ASOCIATE DEPLASĂRILOR TERENULUI, DETERMINATE PRIN TEHNICI PSI. STUDIU DE CAZ: ZONA BARBU VĂCĂRESCU, BUCUREȘTI	92
3.1.	CONTEXT GENERAL.....	92
3.2.	DEZVOLTAREA MODELULUI GEOLOGIC URBAN LOCAL PENTRU ZONA BARBU VĂCĂRESCU.....	95
3.3.	DATE DE HIDROGEOLOGIE UTILIZATE	98
3.4.	DEPLASĂRILE TERENULUI ÎN ZONA BARBU VĂCĂRESCU ȘI CONEXIUNILE CU MEDIUL SUBTERAN.....	99
3.4.1.	Analize ale deplasărilor terenului considerând geologia și stratul antropic de umpluturi.....	100
3.4.2.	Relația dintre deplasările terenului și dinamica sistemului acvifer urban din zona Barbu Văcărescu	102
3.4.3.	Studiu de caz al unui imobil din zona Barbu Văcărescu	105
3.5.	DISCUȚII ȘI CONCLUZII PRIVIND ANALIZELE DIN ZONA BARBU VĂCĂRESCU	107
4.	ANALIZA FENOMENULUI DE SUBSIDENȚĂ LA NIVEL REGIONAL URBAN: CARACTERIZAREA ZONELOR CRITICE CU SUBSIDENȚĂ DIN BUCUREȘTI, PUSE ÎN EVIDENȚĂ PRIN TEHNICI DE TELEDETECȚIE	110
4.1.	SCOPUL REALIZĂRII STUDIULUI REGIONAL URBAN ȘI METODOLOGIA DE LUCRU.....	110
4.2.	SELECTAREA ZONEI REGIONALE DE STUDIU- COLENTINA.....	112
4.3.	SURSE DE DATE UTILIZATE PENTRU CARACTERIZAREA ZONEI COLENTINA	112
4.4.	DESCRIEREA CONDIȚIILOR GENERALE ÎN ZONA REGIONALĂ DE STUDIU.....	115
4.5.	EVOLUȚIA ZONELOR DE INSTABILITATE A TERENULUI PENTRU ZONA REGIONALĂ DE STUDIU, ÎN INTERVALUL 2004-2018, PE BAZA HĂRȚILOR PSI DE DEPLASARE VERTICALĂ A TERENULUI	117
4.6.	ANALIZA SCHIMBĂRILOR LA SUPRAFAȚA TERENULUI PE BAZA HĂRȚII DETECTĂRII SCHIMBĂRILOR DIN DATE SENTINEL-1 GRD, PENTRU INTERVALUL 2014-2018.....	119
4.7.	ANALIZA TOPOGRAFIEI PENTRU IDENTIFICAREA ZONELOR CU POTENȚIAL DE INSTABILITATE	121
4.7.1.	Extinderea lacurilor Colentinei obținută din Planurile Directorare de Tragere (1918)	122
4.7.2.	Lacurile Colentinei din Planul Bălților Colentinei (1936).....	123
4.7.3.	Lacurile Colentinei din Hărțile Sovietice 1:100 000, înainte de anii 1980.....	125
4.7.4.	Lacurile Colentinei din Harta de Raionare Geotehnică (ISPIF- 1977).....	127
4.7.5.	Lacurile Colentinei din Harta Topografică Militară la scara 1:25 000 (1982).....	128
4.7.6.	Lacurile Colentinei din Hărțile Sovietice la scara 1:50 000 (sfârșitul anilor 1980)	130
4.7.7.	Zone potențial instabile identificate din hărțile istorice și alte surse de date	131
4.8.	MODELUL DIGITAL AL TERENULUI ȘI HARTA PANTELOR.....	133
4.9.	ANALIZA GEOLOGICĂ A ZONEI COLENTINA	135
4.10.	FOSTE CARIERE DE MATERIALE DE CONSTRUCȚII ȘI GROSIMEA STRATULUI DE LOESS ÎN ZONA COLENTINA	136

4.11.	ANALIZA HIDROGEOLOGICĂ	138
4.12.	STUDIUL ZONELOR DE SUBSIDENȚĂ	140
4.12.1.	Zona Tei Nord	143
4.12.2.	Zona Intrarea Chefalului.....	145
4.12.3.	Zona Bizet- Barbu Văcărescu.....	146
4.12.4.	Zona Pantelimon	147
4.12.5.	Zonele Ghinea Brătășanu, Silvia, Heliade Între Vii și Dobrici.....	149
4.12.6.	Zonele Somnului și Glasului.....	151
4.12.7.	Zonele Liceul Traian 1 și Liceul Traian 2	152
4.12.8.	Zona Țărmului și zona Zăblăului	154
4.12.9.	Zonele Tuzla, Tei-Fratelli, Colentina-Lac și Rodica.....	156
4.12.10.	Zonele Fundeni, Lt. Moga, George Coșbuc și Caișilor.....	158
4.12.11.	Zonele Mațac, Turnul Eiffel, Fibrei, Rossini, Ramuri Tei Market.....	159
4.12.12.	Zonele Ciocărliei și Lacului	161
4.12.13.	Zonele Cora Pantelimon și Mega Mall	162
4.12.14.	Zonele Promenada, Pod BV, Gara Herăstrău și Șoseaua Nordului	163
4.13.	DISCUȚII ȘI CONCLUZII PRIVIND ANALIZA ZONEI DE STUDIU REGIONALĂ COLENTINA.....	164
5.	CONCLUZII PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE PENTRU MONITORIZAREA DINAMICII APELOR SUBTERANE URBANE	167
5.1.	CONCLUZII GENERALE	167
5.2.	CONTRIBUȚII PERSONALE ÎN APLICAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE PENTRU MONITORIZAREA DINAMICII APELOR SUBTERANE URBANE	173
5.3.	POTENȚIALE DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.....	174
	BIBLIOGRAFIE	175
	LISTĂ DE ABREVIERI ȘI ACRONIME	190
	ANEXE	193
A.1	HARTA HIPSOMETRICĂ A CULOARULUI RÂULUI COLENTINA	193
A.2	GRAFICELE DE TEMPERATURĂ PENTRU ZONELE DE SUBSIDENȚĂ DIN ZONA REGIONALĂ DE STUDIU COLENTINA	194

CUPRINSUL REZUMATULUI

SCURTĂ PREZENTARE	10
SHORT PRESENTATION	12
INTRODUCERE	14
1.STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECTIE ÎN MONITORIZAREA MEDIULUI SUBTERAN URBAN	17
1.1. UTILIZAREA DATELOR DE TELEDETECTIE PENTRU MANAGEMENTUL APELOR SUBTERANE	17
1.2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR LA NIVEL INTERNAȚIONAL, PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRIILOR ÎN MEDIUL URBAN	19
1.2.1. Caracterizarea deplasărilor pe verticală ale terenului în mediul urban	19
1.2.2. Monitorizarea zonelor urbane afectate de fenomene de subsidență, ca rezultat al pompării apei subterane	20
1.2.3. Distribuția geografică documentată și istoricul apariției fenomenelor de subsidență urbană la nivel internațional	20
1.2.4. Metode clasice utilizate pentru monitorizarea deplasărilor	23
1.2.5. Metode InSAR și datele SAR utilizate pentru monitorizarea deplasărilor	23
1.2.6. Modelarea deplasărilor verticale.....	25
1.2.7. Comparații și corelații dintre diverse metode de monitorizare a deplasărilor pe verticală	25
1.2.8. Inițiative europene pentru monitorizarea deplasărilor verticale în zone urbane- Terrafirma, PanGEO și EGMS26	
1.3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR LA NIVEL NAȚIONAL PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRIILOR ÎN ZONE URBANE, CU UTILIZAREA TEHNICILOR INSAR	26
1.3.1. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului datorate dinamicii antropice.....	26
1.3.2. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului ca efect al lucrărilor miniere	27
1.3.3. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului în zone seismice.....	28
1.3.4. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului pentru patrimoniul cultural UNESCO	28
2.STUDII DE CAZ PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRIILOR TERENULUI ȘI CARACTERIZAREA MEDIULUI SUBTERAN URBAN ÎN MUNICIPIUL BUCUREȘTI, UTILIZÂND TEHNICI DE TELEDETECTIE	28
2.1. PREZENTAREA GENERALĂ A ZONEI DE STUDIU: MUNICIPIUL BUCUREȘTI	28
2.2. GENERAREA HĂRȚII PSI A DEPLASĂRIILOR TERENULUI PENTRU MUNICIPIUL BUCUREȘTI, PENTRU PERIOADA 2004-2010	30
2.3. GENERAREA HĂRȚII PSI A DEPLASĂRIILOR TERENULUI PENTRU MUNICIPIUL BUCUREȘTI, PENTRU PERIOADA 2014-2018	31
2.4. GENERAREA HĂRȚII DETECTĂRII SCHIMBĂRIILOR FOLOSIND IMAGINI SENTINEL-1 GRD 33	
2.5. ZONE DE INSTABILITATE A TERENULUI IDENTIFICATE ÎN INTERVALUL 2014-2018, PE BAZA HĂRȚII DE DEPLASARE PSI SENTINEL-1	34
2.6. UTILIZAREA COMBINATĂ A TEHNICII PSI ȘI A TEHNICII DE DETECTARE A SCHIMBĂRIILOR PENTRU IDENTIFICAREA ZONELOR CU POTENȚIAL DE INSTABILITATE.....	36
2.6.1. Analize comune pornind de la harta PSI a deplasărilor terenului și harta detectării schimbărilor pentru municipiul București, în perioada 2014-2018.....	36
2.6.2. Concluzii privind utilizarea tehnicii PSI împreună cu detecția radar a modificărilor suprafeței terenului.....	37
3.FENOMENE ȘI PROCESE DIN MEDIUL SUBTERAN URBAN ASOCIATE DEPLASĂRIILOR TERENULUI, DETERMINATE PRIN TEHNICI PSI. STUDIU DE CAZ: ZONA BARBU VĂCĂRESCU, BUCUREȘTI	38
3.1. CONTEXT GENERAL.....	38
3.2. DEZVOLTAREA MODELULUI GEOLOGIC URBAN LOCAL PENTRU ZONA BARBU VĂCĂRESCU.....	38
3.3. DATE DE HIDROGEOLOGIE UTILIZATE	39
3.4. DEPLASĂRIILE TERENULUI ÎN ZONA BARBU VĂCĂRESCU ȘI CONEXIUNILE CU MEDIUL SUBTERAN.....	40

3.4.1.	<i>Analize ale deplasărilor terenului considerând geologia și stratul antropoc de umpluturi</i>	40
3.4.2.	<i>Relația dintre deplasările terenului și dinamica sistemului acvifer urban din zona Barbu Văcărescu</i> 41	
3.4.3.	<i>Studiu de caz al unui imobil din zona Barbu Văcărescu</i>	43
3.5.	DISCUȚII ȘI CONCLUZII PRIVIND ANALIZELE DIN ZONA BARBU VĂCĂRESCU	45
4. ANALIZA FENOMENULUI DE SUBSIDENȚĂ LA NIVEL REGIONAL URBAN: CARACTERIZAREA ZONELOR CRITICE CU SUBSIDENȚĂ DIN BUCUREȘTI, PUSE ÎN EVIDENȚĂ PRIN TEHNICI DE TELEDETECȚIE		45
4.1.	SCOPUL REALIZĂRII STUDIULUI REGIONAL URBAN. METODOLOGIA DE LUCRU. ZONA REGIONALĂ DE STUDIU	45
4.2.	SURSE DE DATE UTILIZATE PENTRU CARACTERIZAREA ZONEI COLENTINA	47
4.3.	EVOLUȚIA ZONELOR DE INSTABILITATE A TERENULUI PENTRU ZONA REGIONALĂ DE STUDIU, ȘI ANALIZA SCHIMBĂRIILOR LA SUPRAFAȚA TERENULUI	48
4.4.	ANALIZA TOPOGRAFIEI PENTRU IDENTIFICAREA ZONELOR CU POTENȚIAL DE INSTABILITATE. ANALIZA HIDROGEOLOGICĂ	48
4.5.	STUDIUL ZONELOR DE SUBSIDENȚĂ	50
4.6.	DISCUȚII ȘI CONCLUZII PRIVIND ANALIZA ZONEI DE STUDIU REGIONALĂ COLENTINA	53
5. CONCLUZII PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE PENTRU MONITORIZAREA DINAMICII APELOR SUBTERANE URBANE.....		55
5.1.	CONCLUZII GENERALE	55
5.2.	CONTRIBUȚII PERSONALE ÎN APLICAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE PENTRU MONITORIZAREA DINAMICII APELOR SUBTERANE URBANE	59
5.3.	POTENȚIALE DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE	60
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ		61

LISTA FIGURILOR

Figura 1-2	Privire de ansamblu a zonelor urbane afectate de fenomene de deplasări verticale la nivel internațional	21
Figura 2-1	Harta municipiului București. Hartă generată în Esri®ArcMap™ 10.3.....	29
Figura 2-2	Harta PSI a deplasărilor terenului în București obținută din imagini ENVISAT ASAR de pe orbita descendentă 465D, pentru perioada 2004-2010.....	31
Figura 2-3	Harta PSI a deplasărilor verticale în București, pentru intervalul 2014-2018, obținută din imagini Sentinel-1 de pe orbita ascendentă 131A și de pe orbita descendentă 109D	33
Figura 2-4	Harta de detecție a modificărilor suprafeței terenului pentru municipiul București (2014-2018), obținută din imagini Sentinel-1 GRD	34
Figura 2-5	Harta PSI a deplasărilor verticale ale terenului în București obținută din imagini Sentinel-1, împreună cu zonele de subsidență identificate	35
Figura 2-6	Harta deplasării terenului și de detecție a schimbărilor pentru municipiul București, perioada 2014-2018	37
Figura 2-7	Harta detecției modificărilor suprafeței terenului și a deplasărilor verticale pentru zona Pipera	37
Figura 3-1	Zona Barbu Văcărescu	38
Figura 3-2	Foraje de monitorizare din Parcul Circului (violet), situate în partea de sud est a zonei studiate (Figura 3-1) și forajul de monitorizare aflat în interiorul zonei Barbu Văcărescu (galben).	39
Figura 3-3	Deplasări PSI ale terenului în zona Barbu Văcărescu	40
Figura 3-4	Zona Barbu Văcărescu: a) Grosimea stratului antropoc de umpluturi și punctele PS de deplasare a terenului din date Sentinel-1. Secțiunea geologică este indicată de-a lungul profilului AA' care secționează zona Barbu Văcărescu și Parcul Circului; b) modelul geologic urmând secțiunea geologică AA' indicând straturile litologice.....	41
Figura 3-5	Tendențe de deplasare a punctelor PS din zona Barbu Văcărescu	41
Figura 3-6	Puncte PS situate la o distanță mai mică de 100 m față de forajele de monitorizare FM1LC/FM2LC și F14M. Codurile punctelor situate în vecinătatea forajului FM1LC/FM2LC: 333807 și 333808.	42

Figura 3-7 Corelații între deplasările punctelor PS și nivelul piezometric, măsurată în forajele de monitorizare FM1LC și FM2LC.....	43
Figura 3-8 Corelația dintre deplasările punctelor PS și nivelul piezometric măsurată în forajul de monitorizare F14M	43
Figura 3-9 Studiu de caz al unei clădiri situate în zona Barbu Văcărescu. Harta PS a deplasărilor terenului este generată din date Sentinel-1, orbita 109D	44
Figura 3-10 Comparatie între evoluția datelor piezometrice din forajul TrEiff și deplasările terenului indicate de punctele PS generate din date Sentinel-1 109D.....	44
Figura 4-1 Metodologia caracterizării zonelor cu deplasări verticale ale terenului	46
Figura 4-2 Zona de studiu regional, din lungul râului Colentina	46
Figura 4-3 Zone de deplasare a terenului din zona regională de studiu Colentina, pentru intervalele 2004-2010 și 2014-2018 și zone cu schimbări la nivelul suprafeței terenului.....	48
Figura 4-4 Zone cu potențial de instabilitate și zone de subsidență	49
Figura 4-5 Zone de subsidență, depozite antropice, zone desecate și foraje de monitorizare (piezometre).....	50

LISTA TABELELOR

Tabelul 1-1 Clasificarea zonelor urbane afectate de subsidență (modificat după (Chaussard, et al., 2013))	22
Tabelul 2-1 Datele Sentinel 1 utilizate pentru realizarea hărților de deformare.....	32
Tabelul 3-1 Foraje de monitorizare în Parcul Circului, Figura 3-2 arată localizarea acestora	39
Tabelul 4-1 Centralizarea informațiilor privind arealele de deplasare verticală a terenului identificate din hărțile PSI Sentinel-1 pentru intervalul 2014-2018	51

SCURTĂ PREZENTARE

Apa subterană este una dintre principalele resurse necesare activităților antropice din mediul urban. Deoarece aceasta asigură satisfacerea nevoilor populației și îmbunătățirea calității vieții, în procesul de planificare urbană i se acordă o importanță sporită. Există însă situații când din cauza exploatării unor cantități mari de apă subterană sau din cauza asocierii exploatării acestora cu alte activități din mediul subteran și suprateran urban, aceste activități sunt însoțite de fenomene de degradare a suprafeței terestre generând deplasări pe verticală ale terenului. Acestea pot avea drept consecință degradarea construcțiilor sau a elementelor de infrastructură. Prin monitorizarea deplasărilor verticale ale terenului, se poate realiza indirect o estimare a fenomenelor care au generat aceste deplasări, unul dintre cele mai importante fiind legat de dinamica apei subterane urbane. Metoda recentă pentru monitorizarea subsidenței urbane este tehnica de teledetecție satelitară ce utilizează Interferometria Radar bazată pe Ținte Persistente - PSI (Persistent Scatterer Interferometry), deplasările verticale ale terenului fiind determinate până la un ordin milimetric.

La nivel mondial, studiile menționează exploatarea apei subterane ca fiind una dintre cauzele principale ale fenomenelor de subsidență. Cele 53 de studii de caz din primul capitol documentează răspândirea acestui fenomen pe glob. **Este prezentată o comparație între țările cu un lung istoric al pompării de apă subterană și în care zonele de subsidență încep să aibă valori tot mai scăzute (ex. Tokyo, Japonia) și țările cu o istorie recentă a pompării apei subterane.** Deplasările negative pe verticală ale terenului se produc mai rapid în zonele cu un istoric mai recent de subsidență, din cauza cantităților foarte mari de apă subterană care sunt pompate pentru satisfacerea nevoilor de apă pentru populație și pentru industrie (ex. Indonesia).

În a doua secțiune a tezei un studiu de caz asupra Municipiului București este realizat, considerând particularități ale fenomenelor de subsidență la nivelul orașului, la nivel local și la nivel regional. Au fost luate în considerare două perioade de timp pentru care au fost disponibile seturi de date de la două misiuni satelitare radar europene. Astfel, pentru perioada 2004-2010 au fost utilizate și procesate cu ajutorul tehnicii PSI, date de la misiunea ENVISAT ASAR, iar pentru intervalul de timp 2014-2018 au fost utilizate date de la misiunea actuală radar europeană, Sentinel-1. Folosind aceste seturi de date, au fost generate hărți ale deplasărilor verticale ale terenului la nivelul întregii zone urbane, pentru cele două intervale de timp menționate anterior. Urmărind cele două hărți generate, ale deplasărilor terenului, s-a observat consistența rezultatelor celor două intervale de timp. Numeroase zone de instabilitate identificate pe harta deplasărilor terenului pentru perioada 2004-2010 prezintă aceleași tendințe și în intervalul 2014-2018. **Ca și noutate, este propusă utilizarea unui nou produs cartografic obținut prin combinarea hărții de determinare a deplasărilor verticale ale terenului cu harta detectării schimbărilor la nivelul suprafeței terenului, pentru stabilirea cu mai mare exactitate a arealelor potențiale ce localizează sursa generatoare de deplasări verticale ale terenului. Pentru ambele intervale de timp s-a observat o tendință generală de stabilitate la nivelul orașului, cu o tendință particulară de apariție și menținere a deplasărilor verticale negative pentru anumite zone aflate mai ales în lungul culoarelor celor două râuri care traversează Municipiul București: râul Dâmbovița și râul Colentina.**

La nivel local, a fost studiată zona Barbu Văcărescu (București), care are un istoric de subsidență încă din anii '90, când din seriile temporale SAR analizate începând cu anul 1992, aceasta zonă a fost identificată ca zonă de instabilitate. S-au analizat datele privind deplasarea terenului, datele litologice, geologice și hidrogeologice disponibile pentru acest areal. Urmărind deplasările verticale ale terenului din hărțile PSI generate pentru intervale de timp cuprinse între 1992 și 2018, se poate observa că **tendința de instabilitate nu este dată în principal de extinderea spațială și de predominanța punctelor PS care indică subsidență, ci de schimbările care apar în privința amplasării punctelor PS care indică deplasări ale terenului.** Analiza a fost focalizată pe relația care există între deplasările terenului și dinamica sistemului acviferului urban din zona Barbu Văcărescu și se prezintă și un studiu de caz particular al unui imobil din zona de studiu. **Rezultatele procesării PSI evidențiază un model de instabilitate dinamică care este legat de prezența stratului superior de materiale antropice.** Pentru lucrări viitoare, atunci când procedurile de planificare și proiectare urbană iau în considerare operațiuni de construcții care modifică dinamica sistemului acvifer, este necesar a fi analizat cu atenție stratul de materiale antropice și comportamentul hidraulic al acestuia în cadrul sistemului acvifer urban.

Pentru studiul urban regional, zona aleasă se găsește de-a lungul culoarului râului Colentina. A fost propusă o metodologie de caracterizare a zonei pentru intervalul 2014-2018, ținându-se cont de numeroase aspecte specifice din zona studiată, cum ar fi: prezența subsidenței, prezența schimbărilor terenului, aspecte și caracteristici hidrogeologice, geologice, hidrologice, istoricul zonei de studiu (considerând dispunerea vechilor cariere de materiale de construcții), schimbările topografiei lacurilor râului Colentina în ultimii 100 de ani, aspecte climatice. **Rezultatele obținute au arătat o concordanță majoră între nivelul apei din lacuri și deplasările pe verticală ale zonelor limitrofe, ambele având tendințe de scădere, în contextul unei puternice conexiuni hidraulice dintre salba de lacuri ale râului Colentina și primul strat acvifer.** Prezența depozitelor antropice asociate fluctuațiilor apei subterane pot avea un efect și mai puternic în termeni de deplasare verticală a solului, față de cazurile în care stratul superficial este format din depozite naturale. O altă asociere care poate produce deplasări ale suprafeței terenului este dată de existența unor soluri mlăștinoase ca bază pentru un depozit antropogenic eterogen.

Fenomenul de subsidență în zonele urbane, precum municipiul București, poate avea cauze multiple. Schimbări ale nivelului piezometric al acviferului din cauza pierderilor din rețelele de distribuție a apei, comportamentul stratelor antropice, sau diminuarea infiltrațiilor apei în acvifere din cauza impermeabilizării stratului superficial urban, prezintă un rol important. Aceste fenomene contribuie direct la dinamica apei subterane urbane și în consecință la probleme de destabilizare ale terenului. O mai bună înțelegere a modului complex de conectare dintre procesele geologice și hidrogeologice ca parte a ciclului apei în mediul urban și deplasările terenului va aduce îmbunătățiri în planificarea urbană a mediului subteran și a dezvoltării urbane sustenabile. Considerând dezvoltările din cadrul misiunii satelitare europene Sentinel-1, care furnizează date SAR în mod gratuit, tehnicile InSAR pot implica mai puține resurse financiare decât celelalte metode, însă cele mai bune rezultate pot fi obținute prin combinarea a diverse metode de monitorizare.

SHORT PRESENTATION

Groundwater is one of the main resources needed for anthropogenic activities in urban areas, as it satisfies the needs of the population and an improved quality of life. Consequently, it reaches a high importance in the urban planning process. However, there are situations when due to the exploitation of large groundwater quantities or due to the association of its exploitation with other underground and above-ground urban activities, land degradation phenomena generating vertical displacements appear. These can lead to buildings or infrastructure elements deterioration. By monitoring the vertical ground displacements, it is possible to indirectly estimate the phenomena that generated them, one of the most important such phenomenon being related to the dynamics of urban groundwater. The recent method for monitoring urban subsidence is the satellite remote sensing technique that uses PSI (Persistent Scatterer Interferometry), the vertical ground displacements being determined to a millimeter order.

Globally, scientific studies cite groundwater exploitation as one of the main causes of subsidence phenomena. The 53 case studies from the first chapter document the spread of this phenomenon worldwide. **A comparison is presented between countries with a long history of groundwater pumping and where subsidence areas are beginning to have decreasing values (eg., Tokyo, Japan) and countries with a recent history of groundwater pumping.** Negative vertical displacements of land occur more rapidly in areas with a more recent history of subsidence, due to the very large quantities of groundwater that are pumped to meet water needs for the population and industry (eg., Indonesia).

In the second section of the thesis a case study on the Municipality of Bucharest is carried out, considering the particularities of the subsidence phenomena at city level, at local level, and at regional level. Two time periods for which data sets from two European satellite radar missions were available were taken into consideration. Thus, for the period 2004-2010 data from the ENVISAT ASAR mission were used and processed using the PSI technique, and for the period 2014-2018 data from the current European radar mission, Sentinel-1 were used. Maps of the vertical displacements of the terrain at the level of the entire urban area were generated using these data sets, for the two abovementioned time intervals. Following the two generated maps of the terrain displacements, the consistency of the results for the two-time intervals was observed. Numerous areas of instability identified on the land displacements map for the period 2004-2010 show the same trends for the 2014-2018 interval as well. **As a novelty, the use of a new cartographic product obtained through combining the map of the vertical land displacements with the surface terrain change detection map is proposed. Therefore, the potential areas that locate the source of vertical displacements can be established more accurately. For both time intervals there was a general trend of stability in the city. However, a particular trend of occurrence and maintenance of negative vertical displacements for certain areas, located especially along the corridors of the two rivers that cross Bucharest: Dâmbovița River and Colentina River, has been identified.**

At local level, the Barbu Văcărescu area (Bucharest) was studied, which has a history of subsidence since the '90s, when from the SAR time series analyzed since 1992, this area was identified as an instability area. The land displacements, lithological, geological, and hydrogeological data available for this area were analyzed. **Analyzing the vertical**

displacements of the terrain in the PSI maps generated for time intervals between 1992 and 2018, it can be observed that the trend of instability is not marked by its spatial expansion and the predominance of PS points indicating subsidence, but by changes in the location of the PS points. The analysis focuses on the relationship between land displacements and the dynamics of the urban aquifer system in the Barbu Văcărescu area, and presents a particular case study of a building in the study area. **The results of PSI processing highlight a pattern of dynamic instability related to the presence of the upper layer of anthropogenic materials.** For future work, when urban planning and design procedures take into account construction operations that change the dynamics of the aquifer system, it is necessary to carefully analyze the layer of anthropogenic materials and its hydraulic behavior as part of the urban aquifer system.

As the regional urban study, the chosen area is located along the Colentina River corridor. A methodology for characterizing the area for the period 2014-2018 was proposed, taking into account specific elements of the studied area, such as: the presence of subsidence, the presence of land changes, hydrogeological, geological, hydrological characteristics, history of the study area (considering the location and extension of old quarries of building materials), changes in the topography of the lakes of the Colentina River in the last 100 years, and climatic aspects. **The obtained results showed a major concordance between the water level in the lakes and the vertical movements of the surrounding areas, both with decreasing tendencies, in the context of a strong hydraulic connection between the Colentina riverbed and the first aquifer strata.** The presence of anthropogenic deposits associated with groundwater fluctuations can have an even stronger effect in terms of ground vertical displacements, compared to cases where the surface layer consists of natural deposits. Another association that can produce land movements is given by the existence of marshy soils as a basis for a heterogeneous anthropogenic deposit.

The phenomenon of subsidence in urban areas, such as Bucharest, can have multiple causes. Changes in the hydraulic head of the aquifer due to losses in water distribution networks, the behavior of anthropogenic strata, or the decrease of water infiltrations into aquifers due to the urban fabric surface play an important role. These phenomena contribute directly to the dynamics of urban groundwater and consequently lead to ground weakening problems. A better understanding of the complex connections between the ground displacements with the geological and hydrogeological processes, as part of the urban water cycle, increase the quality of the subsurface urban planning and improve the urban development process. Given the developments in the European Sentinel-1 satellite mission, which provides free of charge SAR data, InSAR techniques may need fewer financial resources than other methods. However, the best results can be achieved only by combining various monitoring methods.

INTRODUCERE

Mediul urban este într-o continuă schimbare, dezvoltare și expansiune. Acest aspect aduce cu sine provocări privind satisfacerea nevoilor populației, care de cele mai multe ori se concretizează în activități antropice care pot modifica substanțial mediul natural. Una dintre cele mai importante nevoi este legată de accesul la resurse de apă dulce. În afară de apele de suprafață, o mare parte din necesarul de apă este acoperit din resursele de apă subterană. Activităților de exploatare a apei subterane utilizabile ca resursă de apă, li se asociază alte activități antropice care necesită pomparea apei subterane pentru diverse scopuri, cum ar fi construcția anumitor clădiri sau infrastructuri, sau pentru menținerea acestora în stare funcțională. Activitățile antropice pot genera alunecări de teren, fenomene de eroziune, tasări diferențiate, deplasări verticale și orizontale ale suprafeței terestre.

Unele dintre cele mai importante activități din mediul urban care pot conduce la apariția unor probleme de deplasări verticale ale terenului sunt legate de aspecte de hidrogeologie, putând fi vorba de extragerea unor cantități foarte mari de apă din sistemele acvifere pentru utilizarea acestora în scopuri industriale, sau legată de construcția și exploatarea infrastructurilor urbane. Aspectele hidrogeologice sunt însoțite și de alte fenomene și procese specifice mediului subteran urban, care țin de geologie și geotehnică, care de multe ori sunt asociate construcției de clădiri cu scop rezidențial și pentru birouri, de centre comerciale, de infrastructuri subterane și supraterane. Deplasările verticale ale terenului pot avea ca efect degradarea construcțiilor existente sau a altor elemente de infrastructură terestră.

Dinamica dintre spațiul suprateran urban și spațiul subteran, incluzând apa subterană, are nevoie de instrumente de monitorizare. Monitorizarea este în cele mai multe cazuri foarte dificil de realizat, cu atât mai mult cu cât pentru anumite zone este posibil ca problemele legate de dinamica celor două medii să nu fie vizibile în stadiul inițial. În această lucrare, tehnici de teledetecție specifice achizițiilor de la sateliți radar sunt propuse ca instrumente de monitorizare. Tehnicile de teledetecție, prin intermediul observațiilor cantitative și calitative achiziționate în mod repetat și cu o largă acoperire spațială, pot oferi oportunitatea de detectare incipientă a problemelor de subsidență care pot apărea în zone urbane (Poenaru și alții, 2015). Datele de la sateliți radar cu apertură sintetică (SAR) prezintă o utilitate operațională specială și capacități de detecție și pot fi folosite pentru actualizarea hărților și monitorizarea dinamicii proceselor de subsidență de-a lungul timpului.

Considerând dinamica mediului urban, realizarea unei monitorizări a subsidenței prin metode in-situ (cum ar fi rețele de nivelment de precizie) ar necesita utilizarea unor resurse importante atât umane cât și materiale și de timp. Tehnicile InSAR permit realizarea cu ușurință a cartării zonelor de subsidență și de asemenea, pot fi utilizate pentru estimarea anumitor parametri după realizarea unor corelații între măsurătorile InSAR și cele de nivel piezometric.

Obiectivul principal al tezei este de a propune tehnicile de teledetecție care pot fi utilizate pentru recunoașterea cât mai precisă a zonelor de instabilitate cauzate de fenomene de subsidență, precum și pentru cuantificarea cât mai precisă a valorilor deplasărilor, corelat cu evidențierea fenomenelor care au provocat deplasarea verticală a terenului. Dinamica apei subterane urbane, influențată de activitățile antropice de captare sau drenaj a acesteia, reprezintă unul dintre factorii principali care pot produce deplasări verticale ale terenului. Deși această

dinamică nu poate fi monitorizată direct prin tehnici de teledetecție, efectul pe care îl poate avea asupra suprafeței terenului poate fi observat și de aici pot fi inițiate noi analize care să ofere mai multe informații cu privire la ceea ce se întâmplă în subteran.

Lucrarea este alcătuită din patru capitole, la care se adaugă o ultimă secțiune care tratează concluziile generale. **Capitolul 1** prezintă stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în monitorizarea mediului subteran urban. În prima parte a acestui capitol sunt prezentate sursele de date de teledetecție care pot fi utilizate pentru managementul apelor subterane, considerând componentele ciclului apei. În cea de-a doua parte a primului capitol este prezentată o sinteză a cercetărilor la nivel internațional cu privire la monitorizarea deplasărilor verticale ale terenului în mediul urban, luându-se în considerare mai mulți parametri, cum ar fi: cauzele apariției fenomenelor de deplasare a terenului, metodele de teledetecție utilizate pentru monitorizare, datele de la sateliți radar utilizate, modelarea fenomenului, specificul arealului geografic, suprafața afectată, valorile maxime înregistrate. Este prezentat, de asemenea, un istoric al metodelor de determinare a deplasărilor terenului a căror utilizare este marcată de începutul secolului XX, împreună cu avantajele și limitările pe care le prezintă fiecare dintre aceste metode. În cea de-a treia parte a primului capitol sunt prezentate cercetările la nivel național privind monitorizarea deplasărilor terenului în mediul urban. În cadrul acestui capitol sunt discutate și diversele definiții ale fenomenelor de subsidență, în funcție de specificul domeniului pentru care au fost date, precum și particularitățile litologice care favorizează apariția fenomenelor de subsidență, sau care pot duce la creșterea vitezei cu care fenomenele de deplasare a terenului au loc.

Capitolul 2 al lucrării prezintă zona de studiu aleasă, și anume, municipiul București, împreună cu metodele de teledetecție care au fost aplicate pentru monitorizarea dinamicii suprafeței terenului pentru acest studiu de caz, considerând metodologia de lucru, datele satelitare radar, rezultatele obținute la nivelul orașului, precum și concluziile cu privire la aceste rezultate. Sunt prezentate atât metode de teledetecție de determinare a deplasărilor verticale ale terenului, cât și metode de detectare a schimbărilor care intervin la suprafața terenului, precum și produsul cartografic obținut prin îmbinarea celor două tipuri de tehnici de teledetecție și utilizarea acestuia. Imaginile radar utilizate pentru determinarea deplasărilor verticale ale terenului provin de la misiunea satelitară europeană radar actuală Sentinel-1 (pentru intervalul de monitorizare 2014-2018) și de la misiunea anterioară acesteia, Envisat ASAR (pentru intervalul de monitorizare 2004-2010), iar pentru detectarea schimbărilor, de la misiunea Sentinel-1. Pentru procesare au fost utilizate softurile ENVI SARscape de la L3Harris Geospatial, platforma SNAP și un soft dezvoltat pentru serviciul INSAR.NO, serviciul public național norvegian pentru determinarea deplasărilor terenului. Imaginile Sentinel-1 au fost prelucrate în cadrul proiectului INXCES (www.inxc.es.eu). Se propune utilizarea produsului cartografic obținut prin combinarea hărții de determinare a deplasărilor verticale ale terenului cu harta detectării schimbărilor la nivelul suprafeței terenului pentru stabilirea cu mai mare exactitate a potențialelor areale unde se află sursa generatoare a deplasărilor verticale ale terenului.

Dacă în capitolul 2 sunt prezentate rezultate la nivelul întregului oraș, **capitolul 3** prezintă un studiu de caz pentru o zonă specifică din municipiul București, denumită Barbu Văcărescu, unde mai multe fenomene și procese din mediul subteran duc la apariția fenomenelor de deplasare verticală a terenului, considerând aspecte de geotehnică, hidrogeologie, geologie,

hidrologie. Este luată în considerare relația care există între deplasările terenului și dinamica sistemului acviferului urban din zona Barbu Văcărescu și se prezintă și un studiu de caz particular al unui imobil din zona de studiu. Capitolul se încheie cu discuții și concluzii privind fenomenele din arealul studiat. În acest capitol, rezultatele procesării PSI evidențiază un model de instabilitate dinamică care este legat de prezența stratului superior de materiale antropice. Stratul de materiale antropice, împreună cu conexiunile sale la sistemul acviferului urban este necesar a fi analizat cu atenție pentru lucrări viitoare, atunci când procedurile de planificare și proiectare urbană iau în considerare operațiuni de construcții care modifică dinamica sistemului acvifer.

Pornind de la studiul de caz specific, în **capitolul 4** se prezintă o analiză privind fenomenele de subsidență la nivel regional urban. Capitolul începe cu prezentarea motivației și a metodologiei de lucru, continuând cu prezentarea zonei de studiu regional selectată, și cu analiza fenomenelor și a specificului diverselor areale incluse în zona regională de studiu. Astfel, zona de studiu regională a fost aleasă în lungul lacurilor râului Colentina, considerând numărul ridicat de areale în care sunt prezente deplasări verticale ale terenului. Există mai mulți factori de care se ține cont în înțelegerea fenomenelor din zonă, printre care istoricul fiecărei zone atât pe termen scurt (4-5 ani), pe termen mediu (20-30 ani), cât și pe termen lung (100 de ani), utilizarea combinată a hărții de identificare a deplasărilor cu harta de detectare a schimbărilor, precum și alte aspecte hidrologice, hidrogeologice, geotehnice și geologice. În foarte multe cazuri, deplasările sunt asociate construcției de ansambluri rezidențiale dotate cu facilități subterane care ajung până la adâncimi apropiate de cota coperișului stratului acvifer freatic, sau chiar până la adâncimi care depășesc adâncimea până la nivelul apei din acviferul freatic. Conexiunile dintre aceste construcții și sistemul acvifer pot constitui unul dintre principalii factori care duc la declanșarea și apoi la menținerea fenomenelor de deplasare verticală a terenului.

Ultimul capitol al lucrării prezintă concluziile generale cu privire la studiile efectuate, contribuțiile personale și direcțiile de cercetare propuse pentru activități viitoare, pornind de la rezultatele acestui studiu. Concluziile generale iau în considerare tehnicile de observare și monitorizare a fenomenului de subsidență, modul în care tehnicile InSAR pun în evidență fenomenele de subsidență generate prin modificarea antropică a dinamicii apelor subterane, fenomenul de subsidență la nivel urban local, fenomenul de subsidență la nivel regional urban, precum și aspecte hidrogeologice caracteristice mediului urban și influența acestora în procesele de deplasare verticală a terenului.

**În interpretarea rezultatelor privind deplasările verticale ale terenului pentru Municipiul București, rezultate în urma procesării datelor satelitare SAR, este important să se țină cont de normativele în vigoare privind proiectarea construcțiilor și a fundațiilor. Astfel în "NORMATIVUL PRIVIND PROIECTAREA FUNDAȚIILOR DE SUPRAFAȚĂ, indicativ NP 112 – 2014", sunt specificate valori orientative privind deplasările sau deformațiile admise la proiectarea fundațiilor pentru diferite tipuri de construcții.*

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE ÎN MONITORIZAREA MEDIULUI SUBTERAN URBAN

1.1. UTILIZAREA DATELOR DE TELEDETECȚIE PENTRU MANAGEMENTUL APELOR SUBTERANE

Managementul apelor subterane este un proces extrem de dificil și complex (NOAA, 2018), atât din cauza faptului că acestea se află cantonate în mediul subteran care este destul de greu accesibil, cât și din cauza fenomenelor și proceselor prin care apa trece pentru a ajunge din atmosferă până în mediul subteran.

Principalii factori responsabili în alimentarea acviferelor sunt factorii climatici, care sunt completați de factori hidrologici și factori geologici (Scrădeanu & Alexandru, 2007). Astfel, temperatura, precipitațiile atmosferice, evapotranspirația, umiditatea aerului, influențează alimentarea acviferelor (Zhao, et al., 2019; Scrădeanu & Alexandru, 2007), la fel ca și vegetația sau solul (Scrădeanu & Alexandru, 2007).

Evaluarea cantitativă a ciclului hidrologic se poate realiza cu ajutorul ecuației bilanțului apei (Scrădeanu & Alexandru, 2007), în care intervin direct sau indirect componentele, factorii și elementele menționate. Într-o formă simplificată, această ecuație poate fi scrisă ca:

$$S = P - Q - E \quad (1.1)$$

unde S reprezintă cantitatea de apă subterană stocată, P reprezintă precipitațiile, Q reprezintă scurgerile de suprafață, iar E reprezintă evapotranspirația.

Observarea Pământului, cu ajutorul senzorilor satelitari, poate ajuta la îmbunătățirea managementului apelor subterane și la înțelegerea ciclului hidrologic, furnizând date și analize referitoare la diferite componente ale ciclului hidrologic, precum și la factorii care influențează apele subterane și la elementele de mediu implicate în toate aceste fenomene și procese. Prin îmbinarea datelor de teledetecție cu cele din teren se pot face cuantificări mai precise ale anumitor factori și se poate obține o imagine de ansamblu mult mai apropiată de realitate.

Mai jos, sunt prezentate o serie de misiuni de teledetecție specifice și generale care au un rol important, direct sau indirect, în caracterizarea apei subterane:

- **Estimarea precipitațiilor** cu ajutorul misiunilor
 - TRMM- Misiunea satelitară pentru măsurarea precipitațiilor tropicale.
 - GPM- Misiunea pentru măsurarea globală a precipitațiilor (NASA GPM, 2017)
- **Estimarea evapotranspirației** - Produsul care conține setul de date globale privind evapotranspirația este **MODIS Evapotranspiration Data Set (MOD16)**
- **Monitorizarea stratului de zăpadă** - Produsele cartografice MODIS cu acoperire globală pentru caracterizarea stratului de zăpadă sau utilizarea senzorilor radar activi, cum ar fi misiunile europene ERS-1, ERS-2, ENVISAT ASAR și Sentinel-1.
- **Estimarea umidității solului**
 - Misiunea SMOS pentru estimarea umidității solului și a salinității oceanului (Soil Moisture and Ocean Salinity)
 - Misiunea SMAP (Soil Moisture Active Passive) pentru estimarea umidității solului cu senzori activi și pasivi

- **Monitorizarea nivelului rezervoarelor de apă globale/ lacurilor (G-REALM)**- monitorizarea în mod regulat variațiile lacurilor și a înălțimilor rezervoarelor multor lacuri de dimensiuni foarte mari din jurul lumii (G-REALM, 2018).
- **Estimarea diminuării globale a resurselor de apă subterană** – se utilizează gravimetria satelitară, folosind variațiile câmpului gravitic al Pământului.
 - Misiunea GRACE- Gravity Recovery and Climate Experiment
 - Misiunea GOCE- Exploratorul câmpului gravitic și al circulației oceanice în stare stabilă (GOCE, 2015).
- **Determinarea indicilor de vegetație**

Unul dintre cei mai utilizați indici de vegetație este indicele de vegetație diferențiată normalizată (NDVI) (Meijerink, 2007) care ia valori în intervalul [-1,1] și care se calculează astfel:

$$NDVI = (NIR-Red) / (NIR+Red) \quad (1.1)$$

unde NIR este banda spectrală de Infraroșu Apropiat, iar Red este banda spectrală pentru culoarea roșu.

- **Estimarea temperaturii suprafeței terenului** - se obține prin combinarea de diverse benzi spectrale din domeniile vizibil și infraroșu, banda infraroșu termal având un rol foarte important (Dupigny-Giroux & Lewis, 1999).
- **Date multispectrale de teledetecție utilizate pentru determinarea parametrilor în conexiune cu ciclul hidrologic**

Începând cu anii '70, au fost lansate o serie de misiuni satelitare cu senzori pasivi, printre care: programul cu cea mai lungă durată de viață și care este încă activ, denumit Landsat (USGS, 2021), seria sateliților SPOT (CNES, 2021), misiunea PLEIADES (Airbus, 2021) . În cadrul programului european actual de Observare a Pământului, Copernicus, a fost lansată misiunea Sentinel-2, care vine cu noi capacități legate de rezoluția spectrală și temporală, care permit o mai bună monitorizare a mediului (ESA, 2018).

- **Misiuni satelitare radar cu apertură sintetică (SAR)**

Senzorii radar, având o sursă proprie de energie, pot prelua achiziții atât ziua cât și noaptea, indiferent de condițiile atmosferice, putând penetra acoperirea cu nori, ceața, sau precipitațiile atmosferice. Aceste proprietăți permit utilizarea datelor de la sateliți radar pentru monitorizarea inundațiilor, cartarea acoperirii cu zăpadă, dar și pentru estimarea mai multor parametri menționați anterior. Astfel, prin combinarea cu date optice se poate realiza estimarea acoperirii cu vegetație și a biomasei, estimarea umidității solului, monitorizarea rezervelor globale de apă.

Prin utilizarea de serii temporale de date SAR achiziționate din aproximativ același punct de pe orbită, pentru aceeași suprafață a terenului, se pot determina deplasările verticale ale suprafeței terenului care apar ca urmare a activităților de pompare sau de injectare de fluide (Galloway & Burbey, 2011). Totodată, se poate estima extinderea spațială a deformării acestei suprafețe (Galloway, et al., 1998).

- **Monitorizarea dinamicii apei subterane urbane**

Misiunile satelitare specifice și generale prezentate în anterior, au un rol important, direct sau indirect, în caracterizarea apei subterane. În contextul urban, regimul natural al dinamicii apelor subterane este profund afectat, considerând atât lucrările de captare și drenaj, cât și infrastructurile subterane care pot constitui bariere în curgerea apei subterane. Tehnicile de teledetecție nu pot monitoriza în mod direct această dinamică a apei subterane din mediul urban, dar pot monitoriza efectele pe care această dinamică le are la suprafața terenului (Galloway & Burbey, 2011). Este vorba de deplasări pe verticală ale terenului care apar ca urmare a exploatării apei subterane sau în urma apariției barierelor din calea apei subterane. Dinamica apelor subterane nu este singurul factor care duce la apariția deplasărilor verticale ale terenului, dar este unul dintre factorii importanți. Monitorizarea deplasărilor terenului nu permite, în general, determinarea magnitudinii variațiilor nivelului piezometric dar pot indica prezența unor variații ale nivelului piezometric.

Tehnicile de teledetecție nu înlocuiesc măsurătorile piezometrice care se efectuează în forajele de monitorizare, ci pot fi utilizate pentru a avea o imagine de ansamblu asupra problemelor care pot exista la nivelul orașului în ceea ce privește deplasările terenului și a dinamicii apei subterane. Pot fi zone în care să nu existe foraje de monitorizare și unde să nu se știe exact care este cantitatea de apă exploatată, dar din harta deplasărilor verticale ale terenului se poate identifica acea zonă unde apoi să fie efectuate analize și măsurători mai amănunțite pentru a cunoaște exact situația din subteran.

1.2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR LA NIVEL INTERNAȚIONAL, PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR ÎN MEDIUL URBAN

1.2.1. Caracterizarea deplasărilor pe verticală ale terenului în mediul urban

Deplasarea pe verticală a terenului reprezintă una dintre formele de degradare care afectează suprafața terenului (Bitelli, et al., 2015). Această deplasare poate fi pozitivă, caz în care se produce o înălțare a terenului, *engl. uplift*, sau negativă, în acest caz producându-se coborârea sau tasarea suprafeței terestre (Allaby, 2013). În literatura de specialitate există mai mulți termeni care sunt utilizați pentru a defini deplasarea verticală negativă a suprafeței terenului, cum ar fi: compactare (Kim & Won, 2003), tasare (Zhang, et al., 2009) sau subsidență (Gambolati, et al., 2006). De cele mai multe ori când este vorba de monitorizarea deplasărilor terenului cu ajutorul tehnicilor de teledetecție InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), termenul utilizat este de subsidență. Poate fi vorba de o generalizare a utilizării acestui termen pentru a denumi deplasările pe verticală, chiar dacă specific unele dintre ele sunt tasări sau compactări ale terenului.

Conform Dicționarului Oxford pentru Mediu și Conservare, în geologie, subsidența este definită ca fiind o "tasare a suprafeței terestre ca un rezultat al unei prăbușiri a unei formațiuni poroase din care a fost extrasă o cantitate foarte mare de apă" (Park & Allaby, 2017).

În afara definițiilor în care cauza subsidenței este legată de extracția de diferite materiale din subteran, Dicționarul de Geologie și Științe ale Pământului oferă și alte definiții:

- "O depresiune progresivă a scoarței terestre, care permite acumularea și conservarea sedimentelor. Subsidența apare ca o cauză a convecției mantalei și de încărcarea

sedimentelor. Rata subsidenței va controla proporția de sedimente depozitate care vor fi păstrate în zona de subsidență”

- ”Scufundarea sau tasarea suprafeței terenului din cauze naturale sau antropice. Materialul de suprafață fără latură liberă este deplasat vertical în jos fără deplasare în plan orizontal sau cu o ușoară deplasare în plan orizontal” (Allaby, 2013).

Fenomenele de degradare ale terenului, pot acoperi de la prăbușiri locale sau de dimensiuni mici, până la areale regionale vaste și pot avea loc ca un proces lent sau ca o scufundare bruscă.

Una dintre cauzele antropice ale subsidenței terenului în zonele urbane este reprezentată de extragerea intensivă a apei subterane necesară pentru a asigura diversele nevoi și funcționalități urbane, care conduce la compactarea sistemelor acvifere predispușe la acest fenomen (Galloway & Burbey, 2011).

1.2.2. Monitorizarea zonelor urbane afectate de fenomene de subsidență, ca rezultat al pompării apei subterane

Cele mai noi tehnici de monitorizare ale deplasărilor terenului sunt reprezentate de tehnicile InSAR care au început să fie utilizate pe o scară din ce în ce mai largă începând cu anii '90, perioadă în care au devenit disponibile suficiente date SAR pentru a putea utiliza interferometria SAR pentru determinarea deplasărilor terenului (Bamler & Hartl, 1998).

Un rezumat al mai multor studii cu privire la monitorizarea subsidenței din zonele urbane, cu utilizarea tehnicilor InSAR, având, în general, ca principală cauză a subsidenței, pomparea apei subterane, a fost realizat. Figura 1-1 arată aceste zone pentru care au fost efectuate studii privind prezența fenomenelor de subsidență, care sunt răspândite pe toată suprafața a globului.

1.2.3. Distribuția geografică documentată și istoricul apariției fenomenelor de subsidență urbană la nivel internațional

În lucrarea de față au fost incluse studii din mai mult de 20 de țări și din peste 50 de zone urbane. S.U.A. este una dintre țările în care sunt întâlnite și documentate fenomene de subsidență în multe zone urbane din state diferite, atât de pe coasta de est, cât și de pe coasta de vest. Această țară este cunoscută și prin faptul că există un lung istoric privind subsidența, apariția acesteia fiind recunoscută încă de la începutul secolului XX (Gambolati, et al., 2006). Cu privire la longevitatea existenței fenomenelor de subsidență, Mexico City și zonele învecinate reprezintă un alt exemplu de zonă urbană cu o lungă istorie de subsidență (Cabral-Cano, et al., 2008). Considerând localizarea geografică, se disting câteva tipuri de relief care au o influență majoră în producerea fenomenelor de subsidență unde efectele pompării apei subterane sunt corelate cu eroziunea costieră și creșterea nivelului mării:

- Zonele costiere (ex. Coachella Valley, Los Angeles, New Orleans, Houston-Galveston, Porto, Lisabona, Barcelona, Veneția, Napoli, Istanbul, Thyborøn, Medan, Jakarta, Surabaya, Tokyo),
- Zonele deltaice (ex. Kolkata, Tianjin, Municipality Delta din Grecia, delta Po (zona Emilia-Romagna), Vancouver), sau
- Zonele costiere extinse cu pământ recuperat din mare (ex., Incheon, Busan, Shenzhen, Hong Kong).



Figura 1-1 Privire de ansamblu a zonelor urbane afectate de fenomene de deplasări verticale la nivel internațional

Chaussard și colab. (2013), realizează un studiu în care zonele afectate de subsidență pot fi clasificate pe baza mai multor criterii: rata de deformare, extinderea spațială și utilizarea terenului. Pornind de la acești parametri, Tabelul 1-1 prezintă distribuția zonelor incluse în acest studiu.

Tabelul 1-1 Clasificarea zonelor urbane afectate de subsidență (modificat după (Chaussard, et al., 2013))

Parametru	Descriere	Criteriu	Orașe
Rata de deformare	Lentă	<5cm/an	Ex. Lisabona, Porto, Atena, Barcelona, Bratislava, Londra, Veneția, Brussels, Düsseldorf, Thyborøn, Paris, Istanbul, Kolkata, Busan, Shanghai, Shenzhen, Surabaya, Los Angeles, Vancouver
	Rapidă	≥ 5cm/an	Ex. Napoli, Delhi, Quetta Valley, Toluca Valley, Mexico City, Hanoi City, Hong Kong, Beijing, Medan, Jakarta, Bandung
Extindere spațială	Scară largă	≥100 km ²	Ex. Londra, Veneția, Quetta Valley, Mexico City, Shanghai, Beijing, Jakarta, Bandung, Antelope Valley, Las Vegas
	Scară locală	10-100 km ²	Ex. Murcia, Atena, Municipality Delta- Grecia, Istanbul, Delhi, Kolkata, Incheon, Hanoi, Medan, Semarang, Coachella Valley.
	Neuniform	1- 10km ²	Ex. Lisabona, Porto, Montellano, Barcelona, Pisa, Napoli, Brussels, Düsseldorf, Thyborøn, Busan, Hong Kong, New Orleans.
	Punctual	< 1 km ²	Ex. Bratislava, Paris
Utilizarea terenului		Agricultură	Ex. Montellano, Municipality Delta- Grecia, Gioi Tauro, Pekalongan, Santa Clara Valley, Coachella Valley, Quetta Valley
		Urban	Ex. Mexico City, Tokyo, Montellano, Pisa, Istanbul, Quetta Valley, Hanoi, Shanghai, Santa Clara Valley, Lisabona, Porto
		Industrial	Ex. Lisabona, Porto, Gioi Tauro, Brussels, Shenzhen, Surabaya, Medan, Jakarta, Bandung, Antelope Valley

• Particularități geologice și geotehnice ale zonelor afectate de subsidență

Deplasările verticale ale terenului apar ca urmare a pomparei unor cantități foarte mari de apă subterană, modificându-se implicit caracteristicile geologice și geotehnice ale mediului subteran, din zonele afectate de subsidență. Se remarcă mai multe tipuri de strate geologice cu anumite caracteristici geotehnice care au un rol important în apariția fenomenelor de subsidență:

- prezența straterlor de argile compresibile intercalate între alte strate de pământuri (roci) mai permeabile (ex. Lisabona, Montellano, Delta Thessaloniki);
- prezența straterlor cu sedimente eterogene- acestea sunt asociate în foarte multe cazuri cu prezența straturilor de argile intercalate, ceea ce face ca deplasarea să fie o consecință a combinației dintre cele două tipuri de strate (ex. Montellano, Câmpia Gioia Tauro).
- prezența depozitelor organice- deplasările verticale prezente în aceste zone, au atât o componentă naturală, din cauza oxidării materialelor organice prezente, cât și o componentă antropică, aici intervenind activitățile umane care favorizează apariția deplasărilor verticale (ex. Hanoi, Blanakan și Pekalongan, Indonezia, New Orleans).
- prezența depozitelor antropice- se disting mai multe tipuri de zone în care astfel de depozite pot fi întâlnite, cum ar fi:
 - zone desecate sau recuperate din mare (ex. Singapore, Shenzhen, Hong Kong, Busan, zone deltaice (ex. New Orleans);
 - zone în care s-au produs dezastre naturale (cutremure- ex. Ciudad Guzman, Mexic) sau
 - zone în care depozitele antropice au fost utilizate pentru umplerea unor foste cariere, de unde au fost extrase materiale de construcții sau alte resurse naturale- ex. București.

- **Fenomene de subsidență asociate construcției de infrastructuri subterane și supraterane**

În afară de utilizarea terenului, în multe cazuri se observă prezența unor lucrări specifice pentru construcția unor infrastructuri subterane sau de suprafață, cum ar fi:

- Tren subteran: Lisabona, Londra, Napoli, Shanghai,
- Stații de tren: Barcelona
- Tuneluri de metrou: Londra, Düsseldorf, Shanghai, București,
- Poduri: Bratislava
- Construcții subterane: Paris, Busan, Beijing, Surabaya.

Toate aceste lucrări, din cauza regimului de pompare al apei subterane, realizate în vederea coborârii nivelului apei sau în vederea depresurizării unor strate acvifere sub presiune, induc fenomene de subsidență.

1.2.4. Metode clasice utilizate pentru monitorizarea deplasărilor

În întreaga lume au fost utilizate de-a lungul timpului mai multe metode pentru monitorizarea subsidenței. Pornind de la tehnica clasică de nivelment geometric de precizie, continuând cu extensometrele pentru foraje, tehnicile GNSS (pornind de la observațiile GPS) și finalizând cu interferometria satelitară SAR, fiecare metodă prezintă avantaje și dezavantaje luând în considerare mai multe criterii (Bitelli, et al., 2015), cum ar fi: ordinul de mărime înregistrat, calitatea măsurătorilor, efortul financiar, suprafața acoperită și resursele umane necesare.

Nivelmentul de precizie

Cea mai precisă metodă pentru măsurarea diferențelor de altitudine la suprafața terenului este nivelmentul geometric de precizie (Karila, et al., 2013). Această metodă constă în determinarea cotelor în punctele unei rețele de repere de nivelment, aflată la suprafața terenului. Prin măsurători repetate la diferite intervale de timp, se poate determina dacă au apărut deplasări pe verticală, față de un reper de control al rețelei (Poland, 1984).

Extensometrie pentru foraje

Extensometrele verticale de foraj sunt utilizate pentru a măsura deplasarea sau modificarea distanței verticale dintre baza unui foraj și suprafața terenului, considerând grosimea stratului de pământ sau de roci (Poland, 1984)(Galloway & Burbey, 2011).

Utilizarea observațiilor de la sistemele GNSS

Tehnicile GNSS au la bază utilizarea a cel puțin patru sateliți de navigație cu ajutorul cărora se determină coordonatele absolute ale unui punct situat pe suprafața terestră (X,Y,Z), într-un sistem global de referință bine definit (Zerbini, et al., 2007). Pornind de la puncte de referință aflate la suprafața terenului, pot fi dezvoltate rețele GNSS pentru a realiza măsurători la diverse intervale de timp în zonele de interes.

1.2.5. Metode InSAR și datele SAR utilizate pentru monitorizarea deplasărilor

În ultimele decenii, teledetecția, prin achizițiile calitative și cantitative realizate în mod repetitiv și cu o largă acoperire spațială, au oferit oportunitatea de depistare timpurie a

subsidenței terenului în zonele urbane. Seriile temporale de date interferometrice SAR au început să fie utilizate pentru a pune în evidență diverși parametri caracteristici ai dinamicii apei subterane (ex. răspunsul sezonier sau pe termen lung al sistemului acvifer, proprietățile de curgere, identificarea barierelor din stratul acvifer) (Chen, et al., 2016).

Tehnica InSAR convențională

Interferometria SAR este o tehnică de măsurare datând din anii 1970, dar care a devenit populară în anii 1990, odată cu lansarea de către ESA a misiunii ERS-1 (Bamler & Hartl, 1998). Această tehnică exploatează diferența de fază dintre două achiziții preluate asupra aceleiași zone la momente diferite de timp, cu aproximativ același unghi de preluare, generând o interferogramă (Bamler & Hartl, 1998). Diferența lor de fază reprezintă franjele interferometrice care pot fi utilizate pentru generarea modelului digital al terenului (DEM), prin aplicarea mai multor pași de procesare (Rocca, et al., 1997).

Tehnica Interferometriei Diferențiale- DInSAR

Dacă pentru o anumită zonă studiată sunt disponibile mai multe scene SAR achiziționate cu aceeași geometrie la momente diferite de timp, efectele componentei topografice și a altor factori pot fi eliminate și se poate măsura componenta de deplasare a terenului. Acest lucru este valabil și dacă se folosește un model digital al terenului extern pentru a elimina componenta topografică a fazei interferometrice (Ferretti, 2007). Această tehnică poartă denumirea de Interferometrie SAR Diferențială (DInSAR).

Tehnici InSAR multi-temporale (MTI) sau A-DInSAR

Pentru estimarea și corectarea fazei atmosferice reziduale, a erorilor de model digital al terenului, a decalărilor de fază legate de poziția țintei la nivel de sub-pixel și a pierderii de coerență (CCIAS, 2015) (Wasowski & Bovenga, 2014), noi tehnici InSAR au fost dezvoltate, luând în considerare serii temporale lungi de date SAR (Wasowski & Bovenga, 2014). Aceste tehnici poartă denumirea de tehnici InSAR multi-temporale (MTI) sau Advanced Differential SAR Interferometry Remote Sensing Techniques (A-DInSAR). Cele două categorii principale ale MTI sunt:

- **Interferometria cu Ținte Permanente (PSI)** (the Persistent Scatterers Interferometry (PSI)) (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001) și alte abordări similare. Aceasta este o metodă multi-temporală de interferometrie radar (InSAR), care consideră serii temporale lungi de achiziții SAR (peste 20 imagini), pentru determinarea deformațiilor verticale (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001). Interferogramele generate sunt utilizate pentru identificarea și utilizarea unor detalii naturale sau artificiale din teren, *engl. feature*, care sunt stabile și prezintă o reflectivitate ridicată în toate achizițiile, și sunt caracterizate de amplitudine fiabilă și fază a semnalului coerentă în toate scenele SAR (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001) (Wasowski & Bovenga, 2014). Aceste detalii din teren au o dimensiune mai mică decât dimensiunea pixelului achiziției SAR și poartă denumirea de ținte permanente (PS), *engl. permanent scatterers*. Țintele permanente din seria temporală indică deplasările din zona de studiu, cu referință la un anumit punct (de referință).
- Tehnica **Small Baseline Subset (SBAS)** și metodele conexe. Aceste metode se concentrează pe perechi de interferograme caracterizate prin baze spațiale de preluare scurte (Berardino, et al., 2002) pentru a utiliza informații mai bine distribuite spațial.

Metodele SBAS se concentrează pe ținte distribuite (DS), *engl. distributed scatterers*, deoarece acestea au o sensibilitate mai mare la decorelațiile temporale și de volum, față de țintele permanente PS (Wasowski & Bovenga, 2014).

În cele mai multe studii consultate, sunt utilizate tehnici din familiile PSI și SBAS, iar în unele cazuri sunt folosite combinații dintre aceste două metode. În cele ce urmează sunt enumerate tehnicile care au fost utilizate în studii și care nu se încadrează în categoria tehnicilor clasice PSI și SBAS, ci sunt în cele mai multe cazuri combinații sau cazuri particulare ale acestor metode: tehnica Stacked Interferometric, tehnica WabInSAR (Wavelet Based InSAR), tehnica SPN (Stable Point Network), tehnica CPT (Coherent Pixels Technique), tehnica CPT-TSC (Coherent Pixel Technique- Temporal Sublook Coherence), tehnica PSP-DIFSAR (Persistent Scatterer Pairs Differential InSAR), tehnica ISBAS (Intermittent SBAS, tehnica PSIG, tehnica STAMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers), tehnica STAMPS/MTI (Stanford Method for Persistent Scatterers- Multi-Temporal InSAR), tehnica SqueeSAR.

1.2.6. Modelarea deplasărilor verticale

Conform lui Galloway și Burbey (2011), analiza și simularea deplasărilor verticale ale terenului care preced deformarea sistemului acvifer din cauza pompării apei subterane, sunt de interes, în special sistemele aluviale neconsolidate sau sistemele acvifere poros-permeabile compuse din acvifere și acvitarde. Modelarea se bazează pe relații dintre sarcina piezometrică, deformare, compresibilitate și curgerea apei subterane. Câteva abordări au fost utilizate de-a lungul timpului, modelul de bază fiind **modelul Terzaghi**. Acest model presupune că modificările care apar în efortul efectiv pot rezulta din schimbări ale efectului total sau schimbări ale presiunii apei din pori (Galloway & Burbey, 2011). Pornind de la această teorie, două abordări au fost propuse: **teoria curgerii convenționale a apei subterane** și **teoria liniară a poroelasticității** (Biot, 1941). Prima dintre ele este mai folosită, deoarece ia în considerare doar deformațiile verticale ale matricei minerale a acviferului și este mai ușor de implementat. Teoria Biot descrie deformația 3D a matricii (Biot, 1941).

Următoarele modele au fost utilizate în studiile analizate:

- Modelul elementelor finite
- modelul Mohr-Coulomb perfect elastic plastic
- modelul TRANSIN-IV
- codul numeric hidro-mecanic de elemente finite, GEHOMADRID
- modelul matematic al comportamentului crustal, de compensare glaciatic-izostatică (GIA)

1.2.7. Comparații și corelații dintre diverse metode de monitorizare a deplasărilor pe verticală

În cazul în care nu sunt disponibili prea mulți parametri de natură hidrologică, hidrogeologică sau geotehnică pentru a se putea realiza un model matematic, pot fi efectuate simple corelații dintre subsidență și unul sau doi parametri.

Astfel, pentru zona Bruxelles a fost realizată o comparație privind evoluția nivelului apei subterane și seriile temporale ale mediilor deplasărilor verticale din jurul unor piezometre selectate pentru analize. Un alt studiu din Belgia, din zona urbană Ottignies-Wavre, a studiat corelațiile dintre captările de apă și tendințele de deplasare ale suprafeței terenului (Declercq, et

al., 2006). În zona San Luis Valley, Colorado, prin utilizarea InSAR, luând în considerare analize pentru 24 de puțuri, s-a putut evidenția o corelație temporală și spațială între deplasările verticale ale terenului și diferențele de sarcină piezometrică (Chen, et al., 2016). O comparație între valorile înregistrate de extensometre, datele InSAR privind deplasarea verticală și datele din timpul campaniilor de nivelment a fost realizată în Antelope Valley, Mojave Desert, California (Galloway, et al., 1998). În regiunea municipalității Delta din Grecia, o comparație între deplasările verticale ale țințelor permanente PS și datele de nivelment pentru câțiva reperi a fost realizată, arătând diferențe milimetrice, pentru deplasări anuale de aproape 4 cm (Raspini, et al., 2014). Liu și Niemeier (2014), prezintă rezultatele din timpul monitorizării lucrărilor de construcție ale unui tunel. Comparația dintre deplasările verticale ale țințelor permanente PS și reperi de nivelment a arătat o bună corelație între cele două metode. În regiunea Venetia, seriile temporale GPS de deplasări verticale au fost comparate cu deplasările în lungul liniei de vizare (LOS) din prelucrările PSI și s-au putut pune în evidență deformații anuale și deformații sezoniere semi-anuale, precum și deplasările verticale pe termen lung (Bock, et al., 2012). În Pisa a fost făcută o corelație între vârsta clădirilor și procesul și nivelul de deplasare verticală (Solari, et al., 2017). Perissin și colab. (2012), face o corelație între perioadele în care au fost deschise diversele linii de metrou din Shanghai și procesele de subsidență. Chaussard și colab. (2013) ia în considerare o corelație între subsidență și geologia zonei afectate, subliniind că, în general, subsidența apare în depozite compresibile, cum ar fi depozitele de suprafață și depozitele mlăștinoase.

1.2.8. Inițiative europene pentru monitorizarea deplasărilor verticale în zone urbane-Terrafirma, PanGEO și EGMS

O parte dintre datele SAR utilizate în diverse în diverse studii care au fost prezentate în secțiunile anterioare, reprezintă rezultatele a două inițiative europene pentru furnizarea de servicii de informare cu privire la deplasarea terenului pentru orașe europene relevante, și anume PanGEO și Terrafirma. Deplasarea terenului a fost estimată cu ajutorul tehnicilor PSInSAR în ambele inițiative (ESA & Terrafirma Partners, 2010)(PANGEO, 2013).

În 2016 a început definirea Serviciului European de Deplasare a Terenului (EGMS-European Ground Motion Service), ca parte a portofoliului de produse a Serviciului Copernicus de Monitorizare a Terenului. Scopul EGMS este de a furniza informații uniforme, coerente, standardizate, armonizate și sigure privind fenomenele naturale și antropice de deplasarea terenului peste întreaga Europa, dincolo de granițele naționale, cu acuratețe milimetrică (Copernicus, 2021).

1.3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR LA NIVEL NAȚIONAL PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR ÎN ZONE URBANE, CU UTILIZAREA TEHNICILOR INSAR

1.3.1. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului datorate dinamicii antropice

La nivel național, cele mai multe studii au fost efectuate asupra orașului București. Studiile pornesc cu cercetările privind generarea prin interferometrie a modelului digital altimetric al terenului pentru orașul București (Poncos & Dana, 2008).

Poncos și colab. (2010) prezintă o hartă de deformare a orașului București utilizând tehnica DInSAR pentru o serie de imagini de la sateliții ERS 1/2, achiziționate în perioada 1992-1999. Aceeași serie temporală de date ERS, care acoperă o perioadă de 7 ani, este procesată în (Poncos, și alții, 2012), prin utilizarea a două tehnici A-DInSAR: Stacking Interferometry și PSI. Tehnicile Stacking Interferometry și PSI sunt utilizate și pentru prelucrarea unei serii temporale de 32 de imagini SLC TerraSAR-X, achiziționate în modul StripMap pentru perioada Iulie 2011- Decembrie 2012 (Poncos, et al., 2013).

Ca parte integrantă a inițiativei europene PanGEO, Institutul Geologic al României realizează o interpretare a hărților de deformare PSI ale Bucureștiului, seturile satelitare și intervalele temporale de acoperire fiind ERS 1/2 SAR (1992-2000) și ENVISAT ASAR (2002-2009) (Vîjdea & Bindea, 2013).

Poncos și colab. (2014) completează studiile legate de instabilitatea orașului București prin generarea de hărți de deformare cu aplicarea tehnicii PSI, pentru date de la sateliții ERS1/2, ENVISAT și TerraSAR-X, care acoperă intervalele 1992-1999, 2003-2009 și 2011-2012 (Poncos, et al., 2014). În același studiu, Poncoș și colab. (2014), prezintă evoluția deplasărilor terenului pentru zona în care se construiește o nouă magistrală de metrou, M5, considerând cele 3 perioade de timp pentru care sunt disponibile date de la cele 3 misiuni satelitare. Utilizând o abordare multidisciplinară cu includerea de tehnici de investigare interferometrice, hidrogeologice și geotehnice, (Boukhemacha, et al., 2021) continuă investigațiile asupra zonei de construcție a noii magistrale de metrou din București, în perioada în care au fost efectuate săpăturile pentru galeriile de metrou, și anume anul 2014, urmărind evoluția lucrărilor până la începutul anului 2015. Utilizând algoritmul Delft Persistent Scatterer Interferometry (DePSI), (Gheorghe, et al., 2020) prezintă rezultatele monitorizării magistralei de metrou M5 pentru perioada 2014-2018, cu utilizarea de date Sentinel-1, surprinzând și unul dintre incidentele care au avut loc la finalul anului 2015, în timpul lucrărilor de epuismen de la o stație de metrou.

În contextul particularităților geomorfologice ale fiecărei zone urbane în parte, Gheorghe și Armaș (2015) aplică tehnici InSAR pentru analiza orașului București, cu evidențierea importanței acestor tehnici pentru studiile de mediu și, în particular, pentru geomorfologie.

Utilizând analize dinamice multidimensionale împreună cu analize InSAR multi-temporale (SBAS și PSI), Armaș și colab. (2017) identifică mecanismele de deplasare ale suprafeței terenului care cuprind tendințe naturale de termen lung, peste care se suprapun modele de termen scurt, provocate mai ales de dinamica recentă a orașului. Validarea rezultatelor obținute prin procesarea datelor TSX este realizată prin observații GNSS, la nivelul orașului București fiind construită o rețea de control GNSS (Armas, et al., 2016).

Având ca zonă de test o parte a orașului București, Dănișor și colab. (2020) propune evaluarea utilizării principiilor SqueeSAR pentru tehnica de procesare SAR multi-temporală SAR Tomography, utilizând date TSX.

Cercetări privind deplasarea terenului sunt efectuate și pentru orașul Constanța, aflat în zona costieră a Mării Negre, utilizând tehnica PSI pentru date Sentinel-1 (Toma, et al., 2018).

1.3.2. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului ca efect al lucrărilor miniere

Pentru studiul zonei Ocnele Mari, care suferă de fenomene de "ridicare" ale terenului, cu valori între 2-4 mm/an, cauzate de exploatarea de depozite de sare existente în zonă, Poenaru și

colab. (2011) utilizează 9 imagini TSX achiziționate în perioada august- noiembrie 2010, aplicând tehnica de procesare DInSAR. Cercetările continuă cu utilizarea unui set de imagini RADARSAT-2, achiziționate în perioada iulie-decembrie 2014, procesate prin tehnici InSAR și DInSAR.

1.3.3. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului în zone seismice

Folosind o serie de 30 de imagini complexe achiziționate de sateliții ERS-1 și ERS-2 în perioada mai 1995- iunie 2000, Dănișor și colab. (2018) evaluează deformațiile liniare din zona orașelor Focșani și Buzău, aflate în zona seismică Vrancea, folosind un lanț de procesare PSI.

Bălan și colab. (2016) monitorizează deplasările care apar în mai multe zone din București, unde stratul superior de pământ este reprezentat de depozite antropice, precum și la centrala nucleară de la Cernavodă, utilizând tehnica PSI (Balan, et al., 2016).

1.3.4. Cercetări privind monitorizarea deplasărilor terenului pentru patrimoniul cultural UNESCO

Utilizând o serie de 18 imagini TerraSAR-X HS achiziționate în perioada martie 2014- octombrie 2014, Dana Negula și colab. (2015) generează o hartă a deplasărilor pentru orașul Sighișoara, prin tehnica PSI. Moise și colab. (2021) prezintă o evoluție în timp și spațiu a orașului Alba Iulia, unul dintre orașele românești cu un bogat trecut istoric, utilizând date istorice și date actuale de teledetecție. O hartă a deplasărilor verticale este generată prin utilizarea de date Sentinel-1, cu ajutorul tehnicii PSI. Alte două orașe, parte a patrimoniului cultural UNESCO, pentru care sunt monitorizate deplasările verticale ale terenului cu ajutorul tehnicii PSI și cu utilizarea datelor de la senzorii Sentinel-1 A/B sunt Deva (Dana Negula, et al., 2019) și Hunedoara (Moise, et al., 2020).

2. STUDII DE CAZ PRIVIND MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR TERENULUI ȘI CARACTERIZAREA MEDIULUI SUBTERAN URBAN ÎN MUNICIPIUL BUCUREȘTI, UTILIZÂND TEHNICI DE TELEDETECȚIE

2.1. PREZENTAREA GENERALĂ A ZONEI DE STUDIU: MUNICIPIUL BUCUREȘTI

Situat în sud-estul României, cu o suprafață de aproximativ 240 km² și o populație de peste 2.1 milioane locuitori (INS-DRS, 2019), municipiul București este traversat de două râuri: Dâmbovița și Colentina, primul dintre acestea fiind canalizat extensiv, iar cel de-al doilea fiind remodelat la începutul secolului XX într-o serie de lacuri care au comunicare directă cu acviferul freatic (Gaitanaru, et al., 2017).

Din punct de vedere geomorfologic, municipiul București se află situat în Câmpia Bucureștiului, în partea centrală a Câmpiei Române, având la nord Câmpia Snagovului, la sud Câmpia Călnăului, la vest Lunca Argeș-Sabar, iar la est Câmpia Mostiștei (Lacatusu, et al., 2008).

Din punct de vedere al geologiei, Municipiul București este situat în partea centrală a platformei Moesice, care se întinde pe o bază rigidă de metamorfite și intruziuni de roci

magmatice (granodiorit, granit) (Serpescu, et al., 2013). Baza rigidă este acoperită cu depozite sedimentare formate în diferite faze de eroziune și procese sedimentare, terminându-se cu sedimente cuaternare (Mutihac, 1990).

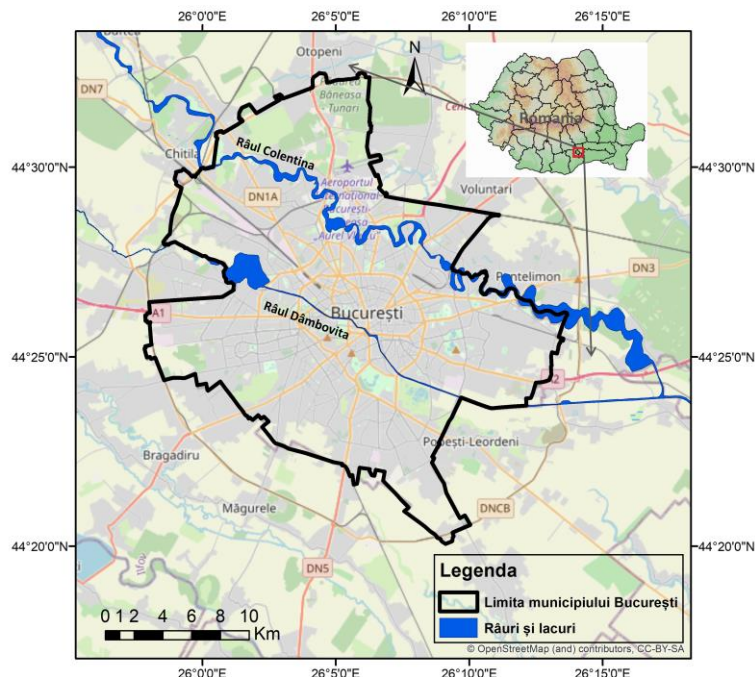


Figura 2-1 Harta municipiului București. Hartă generată în Esri®ArcMap™ 10.3

Depozitele cuaternare sunt organizate în 6 unități structurale și sunt descrise de la suprafață către baza depozitelor sedimentare astfel (Serpescu, et al., 2013; Gaitanaru, 2017b; Lacatusu, et al., 2008):

- Formațiunea depozitelor superficiale formată din loess și materiale antropice;
- Formațiunea de Colentina care conține secvențe de nisipuri și pietrișuri de diferite granulometrii, de la grosieră, până la fină, cu intercalații de lentile argiloase;
- Formațiunea depozitelor intermediare formate în cea mai mare parte din argile și argile prăfoase cu intercalații de nisipuri fine;
- Formațiunea de Mostiștea formată din sedimente de diferite granulometrii de la nisipuri fine până la nisipuri grosiere cu mici intercalații de pietrișuri și rare intercalații argiloase;
- Formațiunea depozitelor marnoase sau Formațiunea de Coconi formată dintr-o succesiune de marne și argile cu intercalații lenticulare nisipoase;
- Formațiunea de Frătești reprezentată prin trei orizonturi, respectiv A, B, C, alcătuită din depozite aluvionare, cum ar fi nisipuri de diferite granulometrii, nisipuri cu pietrișuri, cu intercalații argiloase cu aspect lenticular.

În ceea ce privește hidrogeologia, în zona municipiului București se evidențiază trei strate acvifere: pietrișurile de Colentina (acviferul freatic), nisipurile de Mostiștea (acviferul intermediar) și Formațiunea de Frătești (acviferul de adâncime) (Boukhemacha, et al., 2015).

Clima municipiului București este caracteristică climei temperate continentale (Lacatusu, et al., 2008), cu o tendință de continentalizare de la vest către est, considerând influențele climatice de tranziție în vest și excesive în est (Grigorescu, 2010).

2.2. GENERAREA HĂRȚII PSI A DEPLASĂRILOR TERENULUI PENTRU MUNICIPIUL BUCUREȘTI, PENTRU PERIOADA 2004-2010

Pe baza datelor de la misiunea radar europeană ENVISAT ASAR, o hartă a deplasărilor a fost generată pentru intervalul 2004-2010, utilizând metoda PSI, prezentată în Figura 2-2. Pentru procesare a fost utilizat softul ENVI SARscape (<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape>). Fluxul logic de lucru pentru generarea hărții deplasărilor terenului pe baza imaginilor SAR ENVISAT ASAR este specific utilizării modulului SARscape PS al softului ENVI, produs de L3HarrisTM (<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape>).

Principalii pași ai prelucrării PS includ:

- Importarea imaginilor ENVISAT ASAR în ENVI SARscape;
- Aplicarea corecțiilor de efemeride precise ale orbitei – efemeridele precise au fost descărcate din arhiva ESA, odată cu descărcarea imaginilor SAR;
- Generarea graficului de conexiuni – în această etapă sunt definite combinațiile de perechi SAR, cu selectarea imaginii master și a imaginilor slave. Pentru setul de date utilizat, imaginea master este cea achiziționată în data de 24.02.2007;
- Selectarea zonei de interes, pentru cazul în care aceasta are suprafață mai mică față de suprafața imaginilor;
- Procesarea interferometrică, incluzând coregistrarea și calculul interferogramelor. În această etapă a fost specificat modelul digital al terenului utilizat și anume STRM-3 v4;
- Prima inversiune- cu estimarea coerenței, a deplasării și a componentei topografice reziduale;
- Cea de-a doua inversiune - cu eliminarea influenței atmosferice, a doua estimare a coerenței, a deplasării și a componentei topografice reziduale și estimarea componentei deplasării
- Geocodarea – finalizată cu geocodarea deplasărilor terenului exprimată prin deplasările punctelor PS.

Deplasările terenului au valori cuprinse între -26,80 mm/an și 20,92 mm/an, cu o medie de -0,29 mm/an, o abatere standard de $\pm 0,84$ mm/an și o densitate de 283 puncte PS/km². Pentru intervalul temporal 2004-2010, au fost observate mai multe tendințe ale deplasării terenului, astfel: tendința generală la nivelul orașului este de stabilitate, există mai multe zone cu tendințe de subsidență, situate în special în lungul culoarelor celor două râuri care traversează orașul, există câteva zone din sudul și est-sud-estul orașului cu tendințe de înălțare.

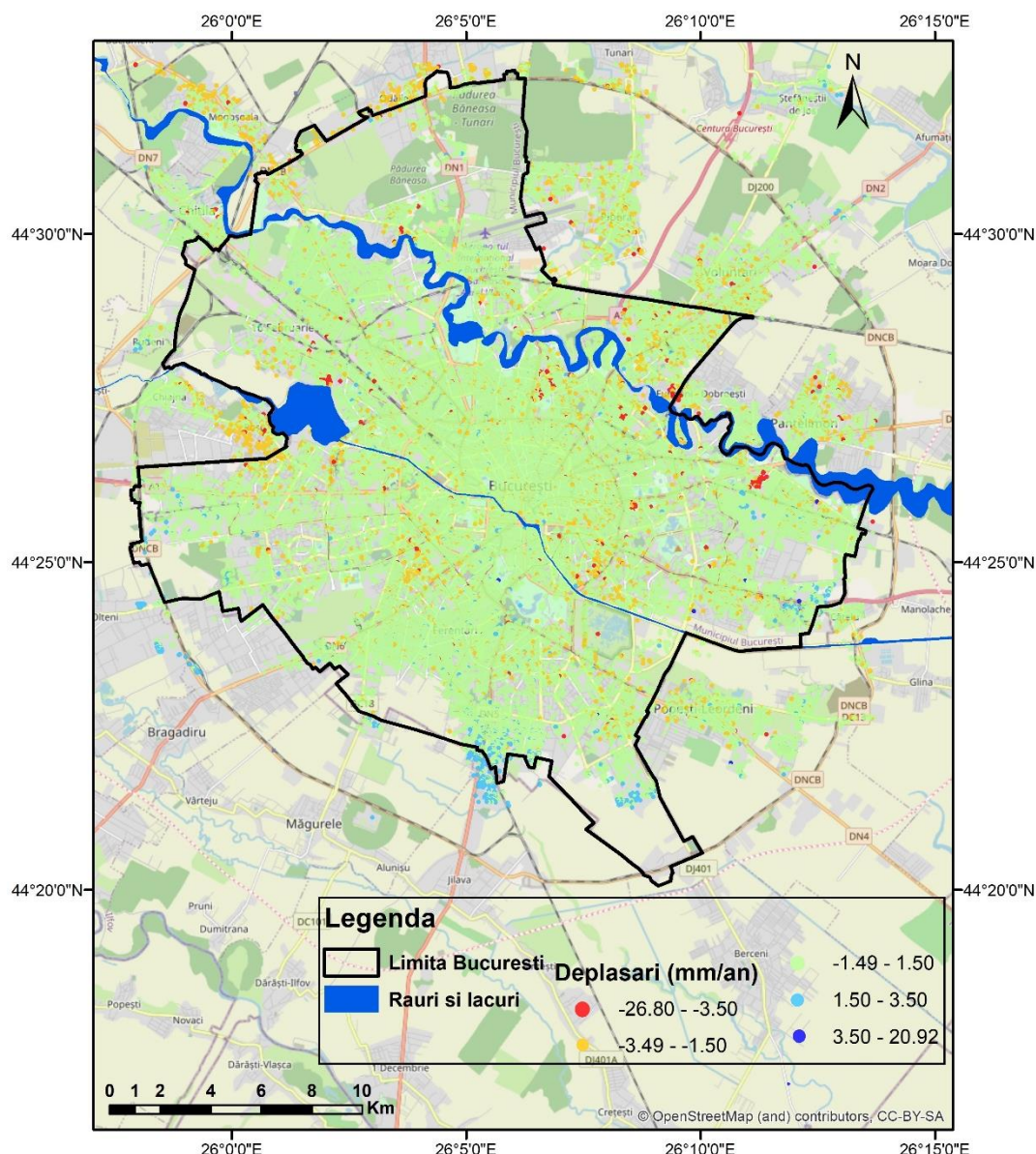


Figura 2-2 Harta PSI a deplasărilor terenului în București obținută din imagini ENVISAT ASAR de pe orbită descendentă 465D, pentru perioada 2004-2010

2.3. GENERAREA HĂRȚII PSI A DEPLASĂRILOR TERENULUI PENTRU MUNICIPIUL BUCUREȘTI, PENTRU PERIOADA 2014-2018

Pentru generarea hărții PSI a deplasărilor pentru perioada 2014-2018, au fost utilizate date de la senzorul SAR Sentinel-1. Datele folosite iau în considerare achiziții atât de pe o orbită descendentă (109D), cât și de pe o orbită ascendentă (131A). Tabelul 2-1 oferă detalii cu privire la perioadele de achiziție și a numărului de achiziții disponibil pentru fiecare serie temporală (atât pentru seria corespunzătoare achizițiilor preluate de pe orbita ascendentă, cât și pentru seria corespunzătoare achizițiilor preluate de pe orbita descendentă).

Harta deplasărilor terenului a fost obținută prin aplicarea tehnicii PSI, cu utilizarea datelor Sentinel-1. Hărțile PSI au fost produse de Institutul Geologic al Norvegiei, în cadrul Serviciului Norwegian de Determinare a Deplasărilor Terenului (Dehls, et al., 2019), *engl. Norwegian Ground Motion Service*, cu aplicarea tehnicii clasice PSI. Procesarea PSI din date Sentinel-1 a

fost realizată ca activitate în cadrul proiectului INXCES- INnovations for eXtreme Climatic EventS (www.inxc.es.eu), în care Centrul de Cercetare Ingineria Apelor Subterane al UTCB a fost partener.

Tabelul 2-1 Datele Sentinel 1 utilizate pentru realizarea hărților de deformare

Senzor	Orbită	Data prima achiziție / Data ultima achiziție	Nr. Achiziții utilizate
Sentinel 1	131 Ascendentă	14.10.2014/ 26.04.2018	115
	109 Descendentă	13.10.2014/ 25.04.2018	153

Considerând geometria de preluare atât de pe orbită ascendentă, cât și de pe orbită descendentă, a celor două seturi de puncte PS, precum și valorile deplasărilor pentru aceste puncte în lungul liniei de vizare, au fost calculate componentele verticală și orizontală (doar pe direcția E-V) ale deplasării, folosind abordarea propusă de Dalla Via și colab. (2012):

$$D_e = (D_d \cos\theta_a - D_a \cos\theta_d) / \sin(\theta_a + \theta_d)$$

$$D_v = (D_d \sin\theta_a + D_a \sin\theta_d) / \sin(\theta_a + \theta_d) \quad (2.1)$$

unde D_e este componenta orizontală a deplasării, D_v este componenta verticală a deplasării, D_d este deplasarea în lungul liniei de vizare pentru înregistrările de pe orbita descendentă, D_a este deplasarea în lungul liniei de vizare pentru înregistrările de pe orbita ascendentă, iar θ_a și θ_d sunt unghiurile de preluare ale înregistrărilor SAR de pe orbita ascendentă, respectiv descendentă.

Pentru gruparea perechilor de puncte PS de pe orbită ascendentă și descendentă, a fost utilizată metoda vectorială a celui mai apropiat vecin, *engl. nearest neighbour*, după abordarea propusă de Fomelis (2016). Operațiile necesare asocierii punctelor PS și aplicării ecuațiilor pentru obținerea componentelor verticale și orizontale ale deplasării terenului au fost realizate în mediul GIS, cu utilizarea de instrumente și funcționalități ale pachetului software ESRI ArcGIS 10.3 software și ale softului open source QGIS.

Harta deplasărilor verticale ale terenului din municipiul București, pentru perioada octombrie 2014 - aprilie 2018, este prezentată în Figura 2-3. Deplasarea verticală ia valori între -13,05 mm/an și 17,24 mm/an, cu o medie de -0,27 mm/an, o abatere standard de $\pm 0,91$ mm/an și o densitate de 1050 puncte PS/km².

La fel ca pentru perioada de timp anterioară, au putut fi identificate mai multe tendințe legate de deplasarea terenului la nivelul orașului. Tendința generală a orașului București, pentru intervalul 2014-2018 este de stabilitate. Au mai fost identificate câteva zone cu tendințe de deplasare negativă, care din nou, majoritatea se află de-a lungul culoarelor celor două râuri care traversează orașul și alte zone cu tendințe alternante pentru care este necesară o analiză pe o perioadă mai lungă de timp, pentru a putea stabili tendința corectă.

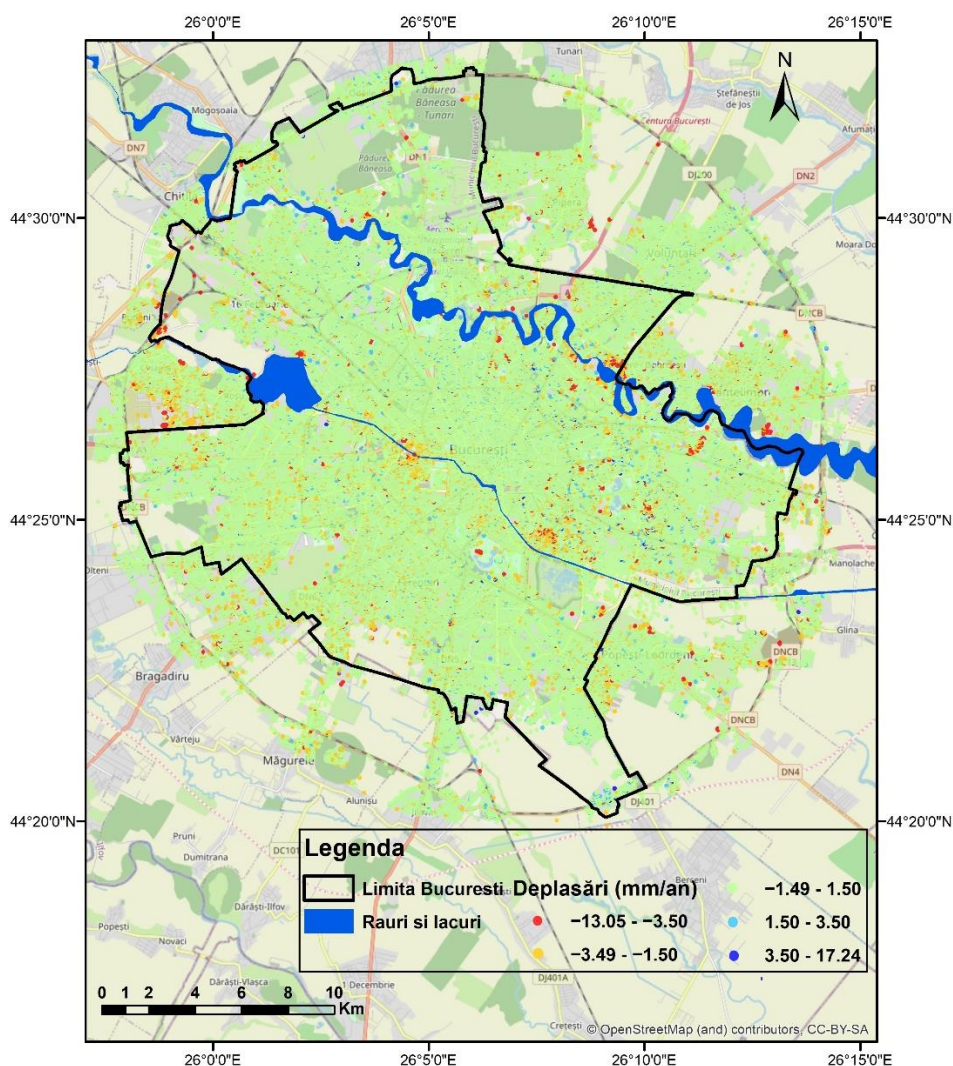


Figura 2-3 Harta PSI a deplasărilor verticale în București, pentru intervalul 2014-2018, obținută din imagini Sentinel-1 de pe orbita ascendentă 131A și de pe orbita descendentă 109D

2.4. GENERAREA HĂRȚII DETECTĂRII SCHIMBĂRILOR FOLOSIND IMAGINI SENTINEL-1 GRD

Pentru detectarea schimbărilor au fost utilizate două imagini Sentinel-1 GRD: prima din 25.10.2014, iar cea de-a doua din 25.04.2018. Pașii propuși pentru prelucrarea celor două imagini Sentinel-1 GRD, în vederea detectării schimbărilor (uni-goettingen, 2021), au fost realizați cu utilizarea platformei software SNAP (Sentinel Application Platform) dezvoltată de Agenția Spațială Europeană:

1. Importarea datelor Sentinel-1 GRD
2. Selectarea zonei de interes și generarea unui subset spațial pentru cele două imagini. Sunt utilizate informațiile de amplitudine pentru imaginea cu polarizare VV.
3. Aplicarea corecțiilor de efemeride precise
4. Calibrare radiometrică
5. Filtrarea zgomotului speckle
6. Geocodare pe baza modelului digital al terenului SRTM 1 sec HGT
7. Coregistrarea celor două imagini

Produsul obținut prin coreregistrarea imaginilor este convertit din formatul standard SNAP (.dim) în format GeoTiff pentru a putea fi importat în softuri GIS, pentru analiza schimbărilor detectate.

Figura 2-4 prezintă harta detectării schimbărilor generată pentru municipiul București. Sunt marcate cu roșu zonele în care au apărut schimbări în anul 2018, față de anul 2014, iar cu gri sunt simbolizate zonele în care nu au apărut schimbări între cele două momente de timp. Zonele simbolizate cu alb arată o intensitate mai ridicată a semnalelor retro-difuzate din spațiul obiect, recepționate de senzorul SAR.

Principalele schimbări care se evidențiază sunt legate de extinderea cartierelor rezidențiale (zona Militari Residence), apariția unor depozite comerciale la periferia zonei urbane, apariția unor centre comerciale în zona urbană (IKEA Pallady), clădiri de birouri (zona Timpuri Noi).



Figura 2-4 Harta de detecție a modificărilor suprafeței terenului pentru municipiul București (2014-2018), obținută din imagini Sentinel-1 GRD

2.5. ZONE DE INSTABILITATE A TERENULUI IDENTIFICATE ÎN INTERVALUL 2014-2018, PE BAZA HĂRȚII DE DEPLASARE PSI SENTINEL-1

Zonele cu tendințe de deplasare verticală a terenului au fost identificate și marcate pe harta deplasărilor generată pentru perioada 2014-2018. În Figura 2-5, aceste zone sunt delimitate cu culoarea roșu. Zonele de subsidență au fost identificate și analizate, acestea putând fi clasificate în funcție de mai multe criterii.

În funcție de cauza majoră care a generat deplasarea, aceste zone de subsidență identificate pot fi clasificate astfel:

- Zone cu strat superficial de umpluturi- ex. zonele A1, A12, A8, A9;
- Zone afectate de lucrări din mediul subteran- ex. zona A2;

- Zone unde au loc lucrări de construcții de suprafață (clădiri de locuit, clădiri de birouri, spații comerciale, infrastructuri supratere), dar pentru care pot exista conexiuni cu mediul subteran- ex. zonele A7, A13, A11, A3, A4, A6;
- Zone cu construcții foarte vechi- ex. zona A10, A5.

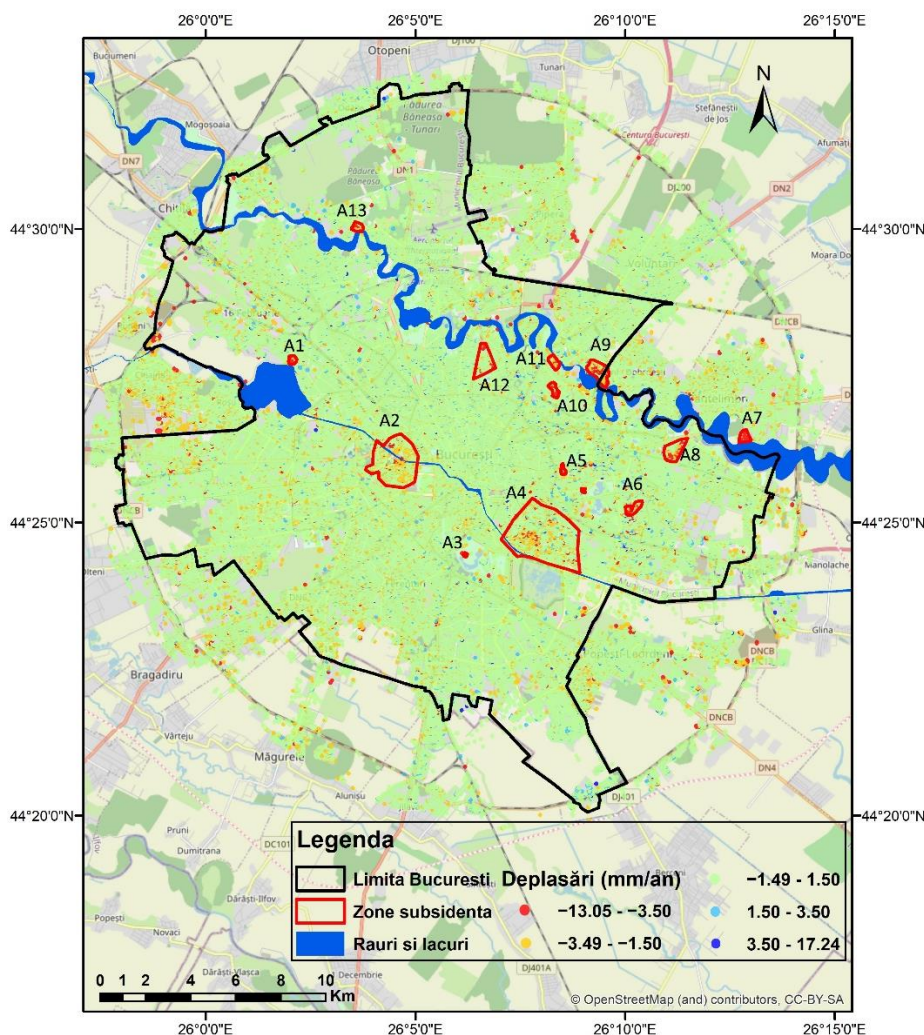


Figura 2-5 Harta PSI a deplasărilor verticale ale terenului în București obținută din imagini Sentinel-1, împreună cu zonele de subsidență identificate

După categoria de utilizare a terenului, zonele de deplasare a terenului pot fi clasificate în:

- Zone cu construcții supratere de dimensiuni mai mici și număr mai redus de nivele, în care au avut loc demolări și au fost construite clădiri de locuințe, de birouri sau spații comerciale- ex. zonele A4, A12, A10;
- Zone din intravilan în care terenurile au trecut de la categoria de spații verzi la categoria de construcții în ultimii 10-15 ani- ex. zonele A6, A9, A13;
- Zone din extravilan din categoria pășune sau pădure care au trecut la categoria de construcții în ultimii 10-15 ani- ex. A7;
- Zone de spații verzi în care au fost realizate lucrări pentru practicarea sporturilor de agrement- ex. piste de biciclete, terenuri de tenis, infrastructură pentru skateboard- zonele A3, A5
- Zone cu aceeași categorie de utilizare, dar cu factori specifici zonei respective care produc deplasările- ex. prezența unui strat superficial de umpluturi- zonele A1, A8.

2.6. UTILIZAREA COMBINATĂ A TEHNICII PSI ȘI A TEHNICII DE DETECTARE A SCHIMBĂRILOR PENTRU IDENTIFICAREA ZONELOR CU POTENȚIAL DE INSTABILITATE

Una dintre cele mai importante limitări ale tehnicii PSI este legată de coerență. Astfel, sunt luate în considerare puncte PS, *engl. persistent scatterers*, cu o coerență suficient de ridicată, pentru întregul interval de timp de monitorizare. În zonele cu vegetație sau cu păduri, apare decorelarea, ceea ce face ca un număr foarte redus de puncte PS să fie disponibile în aceste zone. Același lucru intervine și în cazul în care în intervalul temporal de monitorizare au loc lucrări de construcție, sau alți factori apar și schimbă suprafața terenului. Dacă într-o anumită zonă au loc lucrări la un anumit interval de timp după începerea monitorizării, punctele din zonă care inițial erau coerente, se pierd odată cu începerea lucrărilor. Aceste lucrări de construcție pot produce deplasări ale terenului atât în zona în care sunt executate, cât și în zonele învecinate. În cazul în care zonele învecinate sunt afectate, efectul lucrărilor poate fi tradus prin apariția unor puncte PS care indică deplasări ale terenului. Din modul în care sunt dispuse punctele PS pe harta deplasărilor, nu se va putea lua în considerare că deplasările identificate ar putea avea drept cauză schimbări din zona învecinată, din lipsa unor informații cu privire la acea zonă. Prin combinarea tehnicilor PS cu tehnici de detectare a schimbărilor ale suprafeței terestre, este posibil să se determine mai precis sursa anumitor probleme de instabilitate.

2.6.1. Analize comune pornind de la harta PSI a deplasărilor terenului și harta detectării schimbărilor pentru municipiul București, în perioada 2014-2018

Considerând cele două tipuri de hărți care au fost prezentate în secțiunile anterioare o analiza comună a informațiilor legate de deplasare și de detectarea schimbărilor terenului poate fi efectuată. Dacă pe harta detectării schimbărilor pentru municipiul București, prezentată în Figura 2-4 se adaugă și informațiile din harta PS a deplasării terenului, se obține un nou produs cartografic, prezentat în Figura 2-6.

Pe baza hărții detectării schimbărilor, în apropierea stației de metrou Pipera au fost identificate mai multe zone în care au apărut modificări la suprafața terenului. Figura 2-7 prezintă aceste zone, împreună cu zonele pentru care au fost generate puncte PS care indică deplasările.

Aceste modificări au fost documentate cu imagini optice de teledetecție. În cazul zonelor A1 și A2, între cele două momente de timp au fost construite clădiri pe amplasament, iar în zona A3, peisajul urban s-a modificat prin demolarea unei construcții. Dacă folosim analiza combinată a celor două tehnici de teledetecție, se poate realiza o interpretare a modificărilor suprafeței terenului. Dacă ar fi fost luată în considerare doar harta PSI a deplasărilor verticale, aria de căutare a sursei deplasărilor ar fi fost restrânsă doar la clădirea existentă, din lipsa altor informații. Prin utilizarea informațiilor de detecție a modificărilor suprafeței terenului, procesul de identificare a sursei deplasărilor poate fi extins pentru situațiile în care clădirea sau infrastructura în sine nu este identificată drept cauză.

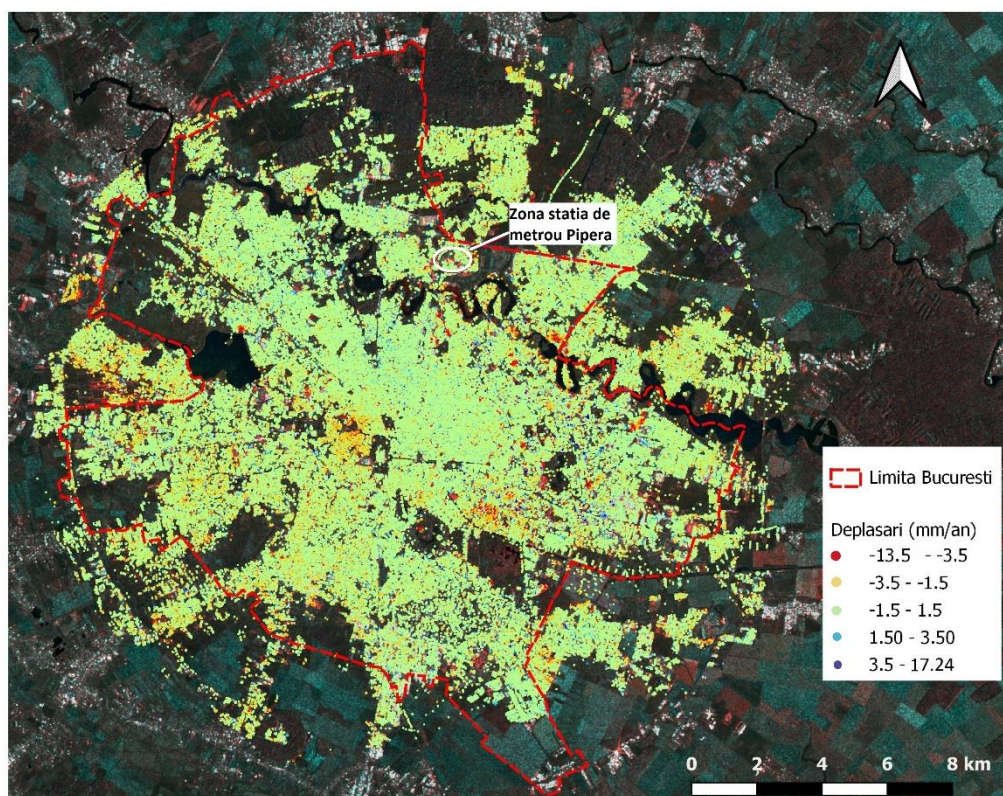


Figura 2-6 Harta deplasării terenului și de detectare a schimbărilor pentru municipiul București, perioada 2014-2018

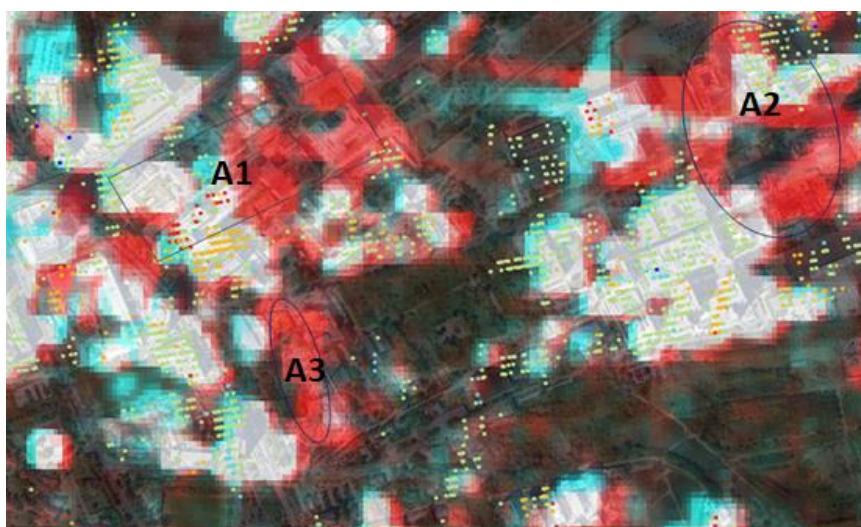


Figura 2-7 Harta detecției modificărilor suprafeței terenului și a deplasărilor verticale pentru zona Pipera

2.6.2. Concluzii privind utilizarea tehnicii PSI împreună cu detecția radar a modificărilor suprafeței terenului

Achizițiile de la senzorii satelitari radar oferă mai multe tipuri de informații care pot fi folosite pentru aplicații din diverse domenii. În cazul în care este vorba de analize privind deplasările suprafeței terenului, informațiile de detecție a modificărilor suprafeței terestre pot fi utilizate în procesul de identificare a sursei deplasărilor. Prin utilizarea combinată a tehnicii PSInSAR cu detecția modificărilor suprafeței terenului, aria de căutare a sursei deplasărilor este mai corect delimitată și astfel și identificarea cauzei deplasărilor poate fi determinată mai precis.

Considerând aria de acoperire a achizițiilor radar, utilizarea comună a celor două tehnici poate fi realizată pentru suprafețe mari și poate suplini o parte din limitările tehnicii PSI.

3. FENOMENE ȘI PROCESE DIN MEDIUL SUBTERAN URBAN ASOCIATE DEPLASĂRILOR TERENULUI, DETERMINATE PRIN TEHNICI PSI. STUDIU DE CAZ: ZONA BARBU VĂCĂRESCU, BUCUREȘTI

3.1. CONTEXT GENERAL

La fel ca în multe alte zone urbane, problemele hidrogeologice ale municipiului București sunt produse de interacțiunea dintre sistemul acvifer și infrastructurile subterane (Gogu, et al., 2017).

Pe baza hărții PSI a deplasărilor terenului generată prin procesarea datelor Sentinel-1, în Figura 2-5 din capitolul anterior, sunt prezentate zonele de instabilitate identificate în București. Una dintre aceste zone este zona A12 (Figura 2-5), aflată la intersecția dintre Bulevardul Lacul Tei, Bulevardul Barbu Văcărescu și strada Opanez, a fost studiată mai detaliat, cu concentrarea analizei asupra comportamentului stratului de umpluturi prezent în zonă, format preponderent din resturi de materiale de construcții (Figura 3-1).

3.2. DEZVOLTAREA MODELULUI GEOLOGIC URBAN LOCAL PENTRU ZONA BARBU VĂCĂRESCU

Pentru o mai bună înțelegere a geologiei locale în conexiune cu infrastructurile urbane (stratul antropic de umpluturi, fundații adânci, tuneluri, excavații, și altele) un model geologic local detaliat a fost generat considerând limitele spațiale (1200 x 1200 m) prezentate în Figura 3-1.

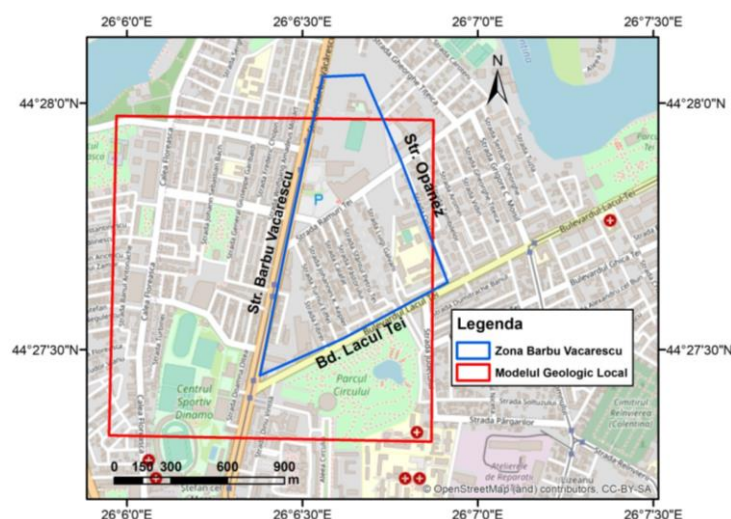


Figura 3-1 Zona Barbu Văcărescu

Pașii pentru generarea modelului geologic au fost:

- Colectarea datelor conținând informații litologice din 16 foraje cu adâncimi cuprinse între 15 m și 170 m; localizarea spațială tridimensională a forajelor a fost precis măsurată;
- După analiza informațiilor litologice și stratigrafice din foraje, au fost generate 6 secțiuni geologice, considerând modelul digital al terenului pentru zona respectivă;

- Pe baza secțiunilor geologice au fost utilizate puncte suplimentare de interpolare, care au fost apoi utilizate pentru generarea modelului geologic;
- Unitățile structurale ale depozitelor cuaternare au fost identificate pentru a genera modelul geologic.

Modelul geologic local, dezvoltat prin corelație lito-stratigrafică cu utilizarea unui software intern (Gogu, et al., 2011), a arătat următoarele unități litografice, de sus în jos:

- Strat de umpluturi antropice neomogene, cu adâncimi de până la 12 m;
- Strat de argile, argile prăfoase și argile nisipoase prăfoase cu grosimi de până la 10 m;
- Strat de nisipuri și pietrișuri cu adâncimi de până la 14 m;
- Strat discontinuu de argile cu adâncimi de până la 5.3 m;
- Strat discontinuu de nisipuri și pietrișuri cu grosimi de până la 6 m;
- Strat de nisipuri cu adâncimi de până la 12 m;
- Strat de argile cu adâncimi de până la 11.6 m.

3.3. DATE DE HIDROGEOLOGIE UTILIZATE

Serii temporale de date piezometrice au fost disponibile în special pentru zona Parcul Circului. Tabelul 3-1 prezintă aceste foraje de monitorizare, cu specificarea acviferului pe care acestea îl deschid. Figura 3-2 arată localizarea forajelor de monitorizare în zona de studiu. Seria de măsurători piezometrice acoperă intervalul temporal februarie 2013- iulie 2019.

Tabelul 3-1 Foraje de monitorizare în Parcul Circului, Figura 3-2 arată localizarea acestora

Nr.	Cod foraj	Strat acv. monit.	Nr.	Cod foraj	Strat acv. Monit.	Nr.	Cod foraj	Strat acv. Monit.
1	F15C	Freatic	3	FC1LC	Freatic	5	FM1LC	Intermediar
2	PC1LC	Freatic	4	FM2LC	Freatic	6	F14M	Intermediar

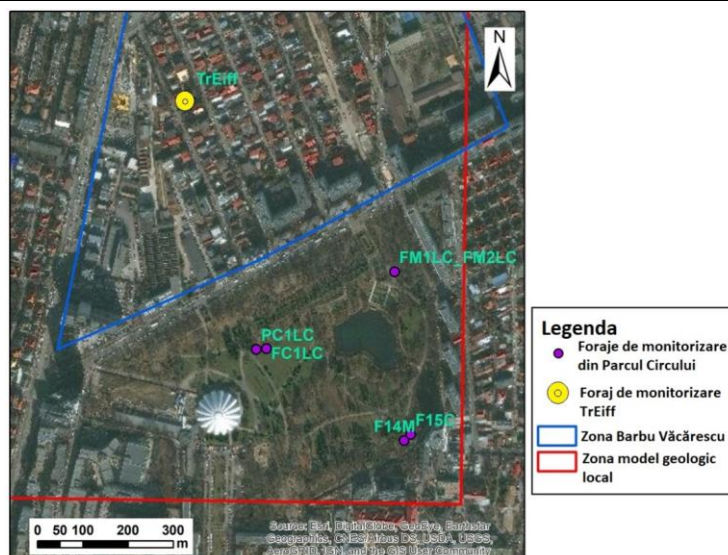


Figura 3-2 Foraje de monitorizare din Parcul Circului (violet), situate în partea de sud est a zonei studiate (Figura 3-1) și forajul de monitorizare aflat în interiorul zonei Barbu Văcărescu (galben).

Toate aceste foraje fac parte din Sistemul de monitorizare al apei subterane urbane (UGMS) al orașului București (Gaitanaru, et al., 2017), dezvoltat de CCIAS (UTCb) împreună cu ApaNova S.A..

3.4. DEPLASĂRILE TERENULUI ÎN ZONA BARBU VĂCĂRESCU ȘI CONEXIUNILE CU MEDIUL SUBTERAN

Barbu Văcărescu este una dintre zonele de instabilitate care a fost identificată în toate hărțile de deplasare generate din serii temporale de imagini SAR, începând cu 1992 (Vîjdea & Bindea, 2013; Poncos, et al., 2013). Pentru perioada 2014-2018, din datele Sentinel-1, deplasările din zona în care a fost generat modelul geologic local au luat valori între -10,72 mm/an (punctele marcate cu roșu) și +3,88 mm/an (punctele albastre) cu o abatere standard de $\pm 1,11$ mm/an. Figura 3-3 prezintă punctele PS de deplasare a terenului din zona Barbu Văcărescu.

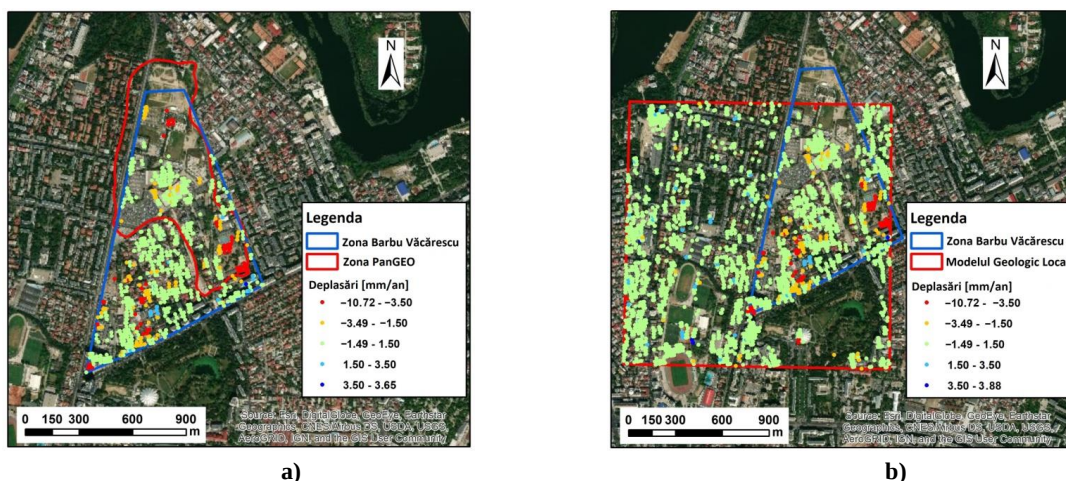
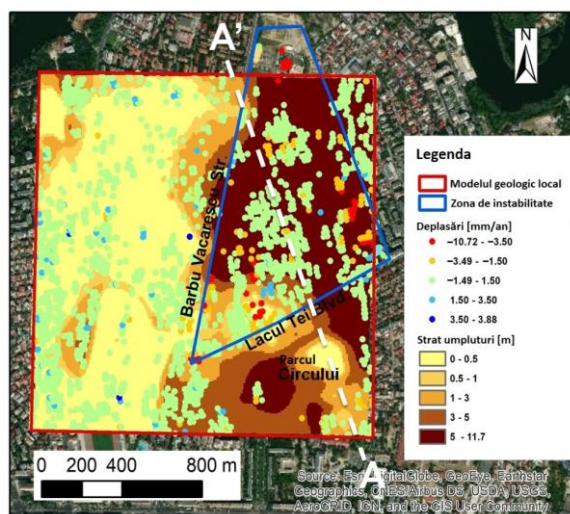


Figura 3-3 Deplasări PSI ale terenului în zona Barbu Văcărescu

3.4.1. Analize ale deplasărilor terenului considerând geologia și stratul antropic de umpluturi

Zona studiată este acoperită în mod extensiv de un strat gros de umpluturi, așa cum este prezentat în Figura 3-4. Stratul antropic este format din umpluturi neomogene din pământuri argiloase, prăfoase în amestec cu deșeuri preponderent menajere, din cauza prezenței în zonă a unei foste cariere pentru materiale de construcții (Vîjdea & Bindea, 2013).



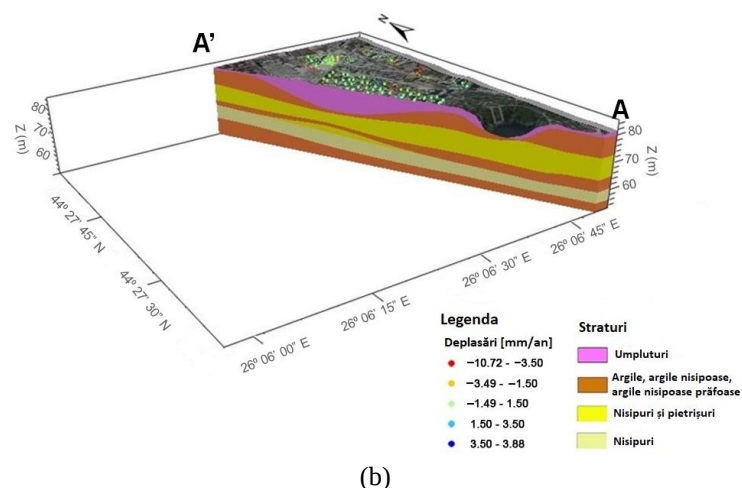


Figura 3-4 Zona Barbu Văcărescu: a) Grosimea stratului antropic de umpluturi și punctele PS de deplasare a terenului din date Sentinel-1. Secțiunea geologică este indicată de-a lungul profilului AA' care secționează zona Barbu Văcărescu și Parcul Circului; b) modelul geologic urmând secțiunea geologică AA' indicând straturile litologice.

Tendința de deplasare pentru câteva puncte PS din zona analizată poate fi observată în Figura 3-5. Ambele amplasamente indică o tendință de deplasare negativă aproximativ liniară cu o medie anuală a valorilor de $-5,2 \text{ mm} \pm 1,4 \text{ mm}$ și o valoare cumulată a subsidenței de aproape -35 mm pentru perioada octombrie 2014- aprilie 2018.

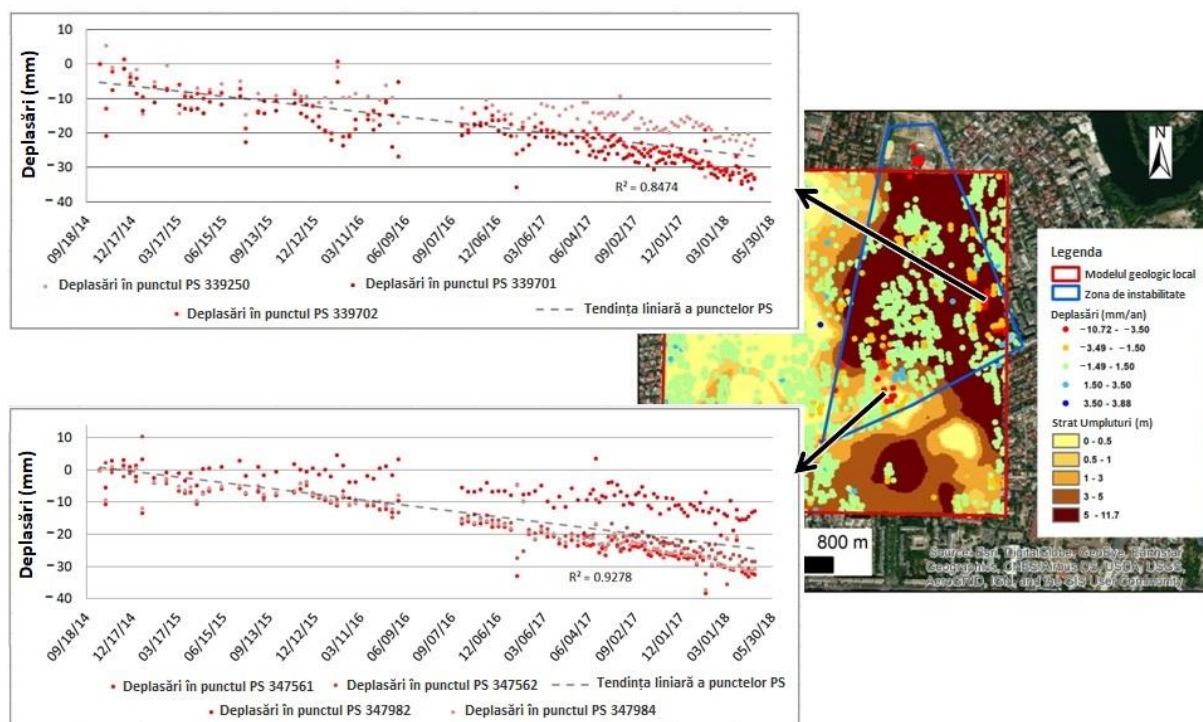


Figura 3-5 Tendințe de deplasare a punctelor PS din zona Barbu Văcărescu

3.4.2. Relația dintre deplasările terenului și dinamica sistemului acvifer urban din zona Barbu Văcărescu

Măsurătorile piezometrice efectuate în forajele din Parcul Circului au fost utilizate în acest studiu împreună cu deplasările verticale ale terenului pentru a identifica posibilele conexiuni dintre dinamica sistemului acvifer și deplasările de la suprafața terenului. În jurul fiecărui foraj au fost căutate cu ajutorul unei interogări spațiale punctele PS care se aflau la o

distanță mai mică de 100 m față de foraj. După identificare, în cazul în care această condiție era îndeplinită, forajul respectiv împreună cu punctele PS învecinate au fost incluse în analiză. Pentru forajele PC1LC și FC1LC nu au fost identificate puncte PS care să se afle în aria de incidență cu raza de 100 m, din cauza vegetației prezente în zonă, și de aceea, aceste foraje nu au fost incluse în analiză. După verificarea seriilor temporale de date de piezometrie, măsurătorile din forajul F15C au fost de asemenea eliminate din analiză, din cauza anumitor inadvertențe ale acestora.

Analiza spațială a cuprins date din forajele FM1LC, FM2LC și F14M. FM1LC și FM2LC sunt amplasate în același punct, primul deschizând acviferul intermediar Mostiștea, iar cel de-al doilea, acviferul freatic Colentina. Doar două puncte PS sunt situate la o distanță mai mică de 100 m față de forajele FM1LC și FM2LC. Figura 3-6 prezintă aceste puncte ale căror coduri sunt 333807, respectiv 333808. Pentru forajul de monitorizare F14M care deschide acviferul Mostiștea, mai mult de 60 de puncte PS se află la mai puțin de 100 m distanță.

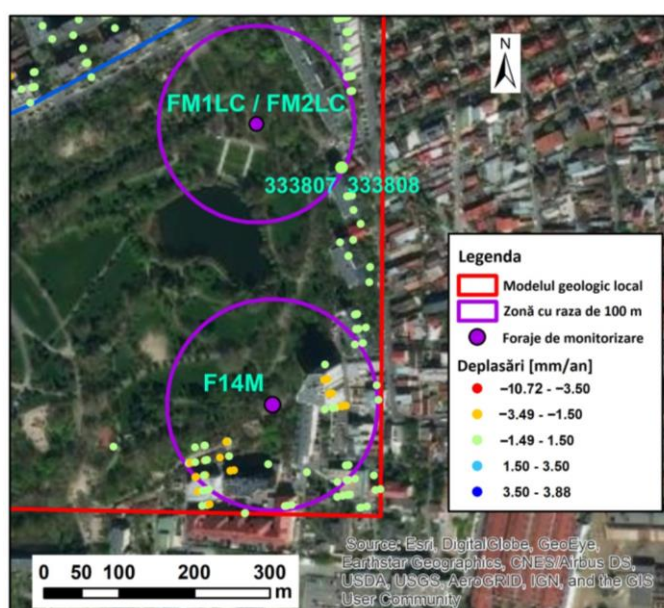


Figura 3-6 Puncte PS situate la o distanță mai mică de 100 m față de forajele de monitorizare FM1LC/FM2LC și F14M. Codurile punctelor situate în vecinătatea forajului FM1LC/FM2LC: 333807 și 333808.

Corelațiile dintre deplasările punctelor PS și nivelul piezometric, măsurată în forajele de monitorizare FM1LC și FM2LC sunt ilustrate grafic în Figura 3-7. Liniile cu nuanțe de albastru indică variațiile nivelului piezometric pentru forajul FM1LC care deschide acviferul intermediar Mostiștea și pentru forajul FM2LC care deschide acviferul freatic Colentina. Punctele PS de deplasare a terenului determinate din imagini Sentinel-1 pentru perioada 2014-2018, sunt marcate cu nuanțe de verde. Pentru ambele foraje care deschid acviferul freatic (forajul FM2LC) și acviferul intermediar sub presiune (forajul FM1LC), nivelul piezometric are tendințe de descreștere, în timp ce aria învecinată punctelor PS arată o ușoară tendință ascensională. Cu toate acestea, valorile anuale ale deplasărilor verticale pentru aceeași perioadă de timp sunt mai mici de -1,5 mm, zona în care se află cele două puncte PS putând fi considerată stabilă. Prin urmare, Figura 3-7 nu pune în evidență o corelație între deplasările verticale și variațiile de sarcină hidraulică.

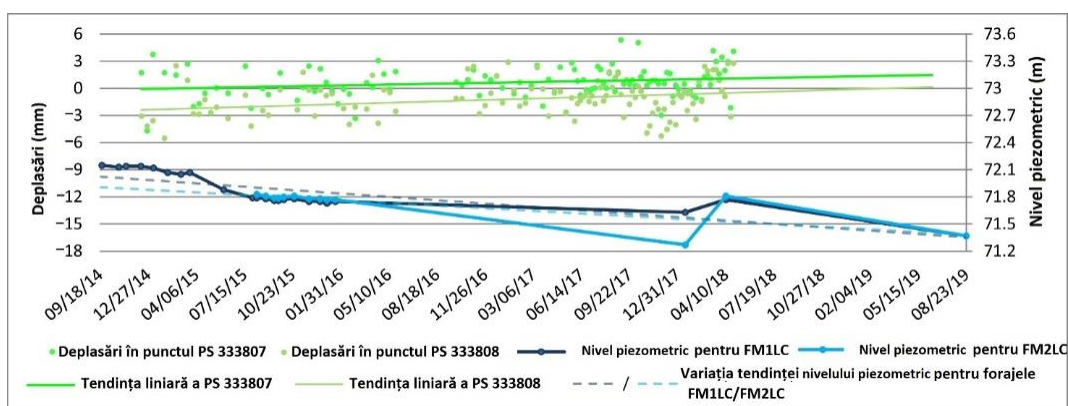


Figura 3-7 Corelații între deplasările punctelor PS și nivelul piezometric, măsurată în forajele de monitorizare FM1LC și FM2LC

În cazul forajului de monitorizare F14M, care deschide acviferul intermediar sub presiune, situația este diferită, corespondența dintre cele două tipuri de date fiind prezentată în Figura 3-8. Astfel, la o descreștere a nivelului piezometric, corespunde o tendință de deplasare negativă (tasare) a terenului. Aceste rezultate întăresc ipoteza că zona Parcului Circului (sau părți ale acestuia) are același comportament ca zona studiată care se află la nord de parc. Punctele roșii reprezintă o medie a variațiilor punctelor PS care se află la o distanță mai mică de 100 m față de forajul F14M.

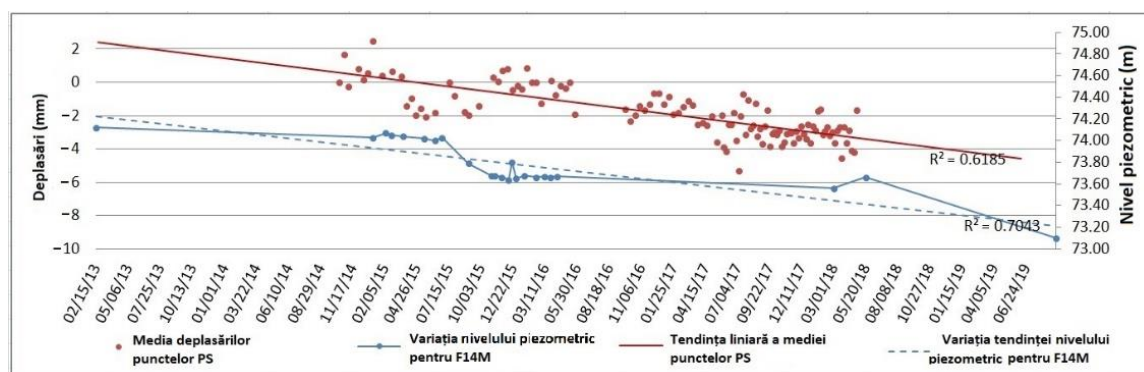


Figura 3-8 Corelația dintre deplasările punctelor PS și nivelul piezometric măsurată în forajul de monitorizare F14M

O bună corespondență este înregistrată între variațiile nivelului piezometric în forajul FM2LC, care deschide acviferul freatic și variațiile nivelului apei din Lacul Circului care are conexiune directă cu acviferul freatic și este reprezentativ pentru tendința nivelului piezometric din zonă, începând cu anul 2006.

3.4.3. Studiu de caz al unui imobil din zona Barbu Văcărescu

În 2011, o expertiză geotehnică a fost solicitată pentru o clădire situată în zona Barbu Văcărescu, care prezenta semne de instabilitate (Manea, 2016). Degradarea acestei clădiri a debutat după începerea lucrărilor de construcție la un imobil învecinat, situat în partea de nord est. Lucrările de construcție au implicat extinderea unei clădiri existente (Figura 3-9). Stratele geologice cartate în zona de investigație sunt în concordanță cu modelul geologic (Figura 3-4), iar un foraj de monitorizare -TrEiff -a fost săpat aproape de limita dintre cele două proprietăți, în apropierea clădirii în construcție.

Din harta PS a deplasărilor terenului generată din date Sentinel-1 de pe orbita descendentă 109D, au fost identificate puncte PS disponibile în zona expertizată. Aceste puncte sunt marcate în Figura 3-9.

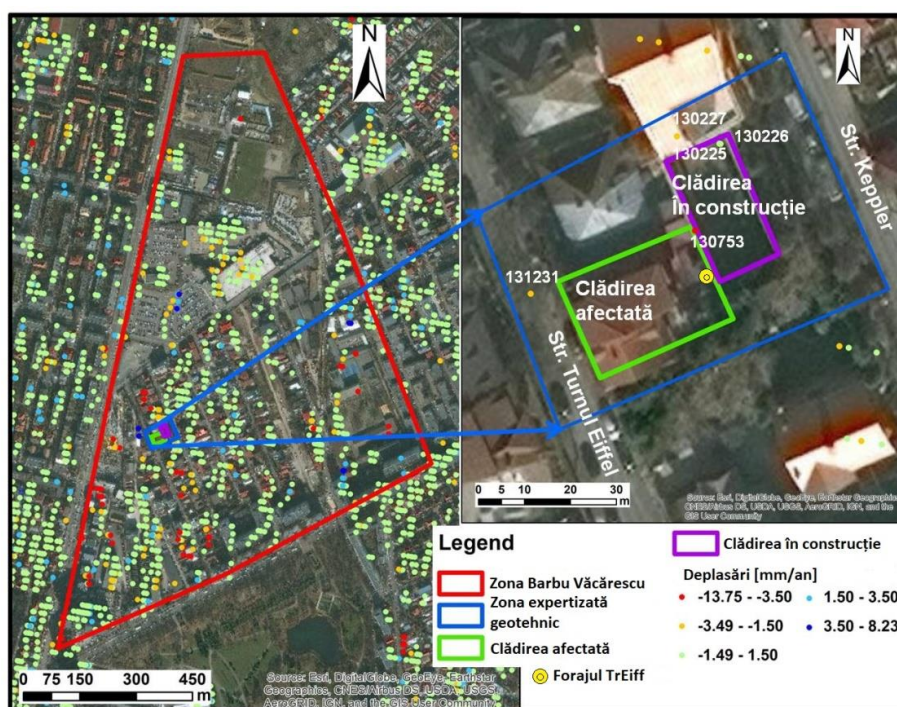


Figura 3-9 Studiu de caz al unei clădiri situate în zona Barbu Văcărescu. Harta PS a deplasărilor terenului este generată din date Sentinel-1, orbita 109D

Diferența majoră între cele două clădiri, cea care prezintă semne de degradare și cea care este în construcție, este legată de tipul fundației clădirilor. Clădirea afectată este fundată cu radier general flotant pe un strat de umpluturi, construcția existentă, pentru care au început lucrările de extindere, a fost fundată pe piloți. Începerea lucrărilor în august 2010, cu activitățile invazive cauzate de execuția piloților în terenul constituit din umpluturi neomogene, au condus la o serie de deformații în teren, cu efect asupra fundațiilor directe ale construcțiilor din apropiere.

Acviferul freatic, situat la adâncimi de 9-10 m, arată variații continue ale nivelului piezometric cu creșteri din 2011 până la mijlocul anului 2012 și apoi cu o scădere până în iulie 2016. Această variație a fost interceptată de forajul de monitorizare amplasat aproape de limita dintre cele două construcții (Figura 3-9). Alternanța nivelului piezometric afectează în mod clar stabilitatea terenului, după cum este indicat de punctele PS în Figura 3-10.

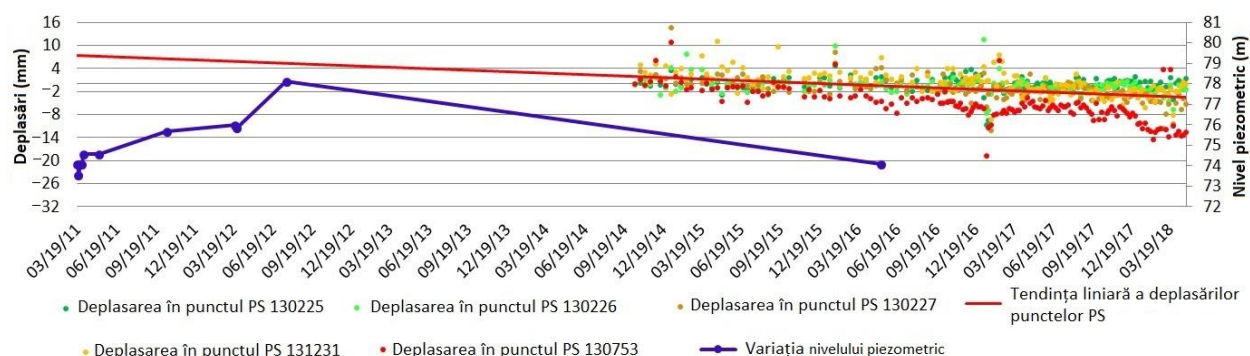


Figura 3-10 Comparăție între evoluția datelor piezometrice din forajul TrEiff și deplasările terenului indicate de punctele PS generate din date Sentinel-1 109D.

Graficul din Figura 3-10 arată tendința de tasare a terenului care are loc în aceeași perioadă în care este detectată descreșterea nivelului piezometric. Măsurătorile piezometrice au fost disponibile pentru perioada 2011-2016, în timp ce seriile temporale de deplasări ale terenului

sunt disponibile pentru perioada 2014-2018. Tendința de coborâre a nivelului piezometric modelat este confirmată de forajele din zonă, precum și de măsurătorile efectuate în forajul TrEiff în mai 2016.

3.5. DISCUȚII ȘI CONCLUZII PRIVIND ANALIZELE DIN ZONA BARBU VĂCĂRESCU

Unul dintre cele mai importante avantaje ale tehnicilor InSAR constă în detectarea deplasărilor terenului cu îmbunătățirea considerabilă a capacităților de monitorizare pentru areale foarte extinse. Acest lucru permite identificarea unor zone specifice care sunt afectate de deplasări ale terenului care erau necunoscute înainte de utilizarea metodelor SAR de monitorizare și arată evoluția temporală a deplasărilor pentru zone care sunt predispuse la apariția unor fenomene de subsidență sau de înălțare a terenului. Acesta este și cazul zonei Barbu Văcărescu, care a fost identificată ca zonă de instabilitate din seriile temporale SAR analizate încă din 1992. Analizând deplasările verticale ale terenului din hărțile PSI generate pentru intervale de timp cuprinse între 1992 și 2018, se poate observa că tendința de instabilitate nu este dată în principal de extinderea spațială și de predominanța punctelor PS care indică subsidență, ci de schimbările care apar în privința amplasării punctelor PS care indică deplasări ale terenului.

Deplasările terenului identificate de sateliții SAR, prin tehnicile InSAR nu recunosc cauza acestor deplasări, dar permit evidențierea diferitelor probleme geologice, hidrogeologice, sau geotehnice care influențează atât mediul subteran, cât și suprafața terenului. Comportamentul diferit al tendințelor punctelor PS corelate cu forajele FM1LC/FM2LC și F14M poate fi din cauza modului diferit de utilizare a terenului în apropierea forajelor, din vecinătatea Parcului Circului.

Instabilitatea terenului observată pentru clădirile analizate din zona Barbu Văcărescu are o cauză combinată. Soluțiile de fundare, prezența stratului antropic neomogen de umpluturi, activitățile de construcție, infiltrațiile din pierderile de apă din rețeaua de distribuție a apei existente înainte de începerea lucrărilor de construcție, variațiile nivelului piezometric, au dus la deplasări ale terenului și implicit la degradarea clădirii prezentate în secțiunea 3.4.3.

Subsidența în zonele urbane, precum orașul București, poate avea cauze multiple. O mai bună înțelegere a modului complex de conectare dintre procesele geologice și hidrogeologice ca parte a ciclului apei în mediul urban și deplasările terenului va aduce îmbunătățiri în planificarea urbană a mediului subteran și a dezvoltării urbane.

4. ANALIZA FENOMENULUI DE SUBSIDENȚĂ LA NIVEL REGIONAL URBAN: CARACTERIZAREA ZONELOR CRITICE CU SUBSIDENȚĂ DIN BUCUREȘTI, PUSE ÎN EVIDENȚĂ PRIN TEHNICI DE TELEDETECȚIE

4.1. SCOPUL REALIZĂRII STUDIULUI REGIONAL URBAN. METODOLOGIA DE LUCRU. ZONA REGIONALĂ DE STUDIU

În încercarea de identificare cât mai corectă și de cuantificare a surselor care produc fenomene de deplasare verticală a terenului pentru areale mai largi, pornind de la caracteristicile identificate la nivel local, studiul regional urban își propune să analizeze un proces de

generalizare a fenomenelor la nivel regional urban. Concluziile studiului pot fi utilizate în vederea realizării unei planificări urbane cât mai bune, cunoscând anumite particularități și fenomene care nu pot fi identificate cu ajutorul altor instrumente.

Pașii de parcurs pentru realizarea studiului regional urban sunt:

- Definirea zonei regionale urbane de studiu
- Identificarea arealelor cu deplasări ale terenului din interiorul zonei regionale de studiu
- Caracterizarea arealelor cu deplasări ale terenului din interiorul zonei regionale de studiu
- Identificarea mecanismelor de subsidență sau uplift pentru arealele cu deplasări ale terenului din interiorul zonei regionale de studiu
- Definirea unor concluzii generale.

Pentru caracterizarea arealelor de subsidență din interiorul zonei regionale de studiu, sursele de date complementare vor fi utilizate pentru a răspunde la mai multe întrebări cu privire la zona de interes. Figura 4-1 prezintă metodologia de caracterizare a arealelor cu deplasări verticale ale terenului, aflate în interiorul zonei regionale de studiu.

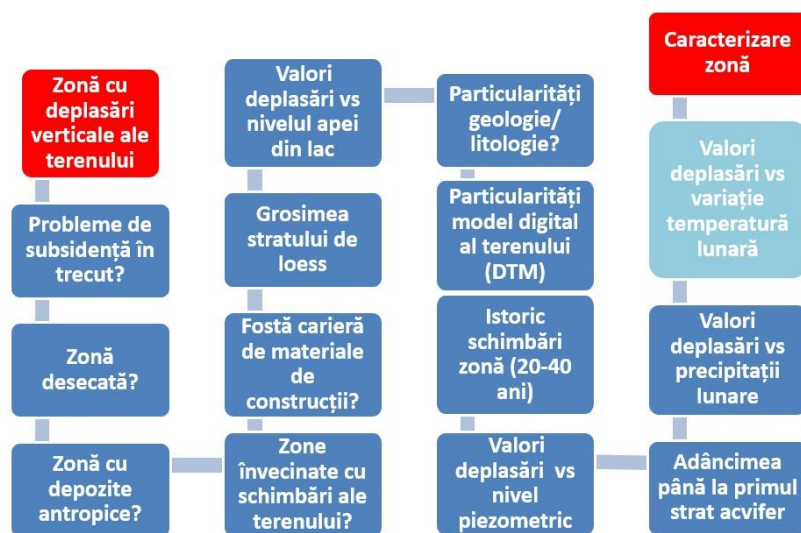


Figura 4-1 Metodologia caracterizării zonelor cu deplasări verticale ale terenului

Figura 4-2 arată extinderea zonei de studiu regionale din lungul culoarului râului Colentina.

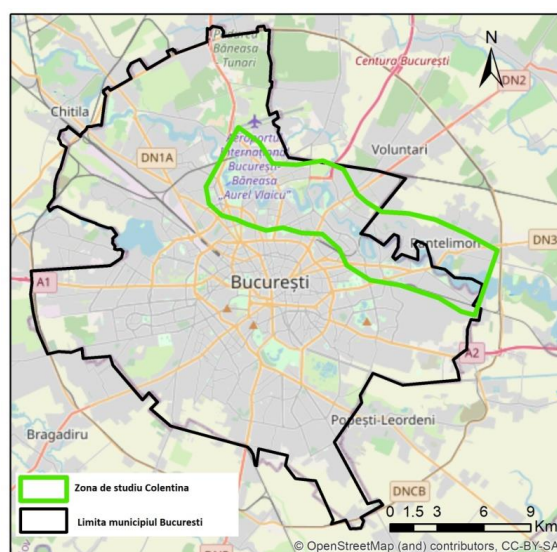


Figura 4-2 Zona de studiu regional, din lungul râului Colentina

4.2. SURSE DE DATE UTILIZATE PENTRU CARACTERIZAREA ZONEI COLENTINA

Pentru o analiză cât mai amănunțită a zonei, care să ajute la înțelegerea fenomenelor și proceselor care au loc în lungul culoarului Colentinei, au fost utilizate mai multe tipuri de surse de date, pornind de la date care descriu cadrul natural al zonei, condițiile generale, până la date specifice de hidrogeologie, hidrologie sau geotehnică. Intervalul de timp pentru care este efectuată analiza este 2014-2018, perioada pentru care a fost utilizat setul de date Sentinel-1 SLC pentru obținerea hărții PSI de deplasare a terenului.

- Date de teledetecție
 - ENVISAT ASAR- zone subsidență 2004-2010;
 - Sentinel-1 SLC- zone subsidență 2014-2018;
 - Sentinel-1 GRD- zone schimbări teren 2014-2018.
- Hărți vechi
 - Hărți austriece (1: 200 000) – 1910;
 - Planuri directe de tragere (1: 20 000)- 1918;
 - Plan Bălțile Colentinei înainte de asanare – 1936;
 - Hărți Sovietice (1: 100 000) – 1970;
 - Harta topografică militară DTM (1: 25 000)- 1982;
 - Hărți sovietice (1: 50 000) – 1985- 1990.
- Date hidrologice
 - Nivelul lacurilor Colentinei în perioada 2014-2017;
- Caracteristici geografice
 - Harta unităților de relief;
 - Harta morfologică a municipiului București;
 - Harta hipsometrică a municipiului București;
 - Modelul Digital a Suprafețelor (DSM);
 - Modelul Digital al Terenului (DTM);
- Date geologice
 - Harta geologică (IGR);
 - Harta grosimii formațiunii Loessului;
 - Secțiuni geologice;
- Date hidrogeologice
 - Harta hidrogeologică a municipiului București (1: 50 000)
 - Măsurători piezometrice;
- Date geotehnice
 - Zone cu soluri antropice;
 - Foraje geotehnice;
 - Amplasamentul fostelor cariere de materiale de construcții
 - Harta de raionare geotehnică
- Date climatice
 - Precipitații
 - Temperatură.

4.3. EVOLUȚIA ZONELOR DE INSTABILITATE A TERENULUI PENTRU ZONA REGIONALĂ DE STUDIU, ȘI ANALIZA SCHIMBĂRIILOR LA SUPRAFAȚA TERENULUI

Pe baza hărților PSI de deplasare verticală a suprafeței terestre, pentru intervalele 2004-2010 și 2014-2018, se poate urmări modul de evoluție al deplasărilor verticale din zona de studiu Colentina (Figura 4-3). Cu roșu sunt evidențiate zonele care au prezentat subsidență în intervalul 2004-2010, iar cu mov sunt evidențiate zonele cu deplasări verticale negative identificate în intervalul 2014-2018.

Din harta detectării schimbărilor generată din date Sentinel-1 GRD, pentru zona de studiu Colentina au fost identificate arealele în care au apărut schimbări ale utilizării terenului în intervalul 2014-2018. Acestea sunt marcate pe hartă cu culoarea maro.

Pornind de la zonele cu deplasări pe verticală identificate, o analiză a zonei de studiu este realizată pentru a identifica potențialii factori care au generat deplasările. Există zone cu schimbări ale terenului care sunt independente de zonele cu deplasări ale terenului, dar există și zone în care cele două tipuri de fenomene se produc în imediata vecinătate. În multe cazuri este vorba de continuarea unor lucrări de construcții din zone rezidențiale.

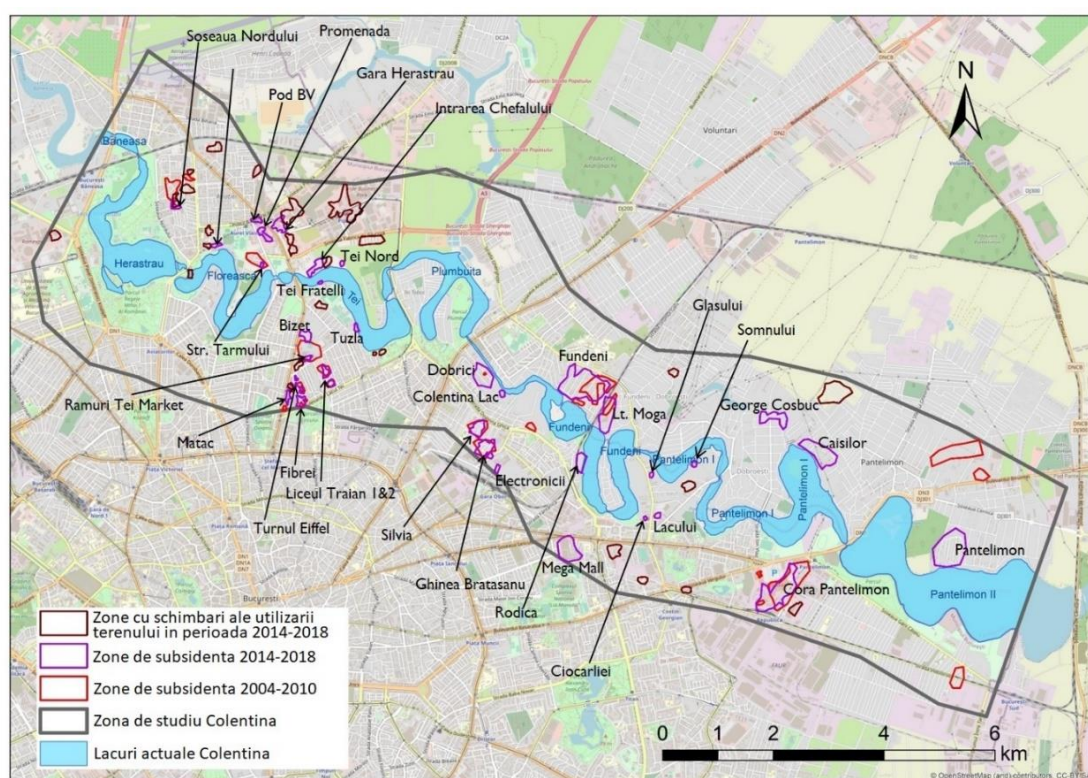


Figura 4-3 Zone de deplasare a terenului din zona regională de studiu Colentina, pentru intervalele 2004-2010 și 2014-2018 și zone cu schimbări la nivelul suprafeței terenului

4.4. ANALIZA TOPOGRAFIEI PENTRU IDENTIFICAREA ZONELOR CU POTENȚIAL DE INSTABILITATE. ANALIZA HIDROGEOLOGICĂ

Un prim pas în vederea caracterizării zonei de studiu este acela de a observa evoluția zonei respective pe un interval de timp cât mai lung. Astfel, au fost căutate surse de date topografice istorice, cea mai veche sursă fiind reprezentată de Hărțile Austriece (1:200 000), care au fost

realizate în anul 1910 (geo-spatial.org, 2021). Secțiunea 4.2 prezintă hărțile istorice consultate pentru analiza evoluției temporale din punct de vedere topografic al zonei de studiu.

Zonele mlăștinoase sau acoperite cu apă în trecut și care acum au o altă utilizare, pot reprezenta zone cu un anumit grad de instabilitate. Considerând zonele identificate în fiecare dintre hărțile istorice, o hartă pe care toate aceste zone sunt reprezentate a fost generată. Figura 4-4 prezintă toate aceste zone urbane care în trecut au fost acoperite cu apă sau mlaștină, reprezentate cu nuanțe de roșu.

Din Harta de Raionare Geotehnică au fost evidențiate forajele în a căror descriere litologică solul antropic apare ca strat superficial. În afara informațiilor obținute pe baza hărților istorice, din informațiile litologice asociate forajelor de monitorizare existente în baza de date SIMPA a CCIAS (CCIAS, 2013), au fost delimitate zonele care prezintă ca strat superficial sol antropic cu o grosime mai mare de 1 m (cu nuanțe de roz-mov pe harta din Figura 4-4).

Figura 4-4 reunește atât zonele cu potențial de instabilitate, zonele cu strat de depozite antropice, cât și zonele cu deplasări verticale negative determinate din hărțile PSI generate din date Sentinel-1, pentru intervalul 2014-2018 și din date ENVISAT ASAR pentru intervalul 2004-2010, precum și zonele cu schimbări ale terenului.

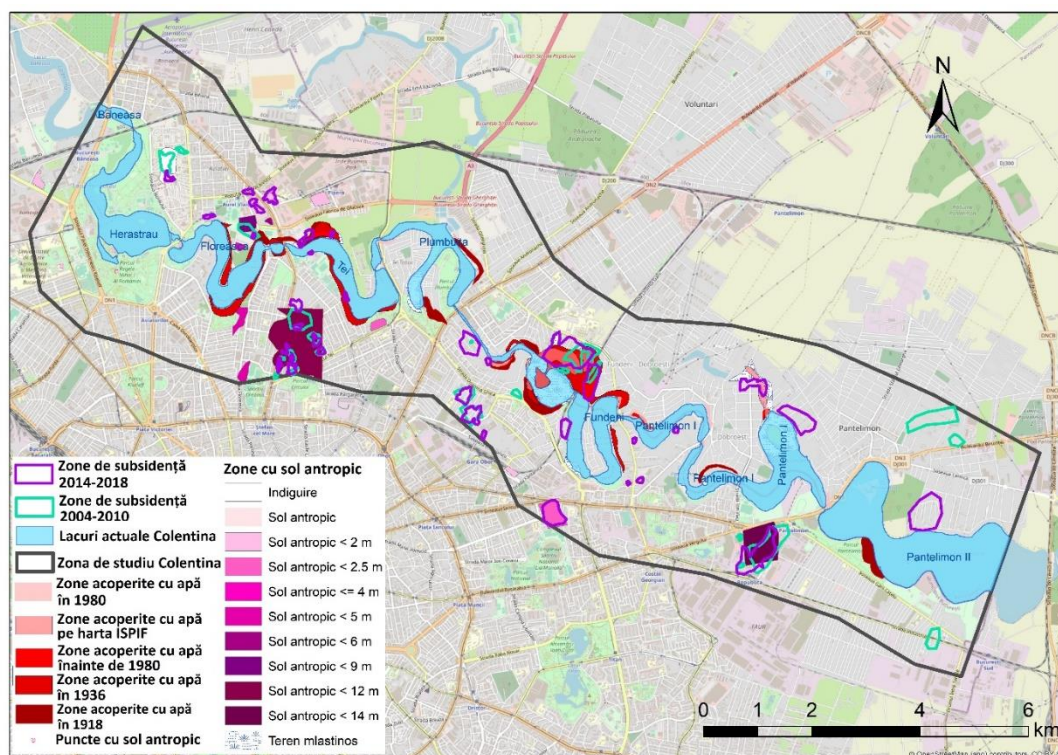


Figura 4-4 Zone cu potențial de instabilitate și zone de subsidență

Pentru o mai bună caracterizare din punct de vedere hidrogeologic a zonei studiate, din baza de date CCIAS au fost extrase forajele de monitorizare disponibile pentru zona de studiu. Figura 4-5 indică amplasamentul acestor foraje. Cu bleu sunt marcate forajele pentru care există o singură măsurătoare disponibilă în intervalul 2014-2018, iar cu bleumarin sunt marcate forajele pentru care există mai mult de nouă măsurători pentru intervalul de timp considerat.

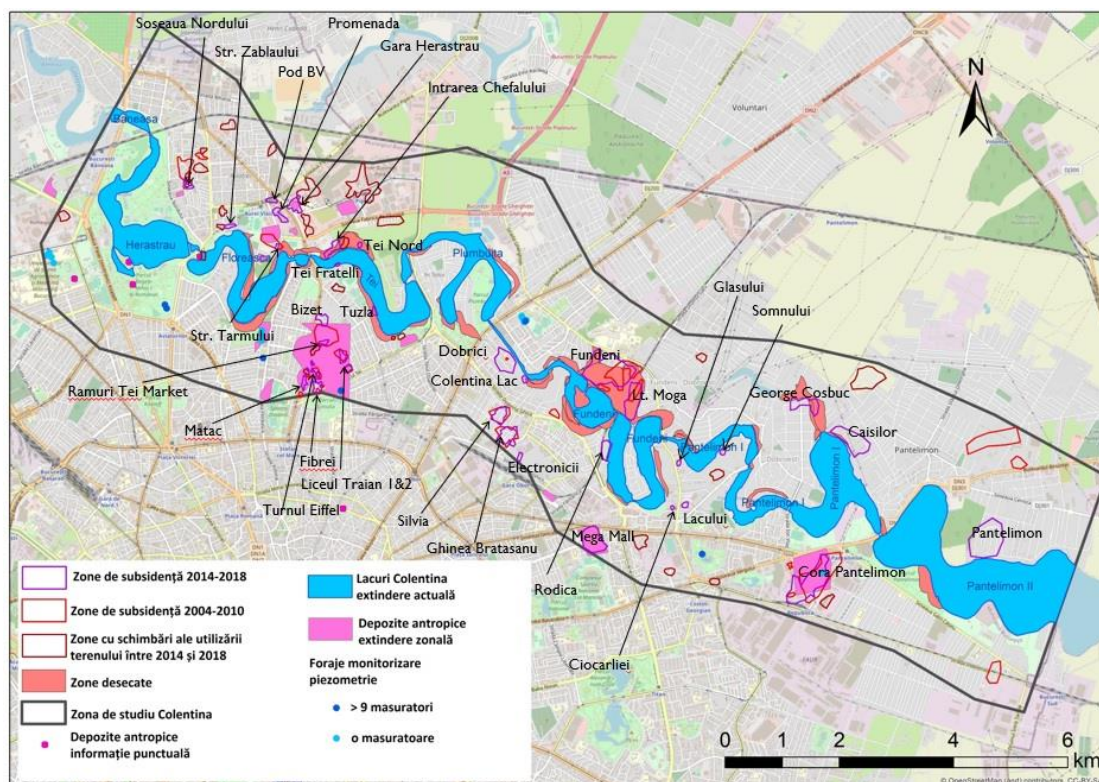


Figura 4-5 Zone de subsidență, depozite antropice, zone desecate și foraje de monitorizare (piezometre)

4.5. STUDIUL ZONELOR DE SUBSIDENȚĂ

Pe baza informațiilor extrase din hărțile de diverse tipuri, o centralizare a acestora a fost realizată pentru fiecare zonă de subsidență identificată în intervalul 2014-2018, pe baza datelor Sentinel-1 de pe orbitele 131A sau 109D. Tabelul 4-1 cuprinde această centralizare. Sunt 37 de areale de instabilitate identificate din date Sentinel-1. Coloanele cuprind următoarele informații: 1) Numărul arealului; 2) Denumirea arealului; 3) Orbita Sentinel-1 utilizată pentru generarea hărții PSI; 4) Situația zonei în perioada 2004-2010; 5) deplasarea medie anuală în lungul liniei de vizare (LOS); 6) Distanța dintre centroidul zonei și lacuri; 7) Prezența solului antropic și grosimea acestuia; 8) Grosimea stratului de loess; 9) Istoricul zonei privind acoperirea cu apă sau mlaștină din hărțile istorice (zone desecate); 10) Prezența unei cariere de materiale de construcții în trecut; 11) Geologia zonei; 12) Foraje de monitorizare aproape de areal; 13) Adâncimea până la orizontul pietrișurilor de Colentina; 13) Adâncimea până la nivelul piezometric al primului strat acvifer.

Considerând datele centralizate, o analiză detaliată a fiecărei zonă de subsidență a fost realizată, incluzând analize comparative între seriile temporale ale deplasărilor terenului cu variațiile nivelului din lacuri (Tabelul 4-2), cu variațiile nivelului piezometric pentru zonele aflate în incidența unui foraj de monitorizare (Tabelul 4-4), cu variațiile precipitațiilor și variațiile temperaturii.

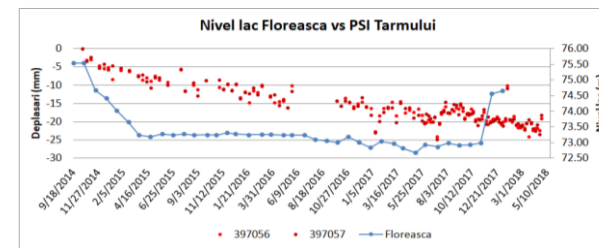
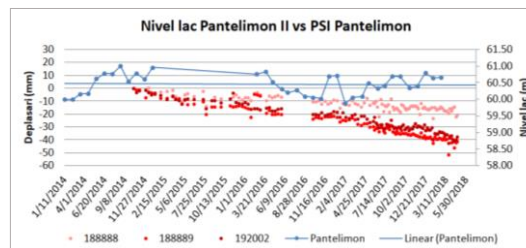
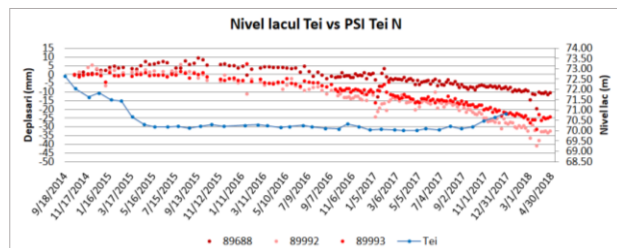
Diferența de pantă dintre zonele de subsidență și marginea lacurilor a fost de asemenea interpretată (Tabelul 4-3).

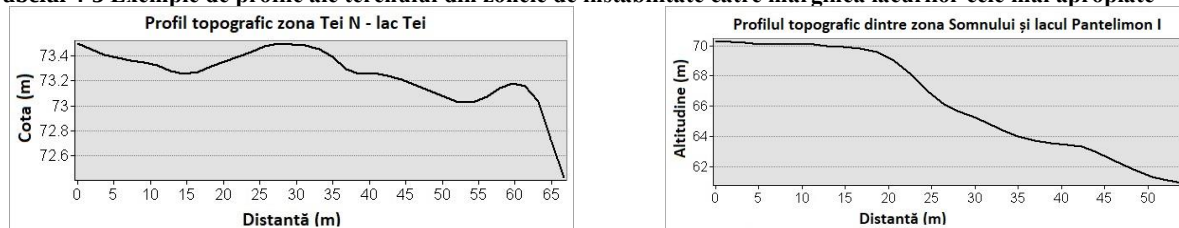
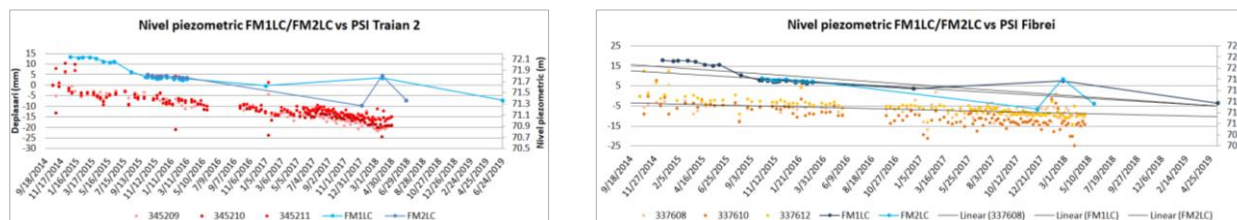
Tabelul 4-1 Centralizarea informațiilor privind arealele de deplasare verticală a terenului identificate din hărțile PSI Sentinel-1 pentru intervalul 2014-2018

Nr. Crt.	Denumire	PSI S1	Subsidentă și în perioada 2004-2010	Deplasare Medie (LOS) [mm/an]	Dist zona-lac [m]	Depozite antropice [m]	Loess [m]	Zonă desecată	Fostă carieră de materiale de construcții	Geologie	Adâncime până la orizont Pietriș de Colentina [m]	Adâncime până la nivelul apei subterane (Colentina)
1	Pantelimon	131A	Nu	-4,9	232	Nu	0 - 6	meandra (DSM)	Nu	qp2/3- Dd	0 - 5	8,7
2	Cora Pantelimon	131A	Da	-2,4	576	2,8 – 13,8	Nu	Nu	Da	qp2/3- Dd	0 -10	14,5
3	Caisilor	131A	Nu	-1,5	104	Nu	2,5 -9	Parțial	Nu	qp2/3- Dd	5 -10	14,9
4	Str. George Cosbuc	131A	Nu	-1,1	408	Nu	2,5 - 9	Parțial	Nu	qp2/3- Dd	0- 10	12,1
5	Somnului	109D	Nu	-4,8	54	Nu	< 2,5	Nu	Nu	qh2	0 -5	9,2
6	Glasului	131A	Nu	-3,8	84	Nu	0 - 6	Nu	Nu	qh2	0 -5	14,5
7	Ciocarliei	131A	Nu	-3,0	126	Nu	2,5 -6	Nu	Vecinatate	qh2	5 -10	6,8
8	Fundeni-Lacului	131A	Nu	-2,7	256	Nu	2,5 -6	Nu	Vecinatate	qh2	5 -10	12,8
9	MegaMall	131A	Nu	-1,4	623	0,6 -2,4	2,5 - 6	Nu	Nu	qp2/3- Dd	5 - 10	10,6
10	Str.Rodica	131A	Nu	-1,9	36	Nu	0 - 6	Nu	Nu	qh2	0 - 5	3,9
11	Str. Lt. Moga	131A	Da	-2,4	217	Nu	6 - 9	Da	Nu	qh2	0 - 5	6
12	Fundeni	131A	Da	-2,3	266	Nu	0 - 9	Da	Nu	qh2	0 - 5	6,7
13	Electronicii-H Intre Vii	131A	Nu	-1,5	850	Nu	2,5 - 6	Nu	Nu	qp2/3- Dd	0 - 5	11
14	Ghinea Bratasanu	131A	Da	-4,8	867	Nu	2,5 - 6	Nu	Nu	qp2/3- Dd	0 - 5	11,5
15	Silvia	131A	Da	-3,5	588	Nu	2,5 - 6	Nu	Nu	qp2/3- Dd	0 - 5	11,5
16	Colentina Lac	109D	Nu	-2,1	42	Nu	< 2,5	Parțial	Nu	qh2	0 - 5	7,3
17	Dobrici	131A	Da	-2,7	131	Nu	0 - 6	Nu	Nu	qh2	0 - 5	2,7
18	Tei-Tuzla	131A	Nu	-2,8	12	Nu	< 2,5	Da	Nu	qh2	0 - 5	0,9
19	Matac	131A	Da	-2,7	1019	0,5 - 6	2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	8,6
20	Fibrei	131A	Da	-2,5	1076	0 – 1,2	2,5 - 6	Nu	Vecinatate	qp2/3- Dd	5 - 10	8,3
21	Lic. Traian 1	131A	Da	-4,1	596	7,5 - 9	2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	8,3
22	Lic. Traian 2	131A	Da	-3,6	632	7 – 7,5	2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	8
23	Tr. Eiff30	131A	Da	-2,4	985	3,5 – 7, 5	2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	7,8

Nr. Crt.	Denumire	PSI S1	Subsidentă și in perioada 2004-2010	Deplasare Medie (LOS) [mm/an]	Dist zona-lac [m]	Depozite antropice [m]	Loess [m]	Zonă desecată	Fostă carieră de materiale de constructii	Geologie	Adâncime până la orizont Pietriș de Colentina [m]	Adâncime până la nivelul apei subterane (Colentina)
24	Tr. Eiff 31	131A	Da	-3,0	937	8 - 10	2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	7,9
25	Tr. Eif 62	109D	Nu	-2,5	874	8,5 -9,5	2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	7,3
26	BV Rossini	109D	Nu	-3,0	897	8 – 10,5	2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	8,7
27	Ramuri Tei Market	131A	Da	-1,3	731	8 – 10,5	Partial 2,5 - 6	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	10,1
28	BV Bizet	131A	Partial	-4,9	665	7 -8,3	nu	nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 10	10
29	Tei Fratelli	131A	Nu	-2,7	6.8	Nu	< 2,5	Nu	Nu	qh2	0 - 5	0,5
30	Intr. Chefalului	131A	Nu	-1,7	77	Nu	0 - 6	Da	Nu	qh2	0 - 5	3,5
31	Tei Nord	109D	Nu	-7,4	66	Nu	2,5 - 6	Da	Nu	qh2	0 - 5	2,4
32	Tarmului	131A	Da	-4,1	89	Nu	<2,5	Nu	Vecinătate	qp2/3- Dd	0 - 5	7
33	Promenada	109D	Nu	-1,3	460	Nu	nu	Nu	Da	qp2/3- Dd	5 - 20	0,3
34	Gara Herastrau	109D	Nu	-2,1	611	< 2	15-17	Nu	Nu	qp2/3- Dd	10 -20	15,8
35	Pod BV	109D	Nu	-1,1	547	Nu	2,5 - 6 partial	Nu	Partial	qp2/3- Dd	10- 20	8,3
36	Zablului	131A	Nu	-1,3	75	Nu	<2,5	Nu	Nu	qh2	0 - 5	2,3
37	Sos. Nordului	131A	Partial	-1,4	513		2,5 - 6	Nu	Nu	qp2/3- Dd	0 - 5	4,27

Tabelul 4-2 Exemple de comparații între variația deplasărilor terenului în punctele PSI din zonele de instabilitate identificate si variația nivelului apei din lacul cel mai apropiat



Tabelul 4-3 Exemple de profile ale terenului din zone de instabilitate către marginea lacurilor cele mai apropiate**Tabelul 4-4 Exemple de comparații între variația nivelului piezometric în foraje și variația deplasărilor în punctele PSI**

4.6. DISCUȚII ȘI CONCLUZII PRIVIND ANALIZA ZONEI DE STUDIU REGIONALĂ COLENTINA

Se observă foarte clar, în toate cazurile analizate de-a lungul culoarului râului Colentina o concordanță majoră între variația nivelului apei din lacuri și deplasările pe verticală a zonelor limitrofe. În toate cazurile scăderea nivelului apei în lacuri este însoțită de subsidența zonelor studiate aflate în vecinătatea acestora. Conexiunea hidrolică puternică între salba de lacuri Colentina și primul strat acvifer (pietrișurile de Colentina) este bine definită, fiind pusă în evidență de numeroase studii (Gogu, et al., 2015; Serpescu, et al., 2013)) iar datele piezometrice, deși limitate, validează aceasta interacțiune. În consecință acest studiu pune în evidență legătura clară între fenomenele de subsidență înregistrate în zonele urbane limitrofe salbei de lacuri Colentina și scăderea nivelului piezometric din primul strat acvifer (Pietrișurile de Colentina). Dezvoltarea unui sistem de monitorizare prin puțuri de observație, în vederea asigurării unui management durabil al întregului oraș este absolut necesar. Datele hidrogeologice oferă o imagine coerentă asupra comportării mediului subteran al orașelor și documentează activitatea de dezvoltare a construcțiilor subterane și subterane.

În privința precipitațiilor, în acest studiu nu s-a putut stabili decât într-o măsură foarte mică o corelație între variația acestora și valorile deplasărilor terenului. Această analiză a fost introdusă datorită faptului că în literatura de specialitate sunt prezentate studii în care s-a evidențiat legătura foarte puternică dintre variația precipitațiilor și variația deplasărilor terenului. Este specific mai ales zonelor în care climatul este caracterizat de un sezon ploios urmat de un sezon secetos, iar matricea minerală a acviferului este formată din argile (Chen, et al., 2016).

O altă concluzie este legată de amplasarea zonei de studiu, care cuprinde lunca și terasele râului Colentina. Din descrierile și analizele anterioare reiese că zona regională Colentina este o zonă cu puternică dinamică urbană, fiind supusă unor numeroase lucrări, cu scopul de extindere a zonelor rezidențiale până la marginea lacurilor. Lacurile în sine reprezintă lucrări de amenajare efectuate pentru stoparea efectelor negative ale inundațiilor produse de râul Colentina, precum și pentru transformarea zonelor mlăștinoase în terenuri cu scop de agrement urban sau construibile. Deoarece între stratul acvifer al pietrișurilor de Colentina și lacurile amenajate de-a lungul râului Colentina există o conexiune hidrolică puternică, lucrările de amenajare și de construcție

efectuate în zonele limitrofe acestor lacuri pot afecta modul de desfășurare a fenomenelor și proceselor asociate conexiunii hidraulice.

Deplasările verticale ale suprafeței terestre au în general o cauză combinată, intervenind probleme de geotehnică, hidrologie, hidrogeologie și aspecte geologice. Faptul că în zonele urbane atât partea subterană cât și partea supraterană sunt expuse mai multor factori decât în arealul extraurban, face foarte dificilă identificarea cu exactitate a cauzelor și efectelor anumitor fenomene care au loc în acest spațiu. Aici intervine și componenta istorică, legată de faptul că în trecut au fost efectuate diverse lucrări fără a se păstra informații coerente și concrete cu privire la modul în care aceste lucrări au fost efectuate. În cazurile rare când aceste informații există acestea nu sunt suficient de amănunțite.

Considerând cauza combinată a subsidenței, pentru zona Colentina se remarcă o altă componentă care are sau poate avea un rol important în apariția deplasărilor verticale. Astfel, construcțiile de clădiri înalte pentru birouri sau cu scopuri rezidențiale, care sunt realizate în multe amplasamente din zona de studiu Colentina, sunt prevăzute cu subsoluri pe mai multe nivele care să asigure locuri de parcare, ceea ce face ca extinderea în adâncime a construcției să depășească în multe cazuri 10 m. S-a observat că adâncimea până la pietrișurile de Colentina în funcție de cota terenului, în 26 de zone din cele 37 studiate, este mai mică de 10 m. Proiectarea și apoi folosirea parcarilor subterane conduce la montarea și utilizarea de pompe pentru scăderea nivelului piezometric al acviferului superior (implementarea unor sisteme de epuismențe), astfel încât să nu fie periclitată lucrările în perioada construcției, iar apoi să permită utilizarea în condiții optime a parcarilor. În funcție de volumul de apă pompat, această operațiune poate avea efecte în ceea ce privește curgerea apei subterane și poate conduce la apariția deplasărilor la suprafața terenului. În zona de studiu există la momentul actual doar câteva foraje de monitorizare, unele dintre ele aflându-se la distanțe prea mari față de zonele de instabilitate, ceea ce face imposibilă utilizarea lor în analizele efectuate în zonă. Pentru acele zone ce prezintă subsidență și pentru care există foraje de monitorizare a apei subterane, în zona de incidență, s-a observat tendința comună de descreștere a valorilor piezometrice și a valorilor deplasărilor verticale.

Locul de amplasare al forajelor de monitorizare reprezintă o problema majoră în spațiul urban. Dezvoltarea unei rețele de stații de monitorizare a măsurătorilor piezometrice într-un mod corect și coerent ar permite demonstrarea unei legături între pomparea apei subterane prin sistemele de epuismenț și deplasările verticale ale terenului. Datele ar putea fi utilizate și pentru a cuantifica deplasările suprafeței terenului generate de coborârea nivelului piezometric prin pompare, ținând cont și de ceilalți factori care duc la apariția deplasărilor verticale ale terenului. Prezența depozitelor antropice asociate fluctuațiilor apei subterane pot avea un efect și mai puternic în termeni de deplasare verticală a solului, față de cazurile în care stratul superficial este teren natural. O altă asociere care poate produce deplasări ale suprafeței terenului este dată de existența unor soluri mlăștinoase ce pot avea ca strat superior un depozit antropic eterogen.

În cazul analizei evoluției nivelului apei în lacurile din lungul râului Colentina, s-a observat o tendință de descreștere, la fel ca și în cazul deplasărilor terenului determinate din punctele PS, din zonele de subsidență identificate. O excepție este lacul Herăstrău, unde se observă o creștere ușoară a nivelului apei pentru intervalul 2014-2017.

Intervalul de timp pentru care s-au efectuat analizele este relevant, fiind vorba de o perioadă de patru ani. Utilizarea unei serii temporale mai lungi permite însă o analiză mai largă

și identificarea proceselor cu o mai mare acuratețe. Aceasta ar permite identificarea cu o mai mare acuratețe a cauzelor ce produc subsidență sau tasări și anume aspectele preponderent geotehnice, geologice sau hidrogeologice.

Un impediment în realizarea unor analize cât mai coerente este legat și de intervalul de achiziție al datelor și de eterogenitatea acestora. Dacă pentru datele climatice există măsurători zilnice, în cazul măsurătorilor PSI intervalul de achiziție depinde de intervalul de trecere al satelitului. În ultimii ani acest interval s-a micșorat simțitor, odată cu lansarea sateliților Sentinel. Volumul de date de prelucrat este un alt aspect pentru care se configurează diverse soluții atât din punctul de vedere al capacității de stocare cât și al capacității de procesare.

Prezența în Câmpul Colentinei a argilelor și balastului, utilizate ca material de construcție, a dus la apariția mai multor cariere în această zonă a orașului, favorizând apariția ulterioară a depozitelor antropice eterogene care constituie o cauză majoră a deplasărilor pe verticală din zona de studiu.

5. CONCLUZII PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE TELEDETECȚIE PENTRU MONITORIZAREA DINAMICII APELOR SUBTERANE URBANE

5.1. CONCLUZII GENERALE

Tehnici de observare și monitorizare a fenomenului de subsidență

Din cercetările efectuate, se poate evidenția că în ultimele trei decenii, tehnicile InSAR au adus noi elemente în estimarea și interpretarea parametrilor specifici mediului subteran și dinamicii apei subterane, prin investigarea efectelor de la suprafața terenului, pe care acești parametri îi au.

În prezent există mai multe metode de determinare a deplasărilor verticale ale suprafeței terenului, care pot fi enumerate în ordinea apariției cronologice: nivelment geometric, extensometrie, observații GNSS, tehnici InSAR (InSAR, DInSAR, MTI). Aceste tehnici pot fi folosite independent sau pot fi combinate sau utilizate pentru comparații și validări, în vederea unei mai bune înțelegeri a fenomenelor de subsidență. Fiecare dintre aceste metode prezintă avantaje și dezavantaje, care pot fi evidențiate în funcție de mai multe criterii:

- Considerând amplasamentul instrumentului cu ajutorul căruia se efectuează observațiile în vederea determinării deplasărilor verticale ale terenului, nivelmentul de precizie și extensometria sunt metode care folosesc instrumente amplasate în teren, iar observațiile GNSS și tehnicile InSAR sunt tehnologii spațiale, instrumentele de monitorizare aflându-se la bordul sateliților.
- Dacă ne referim la acuratețe, nivelmentul de precizie este cea mai precisă metodă de monitorizare a deplasărilor pe verticală. În cazul tehnicilor InSAR, există o evoluție privind precizia rezultatelor obținute, astfel că de la ordinul centimetric obținut cu ajutorul tehnicii InSAR, s-a ajuns ca mărimea măsurărilor în cazul tehnicilor MTI să fie de ordin milimetric.
- În funcție de zona acoperită, se disting metode care folosesc rețele de puncte (nivelment geometric, extensometrie, GNSS) și metode care au acoperire de suprafață, care poate

depăși 100 km² (tehnici InSAR, DInSAR, MTI). Acest lucru permite identificarea unor zone specifice care sunt afectate de deplasări ale terenului care erau necunoscute înainte de utilizarea metodelor SAR.

- În funcție de rezoluția temporală, se disting metode pentru care se pot stabili campanii de teren lunare sau anuale (nivelment geometric, extensometrie, observații GNSS) și metode pentru care rezoluția temporală este dată de rezoluția temporală a sateliților cu ajutorul cărora sunt achiziționate datele (tehnici InSAR, DInSAR, MTI).
- În funcție de resursele umane și financiare necesare, primele trei metode (nivelment geometric, extensometrie, observații GNSS) realizează achiziții punctuale, care implică utilizarea unor resurse umane (campanii de măsurători pe teren) și financiare mai importante, în comparație cu tehnicile InSAR care pot acoperi zone foarte întinse cu implicarea unei singure persoane pentru procesarea datelor.
- În ceea ce privește datele satelitare SAR, din punct de vedere temporal, putem vorbi de limitarea disponibilității de date satelitare SAR utilizabile pentru determinarea deplasărilor terenului, pentru ultimele decenii, înainte de anii '90 neexistând suficiente date SAR pentru generarea interferogramelor necesare mai apoi în prelucrarea seriilor temporale. Avantajul adus de utilizarea datelor satelitare este acela că oferă posibilitatea de a lucra și în post-procesare, determinarea deplasărilor terenului putând fi determinată la momentul actual pentru o zonă care în anii '90 nu prezenta interes de monitorizare. Caracterul global al achizițiilor satelitare permite ca urmărirea unei zone de interes actuale să fie realizată începând cu momentul de la care au început să fie achiziționate date satelitare. Acest lucru nu este posibil în cazul măsurărilor in-situ. Odată cu evoluția misiunilor satelitare radar, rezoluția temporală a datelor a crescut, în momentul actual, pentru misiunea Sentinel-1 fiind disponibile date la fiecare 6 zile, considerând date de la ambii sateliți, Sentinel-1A și Sentinel-1B, față de 35 de zile în cazul misiunilor ERS-1/2 și Envisat ASAR, în anii '90, 2000.

În privința tehnicilor de teledetecție, există limitări ale utilizării acestora în ceea ce privește acoperirea terenului. Astfel, pentru zonele acoperite cu vegetație se pierde coerența ceea ce face ca în acele zone să nu fie generate ținte PS care să indice deplasările. Altă limitare este asociată capacității de procesare. Deși ca resurse de personal este suficientă o singură persoană pentru a efectua procesarea, cerințele de software și hardware sunt destul de ridicate.

Analizând această lucrare din punct de vedere al senzorilor satelitari utilizați și al rezultatelor obținute, privind comparativ cele două hărți produse din date ENVISAT și date Sentinel-1, se pot observa îmbunătățirile care au fost aduse de-a lungul timpului misiunilor cu senzori radar. Astfel, de la rezoluția spațială de 30 x 30 m specifică senzorului ENVISAT ASAR, s-a trecut la rezoluția spațială de 5 x 20 m pentru senzorii Sentinel-1, ceea ce a dus la îmbunătățirea coerenței și la generarea unui număr mai mare de puncte PS per unitate de suprafață.

Fenomenele de subsidență generate prin modificarea antropică a dinamicii apelor subterane și puse în evidență prin tehnici InSAR

Din literatura de specialitate se poate observa că, la nivel mondial, studiile menționează pomparea apei subterane ca fiind una dintre cauzele principale ale fenomenelor de subsidență.

Studiile de caz din primul capitol documentează răspândirea acestui fenomen pe glob. Se poate face o comparație între țările cu un lung istoric al pompării de apă subterană și în care zonele de subsidență încep să aibă valori tot mai scăzute sau chiar să nu mai fie înregistrate deplasări verticale ale terenului (ex. Tokyo, Japonia) și țările cu o istorie recentă a pompării apei subterane. Deplasările negative pe verticală ale terenului se produc mai rapid în zonele cu un istoric mai recent de subsidență, din cauza cantităților foarte mari de apă subterană care sunt pompat pentru satisfacerea nevoilor de apă pentru populație și pentru industrie (ex. Indonesia). Pentru zonele cu un lung istoric al subsidenței, deoarece în timp au apărut multe efecte negative care urmare a subsidenței (ex. risc de inundații, probleme ale sistemelor de canalizare), au fost luate măsuri pentru a diminua deplasările verticale negative.

Urmărind cele două hărți ale deplasărilor terenului care au fost generate pentru Municipiul București, s-a observat consistența rezultatelor celor două intervale de timp, multe dintre zonele de instabilitate identificate pe harta deplasărilor terenului pentru perioada 2004-2010 prezentând aceleași tendințe și în intervalul 2014-2018.

Cele mai precise rezultate se obțin prin îmbinarea rezultatelor obținute prin mai multe metode de determinare a deplasărilor terenului, un aspect important fiind validarea rezultatelor. Urmărind rezultatele obținute și în lucrări anterioare de monitorizare a deplasărilor terenului în municipiul București (Gheorghe, et al., 2020; Armas, et al., 2017; Poncos, et al., 2014; Vîjdea & Bindea, 2013), s-a constatat că rezultatele obținute în cadrul acestei lucrări sunt consistente cu concluziile celorlalți autori. Aceste analize reprezintă și o modalitate de validare a rezultatelor obținute.

Achizițiile de la senzorii satelitari radar oferă mai multe tipuri de informații care pot fi folosite pentru aplicații din diverse domenii. În cazul în care este vorba de analize privind deplasările suprafeței terenului, informațiile de detecție a modificărilor suprafeței terestre pot fi utilizate în procesul de identificare a sursei deplasărilor. Prin utilizarea combinată a tehnicii PSI cu detectarea modificărilor suprafeței terenului, aria de căutare a sursei deplasărilor este mai corect delimitată și astfel și identificarea cauzei deplasărilor poate fi determinată mai ușor.

Fenomenul de subsidență în zonele urbane, precum municipiul București, poate avea cauze multiple. Cu toate acestea, schimbări ale nivelului piezometric al acviferului din cauza pierderilor din rețelele de distribuție a apei, comportamentul stratelor antropice de umpluturi (cu resturi din materiale de construcții), sau diminuarea infiltrațiilor apei în acvifere din cauza impermeabilizării stratului superficial urban, prezintă un rol important.

Fenomenul de subsidență la nivel urban local

Cu privire la cazul zonei Barbu Văcărescu, aceasta a fost identificată ca zonă de instabilitate din seriile temporale SAR analizate încă din 1992. Urmărind deplasările verticale ale terenului din hărțile PSI generate pentru intervale de timp cuprinse între 1992 și 2018, se poate observa că tendința de instabilitate nu este dată în principal de extinderea spațială și de predominanța punctelor PS care indică subsidență, ci de schimbările care apar în privința amplasării punctelor PS care indică deplasări ale terenului. În foarte multe cazuri punctele PS de instabilitate de pe diversele hărți ale deplasărilor terenului nu se găsesc exact în locurile în care erau amplasate în hărțile anterioare, ci uneori se găsesc în imediata vecinătate a acelor amplasamente sau cuprind parțial fostele amplasamente. Considerând că atributul comun al întregii zone este dat de prezența stratului antropic de umpluturi cu conținut de deșeuri și

materiale de construcții de la demolări, particularitățile fiind date de diferențele geotehnice locale sau de dinamica locală a apei subterane, se poate concluziona că tendințele de deplasare spațială a punctelor PS pun în evidență acest tip de strat urban. Punerea în evidență a comportamentului acestui tip de strat urban, existent în majoritatea aglomerărilor urbane mari, are caracter de pionierat și reprezintă o direcție de cercetare importantă ce necesită investigații viitoare (Radutu, et al., 2020).

Eterogenitatea ridicată a materialului antropic urban poate afecta în mod grav stabilitatea terenului în mediul urban.

Fenomenul de subsidență la nivel regional urban

Analizele din zona regională de studiu din lungul culoarului râului Colentina au pus în evidență o concordanță majoră între variația nivelului apei din lacuri și deplasările pe verticală a zonelor limitrofe. Astfel, în toate cazurile, scăderea nivelului apei în lacuri este însoțită de subsidența zonelor studiate aflate în vecinătatea acestora. Conexiunea hidraulică puternică între salba de lacuri Colentina și primul strat acvifer (pietrișurile de Colentina) este bine definită, fiind pusă în evidență de numeroase studii (CCIAS, 2015b) (Gogu, et al., 2015; Serpescu, et al., 2013)) iar datele piezometrice, deși limitate, validează această interacțiune. Astfel, acest studiu pune în evidență legătura clară între fenomenele de subsidență înregistrate în zonele urbane limitrofe salbei de lacuri Colentina și scăderea nivelului piezometric din primul strat acvifer (Pietrișurile de Colentina).

Prezența depozitelor antropice asociate fluctuațiilor apei subterane pot avea un efect și mai puternic în termeni de deplasare verticală a solului, față de cazurile în care stratul superficial este format din depozite naturale. O altă asociere care poate produce deplasări ale suprafeței terenului este dată de existența unor soluri mlăștinoase ca bază pentru un depozit antropic eterogen.

Intervalul de timp pentru care s-au efectuat analizele este relevant, fiind vorba de o perioadă de patru ani, dar urmărirea pe o perioadă mai îndelungată poate permite o analiză mai amplă în care cauzele subsidenței, de diverse naturi (care țin de aspecte preponderent geotehnice, hidrogeologice sau geologice), să fie identificate cu o mai mare acuratețe.

De cele mai multe ori există un factor principal generator al instabilității, cu toate acestea, există un cumul de fenomene și procese declanșatoare și care întrețin deplasările terenului, putând fi implicați factori geologici, litologici, geotehnici, hidrologici, hidrogeologici. Astfel, în cele mai multe cazuri, există o conexiune directă între cauza principală a deplasării și procesele care au loc în mediul subteran.

Aspecte hidrogeologice caracteristice mediului urban și influența acestora în procesele de deplasare verticală a terenului

Considerând seriile temporale hidrogeologice urbane disponibile pentru zona locală de studiu și pentru zona regională de studiu, pentru zonele de subsidență aflate în aria de incidență a forajelor de monitorizare, s-a observat tendința comună de descreștere a valorilor piezometrice și a valorilor deplasărilor verticale. Un aspect extrem de important care limitează obținerea unor rezultate foarte precise cu privire la magnitudinea contribuției dinamicii apei subterane în dimensiunea deplasărilor verticale ale terenului, este disponibilitatea spațială și temporală foarte redusă a datelor din forajele de monitorizare, precum măsurătorile piezometrice. Pentru rezultate precise și analize bine fundamentate, ar fi necesară implementarea unei rețele cu stații de

monitorizare amplasate corect și gestionată coerent de autorități. De asemenea, o bază de date cu epuismențele permanente și temporare ar putea ajuta la formarea unei imagini corecte cu privire la posibilele surse ale deplasărilor. Lipsa datelor și a seriilor temporale hidrogeologice urbane, de lungă durată, fac dificilă obținerea unor analize cantitative.

Adâncimea subsolurilor clădirilor rezidențiale nou construite care depășește adâncimea la care se găsește primul strat acvifer, poate face necesară utilizarea continuă sau periodică a pompelor din subsol pentru menținerea în stare funcțională a spațiilor utilizate de la subsol. În funcție de volumul de apă pompat, această operațiune poate avea efecte în ceea ce privește modul de curgere al apei subterane, precum și în apariția deplasărilor la suprafața terenului. Prezența rețelei de stații de monitorizare a măsurătorilor piezometrice ar permite validarea acestei ipoteze și ar putea fi utilizată și pentru a încerca o cuantificare a cantității de deplasare care este generată de acest fenomen de pompare, ținând cont și de ceilalți factori care duc la apariția deplasărilor verticale ale terenului (ex. tasările generate de construcția clădirii respective).

Este necesar ca datele hidrogeologice să fie analizate împreună cu datele geologice și datele geotehnice existente în zona de studiu. În arealele de subsidență din zona Colentina s-a observat influența foarte mare pe care o au depozitele antropice în apariția deplasărilor verticale ale terenului, luând în considerare și infrastructurile și construcțiile subterane și supraterane din zonele de interes.

5.2. CONTRIBUȚII PERSONALE ÎN APLICAREA TEHNICILOR DE TELEDETECTIE PENTRU MONITORIZAREA DINAMICII APELOR SUBTERANE URBANE

Pot fi enumerate următoarele contribuții personale:

- Realizarea studiului documentar privind stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în monitorizarea mediului subteran urban;
- Obținerea hărții de distribuție a valorilor deplasărilor verticale ale terenului prin combinarea observațiilor de pe orbita descendentă cu cele de pe orbita ascendentă Sentinel-1 pentru intervalul 2014-2018. Această lucrare este prima lucrare la nivel național în care se obține astfel valoarea deplasării verticale;
- Realizarea hărții corespunzătoare detectării schimbărilor suprafeței terenului pentru un interval de 4 ani (2014-2018), pentru municipiul București;
- Dezvoltarea unui nou produs cartografic, obținut prin combinarea hărții PSI cu harta detectării schimbărilor terenului care poate fi utilizat pentru identificarea mai precisă a potențialilor factori implicați în apariția fenomenelor de subsidență, precum și în activitatea de gestiune sustenabilă a mediului urban;
- Realizarea studiului privind monitorizarea deplasărilor terenului și caracterizarea mediului subteran urban în municipiul București, utilizând tehnici de teledetecție;
- Dezvoltarea analizei la scară locală urbană privind fenomenele și procesele hidrogeologice și geotehnice din mediul subteran urban asociate deplasărilor terenului, determinate prin tehnici PSI (zona Barbu Văcărescu, București);
- Documentarea evoluției spațiale a formei lacurilor din lungul râului Colentina din 1918 până în prezent.

- Extinderea analizei fenomenului de subsidență la nivel regional urban pentru întreg culoarul râului Colentina și identificarea-caracterizarea zonelor critice cu subsidență, puse în evidență prin tehnici de teledetecție

5.3. POTENȚIALE DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

În urma experienței dobândite în dezvoltarea acestei teze de doctorat, am identificat următoarele direcții de cercetare viitoare:

- Aplicarea și îmbunătățirea unui nou produs cartografic, obținut prin combinarea hărții PSI cu harta detectării schimbărilor terenului, care poate fi utilizat pentru identificarea mai precisă a potențialilor factori implicați în apariția fenomenelor de subsidență precum și în activitatea de gestiune sustenabilă a mediului urban.
- Dezvoltarea unor instrumente de analiză, bazate pe tehnici de teledetecție, care să poată fi preluate de către gestionarii zonelor urbane precum și de responsabilii cu implementarea politicilor publice în domeniul dezvoltării teritoriale.
- Dezvoltarea unui sistem de monitorizare bazat pe o rețea de stații de monitorizare urbană a măsurătorilor piezometrice pentru sistemul acvifer alcătuit din primele două strate acvifere ce prezintă o interacțiune majoră cu activitățile antropice ar permite o gestiune integrată a mediului subteran din municipiul București și demonstrarea unei legături între pomparea apei subterane prin sistemele de epuismen și deplasările verticale ale terenului. Un instrument util pentru mediul urban ar fi utilizarea unei stații complexe urbane de monitorizare care să includă o țintă artificială reflectorizantă, *engl. corner reflector*, precum și senzori de suprafață și componente pentru mediul subteran, incluzând diverși senzori și echipamente. Acest instrument de monitorizare poate îmbunătăți procedurile de determinare a deplasărilor terenului din mediul urban.
- Studiul detaliat al depozitelor antropice existente, din punct de vedere al componenței și al caracteristicilor hidraulice, în vederea analizei comportamentului acestora asociate fluctuațiilor nivelului apelor subterane va documenta și îmbunătăți studiile privind deplasările verticale ale suprafeței urbane și va oferi o bază documentară solidă pentru investigațiile geotehnice ale viitoarelor construcții și elemente de infrastructură supraterane și subterane.
- Solurile mlăștinoase din mediul urban, ce pot avea sau nu un strat superior un depozit antropic eterogen, trebuie să fie corect și aprofundat analizate și documentate, deoarece acestea reprezintă un pericol real prin generarea de accidente în cazul dezvoltării unor elemente de infrastructură urbană regională.
- Pentru completarea studiilor geologice și geotehnice, includerea informațiilor de microzonare seismică a orașului București poate fi de interes.
- Considerând variațiile de temperatură, se poate studia care este ordinul de mărime al influenței pe care o are temperatura asupra valorii de măsurare a deplasărilor terenului, ținând cont de materialele diferite pe care le au țintele persistente în teren.

Bibliografie Selectivă

- Airbus. (2021). *Pleiades*. Preluat pe 06 04, 2021, de pe <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8692-pleiades>
- Allaby, M. (2013). *A Dictionary of Geology and Earth Sciences* (ed. 4th). Oxford University Press.
- Armas, I., Gheorghe, M., Lendvai, A., Dumitru, P., Badescu, O., & Calin, A. (2016). InSAR validation based on GNSS measurements in Bucharest. *International Journal of Remote Sensing*, 37(32), 5565-5580. Preluat de pe <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1244367>
- Armas, I., Mendes, D., Popa, R.-G., Gheorghe, M., & Popovici, D. (2017). Long-term ground deformation patterns of Bucharest using multi-temporal InSAR and multivariate dynamic analyses: a possible transpressional system? *Sci Rep*, 7, 43762. doi:<https://doi.org/10.1038/srep43762>
- Balan, S., Poncos, V., Teleaga, D., Nicolae, R., & Apostol, B. (2016). Satellite Monitoring For A Safer Construction Environment. *Romanian Journal of Physics*, 61, 1108-1119. Preluat pe 02 23, 2021, de pe http://www.nipne.ro/rjp/2016_61_5-6/RomJPhys.61.p1108.pdf
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, R1–R54.
- Berardino, P., Fornaro, G., & Lanari, R. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383. doi:10.1109/TGRS.2002.803792
- Biot, M. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidations. *Journal of Applied Physics*, 12(2), 155-164.
- Bitelli, G., Bonsignore, F., Pellegrino, I., & Vittuari, L. (2015). Evolution of the techniques for subsidence monitoring at regional scale: the case of Emilia-Romagna region (Italy). 372, pg. 315-321. Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences. doi:10.5194/piahs-372-315-2015
- Bock, Y., Wdowinski, S., Ferretti, A., Novali, F., & Fumagalli, A. (2012). Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13(3). doi:10.1029/2011GC003976
- Boukhemacha, M. A., Teleaga, D., Serbulea, M.-S., Poncos, V., Serpescu, I., Manoli, D. M., . . . Haagmans, R. (2021). Combined in-situ and Persistent Scatterers Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) monitoring of land surface deformation in urban environments - case study: tunnelling works in Bucharest (Romania). *International Journal of Remote Sensing*, 42(7), 2641-2662. doi:10.1080/01431161.2020.1857876
- Boukhemacha, M., Gogu, C., Serpescu, I., Gaitanaru, D., & Bica, I. (2015). General Aspects on Urban Hydrogeology and Highlights from Bucharest (Romania). *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(6), 1279-1285. doi:10.30638/eemj.2015.138
- Cabral-Cano, E., Dixon, T., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., & Carande, R. (2008). Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *GSA Bulletin*, 120(11/12), 1556–1566. doi:10.1130/B26001.1
- CCIAS. (2013). *Hydrogeological flow model for the Moesic aquifer system (Bucharest Area). Research Project: Sedimentary Media Modelling Platform for Groundwater Management in Urban Areas (SIMPA)*. Scientific Report, Technical University of Civil Engineering Bucharest, Groundwater Engineering Research Center.
- CCIAS. (2015). *Integrated service for urban subsidence phenomena based on space-borne interferometric synthetic aperture radar (InSAR) and hydrogeological-geotechnical hybrid modeling "SIRYS"- Final Summary Report*. Întocmit: Boukhemacha, M.A., Serbulea, M.-S., Teleaga, D., Poncos, V., Serpescu, I., Bugea, A.L., Priceputu A., Constantinescu S.A., Manoli, D.-M., Andronic, A., Gaitanaru, D., Gogu, C.R., Bica, I.

- CCIAS. (2015b). *Scientific Report on Research project: Assessment and monitoring of the urban impact (urban infrastructures) on the aquatic environment represented by the lake in Circului Park*. Scientific Report, No 10, Technical University of Civil Engineering, Groundwater Engineering Research Center, Bucharest, nepublicat.
- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H., & Hong, S.-H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, 150-161. Preluat de pe <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>
- Chen, J., Knight, R., Zebker, H. A., & Schreuder, W. A. (2016). Confined aquifer head measurements and storage properties in the San Luis Valley, Colorado, from spaceborne InSAR observations. *Water Resources Research*, 52, 3623–3636. doi:10.1002/2015WR018466
- CNES. (2021). *SPOT*. Preluat pe 06 04, 2021, de pe <https://spot.cnes.fr/en/SPOT/index.htm>
- Copernicus. (2021). *European Ground Motion Service*. Preluat pe February 9, 2021, de pe <https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>
- Dalla Via, G., Crosetto, M., & Crippa, B. (2012). Resolving vertical and east-west horizontal motion from differential interferometric synthetic aperture radar: The L'Aquila earthquake. *J. Geophys. Res.*, 117, B02310.
- Dana Negula, I., Riscuta, C., Cristescu, C., Popitui, I., Moise, C., Mihalache, C., & Dedulescu, A. L. (2019). Persistent Scatterer Interferometry for Deformation Monitoring of Cultural Heritage Sites: the Case Studies of Magna Curia Palace and the Medieval Fortress of Deva. *Living Planet Symposium, Cultural & Natural Heritage Poster Session*. Milan, Italy: ESA, Living Planet Symposium.
- Dana Negula, I., Sofronie, R., Virsta, A., & Badea, A. (2015). Earth Observation for the World Cultural and Natural Heritage. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 438 – 445. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.114>
- Dănișor, C., Datcu, M., & Dănișor, A. (2018). Estimation of terrain's linear deformation rates using synthetic aperture radar systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 400. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/400/2/022018
- Danisor, C., Pauciuolo, A., & Fornaro, G. (2020). Benefit of SqueeSAR filtering in Topography Reconstructions: an example over the Bucharest area with TerraSAR-X. *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X*. 117182X. online: Proc. SPIE 11718. doi:<https://doi.org/10.1117/12.2572132>
- Declercq, P.-Y., Devleeschouwer, X., & Pouriel, F. (2006). Subsidence revealed by PSInSAR technique in the Ottignies-Wavre area (Belgium) related to water pumping in urban area. *ESA, Proceedings of Fringe 2005 Workshop*.
- Dehls, J., Larsen, Y., Marinkovic, P., Lauknes, T., Stodle, D., & Moldestad, D. (2019). INSAR.NO: A National InSAR Deformation Mapping/Monitoring Service in Norway- From Concept to Operations. *Proceedings of the IGARSS 2019- IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama, Japonia, 28 July–2 August 2019, 5461-5464.
- Dupigny-Giroux, L.-A., & Lewis, J. (1999). A Moisture Index for Surface Characterization over a Semiarid. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(8), 937-945.
- e-geos. (2018). *COSMO-SkyMed System Description & User Guide*. Preluat pe November 6, 2018, de pe http://www.e-geos.it/products/pdf/csk-user_guide.pdf
- ESA & TerraFirma Partners. (2010). *TerraFirma*. Preluat pe November 28, 2018, de pe <http://www.terrafirma.eu.com/>
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonnet, D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February 2007)*. ESA Publications .

- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Foumelis, M. (2016). Vector-based approach for combining ascending and descending persistent scatterers interferometric point measurements. *Geocarto International*, 33(1), 38-52.
- Gaitanaru, S., Gogu, R., Boukhemacha, M., Litescu, L., Zaharia, V., Moldovan, A., & Mihailovici, M. (2017). Bucharest city urban groundwater monitoring system. *Procedia Engineering*, 209, 143-147. doi:10.1016/j.proeng.2017.11.140
- Gaitanaru, S.-D. (2017b). *Teză de doctorat: impactul urban asupra structurilor acvifere*. București: Universitatea Tehnică de Construcții București.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. L. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19, 1459-1486. doi:10.1007/s10040-011-0775-5
- Galloway, D., Hudnut, K., Ingebritsen, S., Phillips, S., Peltzer, G., Rogez, F., & Rosen, P. (1998, October). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 34(10), 2573-2585. Preluat de pe <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/98WR01285/pdf>
- Gambolati, G., Teatini, P., & Ferronato, M. (2006). Anthropogenic Land Subsidence. În M. A. McDonnell (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa164b>
- Gheorghe, D., & Armaș, I. (2015). InSAR applications in environmental sciences. *Geopolitics, History, and International Relations*, 7(2), p.278.
- Gheorghe, M., Armas, I., Dumitru, P., Calin, A., Badescu, O., & Necsoiu, M. (2020). Monitoring subway construction using Sentinel-1 data: a case study in Bucharest, Romania. *International Journal of Remote Sensing*, 41(7), 2644-2663. doi:10.1080/01431161.2019.1694723
- GOCE. (2015). *GOCE* ESA. Preluat de pe https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Introducing_GOCE
- Gogu, C., Gaitanaru, D., Boukhemacha, M., Serpescu, I., Litescu, L., Zaharia, V., . . . Mihailovici, M. (2017). Urban Hydrogeology studies in Bucharest City, Romania. *Elsevier, Procedia Engineering*, 209, 135-142. Preluat de pe <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.139>
- Gogu, C., Serpescu, I., Perju, S., Gaitanaru, D., & Bica, I. (2015). Urban Groundwater Modeling Scenarios to simulate Bucharest city lake disturbance., *Proceedings of the 15th SGEM GeoConference on Sci and Technol in Geology, Exploration and Min*, pg. 834-840. Albena, Bulgaria.
- Gogu, R., Velasco, V., Vazquez-Sune, E., Gaitanaru, D., Chitu, Z., & Bica, I. (2011). Sedimentary media analysis platform for groundwater modeling in urban areas. În S. G. Lambrakis N. (Ed.), *Advances in the Research of Aquatic Environment. Environmental Earth Sciences* (Vol. 2, pg. 489-496). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-24076-8_57
- G-REALM, U. (2018). *USDA, IPAD, G-REALM*. Preluat de pe https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/
- Grigorescu, I. (2010). *Modificările mediului în aria metropolitană a municipiului București*. București: Editura Academiei Române.
- INS-DRS. (2019). *INS-Direcția Regională de Statistică a Municipiului București*. Preluat pe 07 20, 2019, de pe <http://www.bucuresti.insse.ro/despre-bucuresti/>
- Karila, K., Karjalainen, M., Hyyppä, J., Koskinen, J., Saaranen, V., & Rouhiainen, P. (2013). A Comparison of Precise Leveling and Persistent Scatterer SAR Interferometry for Building Subsidence Rate Measurement. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 2, 797-816. doi:10.3390/ijgi2030797

- Kim, S.-W., & Won, J.-S. (2003). Measurements of soil compaction rate by using JERS-1 SAR and a prediction model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2683-2686. doi:10.1109/TGRS.2003.817185
- Lacatusu, R., Anastasiu, N., Popescu, M., & Enciu, P. (2008). *Geo-atlasul municipiului București*. București: Editura Estfalia.
- Liu, D., & Niemeier, W. (2014). Process-related deformation monitoring by PSI using high resolution space-based SAR data: a case study in Düsseldorf, Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2, 4813-4830. doi:10.5194/nhessd-2-4813-2014
- Manea, S. (2016). *Expetiză Tehnică Imobil Locuință P+IE+M, str. Turnul Eiffel*.
- Meijerink, A. (2007). *Remote Sensing Applications to Groundwater* (Vol. IHP-VI, Series on Groundwater No.16). Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Moise, C., Dana Negula, I., Mihalache, C. E., Lazar, A. M., Dedulescu, A. L., Rustoiu, G. T., . . . Badea, A. (2021). Remote Sensing for Cultural Heritage Assessment and Monitoring: The Case Study of Alba Iulia. *Sustainability*, 13(3)(1406). doi:https://doi.org/10.3390/su13031406
- Moise, C., Mihalache, C., Dedulescu, A., Lazar, A., Badea, A., & Dana Negula, I. (2020). Advanced multi-source approach for cultural heritage assessment and monitoring – the case study of the Corvin Castle and its surroundings. online: EGU General Assembly 2020. doi:https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-16549
- Mutihac, V. (1990). *Strucura geologică a teritoriului României*. București: Editura Tehnică.
- NASA GPM. (2017). *Global Precipitation Measurement*. Preluat de pe National Aeronautics and Space Administration: https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview/index.html
- NOAA. (2018). *National Oceanic and Atmospheric Administration, Ocean Exploration*. Preluat de pe https://oceanexplorer.noaa.gov/edu/learning/7_water_cycle/water_cycle.html#slide
- PANGEO. (2013). *PANGEO*. Preluat de pe <http://www.pangeoproject.eu/>
- Park, C., & Allaby, M. (2017). *A Dictionary of Environment and Conservation* (ed. 3). Oxford University Press. doi:10.1093/acref/9780191826320.001.0001
- Perissin, D., Wang, Z., & Lin, H. (2012). Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73, 58-67. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002
- Poenaru, V., Badea, A., Cimpeanu, S., & Dana Negula, I. (2015). Synthetic aperture radar for assessing land degradation in a salt mining area – Ocnele. *Romanian Journal of Geography*, 59(2), 117-127.
- Poenaru, V., Badea, A., Savin, E., Teleagă, D., & Poncos, V. (2011). Land degradation monitoring in the Ocnele Mari salt mining area using satellite imagery. 8181. Prague, Czech Republic: Proc. SPIE 8181, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II. doi:https://doi.org/10.1117/12.898022
- Poland, J. S. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. UNESCO.
- Poncos, V., & Dana, I. (2008). Interferometric Generation Of Digital Elevation Models For Urban Areas Using Terrasar-X. 3. *TerraSAR-X Science*. Oberpfaffenhofen, Germany: DLR.
- Poncos, V., Serban, F., Teleaga, D., Ciocan, V., Sorin, M., Caranda, D., . . . Raduca, V. (2012). Water induced geohazards measured with spaceborne interferometry techniques. *EGU General Assembly 2012*. 14, pg. EGU2012-4654. Geophysical Research Abstracts. Preluat pe February 15, 2021, de pe <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/EGU2012-4654.pdf>
- Poncos, V., Serban, F., Teleaga, D., Hannich, D., & Micu, M. (2010). Monitoring Geomorphologic Changes and Ground Instability using SAR Interferometric Techniques. *ESA Living Planet Symposium*. Bergen, Norway.

- Poncos, V., Teleaga, D., Boukhemacha, M., Toma, S., & Serban, F. (2014). Study of urban instability phenomena in Bucharest city based on Ps-InSAR. *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pg. 429-432). Quebec City, QC, Canada: IEEE. doi:10.1109/IGARSS.2014.6946450
- Poncos, V., Teleaga, D., Patrascu, C., & Datcu, M. (2013). Monitoring Urban Subsidence in Bucharest City with TerraSAR-X. *5th TerraSAR-X Science Team Meeting*. Oberpfaffenhofen, Germany: DLR.
- Radutu, A., Venvik, G., Ghibus, T., & Gogu, R. (2020). Sentinel-1 Data for Underground Processes Recognition in Bucharest City, Romania. *Remote Sensing*, 12(24), 4054. doi:https://doi.org/10.3390/rs12244054
- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D., Adam, N., & Moretti, S. (2014). Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 78-89.
- Rocca, F., Prati, C., & Ferretti, A. (1997). An overview of SAR Interferometry. *The 3rd ERS Symposium, Florence 1997*. Florence. Preluat pe November 6, 2018, de pe <http://earth.esa.int/workshops/ers97/program-details/speeches/rocca-et-al/>
- Scrădeanu, D., & Alexandru, G. (2007). *Hidrogeologie Generală*. București: Ed. Universității din București.
- Serpescu, I., Radu, E., Gogu, C., Boukhemacha, M., Gaitanaru, D., & Bica, I. (2013). 3D GEOLOGICAL MODEL OF BUCHAREST CITY QUATERNARY DEPOSITS. *13th SGEM GeoConference on Sci and Technol in Geology, Exploration and Min 2:1-8*. doi:10.5593/SGEM2013/BA1.V2/S02.001
- Solari, L., Ciampalini, A., Raspini, F., Bianchini, S., Zinno, I., Bonano, M., . . . Casagli, N. (2017). Combined Use of C- and X-Band SAR Data for Subsidence Monitoring in an Urban Area. *Geosciences*, 7(21). doi:10.3390/geosciences7020021
- Toma, S., Teleaga, D., & Poncos, V. (2018). Ground Stability Analysis of Constanta City, Romania Through Psi with Atmospheric Phase Screen Removal Using Era-Interim Data. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia: IEEE. doi:10.1109/IGARSS.2018.8517958
- uni-goettingen. (2021). AWF-Wiki. (Chair of Forest Inventory and Remote Sensing at the Georg-August-Universität Göttingen) Preluat pe 02 25, 2021, de pe http://wiki.awf.forst.uni-goettingen.de/wiki/index.php/SAR_change_detection_with_SNAP
- USGS. (2021). *Landsat Missions*. Preluat pe 06 04, 2021, de pe <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>
- Vîjdea, A., & Bindea, G. (2013). *D7.1.33 GeoHazard Description for Bucharest, Enabling Access to Geological Information in Support of GMES (PANGEO)*.
- Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, 174, 103-138. Preluat de pe <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>
- Zerbini, S., Richter, B., Rocca, F., van Dam, T., & Matonti, F. (2007). A Combination of Space and Terrestrial Geodetic Techniques to Monitor Land Subsidence: Case Study, the Southeastern Po Plain, Italy. *Journal Of Geophysical Research*, 112 (B05401). doi:10.1029/2006JB004338
- Zhang, L., Ding, X., Feng, G., & Lu, Z. (2009). Ground settlement monitoring from temporarily persistent scatterers between two SAR acquisitions. *2009 Joint Urban Remote Sensing Event*. Shanghai: IEEE. doi:10.1109/URS.2009.5137659
- Zhao, Z., Jia, Z., Guan, Z., & Chunyan, X. (2019). The Effect of Climatic and Non-climatic Factors on Groundwater Levels in the Jinghuiqu Irrigation District of the Shaanxi Province, China. *Water*, 11(956), 18. doi:https://doi.org/10.3390/w11050956