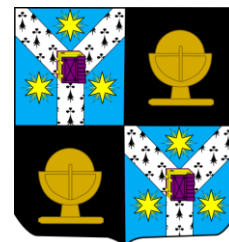


Universitatea Alexandru Ioan Cuza din Iași
Facultatea de Geografie și Geologie
Școala Doctorală de Geoștiințe



Aplicarea Interferometriei SAR Diferențiale și a modelării numerice pentru investigarea alunecărilor de teren cu mișcare lentă

- Rezumatul tezei de doctorat -

Student-doctorand:

Nicușor NECULA

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. hab. Adrian GROZAVU

Cuprins

CUPRINS	2
LISTA PRESCURTĂRIILOR.....	4
LISTĂ DE FIGURI.....	5
LISTĂ DE TABELE	6
INTRODUCERE.....	7
OBIECTIVELE LUCRĂRII.....	9
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII: ALUNECĂRI, MT-INSAR, SIMULĂRI NUMERICE.....	12
1.1 PROBLEMATICA ALUNECĂRIILOR DE TEREN	12
1.2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN INTERFEROMETRIA SAR DIFERENȚIALĂ	14
1.3 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN MODELAREA NUMERICĂ A ALUNECĂRIILOR DE TEREN	16
2. ZONA DE STUDIU.....	18
2.1 ÎNCADRAREA FIZICO-GEOGRAFICĂ A ZONEI DE STUDIU	18
2.2 CARACTERISTICILE GEOLOGICE ȘI GEOMORFOLOGICE CA FACTORI PRECONDIȚIONALI AI ALUNECĂRIILOR	20
2.3 PRECIPITAȚIILE CA FACTOR DECLANȘATOR AL ALUNECĂRIILOR	23
2.4 ALUNECĂRIILE DE TEREN DIN MUNICIPIUL IAȘI	24
2.4.1 Alunecarea de teren Țicău	27
3. MATERIALE.....	29
3.1 DATELE SAR DE TELEDETECTIE	29
3.2 DATELE ALTITUDINALE.....	30
3.3 DATELE GEOTEHNICE.....	30
3.4 DATELE CLIMATICE.....	32
4. METODE	33
4.1 INTERFEROMETRIA ȘI TEHNICILE MULTI-TEMPORALE DE INTERFEROMETRIE SAR DIFERENȚIALĂ (MT-INSAR).....	33
4.1.1 Sistemul activ SAR.....	33
4.1.2 Interferometria SAR și interferograma.....	33
4.1.3 Tehnici avansate de interferometrie SAR diferențială.....	35
4.1.4 Produsele MT-InSAR.....	37
4.2 MODELAREA NUMERICĂ (A DINAMICII ALUNECĂRII)	38
4.2.1 Procesul de lucru în FLAC.....	39
4.3 PROCESAREA STATISTICĂ.....	41
4.3.1 Post-procesarea rezultatelor MT-InSAR.....	41
4.3.2 Procesarea datelor climatice	42
5. REZULTATE.....	43
5.1 MT-INSAR	43
5.2 POST-PROCESAREA STATISTICĂ A REZULTATELOR MT-INSAR	54
5.3 MODELAREA NUMERICĂ	55
6. DISCUȚII.....	58
6.1 DINAMICA VERSANȚILOR DIN MUNICIPIUL IAȘI	58
6.2 TIPOLOGIA, MECANISMUL ALUNECĂRII ȘI VALIDAREA ACESTORA	59

6.3	BENEFICIILE ȘI LIMITĂRILE ANALIZEI	61
CONCLUZII	63
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE		67

Lista prescurtărilor

A-DInSAR – **A**dvanced **D**ifferential **SAR** **I**nterferometry techniques

ALS – **A**irborne **L**aser **S**canning

ASAR – **A**dvanced **S**ynthetic **A**perture **R**adar

CE – **C**omisia **E**uropeană

DE – **D**iscrete **E**lement method

DEM – **D**igital **E**levation **M**odel

DInSAR – **D**ifferential **SAR** **I**nterferometry

DSM – **D**igital **S**urface **M**odel

ENVISAT – **ENV**ironmental **SAT**ellite

ERS – **E**uropean **R**emote-**S**ensing

FDM – **F**inite **D**ifference **M**ethod

FEM – **F**inite **E**lement **M**ethod

FoS – **F**actor of **S**afety

GPS – **G**lobal **P**ositioning **S**ystem

LEM – **L**imit **E**quilibrium **M**ethod

LiDAR – **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging

LOS – **L**ine **O**f **S**ight

MNASt – **M**odel **N**umeric **A**ltitudinal al **S**uprafeței **T**erenului

MNT – **M**odel **N**umeric al **T**erenului

MT-InSAR – **M**ulti-**T**emporal **SAR** **I**nterferometry

PFEM – **P**article **F**inite **E**lement **M**ethod

PS¹ – **P**ermanent **S**catterers

PSI – **P**ermanent **S**catterers **I**nterferometry

RADAR – **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging

RAR – **R**ead **A**perture **R**adar

SAR – **S**ynthetic **A**perture **R**adar

SBAS – **S**mall **B**aseline **S**ubset

TLS – **T**errestrial **L**aser **S**canning

¹ În cadrul tezei de doctorat, termenul de „puncte PS” este utilizat pentru rezultatele procesării seturilor de date Sentinel-1 deoarece nu există o traducere standard a acestuia și nici un alt termen echivalent în limba română care să reflecte corespunzător semnificația lui.

Listă de figuri

FIGURA 1. POZIȚIA FIZICO-GEOGRAFICĂ A MUNICIPIULUI IAȘI.....	19
FIGURA 2. INVENTARUL ALUNECĂRILOR DE TEREN (NECULA ȘI NICULIȚĂ, 2017); NUMĂRUL DIN PANTEZĂ REPREZINTĂ TIPOLOGIA ALUNECĂRILOR DE TEREN DUPĂ CLASIFICAREA ACTUALIZATĂ A LUI HUNGR ET AL. (2014) ȘI ADAPTATĂ ÎN ROMÂNĂ DE NICULIȚĂ (2020A)	21
FIGURA 3. GEOLOGIA MUNICIPIULUI IAȘI (DUPĂ NECULA ȘI NICULIȚĂ, 2017).	22
FIGURA 4. PRECIPITAȚIILE MEDII ANUALE MĂSURATE LA STAȚIA METEOROLOGICĂ IAȘI (DATELE DIN PERIOADA 1921-1955 SUNT DIN GUGIUMAN ȘI ERHAN (1960) , IAR PENTRU PERIOADA 1961-2018 DATELE PROVIN DIN BAZA DE DATE ECA&D (KLEIN TANK ET AL., 2002; HAYLOCK ET AL., 2008). ÎN PARTEA DE JOS SUNT REPREZENTATE ALUNECĂRILE DE TEREN CARE AU AVUT LOC ÎN MUNICIPIUL IAȘI (MODIFICATĂ DUPĂ NECULA ET AL., 2021).	23
FIGURA 5. CURBA DE MAGNITUDINE-FRECVENȚĂ PENTRU DIVERSE INVENTARE DE PE GLOB (MALAMUD ET AL., 2004B), PENTRU INVENTARUL DIN PODIȘUL MOLDOVEI (MĂRGĂRINT ȘI NICULIȚĂ, 2017), PENTRU INVENTARUL ALUNECĂRILOR DE TEREN DIN ULTIMII 100 ANI DIN ZONA METROPOLITANĂ IAȘI (NICULIȚĂ ET AL., 2018) ȘI PENTRU INVENTARUL GEOMORFOLOGIC AL MUNICIPIULUI IAȘI.	26
FIGURA 6. ALUNECAREA DE TEREN ȚICĂU. (A) VEDERE DETALIATĂ A ALUNECĂRII. FOTOGRAFIILE SUNT ÎN FIGURA 15; (B) FOTOGRAFIE AERIANĂ ASUPRA CARTIERULUI ȚICĂU. LINIA ROȘIE CONTINUĂ REPREZINTĂ CORNIȘA PRINCIPALĂ AFECTATĂ DE MAI MULTE REACTIVĂRI ÎN TRECUT. LINIA ROȘIE PUNCTATĂ PREZINTĂ LOCAȚIA APROXIMATIVĂ A ALUNECĂRII DE TEREN INVESTIGATE. LINIA ALBASTRĂ REPREZINTĂ DIRECȚIA PROFILULUI GEOLOGIC; (C) PROFIL GEOLOGIC DE-A LUNGUL VERSANTULUI.	27
FIGURA 7. MODELUL GEOMETRIC AL VERSANTULUI UTILIZAT PENTRU SIMULĂRILE NUMERICE. STELUȚELE REPREZINTĂ POZIȚIA PUNCTELOR CU ISTORICUL MAGNITUDINII DEPLASĂRIILOR.	31
FIGURA 8. PRINCIPIUL INTERFEROMETRIEI SAR.	34
FIGURA 9. GRAFICUL DE CONEXIUNE A IMAGINILOR SAR ÎN PROCESUL DE CREARE A INTERFEROGRAMELOR: PS-INSAR (STÂNGA) ȘI SBAS (DREAPTA).	36
FIGURA 10. SCHIȚĂ A DEFORMĂRIILOR PRODUSE DE ALUNECĂRI MĂSURATE PE DIRECȚIA LOS. MĂSURĂTORILE SUNT NEGATIVE ATUNCI CÂND ALUNECAREA SE ÎNDEPĂRTEAZĂ DE SATELIT (SĂGEATA ROȘIE) ȘI SUNT POZITIVE ATUNCI CÂND MATERIALUL ALUNECAT SE APROPIE DE SATELIT (SĂGEATA ALBASTRĂ).	37
FIGURA 11. NOMENCLATURA GENERALĂ A LIMBAJULUI FLAC.....	40
FIGURA 12. HARTA VITEZEI DE DEPLASARE REZULTATE ÎN URMA PROCESĂRII SETULUI DE DATE SENTINEL-1, ORBITA ASCENDENTĂ, PENTRU PERIOADA 2014-2018. PENTRU CLASIFICAREA ALUNECĂRILOR AM UTILIZAT CLASIFICAREA PROPUȘĂ DE HUNGR ET AL. (2014) ȘI ADAPTATĂ ÎN ROMÂNĂ DE NICULIȚĂ (2020A)	44
FIGURA 13. HARTA VITEZEI DE DEPLASARE REZULTATE ÎN URMA PROCESĂRII SETULUI DE DATE SENTINEL-1, ORBITA DESCENDENTĂ, PENTRU PERIOADA 2014-2018. PENTRU CLASIFICAREA ALUNECĂRILOR AM UTILIZAT CLASIFICAREA PROPUȘĂ DE HUNGR ET AL. (2014) ȘI ADAPTATĂ ÎN ROMÂNĂ DE NICULIȚĂ (2020A)	45
FIGURA 14. HARTA VITEZEI DE DEPLASARE PENTRU ALUNECAREA ȚICĂU ÎN URMA PROCESĂRII SETULUI DE DATE SENTINEL-1, ORBITA ASCENDENTĂ.	46
FIGURA 15. HARTA VITEZEI DE DEPLASARE PENTRU ALUNECAREA ȚICĂU ÎN URMA PROCESĂRII SETULUI DE DATE SENTINEL-1, ORBITA DESCENDENTĂ.....	47
FIGURA 16. HARTA VITEZEI DE DEPLASARE REZULTATE ÎN URMA PROCESĂRII SETULUI DE DATE ENVISAT, ORBITA ASCENDENTĂ, PENTRU PERIOADA 2002-2009. PENTRU CLASIFICAREA ALUNECĂRILOR AM UTILIZAT CLASIFICAREA PROPUȘĂ DE (HUNGR ET AL., 2014) ȘI ADAPTATĂ ÎN ROMÂNĂ DE (NICULIȚĂ, 2020A).	49
FIGURA 17. HARTA VITEZEI DE DEPLASARE PENTRU ALUNECAREA ȚICĂU ÎN URMA PROCESĂRII SETULUI DE DATE ENVISAT, ORBITA ASCENDENTĂ.....	50

FIGURA 18. HARTA VITEZEI DE DEPLASARE PROIECTATĂ DE-A LUNGUL PANTEI MAXIME: (A) PENTRU ORBITA ASCENDENTĂ ȘI (B) PENTRU ORBITA DESCENDENTĂ.....	51
FIGURA 19. HARTA COMPONENTELOR 2D A VITEZEI DE DEPLASARE: (A) COMPONENTUL VERTICAL ȘI (B) COMPONENTUL ORIZONTAL PE DIRECȚIA EST-VEST.	52
FIGURA 20. TRENDUL SERIILOR TEMPORALE ALE DEPLASĂRIILOR SENTINEL-1, PENTRU VERSANTUL NORD-ESTIC AL DEALULUI COPOU ȘI CANTITATEA DE PRECIPITAȚII PENTRU PERIOADA ANALIZATĂ.....	53
FIGURA 21. ZONAREA OFICIALĂ A PERICOLULUI DE ALUNECARE DE TEREN, HOT-SPOT-URILE VITEZEI ALUNECĂRII IDENTIFICATE ȘI INVENTARUL ALUNECĂRIILOR DE TEREN DIN MUNICIPIUL IAȘI (DUPĂ NECULA ET AL., 2021).....	54
FIGURA 22. MAGNITUDINEA DEPLASĂRIILOR OBTINUTE ÎN URMA SIMULĂRIILOR NUMERICE FOLOSIND COMBINAȚII DIFERITE ALE PARAMETRIILOR MATERIALULUI ALUNECAT. LINIA ROȘIE PUNCTATĂ REPREZINTĂ PUNCTUL DIN CARE MODELUL A FOST EXTINS ARTIFICIAL PENTRU A ELIMINA INFLUENȚA LIMITEI MODELULUI, DECI NU REPREZINTĂ TOPOGRAFIA REALĂ.....	56
FIGURA 23. DEPLASĂRIILE AȘTEPTATE ÎN FUNCȚIE DE TIPOLOGIA ALUNECĂRII (MODIFICATĂ DUPĂ CASCINI ET AL., 2010).	60

Listă de tabele

TABELUL 1. PARAMETRII SPECIFICI AI IMAGINILOR SAR UTILIZATE ÎN ANALIZA NOASTRĂ.	29
TABELUL 2. PROPRIETĂȚILE GEOTEHNICE ATRIBUITE MATERIALELOR UTILIZATE ÎN MODELAREA NUMERICĂ.	32

Introducere

Impactul antropic, prin modificările geomorfologice și hidrologice pe care le induce, este un factor declanșator și pregătitor pentru declanșarea și/sau reactivarea alunecărilor de teren. În același timp, pe măsură ce alunecările de teren evoluează, acestea intervin în controlul activităților umane. Această acțiune cu dublu sens creează o buclă interconectată a acestor două procese care depind și se influențează unul pe celălalt.

Alunecările de teren se numără printre hazardurile naturale care produc cele mai mari pagube economice și umane la nivel global (**Crozier și Glade, 2005**). La nivelul României, acest hazard poate deveni unul dintre factorii limitativi importanți, care interferează din ce în ce mai mult cu politicile de dezvoltare ale infrastructurii, extinderea rețelelor de utilități și care pot limita expansiunea zonelor urbanizate. În același timp, acțiunile antropice de modernizare duc la declanșarea și reactivarea acestor procese geomorfologice. Pe lângă dezvoltarea urbană și impactul antropic ca urmare a dezvoltării și expansiunii urbane (**Jaboyedoff et al., 2016**), schimbările climatice globale sunt un alt factor care contribuie și mărește exponențial posibilitatea de declanșare a alunecărilor de teren (**Gariano și Guzzetti, 2016**).

Drept urmare, investigarea și monitorizarea alunecărilor de teren reprezintă un subiect de mare interes la nivel mondial în momentul de față, problematica acestora fiind identificată încă din secolul trecut (**Brabb, 1991**). Din acest motiv, sunt realizate din ce în ce mai multe studii cu scopul de a înțelege modul de producere și dinamica lor. Acest lucru este important în încercarea de prevenire a producerii acestora sau pentru a diminua efectele negative pe care le cauzează, atât asupra clădirilor (construcțiilor), a infrastructurii, sau a patrimoniului, cât mai ales în scopul prevenirii pierderilor de vieți omenești.

În situații critice, ele distrug și provoacă daune clădirilor, infrastructurii și patrimoniului (**Fastellini et al., 2011**) și pot duce la pierderi economice foarte mari, aspect început a fi observat încă de la sfârșitul secolului anterior (**Alexander, 1986, 1989**;

Schuster și Fleming, 1986; Schuster, 1996; Petley, 2008; Kjekstad și Highland, 2009; Haque et al., 2016; Froude și Petley, 2018).

Astfel, fiind unul dintre hazardurile naturale care pot produce pagube majore la nivel global, pentru combaterea efectelor produse de acestea, sau chiar prevenirea lor, au fost gândite și dezvoltate mai multe metode, tehnici și instrumente pentru abordarea și înțelegerea mai bună a acestor procese. Printre acestea se identifică și tehnicile avansate de Interferometrie SAR Diferențială (A-DInSAR) (Bürgmann et al., 2000; Rosen et al., 2000) și modelarea numerică (Duncan, 1996a; Lorig și Varona, 2017) care, în ultimul timp, au devenit metode intens utilizate pentru detectarea, monitorizarea și investigarea alunecărilor de teren (Castaldo et al., 2015; De Novellis et al., 2016; Hu et al., 2020).

Aceste abordări au cunoscut un progres foarte mare în ultimele decenii ca urmare a avansului tehnologic care permite utilizarea unor computere performante pentru realizarea rapidă a calculelor matematice avansate. Ele sunt capabile să ofere informații de foarte bună calitate în ceea ce privește dimensiunea arealului afectat de alunecare, date privind dinamica alunecării (direcția de alunecare, viteza de alunecare), identificarea mecanismului și a suprafeței de alunecare, cât și influența factorilor care condiționează magnitudinea și dinamica procesului.

Informațiile obținute prin exploatarea acestor metode sunt importante din mai multe puncte de vedere:

- *geomorfologic*, se obțin informații despre comportamentul alunecării ce pot constitui mai departe o sursă de date pentru investigarea acestor procese la scară regională;
- *geotehnic*, se obțin informații despre suprafața de alunecare și mecanismul alunecării;
- *economic și administrativ*, oferă autorităților o bază de date importantă pentru gestionarea fondurilor și implementarea unor strategii eficiente de stabilizare a fenomenului acolo unde este necesar.

În prezent, sunt din ce în ce mai multe studii care integrează tehnicile MT-InSAR și de modelare numerică datorită eficienței lor ridicate în monitorizarea și evaluarea stării dinamicii alunecărilor de teren, însă sunt utilizate în zone care dispun de o mulțime de date in situ (Calò et al., 2014; Cevasco et al., 2018; Hu et al., 2020; Notti et al., 2021). În schimb, utilizarea lor în regiunile fără măsurători in situ adecvate este încă o provocare și nu este încă exploatată pe deplin.

În această teză de doctorat, vor fi utilizate în primul rând tehnicile MT-InSAR pentru a identifica zonele critice din municipiul Iași care prezintă deformări legate de alunecări de teren. În continuare, interesul nostru se concentrează pe alunecarea de teren Țicău, una dintre alunecările active care afectează cartierul rezidențial de pe versantul nord-estic al Dealului Copou. Partea provocatoare a investigației este legată de lipsa datelor in situ necesare pentru modelarea comportamentului materialului alunecat. Pentru a înțelege mecanismul și dinamica alunecării de teren, am utilizat codul Diferențelor Finite (FDM) pe o secțiune care trece prin alunecarea de teren și am simulat mai multe scenarii care pot descrie deformările și modelul observat. În cele din urmă, am analizat simulările și rezultatele MT-InSAR, hărțile de viteză, seriile temporale de deplasare și magnitudinea deplasărilor rezultate în urma simulărilor pentru a evidenția părțile active și cele mai periculoase zone ale corpului alunecării cât și pentru a valida mecanismul de alunecare propus și tipul geomorfologic al alunecării.

Ținând cont de cele enumerate mai sus, reiese că tema de cercetare aleasă și tratată în cadrul acestei teze de doctorat este o temă de actualitate, de interes global, care stârnește curiozitatea științifică internațională și pentru care ar trebui acordate mai multe resurse, atât la nivelul României, cât și local, la nivelul municipiului Iași, pentru a combate și preveni cu eficacitate efectele negative pe care aceste procese geomorfologice le pot cauza.

Obiectivele lucrării

Obiectivele acestei teze au fost stabilite în funcție de necesitățile actuale de cunoaștere și înțelegere a riscurilor, atât la nivel global cât și la nivel local, astfel încât să contribuie la îmbunătățirea siguranței oamenilor și creșterea rezilienței comunității în care trăiesc. După cum a fost subliniat și în subcapitolul anterior, alunecările de teren reprezintă o provocare actuală de mare anvergură care ridică mari probleme și instigă la dezbateri în vederea prevenirii și combaterii efectelor acestora.

În vederea investigării alunecărilor de teren trebuie avut în vedere că aceste procese geomorfologice sunt diferite din punctul de vedere al mecanismului deplasării. Din acest motiv, abordările utilizate în investigarea și analiza dinamicii alunecărilor nu sunt standard pentru toate tipologiile, ci din contră, de multe ori este necesară utilizarea unor metode specifice sitului investigat.

În cadrul acestei teze ne focusăm asupra alunecărilor de teren caracterizate de viteze mici de deplasare, care le încadrează în categoria alunecărilor de teren foarte lente, cu viteze tipice de 16 mm/an, conform clasificărilor propuse de [Cruden și Varnes \(1996\)](#) și [Hungar et al. \(2014\)](#). Aceste tipuri de alunecări necesită lucrări permanente de consolidare și mentenanță pentru a diminua pagubele pe care le pot provoca. Această situație se regăsește și la nivelul municipiului Iași, oraș care se confruntă în permanență cu probleme cauzate de prezența alunecărilor active și reactivări ale celor vechi, mai ales pe versantul nord-estic al Dealului Copou unde se regăsește cartierul rezidențial Țicău.

Scopul tezei de doctorat este de a evalua fiabilitatea utilizării a două tehnici din domenii diferite, dar complementare, pentru investigarea și evaluarea dinamicii alunecărilor de teren cu mișcare lentă care afectează zonele urbanizate. Aceste două abordări, și anume, metodele multi-temporale avansate de Interferometrie SAR Diferențială (MT-InSAR) și modelările numerice pe baza Metodei Diferențelor Finite (FDM), au mai fost utilizate până acum în investigarea alunecărilor de teren, dar acest lucru s-a realizat numai în cazuri în care alunecarea respectivă dispunea de foarte multe date in-situ: piezometre, înclinometre, analize geotehnice adecvate, măsurători GPS (*Global Positioning System*) multi-temporale, etc. În cazul de față, alunecarea de teren nu dispune de surse de date adecvate, ceea ce face mult mai dificilă evaluarea corectă a acestui proces, în termeni de magnitudine, suprafața spațială afectată, rata de deplasare, tipologie și mecanismul alunecării.

Pentru investigarea zonelor cu probleme cauzate de alunecările de teren cât și analiza detaliată a dinamicii alunecării de teren Țicău, ne propunem să utilizăm capacitățile acestor două tehnici moderne și sofisticate care au progresat enorm de mult în ultimii 20 de ani, ca urmare a avansului tehnologic la nivel global.

Pe baza acestor premise putem defini două obiective principale pe care ni le propunem, și anume:

OP.1 Identificarea zonelor din municipiul Iași afectate de alunecări de teren active cu ajutorul tehnicilor multi-temporale de Interferometrie SAR Diferențială;

OP.2 Identificarea tipologiei și mecanismului alunecării de teren Țicău pe baza modelărilor numerice și a seriilor temporale MT-InSAR.

Pentru realizarea acestor obiective majore, ne propunem îndeplinirea următoarelor obiective specifice:

OS.1 Încadrarea conceptuală a tehnicilor avansate de Interferometrie SAR Diferențială și a modelării numerice;

OS.2 Crearea hărților cu vitezele medii anuale de suprafață pentru fiecare set de imagini SAR satelitare, atât ale misiunii active Sentinel-1, cât și a datelor arhivate ale misiunilor anterioare (ENVISAT și ERS);

OS.3 Analiza seriilor temporale de deplasare în vederea identificării perioadelor de accelerare, respectiv decelerare a deplasărilor;

OS.4 Analiza seriilor temporale de deplasare în raport cu precipitațiile atmosferice;

OS.5 Calcularea vectorilor componentelor verticale și orizontale ale măsurătorilor InSAR;

OS.6 Configurarea modelului geometric și geotehnic al alunecării de teren Țicău;

OS.7 Analiza câmpurilor magnitudinii deplasărilor și a indicatorilor de plasticitate ale simulărilor pentru identificarea mecanismului alunecării;

OS.8 Analiza dinamicii materialului alunecat pe baza punctelor istorice din cadrul alunecării în vederea înțelegerii deplasărilor pe verticală.

1. Stadiul actual al cercetării: alunecări, MT-InSAR, simulări numerice

1.1 Problematika alunecărilor de teren

La nivel internațional alunecările de teren au început să fie studiate și investigate cu adevărat ca un proces individual începând cu jumătatea secolului trecut atunci când au început să apară teoretizări care să explice procesul cât și posibilitățile de modelare fizică a acestuia ([Terzaghi, 1950](#)) sau cuantificare probabilistică ([Vanmarcke, 1980](#)).

În decursul anilor, au fost formulate câteva definiții care prezintă succint caracteristicile unei alunecări de teren, care poate fi explicată ca:

- alunecarea sau căderea perceptibilă în aval a unei mase relativ uscate de pământ, rocă sau o mixtură între cele două ([Sharpe, 1938](#));
- deplasarea rapidă a unei mase de roci, sol rezidual sau sedimente învecinate unei pante, în care centrul de greutate al masei care se mișcă avansează în jos și spre exterior ([Terzaghi, 1950](#));
- transportul în masă, în josul pantei sub influența gravitației, a solului și rocii; cel mai adesea materialul deplasat se mișcă pe o zonă bine delimitată sau suprafață de fricțiune ([Bates și Jackson, 1987](#));
- deplasarea unei mase de roci, pământ sau deșris în jos pe o pantă ([Cruden, 1991](#)).

Ultima definiție, propusă de [Cruden \(1991\)](#), este considerată cea mai sintetică, și pune accent atât pe tipul de material cât și pe mecanismul gravitațional al procesului. La nivelul literaturii internaționale, tipologia alunecărilor de teren a fost foarte bine definită și susținută de rezultatele lui [Varnes \(1958, 1978\)](#) și ulterior [Cruden și Varnes \(1996\)](#),

îmbunătățite ulterior de către [Hungr et al. \(2014\)](#), și care sunt acceptate de toate categoriile de oameni de știință care activează în domeniul alunecărilor de teren (geologi, geomorfologi, geotehnicieni).

Studiile și analiza alunecărilor de teren au urmat o serie de direcții majore după 1990, și anume:

- utilizarea Sistemelor Informaționale Geografie (GIS) în modelarea susceptibilității, inclusiv prin metode statistice ([Carrara et al., 1991](#); [van Westen, 1993](#); [Carrara et al., 1999](#); [Guzzetti, 2006](#));
- inventarierea alunecărilor de teren și utilizarea inventarului ca unealtă de bază în studiul acestora ([McCalpin, 1984](#); [Wieczorek, 1984](#); [Guzzetti et al., 2012](#); [Santangelo et al., 2015](#)), inclusiv cu o componentă istorică ([Glade, 2001](#); [Klose, 2015](#)), cât și pe baza cartării cu ajutorul teledetecției și în special a modelelor numerice ale terenului de mare rezoluție ([Dunoyer și van Westen, 1994](#); [Antonini et al., 2002](#); [McKean și Roering, 2004](#); [Schulz, 2004](#); [van den Eeckhaut et al., 2005, 2007, 2011](#); [Ardizzone et al., 2007, 2013](#); [Razak et al., 2011, 2013](#); [Jaboyedoff et al., 2012](#); [Petschko et al., 2015](#); [Demers et al., 2017](#)) și prin utilizarea tehnicilor de inteligență artificială ([Meena et al., 2021](#));
- modelarea probabilistică pe baza metodelor statistice lineare, multi-criteriale și nonlineare ([Reichenbach et al., 2018](#)), atât la nivel local, regional, național, continental ([Günther et al., 2014](#); [Jaedicke et al., 2014](#)), cât și global ([Nadim et al., 2006](#); [Kirschbaum et al., 2009](#));
- monitorizarea regională cu ajutorul teledetecției SAR ([Lu et al., 2019](#); [Mondini et al., 2021](#));
- determinarea frecvenței temporale a alunecărilor de teren în ultimele secole ([Burkhalter et al., 2019](#)) sau chiar pe parcursul Holocenului ([Hradecký et al., 2010](#); [Pánek, 2015a, 2015b, 2019](#); [Pánek et al., 2007, 2008, 2013, 2014](#)), cu ajutorul tehnicilor de datare dendrogeomorfologică ([Shroder, 1978, 1980](#); [Braam et al., 1987](#); [Denneker și Schweingruber, 1993](#)) și a datărilor absolute ([Lang et al., 1999](#); [Malik și Wistuba, 2012](#));
- crearea de sisteme de avertizare timpurie ([Piciullo et al., 2020](#));
- modelarea impactului schimbărilor climatice și antropice globale ([McInnes et al., 2007](#); [Bonnard et al., 2008](#); [Gariano și Guzzetti, 2016](#)).

În România nu există o sistematizare națională în ceea ce privește tipologia alunecărilor de teren, după cum concluzionează și [Micu \(2017\)](#) care oferă și o descriere a cercetărilor alunecărilor de teren din țară. Același autor propune utilizarea clasificării internaționale a lui [Cruden și Varnes \(1996\)](#) și exemplifică principalele tipuri de alunecări. [Niculiță \(2020a\)](#) traduce termenii clasificării cât și elementele unei alunecări, și introduce o serie de diagrame care ilustrează principalele tipuri de alunecări de teren existente în Podișul Moldovei pe care le și exemplifică cu ajutorul imaginilor de teledetecție și fotografiilor din teren.

1.2 Stadiul actual al cercetării în Interferometria SAR Diferențială

Utilizarea metodelor avansate de Interferometrie SAR Diferențială (A-DInSAR) în investigarea proceselor geomorfologice și geologice a cunoscut un mare progres mai ales în ultimele două decenii, odată cu dezvoltarea algoritmilor avansați de analiză multi-temporală și accesul liber la datelor SAR satelitare. Conceptul acestei tehnici a fost pus în practică pentru prima dată la sfârșitul anilor '80 ([Gabriel et al., 1989](#)) dar a devenit mult mai utilizat odată cu lansarea sateliților ERS-1/2 care au facilitat achiziționarea imaginilor la intervale de timp regulate și cu specificații dedicate interferometriei.

Progresul din ultimele două decenii, atât la nivel metodologic, cât și din punct de vedere tehnologic, prin îmbunătățirea senzorilor, a dus la transformarea acestei metode într-una din cele mai utilizate pentru investigarea deformărilor care au loc pe suprafața Pământului. Astfel, prin dezvoltarea algoritmilor de analiză multi-temporală a imaginilor SAR de la începutul anilor 2000 ([Ferretti et al., 2000, 2001](#); [Berardino et al., 2002](#)) și îmbunătățirea semnificativă a senzorilor și tehnicilor de achiziționare a imaginilor satelitare de tip SAR este posibilă analiza, monitorizarea și investigarea unei game variate de procese atât naturale cât și antropice.

Pe lângă analiza și monitorizarea proceselor geologice și geomorfologice, metodele MT-InSAR au și alte aplicații în monitorizarea poluării oceanelor, a calotei glaciare, a defrișărilor, a monitorizării traficului naval, și alte domenii conexe. Aceste sectoare au importanță economică majoră, atât la nivel local, național, cât și mondial, iar exploatarea acestor tehnici se datorează, în prezent, disponibilității datelor achiziționate în momentul

de față la intervale de trei zile, și a rezultatelor care oferă o acuratețe a măsurătorilor de ordin milimetric.

Pentru valorificarea produselor interferometrice, a interferogramelor într-o primă fază, acestea pot fi utilizate în diferite scopuri, fie pentru generarea unor modele numerice ale terenului (Lanari et al., 1996; Pizzi și Pugliese, 2004; Krieger et al., 2007;), fie pentru detectarea deplasărilor induse de modificărilor suprafeței terenului (Massonnet et al., 1993; Bürgmann et al., 2000; Tomiyama et al., 2004). La începuturi, după lansarea sateliților ERS-1 și apoi ERS-2, interferogramele erau utilizate mai ales în calcularea deformărilor coseismice și postseismice produse de cutremure (Massonnet et al., 1993, 1996; Peltzer et al., 1994), a activității vulcanice (Massonnet et al., 1995) iar mai târziu pentru investigarea alunecărilor de teren (Fruneau et al., 1996). De fapt, pentru calcularea deformărilor reale care au loc, este necesară diferențierea și eliminarea influenței topografiei din semnalul reflectat, fapt care duce la formarea unei interferograme diferențiale. Acest proces se realizează prin utilizarea unui model numeric al terenului preexistent.

Apariția algoritmilor avansați de analiză interferometrică, care iau în considerare un set de mai multe imagini SAR, permite calcularea și eliminarea influențelor care compun semnalul reflectat și îmbunătățesc semnificativ rezultatele analizei. În acest mod a fost posibilă reducerea unor limitări ale interferometriei precum decorările spațiale și temporale și influența componentului atmosferic (Hanssen, 2001; Colesanti și Wasowski, 2006; Kampes, 2006). Deși au strategii diferite de extragere a componentei deplasării, aceste tehnici de interferometrie diferențială multitemporală (Wasowski și Bovenga, 2014; Necula et al., 2021), cum ar fi Persistent Scatterer Interferometry (PS-InSAR) (Ferretti et al., 2000, 2001; Kampes, 2006) și Small BAseline Subset (SBAS) (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2007b) sunt capabile să depășească limitările DInSAR și permit monitorizarea și evoluția temporală a proceselor investigate.

În România, tehnicile de Interferometrie SAR Diferențială sunt relativ noi, fiind introduse mai târziu și utilizate pentru identificarea instabilităților din zonele urbane (Poncoș et al., 2014; Negula et al., 2015; Balan et al., 2016; Patrascu et al., 2016; Kerekes et al., 2020) și a proceselor geologice și geomorfologice (Armaș et al., 2017; Necula et al., 2017, 2018a). În ultimii cinci ani, odată cu disponibilitatea imaginilor Sentinel-1, tehnicile MT-InSAR au fost utilizate pentru analiza și investigarea deformărilor din zonele urbane, inclusiv a infrastructurii de transport (Gheorghe et al., 2020), pentru investigarea proceselor neotectonice (Armaș et al., 2017; Necula et al., 2018a),

identificarea zonelor afectate de alunecări de teren (Necula et al., 2017, 2021; Armaș et al., 2021), inclusiv în zonele rurale (Necula et al., 2018b) și investigarea detaliată a dinamicii alunecărilor de teren (Necula et al., 2021). În același context, a fost creată o platformă care permite identificarea deformărilor locale și regionale care se bazează pe procesarea imaginilor Sentinel-1, orbita descendentă, pentru toată România (Poncoș et al., 2022).

1.3 Stadiul actual al cercetării în modelarea numerică a alunecărilor de teren

Investigarea alunecărilor de teren prin utilizarea modelărilor sau a simulărilor numerice a apărut datorită necesității de evaluare a deformărilor care au loc în cazul unor situații complexe (Abramson et al., 2002). În acest mod sunt depășite limitările metodelor clasice de evaluare a stabilității versanților care au la bază metodele de echilibru limită (Duncan și Wright, 1980; Bromhead, 1992) și care practic estimează un factor de siguranță a versantului. Acest factor de siguranță reprezintă raportul dintre forța de rezistență la forfecare a materialului și forța necesară teoretic pentru a mobiliza materialul, iar atunci când acest raport este ≤ 1 , sau 1,3 – prag utilizat după metodologia din România (Coman et al., 2017), deplasarea este probabilă, iar când este > 1 (1,3) atunci panta este considerată stabilă. De asemenea, pe baza acestor metode, mecanismele alunecării sunt mult simplificate, de cele mai multe ori fiind luată în considerare o suprafață circulară.

Modelările numerice reprezintă unele dintre cele mai avansate tehnici de modelare fizică a deformărilor cauzate de alunecările de teren pentru care există implementări reușite ce se bazează pe metoda elementelor finite (FEM) (Clough și Woodward, 1967) sau metoda diferențelor finite (FDM) (Desai și Christian, 1977). Aceste modele, implementate sub formă de coduri sau limbaje de programare, pot fi utilizate pentru toate tipurile de alunecare (Zhang, 2020), iar alegerea modelului adecvat depinde de mai mulți factori precum disponibilitatea datelor in situ, a complexității și magnitudinii alunecării de teren, cât și de scopul investigării (Cheng et al., 2007; Griffiths și Marquez, 2007; Alejano et al., 2011; Liu et al., 2015; Tschuchnigg et al., 2015a; Vanneschi et al., 2018).

Simulările numerice pentru evaluarea deformărilor pot fi de asemenea utilizate și pentru analiza inversă, sau retro-analiză, a materialului alunecat (Chandler, 1977) pentru a

valida modul de producere al alunecării și utilitatea lor. Cu toate acestea, pentru astfel de analize sunt preferate metodele de echilibru limită deoarece s-a demonstrat faptul că rezultatele obținute sunt foarte asemănătoare cu cele ale modelărilor și necesită mult mai puțin efort computațional ([Cheng et al., 2007](#); [Liu et al., 2015](#); [Li et al., 2016](#)), iar simulările numerice sunt preferate pentru investigarea unor scenarii mai complexe ([Stead et al., 2006](#); [Tschuchnigg et al., 2015a](#)).

La nivelul României, modelările numerice nu sunt foarte populare, pentru investigarea stabilității versanților fiind preferate metodele de echilibru limită, condiționate și de legislația existentă la nivel național, cu toate că primele pot oferi informații superioare, atât calitativ cât și cantitativ, despre dinamica și tipologia alunecărilor de teren ([Necula et al., 2021](#)).

2. Zona de studiu

2.1 Încadrarea fizico-geografică a zonei de studiu

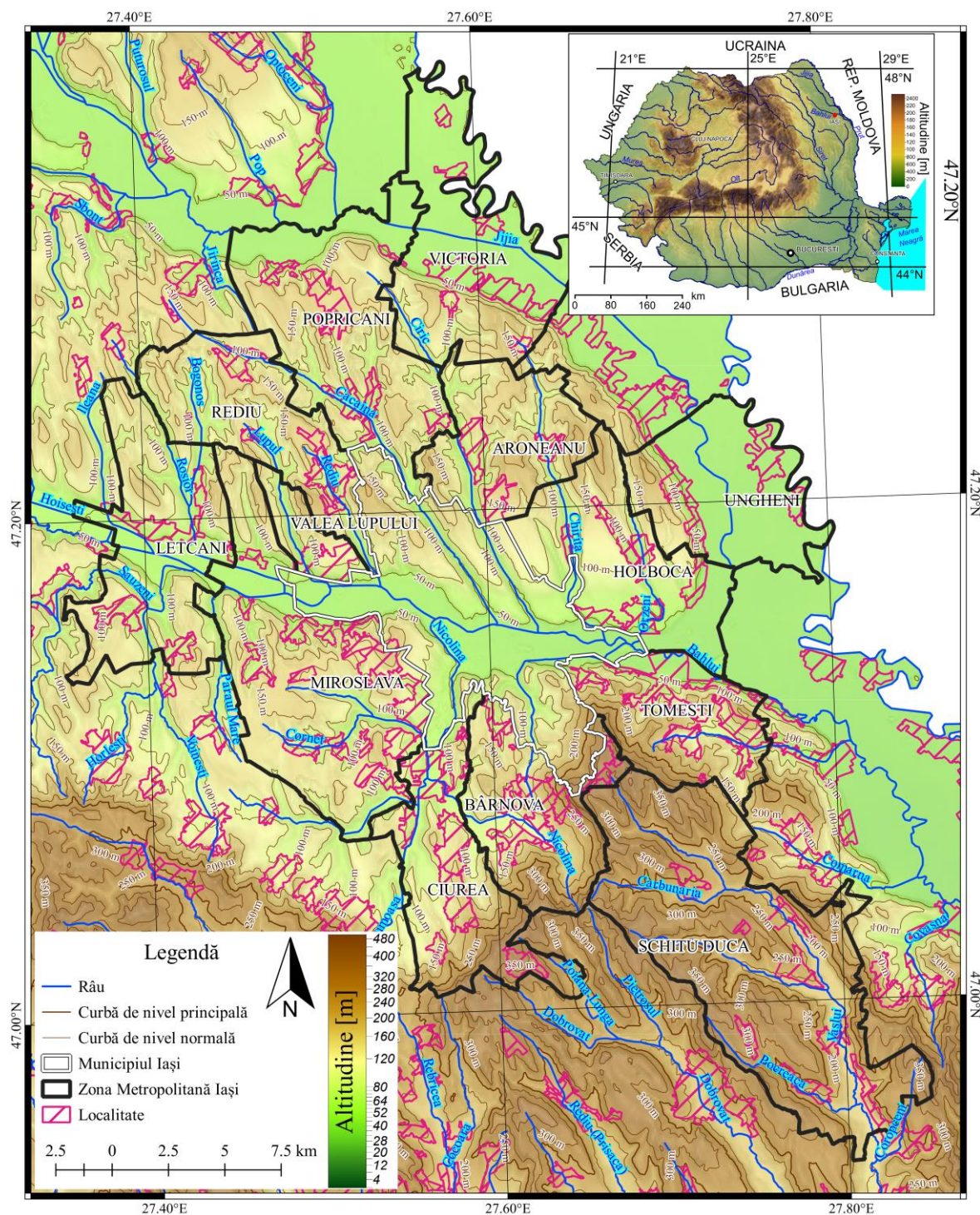
Municipiul Iași are o suprafață de 91,5 km² și o populație mai mare de 300.000 de locuitori, fiind cel mai important pol de dezvoltare din partea de Nord-Est a României, situat pe coordonatele geografice 47°09'44" latitudine Nordică și 27°35'20" longitudine Estică (**Figura 1**). Din punct de vedere administrativ, orașul Iași se învecinează cu nouă comune: Miroslava, Valea Lupului, Reditu, Popricani, Aroneanu, Holboca, Tomești, Bârnova și Ciurea. Acestea li se adaugă și comunele Lețcani, Schitu Duca, Ungheni și Victoria, împreună cu care formează Zona Metropolitană a municipiului Iași (ZMI).

Orașul se află în partea sudică a Dealurilor Jijiei la contactul cu Podișul Central Moldovenesc și este pus în evidență de racordul dintre albia majoră a râului Bahlui și Coasta Iașilor. Acesta s-a dezvoltat preponderent în albia majoră și pe terasele râului Bahlui (**Barbu et al., 1987**) și ale afluenților lui, cât și pe interfluviile dintre aceștia, apele care îl drenează aparținând bazinului hidrografic Bahlui (**Minea, 2009**). Pe direcția vest-est, orașul este străbătut de râul Bahlui care în decursul timpului a suferit modificări și a fost rectificat, asigurându-i-se un traseu aproape liniar, cu albia minoră adâncită și parțial taluzată, pentru a se evita producerea inundațiilor în timpul scurgerii maxime.

Partea de la nord de Bahlui se prezintă sub forma unei alternanțe de dealuri cu altitudini mai mici (Dealul Reditu – 211 m, Dealul Copou – 209 m, Dealul Șorogari – 203 m, Dealul Aroneanu – 218 m), separate de văile afluenților de stânga (re-consecvenți) ai Bahluiului (Lupul, Reditu, Podgoria Copou, Cârlig, Cîrlic). Acești afluenți au lungimi ce variază între 3-16 km, și sunt caracterizați de profiluri transversale ale văilor mai largi și lunci ale căror lățimi pot ajunge la 500 m.

La sud de Bahlui, dealurile de tip cuestă și platourile ce formează Coasta Iașilor au altitudini mai mari care cresc dinspre valea Bahluiului spre periferiile bazinului hidrografic pe care îl formează (Dealul Miroslava – 183 m, Dealul Galata – 185 m, Dealul Cetățuia –

138 m, Dealul Căprița – 210 m, Dealul Vlădiceni – 200 m, Dealul Trelea – 344 m, Dealul Repedea – 365 m, Dealul Păun – 404 m). Afluenții de dreapta (Vămășoia, Ezăreni), obsecvenți, care delimitează dealurile menționate și drenează teritoriul de la sud de Bahlui se caracterizează prin văi mai scurte (1-5 km) și lunci foarte înguste (50-150 m), cu excepția văii Nicolina, care are o lungime mai mare de 20 km și o lățime cuprinsă între 300 – 1000 m (Băcăuanu, 1968).



2.2 Caracteristicile geologice și geomorfologice ca factori precondiționali ai alunecărilor

Relieful zonei Iași s-a dezvoltat pe o structură geologică monoclinală specifică cuverturii sedimentare a Platformei Moldovenești (Ionesi, 1994; Brânzilă, 1999; Mutihac și Mutihac, 2010) sub incizia și migrarea spre sud a râului Bahlui și a afluenților săi, fapt care a dus la formarea văilor structurale și la dezvoltarea unor interfluvii largi, paralele, cât și a unor dealuri asimetrice, de tip cuestă (Băcăuanu, 1973; Ioniță, 2000; Niculiță, 2011). Morfostructura actuală, și mai ales litologia, cuplată cu adâncimile mici ale nivelului freatic și prezența izvoarelor (Macarovici, 1948; Martiniuc et al., 1956; Schram et al., 1977), servesc drept factori precondiționali importanți în declanșarea și reactivarea alunecărilor de teren.

Ca urmare a acestui relief și a substratului geologic, cât și a condițiilor climatice, arealul municipiului Iași se confruntă în mod constant cu probleme cauzate de reactivările alunecărilor de teren (Figura 2). De altfel, în ceea ce privește acest hazard natural, Iașul se identifică ca unul dintre principalele hot-spot-uri la nivelul României (Bălțeanu et al., 2020; Necula et al., 2021) și care a fost semnalat chiar la nivel european (Jaedicke et al., 2014).

Din punct de vedere al morfometriei reliefului (Figura 2), altitudinile variază de la 32 m în lunca Bahluiului până la 371 m deasupra nivelului mării² și care se găsește în partea sud-estică a teritoriului, în zona de tranziție spre Podișul Central Moldovenesc. Aceste valori au fost calculate pe baza unui model digital al altitudinii terenului de mare rezoluție achiziționat prin scanare aeriană laser – LiDAR (*Light Detection and Ranging*). În ceea ce privește panta terenului, teritoriul Iașului este caracterizat de valori medii reduse ale pantei, sub 5°, care se datorează suprafețelor cvasi-orizontale extinse ocupate de albia majoră a Bahluiului și de podurile teraselor fluviale. Cu toate acestea, datorită caracteristicilor structurale ale reliefului din zona investigată care au dus la dezvoltarea unor frunți de cuestă proeminente, mai ales la sud de Bahlui, cât și cornișelor alunecărilor vechi, multe areale sunt caracterizate de valori ridicate ale pantei (>15°). Aceste valori, cuplate cu litologia și hidrogeologia arealului, favorizează producerea alunecărilor de teren sau reactivarea celor existente, mai ales în zona de cornișă a celor din urmă.

² Altitudine deasupra Mării Negre pe baza proiecției stereografice a României.

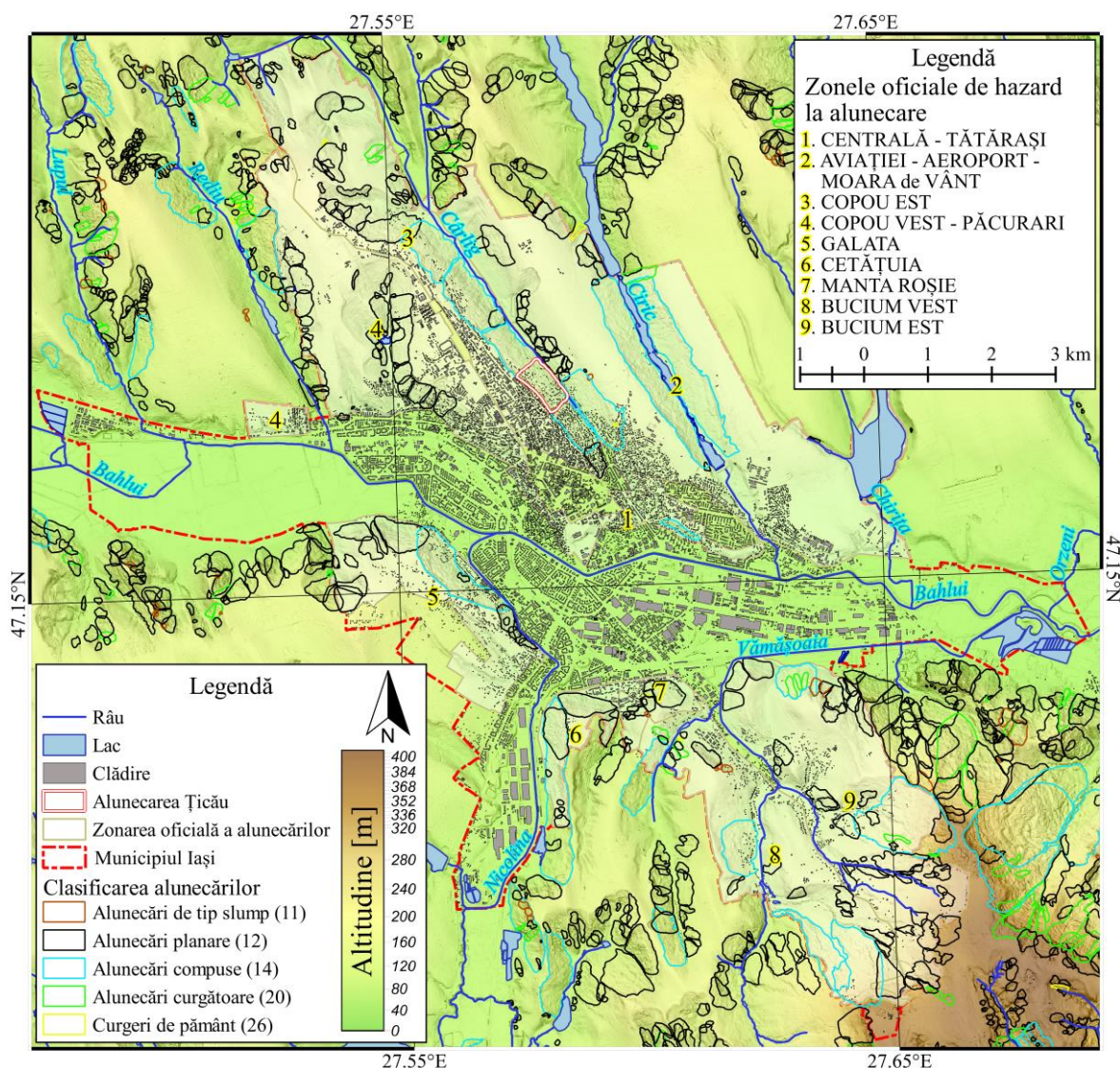


Figura 2. Inventarul alunecărilor de teren ([Necula și Niculiță, 2017](#)); numărul din panteză reprezintă tipologia alunecărilor de teren după clasificarea actualizată a lui [Hungr et al. \(2014\)](#) și adaptată în română de [Niculiță \(2020a\)](#).

Depozitele geologice (**Figura 3**) sunt încadrate în două formațiuni de vârstă basarabiană, și anume: Formațiunea argilelor cu *Cryptomactra* și Formațiunea Bârnova-Muntele (care are grosimi de aproximativ 200 m și aflurează la altitudini mai mari de 125-150 m). Reversurile cuestelor, atât de la nord cât și de la sud de râul Bahlui, sunt acoperite de depozite cuaternare și nu au altitudini care să depășească 220 m (Dealul Reditu, Dealul Copou, Dealul Șorogari, Dealul Galata, Dealul Cetățuia). Depozitele cuaternare includ mai ales pietrișuri și argile fluviale cu grosimi de la 2 până la 5 m și loess care măsoară între 5 și 25 m grosime ([Martiniuc et al., 1956](#); [Martiniuc și Băcăuanu, 1959](#); [Băcăuanu și Martiniuc, 1966](#); [Schram et al., 1977](#)).

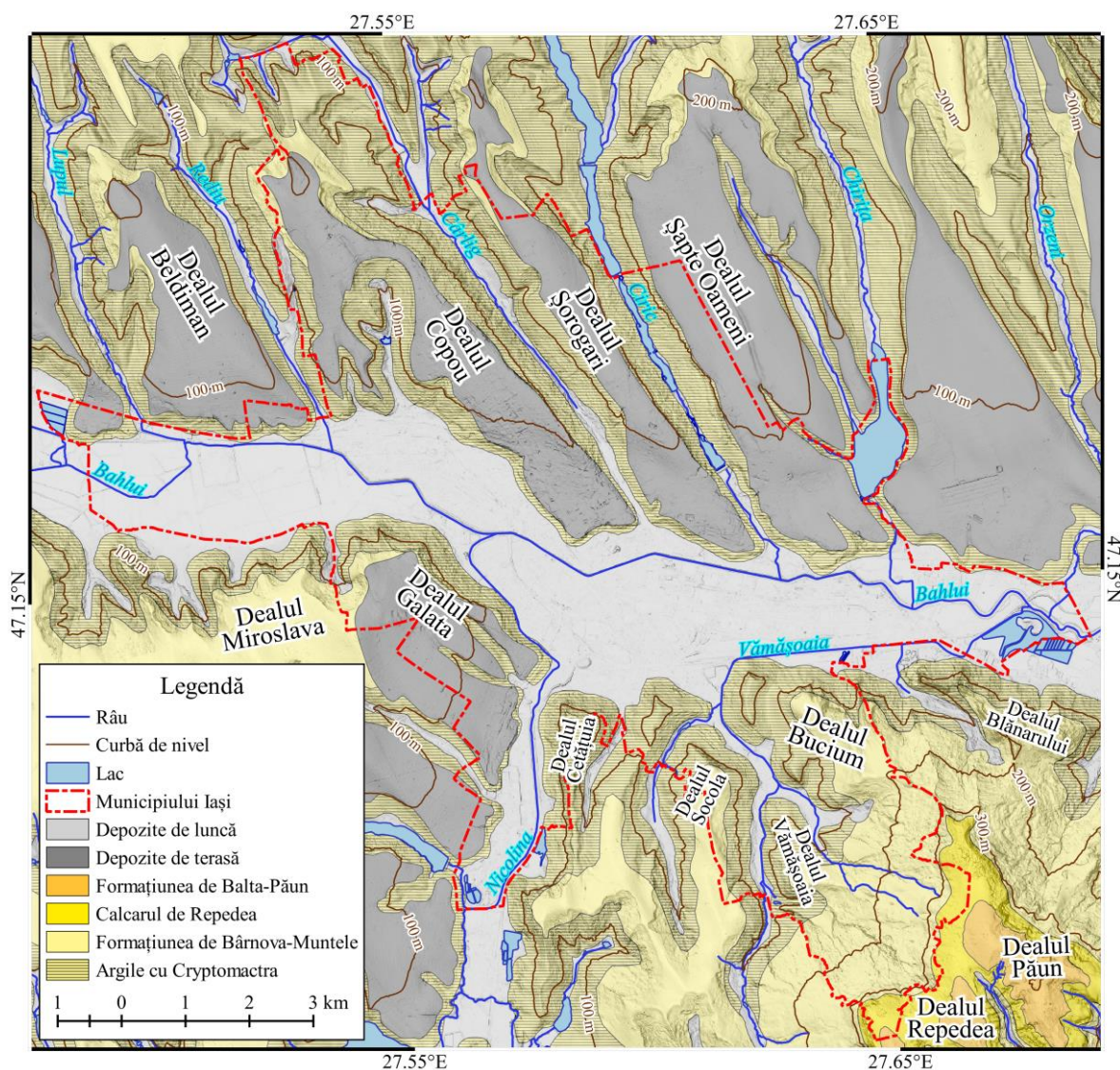


Figura 3. Geologia municipiului Iași (după [Necula și Niculiță, 2017](#)).

Spre sud, deasupra limitei altitudinale de 200 m, în Podișul Central Moldovenesc, aflorează o formațiune litologică mult mai dură și rezistentă, care a permis dezvoltarea unei cornișe impresionante și pante mai mari de 15° care se identifică cu partea de est a Coastei Iașilor ([Băcăuanu, 1968](#); [Băcăuanu et al., 1980](#); [Ungureanu, 1993](#)). Aici altitudinile dealurilor sunt cuprinse între 365 și 407 m (Dealurile Repedea și Păun).

Aceste depozite sunt cuprinse în Formațiunea de Repedea și includ calcarenite, calcare oolitice și nisipuri cuarțoase intercalate cu nisipuri și argile ([Brânzilă, 1999](#); [Dill et al., 2012](#); [Ionesi et al., 2005](#); [Jeanrenaud și Saraiman, 1995](#)) care aflorează mai ales în Dealul Repedea. Aceste depozite basarabiene sunt acoperite de o suită de nisipuri kersoniene (Formațiunea de Balta-Păun) cu o grosime de 40 m și care apar la zi în Dealul Păun.

2.3 Precipitațiile ca factor declanșator al alunecărilor

Deși zona studiată este caracterizată de o climă uscată, temperat continentală, precipitațiile atmosferice au un rol important în activarea deplasărilor în masă, acestea fiind de fapt factorul declanșator al alunecărilor de pe teritoriul orașului Iași. Cu toate că valorile medii anuale ale precipitațiilor sunt de 530 mm/an (Niculiță, 2020b; Necula et al., 2021), distribuția și intensitatea lor pe parcursul anului au o semnificație mai mare deoarece provoacă destabilizarea maselor de pământ și producerea evenimentelor de alunecare. În acest sens, cantitatea maximă de precipitații în 24 de ore, care a avut valoarea cea mai mare de 136,7 mm pentru Iași (Mihăilă, 2006; Minea, 2009), este un indice mult mai semnificativ de analizat în producerea alunecărilor, mai ales atunci când are loc după o perioadă ploioasă anterioară de lungă durată.

În ultimii 100 de ani, se observă în evoluția temporală a precipitațiilor medii anuale (Figura 10) prezența unor ciclicități ale perioadelor umede și a celor secetoase. Perioadele ploioase au fost înregistrate în anii 1920–1950 și 1960–2000, situație care ar putea indica un ciclu umed de 30-40 de ani, despărțite de perioade mai scurte de secetă (Niculiță, 2020b). Aceste perioade ploioase contribuie la menținerea unui nivel freatic ridicat pe toată perioada anului, mai ales în timpul primăverilor și verilor care urmează după ani cu toamne și ierni bogate în precipitații. În acest context, topirea zăpezilor cuplată cu ploi torențiale favorizează apariția alunecărilor de teren și reprezintă principalii factori declanșatori ai acestora, fapt evidențiat prin reactivările produse pe teritoriul Iașului, cum

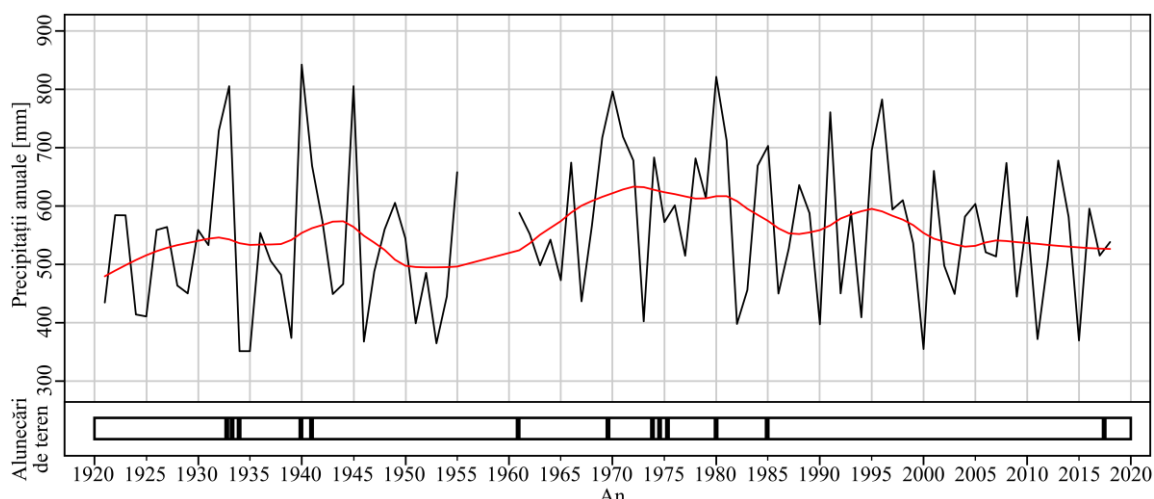


Figura 4. Precipitațiile medii anuale măsurate la stația meteorologică Iași (datele din perioada 1921-1955 sunt din Gugiuman și Erhan (1960), iar pentru perioada 1961-2018 datele provin din baza de date ECA&D (Klein Tank et al., 2002; Haylock et al., 2008)). În partea de jos sunt reprezentate alunecările de teren care au avut loc în municipiul Iași (modificată după Necula et al., 2021).

ar fi cele de pe versantul nord-estic al Dealului Copou ([Macarovici, 1942](#); [Palade și Băcăuanu, 1971](#)) și de pe Dealul Galata ([Brișcan, 1980](#)).

2.4 Alunecările de teren din municipiul Iași

Zona deluroasă a municipiului Iași se identifică la nivelul României ca fiind un „*hot-spot*” al alunecărilor de teren în ceea ce privește activitatea acestor procese geomorfologice ([Necula et al., 2021](#)). Acest fapt se datorează prezenței alunecărilor vechi și relictelor din zona de nord-est a țării ([Niculiță, 2020a](#)) care au modificat morfologia inițială a versanților și care au contribuit la formarea unor depozite deluviale foarte susceptibile și predispuse la reactivări ale alunecărilor de teren ([Silion, 1965](#)), mai ales după evenimentele ploioase din timpul primăverii ([Necula și Niculiță, 2017](#)).

În timp, morfologia versanților a fost remodelată constant de reactivări ale alunecărilor, menționate sau raportate de diverși autori ([Băcăuanu, 1970](#); [Macarovici, 1942](#); [Martiniuc și Băcăuanu, 1982](#); [Necula și Niculiță, 2017](#); [Niculiță et al., 2018](#)) sau chiar de către autoritățile locale și mass-media. Consecințele acestor evenimente s-au materializat de cele mai multe ori prin deteriorări, sau chiar distrugeri, ale clădirilor rezidențiale precum și ale tramei rutiere, ale rețelei de utilități, ale sistemului de drenaj și a infrastructurii de stabilizare (**Figura 2**).

Pe baza literaturii, se pot identifica pe teritoriul Iașului mai multe zone, cunoscute de altfel, cu reactivări ale alunecărilor de teren: versantul nord-estic al Dealului Copou, afectat de foarte multe reactivări în ultimul secol – 1911, 1932-1933, 1934, 1940-1942, 1961, 1969-1970, 1984, cartierul Păcurari, versantul vestic al Dealului Șorogari – 1969-1970, versantul nordic al Dealului Galata – 1932-1933, 1941-1942, 1960, 1970, 1971, 1973, 1974-1975, 1979, versantul vestic al Dealului Cârlig – 1979-1980 și zona Bucium – 1973 2017 ([Macarovici, 1942](#); [Martiniuc și Băcăuanu, 1961, 1982](#); [Silion, 1965](#); [Băcăuanu, 1970](#); [Palade și Băcăuanu, 1971](#); [Brișcan, 1980](#); [Necula și Niculiță, 2017](#)). În ultima perioadă (după anii '90) au fost semnalate reactivări de alunecări de teren în Cartierul Munteni, Grădina Botanică, strada Șapte Oameni, Moara de Vânt. Pe lângă aceste zone, în care mecanismul alunecării are un puternic component natural, există câteva locuri în care alunecările au fost puternic influențate de activitățile antropice, în special de-a lungul

drumurilor, cum ar fi pe drumul județean DJ248D din Bucium în perioada 2000–2010 (Niculiță, 2020a), sau pe malul râului Bahlui (2015), raportate și în presa locală³.

O altă direcție de investigare a alunecărilor de teren, mai ales în ultimii 10 ani, este dată de cartarea și inventarierea acestor hazarduri pe baza imaginilor satelitare, a aerofotogramelor și a modelelor numerice de mare rezoluție, fie la scară locală, fie în context regional la nivelului Podișului Moldovei (Niculiță și Mărgărint, 2014; Mărgărint și Niculiță, 2017). A fost întocmit atât un inventar geomorfologic al alunecărilor de teren pentru zona municipiul Iași (Figura 2) de către Necula și Niculiță (2017), îmbunătățit ulterior din punct de vedere al gradului de activitate al alunecărilor (Necula și Niculiță, 2022 – *in prep*), cât și un inventar al alunecărilor recente pe raza Zonei Metropolitane Iași (Niculiță et al., 2018).

Curba de magnitudine-frecvență a inventarului geomorfologic municipiului Iași (Figura 5), care urmează o distribuție de tip gamma, scoate în evidență caracterul complet al inventarului. Forma curbei de distribuție este asemănătoare cu cea a alunecărilor recente din Podișul Moldovei (Niculiță, 2020a) cât și cu cea a inventarele istorice și geomorfologice analizate la nivel mondial (Malamud et al., 2004a, 2004b). Magnitudinea inventarului prezent acoperă 3 ordine de magnitudine, ceea ce înseamnă că pentru alunecările de dimensiuni mari, inventarul conține magnitudinile reprezentative și că aceste alunecări au factori declanșatori diverși, și au vârste diferite, eventual, reprezentând condiții climatice diferite de cele actuale.

Inventarele geomorfologice cu alunecări sunt importante deoarece ne arată zonele afectate de alunecări de teren preexistente care sunt de altfel unul dintre factorii pregătitori majori în declanșarea acestor procese. Totodată, acestea sunt importante pentru realizarea hărților de susceptibilitate, prin diferite metode statistice, a versanților la reactivări și/sau producere a alunecărilor de teren la scară locală (Necula și Niculiță, 2017) sau în context național (Bălțeanu et al., 2010, 2020; Grozavu și Patriche, 2021). Hărțile de susceptibilitate sunt necesare pentru identificarea zonelor critice (Necula și Niculiță, 2017) și utilizate în zonarea versanților instabili (Adomniței et al., 2012; Coman et al., 2017; Negru, 2017), în ciuda limitărilor acestora. Recent, prin Hotărârea Consiliului Local (HCL 127, 2020), Administrația Municipiului Iași a aprobat o nouă zonare a hazardului la alunecări de teren (Figura 2). Conform acestei zonări, teritoriul administrativ al Iașului

³ <https://www.ziaruldeiasi.ro/stiri/lucrurile-la-bahlui-se-surpa-la-nici-doi-ani-de-la-inaugurare--97420.html>.

este împărțit în 9 zone de risc, care acoperă 61,45% din suprafața orașului, și unde versanții sunt expuși la producerea alunecărilor.

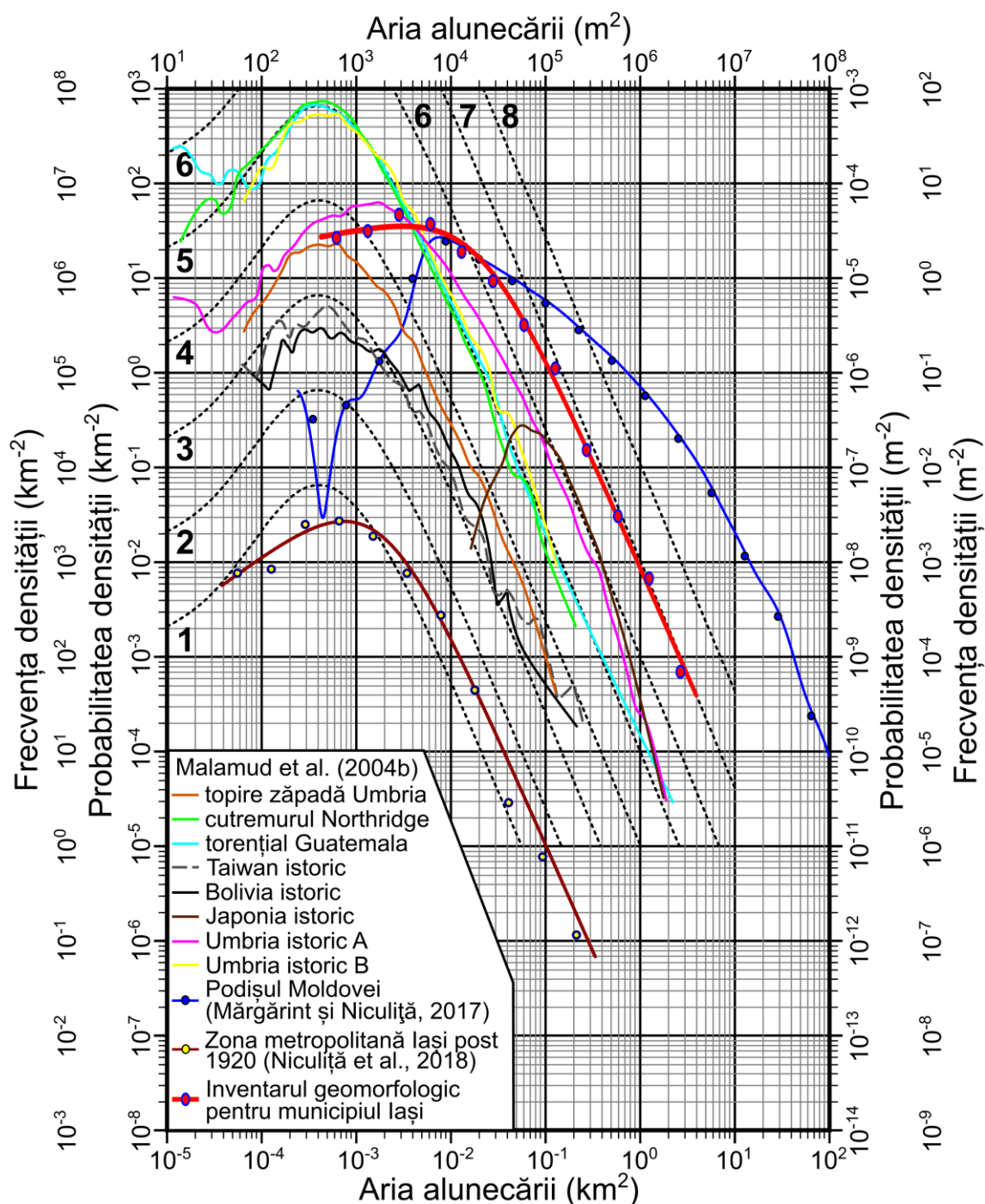


Figura 5. Curba de magnitudine-frecvență pentru diverse inventare de pe glob (Malamud et al., 2004b), pentru inventarul din Podișul Moldovei (Mărgărint și Niculiță, 2017), pentru inventarul alunecărilor de teren din ultimii 100 ani din Zona metropolitană Iași (Niculiță et al., 2018) și pentru inventarul geomorfologic al municipiului Iași.

2.4.1 Alunecarea de teren Țicău

Alunecarea de teren pe care o vom investiga în detaliu în acest studiu reprezintă o reactivare mai veche, produsă în primăvara anului 1942, care a afectat cartierul Țicău (Figura 6) (Macarovici, 1942). Conform surselor științifice, peste 350 de case au fost distruse sau avariate de eveniment, împreună cu rețeaua de drumuri. Evenimentul a creat o

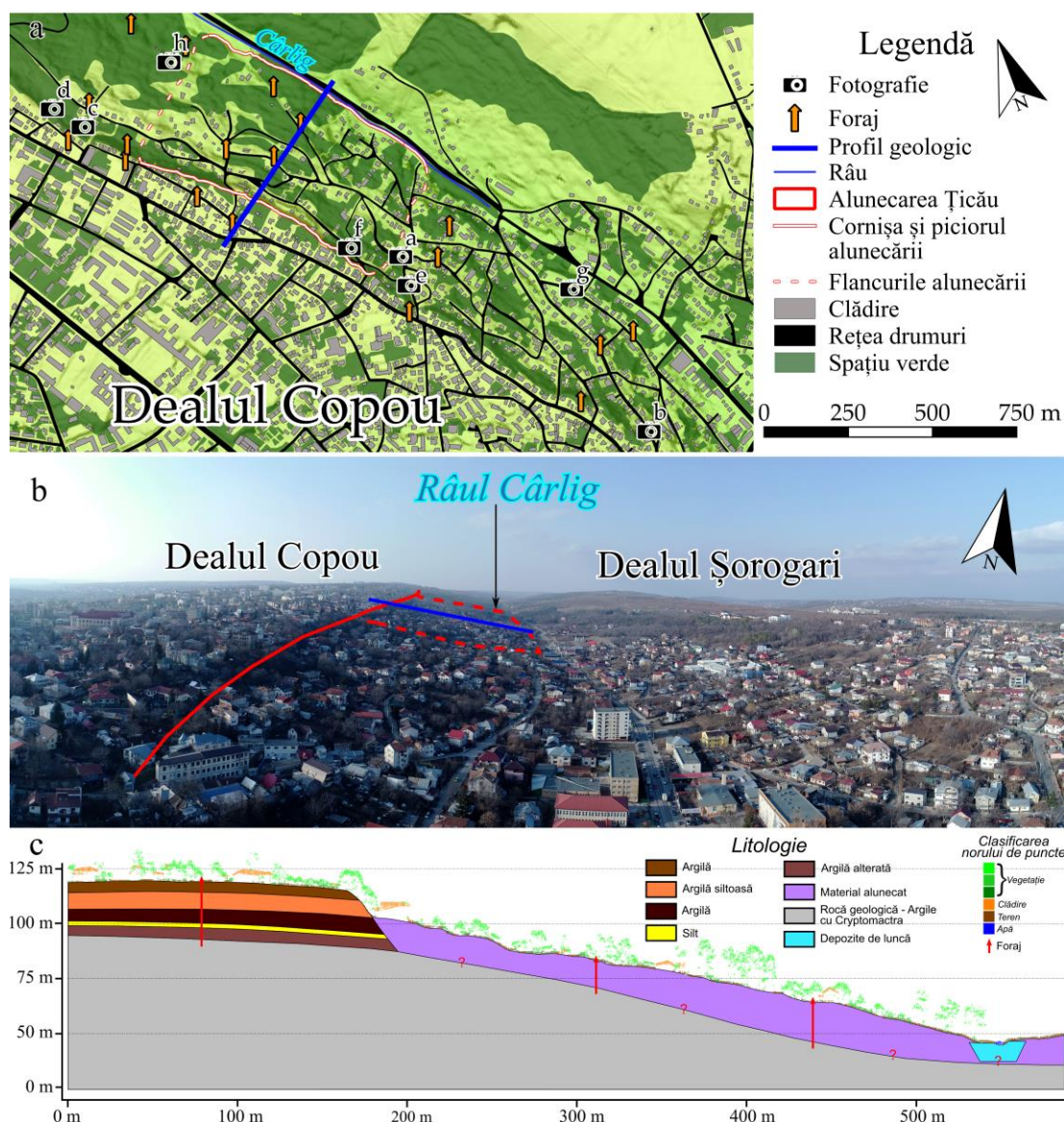


Figura 6. Alunecarea de teren Țicău. (a) Vedere detaliată a alunecării. Fotografiiile sunt în Figura 15; (b) Fotografie aeriană asupra cartierului Țicău. Linia roșie continuă reprezintă cornișa principală afectată de mai multe reactivări în trecut. Linia roșie punctată prezintă locația aproximativă a alunecării de teren investigate. Linia albastră reprezintă direcția profilului geologic; (c) Profil geologic de-a lungul versantului.

cornișă principală de 6-7 m înălțime și aproximativ 800 m lungime. Materialul alunecat a ajuns până în lunca râului Cârlig⁴ și a generat o morfologie tipică cu movile și microdepresiuni de 1-2 m diferență de înălțime, iar ca urmare a nivelului freatic suprasaturat, pentru mai bine de o lună, au ieșit la suprafață apele din subteran sub formă de izvoare. Reactivarea s-a declanșat în urma precipitațiilor prelungite, care au început încă din toamna anului precedent, cărora li s-au adăugat și surplusul de apă provenit din topirea zăpezii.

⁴ Cunoscut și sub numele de Căcaina

3. Materiale

3.1 Datele SAR de teledetecție

Pentru detectarea și monitorizarea alunecărilor de teren din municipiul Iași au fost utilizate imaginile satelitare de tip SAR. Achiziționarea acestora se realizează cu ajutorul sistemelor active de teledetecție de tip RADAR (*Radio Detection And Ranging*) care activează în domeniul microundelor. În funcție de lungimea de undă și frecvența microundelor transmise și receptate, acestea se împart în mai multe categorii și sunt utilizate în scopuri diferite.

Pentru realizarea studiului nostru am utilizat datele SAR de bandă C, ca urmare a disponibilității acestora pentru zona noastră, dar și a lipsei celorlalte tipuri de imagini. Astfel, am folosit achizițiile recente ale misiunii active Sentinel-1 A/B cât și arhiva misiunilor ERS-1/2 și ENVISAT, date care sunt oferite publicului larg în mod gratuit de către Agenția Spațială Europeană (ESA – *European Space Agency*). Continuitatea acestor misiuni și accesul la aceste imagini permite monitorizarea și investigarea alunecărilor de teren din municipiul Iași pentru o perioadă de peste 25 de ani, începând cu anul 1992 și până astăzi. În prezentul studiu am ales intervalul până în 2018 din rațiuni care țin de disponibilitatea datelor climatice și a licenței pentru aplicația de procesare a datelor SAR. Caracteristicile semnalului, numărul de imagini, perioadele monitorizate și alte specificații ale imaginilor utilizate sunt descrise în **Tabelul 1**.

Tabelul 1. Parametrii specifici ai imaginilor SAR utilizate în analiza noastră.

Satelit	Specificații							
	Direcția orbitei	Codul traiectoriei	Perioada analizată	Perioada de revizitare (zile)	Numărul de imagini	Modul de achiziție	Unghiul de incidență local	Polarizarea
ERS-1	Descendentă	193	1992–1996	35	11	SAR	~22°	VV
ERS-2	Descendentă	193	1995–2000	35	31	SAR	~22°	VV

ENVI SAT	Ascendentă	429	2002– 2009	35	19	ASAR IM	~23.5°	VV
	Descendentă	193	2003– 2010	35	20	ASAR IM	~22°	VV
Sentinel-1 A/B	Ascendentă	58	2014– 2017	12, 6 ¹	123	IM Wide Swath	~39°	VV
	Descendentă	109	2014– 2017	12, 6 ¹	127	IM Wide Swath	~37°	VV

¹12 zile între achiziții până în Octombrie 2016, 6 zile după aceea.

3.2 Datele altitudinale

Pentru realizarea acestui studiu a fost necesară de asemenea și utilizarea Modelelor Altitudinale ale Suprafeței Terenului (MNAȘT- DEM⁵). În acest sens am folosit modele numerice ale terenului (MNT) de înaltă rezoluție realizate pe baza tehnologiei LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Sistemul activ de teledetecție LiDAR, care este asemănător cu principiul RADAR, constă într-un senzor care emite propria energie sub forma unui fascicul luminos, sau puls, către o țintă și receptarea energiei reflectate de către obiectul/suprafața în cauză cu ajutorul unui receptor ([Mihai, 2009](#); [Vosselman și Maas, 2010](#); [Campbell și Wynne, 2011](#)).

În cazul nostru, am utilizat un model digital al suprafeței terenului (DSM) generat pe baza norilor de puncte obținuți prin sistemul activ LiDAR. Datele utilizate au fost puse la dispoziție de Administrația Bazinală Prut-Bârlad, și au constat în nori de puncte LiDAR care au densități de 4-6 puncte/m². Acest model numeric a fost utilizat atât în cartarea alunecărilor de teren și crearea inventarului pe de o parte, cât și în procesarea interferometrică pentru eliminarea componentului topografic din interferogramele generate și geocodarea rezultatelor finale.

3.3 Datele geotehnice

Din punctul de vedere al datelor in situ (parametri ai materialelor, înclinometre, măsurători GPS), zona investigată se confruntă cu deficiențe mari în ceea ce privește existența acestora. În momentul de față, alunecarea de teren nu este suficient de bine monitorizată, în sensul că nu sunt instalate instrumente permanente și nici nu se efectuează campanii de teren regulate pentru măsurarea deformărilor (deplasări, crăpături) și

⁵ Digital Elevation Model – varianta în limba engleză

identificarea posibilelor noi daune provocate de materialul instabil. Din acest motiv, pentru a avea un punct de plecare în analiza noastră, am utilizat ca sursă a datelor geotehnice teza de doctorat realizată de **Purice (2013)**, în care sunt publicate mai multe foraje exploratorii executate în 2006 de o companie privată pentru Primăria Iași. În descrierea acestora sunt menționate sumar mai multe informații cum ar fi: limitele litologice ale straturilor, nivelul freatic măsurat în timpul executării forajelor, greutatea specifică în stare naturală (γ), limitele și indicii de plasticitate, granulometria, modulul de deformare edometric (M_{2-3}), iar pentru unele straturi, sunt calculate și unghiul de fricțiune (φ) și coeziunea efectivă (c') a materialului.

Pe baza acestor date disponibile am creat modelul geotehnic/geometric al versantului în lungul unei secțiuni transversale prin alunecarea de teren și am compilat o bază de date cu proprietățile materialelor necesare în realizarea simulărilor numerice (**Tabelul 2**). Analiza dinamicii teoretice a alunecării a fost realizată folosind metoda Diferențelor Finite 2D (2D FDM), descrisă în subcapitolul 4.2, de-a lungul unei secțiuni transversale prin alunecarea de teren (**Figura 6**). Modelul creat a fost împărțit în șapte regiuni/unități (**Figura 7**): o succesiune de cinci straturi în partea superioară a versantului, unitatea materialului alunecat în sectorul median și inferior al versantului și roca geologică in situ. Acestor materiale le-au fost atribuite parametrii disponibili în literatură.

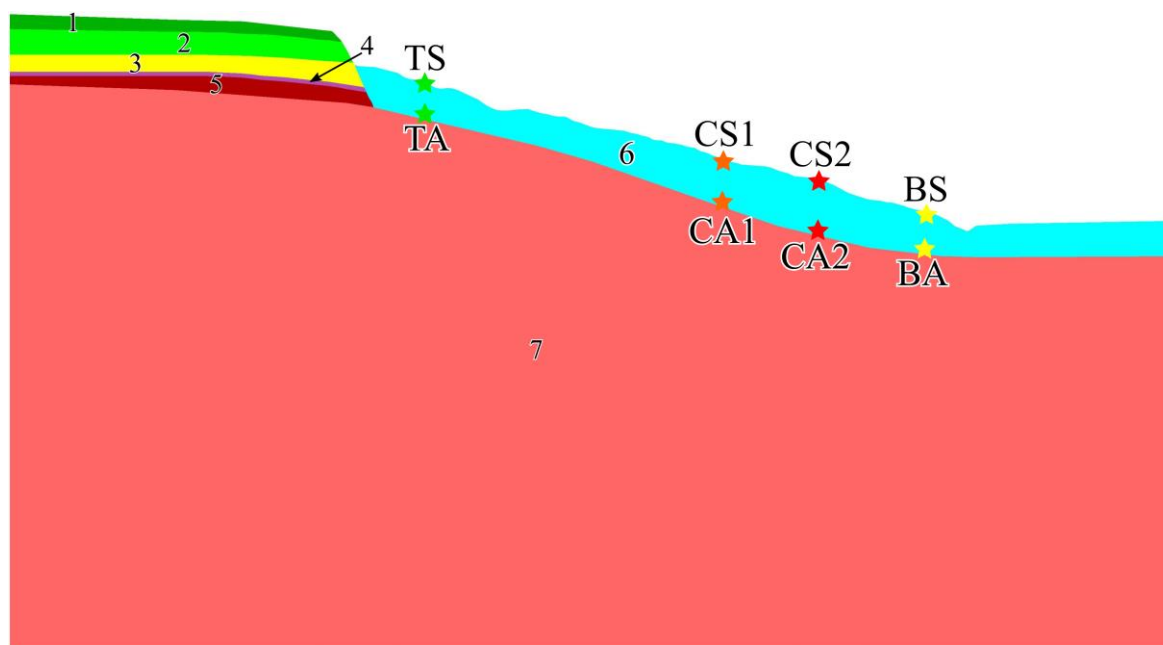


Figura 7. Modelul geometric al versantului utilizat pentru simulările numerice. Steluțele reprezintă poziția punctelor cu istoricul magnitudinii deplasărilor.

Tabelul 2. Proprietățile geotehnice atribuite materialelor utilizate în modelarea numerică.

Strat	Densitatea [kg/m ³]	Unghiul de fricțiune (ϕ)	Coeziunea efectivă (c') [kPa]	Modulul Edometric ($M_{2,3}$) [kPa]	Tensiunea (t) [kPa]	Modulul Young (E) [kPa]	Coefficientul Poisson (ν)
1. Argilă	17.4	24°	25	9243	20	7886.53	0.3
2. Argilă siltoasă	19.2	25°	20	6590	10	5622.87	0.3
3. Argilă	18.7	24°	25	16434	15	14504.85	0.4
4. Silt	20	27°	10	12520	5	10682.60	0.3
5. Argilă	19.5	24°	30	9522	20	8404.23	0.4
6. Material alunecat	19.7	18°	2	9000*	0	15000.0	0.4
		20°	5		1		
		22°	10		2		
		25°	15		3		
7. Roca de bază	20.5	38°	100	14000	100	60000.0	0.28

* Valoarea medie calculată pe baza informațiilor din foraje. Valorile în bold au fost determinate empiric.

3.4 Datele climatice

Pentru analiza evoluției precipitațiilor și a corelării acestora cu deformările PS am utilizat baza de date ECA&D (*European Climate Assessment & Dataset*) care înglobează datele climatice la nivel european. Aceasta constă în peste 68.500 serii de observații zilnice a 13 componente climatice achiziționate de la 19243 stații meteorologice și sunt disponibile prin intermediul a 79 de instituții din 65 de țări ([Klein Tank et al., 2002](#)). Aceste date punctuale au fost interpolate sub formă de date raster la o rezoluție de 0,25°x0,25° ([Haylock et al., 2008](#); [Cornes et al., 2018](#)). Setul de date zilnice ECA&D, cât și al celor de tip raster, este disponibil gratuit și poate fi accesat prin intermediul site-ului: <https://www.ecad.eu/dailydata/index.php> [Daily data \(ecad.eu\)](#).

În studiul nostru au fost necesare datele privind precipitațiile zilnice de la stația meteorologică Iași (identificată ca variabila RR în setul de date ECA&D⁶). Disponibilitatea acestora acoperă perioada 1961-2020. Pentru completarea bazei de date climatice cu perioada 1921-1955 am preluat valorile medii anuale ale precipitațiilor după [Gugiuman și Erhan \(1960\)](#).

⁶ <https://www.ecad.eu/dailydata/datadictionaryelement.php>

4. Metode

4.1 Interferometria și tehnicile multi-temporale de Interferometrie SAR Diferențială (MT-InSAR)

4.1.1 Sistemul activ SAR

SAR este un acronim de la englezescul *Synthetic Aperture Radar*, deci se referă la apertura, sau deschiderea, antenei satelitului care este utilizată pentru a colecta/înregistra semnalul transmis inițial de senzorul satelitului și reflectat ulterior dinspre suprafața Pământului. În urma procesării semnalului reflectat, denumit „echo”, se generează o imagine. Sistemul SAR se încadrează în categoria sistemelor active de teledetecție bazate pe principiul RADAR.

RADAR-ul (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) este un sistem activ de teledetecție care utilizează microundele – pulsuri electromagnetice caracterizate de lungimi de undă cuprinse între 1mm și 1m, pentru a obține informații despre forma, poziția și/sau viteza unui corp. Printr-un sistem activ înțelegem că senzorul (transmițătorul) generează propriul semnal care este transmis către suprafața Pământului, după care, cu ajutorul antenei, receptează răspunsul reflectat, denumit „echo”.

4.1.2 Interferometria SAR și interferograma

Interferometria SAR sau InSAR-ul (termen utilizat în continuare pe parcursul acestei lucrări) este o metodă de teledetecție activă de tip RADAR dezvoltată în anii '90 care permite monitorizarea suprafeței Pământului și detectarea modificărilor topografiei (Gabriel et al., 1989; Massonnet et al., 1993, 1995; Peltzer et al., 1994; Zebker et al., 1994, 1997).

Pentru utilizarea acesteia este nevoie de două imagini SAR complexe pentru a obține mai multe informații despre obiecte prin exploatarea fazei semnalului. Măsurarea deformărilor relative între două achiziții SAR se bazează pe calcularea diferenței de

distanță dintre antena satelitului și obiect (**Figura 8**), care este înregistrată ca o schimbare în faza ecoului reflectat (**Bamler și Hartl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Rosen et al., 2000**). Din acest motiv, imaginile utilizate pentru interferometrie trebuie să fie achiziționate de același satelit cu aceeași geometrie a orbitelor și care utilizează același mod de achiziție și proprietăți ale semnalului (polarizare, unghi de incidență, lungime de undă, etc).

4.1.2.1 Interferograma

Printr-o interferogramă ne referim la diferențele fazei semnalului măsurate între două imagini SAR pentru aceeași arie de studiu (**Bamler și Hartl 1998; Massonnet și Feigl 1998**). Practic, acesta reprezintă o matrice de valori numerice care corespund diferențelor fazei semnalului dintre cele două imagini SAR, măsurate de la $-\pi$ la $+\pi$. Acestea pot fi utilizate pentru crearea modelelor digitale ale terenului (**Lanari et al. 1996; Pizzi și Pugliese 2004; Krieger et al. 2007**) sau pentru identificarea deformărilor care au loc pe suprafața terestră (**Massonnet et al., 1993; Bürgmann et al., 2000; Tomiyama et al., 2004**).

În funcție de scopul urmărit, interferogramele pot fi utilizate în două moduri: fie independente, atunci când sunt analizate deplasările produse în urma unor evenimente majore, precum cutremurele, fie în seturi de interferograme atunci când se dorește monitorizarea temporală a deformărilor legate de diferite procese naturale sau antropice.

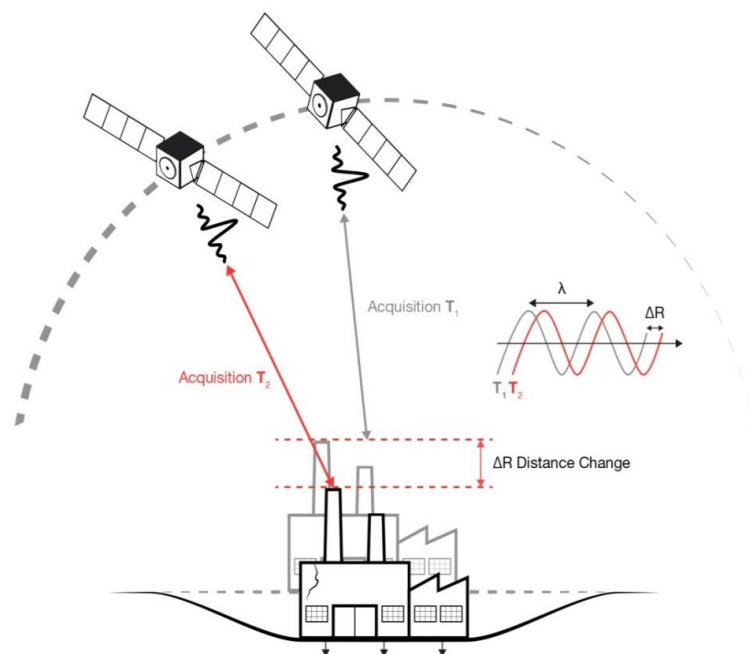


Figura 8. Principiul Interferometriei SAR.

4.1.2.2 Interferometria SAR Diferențială

Interferometria SAR Diferențială este procesul prin care o pereche de imagini SAR sunt procesate interferometric cu scopul de a identifica și măsura deformările topografice. Pentru cuantificarea deplasărilor spațiale este important ca din interferograma utilizată să fie identificat și eliminat componentul topografic care contribuie la faza semnalului reflectat, lucru realizabil cu ajutorul unui model numeric al terenului.

Cu toate acestea, semnalul reflectat reprezintă suma mai multor contribuitori ale căror efecte trebuie luate în considerare și eliminate pentru a izola deformările reale, posibil abia după dezvoltare tehnicilor avansate DInSAR. Astfel, pe lângă componentul deformării și cel topografic, faza semnalului este supusă influenței condițiilor atmosferice în momentul obținerii fiecărei imagini, a decorelărilor geometrice și temporale introduse de posibile erori orbitale și zgomot ([Massonnet și Feigl, 1998](#); [Hanssen, 2001](#); [Colesanti și Wasowski, 2006](#); [Kampes, 2006](#); [Crosetto et al., 2016](#)).

4.1.3 Tehnici avansate de interferometrie SAR diferențială

Progresul din ultimele două decenii a dus la dezvoltarea tehnicilor avansate de Interferometrie SAR Diferențială (A-DInSAR) care consideră mai mult de trei achiziții SAR pentru a calcula și înlătura efectele contributorilor la faza semnalului. Deși au strategii diferite pentru a extrage deformările reale, aceste tehnici de interferometrie multi-temporală (MT-InSAR), cum mai sunt numite în literatură ([Wasowski și Bovenga, 2014](#); [Necula et al., 2021](#)), cum ar fi PS-InSAR și SBAS, sunt capabile să depășească limitările DInSAR și să ofere rezultate cu acuratețe milimetrică pentru o perioadă de timp analizată mult mai mare.

4.1.3.1 Permanent Scatterers Interferometry (PS-InSAR)

Apărut la începutul anilor 2000 ([Ferretti et al., 2000, 2001](#); [Kampes, 2006](#)), PS-InSAR este primul algoritm de analiză a setului de date dezvoltat pentru a depăși unele dintre limitările DInSAR. Acesta ține cont de întregul set de date al achizițiilor SAR pentru a crea interferograme între imagine principală „master” și toate celelalte, denumite „slaves”, fără restricții în ceea ce privește limitele de bază temporale și spațiale (**Figura 9**).

Această tehnică se bazează pe utilizarea reflectorilor permanenți care sunt ținte/obiecte de pe suprafața terestră care nu sunt afectate de decorelări temporale și își mențin coerența, iar intensitatea semnalului reflectat rămâne constantă pe toată perioada

analizată. Din acest motiv, această abordare este limitată de existența unui număr redus de reflectori care își păstrează o coerență suficient de mare în toate imaginile setului de date.

Tehnica PS-InSAR este limitată la un număr mic de ținte care prezintă o coerență suficient de mare în toate imaginile setului de date. Această caracteristică este o limitare a tehnicii ce nu permite aplicarea ei pentru zonele neurbanizate și zonele cu vegetație abundentă. Cu toate acestea, metoda este fiabilă pentru zonele urbanizate datorită prezenței clădirilor care își mențin în timp coerența semnalului reflectat. Ca urmare, această abordare este potrivită pentru studiul nostru, mai ales în cazul seturilor de date Sentinel-1 care se caracterizează printr-un timp scurt de revizitare între achiziții și un număr mare de imagini.

4.1.3.1 Small BAseline Subset (SBAS)

Tehnica SBAS ([Berardino et al., 2002](#); [Lanari et al., 2007b](#)) exploatează diferența de fază a reflectorilor caracterizați de o coerență mai mică pentru a măsura deformările suprafeței terestre. În acest fel, suprafața spațială de unde pot fi obținute se mărește, fiind un instrument util pentru zonele caracterizate de vegetație și puțini reflectori. Față de abordarea PS-InSAR, această tehnică ia în considerare doar perechile de imagini SAR caracterizate de limite temporale și spațiale mici (**Figura 9**) pentru a reduce decorelarea și zgomotul. Utilizarea multilooking-ului imaginilor și a conexiunilor dintre subseturi permite utilizarea unui set de imagini SAR mai mic. Cu toate acestea, ca efect al multilooking-ului, această abordare omogenizează informația, fapt pentru care nu este potrivită pentru detectarea deformărilor locale.

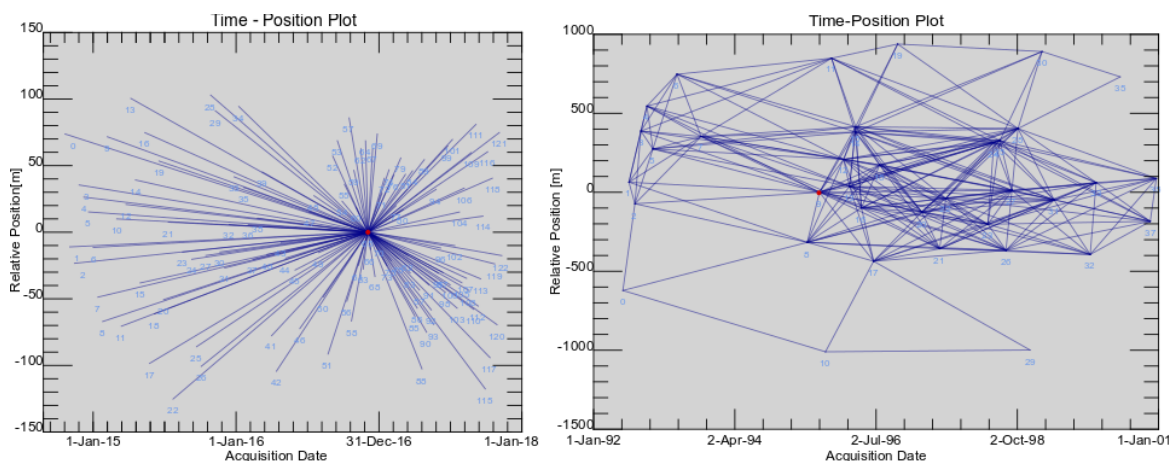


Figura 9. Graficul de conexiune a imaginilor SAR în procesul de creare a interferogramelor: PS-InSAR (stânga) și SBAS (dreapta).

4.1.4 Produsele MT-InSAR

Rezultatele tehnicilor MT-InSAR constau în hărți ale vitezei deformării spațiale și serii de timp ale deplasării pentru fiecare țintă coerentă. Fiecare măsurătoare cuantifică cu o acuratețe milimetrică schimbarea distanței dintre senzor și țintă, vizualizată în direcția de iluminare a satelitului (LOS).

În interpretarea acestor date pentru analiza alunecărilor de teren este important de avut în vedere două lucruri. Valorile obținute depind atât de geometria achiziționării imaginilor, ascendent sau descendent, cât și de expoziția versanților (**Figura 10**). Practic, pentru orbita ascendentă se vor obține valori negative dacă versantul are expoziție estică, și valori pozitive dacă versantul are expoziție vestică. În cazul orbitei descendente, valorile pozitive vor fi pe versanții estici iar cele negative se înregistrează pe versanții cu expoziție vestică. Valorile pozitive semnifică o apropiere a obiectului de pe suprafața terestră față de satelit, adică o micșorare a distanței, în timp ce valorile negative indică o depărtare, adică o creștere a distanței dintre obiect și satelit.

Măsurătorile obținute pe direcția LOS sunt 1D, cu toate acestea, pe baza măsurătorilor obținute de pe ambele orbite, pot fi calculate componentele de deplasare pe direcția est-vest și cel vertical. Vectorul de deplasare pe direcția nord-sud nu poate fi detectat cu ajutorul metodelor A-DInSAR, aceasta fiind una dintre limitările importante ale metodologiei, care poate fi depășită numai cu ajutorul datelor suplimentare din măsurători GPS.

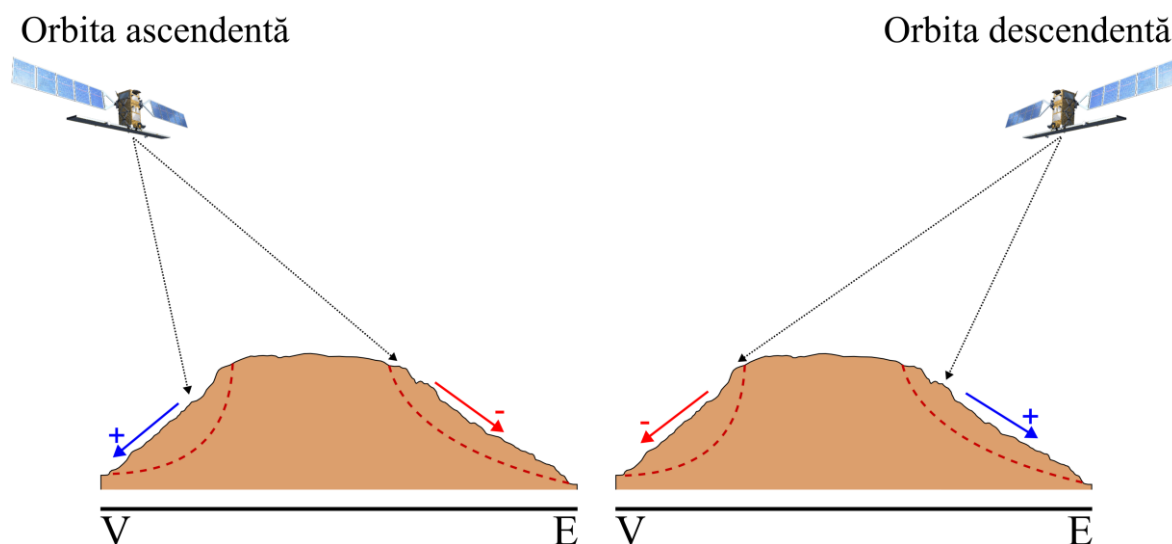


Figura 10. Schiță a deformărilor produse de alunecări măsurate pe direcția LOS. Măsurătorile sunt negative atunci când alunecarea se îndepărtează de satelit (săgeata roșie) și sunt pozitive atunci când materialul alunecat se apropie de satelit (săgeata albastră).

Pe baza metodologiei lui [Notti et al. \(2014\)](#), au fost selectate punctele PS în apropiere de 10 m față de orbita opusă obținute în urma procesării datelor Sentinel-1 atât pentru a extrage vectorii componentelor est-vest și vertical, cât și pentru a proiecta viteza de-a lungul pantei.

4.2 Modelarea numerică (a dinamicii alunecării)

Analiza deformărilor induse de alunecarea Țicău a fost realizată folosind codul Metodei Diferențelor Finite (FDM) de-a lungul secțiunii care traversează alunecarea de teren. Acesta este implementat în aplicația *FLAC*⁷ (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) care încorporează mai multe modele constitutive elastice, plastice, care iau în considerare vâscozitatea, și combinații ale acestora, potrivite pentru situații diferite ([Itasca Consulting group, 2016](#)). Metoda Diferențelor Finite este una dintre cele mai timpurii tehnici de analiză numerică utilizate pentru soluționarea unor seturi de ecuații diferențiale care ia în considerare anumite valori inițiale și/sau condiții de limită ale modelului ([Desai și Christian, 1977](#)).

În general, atunci când este evaluată probabilitatea de producere și/sau dinamica alunecării, aceasta se realizează pe baza tehnicilor de stabilitate care pot avea scopuri diferite, fie să se determine condițiile de stabilitate a versantului, fie să se identifice deplasările care au loc la nivelul masei alunecate, a zonelor problematice și a potențialului mecanism de rupere/alunecare ([Duncan, 1996a](#)).

În ceea ce privește simulările numerice, rezultatele acestora se concretizează de obicei prin echilibru, când evoluția deformărilor încetează, sau colaps. Dacă se obține un rezultat de echilibru, tensiunile și stresurile rezultate în orice punct al masei materialelor pot fi comparate cu valorile măsurate. Dacă se obține un rezultat de colaps, este demonstrat modul de producere a acestuia.

Pentru efectuarea modelelor numerice, masa rocii este împărțită în zone, sau elemente. Fiecărei zone i se atribuie un model constitutiv al materialelor și proprietăți specifice acestora. Modelele constitutive se bazează pe relațiile idealizate dintre stres și deformare care descriu modul în care se comportă materialul. Cel mai simplu model constitutiv este cel elastic liniar, care folosește proprietățile elastice (modulul Young și

⁷ <https://www.itascacg.com/software/FLAC>

raportul lui Poisson) ale materialului. Modelele elastice-plastice folosesc parametri de rezistență pentru a limita stresul/tensiunea de forfecare pe care o zonă îl poate suporta.

Identificarea factorilor care destabilizează panta și conduc la declanșarea unui potențial eveniment poate facilita evaluarea corectă a posibilităților de atenuare a pericolului de alunecare de teren. În consecință, politici și strategii eficiente pot fi propuse și implementate pentru a stabiliza materialul deplasat (Abramson et al., 2002).

4.2.1 Procesul de lucru în FLAC

Pentru realizarea simulărilor numerice a fost folosită Metoda Diferențelor Finite (FDM) implementată în softul specializat FLAC (Itasca Consulting Group, 2016). Acesta permite atât utilizarea interfeței grafice, care este recomandată pentru rezolvarea problemelor simple, cât și utilizarea liniei de comandă dintr-un terminal al aplicației. Utilizarea liniei de comandă este recomandată pentru rezolvarea problemelor complexe și necesită cunoștințe avansate ale utilizatorului deoarece folosește un limbaj de programare propriu numit FISH (prescurtare de la FLACish) care permite dezvoltarea unor funcții specifice și rezolvarea unor probleme mari, extinzând capacitățile programului.

FLAC este un program bidimensional de analiză a diferențelor finite explicite care utilizează nomenclatura convențională (Figura 11) specifică acestor aplicații. Este folosit pentru rezolvarea problemelor ingineresti prin simularea comportamentului materialelor (sol – în sensul de material alterat, care cuprinde pământ și deșeur, ci nu în sens pedologic; rocă sau alte materiale similare) care pot suferi deformări plastice, ireversibile, atunci când limitele lor de sarcină („*yield limits*”) sunt atinse și depășite.

Materialele sunt reprezentate geometric de elemente, sau zone, care formează un grid și care este ajustat de utilizator pentru a se potrivi cu forma obiectului care urmează a fi modelat. Fiecare element se comportă conform unor legi prescrise de stres/tensiune, liniare sau non-liniare, ca răspuns al forțelor aplicate sau restricțiilor de limită („*boundary limits*”). În funcție de sarcina forțelor aplicate, materialul poate ceda și „curge” iar gridul suferă deformări ca răspuns al deplasării materialului reprezentat. Datorită schemei de calcul Lagrangiană, explicită și a tehnicii de zonare discretizată utilizată în FLAC, deformările plastice și colapsul sunt modelate foarte precis.

Pentru realizarea modelărilor numerice în FLAC am urmat fluxul de lucru clasic utilizat în literatură (Conte et al., 2014; Castaldo et al., 2015; De Novellis et al., 2016). Acesta presupune efectuarea mai multor etape, și anume: generarea gridului sau a modelului geometric, alegerea modelului constitutiv și atribuirea proprietăților

materialelor, stabilirea condițiilor inițiale și a condițiilor de limită („boundary”) ale modelului, setarea condițiilor de sarcină și modelarea secvențială (în stagii), interpretarea rezultatelor și identificarea posibilităților de îmbunătățire a eficienței modelului.

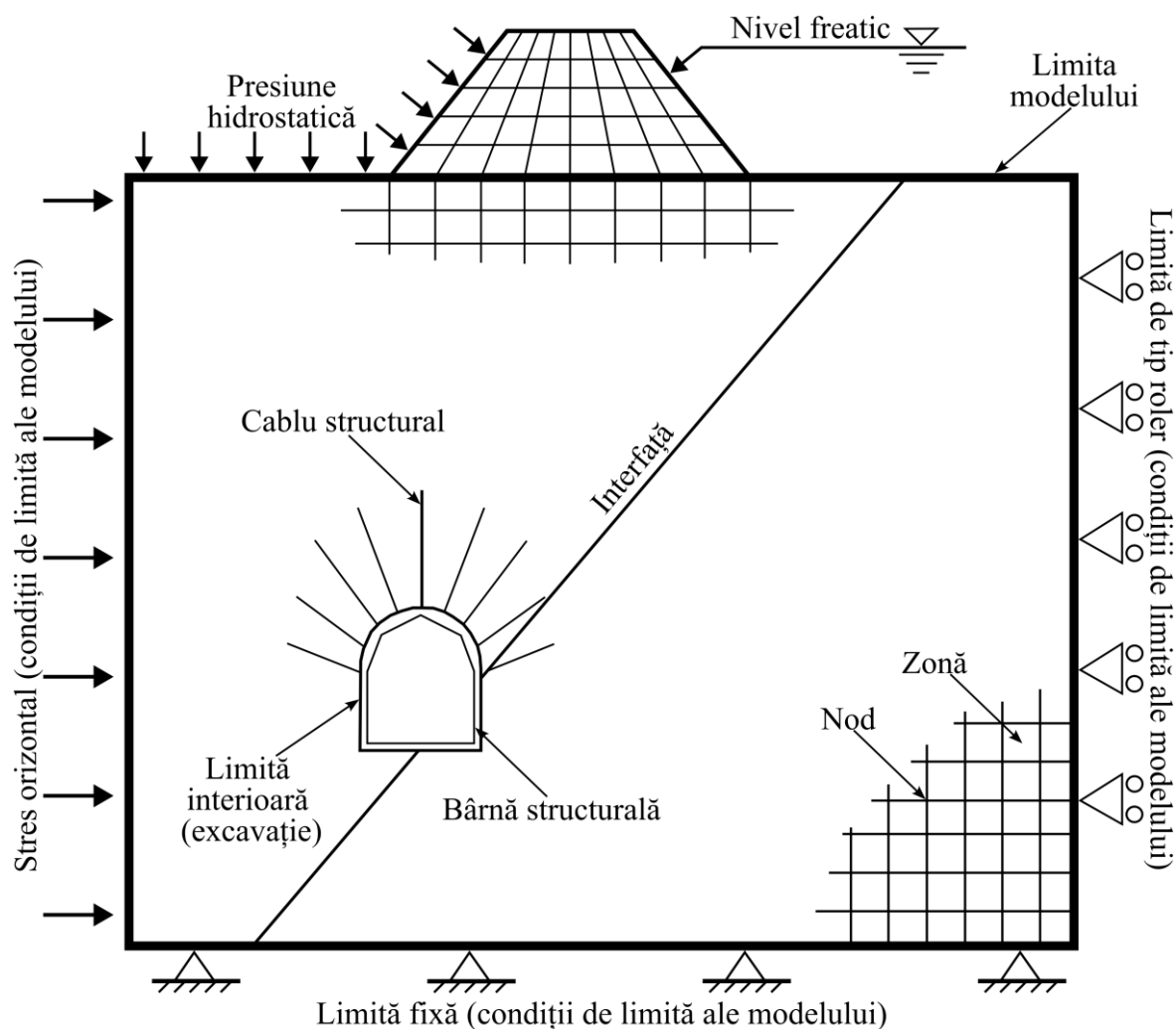


Figura 11. Nomenclatura generală a limbajului FLAC.

Deoarece această analiză este una statică, rezultatele obținute în aceste simulări trebuie interpretate cu atenție. Modelările pe baza Diferențelor Finite nu sunt un „black box” care la final să îți dea soluția dorită. În schimb, există mai mulți indicatori care pot fi analizați în vederea evaluării stării alunecării, dacă este stabilă sau instabilă. În timpul analizei sunt înregistrate valorile vitezelor și a deplasărilor pentru fiecare gridpoint care alcătuiește modelul geometric. Magnitudinile deplasărilor și ale vitezelor pot fi afișate, atât sub formă de linii de contur la nivelul întregului grid, cât și sub forma de history point, și analizate pentru a vedea dacă valorile calculate sunt în creștere, sunt stabile sau sunt în descreștere. Bineînțeles, valorile în creștere indică instabilitate, iar cele stabile și în descreștere indică o situație stabilă. În cazul în care se observă un patrn sistematic și

coerent al deplasărilor și magnitudinea acestora este destul de mare înseamnă că au loc deformări plastice și trebuie analizați și indicatorii plastici.

4.3 Procesarea statistică

4.3.1 Post-procesarea rezultatelor MT-InSAR

Pentru evaluarea obiectivă a zonelor care prezintă o tendință consistentă de deformare a fost utilizat testul nonparametric Mann-Kendall ([Hipel și Mcleod, 1994](#)). Cu ajutorul acestuia au putut fi identificate punctele PS caracterizate de o tendință temporală a deplasărilor (care poate fi diferită de o tendință liniară, sau monotonă) și a fost calculată panta tendinței liniare, care evaluează magnitudinea deformării. Cu ajutorul acestor variabile a fost realizată o filtrare automată a punctelor PS.

Testul Man-Kendall (MK) a fost utilizat prin intermediul aplicației Rstat⁸ ([R Core Team, 2022](#)) prin funcția *mk.test* a pachetului *trend* ([Pohlert, 2020](#)). Practic, pentru fiecare măsurătoare PS este calculată o valoare p (p -value), iar pe baza acestei valori sunt selectate punctele care au un trend semnificativ (în cazul nostru, a fost considerată o valoare p mai mică de 0,0000005). Cu toate că valoarea p pare a fi foarte mică, pentru filtrarea punctelor PS aceasta este semnificativă din punct de vedere statistic și diferențiază măsurătorile care prezintă un trend față de cele care nu prezintă o tendință temporală.

O filtrare ulterioară a fost realizată pe baza pantei regresiei liniare, care ar trebui să fie mai mare/mai mică decât +0,15/-0,15 (în funcție de orbita satelitului), pentru a elimina punctele care arată un trend mai slab. Pentru selectarea clusterelor caracterizate de rate mari ale deformărilor a fost utilizată densitatea kernel a punctelor PS, estimată pe baza vitezei ca și covariată prin intermediul funcției *rhohat* din pachetul R *spatstat* ([Baddeley și Turner, 2005](#); [Baddeley et al., 2016](#)). Această abordare scoate în evidență zonele caracterizate de rate de deplasare de pe suprafețe mai mari și elimină punctele singulare care pot apărea din cauza mai multor factori, fie naturali, fie din cauza procesării. În ceea ce privește prima situație, prezența punctelor PS individuale care au viteze de deplasare mari poate fi dată de schimbarea utilizării terenului sau de cazuri topografice particulare, cum ar fi prezența clădirilor construite pe depozite de umplutură care nu reflectă starea actuală a versantului. Cel de-al doilea caz poate fi dat de prezența zgomotului în

⁸ <https://www.R-project.org/>

interferogramele utilizate în lanțul de procesare, lucru întâlnit mai ales în zonele cu vegetație.

Pentru a analiza relațiile dintre ratele de deplasare și precipitații a fost folosit pachetul R *greenbrown* (Forkel et al., 2013, 2015) care permite identificarea punctelor de rupere în seriile temporale și calcularea trendurilor/tendințelor (sau a segmentelor de trend) de evoluție. În cazul nostru, punctele de rupere și tendințele au fost calculate pe baza regresiei cuantilelor la mediană folosind funcția *Trend* din pachetul R *greenbrown*. Pentru detectarea punctelor de rupere, abordarea utilizează în mod iterativ testul sumei glisante a celor mai mici pătrate obișnuite (*the ordinary-least squares moving sum – MOSUM test*). Dacă testul indică o schimbare structurală semnificativă a valorii $p \geq 0,05$ atunci numărul și locația punctelor de întrerupere sunt estimate prin reducerea Criteriului Informațiilor Bayesiene (BIC) și, respectiv, prin reducerea sumei reziduale a pătratelor acestei regresii (Bai și Perron, 2003; Zeileis et al., 2003; Forkel et al., 2013, 2015). Ulterior, tendințele ratei de deplasare au fost corelate cu precipitațiile pentru stația meteorologică Iași din baza de date ECA&D (Klein Tank et al., 2002; Haylock et al., 2008) pentru a identifica potențialul comportament al obiectelor reprezentative (de ex.: case, stâlpi) care sunt amplasate pe corpul alunecării de teren Țicău după evenimentele cu precipitații abundente.

4.3.2 Procesarea datelor climatice

Datele climatice au fost procesate statistic cu ajutorul soft-ului de tip open-source Rstat (R Core Team, 2022), care poate fi descărcat de la adresa <http://www.r-project.org/index.html>, și prin utilizarea pachetelor *zoo* (Zeileis și Grothendieck, 2005; Zeileis et al., 2022) și *xts* (Ryan et al., 2020). Pentru calculul trendului polinomial în graficele cu precipitațiile medii zilnice sau anuale a fost utilizată funcția *loess*, cu 50% din date utilizate ca vecinătate pentru regresie.

5. Rezultate

5.1 MT-InSAR

Rezultatele obținute pe baza procesării imaginilor SAR constau în două tipuri de informații. Pe de o parte au fost create hărți ale vitezelor medii anuale ale deformărilor înregistrate la nivelul orașului Iași, iar pe de altă parte, au fost extrase serii temporale ale evoluției deformărilor. Aceste rezultate sunt obținute pentru fiecare set de imagini procesat și pot fi vizualizate, clasificate și interpretate cu ajutorul aplicațiilor SIG, în cazul nostru fiind utilizată aplicația cu sursă deschisă QGIS⁹.

În cazul rezultatelor obținute pe baza datelor Sentinel-1, viteza medie anuală variază de la -24,4 la +16,9 mm/an pentru orbita ascendentă (**Figura 12**) și de la -24,2 mm/an la +18,3 mm/an pentru cea descendentă (**Figura 13**). Valorile pozitive indică faptul că distanța dintre obiectul considerat reflector și senzor se micșorează în timp, iar valorile negative indică o creștere a distanței țintă-senzor, cu alte cuvinte, reflectorul se îndepărtează de satelit.

Pentru datele Sentinel-1 au fost luate în considerare doar punctele PS cu coerență a semnalului reflectat mai mare de 0,75, puncte care acoperă teritoriul municipiului Iași și părți ale zonei sale metropolitane. Astfel, numărul de puncte cu o coerență mai mare decât pragul considerat este de 131670 de puncte detectate pe orbita descendentă, dintre care aproximativ 92,7% sunt clasificate ca puncte stabile. Pentru orbita ascendentă au fost identificate 125022 de reflectori coerenți, iar dintre aceștia 93,1% sunt stabili. În analiza noastră, considerăm ca fiind stabil un punct care are o viteză medie anuală cuprinsă între -2 și +2 mm/an. Acest prag a fost ales pe baza preciziei tehnicilor MT-InSAR (**Colesanti și Wasowski 2006; Crosetto et al. 2008**) și pe baza observației și comparației directe a punctelor PS din zonele stabile (ex. Platoul Dealului Copou) și a celor instabile (ex. zona Țicău).

⁹ <https://www.qgis.org/en/site/>

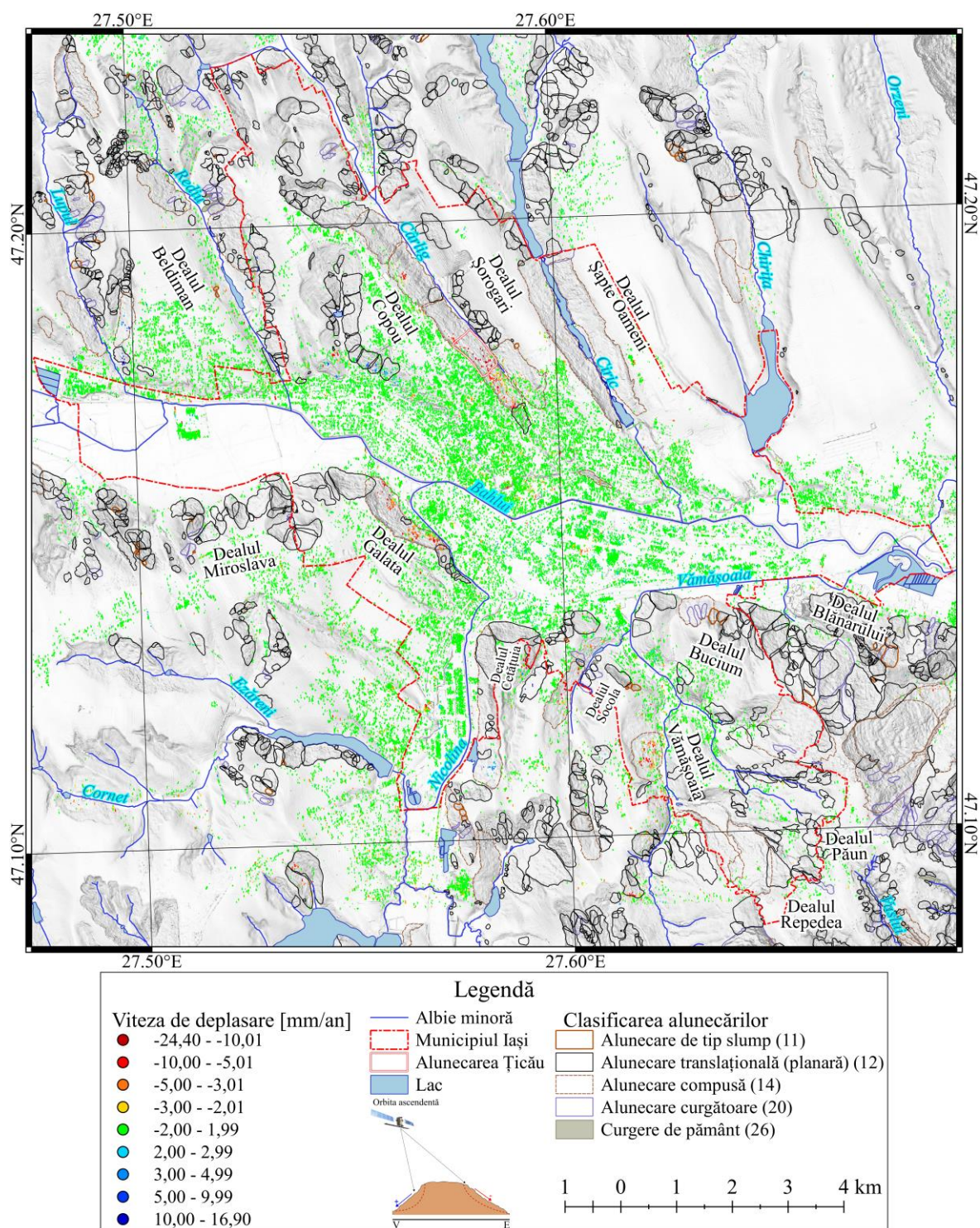


Figura 12. Harta vitezei de deplasare rezultate în urma procesării setului de date Sentinel-1, orbita ascendentă, pentru perioada 2014-2018. Pentru clasificarea alunecărilor am utilizat clasificarea propusă de [Hungar et al. \(2014\)](#) și adaptată în română de [Niculiță \(2020a\)](#).

Viteza deplasărilor înregistrate pe pantele afectate de alunecări de teren variază de la ± 7 mm/an la ± 24 mm/an, viteză măsurată în lungul direcției de iluminare a satelitului (LOS), în concordanță cu geometria satelitului și orientarea versanților. Pantele instabile orientate spre nord-est și est prezintă deformări pozitive pe orbita descendentă și valori

negative pe cea ascendentă. Dimpotrivă, pantele orientate spre sud-vest și vest prezintă deformări pozitive pentru geometria ascendentă și valori negative în cea descendentă.

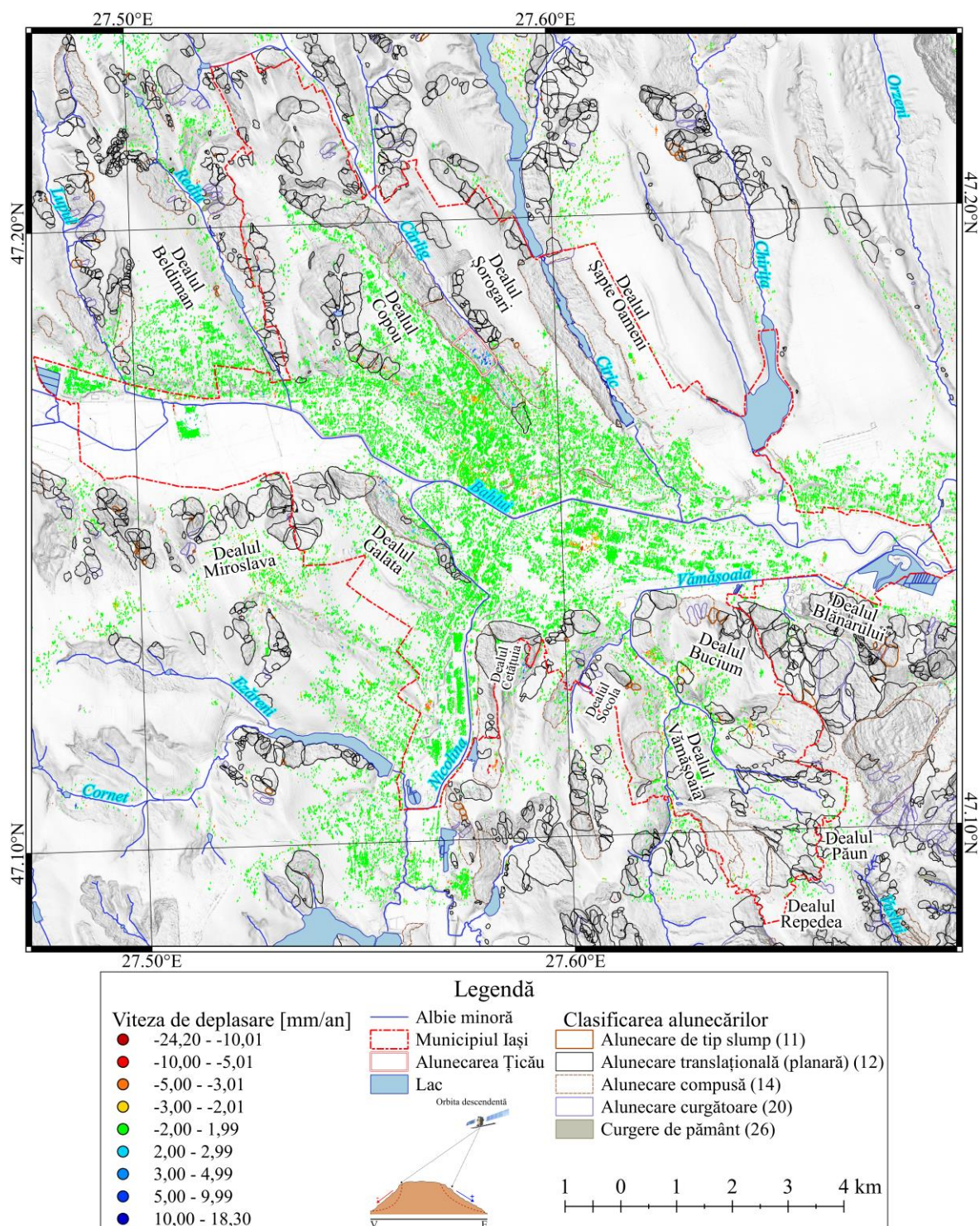


Figura 13. Harta vitezei de deplasare rezultate în urma procesării setului de date Sentinel-1, orbita descendentă, pentru perioada 2014-2018. Pentru clasificarea alunecărilor am utilizat clasificarea propusă de [Hungry et al. \(2014\)](#) și adaptată în română de [Niculiță \(2020a\)](#).

În zona afectată cu alunecări de teren a cartierului Țicău, viteza medie a măsurătorilor PS are un comportament similar cu modelul descris mai sus, înregistrând valori mari ale vitezei medii ce variază de la ± 7 mm/an până la ± 24 mm/an (**Figura 14 și**

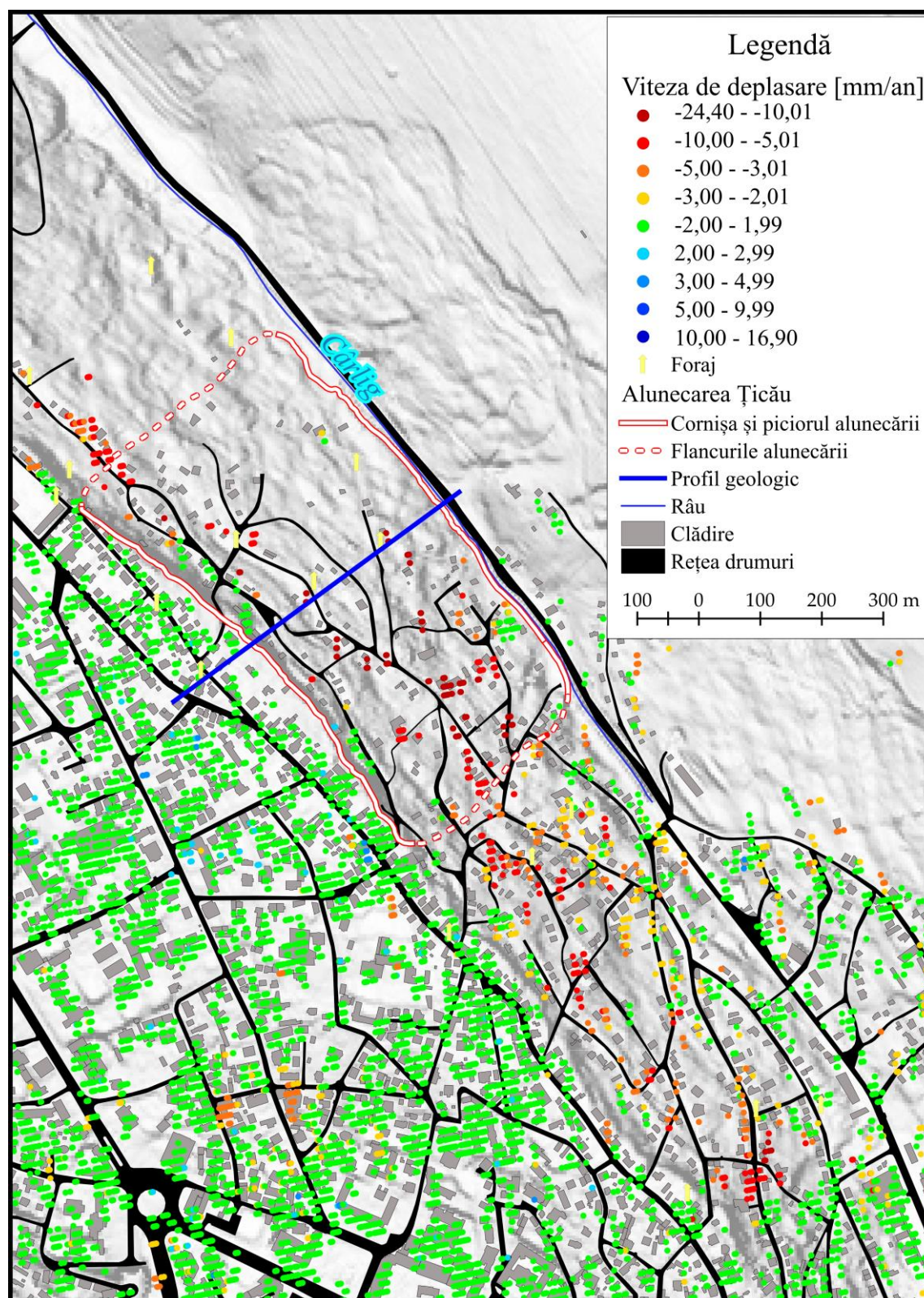


Figura 14. Harta vitezei de deplasare pentru alunecarea Țicău în urma procesării setului de date Sentinel-1, orbita ascendentă.

Figura 15). Punctele identificate sunt localizate în partea superioară și de mijloc a versantului. Densitatea mică a punctelor în partea inferioară a acestuia este cauzată de prezența vegetației dense și lipsa unor reflectori coerenți. În mod specific, punctele stabile

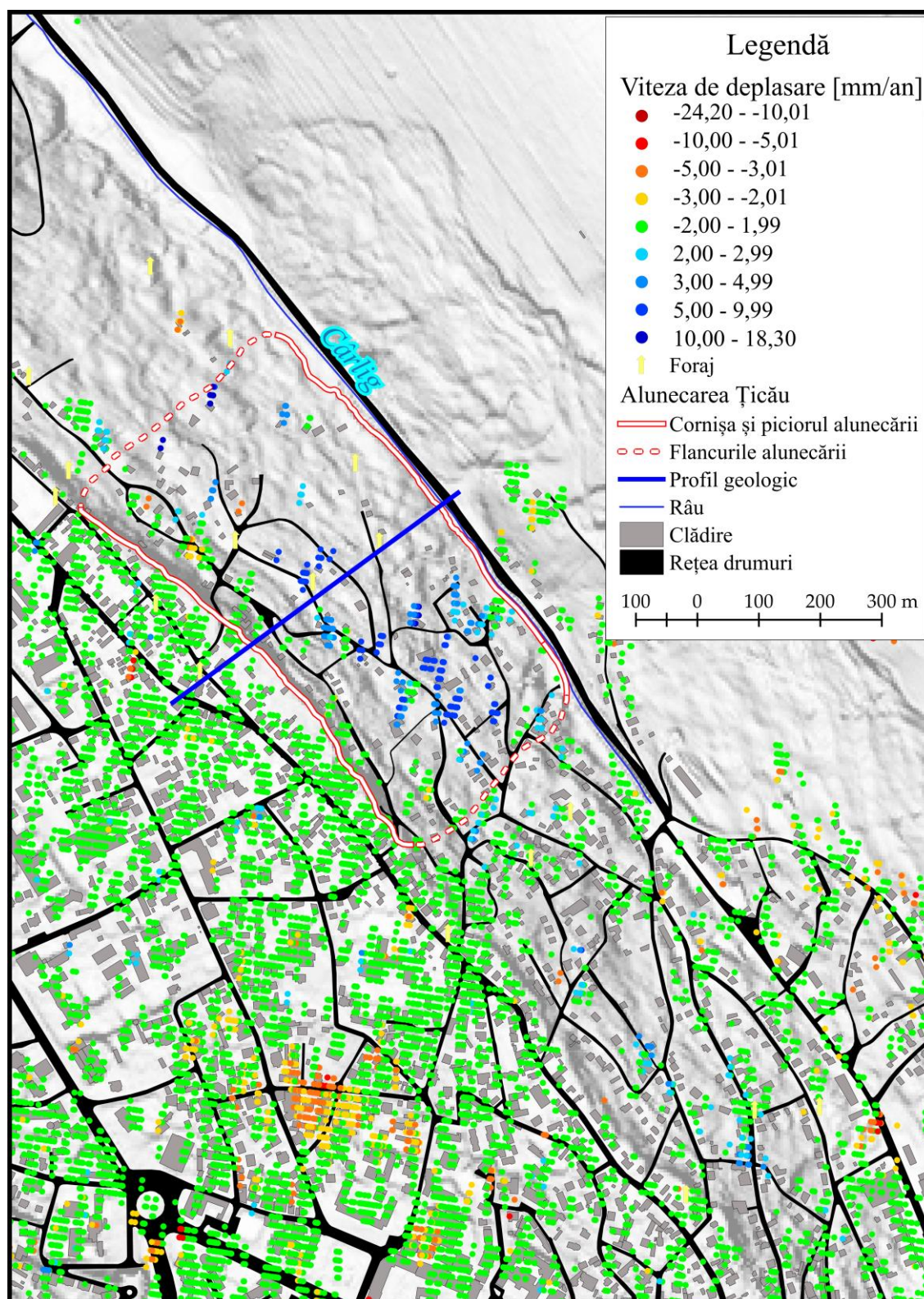


Figura 15. Harta vitezei de deplasare pentru alunecarea Țicău în urma procesării setului de date Sentinel-1, orbita descendentă.

se găsesc în zona de platou a Dealului Copou, mai sus de coroana alunecării de teren, în timp ce punctele instabile sunt localizate în partea bazală a cornișei alunecării și în zonei de depleție a alunecării.

În cazul imaginilor ENVISAT și ERS-1/2 a fost utilizată tehnica SBAS ca urmare a numărului mic de achiziții disponibile pentru zona de studiu și pentru a îmbunătăți astfel gradul de acoperire spațială cu informații utile. Datorită geometriei ascendente de achiziție a imaginilor și a orientării versantului a fost posibilă obținerea unor rezultate care indică clar prezența deformărilor pe versantul nord-estic al Dealului Copou în perioada 2002-2009. Harta vitezei medii anuale a setului de date ENVISAT ascendent prezintă valori cuprinse între -10 mm/an și +10 mm/an măsurate pe direcția LOS (**Figura 16**). Cele mai evidente deformări se identifică în zona cartierului Țicău, unde vitezele de deplasare înregistrate peste corpul alunecat încep de la -2 mm/an și ajung până la -10 mm/an, și chiar mai mult (**Figura 17**). De fapt, în această zonă se găsesc cele mai mari valori calculate pentru perioada 2002-2009. Prezența acestor deformări confirmă activitatea și mișcarea lentă, dar continuă, a alunecării de teren.

Viteza proiectată de-a lungul pantei maxime (**Figura 18**) indică modele similare cu viteza 1D, măsurată în lungul direcției de iluminare a senzorului. Componenta verticală și cea orizontală, pe direcția est-vest (**Figura 19**), confirmă de asemenea, concluziile obținute în urma analizei vitezelor de deplasare 1D pentru cele două orbite. Este de menționat faptul că aceste măsurători, obținute în urma reproiectării rezultatelor 1D, nu sunt la fel de zgomotoase ca și datele originale, versantul alunecat diferențiindu-se clar de platoul stabil al dealului Copou. Pe de altă parte, acoperirea spațială a acestora este mai redusă deoarece unele puncte din orbita ascendentă și cea descendentă nu se află unele în proximitatea celorlalte și nu au fost incluse în estimarea vitezei proiectate.

În ceea ce privește seriile temporale de deplasare a rezultatelor obținute pe baza procesării datelor Sentinel-1, este de observat sensibilitatea dinamicii alunecării de teren raportată la cantitatea de precipitații. Modelul de evoluție în timp a măsurătorilor PS de pe alunecarea de teren Țicău este definit de tendințe asociate cu perioade de accelerare și decelerare a deformărilor (**Figura 20**).

Perioadele cu decelerări, caracterizate de deplasări reduse ale maselor alunecate și care tind spre stabilizare, au loc în timpul anotimpurilor cu precipitații reduse. Situația ulterioară apare în timpul sezoanelor cu precipitații abundente, mai ales atunci când precipitațiile provenite din ploi sunt asociate cu topirea zăpezii, fapt care duce la creșterea

nivelului freatic. Acest proces are ca rezultat deplasarea permanentă și lentă a materialului destabilizat, care se poate prelungi chiar și în timpul sezonelor uscate. Deplasările înregistrate în perioada investigată confirmă faptul că alunecarea de teren Țicău este activă

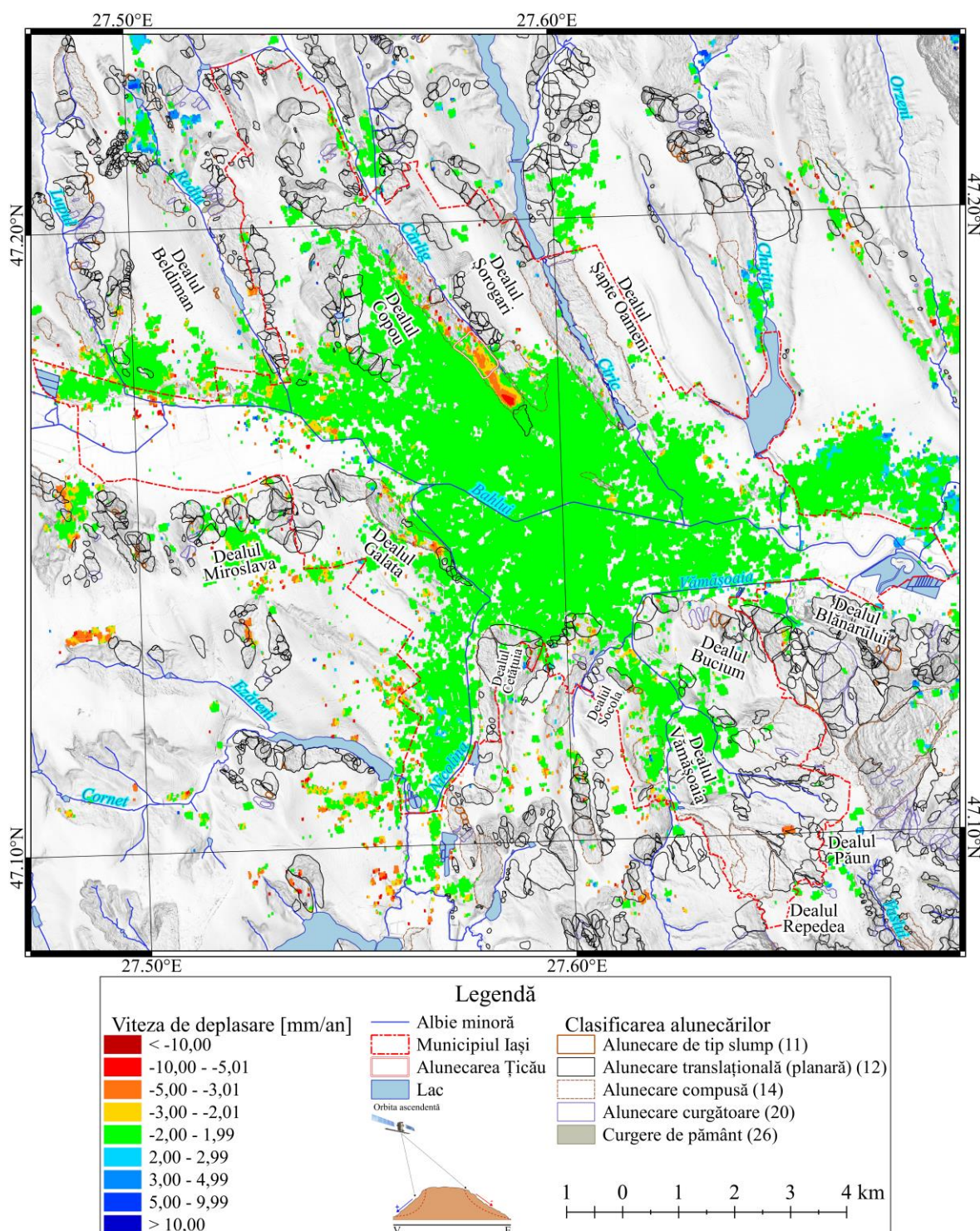


Figura 16. Harta vitezei de deplasare rezultate în urma procesării setului de date ENVISAT, orbita ascendentă, pentru perioada 2002-2009. Pentru clasificarea alunecărilor am utilizat clasificarea propusă de (Hungar et al., 2014) și adaptată în română de (Niculiță, 2020a).

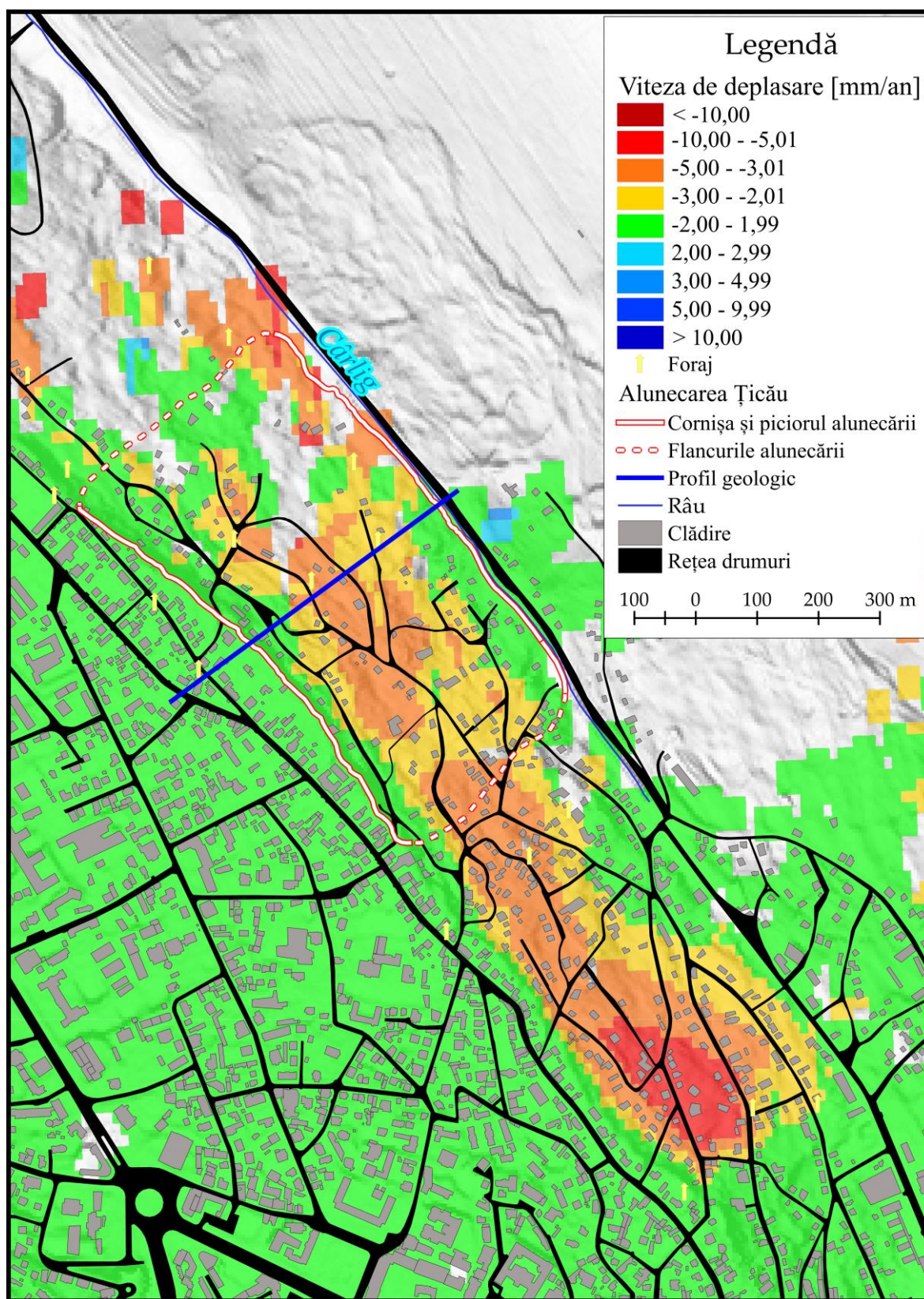


Figura 17. Harta vitezei de deplasare pentru alunecarea Țicău în urma procesării setului de date ENVISAT, orbita ascendentă.

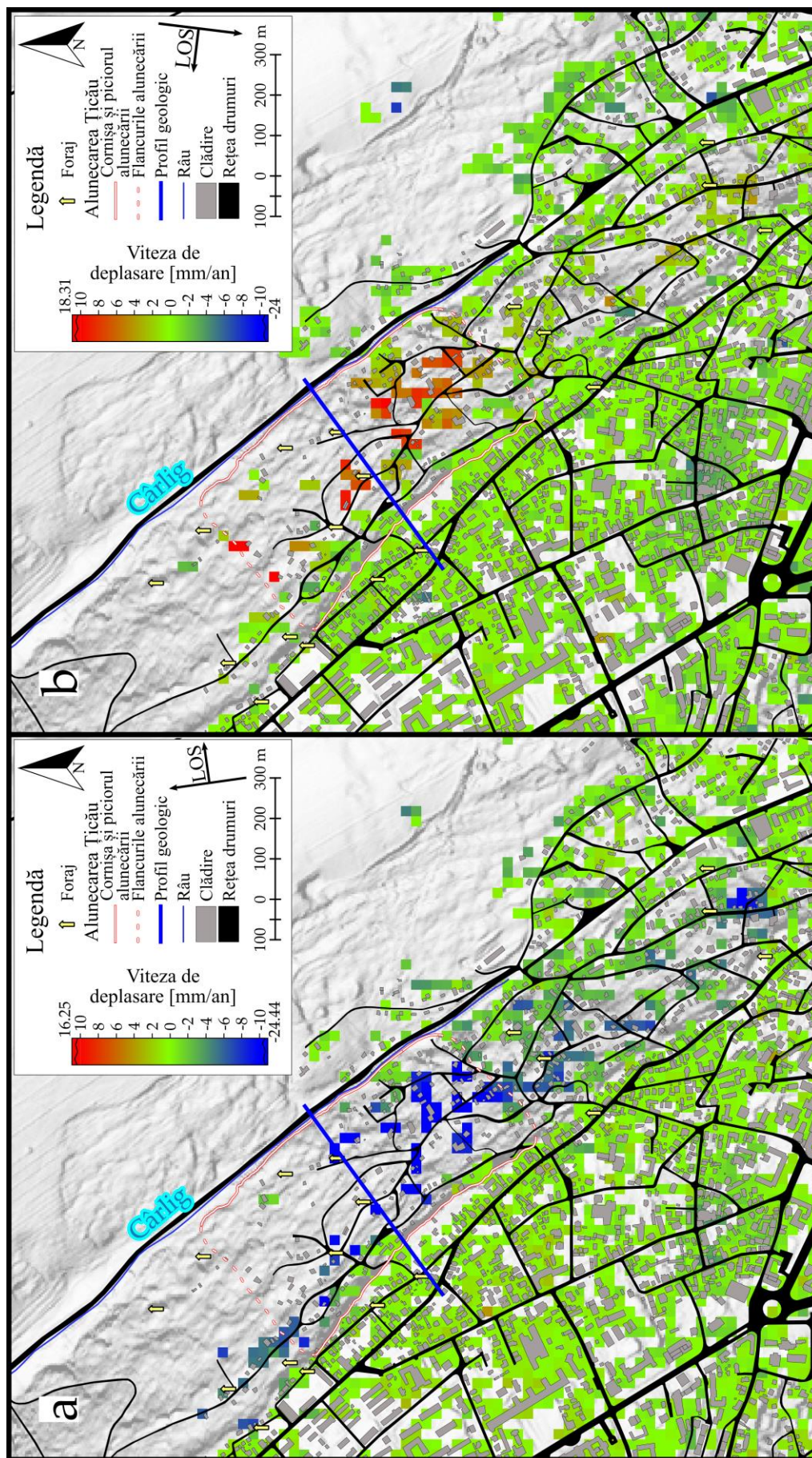


Figura 18. Harta vitezei de deplasare proiectată de-a lungul pantei ascendente și (b) pentru orbita descendentă.

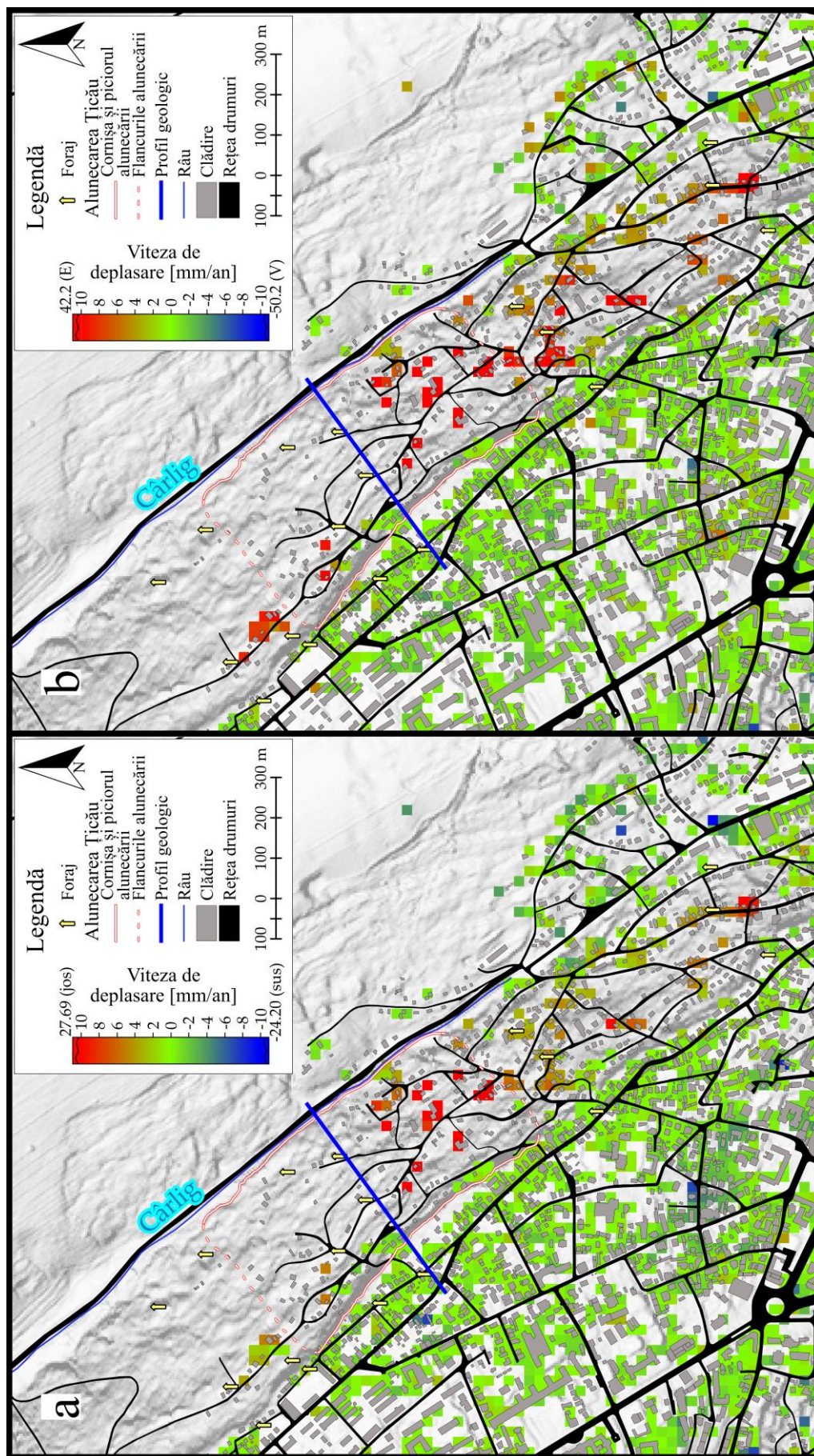


Figura 19. Harta componentelor 2D a vitezei de deplasare: (a) componentul vertical și (b) componentul orizontal pe direcția est-vest.

cu rate de deplasări care prezintă diferite tendințe separate de puncte de întrerupere („*breakpoints*”) generalizate în evoluția punctele PS analizate.

Analiza seriilor de precipitații indică pentru anii 2014, 2016 și 2017 primăveri și veri ploioase (atât pe baza precipitațiilor zilnice, cât și pe baza precipitațiilor cumulate în 30 de zile), în timp ce anul 2015 este caracterizat de anotimpuri mai uscate. În acest context, tendința deplasărilor este definită de o decelerare din 2014 până în 2015 și accelerare din nou în cursul anului 2016. Locația punctelor de întrerupere a trendului deplasărilor (graficul de tip *rug plot* din **Figura 20**) este consistentă pentru toate măsurătorile PS în ceea ce privește modificările de trend din primăvara anului 2015 și toamna lui 2016. Deoarece în zona de studiu nu există un sistem de monitorizare a apelor subterane, dar având în vedere că răspunsul apei subterane la precipitațiile căzute este susceptibil la întârzieri (Conte et al., 2017), raportarea și interpretarea rezultatelor pe baza influenței precipitațiilor asupra deplasării materialului destabilizat prin reîncărcarea stratului freatic este plauzibilă și posibilă.

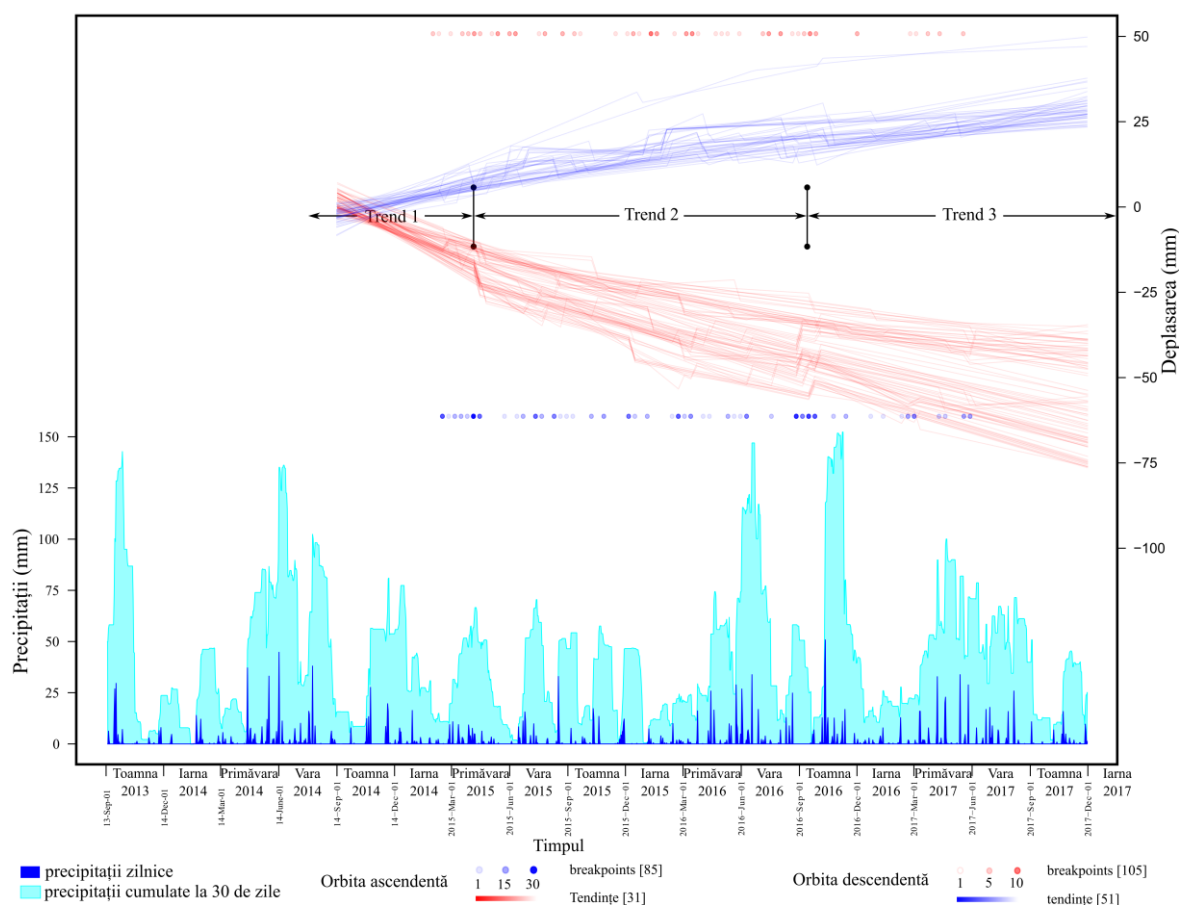


Figura 20. Trendul seriilor temporale ale deplasărilor Sentinel-1, pentru versantul nord-estic al Dealului Copou și cantitatea de precipitații pentru perioada analizată.

5.2 Post-procesarea statistică a rezultatelor MT-InSAR

Prin procesarea și analiza ulterioară a vitezelor și ratelor de deplasare ale măsurătorilor PS ne propunem identificarea arealelor de tip „hot-spot” (**Figura 21** - poligoanele portocalii și magenta) care sunt active în momentul de față ca urmare a deformărilor/mișcărilor provocate de alunecări de teren active sau latente, cartate de (**Necula și Niculiță, 2017; Niculiță et al., 2018**).

Pentru determinarea gradului de activitate al alunecărilor am considerat pragurile empirice propuse de (**Varnes, 1978; Cruden și Varnes, 1996; Hungr et al., 2014**) bazate pe viteza alunecărilor de teren. Pe seama acestor praguri am clasificat vitezele medii anuale

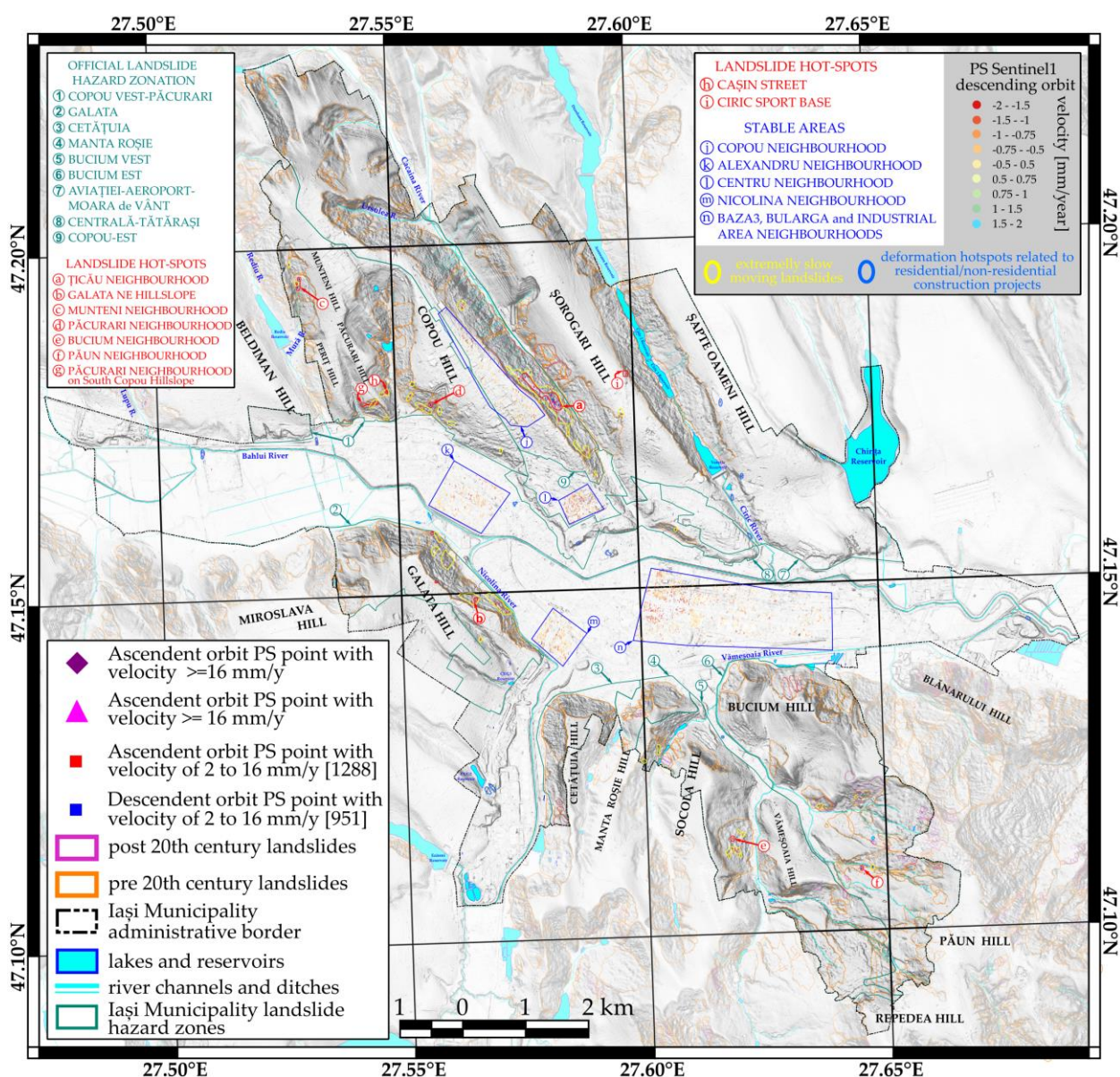


Figura 21. Zonarea oficială a pericolului de alunecare de teren, hot-spot-urile vitezei alunecării identificate și inventarul alunecărilor de teren din municipiul Iași (după **Necula et al., 2021**).

ale măsurătorilor PS după cum urmează: viteze >16 mm/an sunt clasificate drept alunecări de teren foarte lente care necesită întreținere, iar pe de altă parte, viteze <16 mm/an sunt caracteristice alunecărilor de teren extrem de lente. Pe baza acestei clasificări putem argumenta existența a două grupuri hot-spot cu viteze mai mari de 16 mm/an care se încadrează în categoria alunecărilor de teren cu mișcare foarte lentă, situatele în zonele de hazard 9 (Copou-Est) și 2 (Galata) din **Figura 21**.

Aceste grupuri de deplasare pe care le considerăm hot-spot-uri ale activității alunecării de teren sunt poligoanele roșii din **Figura 21** și sunt localizate în cartierul Țicău, în partea de nord-est a Dealului Copou și versantul nord-estic al cartierului Galata. Celelalte zone care prezintă deformări asociate deplasărilor în masă sunt clasificate ca alunecări de teren extrem de lente. Ca limită inferioară a acestei clase am considerat pragul de 2 mm/an, reprezentativ pentru zona investigată. În studiul nostru, zonele cu viteze mai mici de 2 mm/an, clasificate ca fiind relativ stabile, sunt situate în zonele de platou (**Figura 21** - zonele stabile *j* și *l*) și în albiile majore ale râurilor (**Figura 21** - zonele stabile *k*, *m* și *n*).

5.3 Modelarea numerică

Pentru identificarea tipologiei și înțelegerea mecanismului alunecării de teren am efectuat o serie de simulări numerice pentru a observa dinamica și modelul deformărilor în funcție de variația proprietăților materialului. În acest mod, reducem gradul de incertitudine al presupunerilor asumate în procesul de atribuire a parametrilor și întărim validitatea modelului, astfel încât acesta să arate realitatea din teren și să valideze datele MT-InSAR. Totodată, în simulările noastre, am luat în considerare și variația nivelului freatic. Rezultatul acestor simulări ne ajută să înțelegem comportamentul corpului alunecat în raport cu factorii de mediu, cei pregătitori și preparatori.

Din punctul de vedere al magnitudinii deplasărilor (**Figura 22**), evoluția modelului este consistentă cu modificarea parametrilor, în sensul că deplasările calculate scad odată cu creșterea valorilor proprietăților materialului. Mai precis, prin creșterea valorilor unghiului de fricțiune (φ) și/sau a coeziunii efective (c') a materialului, deplasările totale înregistrate în simulările noastre scad. Astfel, scenariile simulate indică deplasări mai mari

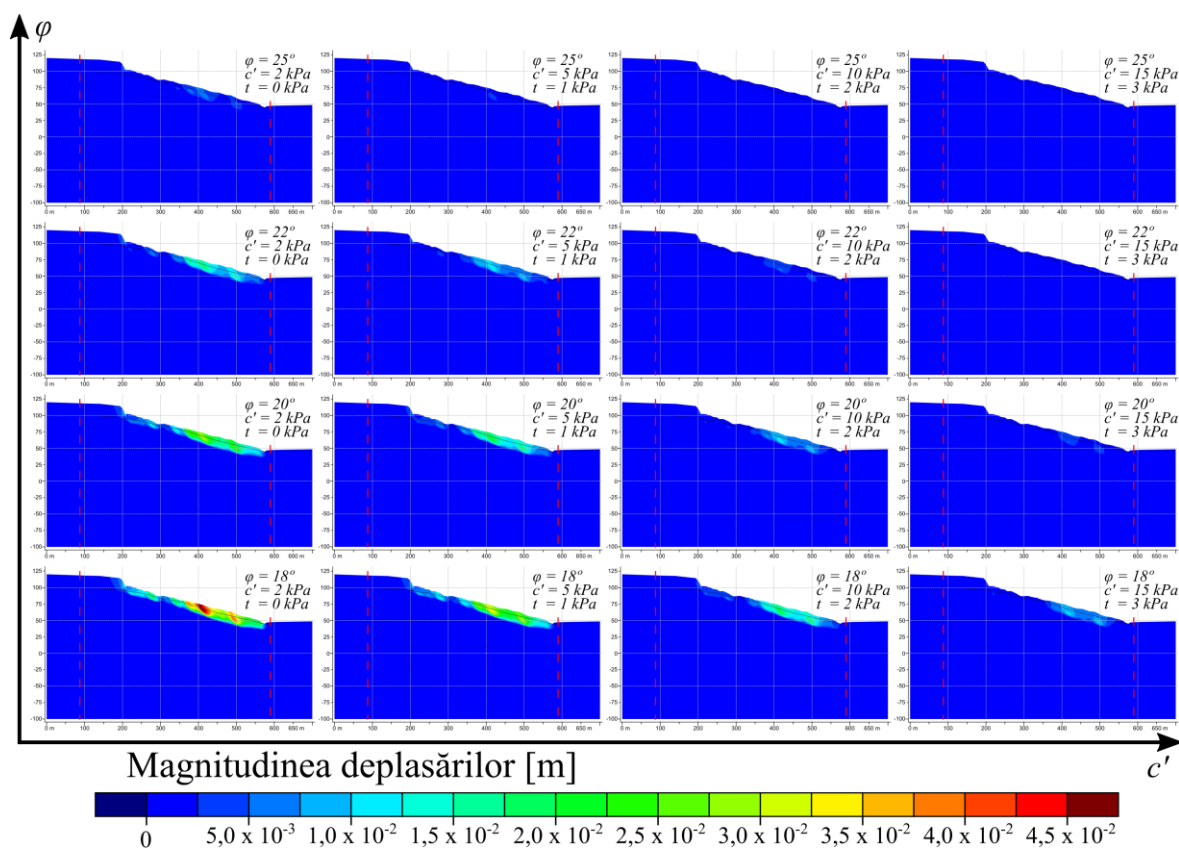


Figura 22. Magnitudinea deplasărilor obținute în urma simulărilor numerice folosind combinații diferite ale parametrilor materialului alunecat. Linia roșie punctată reprezintă punctul din care modelul a fost extins artificial pentru a elimina influența limitei modelului, deci nu reprezintă topografia reală.

pentru situația în care unghiul de fricțiune este mic și coeziunea efectivă a materialului mică. În situația opusă, unghi de fricțiune mare și coeziune efectivă mare, deplasările care se produc sunt mai mici.

În ceea ce privește simularea reprezentativă pentru alunecarea studiată am considerat-o pe cea definită de parametrii: $\varphi = 20$, $c' = 5$ kPa, $t = 1$ kPa. Alegerea acestei simulări se bazează pe observațiile din teren și pe experiența autorului. Alegerea unei simulări cu parametri foarte mari duce la o stabilitate a alunecării pe când niște valori ale parametrilor foarte mici (de ex. $\varphi = 18$, $c' = 2$ kPa, $t = 0$ kPa), ar duce la valori ale deplasărilor foarte mari și care nu sunt reale. În acest caz, valorile maxime ale magnitudinii totale ale deplasărilor ajung până la cel mult 25 mm și indică partea mediană a versantului ca fiind cea mai susceptibilă la deformări, față de partea de sus și bazală a acestuia. Rezultatele obținute îmbunătățesc în mod semnificativ modul de înțelegere a comportamentului din adâncime al alunecării de teren cât și a mecanismului de alunecare și ar trebui să fie utilizate ca informații prealabile pentru lucrările viitoare de stabilizare și amenajare.

Avantajul utilizării modelelor numerice față de tehnicile MT-DInSAR este că obținem un câmp continuu al deplasărilor existente, față de măsurătorilor PS unde obținem date punctuale, dar de o acuratețe foarte mare. Pe baza acestor informații putem observa comportamentul alunecării în adâncime și care sunt relațiile acestor deformări cu ceea ce identificăm la suprafață. Pe de altă parte, pentru realizarea simulărilor numerice sunt necesare cât mai multe date și măsurători in situ. Lipsa lor limitează realizarea unor modelări temporale a dinamicii deformărilor, comparabilă cu seriile temporale a rezultatelor MT-InSAR. Din acest motiv am folosit un model constitutiv mult mai simplu pentru modelarea comportamentului materialelor. Astfel, justificăm alegerea efectuării unei analize statice prin utilizarea unui model constitutiv clasic, modelul elasto-plastic Mohr-Coulomb, care este suficient pentru calcularea magnitudinii deplasărilor și identificarea celor mai predispuse zone producerii deformărilor, a magnitudinii acestora și a mecanismul de alunecare.

Datele obținute indică prezența unei alunecări active, în sectorul median, cu o geometrie tipică alunecărilor translaționale, puțin adâncă (10-15 m), cu totul diferită de ceea ce prezintă studiile geotehnice comandate de Primăria Municipiului Iași pentru această zonă. Astfel, din datele prezentate de [Purice \(2013\)](#) se previzionează alunecări rotaționale care să afecteze masa alunecată.

6. Discuții

6.1 Dinamica versanților din municipiul Iași

Prin analiza rezultatelor datelor Sentinel-1 este posibilă detectarea zonelor afectate de alunecări de teren, actualizarea și îmbunătățirea bazei de date existente prin delimitarea clară a zonelor afectate, precum și monitorizarea zonelor critice. Mai mult, datorită posibilității de a efectua analize pe suprafețe relativ mari, comparativ cu măsurătorile in situ, pot fi identificate zone noi afectate de procese geomorfologice și geologice și care nu erau cunoscute anterior. Astfel de cazuri sunt observate atât pe baza măsurătorile PS brute cât și în urma post-procesării acestor rezultate. În zona analizată, a fost identificată zona Spitalului Sfântul Spiridon, afectată de o subsidență locală, probabil indusă de compactarea sedimentelor cuaternare sub sarcina construcțiilor din zonă. Cele mai multe dintre deformări se suprapun peste zonele afectate de alunecări de teren și care sunt incluse în zonele de hazard oficiale delimitate de Primăria Municipiului Iași (poligoane verzi din **Figura 21**) și care acoperă 61,45% din suprafața orașului. În șapte din cele nouă zone de hazard se identifică deformări active ale versanților datorate alunecărilor de teren.

Disponibilitatea ambelor orbite, ascendentă și descendentă, îmbunătățește semnificativ calitatea rezultatelor noastre prin operațiunea de validare încrucișată și oferă posibilitatea de a deriva din măsurătorile LOS componentele reale ale deformărilor. Procesul de validare încrucișată presupune că prezența proceselor de alunecare (sau a altor procese, de exemplu, de compactare) care au fost identificate pe prima orbită sunt confirmate și de rezultatele celei de-a doua orbite. Știind că alunecarea de teren Țicău translează dinspre sud-vest către nord-est, vom obține viteze negative măsurate pe direcția de deplasare ascendentă a satelitului, în timp ce măsurătorile înregistrate de orbita descendentă vor fi pozitive.

În ceea ce privește seriile temporale ale deplasărilor, este de observat sensibilitatea dinamicii alunecării în raport cu cantitatea de precipitații. Privind modelul de evoluție al

punctelor PS de pe versantul nord-estic al Copoului, comportamentul lor este caracterizat de intervale de accelerare și perioade de activitate redusă care tinde spre stabilizare (**Figura 20**). Perioadele cu mișcare lentă apar, mai mult sau mai puțin, în anotimpurile de iarnă, când precipitațiile solide, sub formă de ninsoare, sunt specifice. Mai mult, cantitatea de precipitații cumulate din acest sezon este mai mică comparativ cu perioadele de accelerație definite de cantități ale precipitațiilor mult mai mari. Modelul ulterior apare în sezonul de primăvară, când precipitațiile caracterizate de ploi sunt asociate topirii zăpezii, ceea ce duce la creșterea nivelului freatic. Acest proces rezultă în menținerea unei alunecări lente dar constante a corpului alunecării, care se poate prelungi chiar și în timpul verii.

6.2 Tipologia, mecanismul alunecării și validarea acestora

Un aspect foarte important, atât din punct de vedere științific, dar mai ales practic, este cel legat de tipul alunecării de teren și al mecanismului acesteia, cu referire la alunecarea Țicău. Aceste două elemente sunt importante deoarece ne oferă indicații despre modul în care ar trebui acționat în vederea stabilizării materialului, în funcție de modul de deformare.

În ceea ce privește mecanismul procesului, alunecarea este de tip translațional, de suprafață, după cum reiese din simulările numerice, mai ales atunci când analizăm forța maximă de forfecare. Pe baza acesteia se poate identifica clar planul de alunecare, cât și prezența unor eventuale cornișe secundare care se pot reactiva. Această tipologie este în contradicție cu studiile anterioare realizate, care indică faptul că alunecarea ar fi una de tip rotațional și care ar avea planul de alunecare la o adâncime mult mai mare. În această idee, reamintim metodologia utilizată anterior pentru realizarea studiilor de stabilitate.

Ideea mecanismului translațional este susținută și de rezultatele MT-InSAR. Analiza componentelor verticale și orizontale (**Figura 23**) indică foarte clar dominanța componentului orizontal, specific alunecărilor translaționale. În cazul în care alunecarea ar fi fost una de tip rotațional, tiparul deplasărilor ar fi fost diferit (**Figura 23**). Practic, pe baza componentului vertical, în partea mediană spre cea de jos a alunecării ar trebui să existe ridicări ale masei alunecate, lucru care nu se întâmplă.

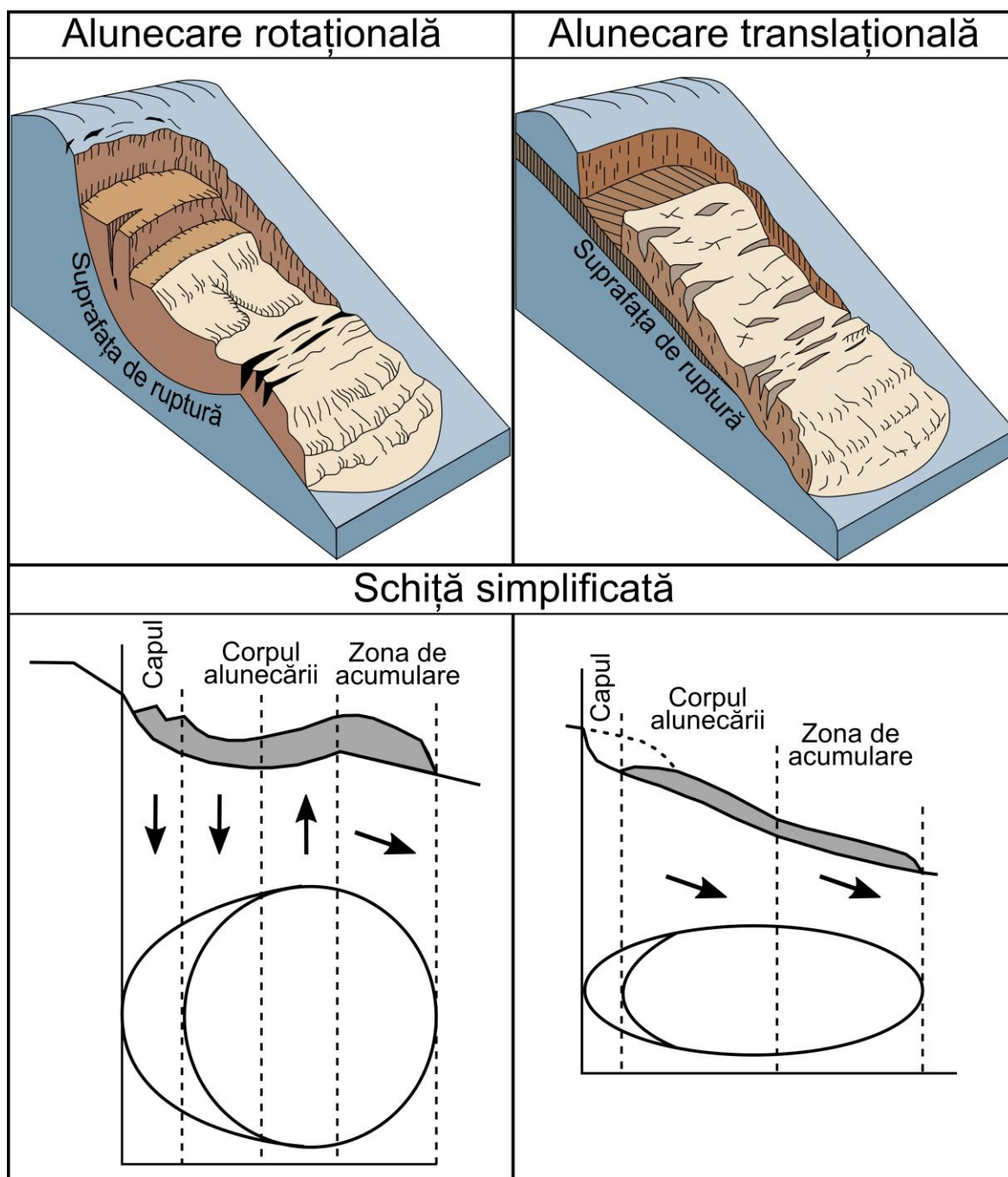


Figura 23. Deplasările așteptate în funcție de tipologia alunecării (modificată după [Cascini et al., 2010](#)).

Astfel, pe baza celor prezentate putem argumenta clar faptul că alunecarea de teren Țicău este o alunecare de translație, cu mișcare foarte lentă, care are direcția de alunecare dinspre sud-vest spre nord-est. Aceasta este caracterizată de prezența unei cornișe principale și a mai multor cornișe secundare, de un plan de alunecare prezent la adâncimi ce variază între 10-15 m și de o masă alunecată a cărei dinamici se accentuează pe măsură ce nivelul freatic crește. Viteza medie anuală, calculată pe baza tehnicilor MT-InSAR,

înregistrată peste corpul alunecat măsoară mai mult de 16mm/an, fapt care o încadrează în categoria alunecărilor foarte lente și care necesită monitoring și mentenanță.

6.3 Beneficiile și limitările analizei

Pentru realizarea studiului nostru, am pus în valoare capacitățile și oportunitățile a două tehnici moderne și de perspectivă prin exploatarea și corelarea rezultatele acestora. În acest mod, am reușit să depășim atât deficiențele cauzate de lipsa datelor de calitate pe care le-am utilizat, cât și limitările uneia dintre metode prin fructificarea punctelor forte ale celeilalte

În ceea ce privește analiza MT-InSAR, principala problemă întâlnită în timpul procesării imaginilor a fost legată de prezența vegetației dense, de tip forestier, în anumite zone ale Iașului, care a dus la pierderea coerenței semnalului reflectat. Atunci când această problemă este asociată cu disponibilitatea unui număr limitat de imagini se poate ajunge la reducerea semnificativă a informațiilor spațiale pe care le putem obține. Acest lucru este foarte vizibil în cazul seturilor de date ERS și ENVISAT. Deoarece partea inferioară a alunecării de teren Țicău este acoperită de pădure nu a fost posibil să identificăm deformările care se produc în acest sector, nici măcar în cazul datelor Sentinel-1. Cu toate acestea, am reușit să obținem informații despre dinamica alunecării din acest sector și să depășim această problemă cu ajutorul simulărilor numerice. Pe baza acestora se observă că și în partea inferioară a versantului există deplasări induse/cauzate de alunecarea de teren, lucru care este logic din punctul de vedere al procesului în sine.

Din cauza lipsei datelor in situ de încredere care să poată fi utilizate în modelările numerice realizate, a trebuit să facem anumite presupuneri/compromisuri pentru a completa baza noastră de date cu proprietățile materialelor, care, din punctul nostru de vedere, sunt destul de valide. În primul rând, am considerat masa alunecată ca un corp unitar, omogen. În realitate, materialul deformat este caracterizat, cel mai probabil, de variații litologice și, implicit, de modificări ale comportamentului geomecanic al materialului, atât pe verticală, în adâncime, cât și în lateral. Pentru a reduce incertitudinea acestor ipoteze am efectuat o serie de simulări parametrice de tip încercare și eroare („*trial-and-error*”). În aceste simulări, am utilizat diferite combinații ale parametrilor intrinseci ai materialelor (unghi de fricțiune, coeziune efectivă și tensiunea), astfel încât putem argumenta faptul că alegerile făcute sunt justificate și relevante.

Cu toate acestea, rezultatele modelării numerice sunt susținute de rezultatele MT-InSAR și informațiile de teren, ceea ce indică faptul că deplasările identificate și determinate prin cele două metode sunt consistente și validează modelul nostru. Prospecțiunile geofizice și seismice suplimentare, care deja au fost începute, vor îmbunătăți modelul litologic și vor contribui la generarea unui model geometric mai bun și simulări numerice avansate care să modeleze mult mai bine variațiile spațiale și temporale ale dinamicii alunecării și comportamentul deformărilor.

Rezultatele noastre demonstrează că utilizarea tehnicilor MT-InSAR și a datelor SAR cuplate cu simulările numerice au potențialul de a furniza informații critice despre hazardurile naturale reprezentate de deplasările în masă, chiar și în zonele în care lipsa datelor in-situ este o problemă majoră, nu numai în siturile foarte bine investigate. MT-InSAR furnizează informații despre extinderea spațială a procesului și comportamentul deformărilor la scară temporală, iar modelările numerice oferă o mai bună înțelegere a tipului de alunecare și a mecanismului acesteia, cât și a dinamicii și a comportamentului din profunzime. Rezultatele lor sunt benefice nu doar în monitorizarea alunecărilor de teren pentru evaluarea și prevenirea posibilelor pericole produse de alunecări, ci, mai important, pot fi utilizate și ca informații prealabile pentru planificarea și implementarea viitoarelor politici de dezvoltare, cât și a planurilor de stabilizare ale alunecării.

Concluzii

Aplicarea tehnicilor multi-temporale de interferometrie SAR (MT-InSAR) și modelarea numerică a deformărilor versanților în zonele urbane constituie o necesitate în contextul actual al expansiunii teritoriale urbane. Aceste investigații sunt importante pentru identificarea și monitorizarea cu succes a posibilelor deformări care ar putea pune în pericol infrastructura urbană și, mai ales, oamenii.

Cu ajutorul acestor două abordări am reușit să îndeplinim obiectivele principale propuse/stabilite la începutul studiului, și anume să identificăm alunecările de teren active care afectează zonele rezidențiale ale orașului și să încadrăm și argumentăm tipologia și mecanismul alunecării de teren Țicău conform clasificării recunoscute la nivel internațional. Realizarea lor s-a făcut cu ajutorul tehnicilor moderne de teledetecție pe baza datelor SAR satelitare și modelare numerică a materialului alunecat. Practic, prin utilizarea tehnicilor avansate de Interferometrie SAR Diferențială au fost calculate vitezele medii anuale ale deplasărilor terenurilor și, pe baza unor praguri empirice, au fost delimitate zonele cu alunecări de teren active. Mai mult, prin analiza detaliată a seriilor temporale ale deplasărilor și corelarea acestora cu produsele simulărilor numerice și precipitațiile din zonă a fost posibilă evaluarea dinamicii alunecării Țicău în condiții diferite. Cu ajutorul punctelor istorice și a magnitudinii deplasărilor a putut fi determinat tiparul deplasărilor pe verticală și comportamentul materialului alunecat în condițiile unui nivel freatic ridicat. De asemenea, pe baza hărților vitezelor medii anuale ale deplasărilor a fost delimitată foarte precis suprafața afectată de alunecare și totodată este confirmată temporal starea ei de activitate, cel puțin din 2002, conform rezultatelor ENVISAT.

La nivelul orașului Iași, problema alunecărilor de teren este una bine cunoscută, fiind prezentate în literatura timpului mai multe evenimente care au produs pagube sau chiar au distrus locuințele oamenilor, în unele situații aceștia fiind nevoiți să se mute. După cum am prezentat în cadrul lucrării, aceste evenimente sunt condiționate de caracteristicile geologice, fiind declanșate pe fondul perioadelor umede în care valorile precipitațiilor sunt

mai mari. Drept urmare, este de înțeles interesul pentru investigarea acestor procese geomorfologice în vederea atenuării efectelor negative pe care le pot avea. Primele studii au analizat alunecările de teren mai mult descriptiv, cu prezentarea evenimentelor care au avut loc și punerea lor pe seama substratului argilos. Ulterior, un interes mai mare a fost acordat înțelegerii geologiei terenului și evaluării stabilității versanților prin calcularea unui factor de siguranță al versantului. Rezultatele obținute în cadrul acestei lucrări de doctorat reprezintă un pas înainte în ceea ce privește evaluarea activității alunecărilor de teren de pe teritoriul orașului Iași, identificarea clară a zonelor active cu alunecări de teren din tot orașul și, mai mult, un progres important în identificarea tipologiei alunecărilor de teren și a modului în care dinamica acestora se modifică în funcție de cantitatea de precipitații.

Beneficiile cuplării rezultatelor MT-InSAR (adică hărțile vitezei de deplasare medii anuale de suprafață și seriile temporale de deplasare) și ale simulărilor numerice aplicate pentru investigarea acestor procese geomorfologice de pe teritoriul orașului Iași, ne-au permis: (1) să identificăm zonele potențial periculoase afectate de instabilități; (2) să delimităm în mod corespunzător amploarea sectorului activ care afectează integritatea cartierului Țicău; (3) să monitorizăm activitatea alunecării de teren și comportamentul acesteia raportat la cantitatea de precipitații și la modificările nivelului freatic; (4) să argumentăm tipologia alunecării de teren pe baza vitezei și mecanismului său de alunecare.

Cu toate că analiza noastră prezintă anumite limitări, cauzate mai ales de lipsa datelor in situ de bună calitate, avantajele utilizării acestor metode complementare sunt mult mai valoroase. Integrarea rezultatelor MT-InSAR și a simulărilor, împreună cu investigațiile pe teren facilitează și îmbunătățesc înțelegerea dinamicii și evoluției alunecărilor de teren. Astfel, putem spune că alunecarea de teren Țicău se comportă ca o alunecare de teren cu mișcare foarte lentă, cu un mecanism de translație, al cărei corp alunecat se deplasează de la sud-vest către nord-est. Tiparul deformărilor indică sectorul mijlociu al versantului ca fiind cel mai predispus la deformări și care se accelerează după perioade prelungite de precipitații. Viteza medie anuală identificată pe corpul alunecării variază de la 10 mm/an la peste 20 mm/an în sectorul mijlociu al masei alunecate, concluzie care este justificată/validată și de simulările numerice. Aceste rezultate ar trebui considerate prospective și utilizate ca informații prealabile pentru a sprijini implementarea politicilor de stabilizare, mai ales că recent, autoritățile locale au aprobat finanțarea pentru astfel de strategii.

Rezultatele obținute și prezentate în această teză pot fi considerate un element de originalitate, fiind unul dintre puținele studii, inclusiv din literatura internațională, care analizează și evaluează comportamentul alunecărilor de teren cu ajutorul metodologiilor menționate. Mai mult decât atât, studiul nostru de caz este unul aparte deoarece se bazează pe de date in situ foarte puține și nu foarte calitative. Cu toate acestea, am reușit să arătăm că aceste abordări, bine definite și utilizate în literatura straină, pot fi aplicate și pot oferi informații valoroase și în astfel de cazuri, nu doar în situații ideale. Un alt aspect original al tezei constă în caracterul ei de pionierat, fiind printre puținele lucrări de specialitate scrise în limba română care introduc termeni și vocabular de specialitate caracteristice metodelor utilizate în cadrul acesteia.

În scop științific, rezultatele noastre sporesc/solidifică ideea integrării, sau mai bine spus, complementarității rezultatelor tehnicilor MT-InSAR și modelării numerice, deoarece ofere posibilități pentru depășirea obstacolului dat de lipsa datelor și a măsurătorilor in situ în cazurile/zonile care se confruntă cu această problemă. Prin capabilitățile lor de a dobândi și oferi informații despre deformările produse pe versanți fac posibile evaluarea și monitorizarea corectă a acestor procese și chiar atenuarea și prevenția pericolului de producere a alunecărilor de teren.

În ceea ce privește perspectivele viitoare, acestea includ continuarea monitorizării alunecărilor de teren de pe teritoriul Municipiul Iași și extinderea zonei de studiu, preferabil la tot Podișul Moldovei, folosind tehnici MT-InSAR. Totodată, dorim să îmbunătățim modelul numeric, atât din punct de vedere geometric cât și al proprietăților materialelor. În acest scop, vom lua în considerare clădirile, infrastructura și construcțiile de stabilizare care se află pe masa alunecată și care solicită, încarcă și contribuie la deplasarea materialului. În această privință există perspective de a realiza profiluri seismice de suprafață și tomografie cu rezistivitate electrică (ERT) pentru a îmbunătăți calitatea datelor existente. Accesul la astfel de date ne va permite, pe termen lung, simularea numerică tridimensională a întregului versant, pe de o parte, cât și utilizarea unui model constitutiv avansat care ia în considerare vâscozitatea materialelor și care permite modelarea în timp a comportamentului și dinamicii alunecării.

O altă direcție pe care dorim să ne focusăm în viitor este aceea de a stabili colaborări cu autoritățile locale (Primăria Iași, Consiliul Județean) pentru a pune bazele unui sistem de monitorizare a alunecărilor de teren și a zonelor urbane care prezintă deformări active. Prin punerea în practică a acestor instrumente am putea aduce un plus de valoare

comunității Iașului în ceea ce privește prevenirea efectelor negative ale acestor procese sau remedierea zonelor deja afectate. Astfel, aplicarea acestor metode inovative ar putea contribui cu adevărat, nu doar la nivel de concept științific, la creșterea rezilienței și la îmbunătățirea nivelului de siguranță și de satisfacție ale populației și să ajute în luarea deciziilor pentru dezvoltarea sustenabilă și de lungă durată a orașului.

Referințe bibliografice

1. Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M. (2002). Slope stability and stabilization methods, 2 ed. John Wiley & Sons, Inc., New York
2. Adomniței C., Stanciu A., Bărbieru A., Lungu I. (2012). Map zoning of natural slope stability in the city of Iași. *Ann. Acad. Rom. Sci.* 4, 23-32
3. Akoglu A.M., Cakir Z., Meghraoui M., Belabbes S., El Alami S.O., Ergintav S., Akyüz H.S. (2006). The 1994-2004 Al Hoceima (Morocco) earthquake sequence: Conjugate fault ruptures deduced from InSAR. *Earth Planet. Sci. Lett.* 252, 467-480. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.010>
4. Alejano L.R., Ferrero A.M., Ramirez-Oyanguren P., Alvarez Fernandez A.I. (2011). Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.013>
5. Alexander D. (1986). Landslide damage to buildings. *Environ. Geol. Water Sci.* 8, 147-151. <https://doi.org/10.1007/BF02509902>
6. Alexander D. (1989). Urban landslides. *Prog. Phys. Geogr.* 13, 157-189. <https://doi.org/10.1177/030913338901300201>
7. Antonielli B., Monserrat O., Bonini M., Cenni N., Devanthery N., Righini G., Sani F. (2016). Persistent Scatterer Interferometry analysis of ground deformation in the Po Plain (Piacenza-Reggio Emilia sector, Northern Italy): seismo-tectonic implications. *Geophys. J. Int.* 206, 1440-1455. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw227>
8. Antonini G., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F., Reichenbach P. (2002). Surface deposits and landslide inventory map of the area affected by the 1997 Umbria-Marche earthquakes. *Bollettino della Societa Geologica Italiana* 121, 843-853
9. Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F., Reichenbach P. (2007). Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. *Natural Hazards and Earth System Science* 7, 637-650. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-637-2007>
10. Ardizzone F., Fiorucci F., Santangelo M., Cardinali M., Mondini A.C., Rossi M., Reichenbach P., Guzzetti F. (2013). Very-high resolution stereoscopic satellite images for landslide mapping. *Landslide Sci. Pract.* 1, 95-101. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_12
11. Armaș I. (2011a). Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping. *Prahova Subcarpathians, Romania. Natural Hazards* 60(3), 937-950. doi:10.1007/s11069-011-9879-4
12. Armaș I. (2011b). An analytic multicriteria hierarchical approach to assess landslide vulnerability. Case study: Cornu village, Subcarpathian Prahova Valley/Romania. *Zeitschrift Für Geomorphologie* 55(2), 209-229. doi:10.1127/0372-8854/2011/0055-0040
13. Armaș I. (2013). Diagnosis of landslide risk for individual buildings: insights from Prahova Subcarpathians, Romania. *Environmental Earth Sciences* 71(11), 4637-4646. doi:10.1007/s12665-013-2854-5
14. Armaș I., Damian R., Șandric I., Osaci-Costache G. (2003). Vulnerabilitatea versanților la alunecări de teren în sectorul subcarpatic al Văii Prahova. Editura Fundației România de Măine, București
15. Armaș I., Vartolomei F., Stroia F., Brașoveanu L. (2013). Landslide susceptibility deterministic approach using geographic information systems: application to Breaza town, Romania. *Natural Hazards* 70(2), 995-1017. doi:10.1007/s11069-013-0857-x

- 16.Armaş I., Mendes D.A., 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. <https://doi.org/10.1038/srep43762>
- 17.Armaş I., Gheorghe M., Silvaş G.C. (2021). Shallow Landslides Physically Based Susceptibility Assessment Improvement Using InSAR. Case Study: Carpathian and Subcarpathian Prahova Valley, Romania. *Remote Sens.* 13, 2385. <https://doi.org/10.3390/rs13122385>
- 18.Árnadóttir T., Jónsson S., Pollitz F.F., Jiang W., Feigl K.L. (2005). Postseismic deformation following the June 2000 earthquake sequence in the south Iceland seismic zone. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2005JB003701>
- 19.Augarde C.E., Lee S.J., Loukidis D. (2021). Numerical modelling of large deformation problems in geotechnical engineering: A state-of-the-art review. *Soils Found.* 61, 1718-1735. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.08.007>
- 20.Băcăuanu V. (1968). Cîmpia Moldovei - studiu geomorfologic. Bucureşti
- 21.Băcăuanu V. (1970). Alunecările de teren din partea nord-estică a Dealului Copou - Iaşi. *Analele Ştiinţifice ale Univ. „Al. I. Cuza” din Iaşi (Serie nouă), Secţiunea II, c. Geogr.* 16, 143-146
- 22.Băcăuanu V. (1973). Evoluţia văilor din Podişul Moldovenesc, în: *Realizări în geografia Republicii Socialiste România*. Editura Ştiinţifică, Bucharest, pp. 227-235
- 23.Băcăuanu V., Barbu N., Pantazică M., Ungureanu A., Chiriac D. (1980). Podişul Moldovei. *Natură, om, economie*. Editura ştiinţifică şi enciclopedică, Bucureşti
- 24.Băcăuanu V., Martiniuc C. (1966). Cercetări geomorfologice asupra teraselor din Bazinul Bahluiului. *Analele Ştiinţifice ale Univ. „Al. I. Cuza” din Iaşi (Serie nouă), Secţiunea II, b. Geol.* 12, 147-156
- 25.Baddeley A., Rubak E., Turner R. (2016). *Spatial Point Patterns. Methodology and Applications* with R. Chapman & Hall/CRC Press, London
- 26.Baddeley A., Turner R. (2005). spatstat : An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns. *J. Stat. Softw.* 12. <https://doi.org/10.18637/jss.v012.i06>
- 27.Bai J., Perron P. (2003). Computation and analysis of multiple structural change models. *J. Appl. Econom.* 18, 1-22. <https://doi.org/10.1002/jae.659>
- 28.Balan S.F., Poncos V., Teleaga D., Nicolae R., Apostol B.F. (2016). Satellite monitoring for a safer construction environment. *Rom. J. Phys.* 61, 1108-1119
- 29.Bălţeanu D., Chendeş V., Sima M., Enciu P. (2010). A country-wide spatial assessment of landslide susceptibility in Romania. *Geomorphology* 124, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.005>
- 30.Bălţeanu D., Micu M., Jurchescu M., Malet J., Sima M., Kucsicsa G., Dumitrică C., Petrea D., Mărgărint M.C., Bilaşco Ş., Dobrescu C.-F., Călăraşu E.-A., Olinic E., Boţi I., Senzaconi F. (2020). National-scale landslide susceptibility map of Romania in a European methodological framework. *Geomorphology* 371, 107432. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107432>
- 31.Bamler R., Hartl P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 14, 54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
- 32.Barbu N., Ungureanu A., Apăvăloaiei M., Băcăuanu V., Erhan E., Giosu V., Gugiuman I., Lupu-Bratiloveanu N., Martiniuc C., Nimigeanu V., Pantazică M., Poghirc P., Schram M., Şandru I., Ungureanu I. (1987). *Geografia Municipiului Iaşi*. Editura Universităţii Alexandru Ioan Cuza, Iaşi
- 33.Bates R.L., Jackson J.A. (1987). *Glossary of geology*, American Geological Institute

34. Béjar-Pizarro M., Notti D., Mateos R.M., Ezquerro P., Centolanza G., Herrera G., Bru G., Sanabria M., Solari L., Duro J., Fernández J. (2017). Mapping Vulnerable Urban Areas Affected by Slow-Moving Landslides Using Sentinel-1 InSAR Data. *Remote Sens.* 9, 876. <https://doi.org/10.3390/rs9090876>
35. Bejenaru A., Niculiță M. (2017). Landslide inventory of the Crasna catchment, Moldavian Plateau, Romania, în: Niculiță M., Mărgărint M.C. (Ed.), *Proceedings of Romanian Geomorphology Symposium*, vol. 1, Alexandru Ioan Cuza University Press, Iași, pp. 28-31. <http://dx.doi.org/10.15551/prgs.2017.28>
36. Bell J.W., Amelung F., Ferretti A., Bianchi M., Novali F. (2008). Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge. *Water Resour. Res.* 44. <https://doi.org/10.1029/2007WR006152>
37. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40, 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
38. Biescas E., Crosetto M., Agudo M., Monserrat O., Crippa B. (2007). Two Radar Interferometric Approaches to Monitor Slow and Fast Land Deformation. *J. Surv. Eng.* 133, 66-71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2007\)133:2\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:2(66))
39. Biggs J., Bergman E., Emmerson B., Funning G.J., Jackson J., Parsons B., Wright T.J. (2006). Fault identification for buried strike-slip earthquakes using InSAR: The 1994 and 2004 Al Hoceima, Morocco earthquakes. *Geophys. J. Int.* 166, 1347-1362. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03071.x>
40. Bishop A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5, 7-17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
41. Bolt B.A., Horn W.L., Macdonald G.A., Scott R.F. (1975). *Geological hazards. Earthquakes – Tsunamis – Volcanoes – Avalanches – Landslides - Floods*. Springer-Verlag
42. Bonì R., Bordoni M., Colombo A., Lanteri L., Meisina C. (2018). Landslide state of activity maps by combining multi-temporal A-DInSAR (LAMBDA). *Remote Sens. Environ.* 217, 172-190. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.013>
43. Bonnard C., Tacher L., Beniston M. (2008). Prediction of landslide movements caused by climate change: Modelling the behaviour of a mean elevation large slide in the Alps and assessing its uncertainties, în: Chen Z., Zhang J.M., Li Z.K., Wu F.Q., Ho K. (Ed.), *Landslides and Engineering Slopes: From the Past to the Future*, pp. 217-227. <https://doi.org/10.1201/9780203885284-c13>
44. Bovenga F., Nutricato R., Refice A., Wasowski J. (2006). Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Eng. Geol.* 88, 218-239. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.015>
45. Bovenga F., Wasowski J., Nitti D.O., Nutricato R., Chiaradia M.T. (2012). Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sens. Environ.* 119, 272-285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.013>
46. Braam R.R., Weiss E.E.J., Burrough P.A. (1987). Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena* 14, 573-584. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(87\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0341-8162(87)90007-5)
47. Brabb E.E. (1984). Innovative Approaches to Landslide Hazard and Risk Mapping, în *Proc., Fourth International Symposium on Landslides*, Canadian Geotechnical Society, Toronto, Canada, Vol. 1, pp. 307-323
48. Brabb E.E. (1991). The world landslide problem. *Episodes* 14, 52-61
49. Brânzîlă M. (1999). *Geologia părții sudice a Câmpiei Moldovei*, 1 ed. Corson, Iași

50. Brișcan A. (1980). Studiul alunecărilor de teren din zona Galata - Iași. Iași
51. Bromhead E. (1992). The Stability of Slopes, 2nd ed. Taylor & Francis
52. Bürgmann R., Hilley G., Ferretti A., Novali F. (2006). Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. *Geology* 34, 221-224. <https://doi.org/10.1130/G22064.1>
53. Bürgmann R., Rosen P.A., Fielding E.J. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 169-209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
54. Burkhalter P., Egli M., Gärtner H. (2019). Reconstruction and actual trends of landslide activities in Bruus-Haltiwald, Horw, canton of Lucerne, Switzerland. *Geographica Helvetica* 74, 93-103. <https://doi.org/10.5194/gh-74-93-2019>
55. Calò F., Ardizzone F., Castaldo R., Lollino P., Tizzani P., Guzzetti F., Lanari R., Angeli M.-G., Pontoni F., Manunta M. (2014). Enhanced landslide investigations through advanced DInSAR techniques: The Ivancich case study, Assisi, Italy. *Remote Sens. Environ.* 142, 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.003>
56. Campbell J.B., Wynne R.H. (2011). Introduction to remote sensing, Fifth. ed. The Guilford Press, New York
57. Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms* 16(5), 427-445. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>
58. Carrara A., Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P. (1999). Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of landslide hazard. *Nat. Hazards* 20, 117-135. <https://doi.org/10.1023/a:1008097111310>
59. Cascini L., Fornaro G., Peduto D. (2010). Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Eng. Geol.* 112, 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.01.003>
60. Castaldo R., Tizzani P., Lollino P., Calò F., Ardizzone F., Lanari R., Guzzetti F., Manunta M. (2015). Landslide Kinematical Analysis through Inverse Numerical Modelling and Differential SAR Interferometry. *Pure Appl. Geophys.* 172, 3067-3080. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1008-3>
61. Cernătescu A., Martiniuc C., Silion T., Ciubotaru V., Mihăilescu C. (1966). Contribuție la studiul stabilității versanților din raza orașului Iași. *Bul. Institutului Politeh. din Iași, Ser. nouă XII (XVI)*, 431-436
62. Cevasco A., Termini F., Valentino R., Meisina C., Bonì R., Bordoni M., Chella G.P., De Vita P. (2018). Residual mechanisms and kinematics of the relict Lemoglio coastal landslide (Liguria, northwestern Italy). *Geomorphology* 320, 64-81. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.08.010>
63. Chandler R.J. (1977). Back analysis techniques for slope stabilization works: a case record. *Géotechnique* 27, 479-495. <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.4.479>
64. Chang L., Dollevoet R.P.B.J., Hanssen R.F. (2017). Nationwide Railway Monitoring Using Satellite SAR Interferometry. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 10, 596-604. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2584783>
65. Chen M., Tomás R., Li Z., Motagh M., Li T., Hu L., Gong H., Li X., Yu J., Gong X. (2016). Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry. *Remote Sens.* 8, 468. <https://doi.org/10.3390/rs8060468>
66. Cheng Y.M., Lansivaara T., Wei W.B. (2007). Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Comput. Geotech.* 34, 137-150.

- <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011>
67. Chițu Z., Istrate A., Adler M.-J., Sandric I., Olariu B., Mihai B. (2015). Comparative Study of the Methods for Assessing Landslide Susceptibility in Ialomița Subcarpathians, Romania. *Engineering Geology for Society and Territory* 2, 1205-1209. doi:10.1007/978-3-319-09057-3_211
 68. Clough R.W., Woodward R.J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 93(4), 529-549. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001005>
 69. Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Eng. Geol.* 68, 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00195-3)
 70. Colesanti C., Wasowski J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.* 88, 173-199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>
 71. Coman C.M., Manea S., Olinic E., Boți I. (2017). Comparative analysis of large scale scenario-based landslides hazard zonation maps. A case study in Iasi City, Romania. *Rev. Geomorfol.* 19, 145-154. <https://doi.org/10.21094/rg.2017.030>
 72. Constantin M., Bednarik M., Jurchescu M.C., Vlaicu M. (2011). Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences* 63(2), 397-406. doi:10.1007/s12665-010-0724-y
 73. Conte E., Donato A., Troncone A. (2014). A finite element approach for the analysis of active slow-moving landslides. *Landslides* 11, 723-731. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0446-9>
 74. Conte E., Donato A., Troncone A. (2017). A simplified method for predicting rainfall-induced mobility of active landslides. *Landslides* 14, 35-45. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0692-8>
 75. Cornes R.C., van der Schrier G., van den Besselaar E.J.M., Jones P.D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 9391-9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
 76. Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Minati F. (2008). A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of sar images. *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 2, 449-452. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779025>
 77. Cremonesi M., Franci A., Idelsohn S., Oñate E. (2020). A State of the Art Review of the Particle Finite Element Method (PFEM). *Arch. Comput. Methods Eng.* 27, 1709-1735. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09468-4>
 78. Crosetto M., Monserrat O., Bremmer C., Hanssen R., Capes R., Marsh S. (2008). Ground Motion Monitoring Using SAR Interferometry: Quality Assessment. *Eur. Geol. Mag.* 26, 12-15
 79. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 115, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
 80. Crosetto M., Solari L., Mróz M., Balasis-Levinsen J., Casagli N., Frei M., Oyen A., Moldestad D.A., Bateson L., Guerrieri L., Commerci V., Andersen H.S. (2020). The evolution of wide-area DInSAR: From regional and national services to the European ground motion service. *Remote Sens.* 12, 1-20. <https://doi.org/10.3390/RS12122043>
 81. Crozier M.J., Glade T. (2005). Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach, in: *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, pp. 1-40. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch1>
 82. Cruden D.M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 43, 27-

29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
83. Cruden D.M., Varnes D.J. (1996). Landslide Types and Processes, în: Turner A.K., Shuster R.L. (Ed.), Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 36-75
84. de Leeuw A., Vincent S.J., Matoshko A., Matoshko A., Stoica M., Nicoară I. (2020). Late Miocene sediment delivery from the axial drainage system of the East Carpathian foreland basin to the Black Sea. *Geology* 48, 761–765. <https://doi.org/10.1130/G47318.1>
85. De Novellis V., Castaldo R., Lollino P., Manunta M., Tizzani P. (2016). Advanced Three-Dimensional Finite Element Modeling of a Slow Landslide through the Exploitation of DInSAR Measurements and in Situ Surveys. *Remote Sens.* 8, 670. <https://doi.org/10.3390/rs8080670>
86. Del Ventisette C., Righini G., Moretti S., Casagli N. (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 30, 238-246. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.02.008>
87. Demers D., Robitaille D., Lavoie A., Paradis S., Fortin A., Ouellet A. (2017). The use of LiDAR airborne data for retrogressive landslides inventory in sensitive clays, Québec, Canada, în: Thakur V.J., L'Heureux S., Locat A. (Ed.), Landslides in sensitive clays. Advances in natural and technological hazards research, vol. 46, Springer, Cham, pp. 279-288. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56487-6_25
88. Denneler B., Schweingruber F.H. (1993). Slow mass movement. A Dendrogeomorphological study in Gams, Swiss Rhine Valley. *Dendrochronologia* 11, 55-67
89. Desai S.C., Christian T.J. (1977). Numerical methods in geotechnical engineering, 1 ed, Numerical methods in geotechnical engineering. McGraw-Hill Book Company, New York
90. Desnos Y.-L., Fomelis M., Engdahl M., Mathieu P.-P., Palazzo F., Ramoino F., Zmuda A. (2016). Scientific Exploitation of Sentinel-1 within ESA's SEOM programme element, în: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, pp. 3878-3881. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730007>
91. Devanthéry N., Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Crippa B. (2014). An approach to persistent scatterer interferometry. *Remote Sens.* 6, 6662-6679. <https://doi.org/10.3390/rs6076662>
92. Di Martire D., Iglesias R., Monells D., Centolanza G., Sica S., Ramondini M., Pagano L., Mallorquí J.J., Calcaterra D. (2014). Comparison between Differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy). *Remote Sens. Environ.* 148, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.014>
93. Dill H.G., Iancu G.O., Ionesi V., Sârbu S., Balintoni I., Botz R. (2012). Petrography and mineral chemistry of Bessarabian siliciclastic rocks in the Eastern Carpathians Foreland Basin (Romania and Republic of Moldova). *Neues Jahrb. für Geol. und Paläontologie - Abhandlungen* 263, 199-226. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2012/0224>
94. Dong J., Zhang L., Li M., Yu Y., Liao M., Gong J., Luo H. (2018a). Measuring precursory movements of the recent Xinmo landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 datasets. *Landslides* 15, 135-144. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0914-8>
95. Dong J., Zhang L., Tang M., Liao M., Xu Q., Gong J., Ao M. (2018b). Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China. *Remote Sens. Environ.* 205, 180-198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.022>

96. Duan H., Wu S., Kang M., Xie L., Chen L. (2020). Fault slip distribution of the 2015 Mw7.8 Gorkha (Nepal) earthquake estimated from InSAR and GPS measurements. *J. Geodyn.* 139, 101767. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101767>
97. Duncan J.M. (1996). State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *J. Geotech. Eng.* 122, 577-596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577))
98. Duncan J.M. (1996). Soil slope stability analysis. in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 337-371
99. Duncan J.M., Wright S.G. (1980). The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Eng. Geol.* 16, 5-17. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(80\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(80)90003-4)
100. Duncan J.M., Wright S.G., Brandon T.L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*, 2-a ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. <https://www.wiley.com/en-us/Soil+Strength+and+Slope+Stability%2C+2nd+Edition-p-9781118651650>
101. Dunoyer M., van Westen C.J. (1994). Assessing Uncertainty in Interpreting Landslides from Airphotos. *ITC Journal* 3
102. Esposito G., Marchesini I., Mondini A.C., Reichenbach P., Rossi M., Sterlacchini S. (2020). A spaceborne SAR-based procedure to support the detection of landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 2379-2395. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2379-2020>
103. Fan H., Lu L., Yao Y. (2018). Method Combining Probability Integration Model and a Small Baseline Subset for Time Series Monitoring of Mining Subsidence. *Remote Sens.* 10, 1444. <https://doi.org/10.3390/rs10091444>
104. Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A. (2011). The Assisi landslide monitoring: A multi-year activity based on geomatic techniques. *Appl. Geomatics* 3, 91-100. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0042-9>
105. Fellenius W. (1936). Calculation of the stability of earth dams, *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams. International Commission on Large Dams of the World Power Conference* 4, 445–462
106. Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 49, 3460-3470. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>
107. Ferretti A., Novali F., Bürgmann R., Hilley G., Prati C. (2004). InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in San Francisco Bay Area. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 85, 317. <https://doi.org/10.1029/2004EO340002>
108. Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000). Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 2202-2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
109. Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, 8-20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
110. Fiaschi S., Mantovani M., Frigerio S., Pasuto A., Floris M. (2017). Testing the potential of Sentinel-1A TOPS interferometry for the detection and monitoring of landslides at local scale (Veneto Region, Italy). *Environ. Earth Sci.* 76, 492. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6827-y>
111. Forkel M., Carvalhais N., Verbesselt J., Mahecha M., Neigh C., Reichstein M. (2013). Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sens.* 5, 2113-2144. <https://doi.org/10.3390/rs5052113>

112. Forkel M., Migliavacca M., Thonicke K., Reichstein M., Schaphoff S., Weber U., Carvalhais N. (2015). Codominant water control on global interannual variability and trends in land surface phenology and greenness. *Glob. Chang. Biol.* 21, 3414-3435. <https://doi.org/10.1111/gcb.12950>
113. Frattini P., Crosta G.B., Rossini M., Allievi J. (2018). Activity and kinematic behaviour of deep-seated landslides from PS-InSAR displacement rate measurements. *Landslides* 15, 1053-1070. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0940-6>
114. Froude M.J., Petley D.N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18, 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
115. Fruneau B., Achache J., Delacourt C. (1996). Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics* 265, 181-190. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00047-9)
116. Funning G.J., Bürgmann R., Ferretti A., Novali F., Fumagalli A. (2007). Creep on the Rodgers Creek fault, northern San Francisco Bay area from a 10 year PS-InSAR dataset. *Geophys. Res. Lett.* 34, 3-7. <https://doi.org/10.1029/2007GL030836>
117. Gabriel A.K., Goldstein R.M., Zebker H.A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.* 94, 9183-9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
118. Gariano S.L., Guzzetti F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Rev.* 162, 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
119. Gârbacea V., Tanțău I., Pop O., Benea M. (2015). First radiocarbon dating of landslides („Glimee”) in Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 10(3), 217–222
120. Gernhardt S., Adam N., Eineder M., Bamler R. (2010). Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas. *Ann. GIS* 16, 103-111. <https://doi.org/10.1080/19475683.2010.492126>
121. Gedney D.S., Weber Jr. W.G. (1978). Design and construction of soil slopes, în: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 172-191
122. Gernhardt S., Auer S., Eder K. (2015). Persistent scatterers at building facades – Evaluation of appearance and localization accuracy. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 100, 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.05.014>
123. Gernhardt S., Bamler R. (2012). Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.06.009>
124. Gheorghe M., Armaș I., Dumitru P., Călin A., Bădescu O., Necsoiu M. (2020). Monitoring subway construction using Sentinel-1 data: a case study in Bucharest, Romania. *Int. J. Remote Sens.* 41, 2644-2663. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1694723>
125. Glade T. (2001). Landslide hazard assessment and historical landslide data – an inseparable couple?, în: Glade T., Albini P., Francés F. (Ed.), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 17. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3490-5_12
126. Gomasasca M.A. (2009). *Basics of Geomatics*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9014-1>
127. Gray L., Joughin I., Tulaczyk S., Spykes V.B., Bindshadler R., Jezek K. (2005). Evidence for subglacial water transport in the West Antarctic Ice Sheet through three-dimensional

- satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 32, L03501. <https://doi.org/10.1029/2004GL021387>
128. Griffiths D. V., Lane P.A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique* 49, 387-403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
 129. Griffiths D. V., Marquez R.M. (2007). Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements. *Geotechnique* 57, 537-546. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.537>
 130. Grozavu A., Patriche C.V. (2021). Mapping landslide susceptibility at national scale by spatial multi-criteria Mapping landslide susceptibility at national scale by spatial multi-criteria evaluation. *Geomatics, Nat. Hazards Risk* 12, 1127-1152. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1914752>
 131. Grozavu A., Pleșcan S., Patriche C.V., Mărgărint M.C., Roșca B. (2013). Landslide susceptibility assessment: GIS application to a complex mountainous environment, în: Kozak J., Ostapowicz K., Bytnerowicz A., Wyżga B. (Ed.), *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*, Environmental Science and Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 31-44. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12725-0_4#page-1
 132. Gugiuman I., Erhan E. (1960). Regimul precipitațiilor atmosferice la Iași în perioada 1921 - 1955. *Analele Științifice ale Univ. „Al. I. Cuza” din Iași* 6, 211-222
 133. Günther A., Van Den Eeckhaut M., Malet J.P., Reichenbach P., Hervás J. (2014). Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information. *Geomorphology* 224, 69-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.011>
 134. Guo J., Zhou L., Yao C., Hu J. (2016). Surface Subsidence Analysis by Multi-Temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing. *Sensors* 16, 1495. <https://doi.org/10.3390/s16091495>
 135. Guzzetti F. (2006). Landslide hazard and risk assessment. RheinischenFriedrich-Wilhelms-Universität Bonn. <https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/handle/20.500.11811/2644>
 136. Guzzetti F., Mondini A.C., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.-T. (2012). Landslide inventory map: new tools for an old problem. *Earth-Science Reviews* 112(1-2), 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
 137. Hanssen R.F. (2001). *Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis*, 1 ed. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
 138. Haque U., Blum P., da Silva P.F., Andersen P., Pilz J., Chalov S.R., Malet J.P., Auflič M.J., Andres N., Poyiadji E., Lamas P.C., Zhang W., Peshevski I., Pétursson H.G., Kurt T., Dobrev N., García-Davalillo J.C., Halkia M., Ferri S., Gaprindashvili G., Engström J., Keellings D. (2016). Fatal landslides in Europe. *Landslides* 13, 1545-1554. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0689-3>
 139. Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113, 12. <http://doi.wiley.com/10.1029/2008JD010201>
 140. HCL 127 2020 (2020). HOTĂRÂRE privind stabilirea zonelor de versanți supuse fenomenului de alunecare de teren din municipiul Iași și a măsurilor ce trebuie luate în vederea protejării, consolidării și întreținerii versanților cuprinși în aceste zone
 141. Herrera G., Tomás R., Lopez-Sanchez J.M., Delgado J., Vicente F., Mulas J., Cooksley G., Sanchez M., Duro J., Arnaud A., Blanco P., Duque S., Mallorqui J.J., De la Vega-Panizo R., Monserrat O. (2009). Validation and comparison of Advanced Differential Interferometry

- Techniques: Murcia metropolitan area case study. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 64, 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.008>
142. Higgins J.D., Modeer Jr. V.A. (1996). Loess, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 585-606
 143. Hilley G.E., Bürgmann R., Ferretti A., Novali F., Rocca F. (2004). Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science* (80-.). 304, 1952-1955. <https://doi.org/10.1126/science.1098821>
 144. Himematsu Y., Furuya M. (2020). Coseismic and Postseismic Crustal Deformation Associated With the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence Revealed by PALSAR-2 Pixel Tracking and InSAR. *Earth Sp. Sci.* 7, 1-19. <https://doi.org/10.1029/2020EA001200>
 145. Hipel K.W., Mcleod A.I. (1994). *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Elsevier Science, Amsterdam
 146. Hoffmann J., Zebker H.A., Galloway D.L., Amelung F. (2001). Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Water Resour. Res.* 37, 1551-1566. <https://doi.org/10.1029/2000WR900404>
 147. Hole J.K., Bromley C.J., Stevens N.F., Wadge G. (2007). Subsidence in the geothermal fields of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand from 1996 to 2005 measured by InSAR. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 166, 125-146. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.07.013>
 148. Holtz R.D., Schuster R.L. (1996). Stabilization of soil slopes, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 439-473
 149. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.* 31, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
 150. Hooper A.J. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Lett.* 35, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2008GL034654>
 151. Hradecký J., Pánek T., Smolková V., Šilhán K. (2010). Dating of the landslide activity in the Czech part of the Outer Western Carpathians and its palaeoenvironmental significance. *Geologica Balcanica* 39(1-2), 160-161
 152. Hu X., Bürgmann R., Fielding E.J., Lee H. (2020). Internal kinematics of the Slumgullion landslide (USA) from high-resolution UAVSAR InSAR data. *Remote Sens. Environ.* 251, 112057. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112057>
 153. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
 154. Ilinca V., Gheuca I. (2011). The Red Lake Landslide (Uciğaşu Mountain, Romania). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 6(1), 263–272
 155. Intrieri E., Raspini F., Fumagalli A., Lu P., Del Conte S., Farina P., Allievi J., Ferretti A., Casagli N. (2018). The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. *Landslides* 15, 123-133. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0915-7>
 156. Ionesi L. (1994). *Geologia Unităţilor de Platformă şi a Orogenului Nord-Dobrogean*. Editura Tehnică, Bucharest
 157. Ionesi L., Ionesi B., Roşca V., Lungu A., Ionesi V. (2005). *Sarmaţianul mediu şi superior de pe Platforma Moldovenească*. Editura Academiei Române, Bucharest

158. Ioniță I. (2000). Relieful de cueste din Podișul Moldovei. Editura Corson, Iași
159. Itasca Consulting Group Inc. (2016). FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua, User's Guide (version 8.0). Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota
160. Jaboyedoff M., Michoud C., Derron M., Voumard J., Leibundgut G., Sudmeier-Rieux K., Michoud C., Nadim F., Leroi E. (2016). Human-Induced Landslides: Toward the analysis of anthropogenic changes of the slope environment. *Landslides Eng. Slopes. Exp. Theory Pract.* 217-232. <https://doi.org/10.1201/b21520-20>
161. Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellán A., Derron M.H., Loya A., Metzger R., Pedrazzini A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Nat. Hazards* 61, 5-28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
162. Jaedicke C., Van Den Eeckhaut M., Nadim F., Hervás J., Kalsnes B., Vangelsten B.V., Smith J.T., Tofani V., Ciurean R., Winter M.G., Sverdrup-Thygeson K., Syre E., Smebye H. (2014). Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 73, 325-339. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0541-0>
163. Janbu N. (1954). Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings, European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm* 3, 43-49
164. Jeanrenaud P., Saraiman A. (1995). *Geologia Moldovei Centrale dintre Siret și Prut*, 1 ed. Editura Universității Alexandru Ioan Cuza, Iași
165. Jiang L., Lin H., Cheng S. (2011). Monitoring and assessing reclamation settlement in coastal areas with advanced InSAR techniques: Macao city (China) case study. *Int. J. Remote Sens.* 32, 3565-3588. <https://doi.org/10.1080/01431161003752448>
166. Kalia A.C. (2018). Classification of Landslide Activity on a Regional Scale Using Persistent Scatterer Interferometry at the Moselle Valley (Germany). *Remote Sens.* 10, 1880. <https://doi.org/10.3390/rs10121880>
167. Kampes B.M. (2006). *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*, 1 ed, Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4723-7>
168. Kang Y., Zhao C., Zhang Q., Lu Z., Li B. (2017). Application of InSAR Techniques to an Analysis of the Guanling Landslide. *Remote Sens.* 9, 1046. <https://doi.org/10.3390/rs9101046>
169. Karila K., Karjalainen M., Hyypä 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-Information* 2, 797-816. <https://doi.org/10.3390/ijgi2030797>
170. Keaton J.R., Beckwith G.H. (1996). Important considerations in slope design, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 429-438
171. Kerekes A.H., Poszet S.L., Baci L.C. (2020). Investigating land surface deformation using InSAR and GIS techniques in Cluj–Napoca city's most affected sector by urban sprawl (Romania). *Rev. Geomorfol.* 22, 43-59. <https://doi.org/10.21094/rg.2020.097>
172. Kim S.-W., Wdowinski S., Dixon T.H., Amelung F., Kim J.W., Won J.-S. (2010). Measurements and predictions of subsidence induced by soil consolidation using persistent scatterer InSAR and a hyperbolic model. *Geophys. Res. Lett.* 37, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009GL041644>
173. Kirschbaum D.B., Adler R., Hong Y., Lerner-Lam A. (2009). Evaluation of a preliminary satellite-based landslide hazard algorithm using global landslide inventories. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 673-686. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-673-2009>

174. Kjekstad O., Highland L. (2009). Economic and Social Impacts of Landslides, in: Sassa K., Canuti P. (Ed.), *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Springer, Berlin, Heidelberg, Berlin, pp. 573-587. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_30
175. Klein Tank A.M.G., Wijngaard J.B., Können G.P., Böhm R., Demarée G., Gocheva A., Mileta M., Pashiardis S., Hejkrlik L., Kern-Hansen C., Heino R., Bessemoulin P., Müller-Westermeier G., Tzanakou M., Szalai S., Pálsdóttir T., Fitzgerald D., Rubin S., Capaldo M., Maugeri M., Leitass A., Bukantis A., Aberfeld R., Van Engelen A.F. V., Forland E., Miletus M., Coelho F., Mares C., Razuvaev V., Nieplova E., Cegnar T., Antonio López J., Dahlström B., Moberg A., Kirchhofer W., Ceylan A., Pachaliuk O., Alexander L. V., Petrovic P. (2002). Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.* 22, 1441-1453. <https://doi.org/10.1002/joc.773>
176. Klose M. (2015). *Landslide databases as tools for integrated assessment of landslide risk*. Springer Theses
177. Kobayashi T. (2017). Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (M_j 6.5 and M_j 6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR. *Earth, Planets Sp.* 69, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0594-y>
178. Krahn J. (2003). The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses. *Can. Geotech. J.* 40, 643-660. <https://doi.org/10.1139/t03-024>
179. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Werner M., Younis M., Zink M. (2007). TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 3317-3340. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693>
180. Lagios E., Sakkas V., Novali F., Bellotti F., Ferretti A., Vlachou K., Dietrich V. (2013). SqueeSARTM and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992-2012): Tectonic implications. *Tectonophysics* 594, 38-59. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.012>
181. Lambe P.C. (1996). Residual soils, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 507-524
182. Lan H., Li L., Liu H., Yang Z. (2012). Complex Urban Infrastructure Deformation Monitoring Using High Resolution PSI. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 5, 643-651. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2011.2181490>
183. Lanari R., Casu F., Manzo M., Lundgren P. (2007a). Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California. *Remote Sens. Environ.* 109, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.003>
184. Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., Pepe A. (2007b). An Overview of the Small BAseline Subset Algorithm: a DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. *Pure Appl. Geophys.* 164, 637-661. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0192-9>
185. Lanari R., Fornaro G., Riccio D., Migliaccio M., Papathanassiou K.P., Moreira J.R., Schwäbisch M., Dutra L., Puglisi G., Franceschetti G., Coltelli M. (1996). Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: The etna case study. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 34, 1097-1114. <https://doi.org/10.1109/36.536526>
186. Lang A., Moya J., Corominas J., Schrott L., Dikau R. (1999). Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology* 30(1-2), 33-52. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00043-4)
187. Lee E.M., Jones D.K.C. (2004). *Landslide Risk Assessment*. Thomas Telford, 454

188. Lefebvre G. (1996). Soft sensitive clays, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 607-619
189. Leopold L.B. (1942). Areal extent of intense rainfalls, New Mexico and Arizona. *Trans. Am. Geophys. Union* 23, 558. <https://doi.org/10.1029/TR023i002p00558>
190. Leopold L.B. (1944). Characteristics of Heavy Rainfall in New Mexico and Arizona. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 109, 837-866. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005735>
191. Li D.Q., Xiao T., Cao Z.J., Phoon K.K., Zhou C.B. (2016). Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis. *Appl. Math. Model.* 40, 5216-5229. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.11.044>
192. Liu F., Elliott J.R., Craig T.J., Hooper A., Wright T.J. (2021). Improving the Resolving Power of InSAR for Earthquakes Using Time Series: A Case Study in Iran. *Geophys. Res. Lett.* 48. <https://doi.org/10.1029/2021GL093043>
193. Liu S., Segoni S., Raspini F., Yin K., Zhou C., Zhang Y., Casagli N. (2020). Satellite InSAR as a New Tool for the Verification of Landslide Engineering Remedial Works at the Regional Scale: A Case Study in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Appl. Sci.* 10, 6435. <https://doi.org/10.3390/app10186435>
194. Liu S.Y., Shao L.T., Li H.J. (2015). Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods. *Comput. Geotech.* 63, 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.008>
195. López-Vinielles J., Fernández-Merodo J.A., Ezquerro P., García-Davalillo J.C., Sarro R., Reyes-Carmona C., Barra A., Navarro J.A., Krishnakumar V., Alvioli M., Herrera G. (2021). Combining Satellite InSAR, Slope Units and Finite Element Modeling for Stability Analysis in Mining Waste Disposal Areas. *Remote Sens.* 13, 2008. <https://doi.org/10.3390/rs13102008>
196. Lorig L., Varona P. (2017). Numerical analysis, în: Wyllie D.C., Mah C.W. (Ed.), *Rock Slope Engineering*. CRC Press, pp. 218-244. <https://doi.org/10.1201/9781315274980>
197. Lu Y., Ke C.-Q., Zhou X., Wang M., Lin H., Chen D., Jiang H. (2018). Monitoring land deformation in Changzhou city (China) with multi-band InSAR data sets from 2006 to 2012. *Int. J. Remote Sens.* 39, 1151-1174. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1399474>
198. Lu P., Bai S., Tofani V., Casagli N. (2019). Landslides detection through optimized hot spot analysis on persistent scatterers and distributed scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 156, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.004>
199. Lundgren P., Casu F., Manzo M., Pepe A., Berardino P., Sansosti E., Lanari R. (2004). Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 31, 1-4. <https://doi.org/10.1029/2003GL018736>
200. Lv X., Yazıcı B., Zeghal M., Bennett V., Abdoun T. (2014). Joint-Scatterer Processing for Time-Series InSAR 1-17
201. Macarovici N. (1942). Observații asupra alunecării de teren dela Iași din primăvara anului 1942. *Rev. Științifică „V. Adamachi” XXVIII*, 185-188
202. Macarovici N. (1948). Asupra hidrogeologiei împrejurimilor orașului Iași. *Studii* 14-20
203. Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. (2004a). Landslides, earthquakes, and erosion. *Earth Planet. Sci. Lett.* 229, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.018>
204. Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. (2004b). Landslide inventories

- and their statistical properties. *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 687-711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
205. Malik I., Wistuba M. (2012). Dendrochronological methods for reconstructing mass movements — An example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity. *Geochronometria* 39(3), 180–196
 206. Malinowska A.A., Witkowski W.T., Guzy A., Hejmanowski R. (2018). Mapping ground movements caused by mining-induced earthquakes applying satellite radar interferometry. *Eng. Geol.* 246, 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.013>
 207. Martiniuc C., Băcăuanu V. (1959). Harta geomorfologică a oraşului Iaşi. *Analele Ştiinţifice ale Univ. „Al. I. Cuza” din Iaşi (Serie nouă), Secţiunea II, Ştiinţe Nat.* 5, 183-190
 208. Martiniuc C., Băcăuanu V. (1961). Porniturile de teren şi modul cum pot fi prevenite sau stabilizate. *Natura. Ser. Geogr.* 4, 25-35
 209. Martiniuc C., Băcăuanu V. (1982). Deplasările de teren din Municipiul Iaşi şi împrejurimi. *Bul. Soc. Ştiinţe Geogr.* 6, 152-158
 210. Martiniuc C., Safca M., Băcăuanu V., Barbu A., Pantazică M. (1956). Contribuţie la studiul hidrogeologic al regiunii oraşului Iaşi. *Probl. Geogr.* III, 61-96
 211. Massonnet D., Briole P., Arnaud A. (1995). Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/375567a0>
 212. Massonnet D., Feigl K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.* 36, 441-500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
 213. Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K.L., Rabaute T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature* 364, 138-142. <https://doi.org/10.1038/364138a0>
 214. Massonnet D., Thatcher W., Vadon H. (1996). Detection of postseismic fault-zone collapse following the Landers earthquake. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/382612a0>
 215. Mărgărint M.C., Niculiţă M. (2017). Landslide Type and Pattern in Moldavian Plateau, NE Romania, în: Radoane M., Vespremeanu-Stroe A. (Ed.), *Landform Dynamics and Evolution in Romania*, Springer Geography. Springer International Publishing, Cham, pp. 271-304. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32589-7_12
 216. Mărgărint M.C., Grozavu A., Patriche C.V. (2013). Assessing the spatial variability of coefficients of landslide predictors in different regions of Romania using logistic regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(12), 3339-3355. doi:10.5194/nhess-13-3339-2013
 217. McCalpin J. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping, în: *Proceedings 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, 5-6 April, University of Idaho, Moscow, Idaho, pp 99-111
 218. McGuffrey V.C., Modeer Jr. V.A., Turner A.K. (1996). Subsurface exploration, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 231-277
 219. McInnes R., Jakeways J., Fairbank H., Mathie E. (2007). *Landslides and Climate Change: Challenges and Solutions*, Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change. Taylor & Francis, Ventnor. <https://doi.org/10.1201/noe0415443180>
 220. McKean J., Roering J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology* 57, 331–351. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00164-8)
 221. Meena S.R., Ghorbanzadeh O., van Westen C.J., Nachappa T.G., Blaschke T., Singh R.P.,

- Sarkar R. (2021). Rapid mapping of landslides in the Western Ghats (India) triggered by 2018 extreme monsoon rainfall using a deep learning approach. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01602-4>
222. Micu M. (2017). The systematic of landslide processes in the conditions of Romania's relief, în: Rădoane M., Vespremeanu-Stroe A. (Ed.), *Landform Dynamics and Evolution in Romania*, Springer Geography, 249-269. doi:10.1007/978-3-319-32589-7_11
223. Mihai A.B. (2009). *Teledetecție. Noțiuni și principii fundamentale*. Editura Universității din București, București
224. Mihăilă D. (2006). *Câmpia Moldovei. Studiu climatic*. Editura Universității Suceava, Suceava
225. Mikkelsen P.E. (1996). Field instrumentation, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 278-316
226. Minea I. (2009). *Bazinul hidrografic Bahlui – studiu hidrologic*. Alexandru Ioan Cuza
227. Mohr J.J., Reeh N., Madsen S.N. (1998). Three-dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry. *Nature* 391, 273-276. <https://doi.org/10.1038/34635>
228. Mondini A.C., Guzzetti F., Chang K.-T., Monserrat O., Martha T.R., Manconi A. (2021). Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 216, 103574. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103574>
229. Moretto S., Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Rocca A. (2017). Assessment of Landslide Pre-Failure Monitoring and Forecasting Using Satellite SAR Interferometry. *Geosciences* 7, 36. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020036>
230. Morgenstern N.R., Price V.E. (1965). The Analysis of The Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique* 15, 79-93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
231. Morgenstern N.R., Sangrey D.A. (1978). Methods of stability analysis, în: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 155-171
232. Motagh M., Hoffmann J., Kampes B., Baes M., Zschau J. (2007). Strain accumulation across the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 255, 432-444. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.003>
233. Mutihac V., Mutihac G. (2010). *The geology of Romania within the Central East-European geosstructural context*, 1 ed. Editura Didactică și Pedagogică, R.A., Bucharest
234. Nadim F., Kjekstad O., Peduzzi P., Herold C., Jaedicke C. (2006). Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides* 3, 159-173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>
235. Necula N., Niculiță M. (2017). Landslide reactivation susceptibility modeling in Iași Municipality. *Rev. Geomorfol.* 19, 101-117. <https://doi.org/10.21094/rg.2017.021>
236. Necula N., Niculiță M., Fiaschi S., Genevois R., Riccardi P., Floris M. (2021). Assessing Urban Landslide Dynamics through Multi-Temporal InSAR Techniques and Slope Numerical Modeling. *Remote Sens.* 13, 3862. <https://doi.org/10.3390/rs13193862>
237. Necula N., Niculiță M., Floris M. (2018a). Using Sentinel-1 SAR data to detect earth surface changes related to neotectonics in the Focșani basin (Eastern Romania). *PeerJ Preprints* 2-5. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27084>
238. Necula N., Niculiță M., Floris M. (2018b). Identifying slow-moving landslide deformations

- affecting rural areas using Interferometric Stacking techniques and Sentinel-1 data, în: Micu M., Comănescu L. (Ed.), Proceedings of the 34th Romanian Geomorphology Symposium. pp. 81-84
239. Necula N., Niculiță M., Floris M., Tessari G. (2017). InSAR analysis of Sentinel-1 data for monitoring landslide displacement of the north-eastern Copou hillslope, Iași city, Romania, în: Niculiță M., Mărgărint M.C. (Ed.), Proceedings of the 33rd Romanian Geomorphology Symposium. Alexandru Ioan Cuza University of Iași Press, Iași, pp. 85-88. <https://doi.org/10.15551/prgs.2017.85>
 240. Negru C. (2017). Studiul stabilității versanților în condiții de incertitudine. Alexandru Ioan Cuza
 241. Negula I.D., Sofronie R., Virsta A., Badea A. (2015). Earth Observation for the World Cultural and Natural Heritage. Agric. Agric. Sci. Procedia 6, 438-445. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.114>
 242. Niculiță M. (2011). A classification schema for structural landforms of the Moldavian platform (Romania), în: Hengl T., Evans I.S., Wilson J.P., Gould M. (Ed.), Geomorphometry 2011. Redlands, CA, pp. 129-132
 243. Niculiță M. (2016). Automatic landslide length and width estimation based on the geometric processing of the bounding box and the geomorphometric analysis of DEMs. Natural Hazards and Earth System Science 16, 2021-2030. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2021-2016>
 244. Niculiță M. (2020a). Evaluarea activității alunecărilor de teren din Podișul Moldovei în holocen și antropocen: element fundamental pentru evaluarea hazardului la alunecări de teren în contextul schimbărilor climatice (LAHAMP). Raport de cercetare. Editura Tehnopress, Iași
 245. Niculiță M. (2020b). Landslide Hazard Induced by Climate Changes in North-Eastern Romania, în: Filho W.L., Nagy G.J., Borga M., Chávez Muñoz P.D., Magnuszewski A. (Ed.), Climate Change, Hazards and Adaptation Options. Springer, Cham, pp. 245-265. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37425-9_13
 246. Niculiță M. (2021). Geomorphological restitutions for the geomorphological regionalization of Romania: the Moldavian Plain case. Rev. Geomorf. 23, 17-37. <https://doi.org/http://10.21094/rg.2021.137>
 247. Niculiță M., Mărgărint M.C. (2014). Landslide inventory for Moldavian Plateau, Romania, în: International conference Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, 18-19 November 2014, Padova, p. 9. http://www.changes-itn.eu/Portals/0/Content/2014/Final%20conference/abstracts/AP3_Abstract_Niculita.pdf
 248. Niculiță M., Mărgărint M.C. (2015). Testing landslide susceptibility uncertainty propagation due to the data source of the landslide inventory: satellite imagery versus LIDAR. Geophysical Research Abstracts 17, EGU2015-10043-2, EGU General Assembly 2015
 249. Niculiță M., Mărgărint M.C. (2017). Landslide susceptibility modelling for Iasi County, Romania, în: Sixth EUGEO Congress on the Geography of Europe, 4-6 September, 2017, Bruxelles, Belgium. <https://eugeo2017.sciencesconf.org/152555/document>
 250. Niculiță M., Mărgărint M.C., Santangelo M. (2016). Archaeological evidence for Holocene landslide activity in the Eastern Carpathian lowland. Quat. Int. 415, 175-189. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.048>
 251. Niculiță M., Andrei A., Lupu C. (2017). The landslide database of the North-Eastern Romania, în: Niculiță M., Mărgărint M.C. (Ed.), Proceedings of Romanian Geomorphology Symposium, vol. 1, Alexandru Ioan Cuza University Press, Iași, pp. 81-84. <http://dx.doi.org/10.15551/prgs.2017.81>

252. Niculiță M., Stoilov-Linu V., Necula N. (2018). Recent landslides from Iași Metropolitan Area. *Rev. Geomorfol.* 20, 90-101. <https://doi.org/10.21094/rg.2018.030>
253. Niculiță M., Mărgărint M.C., Cristea A.I. (2019). Using archaeological and geomorphological evidence for the establishment of a relative chronology and evolution pattern for Holocene landslides. *PLoS One* 14, e0227335. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227335>
254. Normand J.C.L., Heggy E. (2015). InSAR Assessment of Surface Deformations in Urban Coastal Terrains Associated With Groundwater Dynamics. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 53, 6356-6371. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2437368>
255. Norrish N.I., Wyllie D.C. (1996). Rockslope stability analysis, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 391-425
256. Notti D., Herrera G., Bianchini S., Meisina C., García-Davalillo J.C., Zucca F. (2014). A methodology for improving landslide PSI data analysis. *Int. J. Remote Sens.* 35, 2186-2214. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.889864>
257. Notti D., Wrzesniak A., Dematteis N., Lollino P., Fazio N.L., Zucca F., Giordan D. (2021). A multidisciplinary investigation of deep-seated landslide reactivation triggered by an extreme rainfall event: a case study of the Monesi di Mendatica landslide, Ligurian Alps. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01651-3>
258. Osmanoglu B., Dixon T.H., Wdowinski S., Cabral-Cano E., Jiang Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 13, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009>
259. Palade L., Băcăuanu V. (1971). Contribuții la studiul alunecărilor de teren din partea de nord-est a Dealului Copou-Iași (Facultatea de Horticultură). *Lucr. științifice. Ser. Agron. – Hortic.* 1, 197-202
260. Pánek T. (2015a). Recent progress in landslide dating. A global overview. *Progress in Physical Geography* 39, 168-198. <https://doi.org/10.1177/0309133314550671>
261. Pánek T. (2015b). Giant Landslides in Low-Gradient Landscapes: A Global Perspective, în: Lollino G. et al. (Ed.), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*. Springer, Cham, pp. 905-908. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_156
262. Pánek T. (2019). Landslides and Quaternary climate changes — The state of the art. *Earth-Science Reviews* 196, 102871. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.015>
263. Pánek T., Smolková V., Hradecký J., Kirchner K. (2007). Landslide dams in the northern part of Czech flysch Carpathians: geomorphic evidence and imprints. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica* 41, 77-96
264. Pánek T., Hradecký J., Smolková V., Silhan K. (2008). Gigantic low-gradient landslides in the northern periphery of the Crimean Mountains (Ukraine). *Geomorphology* 95, 449-473. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.007>
265. Pánek T., Smolková V., Hradecký J., Baroň I., Šilhán K. (2013). Holocene reactivations of catastrophic complex flow-like landslides in the Flysch Carpathians (Czech Republic/Slovakia). *Quaternary Research* 80, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.03.009>
266. Pánek T., Hartvich F., Jankovská V., Klimeš J., Tábořík P., Bubík M., Smolková V., Hradecký J. (2014). Large Late Pleistocene landslides from the marginal slope of the Flysch Carpathians. *Landslides* 11, 981-992. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0463-8>
267. Pascariu F. (2010). Studiul argilelor sarmațiene și formațiunile acoperitoare din municipiul

- Iași, privite ca terenuri de fundare. Alexandru Ioan Cuza
268. Patriche C.V., Pîrnău R., Grozavu A., Roșca B. (2016). A comparative analysis of binary logistic regression and analytical hierarchy process for landslide susceptibility assessment in the Dobrovăț River Basin, Romania. *Pedosphere* 26, 335-350. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60047-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60047-9)
 269. Patrascu C., Popescu A.A., Datcu M. (2016). Comparative assessment of multi-temporal InSAR techniques for generation of displacement maps: A case study for Bucharest area. *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng. Comput. Sci.* 78, 135-146
 270. Pedersen R., Sigmundsson F., Feigl K.L., Árnadóttir T. (2001). Coseismic interferograms of two $M_S = 6.6$ earthquakes in the South Iceland Seismic Zone, June 2000. *Geophys. Res. Lett.* 28, 3341-3344. <https://doi.org/10.1029/2001GL013235>
 271. Pelin L.-I. (2015). Fenomenul de secetă din Câmpia Moldovei. Alexandru Ioan Cuza din Iași
 272. Peltzer G., Hudnut K.W., Feigl K.L. (1994). Analysis of coseismic surface displacement gradients using radar interferometry; new insights into the Landers earthquake. *J. Geophys. Res.* 99, 21,981. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1029/94JB01888>
 273. Petley D.N. (2008). On the occurrence of fatal landslides in 2007, în: *Geophysical Research Abstracts EGU General Assembly*. pp. EGU2008-A-10487. <https://doi.org/1607-7962/gra/EGU2008-A-10487>
 274. Petschko H., Bell T., Glade T. (2015). Effectiveness of visually analyzing LiDAR DTM derivatives for earth and debris slide inventory mapping for statistical susceptibility modeling. *Landslides* 13, 857–872. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0622-1>
 275. Piciullo L., Tiranti D., Pecoraro G., Cepeda J.M., Calvello M. (2020). Standards for the performance assessment of territorial landslide early warning systems. *Landslides* 17(11), 2533-2546. doi:10.1007/s10346-020-01486-4
 276. Piteau D.R., Peckover F.L. (1978). Recognition and identification, în: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 193-228
 277. Pizzi A., Pugliese G. (2004). InSAR-DEM analyses integrated with geologic field methods for the study of long-term seismogenic fault behavior: Applications in the axial zone of the central Apennines (Italy). *J. Seismol.* 8, 313-329. <https://doi.org/10.1023/B:JOSE.0000038454.18706.25>
 278. Pohlert T. (2020). Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection
 279. Poncoș V., Stanciu I., Teleagă D., Mațenco L., Bozsó I., Szakács A., Birtas D., Toma Ș.-A., Stănică A., Rădulescu V. (2022). An Integrated Platform for Ground-Motion Mapping, Local to Regional Scale; Examples from SE Europe. *Remote Sens.* 14, 1046. <https://doi.org/10.3390/rs14041046>
 280. Poncos V., Teleaga D., Boukhemacha M.A., Toma S.A., Serban F. (2014). Study of urban instability phenomena in Bucharest city based on Ps-InSAR. *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 429-432. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946450>
 281. Potin P., Rosich B., Miranda N., Grimont P. (2016). Sentinel-1 Mission Status. *Procedia Comput. Sci.* 100, 1297-1304. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.245>
 282. Pritchard M.E., Fielding E.J. (2008). A study of the 2006 and 2007 earthquake sequence of Pisco, Peru, with InSAR and teleseismic data. *Geophys. Res. Lett.* 35, 1-6. <https://doi.org/10.1029/2008GL033374>
 283. Purice D.-A. (2013). Studiul alunecărilor de teren din partea de Nord-Est a Municipiului

Iași. Alexandru Ioan Cuza University of Iași

284. Qu C., Qiao X., Shan X., Zhao D., Zhao L., Gong W., Li Y. (2020). InSAR 3-D coseismic displacement field of the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake: Insights into complex fault kinematics during the event. *Remote Sens.* 12, 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs12233982>
285. R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
286. Rabus B.T., Fatland D.R. (2000). Comparison of SAR-interferometric and surveyed velocities on a mountain glacier: Black Rapids Glacier, Alaska, U.S.A. *J. Glaciol.* 46, 119-128. <https://doi.org/10.3189/172756500781833214>
287. Raucoules D., Bourguin B., de Michele M., Le Cozannet G., Closset L., Bremmer C., Veldkamp H., Tragheim D., Bateson L., Crosetto M., Agudo M., Engdahl M. (2009). Validation and intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 project results. *J. Appl. Geophys.* 68, 335-347. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.003>
288. Razak K.A., Straatsma M.W., Van Westen C.J., Malet J.P., de Jong S.M. (2011). Airborne laser scanning of forested landslides characterization: terrain model quality and visualization. *Geomorphology* 126, 186-200. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.003>
289. Razak K.A., Santangelo M., Van Westen C.J., Straatsma M.W., de Jong S.M. (2013). Generating an optimal DTM from airborne laser scanning data for landslide mapping in a tropical forest environment. *Geomorphology* 190, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.021>
290. Reale D., Nitti D.O., Peduto D., Nutricato R., Bovenga F., Fornaro G. (2011). Postseismic deformation monitoring with the COSMO/SKYMED constellation. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 8, 696-700. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2100364>
291. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models, *Earth-Science Reviews*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
292. Ren H., Feng X. (2020). Calculating vertical deformation using a single InSAR pair based on singular value decomposition in mining areas. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 92, 102115. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102115>
293. Reyes-Carmona C., Barra A., Galve J., Monserrat O., Pérez-Peña J., Mateos R., Notti D., Ruano P., Millares A., López-Vinielles J., Azañón J. (2020). Sentinel-1 DInSAR for Monitoring Active Landslides in Critical Infrastructures: The Case of the Rules Reservoir (Southern Spain). *Remote Sens.* 12, 809. <https://doi.org/10.3390/rs12050809>
294. Rib H.T., Liang T. (1978). Recognition and identification, în: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 34-80
295. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE* 88, 333-382. <https://doi.org/10.1109/5.838084>
296. Roșca S., Bilașco Ș., Petrea D., Fodorean I., Vescan I., Filip S. (2015). Application of landslide hazard scenarios at annual scale in the Niraj River basin (Transylvania Depression, Romania). *Natural Hazards* 77(3), 1573-1592. doi:10.1007/s11069-015-1665-2
297. Roșca S., Bilașco Ș., Petrea D., Vescan I., Fodorean I. (2016). Comparative assessment of landslide susceptibility. Case study: the Niraj river basin (Transylvania depression, Romania). *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7(3), 1043-1064. doi:10.1080/19475705.2015.1030784
298. Roșian G., Csaba H., Kinga-Olga R., Boțan C.-N., Gavrilă I.G. (2016). Assessing landslide vulnerability using bivariate statistical analysis and the frequency ratio model. Case study:

- Transylvanian Plain (Romania). *Zeitschrift Für Geomorphologie* 60(4), 359-371. doi:10.1127/zfg/2016/0404
299. Ryan J.A., Ulrich J.M., Bennett R., Joy C. (2020). Package „xts”: eXtensible Time Series
 300. Șandric I., Chițu Z. (2009). Landslide inventory for the administrative area of Breaza, Curvature Subcarpathians, România. *Journal of Maps* 5(1), 75-86. doi:10.4113/jom.2009.1051
 301. Șandric I., Chițu Z., Mihai B., Săvulescu I. (2011). Landslide Susceptibility for the Administrative Area of Breaza, Prahova County, Curvature Subcarpathians, România. *Journal of Maps* 7(1), 552-563. doi:10.4113/jom.2011.1168
 302. Santangelo M., Gioia D., Cardinali M., Guzzetti F., Schiattarella M. (2015). Landslide inventory map of the upper Sinni River valley, Southern Italy. *Journal of Maps* 11, 444-453. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.949313>
 303. Schmidt D.A., Bürgmann R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 108. <https://doi.org/10.1029/2002JB002267>
 304. Schram M., Pantazică M., Martiniuc C. (1977). Aspecte hidrogeologice din zona Municipiului Iași și împrejurimi. *Analele Științifice ale Univ. „Al. I. Cuza” din Iași (Serie nouă), Secțiunea II, b. Geol.* 23, 107-113
 305. Schulz W.H. (2004). Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington. US Geological Survey Open-File Report 1396, 11
 306. Schuster R.L. (1996). Socioeconomic significance of landslides, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC*, pp. 12-35
 307. Schuster R.L., Fleming R.W. (1986). Economic Losses and Fatalities Due to Landslides. *Environ. Eng. Geosci.* xxiii, 11-28. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxiii.1.11>
 308. Schuster R.L., Kockelman W.J. (1996). Principles of landslide hazard reduction, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC*, pp. 91-105
 309. Sharpe C.F.S. (1938). *Landslides and Related Phenomena*, Columbia University Press, New York, 137
 310. Shepherd A., Wingham D.J., Mansley J.A.D., Corr H.F.J. (2001). Inland Thinning of Pine Island Glacier, West Antarctica. *Science* (80-.). 291, 862-864. <https://doi.org/10.1126/science.291.5505.862>
 311. Shirani K., Pasandi M. (2019). Detecting and monitoring of landslides using persistent scattering synthetic aperture radar interferometry. *Environ. Earth Sci.* 78, 42. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8042-x>
 312. Shroder J.F. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movements on Table Cliffs Plateau Utah. *Quaternary Research* 9, 168-185
 313. Shroder J.F. (1980). Dendrogeomorphology, review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4, 161-188
 314. Sillion T. (1965). Contribuții la studiul stabilității versanților dealului Copou în raza județului Iași. *Institutul Politehnic Iași*
 315. Soeters R., van Westen C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC*, pp. 129-175

316. Song K., Wang F., Dai Z., Iio A., Osaka O., Sakata S. (2017). Geological characteristics of landslides triggered by the 2016 Kumamoto earthquake in Mt. Aso volcano, Japan. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1097-1>
317. Sousa J.J., Bastos L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 659-667. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-659-2013>
318. Sowers G.F., Royster D.L. (1978). Field investigation, in: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 81-111
319. Spencer E. (1967). A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Géotechnique* 17, 11-26. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11>
320. Stead D., Eberhardt E., Coggan J.S. (2006). Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Eng. Geol.* 83, 217-235. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.033>
321. Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sens. Environ.* 112, 3160-3172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.008>
322. Strozzi T., Caduff R., Jones N., Barboux C., Delaloye R., Bodin X., Kääb A., Mätzler E., Schrott L. (2020). Monitoring rock glacier kinematics with satellite synthetic aperture radar. *Remote Sens.* 12, 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs12030559>
323. Strozzi T., Luckman A., Murray T., Wegmuller U., Werner C.L. (2002). Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40, 2384-2391. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.805079>
324. Strozzi T., Teatini P., Tosi L. (2009). TerraSAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on Venice coastland stability. *Remote Sens. Environ.* 113, 2682-2688. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.001>
325. Sun Q., Hu J., Zhang L., Ding X. (2016). Towards Slow-Moving Landslide Monitoring by Integrating Multi-Sensor InSAR Time Series Datasets: The Zhouqu Case Study, China. *Remote Sens.* 8, 908. <https://doi.org/10.3390/rs8110908>
326. Tart Jr. R.G. (1996). Permafrost, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 620-645
327. Teatini P., Tosi L., Strozzi T., Carbognin L., Wegmuller U., Rizzetto F. (2005). Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sens. Environ.* 98, 403-413. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.002>
328. Terzaghi K. (1950). Mechanism of Landslides, in: Page S. (Ed.), *Application of Geology to Engineering Practice*, Geological Society of America, Inc. <https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83>
329. Tessari G., Floris M., Pasquali P. (2017). Phase and amplitude analyses of SAR data for landslide detection and monitoring in non-urban areas located in the North-Eastern Italian pre-Alps. *Environ. Earth Sci.* 76, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6403-5>
330. Tiberius C., van der Marel H., Reudink R., van Leijen F. (2021). Surveying and Mapping. *TU Delft Open*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5074/T.2021.007>
331. Tizzani P., Castaldo R., Solaro G., Pepe S., Bonano M., Casu F., Manunta M., Manzo M., Pepe A., Samsonov S., Lanari R., Sansosti E. (2013). New insights into the 2012 Emilia (Italy)

- seismic sequence through advanced numerical modeling of ground deformation InSAR measurements. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1971-1977. <https://doi.org/10.1002/grl.50290>
332. Tomás R., Cano M., García-Barba J., Vicente F., Herrera G., Lopez-Sanchez J.M., Mallorquí J.J. (2013). Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry: La Pedrera dam, Alicante, Spain. *Eng. Geol.* 157, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.01.022>
 333. Tomiyama N., Koike K., Omura M. (2004). Detection of topographic changes associated with volcanic activities of Mt. Hossho using D-InSAR. *Adv. Sp. Res.* 33, 279-283. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00483-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00483-6)
 334. Trujillo-Vela M.G., Galindo-Torres S.A., Zhang X., Ramos-Cañón A.M., Escobar-Vargas J.A. (2020). Smooth particle hydrodynamics and discrete element method coupling scheme for the simulation of debris flows. *Comput. Geotech.* 125, 103669. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103669>
 335. Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W. (2015a). Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part I: Numerical studies considering non-associated plasticity. *Comput. Geotech.* 70, 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.06.018>
 336. Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W. (2015b). Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history. *Comput. Geotech.* 70, 178-189. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.07.019>
 337. Turner A.K. (1996). Colluvium and talus, în: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 525-554
 338. Ungureanu A. (1993). *Geografia podişurilor şi câmpiilor României*. Editura Universităţii Alexandru Ioan Cuza, Iaşi
 339. Vajedian S., Motagh M., Mousavi Z., Motaghi K., Fielding E., Akbari B., Wetzel H.-U., Darabi A. (2018). Coseismic Deformation Field of the Mw 7.3 12 November 2017 Sarpol-e Zahab (Iran) Earthquake: A Decoupling Horizon in the Northern Zagros Mountains Inferred from InSAR Observations. *Remote Sens.* 10, 1589. <https://doi.org/10.3390/rs10101589>
 340. Vallone P., Giammarinaro M.S., Crosetto M., Agudo M., Biescas E. (2008). Ground motion phenomena in Caltanissetta (Italy) investigated by InSAR and geological data integration. *Eng. Geol.* 98, 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.004>
 341. Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Verstraeten G., Vanacker V., Moeyersons J., Nyssen J., Van Beek L.P.H. (2005). The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides. *Geomorphology* 67, 351–363. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.001>
 342. Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Verstraeten G., Vanacker V., Moeyersons J., Nyssen J., Van Beek L.P.H., Vandekerckhove L. (2007). Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 754-769. <https://doi.org/10.1002/esp.1417>
 343. Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Gullentops F., Vandekerckhove L., Hervás J. (2011). Regional mapping and characterization of old landslides in hilly regions using LiDAR-based imagery in Southern Flanders. *Quaternary Research* 75, 721–733. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.006>
 344. Van Westen C.J. (1993). Application of Geographic Information Systems to landslide

- hazard zonation. ITC Publication, 15, Enschede, The Netherlands
345. Van Westen C.J. (2013). Remote sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management, in: Shroder J., Bishop M.P. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 3, Remote Sensing and GIScience in Geomorphology, 259–298. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00051-8>
 346. Van Westen C.J., van Asch T.W.J., Soeters R. (2006). Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? *Bulletin of engineering geology and the environment* 65(2), 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
 347. Van Westen C.J., Castellanos E., Kuriakose S.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Eng. Geol.* 102, 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
 348. Vanmarcke E.H. (1980). Probabilistic stability analysis of earth slopes. *Eng. Geol.* 16, 29–50. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(80\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0013-7952(80)90005-8)
 349. Vanneschi C., Eyre M., Burda J., Žižka L., Francioni M., Coggan J.S. (2018). Investigation of landslide failure mechanisms adjacent to lignite mining operations in North Bohemia (Czech Republic) through a limit equilibrium/finite element modelling approach. *Geomorphology* 320, 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.08.006>
 350. Varnes D.J. (1958). Landslide types and processes, in: Eckel E.B. (Ed.), *Landslides and engineering practice*. Special Report 29. Highway Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC, pp. 20–47
 351. Varnes D.J. (1978). Slope movement types and processes, in: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 11–33
 352. Varnes D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO Press, Paris, 63
 353. Vick S.G. (1996). Hydraulic tailings, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 577–584
 354. Vosselman G., Maas H.-G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*, First. ed. Whittles Publishing, Dunbeath
 355. Walkinshaw J.L., Santi P.M. (1996). Shales and other degradable materials, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 555–576
 356. Wang B., Vardon P.J., Hicks M.A. (2016). Investigation of retrogressive and progressive slope failure mechanisms using the material point method. *Comput. Geotech.* 78, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.04.016>
 357. Wangenstein B., Weydahl D.J., Hagen J.O. (2005). Mapping glacier velocities on Svalbard using ERS tandem DInSAR data. *Nor. Geogr. Tidsskr. - Nor. J. Geogr.* 59, 276–285. <https://doi.org/10.1080/00291950500375500>
 358. Wasowski J., Bovenga F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Eng. Geol.* 174, 103–138. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>
 359. Wegmuller U., Walter D., Spreckels V., Werner C.L. (2010). Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatterer Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 48, 895–904. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030792>

360. Wieczorek G. (1984). Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 21, 337–342. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxi.3.337>
361. Wieczorek G. (1996). Landslide triggering mechanisms, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 76-90
362. Wilson S.D., Mikkelsen P.E. (1978). Field instrumentation, in: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 113-138
363. Wu T.H. (1996). Soil strength properties and their measurement, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 319-336
364. Wu T.H., Sangrey D.A. (1978). Strength properties and their measurement, in: Schuster R.L., Krizek R.J. (Ed.), *Landslides. Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington DC, pp. 139-154
365. Wu T.H., Tang W.H., Einstein H.H. (1996). Landslide hazard and risk assessment, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 106-118
366. Wyllie D.C., Norrish N.I. (1996a). Rock strength properties and their measurement, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 372-390
367. Wyllie D.C., Norrish N.I. (1996b). Stabilization of rock slopes, in: Turner A.K., Schuster R.L. (Ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, National Academy of Sciences – National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 474-504
368. Xu X., Jin F., Sun Q., Soga K., Zhou G.G.D. (2019). Three-dimensional material point method modeling of runout behavior of the Hongshiyuan landslide. *Can. Geotech. J.* 56, 1318-1337. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0638>
369. Xue F., Lv X., Dou F., Yun Y. (2020). A Review of Time-Series Interferometric SAR Techniques. *Ieee Geosci. Remote Sens. Mag.*
370. Yerro A., Soga K., Bray J. (2019). Runout evaluation of Oso landslide with the material point method. *Can. Geotech. J.* 56, 1304-1317. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0630>
371. Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M., Gabriel A., Werner C.L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 99, 19617-19634. <https://doi.org/10.1029/94JB01179>
372. Zebker H.A., Rosen P.A., Hensley S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *J. Geophys. Res.* 102, 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>
373. Zeileis A., Grothendieck G. (2005). Zoo: S3 infrastructure for regular and irregular time series. *J. Stat. Softw.* 14. <https://doi.org/10.18637/jss.v014.i06>
374. Zeileis A., Grothendieck G., Ryan J.A., Ulrich J.M., Andrews F. (2022). Package ‘ zoo ’

- 375. Zeileis A., Kleiber C., Krämer W., Hornik K. (2003). Testing and dating of structural changes in practice. *Comput. Stat. Data Anal.* 44, 109-123. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(03\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(03)00030-6)
- 376. Zhang K. (2020). *Failure Mechanism and Stability Analysis of Rock Slope*, Failure Mechanism and Stability Analysis of Rock Slope. Springer Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-5743-9>
- 377. Zhao F., Mallorqui J.J., Iglesias R., Gili J.A., Corominas J. (2018). Landslide Monitoring Using Multi-Temporal SAR Interferometry with Advanced Persistent Scatterers Identification Methods and Super High-Spatial Resolution TerraSAR-X Images. *Remote Sens.* 10, 921. <https://doi.org/10.3390/rs10060921>
- 378. Zhu D.Y., Lee C.F., Jiang H.D. (2003). Generalised framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis. *Geotechnique* 53, 377-395. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.4.377>