

UNIVERSITATEA ALEXANDRU IOAN CUZA DIN IAȘI
FACULTATEA DE GEOGRAFIE ȘI GEOLOGIE
ȘCOALA DOCTORALĂ DE GEOȘTIINȚE



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

UTILIZAREA DATELOR SPECIFICE TELEDETECTIEI ȘI A TEHNICILOR SIG ÎN EVALUAREA HAZARDULUI LA INUNDAȚII – APLICAȚII ÎN NORD-ESTUL ROMÂNIEI

Cîmpianu Cătălin Ioan

Coordonatori științifici: Prof. Dr. Gheorghe Romanescu/Prof. Dr. Dan Dumitriu

Domeniul Geografie

Iași, 2021

CUPRINS

INTRODUCERE.....	5
PREMISE.....	7
OBIECTIVELE LUCRĂRII.....	9
CAPITOLUL 1 – INUNDAȚIILE PROBLEMATICĂ GENERALĂ.....	10
1.1. Definirea conceptelor de inundație și viitură (flood and flash flood).....	10
1.2. Problematika inundațiilor la nivel internațional.....	11
1.3. Problematika inundațiilor la nivel European și național	12
CAPITOLUL 2 – UTILIZAREA TELEDETEȚIEI ȘI A SISTEMELOR INFORMATICE GEOGRAFICE ÎN EVALUAREA HAZARDULUI LA INUNDAȚII.....	15
2.1 Noțiuni generale de teledeteție.....	15
2.1.1 Senzori specifici teledeteției și achiziția datelor	16
2.2 Sistemele informatice geografice – instrumente suport în cadrul procesului de cartografiere a inundațiilor și evaluare al hazardului la inundații	19
2.2.1 Exemple de soluții software SIG ce pot fi utilizate în evaluarea hazardului la inundații.....	19
CAPITOLUL 3 – CONSIDERAȚII TEORETICE/CONCEPTUALE PRIVIND PROCESUL DE EVALUARE A HAZARDULUI LA INUNDAȚII	21
3.1 Riscul la inundații.....	21
3.1.1 Componentele riscului la inundații	22
3.1.1.1 Hazardul la inundații	22
3.1.1.2 Vulnerabilitatea la inundații	23
3.1.1.3 Expunerea la inundații	23
3.2 Managementul riscului la inundații.....	24
3.2.1 Evaluarea hazardului la inundații – componentă principală a analizei și managementului riscului la inundații	26
3.2.2 Metode de evaluare a hazardului la inundații	27
3.2.2.1 Metodele hidrologice-hidraulice.....	27
3.2.2.2 Metodele geologice-geomorfologice	28
3.2.2.3 Metodele istorice	28
3.2.2.4 Metode de evaluare a hazardului la inundații specifice teledeteției.....	29
3.2.2.5 Metode specifice SIG care pot contribui în cadrul procesului de evaluare a hazardului la inundații.....	30
3.2.3 Criterii de evaluare a hazardului la inundații	31
3.2.3.1 Metodologia elvețiană de evaluare a hazardului.....	31
3.2.3.2 Metodologia propusă de Ministerul Infrastructurii Terestre și a Transporturilor din Japonia (MLIT).	31

3.2.4 Hărțile de hazard la inundații în contextul comunitar și național.....	32
--	----

CAPITOLUL 4 – DATE, SOFTURI ȘI METODOLOGII UTILIZATE ÎN EVALUAREA HAZARDULUI LA INUNDAȚII DIN CADRUL REGIUNII DE N-E A ROMÂNIEI..... 33

4.1 Date utilizate 33

4.1.1 Imagini satelitare optice Landsat și Sentinel-2	33
4.1.2 Imagini satelitare radar Sentinel-1	33
4.1.3 Model digital de elevație LiDAR.....	34
4.1.4 Alte date în format raster	34
4.1.5 Date numerice cu privire la valorile de debit înregistrate la stația hidrometrică Rădăuți-Prut	34
4.1.6 Date vectoriale în format punct, linie sau poligon	34

4.2 Soluții software utilizate..... 34

4.2.1 Alte soluții software utilizate	35
---	----

4.3 Metode utilizate 35

4.3.1 Metode specifice teledetecției.....	35
4.3.1.1 Metoda clasificări supervizate	35
4.3.1.2 Metoda indicilor spațiali - Normalized Difference Water Index (NDWI) și Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI).	35
4.3.1.3 Metoda manipulării valorilor de backscatter aferente histogramelor imaginilor satelitare radar	36
4.3.1.4 Metoda interpretării vizuale a imaginilor satelitare și extragerea informațiilor manual (prin digitizare).	37
4.3.2 Metode hidrologice-hidraulice.....	37
4.3.2.1 Metode statistice de analiză a frecvenței inundațiilor – determinarea debitelor maxime specifice unor perioade de revenire și implicit a probabilităților de apariție utilizând metoda Gumbel.	37
4.3.2.2 Metoda modelării hidraulice 2D.....	38
4.3.3 Metode specifice SIG.....	39
4.3.3.1 Metoda digitizării (a vectorizării).....	39
4.3.3.2 Metoda geostatistică de interpolare Natural Neighbor	39
4.3.3.3 Metoda suprapunerii datelor	39
4.3.3.4 Metoda cartografiei digitale	39

4.4 Metodologie 1 - Evaluarea hazardului la inundații folosind imagini satelitare optice (Landsat și Sentinel-2), metoda clasificări supervizate, metoda indicilor spațiali și SIG. 40

4.4.1 Etape metodologice	40
4.4.1.1 Datele hidrologice și inventarierea inundațiilor.....	41
4.4.1.2 Pre-procesarea imaginilor satelitare	41

4.5 Metodologie 2 - Evaluarea hazardului la inundații folosind imagini satelitare radar (Sentinel-1), metoda manipulării histogramelor, legile probabilistice de analiză a frecvențelor inundațiilor și SIG.... 43

4.5.1 Etape metodologice ale fluxului de lucru	45
4.5.1.1 Preprocesarea imaginilor satelitare Sentinel-1	45

4.5.1.2 Extragerea pixelilor aferenți apei	46
4.5.1.3 Validarea rezultatelor	48
4.6 Metodologie 3 - Evaluarea hazardului la inundații folosind metoda modelării hidraulice 2D, un model digital de elevație LiDAR (cu acuratețe ridicată) și SIG	50
4.6.1 Etape metodologice	50
4.6.1.1 Achiziția și pregătirea datelor de intrare (necesare modelări hidraulice 2D).....	50
4.6.1.2 Obținerea modelului digital al terenului LiDAR	51
4.6.1.3 Datele hidrologice	51
4.6.1.4 Modelarea hidraulică	52
4.6.1.6 Dezvoltarea scenariilor	55
 CAPITOLUL 5 – REZULTATE OBTINUTE.....	57
5.1 Rezultate obținute în urma implementării metodologiei nr. 1 - hărți ce delimitează extinderea spațială a inundațiilor din ultimi 30 ani din regiunea de N-E a României (derivate din imagini satelitare optice).....	57
5.1.1 Principalele evenimente de inundație din ultimii 30 ani.	57
5.1.1.1 Inundațiile din sectorul inferior al bazinului Siret (din anii 1991 și 2005).....	57
5.1.1.2 Inundațiile din sectorul mijlociu al bazinului Siret (1991, 2008 și 2010).....	59
5.1.1.3 Inundația de pe râul Jijia (bazinul Prut) din anul 1991	60
5.1.1.4 Inundația din sectorul superior al râului Prut, din amonte de lacul de acumulare Stânca Costești (2008).	60
5.2 Rezultate obținute în urma implementării metodologiei nr. 2 – Harta de hazard la inundații pentru sectorul mijlociu al râului Prut situat între Oroftiana și Rădăuți-Prut.....	61
5.2.1 Obținerea unei hărți de hazard la inundații pentru sectorul mijlociu al râului Prut situat între Oroftiana și Rădăuți-Prut folosind exclusiv imagini satelitare radar Sentinel-1.....	61
5.3 Rezultate obținute în urma implementării metodologiei nr. 3 – Hărți de hazard la inundații pentru sectorul inferior al râului Bistrița ce traversează zona urbană și periurbană a orașului Bacău	64
5.3.1 Limitele spațiale ale inundațiilor	65
5.3.2 Viteza de curgere a apei la inundație	66
5.3.3 Adâncimea apei la inundație	67
5.3.4 Evaluarea hazardului la inundații.....	68
 DISCUȚII.....	70
CONCLUZII.....	71
MENȚIUNI	75
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	76

INTRODUCERE

La nivel mondial, inundațiile sunt cele mai frecvente și comune tipuri de dezastre naturale (evenimente catastrofale), având capacitatea de a provoca pierderi de vieți omenești, distrugeri de locuințe și infrastructuri, strămutări, foamete, epidemii, crize de apă potabilă etc. (Directiva 2007/60/EC; Franci et al., 2016; Beden and Keskin, 2021). Conform Bazei de Date Internaționale privind dezastrele naturale și tehnologice (Emergency Events Database – EM-DAT), incidența inundațiilor a început a cunoaște un trend ascendent odată cu sfârșitul secolului al XX-lea și începutul celui de-al XXI-lea (perioadă de timp ce se suprapune cu amploarea schimbărilor climatice) (Barredo, 2009; Blöschl & Montanari, 2010; Kundzewicz et al., 2013; Thomas și Lopez, 2015; Blöschl et al., 2020). În același timp, pe fondul recrudescenței tiparelor de manifestare ale acestora (ex: durata, intensitatea, extinderea spațială etc.), consecințele socio-economice au atins niveluri fără precedent (Kundzewicz et al., 2010; Yoon et al., 2014; Kvočka et al., 2015; Halgamuge et al., 2017; Blöschl et al., 2017; Mișu-Pintilie et al., 2019; Petrucci et al., 2019; Kron et al., 2019a; Kron et al., 2019b).

Conform Boccard, 2018, societățile umane au încercat întotdeauna să reducă impactul inundațiilor și au căutat întotdeauna protecție împotriva acestor dezastre naturale. În acest sens, pentru a face față acestora, au fost adoptate mai multe măsuri de apărare. O primă abordare a acestei necesități umane, ghidată de sloganul „*țineți inundațiile departe de oameni*”, a constat în reducerea efectelor negative asociate inundațiilor prin implementarea unor măsuri structurale de apărare cum ar fi edificarea de infrastructuri hidrotehnice (baraje, bazine de retenție, lacuri de acumulare, diguri, etc). În ciuda succesului pe care aceste măsuri l-au înregistrat inițial, de-a lungul anilor, a devenit clar faptul că această strategie nu asigură o protecție completă împotriva inundațiilor (aceste lucrările de protecție exclusiv ingineresti nefiind capabile a evita inundațiile extreme) (Islam & Sado, 2000a; Islam & Sado, 2000b; Petry, 2002).

Astfel, începând cu a doua jumătate a secolului al XX-lea, o nouă abordare cu privire la problematica inundațiilor s-a conturat, iar aspecte nestructurale specifice managementului riscului la inundații (ex: identificarea și evaluarea hazardului la inundații, evaluarea vulnerabilității, etc.), au început a primi o atenție tot mai mare, devenind fundamental prioritare odată cu debutul secolului al XXI-lea (odată cu escaladarea numărului inundațiilor și a implicațiilor schimbărilor climatice) (Balica & Wright, 2009; Foudi et al., 2015; Sorocovschi, 2016; Teng et al., 2017; Mișu-Pintilie et al., 2019).

Conform acestei noi abordări, efectele adverse asociate inundațiilor pot fi evitate, reduse sau transferate prin implementarea unor măsuri de prevenire, reducere și/sau pregătire specifice (UNISDR, 2009).

Dintre toate aspectele ce țin de managementul riscului la inundații (și implicit de măsurile de prevenire a acestuia), identificarea și evaluarea hazardului la inundații reprezintă primul și cel mai important pas (Alfieri et al., 2015; Erena et al. 2018). Hărțile de hazard la inundații elaborate în urma acestui proces oferă informații valoroase cu privire la distribuția spațială a nivelului de pericol care planează asupra unui areal anume, constituind instrumente suport pentru cele mai potrivite măsuri de atenuare a riscului la inundații (Merz et al., 2007; de Moel et al., 2009; van Alphen, 2009). Cu ajutorul acestora, factorii de decizie și autoritățile responsabile pot lua măsurile adecvate cu privire la: planificarea teritorială și elaborarea unor planuri de limitare a teritoriului construit, proiectarea viitoarelor infrastructuri și investiții, elaborarea planurilor de urgență și evacuare a populației în caz de dezastru, realizarea unui sistem eficient de coordonare al activităților solicitate în perioadele specifice precizei, crizei și postcrizei, informare a populației asupra riscului la inundații, etc. (Getahun & Gebre, 2015).

Cum în întreg procesul de management al riscului la inundații, informațiile spațiale joacă un rol crucial (van Westen, 2013), utilizarea imaginilor satelitare (optice și/sau radar) reprezintă o necesitate. Împreună cu sistemele informaționale geografice (SIG) (care constau în diferite unelte și softuri), acestea pot fi folosite cu succes în cartografierea variațiilor spațio-temporale ale inundațiilor și implicit în evaluarea hazardului (Pradhan et al., 2014; Armenakis et al., 2017; Muthusamy et al., 2019; Wan et al., 2019; Massaza et al., 2019; Bui et al., 2019; Shahabi et al., 2020; Sansare & Mhaske 2020). Progresele înregistrate în ultimii ani în domeniul teledetecției și al SIG, permit o monitorizare permanentă a dinamicii corpurilor de apă aflate la suprafața Pământului și implicit cartografierea inundațiilor (în diferite etape de dezvoltare ale acestora) (Wang et al., 2002; Sanyal & Lu, 2004; Goetz et al., 2008; Opolot, 2013; Kabenge et al., 2017), precum și modelarea computerizată a hazardului la inundații (Mihu-Pintilie et. al., 2019). Tehnicile de prelucrare a diverselor tipuri de date specifice teledetecției, în diferite soluții software SIG, oferă posibilitatea de a avea o privire de ansamblu (mult mai detaliată) asupra situației în teren, de a gestiona durabil zonele supuse hazardului la inundații (luând în considerare diferitele lui posibilități de manifestare și probabilității de apariție), de a încorpora diferite cunoștințe locale și de a asigura participarea și informarea comunităților

(Sami et al., 2013; Ouma & Tateishi, 2014; Astite et al., 2015; Ireland et al., 2015; Romanescu et al., 2017).

În acest context, lucrarea de față va urmări identificarea unor noi metodologii de evaluare a hazardului la inundații și implicit de realizare a hărților de hazard în cadrul regiunii de N-E a României precum și îmbunătățirea celor deja existente la nivel național, prin: (1) explorarea capabilităților imaginilor satelitare optice și/sau radar (o soluție alternativă pentru sectoarele de râu unde acest tip de hărți lipsesc sau necesită anumite completări) și (2) implementarea la scară locală a unei metode de modelare hidraulică 2D (prin utilizarea unor date de intrare specifice, cu o acuratețe ridicată, adaptate unor condiții particulare de curgere a apei).

PREMISE

(1) Conform proiectului Evaluarea Riscurilor de Dezastre la Nivel Național - RO-RISK, SIPOCA 30, din cadrul Programului Operațional Capacitate Administrativă 2014 – 2020, Axă prioritară – 1, Capitolul 2 – Analiza de hazard la inundații, în cadrul Programului Național Planul de Prevenire, Protecție și Diminuare a Efectelor Inundațiilor (P.P.P.D.E.I.), s-au realizat hărți de hazard la inundații pentru o lungime de cursuri de apă de aproximativ 33.500 km (Bilașco & Csaba, 2016). Cu toate acestea, *se face precizarea că, la nivelul țării noastre au fost declarate la Comisia Europeană (CE), în cadrul primei etape specifice implementării Directivei 2007/60/C.E, numită și etapa Evaluării Preliminare a Riscului la Inundații – EPRI (Preliminary Flood Risk Assessment - PFRA), ca fiind zone cu risc potențial semnificativ la inundații (Area of Potential Significant Flood Risk – A.P.S.F.R), o serie de sectoare de râu în lungime totală de cca. 17.500 km (Rădulescu et al., 2013; Rădulescu et al., 2014).* De asemenea, se mai precizează faptul că hărțile de hazard raportate la Comisia Europeană acoperă sectoare de râu cu o lungime însumată de 17.500 km, ceea ce reprezintă 22% din totalul de 79.000 km de lungimi de râuri cadastrate și 15% din totalul de 115.000 km de râuri cu regim permanent (Rădulescu et al., 2014; Chendeș et al., 2014). Datele cu privire la lungimile de râuri (cadastrate și cu regim permanent) au fost extrase din Planul Național de Amenajare a Bazinelor Hidrografice din România, revizuit și elaborat în anul 2013.

(2) *Pentru 84% din lungimea sectoarelor A.P.S.F.R., hărțile de hazard au fost realizate prin utilizarea programelor de modelare. Datele pe baza cărora s-au realizat aceste modelări hidraulice, sub forma modelelor digitale de elevație LiDAR, au fost*

caracterizate de o rezoluție spațială ridicată de la 1 m până la 10 m. Pentru celelalte zone A.P.S.F.R. (16%), au fost dezvoltate metode simplificate de generare a hărților de hazard la inundații (prin proceduri GRASS/Chezy și proceduri SIG), cu un grad de incertitudine mai ridicat decât în cazul metodelor bazate pe modelare hidrologică – hidraulică detaliată. Pentru aceste metode simplificate au fost folosite date cu rezoluția de la 2 m până la 30 m (Sursa: Planul de Management al Riscului la Inundații Sinteza Națională; Evaluarea Riscurilor de Dezastre la Nivel Național - RO-RISK, SIPOCA 30, din cadrul Programului Operațional Capacitate Administrativă 2014 – 2020, Axă prioritară – 1, Capitolul 3 - Analiza de hazard și harta de hazard pentru inundații provenite din revărsări de apă și viituri rapide) ([Rădulescu et al., 2014](#)).

(3) Menționăm faptul că hărțile prezentate sunt de interes general, în scop de informare; pentru activități de promovare a investițiilor, proiectare, etc. sunt necesare studii aprofundate la nivel local. De asemenea, atragem atenția asupra faptului că aceste hărți au fost întocmite doar pentru anumite zone/sectoare (zone cu risc potențial semnificativ la inundații, în accepțiunea Directivei 2007/60/CE), și neacoperirea unei zone din țara noastră nu conduce la concluzia că zona respectivă nu poate fi expusă riscului la inundații. Harta însă nu oferă gradul de precizie necesar proiectării unor construcții, mai ales a celor de tip industrial, drumuri, stații de tratare/epurare etc (Sursa ANAR - <http://www.rowater.ro/>).

(4) Scara indicată de vizualizare/tipărire a hărților de hazard la inundații (în format web) este de 1:25.000.

(5) Se menționează faptul că efectele schimbărilor climatice nu au fost luate în considerare în modelarea și analizele realizate ([Rădulescu et al., 2014](#)).

(6) Procesul de evaluare este unul ciclic, reactualizarea făcându-se la fiecare 6 ani ([Chendeș et al., 2014](#)).

(7) OUG 3/2010 pentru modificarea și completarea Legii Apelor 107/1996 ce transpune integral prevederile Directivei 2007/60/C.E. precizează la Art. 769 (1) faptul că: *Evaluarea preliminară a riscului la inundații este revizuită și, dacă este necesar, actualizată până la data de 22 decembrie 2018 și apoi reactualizată la fiecare 6 ani.*

Având în vedere premisele expuse anterior, putem declara faptul că, îmbunătățirea și completarea hărților de hazard la inundații existente la momentul actual la nivel național este necesară. Astfel, trebuie avut în vedere faptul că metodologiile care apreciază spațial hazardul la inundații pot suferi modificări, actualizări sau chiar noi propuneri, în conformitate cu: standardele științifice emergente, îmbogățirea bazelor de date

hidrometrice (provenite din înregistrările continue ale stațiilor hidrometrice), disponibilitatea datelor de observare a suprafeței Pământului (reprezentate de: imagini satelitare; modele digitale ale terenului LiDAR actualizate sau care descriu noi zone), schimbări semnificative în utilizarea terenului care ar putea influența caracteristicile hidraulice ale curgerii apei, etc. De asemenea, hazardul la inundații necesită a fi reevaluat și după fiecare eveniment major de acest fel.

OBIECTIVELE LUCRĂRII

Având în vedere premisele amintite mai sus, obiectivul principal al prezentei teze de doctorat este reprezentat de identificarea unor noi metodologii de evaluare al hazardului la inundații în cadrul regiunii de N-E a României, utilizând exclusiv date specifice teledetecției (imagini satelitare optice și/sau radar) și îmbunătățirea metodologiilor de modelare hidrologică-hidraulică deja existente în mod oficial la nivel național (considerând condițiile locale de curgere a apei și modelele digitale ale terenului LiDAR cu rezoluție spațială ridicată). Astfel, se vor urmări trei obiective specifice, care vor consta în:

(1) realizarea de hărți de hazard la inundații folosind date și metode specifice teledetecției.

(2) aplicarea la scară locală a unei metode de modelare hidraulică 2D și implicit realizarea de hărți de hazard la inundații considerând atât factorii locali ce guvernează posibilitatea producerii unei inundații cât și particularitățile fizico-geografice detaliate ale terenului (ilustrate de un model digital al terenului – LiDAR cu rezoluția de 0.5 m).

(3) îmbunătățirea și completarea hărților de hazard la inundații oficiale, deja existente, astfel încât acestea să se preteze activităților de promovare a investițiilor și ale proiectării anumitor elemente de infrastructură (ex: stații de epurare ale apelor uzate, anumite structuri rutiere, etc.).

CAPITOLUL 1 – INUNDAȚIILE PROBLEMATICĂ GENERALĂ

1.1. Definirea conceptelor de inundație și viitură (flood and flash flood)

În sensul cel mai general, inundațiile reprezintă fenomene naturale asociate curgerii maxime ce se manifestă prin acoperirea cu apă a unei suprafețe uscate de către apele unui curs de apă sau a unei alte suprafețe acvatice (EXCIMAP, 2007; Prinos et al., 2008; Romanescu, 2018). Acestea pot fi provocate de cauze naturale, antropice sau combinații ale acestora, ca de exemplu: furtuni puternice, precipitații de lungă durată, topirea accelerată a zăpezilor/gheții, spargerea barajelor și a digurilor, ridicarea nivelului apelor freatice și stagnarea lor la suprafața solului, alunecări de teren, marea, tsunami, despăduriri ale versanților, lucrări de regularizare deficitare ale albiilor râurilor, proiectarea necorespunzătoare și neîntreținerea construcțiilor hidrotehnice, accidente tehnologice, managementul defectuos al barajelor, etc. (Merz & Blöschl, 2003; Mandych, 2010; Di Baldassarre, 2012; Grecu, 2016). De-a lungul timpului, luând în considerare suprafața ocupată, durata, cauzele, efectele și modul de manifestare al inundațiilor, mai multe definiții s-au alocat conceptului de inundație (Romanescu, 2009; Hong et al., 2016):

- „Inundația este o curgere relativ mare, care provine din precipitații și provoacă ieșirea apei din albie” (Chow, 1973).
- „Inundația reprezintă corpul de apă care se ridică pe un teritoriu foarte rar submers” (Ward, 1978).
- „Prezența apei în zonele care de obicei nu sunt submerse, care perturbă sau afectează în mod semnificativ activitățile societății umane” (Jonkman & Kelman, 2005).

O clasificare exhaustivă a inundațiilor este greu de realizat datorită complexității variabilelor care trebuie luate în calcul. Cu toate acestea, în funcție de caracteristicile spațiale și temporale (durata), inundațiile pot fi clasificate în trei mari categorii: viituri rapide (flash floods), inundații fluviale (river floods) și inundații litorale (costal floods) (Bronstert, 2003; Jonkman, 2005; Acosta-Coll et al., 2018). În funcție de factorii cauzatori, inundațiile mai pot fi clasificate în: naturale și accidentale. Inundațiile naturale sunt provocate de cauze care nu au legătură cu activitatea umană (precipitații de mare intensitate, topirea zăpezilor și a gheții, tsunami, etc.) pe când cele accidentale reprezintă exact opusul. Lucrări de regularizare deficitare ale albiilor râurilor care pot duce la amplificarea debitelor naturale, limitarea secțiunii de curgere pe anumite tronsoane de râu, alunecarea bruscă a versanților în acumulări antropice sau naturale, avarierea și ruperea

construcțiilor hidrotehnice (în special a barajelor), managementul defectuos al acestora sau eroarea umană sunt câteva dintre factori declanșatori ai inundațiilor accidentale (Sorocovschi, 2002; Romanescu, 2018). De asemenea acestea mai pot fi clasificate și în funcție de magnitudine, intensitate și/sau frecvență (Viglione et al., 2010; Merz et al., 2016; Fischer & Schumann, 2018).

1.2. Problematika inundațiilor la nivel internațional

EM-DAT este una dintre cele mai importante baze de date de tip open source, ce înregistrează dezastrele și caracteristicile acestora la nivel mondial (ex: anul și țara dezastrului, numărul de persoane afectate, numărul de victime, cuantumul pagubelor economice, etc.) (Jonkman et al., 2008; Jonkman & Vrijling, 2008; Tschumi & Zscheischler, 2020). Aceasta funcționează sub egida Centrului de cercetare și epidemiologie a dezastrelor (Centre for Research and Epidemiology of Disasters - CRED) din cadrul Universității Catolice din Louvain și conține informații, cu privire la dezastre ce datează încă din anul 1900 (Barredo et al., 2007; Wirtz et al., 2014).

Statisticile ultimilor ani, remarcă o creștere considerabilă în rândul dezastrelor naturale, în special a celor de natură hidrometeorologică (care grupează dezastrele meteorologice, hidrologice și climatologice), trend observat și în evidența numerică a bazei de date EM-DAT (Banholzer și alții, 2014; Hoeppe, 2016; Raikes et al., 2019). Conform acesteia, în ultimii 50 de ani, dezastrele hidro-meteorologice au cunoscut o creștere de până la 3 ori (între 1970 - 2019) de la o medie de aproximativ 106 evenimente, în perioada 1970 – 1989, la o medie anuală de peste 333 incidente, în intervalul de timp 2000 – 2019 (Thomas și Lopez, 2015; Duan et al., 2016). Aceste cifre sunt cu atât mai grave, cu cât ele reprezintă mai mult de trei sferturi din totalul dezastrelor naturale ce au loc la nivel global. În acest sens, în perioada de timp 1970 – 2019, 79% din dezastrele naturale înregistrate, au fost de natură hidrometeorologică (dintr-un total de 13922 de dezastre naturale înregistrate, 11048 de evenimente au fost pe fond hidrologic, climatologic sau meteorologic).

Dintre totalitatea dezastrelor hidro-meteorologice, majoritatea s-au manifestat sub forma unui dezastru hidrologic și anume sub forma unei inundații. Astfel, dintr-un total de 11048 de dezastre hidrometeorologice, înregistrate în perioada mai sus menționată (1970 - 2019), 4,907 (44.41 %) au fost inundații, fapt ce face ca acest tip de dezastru natural să fie cel mai frecvent din ultimii 50 de ani, având incidența cea mai ridicată la nivel global (Di Baldassarre et al., 2009; Shah et al., 2017; Bloomer et al., 2019; Figueiredo et al., 2020; EM-DAT & UNDRR, 2020). Numărul inundațiilor a cunoscut în această perioadă de

referință (1970 - 2019), un trend ascendent, de la o medie de 27 evenimente catastrofale în decada 1970 – 1980, la o medie de peste 152 în perioada/decada 2009 – 2019. Sfârșitul secolului al XX-lea, a dat startul unei creșteri semnificative a numărului inundațiilor, trend ce a continuat și în perioada de după anul 2000 (Stevens et al., 2016; Kundzewicz et al., 2017; Blöschl et al., 2020).

1.3. Problematica inundațiilor la nivel European și național

Luând în considerare perioada de timp 1985 – 2020 și datele oferite de către Observatorul pentru Inundații de la Dartmouth (Dartmouth Flood Observatory - DFO), dintre țările europene care au avut de suferit din cauza inundațiilor puternice putem enumera: Marea Britanie, Franța, Italia, Spania, România, Grecia și Germania. Dintre acestea, România a fost printre cele mai afectate (Menne & Murray, 2013; Faccini et al., 2015; Kundzewicz et al., 2013; Paprotny et al., 2017; Kundzewicz et al., 2018). La nivelul Europei (conform bazei de date - DFO), în perioada de timp 1985 – 2020 au fost înregistrate un număr de 429 de inundații majore. Aceeași sursă, clasează România pe locul 5 în topul celor mai afectate țări europene, exceptând Federația Rusă și Turcia (cu 39 de inundații majore înregistrate în ultimii 35 de ani) după Marea Britanie, Franța, Italia și Spania care au înregistrat 65, 42, 41 respectiv 40 de astfel de evenimente.

Observatorul pentru Inundații de la Dartmouth (<http://floodobservatory.colorado.edu>), reprezintă o sursă utilă de informații open source cu privire la inundațiile din ultimele decenii. Aceasta face uz de rapoarte de știri cât și de date specifice teledetecției pentru a detecta, măsura și cartografia inundații ce au loc la nivel global. Un număr de arhivă este atribuit oricărei inundații care a cauzat pagube semnificative domeniului agricol, reprezintă un eveniment rar (asociat unei anume probabilități de apariție) sau cauzează victime omenești; în acest sens, inundațiile fiind clasificate în 3 clase majore de severitate: clasa 1 – evenimente de inundații mari, daune semnificative provocate culturilor agricole, decese și o probabilitate de apariție de 10 până la 20 de ani (10% respectiv 5%); clasa 1.5 – evenimente foarte mari, interval de recurență mai mare de 20 de ani, dar nu mai mult de 100 de ani (1%); clasa 2 - evenimente extreme, cu un interval de recurență estimat mai mare de 100 de ani (inundații care se pot produce o dată la 500, 1000 de ani) (Kundzewicz et al., 2018).

Dintre inundațiile ce au avut loc în România, cele mai multe inundații majore s-au produs în cadrul regiunii de N-E, zonă care a fost ținta unei serii devastatoare de inundații, cu impact puternic asupra factorilor economici și sociali (Stoleriu et al., 2020). În ultimii

35 de ani, cele mai mari inundații care au avut loc pe teritoriul țării noastre s-au produs în cadrul bazinului Siret, unde în anul 2005 s-a înregistrat și cel mai mare debit pe un râu interior și anume 4650 m³/s la stația hidrometrică Lungoci (0.5% probabilitate de apariție – cel mai mare debit înregistrat din anul 1955 de când se realizează măsurători ale debitelor la nivel național) și Prut, unde în anul 2008 a fost înregistrată o valoare debit de 7140 m³/s (mai mare decât cea aferentă anului 2005 și râului Siret), la intrarea acestuia pe teritoriul României (în dreptul localității Oroftiana, în amonte de barajul de la Stânca-Costești) (probabilitate de apariție 0.1%) (Romanescu et al., 2011; Romanescu, 2013; Dumitriu, 2020a).

În același timp debite istorice au fost înregistrate și în cadrul bazinelor mici și mijlocii aferente regiunii: Trotuș în anul 2005 (2845 m³/s – stația hidrometrică Vrânceni) (Dumitriu, 2018), Suceava în anul 2008 (1946 m³/s – stația hidrometrică Ițcani) (Romanescu, 2013; Romanescu et al., 2018a), Sucevița în anul 2010 (467 m³/s – stația hidrometrică Sucevița) (Romanescu et al., 2018b), Putna în anul 2005 (1510 m³/s – stația hidrometrică Colacu) (Romanescu & Nistor, 2011), etc. Astfel principalele cursuri de apă din regiunea nord-estică a României au înregistrat într-un interval foarte scurt inundații cu probabilitate de apariție de o dată la 500, 625 sau chiar 1000 ani (Romanescu & Nistor, 2011; Romanescu & Bounegru, 2012; Romanescu & Stoleriu, 2013; Romanescu et al., 2017; Dumitriu, 2018; Enea et al., 2018; Arseni et al., 2020).

Ca și o confirmare a celor menționate, DFO clasează regiunea de N-E a României pe primul loc în ceea ce privește incidența inundațiilor extreme. Dintre cele 39 de inundații consemnate la nivel național în cadrul acestei baze de date (considerând toate cele 8 regiunii de dezvoltare ale României), regiunea de Nord-Est a înregistrat 9 inundații majore, 4 dintre acestea fiind incluse în categoria de severitate 2 (inundații cu probabilitate de apariție mai mare de 100 ani). A doua cea mai afectată a fost regiunea de dezvoltare Sud-Est care a consemnat 8 inundații majore (dintre care 2 de severitate clasa 2). Un aspect important ce necesită menționat este faptul că aceste două regiuni de dezvoltare se suprapun în proporție de 78% cu bazinele hidrografice ale râurilor Siret și Prut (cele mai mari și complexe bazine hidrografice de pe teritoriul României).

Și baza de date EM-DAT oferă o perspectivă amplă asupra inundațiilor majore ce au avut loc la nivelul continentului European, dintre toate țările componente, România fiind una dintre cele mai afectate (Albano et al., 2020). În acest sens, luând în considerare perioada de timp 1985 – 2020, Europa a înregistrat 548 de inundații majore. Dintre acestea (ținând cont de regiunile Europei), cele mai multe au avut loc în Europa de Est (213 ceea

ce reprezintă 38.8% din totalul inundațiilor din Europa). A doua cea mai afectată regiune a Europei este cea sudică unde au avut loc 187 de evenimente negative (34.1%) fiind urmată de Europa de Vest (101 inundații – 18.4%) și de cea de Nord (47 inundații – 8.5%). Referitor la numărul inundațiilor înregistrate la nivel de țară, România se află pe primul loc, cu 47 de evenimente de inundație (exceptând Federația Rusă și Turcia). Aceasta este urmată de Franța (cu 44 de inundații consemnate), Italia (39), Marea Britanie (33), Spania (25), Grecia (24), Bulgaria (22), Germania (17), Bosnia și Herțegovina (16) etc. (Mihai, 2019). În acest sens, pentru a confirma statistica prezentată anterior, numeroase studii care au abordat problematica inundațiilor la nivel mondial și european au semnalat incidența ridicată a acestora în arealul Sud-Estic al Europei, pe teritoriul României, și în special în spațiul Nord-Estic al acesteia (Kundzewicz et al., 2013; Romanescu & Stoleriu, 2017; Costache et al., 2020).

Considerând aceste aspecte cantitative (ce țin de incidența inundațiilor la nivel European), oferite de cele două baze de date luate în considerare (DFO și EM-DAT), România este una dintre cele mai afectate țări de pe întreg continentul European, regiunea de Nord-Est a acesteia fiind caracterizată de o susceptibilitate foarte ridicată la inundații. Aici, inundațiile care s-au produs în ultimii ani au atins cote record sau chiar depășiri ale unor anumite recorduri istorice (în ceea ce privește valorile de debit) (Iosub et al., 2020).

CAPITOLUL 2 – UTILIZAREA TELEDETEȚIEI ȘI A SISTEMELOR INFORMATICE GEOGRAFICE ÎN EVALUAREA HAZARDULUI LA INUNDAȚII

2.1 Noțiuni generale de teledeteție

Cu toate că în literatura de specialitate există numeroase definiții ale teledeteției, este comun acceptat faptul că aceasta se referă la știința de a obține informații despre un obiect, zonă sau fenomen, fără a intra în contact direct cu obiectul, zona sau fenomenul investigat (aceasta fiind cea mai generală definiție utilizată în practică) ([Aggarwal, 2004](#); [Joseph, 2005](#); [Reddy, 2008](#); [Khorram et al., 2016](#)). Într-o accepțiune mai largă, teledeteția se referă la metodele care utilizează energia electromagnetică cum ar fi lumina, căldura sau undele radio, ca mijloace de detectare și măsurare a caracteristicilor unui obiect țintă (ca de exemplu, suprafața Pământului și fenomenele naturale și sau artificiale ce au loc la nivelul acesteia) ([Sabins, 1997](#)). Practic teledeteția constă într-un ansamblu de tehnici și tehnologii care fac uz de spectrul electromagnetic pentru a detecta, înregistra și măsura de la distanță (fără a intra în contact direct), caracteristicile suprafeței Pământului (a fenomenelor naturale și artificiale), a atmosferei acestuia, a altor planete precum și a spațiului interplanetar, implicând activități legate de: (1) perceperea de la distanță a informațiilor de către un senzor; (2) de transformare a acestora în imagini fotografice convenționale (analogice) sau în semnale electrice (imagini digitale); și (3) de transmitere a acestora către memoria unui calculator, în vederea prelucrării, corectării și utilizării acestora în diverse domenii de activitate ([Zegheru & Albotă, 1979](#); [Dong & Chen, 2018](#)).

Teledeteția mai poate fi definită și din perspectiva unui ansamblu al fizicii și ingineriei destinat obținerii de imagini; scopul final al acestui domeniu fiind imaginea de teledeteție care poate fi obținută folosind diverse mijloace tehnice (aparate, sisteme de înregistrare, senzori de teledeteție), care colectează datele de la o distanță care poate varia de la câțiva metri la sute de kilometri ([Mulders, 1987](#); [Mihai, 2008](#)). Teledeteția este practica derivării informațiilor cu privire la suprafața Pământului (al mediului terestru, acvatic și atmosferic) sub forma unor imagini achiziționate dintr-o perspectivă aeriană, folosind radiațiile electromagnetice (din una sau mai multe regiuni ale spectrului electromagnetic) și care sunt reflectate sau emise de suprafața Pământului ([Campbell & Wynne, 2011](#)). Astfel putem spune că, esența teledeteției constă în măsurarea și înregistrarea energiei/radiației electromagnetice reflectate sau emise de obiectul monitorizat (de ex: suprafața Pământului și/sau atmosfera, alte planete etc.), folosind un

senzor (special adaptat pentru fiecare categorie spectrală în parte), situat într-un punct deasupra suprafeței vizate/observate (la o anumită distanță și de obicei montat pe platforme aeriene și/sau satelitare), și transpunerea acestuia în imagini specifice (convenționale) sau în alte forme de înregistrări electromagnetice (White, 1977 citat de Campbell & Wynne, 2011; Barrett & Curtis, 1976 citați de Campbell & Wynne, 2011; Reddy, 2008; Mărgărint, 2010).

2.1.1 Senzori specifici teledetecției și achiziția datelor

Așa cum reiese și din secțiunea precedentă, senzorii de teledetecție sunt elementele tehnice indispensabile teledetecției. Cu ajutorul acestora radiația electromagnetică reflectată sau emisă poate fi măsurată, înregistrată și ulterior (folosind mijloace specifice) transformată în imagini de teledetecție. Cu ajutorul acestora comunitățile științifice pot dezvolta aplicații diverse de monitorizare a Pământului și a fenomenelor naturale și/sau artificiale, în funcție de domeniul de interes. În acest sens, teledetecția oferă informații suport esențiale pentru o serie întreagă de activități științifice printre care și monitorizarea dezastrelor naturale și implicit a inundațiilor (Cracknell & Hayes, 2007). Conform (Toth & Józków, 2016), senzorii de teledetecție reprezintă componenta de bază a oricărui sistem de teledetecție și pot fi clasificați în funcție de mai multe criterii. În acest sens, (Kerle et al., 2004; Gomasca, 2009; Toth & Józków, 2016; Zhu et al., 2017) clasifică senzorii în funcție de sursa radiației electromagnetice detectată de senzori în: senzori pasivi și senzori activi.

Senzori pasivi înregistrează intensitatea energiei electromagnetice reflectată (radianța spectrală) provenită de la Soare sau emisă de Pământ. Aceștia sunt reprezentați de către camere foto, scanere, camere termice și camere video. Cel mai vechi și mai comun tip de senzor pasiv este camera foto (care poate furniza o imagine statică și convențională în intervalul vizibil al spectrului electromagnetic). Senzorii pasivi operaționali la momentul actual acoperă intervale din spectrul electromagnetic de la lungimi de undă mai mici de 1 picometru (specifice razelor gamma) până la lungimi de undă de până la 1 metru (din regiunea microundelor). Cu toate acestea cei mai mulți dintre ei operează și achiziționează date (imagini) în interval spectral 0.3–15 μm , (interval tipic pentru sistemele de teledetecție pasivă), din acest motiv fiind numiți și senzori optici. Din acest motiv, imaginile obținute prin intermediul instrumentelor care operează în intervalul de lungimi de undă menționat se mai numesc și imagini optice. Acestea sunt dobândite în timpul zilei, depinzând de

reflexia luminii solare a obiectelor, iluminate în prealabil, și de absența norilor (condiții meteorologice favorabile) (Musa et al., 2015).

Senzori activi reprezintă acele sisteme de achiziție care emit și detectează ele însele radiații. Măsurătorile efectuate de acești senzori sunt mai controlate și precise, deoarece nu depind de condiții de iluminare și nici de cele meteorologice (Kerle et al., 2004). Radiația emisă inițial de acestea, este retransmisă la senzor cu o anumită intensitate în funcție de caracteristicile structurale ale suprafeței examinate și de lungimea de undă (λ) a energiei incidente (Gomasca, 2009). Sistemele active includ senzori: RADAR (radio detection and ranging), LiDAR (light detection and ranging) și SONAR (sound navigation ranging) care pot fi utilizați atât în altimetrie cât și pentru achiziția de imagini digitale (imagistică).

Senzori RADAR (Radio Detection and Ranging) operează în domeniul microundelor (MW) al spectrului electromagnetic, mai precis în intervalul situat între 1 mm și 1 m (benzile Ka, K, Ku, X, C, S, L, P). Dintre acestea, benzile X, C și L fiind cele mai utilizate (Dana, 2010). Mai departe, aceștia pot fi împărțiți în două mari categorii, în senzori imagistici (en: *imaging radar sensors*) și non-imagistici (en: *non-imaging radar sensors*) care sunt reprezentați de către altimetre și scatterometre. Sistemele radar de imagine, includ mai multe componente: un transmițător, un receptor, o antenă și un sistem de înregistrare (Kerle et al., 2004; Soergel, 2010; Mohan, 2013; Zhu et al., 2017). Cel mai cunoscut senzor radar imagistic este SAR (Synthetic Aperture Radar). În imagistica radar cu deschidere sintetică (SAR), impulsurile de microunde sunt transmise de o antenă către suprafața Pământului (vertical sau orizontal în funcție de polarizare). Dacă impulsurile transmise nu întâmpină nici un obstacol, acestea nu sunt retransmise, în timp ce dacă traiectoria lor întâlnește un obiect, o navă, un munte, o clădire, etc. o mică parte a energiei iradiate revine la antena de transmisie, sub forma a unui ecou (denumit și coeficient de backscatter - împrăștiere) (de asemenea vertical sau orizontal). Receptorul filtrează și amplifică semnalul primit de antenă iar sistemul de înregistrare îl stochează (Kerle et al., 2004; Gomasca, 2009; Campbell & Wynne, 2011). SAR, funcționează pe principiul că obiectele dintr-o scenă (zonă supravegheată), sunt iluminate de radar (senzor) într-un interval de timp, pe măsură ce aeronava (sau platforma care transportă senzorul) se deplasează de-a lungul traseului său de zbor (Campbell & Wynne, 2011). Achiziția de date folosind acest tip de tehnologie este posibilă indiferent de condițiile meteorologice sau alternanța zi-noapte (capabilitate de o importanță critică în procesul de observare a fenomenelor naturale ce au loc la suprafața terestră), în special al inundațiilor (Franceschetti & Lanari, 1999; Berens, 2006; Chan & Koo, 2008).

Principiul de funcționare a sistemelor active LiDAR (Light Detection and Ranging) este asemănător celor RADAR, în sensul în care ambele familii de senzori sunt concepute pentru a transmite energie către o țintă, pe care o detectează apoi sub formă de energie retro difuzată (împrăștiată) pentru a forma o imagine a acesteia (care de obicei este constituită din suprafața Pământului) (Campbell & Wynne, 2011). Cu toate acestea, sistemele LiDAR, folosesc energia electromagnetică din domeniul vizibil și pulsurile laser pentru a sonda mediul înconjurător (aproximativ 300000 de impulsuri pe secundă, în funcție de sistem și design), în scopul cartografierii 3D a acestuia și obținerii modelelor digitale de elevație (a terenului) de înaltă rezoluție sau a modelelor 3D ale obiectelor scanate (Killinger, 2014; Royo & Ballesta-Garcia, 2019). Un sistem LiDAR este compus de obicei din trei componente principale: o unitate de scanare laser, un sistem de poziționare globală (GPS) și o unitate de măsurare inerțială (IMU). Poziția și orientarea instantanee a laserului față de obiectul observat sunt determinate folosind sistemul de poziționare globală (GPS) și sistemul de navigație de inerție (IMU). Poziția 3D a acestuia este dată în mod precis în funcție de unghiul de scanare și stația de bază GPS (terestră) (Wedajo, 2017). Folosind altimetria laser, coordonatele planimetrice (x și y) și altimetrice (y) sunt astfel înregistrate (Werbrouck et al., 2011). Rezultatul scanării este de obicei un set de puncte specific zonei observate denumit și nor de puncte de înaltă rezoluție și care stă la baza derivării unor produse spațiale diverse ca: modele digitale ale terenului, modele digitale ale suprafeței terenului, coronamentul arborilor, diferite tipuri de vegetație, elementele artificiale - construcții, etc (Gigli & Casagli, 2011).

În funcție de tipul de senzor (și implicit de modul de achiziție), datele specifice teledetecției pot fi clasificate în: imagini satelitare optice (achiziționate de către senzori optici), imagini satelitare radar (achiziționate de către senzori RADAR) și nori de puncte 3D (format de date specific senzorilor LiDAR) (Agrawal & Khairnar, 2019). În ceea ce privește formatul acestora, formatul raster este cel mai folosit și comun. Majoritatea furnizorilor de imagini satelitare pun la dispoziția publicului date în format raster. Cu toate acestea, datele achiziționate de către sistemele LiDAR se pot regăsi și în format vector (sau formate special create, ca de exemplu formatul .laz sau .las). Folosind metode specifice, datele LiDAR (regăsite în format special – vector, .laz sau .las) pot fi transformate în fișiere raster folosind mijloace specifice sistemelor informatice geografice (SIG).

2.2 Sistemele informatice geografice – instrumente suport în cadrul procesului de cartografiere a inundațiilor și evaluare al hazardului la inundații

Un sistem informatic geografic (SIG) este un sistem digital (computerizat), special creat pentru achiziționarea, gestionarea, analiza și vizualizarea datelor spațiale (sau cu alte cuvinte date geografice - cu referință spațială pe suprafața Pământului), în scopul planificării, administrării și monitorizării mediului natural și/sau socio-economic. În sens larg, acesta reprezintă un model digital de geografie ([Konecny, 2014](#)). Ca orice alt sistem, un SIG este compus dintr-un set de componente interdependente care îi permit să îndeplinească numeroase sarcini. Astfel, un SIG este format din: hardware, software, date (în diferite formate - vector, raster sau alfanumeric), oameni (analisti) și un set de protocoale organizaționale ([DeMers, 2009](#); [Burrough et al., 2015](#); [Bolstad, 2016](#)).

Dintre toate componentele ce constituie un SIG, datele vor fi întotdeauna cele mai importante, reprezentarea diferitelor caracteristici ale Pământului fiind exclusiv surprinse cu ajutorul acestora ([Tomaszewski, 2015](#)). Aici putem distinge între date spațiale (georeferențiate) care conțin valori poziționale precum coordonate x, y într-un sistem de coordonate geografice și/sau proiectate (cunoscute ca și date geospațiale) și date atribut, asociate celor spațiale și utilizate pentru a descrie proprietățile acestora ([Huisman & de By, 2009](#); [Bolstad, 2016](#)).

2.2.1 Exemple de soluții software SIG ce pot fi utilizate în evaluarea hazardului la inundații

Soluțiile software SIG oferă instrumentele de gestionare, manipulare, analiză, afișare și diseminare a informațiilor spațiale. La nivel mondial există numeroase softuri care furnizează asemenea capacități specifice. Acestea se clasifică în funcție de capacități, disponibilitate (liberă sau proprietară), scop și/sau destinație ([Longley et al., 2005](#); [Eldrandaly & Naguib, 2013](#)). Printre cele mai importante menționăm ([Bunting et al., 2014](#); [Bolstad, 2016](#)):

- ArcGIS - ArcGIS este o linie de produse software SIG, comerciale, dezvoltate de către ESRI. Acestea oferă capacități multiple în ceea ce privește analizele bazate oferind un suport esențial domeniului geostiintelor și al aplicațiilor asociate ([Longley et al., 2005](#); [Maguire, 2008](#); [Law & Collins, 2015](#)).
- QGIS – QGIS spre deosebire de ArcGIS pentru Desktop este un SIG, gratuit, cu sursă liberă (en: *open source*), care rulează pe toate sistemele de operare majore. QGIS este folosit pentru a vizualiza, edita și analiza date geospațiale ([Westra, 2014](#);

Menke et al., 2015). Programul are capacitatea de a opera atât cu date în format vector cât și raster, datorită încorporării librăriilor GDAL și OGR (<https://www.osgeo.org/projects/gdal/>). În plus, grație integrării sale cu GRASS - Geographic Resources Analysis Support System (<https://grass.osgeo.org/>), întregul potențial al procesării și analizei imaginilor digitale satelitare poate fi explorat în interfața QGIS (Neteler & Mitasova 2008; Neteler et al., 2008; Halbey-Martin, 2008).

- ENVI - ENVI (The Environment for Visualizing Images), este un produs software comercial, folosit de profesioniștii SIG, de oameni de știință și de analiștii pentru a prelucra, analiza și a extrage informații semnificative din imagini satelitare optice sau radar (<https://www.esri.ro/envi>).
- SNAP - este o platformă SIG lansată de Agenția Spațială Europeană (ESA) ca un instrument gratuit și open-source, în vederea sprijiniri exploatarei în principal al imaginilor satelitare specifice misiunilor ESA (ERS, ENVISAT, Sentinel -1, -2 și -3) (Filipponi, 2019; Grivei et al., 2020; Hütt et al., 2020)
- HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) este o aplicație de modelare hidraulică care face uz de date specifice SIG pentru a realiza modele 1D sau 2D de curgerea a apei râurilor și/sau a altor corpuri de apă (Brunner & CEIWR-HEC, 2016). HEC-RAS este cel mai utilizat instrument în cadrul studiilor ce privesc modelarea și evaluarea hazardului la inundații (Huțanu et al., 2020).

CAPITOLUL 3 – CONSIDERAȚII TEORETICE/CONCEPTUALE PRIVIND PROCESUL DE EVALUARE A HAZARDULUI LA INUNDAȚII

Studiul hazardurilor și al riscurilor naturale și antropice își dezvoltă cu rapiditate propriul său vocabular tehnic ca parte a eforturilor de a stabili domeniul ca o profesie și disciplină academică distinctă (Kelman, 2018; Staupe-Delgado, 2019). În vederea reducerii efectelor dezastrelor naturale și antropice este nevoie de teorie pentru a da un sens evenimentelor aparent haotice (Alexander, 2013). În ultimii ani, pe fondul intensificării frecvenței fenomenelor naturale cu consecințe grave dar și datorită direcțiilor dezordonate și imprevizibile de dezvoltare ale societății moderne actuale, la care se adaugă și creșterea temperaturii medii globale, studiul hazardelor și al riscurilor naturale a devenit o prioritate la nivel mondial acesta fiind ridicat până la gradul de știință, treptat fiind introdus și ca obiect de studiu în instituțiile de învățământ (Grecu, 2016; Sorocovschi, 2016).

În acest sens, pentru a facilita comunicarea dintre actori direct interesați de acest aspect (practicieni, cercetători, reprezentanți ai instituțiilor responsabile cu reducerea și managementul riscurilor naturale, etc.), o nouă terminologie specifică a fost adoptată la nivel internațional. Astfel, termeni ca risc, hazard, vulnerabilitate, expunere, reziliență, senzitivitate, dezastru și concepte conexe ale acestora cum ar fi managementul riscurilor naturale (ce privește identificarea, analiza, evaluarea și gestionarea riscurilor) s-au impus în problematica globală a cercetării științifice (Stângă, 2007; Grecu, 2016; Romanescu, 2018).

3.1 Riscul la inundații

Riscul este o măsură a probabilității unor efecte adverse, rezultate din expunerea și vulnerabilitatea societății umane la un anumit hazard (caracterizat de o magnitudine, locație geografică și durată) (Smith, 2004; Hufschmidt et al., 2005). Astfel riscul constă în apariția unei stări de realitate nedorită ca rezultat a unor evenimente naturale și/sau a activității umane (Renn, 1992). Concret, riscul asociază două elemente distincte: pe deoparte hazardul, pe de altă parte elementele receptoare ale efectelor distructive specifice acestuia (elemente caracterizate la rândul lor de o anumită expunere și vulnerabilitate) (Stângă, 2007; Alfieri et al., 2015; Grozavu & Mihai, 2018; Disse et al., 2020). Astfel, în cea mai simplă formă a sa, riscul este văzut ca produsul dintre hazard, expunere și vulnerabilitate ($Risc = Hazard \times Expunere \times Vulnerabilitate$), al cărui rezultat este exprimat întotdeauna în pierderi așteptate (consecințe) (Figura 1) (Kron, 2002, 2005; Jonkman,

2007; Barredo et al., 2007; Bründl et al., 2009; Luger et al., 2010). În funcție de valorile de intrare, consecințele pot varia de la pozitive la negative (Hopkin, 2018).

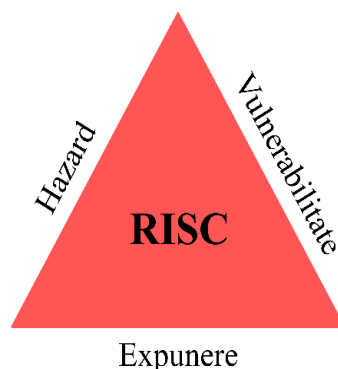


Figura 1 Triunghiul riscului al lui Crichton (prelucrare după Crichton, 2008).

Riscul la inundații este definit ca o funcție a hazardului (probabilitatea de apariție a unei inundații de o anumită magnitudine), a expunerii (populația și valoarea activelor supuse inundației) și a vulnerabilității (capacitatea unei societăți de a face față evenimentului de inundație) (Klijn et al., 2008; Bradford et al., 2012; Koks et al., 2015; UNISDR, 2017; Rey et al., 2020). Conform Directivei 2007/60/CE acesta „înseamnă combinația dintre probabilitatea apariției unor inundații și efectele potențial adverse pentru sănătatea umană, mediu, patrimoniul cultural și activitatea economică asociate apariției unei inundații”.

În acest sens, pentru a determina riscul la inundații trebuie să cuantificăm elemente definitorii ale acestuia: hazardul, expunerea și vulnerabilitatea (Kaźmierczak & Cavan, 2011). Printre acestea, identificarea și estimarea zonelor potențial inundabile și implicit a hazardului la inundații reprezintă primul și cel mai important pas în estimarea și gestionarea eficientă a acestuia (Alfieri et al., 2015; Cameron et al., 2017; Erena et al. 2018).

3.1.1 Componentele riscului la inundații

3.1.1.1 Hazardul la inundații

Terminologia UNISDR cu privire la reducerea riscurilor la dezastre, oferă o serie de clarificări al acestui concept, un hazard natural fiind considerat „un proces/fenomen natural extrem care ar putea cauza pierderi de vieți omenești, prejudicii sau alte efecte negative asupra sănătății populației, pagube materiale, perturbări ale bunăstării aspectelor sociale și economice sau daune asupra mediului înconjurător” (UNISDR, 2009). Prin hazarduri naturale ne referim la acele „evenimente și/sau fenomene fizice cu

potențial dăunător, care pot provoca vătămări și pierderi de vieți omenești, daune sociale și economice sau degradarea mediului înconjurător” (Ismail-Zadeh et al., 2017). În general, hazardurile sunt percepute ca o sursă potențială de pericol, majoritatea definițiilor redactate de-a lungul timpului de diverși autori concentrându-se pe acest aspect (Sorocovschi, 2016):

Hazardul (principala componentă a riscului), presupune astfel, *„posibilitatea de producere unui eveniment cu potențial devastator, într-o anumită perioadă și pe un anumit areal”*, care poate provoca *„o schimbare, rapidă a unei stări sau condiție stabile”*, de echilibru natural (Scheidegger, 1994; Armaș, 2006; Renaud et al., 2010; Sorocovschi, 2016; Ali et al., 2016). Caracteristica principală a acestuia este reprezentată de starea de pericol (cu potențialitate distructivă mare), care planează asupra unui anumit areal și nu manifestarea evenimentului în sine (Degg, 1992; Armaș, 2006; Kanti Paul, 2011; Grozavu & Mihai, 2018).

3.1.1.2 Vulnerabilitatea la inundații

Termenul de vulnerabilitate provine din latinescul *vulnero*, *vulnare* care înseamnă *a răni*. În contextul studierii riscurilor naturale și antropice, vulnerabilitatea (a doua componentă a riscului) se referă la *„caracteristicile și circumstanțele unei comunități, sistem sau bun material care fac aceste elemente susceptibile de a fi rănite sau atacate de consecințele negative ale unui hazard” (Romanescu, 2009; UNISDR, 2009; Licurici, 2013; Birkmann et al., 2014; Sorocovschi, 2016). „Vulnerabilitatea reprezintă un concept esențial în analiza riscurilor naturale, reprezentând un atribut al elementelor susceptibile de a fi afectate de un anumit hazard” (Stângă, 2007). Dictionarul IDNDR, 1992, definește vulnerabilitatea ca fiind „gradul de pierderi (de la 0 la 100%) rezultate dintr-un fenomen (hazard) cu potențial distructiv”. Conform Biroului Națiunilor Unite pentru Reducerea Riscului de Dezastre (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (UNDRR, 2016), vulnerabilitatea este definită de „condițiile determinate de factori sau procesele fizice, sociale, economice și de mediu care cresc sensibilitatea unei persoane, a unei comunități, a unor active/bunuri sau sisteme la impactul unui hazard”.*

3.1.1.3 Expunerea la inundații

Conform UNDRR, (2016), expunerea (a treia componentă a riscului) este reprezentată de *„situația persoanelor, a infrastructurilor, a locuințelor, a capacităților de producție precum și a altor bunuri localizate în areale predispuse hazardurilor”*. Agard

and Schipper (2014) citați de Kron et al. (2019a), definesc expunerea ca și „prezența oamenilor, a mijloacelor de trai, a speciilor sau a ecosistemelor, a funcțiilor de mediu, a serviciilor și resurselor, a infrastructuri sau a bunurilor economice, sociale și culturale în locuri și cadre care ar putea fi afectate într-un mod negativ”. Prin urmare, expunerea poate fi evaluată pe baza unui inventar a tuturor elementelor situate într-o zonă în care anumite hazarde sau efecte adverse asociate schimbărilor climatice pot să apară (Allan et al., 2018). Expunerea implică suprapunerea sistemelor socio-economice cu factori favorabili hazardului, fiind practic o condiție prealabilă pentru risc și dezastru (Grozu & Mihai, 2018). Cu alte cuvinte, aceasta reprezintă capitalul, oamenii și activele ecologice expuse hazardului (exprimate de obicei prin statistici privind populația și datele socio-economice) (Feyen et al., 2012).

3.2 Managementul riscului la inundații

Conform UNISDR (2009), managementul riscului de dezastru reprezintă „procesul sistematic de utilizare a directivelor administrative, organizațiilor, abilităților operaționale și resurselor pentru implementarea strategiilor, politicilor pentru îmbunătățirea capacității de redresare în scopul de a diminua efectele negative ale hazardelor și posibilitatea producerii unui dezastru”. Acest termen este o extensie a termenului mai general de „management al riscului”, fiind folosit în problematica riscurilor specifice dezastrelor naturale. Managementul riscului de dezastru are „scopul de a evita, reduce sau transfera efectele adverse ale hazardelor prin activități și măsuri de prevenire, reducere și pregătire” (UNISDR, 2009). În ultimele decenii (în special după anul 1990, odată cu declararea Deceniului Internațional pentru Reducerea Efectelor și Dezastrelor Naturale), am asistat la o schimbare în ceea ce privește abordarea protecției împotriva dezastrelor naturale, de la măsuri de protecție fizice - tradiționale (structurale), la măsuri de prevenire (nestructurale) ce țin de managementul integrat al riscurilor și constau în aspecte ca: predicție, previziune, prevenire și diminuare a riscurilor (Schanze, 2006; Dottori et al., 2018; Merz et al., 2010a; Disse et al., 2020).

Schimbarea a constat de asemenea și într-o abordare care s-a concentrat în principal pe vulnerabilitatea comunităților umane și pe evitarea și reducerea riscului înaintea de apariția dezastrului (planning pre-dezastru), promovând și favorizând aspecte ca: conștientizarea riscurilor, conștientizarea vulnerabilității, angajamentul public, comunicare, parteneriate și schimburi de cunoștințe între actori publici și privați, sisteme de avertizare, elaborarea și implementarea strategiilor de reducere a riscurilor, politici de planificare și

gestionare a teritoriului, etc. (UNISDR, 2005; Sperling & Szekely 2005; Coetzee & Van Niekerk, 2012; van Westen, 2013). În consecință, s-a trecut de la strategiile de management al riscurilor sectoriale (dedicate unui anumit tip de risc) și concentrate în principal pe răspuns, reconstrucție și recuperare, la cele holistice (mult mai integrate) care prevăd o serie de acțiuni desfășurate pe etape (antecriză, criză, postcriză) și care se referă la prevenire, stabilirea contextului, identificarea hazardului, evaluarea vulnerabilității, analiza, evaluarea și ierarhizarea riscului, comunicarea riscului, acceptarea riscului, monitorizarea și revizuirea riscului, alerte și sisteme de avertizare, diagnosticul riscurilor, stabilirea priorităților, răspuns la risc, dezvoltarea unui cult al riscului, etc. (Thywissen, 2006; Schanze, 2006; Gavrilesu, 2008; Joyce et al., 2009; Merz et al., 2010a; van Westen, 2013; Salit et al., 2013; Sorocovschi, 2016; Romanescu, 2018).

Chiar dacă o eliminare completă a efectelor negative asociate unui hazard (ex: inundație) este nerealizabilă (Schanze, 2006; Stanganelli, 2008; Di Baldassarre et al., 2009; Vojtek & Vojteková, 2016), managementul riscului de dezastru își propune să reducă sau să evite potențialele pierderi cauzate de acesta (prin măsuri de prevenire), să asigure asistență promptă și adecvată victimelor dezastrului (în timpul desfășurării crizei) și să obțină o recuperare rapidă și eficientă (în perioada imediat următoare postcrizei) (Romanescu, 2009; Sorocovschi, 2016; Romanescu, 2018). Acțiuni corespunzătoare în toate etapele (ce corespund perioadei dinaintea producerii dezastrului, din timpul și de după desfășurarea acestuia), pot duce la: o pregătire mai conștiincioasă, avertizări mai bune, o vulnerabilitate mai redusă, o reziliență mai crescută sau chiar la prevenirea dezastrului și a consecințelor negative asociate (Khan & Khan, 2008). Scopul acestor activități este de a oferi un anumit nivel de siguranță, atingerea acestuia bazându-se pe două elemente esențiale: analiza riscului (cu analiza factorilor de risc, analiza pericolității sau a hazardului, analiza expunerii, analiza vulnerabilității) și evaluarea riscului (pe baza cărora se vor adopta cele mai adecvate politici și măsuri pentru reducerea dezastrului) (Ologunorisa & Abawua, 2005; Schanze, 2006; Lin Moe & Pathranarakul, 2006; van Westen, 2013; Sayers et al., 2013; Sorocovschi, 2016).

Analiza riscului la inundații utilizează totalitatea informațiilor disponibile pentru a estima riscul la care se expune populația, proprietățile sau mediul înconjurător, cuantificând consecințele manifestării unei inundații prin dezvoltarea scenariilor accidentale și calculul frecvenței de manifestare a acestor scenarii (van Westen, 2013). Analiza riscului estimează posibilitățile și consecințele așteptate în cazul manifestării unei inundații extreme. Consecințele pot varia în funcție de magnitudinea evenimentului și de

gradul de vulnerabilitatea a elementelor expuse (Sorocovschi, 2016). Se bazează pe metodele științifice ce țin de: identificarea hazardului, evaluarea hazardului, analiza expunerii, analiza vulnerabilității și estimarea riscului (Penning-Rowsell et al., 2005; Vorogushyn et al., 2010; Foudi & Osés-Eraso, 2014; Bubeck et al., 2016; Röthlisberger et al., 2018). Printre acestea, evaluarea hazardului la inundații reprezintă primul pas în determinarea și gestionarea eficientă a riscului la inundații (Erena et al. 2018). Scopul evaluării hazardului la inundații este de a înțelege probabilitatea ca o viitură și/sau inundație, de o anumită intensitate, să se producă într-o anumită perioadă de timp. Evaluarea hazardului își propune să estimeze această probabilitate pe perioade de ani, până la zeci sau sute de ani, pentru a sprijini activitățile de management al riscurilor asociate (IBRD/World Bank, 2016; Dalezios, 2017).

3.2.1 Evaluarea hazardului la inundații – componentă principală a analizei și managementului riscului la inundații

Cunoașterea hazardului la inundații (prezicerea inundațiilor) care ar putea să se manifeste într-o oarecare regiune a lumii constituie o primă etapă esențială în realizarea managementului riscurilor determinate de aceste dezastre. Dintre toate particularitățile procesului de analiză a riscului la inundații, determinarea și evaluarea hazardului primește cea mai mare atenție (Kvočka et al., 2016). Acest aspect reprezintă primul și cel mai important pas în realizarea managementului eficient al riscului la inundații, stând la baza tuturor măsurilor preventive care au drept scop diminuarea riscurilor (Fuentes-Andino, 2012; Samela et al., 2018; Liu et al., 2019). Evaluarea hazardului la inundații include capacitatea de a modela și estima parametrii care definesc o inundație (folosind metode specifice de evaluare/determinare) și are drept scop delimitarea spațială a suprafețelor inundate, în raport cu diferite frecvențe (probabilități) și magnitudini ale acestuia, oferind totodată informații esențiale cu privire la anumite caracteristici particulare (adâncimea apei, direcția acesteia sau viteza de propagare) (Alkema & Middelkoop, 2005; EXCIMAP, 2007; van Westen, 2013; Banks et al., 2013; Foudi et al., 2015; IBRD/World Bank, 2016; Sy et al., 2018; Moftakhari et al., 2019).

Informațiile spațiale obținute în urma acestui proces poartă numele de hărți de hazard la inundații iar în ultimii ani, acestea au reprezentat o componentă majoră în încercările de atenuare a efectelor negative asociate inundațiilor, scopul lor fiind acela de a oferi informații cu privire la pericolul la care se expun anumite comunități umane (ex: pe baza acestora putându-se determina vulnerabilitatea comunităților în fața inundațiilor)

(Giustarini et al., 2015; Kvočka et al., 2016; Gigović et al., 2017; Abdelkarim et al., 2020). Hărțile de hazard la inundații oferă o privire de ansamblu asupra zonelor predispuse la inundații prin delimitarea spațială, fie a unei inundații istorice, care a avut loc în trecut și a fost reconstituită utilizând metode istorice, hidrogeomorfologice sau date satelitare și care a fost neapărat corelată cu o anumită probabilitate de depășire și magnitudine (obținută prin analiza statistică a valorilor istorice de debit) (Huang et al., 2014; Giustarini et al., 2015; Brakenridge, 2018), fie a inundațiilor ipotetice (modelate) specifice unor debite cu diferite probabilități de depășire (obținute de obicei prin metode statistice, hidrologice și/sau hidraulice), acest aspect favorizând în special gestionarea adecvată a viitoarelor evenimente extreme de acest fel (Handmer, 1980; EXCIMAP, 2007; Asare-Kyei et al., 2015). Acestea mai pot ilustra adâncimea și viteza apei (variabile obținute, de obicei, prin modelare hidraulică). Cartografierea și modelarea hazardului la inundații sunt astfel componente vitale în cadrul procesului de management al riscului la inundații, acest tip de hărți acționând ca un instrument suport pentru o serie întreagă de activități menite să reducă la minimum riscul la inundații (Aryal et al., 2020).

3.2.2 Metode de evaluare a hazardului la inundații

Scopul evaluării hazardului la inundații este de a înțelege probabilitatea ca o inundație de o anumită intensitate să apară într-un anumit areal și într-o anumită perioadă de timp (Wright, 2016). Evaluarea sau determinarea hazardului la inundații este realizată folosind o serie de tehnici și proceduri combinate și complementare care, în linii mari, pot fi grupate în trei abordări metodologice: metode istorice, metode geologice - geomorfologice și metode hidrologice - hidraulice (Diez-Herrero et al., 2009; Huong & Nagasawa, 2014; Bourenane et al., 2019).

3.2.2.1 Metodele hidrologice-hidraulice

Prevenirea începe prin previziunea hazardului și necesită culegerea și interpretarea observațiilor din teren (Sorocovschi, 2016). În general, în evaluarea hazardului la inundații, se folosesc metode hidrologice și date statistice, observate cronologic în teren la stațiile hidrometrice, iar existența unor măsurători exacte și de lungă durată este obligatorie. Este important să interpretăm înregistrările anterioare, (specifice unor inundații istorice), pentru a evalua posibilitățile viitoare ale unor astfel de evenimente. Pentru a identifica probabilitatea de apariție a unei inundații majore sau perioada de revenire a acesteia, (împreună cu valoarea cantitativă a debitelor specifice fiecărei probabilități), pe un anumit

sector de râu, un studiu amănunțit asupra datelor furnizate de stațiile hidrometrice (la care se poate adăuga și teoria probabilităților) este necesar ([Directiva 2007/60/CE](#)). Întrucât la baza măsurilor preventive stau de obicei hărțile de hazard la inundații ([Sorocovschi, 2016](#)), odată cu stabilirea debitelor și a perioadelor de revenire, transpunerea acestora în niveluri ale apei și ulterior în hărți de hazard este o practică obligatorie, acest lucru putându-se realiza folosind modele hidrodinamice (1D, 2D sau 3D), specifice metodelor hidraulice de simulare a curgerii apei ([de Moel et al., 2009](#); [Samela et al., 2018](#)).

3.2.2.2 Metodele geologice-geomorfologice

Metodele geologice-geomorfologice utilizează caracteristicile specifice terenului (detaliile topografice), a microformelor de relief existente și depunerile de sedimente generate în timpul și/sau după o inundație (identificând modificări morfologice asociate proceselor de eroziune și depunere prin studii și observații sedimentologice), pentru a delimita spațial zonele geomorfologice active, (din cadrul albiei minore și majore) și implicit a zonelor de risc asociate cu diverse intervale de inundații – anuale, frecvențe sau excepționale. Aceste metode se bazează pe un principiu simplu: limita zonei inundabile aferente unui râu (a albiei - din prezent) corespunde cu limitele observabile în teren a tuturor inundațiilor din trecut ([Lastra et al., 2008](#); [Díez-Herrero, 2009](#); [Spaliviero et al., 2014](#); [Tavares da Costa et al., 2019](#); [Bourenane et al., 2019](#)).

3.2.2.3 Metodele istorice

Metodele istorice se bazează pe observații umane indirecte, non instrumentale, documentații cu caracter istoric (manuscrite din arhive, diverse documente tipărite, ziare, cărți, imagini vechi), marcaje și plăci pe elemente naturale și artificiale (însemne pe clădiri, pe poduri, pe copaci, roci) și mărturii (orale sau audiovizuale) pentru a reconstitui extinderea spațială și adâncimea apei specifice unei inundații dintr-o anumită perioadă din trecut ([Glaser & Stangl, 2003](#); [Brázdil et al., 2006](#); [Díez-Herrero et al., 2009](#); [Benito et al., 2015a](#); [Luu et al., 2018](#)). Analiza datelor hidrologice istorice reprezintă un aspect foarte important în evaluarea hazardului la inundații. Utilizate împreună cu metode hidrologice, instrumente statistice și de modelare, acestea ajută la estimarea probabilității de apariție a unui inundații ipotetice, cu anumite caracteristici (debite cu diferite probabilități de depășire) și a perioadei de revenire a acesteia (timpul înregistrat între apariția unui anumit eveniment de inundație și următorul eveniment de aceeași mărime) ([Foudi et al., 2015](#)). În ultimii ani, pe fondul îmbogățirii fondului de date digitale din arhivele programelor

satelitare de monitorizare a suprafeței Pământului (de exemplu, programul american Landsat furnizează date continue de observare a suprafeței Pământului încă din 1972, având mai mult de 40 de ani de activitate), un nou tip de date ce constau în imagini satelitare, au intrat sub incidența metodelor istorice de analiză și observare a fenomenului inundațiilor. Acestea au fost aplicate cu succes în numeroase studii cu privire la cartografierea inundațiilor istorice și obținerea delimitări spațiale a acestora (Romanescu et al., 2017; Olthof, 2017), sau în cadrul validării prin comparație a modelelor hidrodinamice de simulare a inundațiilor (Salunkhe et al., 2018; Mihu-Pintilie et al., 2019). Chiar dacă acest tip de date cad sub influența metodelor istorice (datorită existenței unor observații ce se întind pe o perioadă lungă de timp), acestea oferă informații directe instrumentale și georeferențiate asupra inundațiilor care au avut loc într-un trecut mai apropiat sau mai îndepărtat (Schumann, 2015; Schumann & Moller, 2015).

3.2.2.4 Metode de evaluare a hazardului la inundații specifice teledetecției

Datele specifice teledetecției (active sau pasive, optice sau radar - ce constau în principal în imagini satelitare), furnizează diverse informații utile cu privire la fenomenele naturale ce au loc la suprafața terestră și astfel pot fi utilizate pentru: cartografierea evenimentelor istorice și a fazelor secvențiale de inundare (incluzând detalii despre durata și direcția de curgere a undei de viitură, etc.) (Romanescu et al., 2017) și pentru realizarea hărților de hazard la inundații (Islam & Sado, 2000; Huang et al., 2014; Giustarini et al., 2015; Brakenridge, 2018). Cartografierea inundațiilor folosind date spațiale a devenit o practică populară datorită sporirii capacităților tehnologice a senzorilor atașați platformelor satelitare și a îmbunătățirii rezoluției temporale (a frecvenței de achiziție a imaginilor) a acestora (Dash & Sar, 2020). Datele specifice teledetecției pot caracteriza suprafața Pământului atât cantitativ cât și calitativ. Cu ajutorul acestora, o varietate de informații geografice cu privire la starea și fenomenele ce au loc la suprafața Pământului pot fi extrase (Mărgărint, 2010; Abburi & Golla, 2015). În acest sens, obținerea informațiilor cu privire la suprafețele acvatice și implicit a zonelor inundate este posibilă. Extragerea zonelor inundate poate fi realizată folosind imagini optice multispectrale și/sau imagini radar (SAR). Pentru a extrage informațiile necesare din imaginile satelitare și implicit pentru a cartografia inundațiile reprezentate de acestea, mai multe metode specifice teledetecției sunt disponibile. În cazul imaginilor satelitare optice, cele mai multe metode de extragere a suprafețelor acvatice au fost dezvoltate pe baza principiului conform căruia reflectanța suprafețelor acvatice este evident mult mai scăzută în canalele infraroșii ale

spectrului electromagnetic (comparativ cu alte tipuri de acoperire al terenului) (Huang et al., 2018). În acest sens, printre cele mai importante metode de cartografiere a inundațiilor (folosind imagini satelitare optice) și care se bazează pe principiul menționat anterior enumerăm: interpretarea vizuală a imaginilor satelitare și extragerea informațiilor manual (prin digitizare) (Notti et al., 2018; Goffi et al., 2020), clasificări nesupervizate și supervizate, manipularea histogramelor diferitelor benzi spectrale (bazându-ne pe cunoașterea proprietăților spectrale ale apei în comparație cu alte tipuri de acoperire a terenului și pe interpretarea vizuală) precum și metoda indicilor spectrali (NDWI, MNDWI, NWI) (Haibo et al., 2011; Du et al., 2016; Huang et al., 2018; Chen et al., 2018).

Și în cazul imaginilor satelitare radar există anumite metode specifice de extragere a informațiilor cu privire la suprafețele acvatice – inundate (bazate în principal pe valorile scăzute ale coeficientului de backscatter – împrăștiere caracteristic acestora). Dintre acestea, manipularea histogramei unei imagini radar și implicit a coeficientului de backscatter – împrăștiere este cea mai utilizată (Behnamian et al., 2017; Chini et al., 2019; Wan et al., 2019). În acest sens, numeroase cercetări au folosit semnalul de revenire (sau cu alte cuvinte al coeficientului de împrăștiere - backscatter) scăzut, specific corpurilor de apă și metoda pragurilor și al manipulării histogramei unei imaginii satelitare radar pentru a delimita pixeli acoperiți cu apă de cei asociați suprafețelor uscate și astfel pentru a cartografia corpuri de apă și/sau zone inundate (Martinis et al., 2009; Giustarini et al., 2013; Rahman & Thakurb, 2018; Markert et al., 2018; Carreño Conde & De Mata Muñoz, 2019; Liang & Liu, 2020; Zhang et al., 2020). Printre alte metode de extragere a informațiilor folosind imagini radar enumerăm: clasificări nesupervizate și supervizate, segmentarea imaginii (gruparea pixelilor omogeni în patch-uri, și furnizarea informațiilor la nivel de obiect), detectarea modificărilor (*change detection*), realizată prin compararea imaginilor satelitare radar înainte și după un eveniment de inundație pentru a detecta modificări de intensitate în pixeli (cauzate de inundație), interpretarea/inspecția vizuală a imaginilor și extragerea corpurilor de apă și/sau inundate prin digitizare manuală (Bioresita et al., 2018; Shen & Anagnostou, 2019).

3.2.2.5 Metode specifice SIG care pot contribui în cadrul procesului de evaluare a hazardului la inundații.

Prin diverse metode specifice soluțiilor software SIG, se poate realiza obținerea, interogarea, analiza spațială, suprapunerea, transformarea, modelarea, etc., ale datelor spațiale și non spațiale, în vederea oferirii unei soluții, unei probleme identificate în

prealabil în teren (în cazul de față problema fiind posibilitatea inundaării unui areal de către apele unui corp de apă) (Wang, 2006). Un răspuns inteligent în acest caz, ce poate fi oferit de către un SIG (utilizând metode proprii), constă în delimitarea spațială a unei posibile inundații (având în vedere anumite condiții, parametri și factori cauzatori). Printre principalele metode SIG care pot contribui la realizarea acestui lucru enumerăm: metoda digitizării (a vectorizării), metoda geostatistică de interpolare a datelor, metoda suprapunerii datelor, metoda cartografiei digitale etc.

3.2.3 Criterii de evaluare a hazardului la inundații

3.2.3.1 Metodologia elvețiană de evaluare a hazardului

În cadrul acestei metodologii, hazardul este clasificat într-un număr predefinit de clase de pericol. Zonele de pericol sunt agregate pe baza probabilității de inundație și a intensității potențiale a inundațiilor prin intermediul unei matrici intensitate-probabilitate. Trei niveluri calitative ale magnitudinii sunt luate în considerare (ridicat, mediu și scăzut) iar în ceea ce privește probabilitatea sunt utilizate patru posibilități ale acesteia (ridică, medie, scăzută și foarte scăzută), posibilități ce corespund perioadelor de revenire ale unui eveniment de inundație de 1 – 30, 30 – 100, 100 – 300 și > 300 ani (Dransch et al., 2005; Loat, 2010). Magnitudinea unui inundații este determinată pentru fiecare probabilitate în parte, în funcție de adâncimea apei de inundație și de viteza de curgere a acesteia, traducerea efectelor potențiale asupra oamenilor și clădirilor rezultând astfel din pragurile de intensitate/magnitudine (Loat & Petrascheck, 2008; Kappes et al., 2012; Milanesi et al., 2014).

3.2.3.2 Metodologia propusă de Ministerul Infrastructurii Terestre și a Transporturilor din Japonia (MLIT).

Conform acestei metodologii, cinci categorii de hazard sunt propuse luând în considerare adâncimea apei inundației (indiferent de probabilitatea de apariție a acesteia). Acest aspect trebuie neapărat inclus în hărțile de hazard la inundații (datorită zonelor care necesită o atenție specială cum ar fi o rată de creștere rapidă a nivelului apei asociată inundației). Includerea acestei informații este foarte importantă întrucât ajută rezidenții să evacueze o anumită zonă (caracterizată de un anumit hazard) într-un mod adecvat și la momentul oportun (MLIT, 2005; Santillan et al., 2016). Criteriul japonez împarte adâncimea apelor inundațiilor în diferite clase, luând în considerare înălțimea medie a persoanelor de vârste diferite și de asemenea diferite alternative de răspuns la crizele

produse de inundații (concentrându-se pe posibilitățile de evacuare a persoanelor din zonele afectate) (Quiroga Gomez et al., 2018).

3.2.4 Hărțile de hazard la inundații în contextul comunitar și național

La nivel național, odată cu aderarea României la Uniunea Europeană, directivele Parlamentului și Consiliului European au devenit obligatorii. Astfel Administrației Naționale Apele Române (ANAR, www.rowater.ro) i s-a încredințat implementarea Directivei 2007/60/CE privind evaluarea și gestionarea riscurilor la inundații. Aceasta a avut ca scop principal elaborarea hărților de hazard și a hărților de risc la inundații la nivel național (<https://apele-romane.ro/ro/page/harti-de-hazard-si-risc>). În cadrul acestui program, finalizat în anul 2014, au fost analizați aproximativ 33.500 km lungimi de cursuri de apă cu o suprafață aferentă de cca 89.826 km², hărțile de hazard la inundații indicând suprafața geografică care ar putea fi inundată în cazul celor trei scenarii impuse de către Directiva Inundații: (i) inundații cu probabilitate mică sau în cazuri extreme (cu probabilitate de apariție o dată la 1000 ani), (ii) inundații cu probabilitate medie (perioada probabilă de revenire ≥ 100 ani) și (iii) inundații cu probabilitate mare, după caz (cu probabilitate de producere o dată la 10 ani) (Rădulescu et al., 2014). Clasele de hazard la inundații au fost stabilite pentru fiecare probabilitate de apariție în parte (10 ani – 10%; 100 ani – 1%; 1000 ani – 0.1%), în funcție de efectele adâncimii apelor provenite din inundații asupra elementelor expuse. În acest fel au fost stabilite 3 clase de adâncime: clasa 1 (adâncime mică): < 0.5 m; clasa 2 (adâncime medie): $0.5 - 1.5$ m; clasa 3 (adâncime mare): > 1.5 m.

CAPITOLUL 4 – DATE, SOFTURI ȘI METODOLOGII UTILIZATE ÎN EVALUAREA HAZARDULUI LA INUNDAȚII DIN CADRUL REGIUNII DE N-E A ROMÂNIEI

4.1 Date utilizate

4.1.1 Imagini satelitare optice Landsat și Sentinel-2

Misiunile Landsat (Landsat 1, 2, 3, 4 – MSS; Landsat 5 – TM; Landsat 7 – ETM+; Landsat 8 – OLI) și Sentinel-2 (Sentinel-2A și Sentinel-2B) sunt echipate cu senzori pasivi, multispectrali și dobândesc imagini folosind anumite intervale ale spectrului electromagnetic, cele mai multe neperceptibile ochiului uman. Dintre acestea, în cadrul prezentului studiu au fost folosite imagini satelitare optice provenite de la sateliți Landsat TM, ETM+ și Sentinel-2A, 2B (imagini care au surprins evenimente de inundații sau caracteristicile spațiale ale apelor permanente). Imaginile satelitare Landsat TM, ETM+ și Sentinel-2A, 2B au fost descărcate folosind platforma EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), respectiv Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>).

4.1.2 Imagini satelitare radar Sentinel-1

Misiunea ESA Sentinel-1 constă într-o constelație de doi sateliți cu orbită polară (Sentinel-1A și Sentinel-1B), echipați cu un senzor SAR activ (ce operează în banda C - lungime de undă $[\lambda] = 5.6$ cm), care facilitează achiziționarea imaginilor indiferent de zi, noapte sau condiții meteorologice, la fiecare 6 zile sau chiar 1 - 3 zile pentru zone precum Europa (Aschbacher & Milagro-Pérez, 2012; Schlaffer et al., 2015; Nagler et al., 2015; Clement et al., 2017; Tsyganskaya et al., 2018; Potin et al., 2019). Datele sunt achiziționate în patru moduri diferite (Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra-Wide swath (EW), Wave (WV)) și sunt distribuite în mod gratuit în funcție de nivelul de procesare (Nivel-0, Nivel-1 și Nivel-2), la rezoluții spațiale, extinderi/dimensiuni ale scenelor și polarizări (posibilități transmisie - recepție) specifice - polarizare unică HH (orizontal - orizontal) sau VV (vertical - vertical) și polarizare duală HH + HV sau VV + VH (Torres et al., 2012; Poursanidis & Chrysoulakis, 2017; Gao et al., 2017; DeVries et al., 2020). Dintre acestea, datele de Nivel-1 au cea mai mare disponibilitate, fiind destinate majorității utilizatorilor și aplicațiilor (bazate pe imagini satelitare Sentinel-1). Produsele de Nivel-1 sunt distribuite în două formate: Single Look Complex (SLC) și Ground Range Detected (GRD). În cadrul acestui studiu au fost folosite imagini GRD Sentinel-1 SAR,

disponibile în mod gratuit, achiziționate de senzor în modul Interferometric Wide Swath (IW) (modul implicit de achiziție deasupra suprafețelor de uscat, ce implică achiziția de imagini pe porțiuni/dimensiuni de 250 km la sol), în polarizare duală (VV/VH) și la o rezoluție spațială de 10 m. Datele au fost descărcate folosind Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>).

4.1.3 Model digital de elevație LiDAR

În cadrul studiului de față, a fost folosit un model digital de elevație obținut prin principiul activ al senzorilor LiDAR. Detalii cu privire la acest tip de model și la modalitatea de obținere a acestuia pot fi găsite în cadrul secțiunilor 2.1.1 Senzori specifici teledeteției și achiziția datelor și 4.6.1.2 Obținerea modelului digital al terenului LiDAR.

4.1.4 Alte date în format raster

Alte date în format raster utilizate în cadrul lucrării de față au constat în: modelul digital de elevație SRTM utilizat ca suport grafic în dezvoltarea hărților cu privire la delimitarea spațială a inundațiilor (derivate din imagini satelitare) și a hărților de hazard la inundații (Sursa datelor: EarthExplorer - <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Ortofotoplan din zona orașului Bacău din anul 2012 (Sursa datelor: Geoportal ANCPI - <https://geoportal.ancpi.ro/portal/home>).

4.1.5 Date numerice cu privire la valorile de debit înregistrate la stația hidrometrică Rădăuți-Prut

În vederea stabilirii valorilor de debit maxime specifice perioadelor de revenire și a probabilităților de depășire din cadrul stației hidrometrice Rădăuți-Prut, au fost utilizate datele cu privire la debitele maxime anuale (Sursa datelor: Institutul Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor – INHGA).

4.1.6 Date vectoriale în format punct, linie sau poligon

Diverse date vectoriale cu privire la ape permanente, râuri, limite administrative, poziția stațiilor hidrometrice, a altor obiective diverse (hidrocentrale, baraje, stavile), utilizarea terenului, intravilane, suprafețe construite (clădiri), drumuri, etc.

4.2 Soluții software utilizate

Soluțiile software utilizate în cadrul lucrării de față au constat în: ENVI 5.0, F-mask 3.3, QGIS 3.4.14, SNAP Desktop 8.0.0, ArcGIS pentru Desktop 10.4, HEC-RAS

v.5.0.3. O descriere completă a acestor studii poate fi consultată în cadrul secțiunii 2.3.1 Exemple de soluții software SIG ce pot fi utilizate în evaluarea hazardului la inundații.

4.2.1 Alte soluții software utilizate

Printre alte soluții software enumerăm: Microsoft Excel, Inkscape Inc.

4.3 Metode utilizate

În vederea realizării obiectivelor propuse în cadrul studiului de față, mai multe metode specifice au fost folosite. În linii mari, acestea pot fi grupate în metode cu privire la extragerea suprafețelor inundate din imagini satelitare (specifice teledetecției), metode hidrologice-hidraulice și metode SIG.

4.3.1 Metode specifice teledetecției

4.3.1.1 Metoda clasificări supervizate

Procesul de clasificare a imaginilor satelitare implică gruparea valorilor pixelilor aferenți imaginii în categorii semnificative în funcție de informațiile spectrale pe care le aceștia le stochează (Abburu & Golla, 2015). Constă în procesul de atribuire a unei clase specifice de acoperire a terenului, pixelilor componenți unei imagini satelitare digitale (Campbell & Wynne, 2011). Clasificarea imaginilor satelitare implică efectuarea unei transformări/conversii din măsurătorile spectrale numerice în clase semnificative sau etichete care pot descrie un peisaj și astfel pot crea o hartă tematică (Wilkinson, 2000). Clasificarea imaginilor satelitare constă în metodele de recunoaștere a anumitor tipare specifice, cu ajutorul cărora imaginile și pixelii componenți ai acestora sunt clasificați, pe baza unor măsuri de similaritate (Elachi & van Zyl, 2006).

4.3.1.2 Metoda indicilor spațiali - Normalized Difference Water Index (NDWI) și Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI).

O altă modalitate de a extrage informații cu privire la suprafețele acvatice și implicit a zonelor inundate din imagini satelitare multispectrale este reprezentată de metoda indicilor spectrali care sunt calculați utilizând două sau mai multe benzi spectrale, pentru a identifica diferențele dintre zonele acoperite de apă și cele non-apă (Verpoorter et al., 2012; Huang et al., 2018; Notti et al., 2018). În acest sens, mai mulți indici spectrali folosind benzile verde, infraroșu apropiat și infraroșu mediu (utilizate datorită capacității de reflecție și/sau absorbție a apei în special în cadrul acestor regiuni ale spectrului electromagnetic), au fost dezvoltați. Printre cei mai cunoscuți indici menționăm

Normalized Difference Water Index (NDWI), propus de McFeeters, 1996 și care utilizează benzile verde și infraroșu apropiat pentru a detecta apele de suprafață de alte clase de acoperire a terenului (McFeeters, 1996; McFeeters, 2013; Du et al., 2016; Li et al., 2019a). Acesta se calculează după ecuația:

$$NDWI = (GREEN - NIR)/(GREEN + NIR) \text{ (Ecuația 1);}$$

unde în cazul unei imagini satelitare Landsat 5 TM:

GREEN = valoarea reflectanței planetare a bandei 2 (verde).

NIR = valoarea reflectanței planetare a bandei 4 (infraroșu apropiat).

Xu, 2006 propune un nou indice numit și Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). Pentru a diferenția pixelii specifici corpurilor de apă de alți pixeli, acest indice (în comparație cu indicele NDWI), utilizează banda specifică regiunii infraroșu apropiat și banda verde (Xu, 2006; Du et al., 2016; Yang & Du, 2017; Zhou et al., 2017; Acharya et al., 2018; Li et al., 2019b). Acesta se calculează după ecuația:

$$MNDWI = (GREEN - SWIR)/(GREEN + SWIR) \text{ (Ecuația 2);}$$

unde în cazul unei imagini satelitare Landsat 5 TM:

GREEN = valoarea reflectanței planetare a bandei 2 (verde).

SWIR = valoarea reflectanței planetare a bandei 5 (infraroșu mediu).

4.3.1.3 Metoda manipulării valorilor de backscatter aferente histogramelor imaginilor satelitare radar

Aceasta metodă a fost utilizată în cadrul acestei lucrări pentru a diferenția între suprafețele acvatice și cele uscate surprinse de imaginile satelitare radar Sentinel-1. Esența detectării suprafețelor acvatice și a celor inundate folosind imagini radar (SAR), stă în detectarea schimbărilor de rugozitate întâlnite la suprafața terestră. Acolo unde suprafața solului este acoperită cu apă, rugozitatea este redusă și implicit împrăștierea reflectivă este aproape ideală. Contrastul puternic al acesteia cu împrăștierea reflectivă a suprafețelor naturale uscate (caracterizate de o rugozitate ridicată), evidențiază prezența apei în cadrul unei imagini satelitare radar (SAR) (Rahman & Thakurb, 2018; Shen & Anagnostou, 2019). Aceasta metodă implică distincția a două distribuții parțial suprapuse care corespund pixelilor de apă și non-apă (Lu et al., 2014; Liang & Liu, 2020). Punctul de intersecție dintre aceste două distribuții determină valoarea prag necesară separării celor două clase (suprafețe acvatice și suprafețe uscate) (Gan et al., 2012; Huth et al., 2020). Pentru imaginile SAR Sentinel-1 luate în considerare în prezentul studiu, extracția celor

două clase a fost efectuată pe baza unei valori prag globale care a fost inițial obținută și apoi aplicată tuturor histogramelor imaginilor. Unul dintre principalele avantaje ale utilizării imaginilor radar SAR în aplicațiile de cartografiere a inundațiilor se bazează pe contrastul ridicat dintre suprafața solului și a apei (Perrou et al., 2018). Suprafețele acvatice sau zonele inundate acționează ca reflectoare speculare ideale și se caracterizează prin valori reduse ale retrodifuzării SAR (a coeficientului de backscatter - împrăștiere) (Tsyganskaya et al., 2018; Romero et al., 2020). Prin urmare, în imaginile radar SAR cum sunt și cele specifice sateliților Sentinel-1 suprafețele acoperite cu apă apar negre (Ezzine et al., 2018; Huth et al., 2020).

4.1.1.4 Metoda interpretării vizuale a imaginilor satelitare și extragerea informațiilor manual (prin digitizare).

Această metodă a fost utilizată în vederea selecției imaginilor satelitare ce ilustrează evenimente de inundații precum și în extragerea anumitor informații spațiale cu privire la zonele inundate. Cu ajutorul acestei metode a fost stabilită valoarea prag globală, utilizată ulterior în manipularea histogramelor imaginilor satelitare Sentinel-1 și în separarea pixelilor specifici apei de ceilalți (specificali zonelor uscate).

4.3.2 Metode hidrologice-hidraulice

4.3.2.1 Metode statistice de analiză a frecvenței inundațiilor – determinarea debitelor maxime specifice unor perioade de revenire și implicit a probabilităților de apariție utilizând metoda Gumbel.

Această metodă a fost folosită pentru a determina debitele maxime specifice unor perioade de revenire. Fînd una dintre cele mai utilizate metode în acest sens (Farooq et al., 2019), distribuția Gumbel (Gumbel, 1941) a fost aplicată în cadrul acestei lucrări pentru a stabili probabilitatea de apariție a unei inundații ce a avut loc pe râul Prut în perioada 24 – 27 Iunie 2020. Astfel, considerînd debitele maxime anuale înregistrate la stația hidrometrică Rădăuți-Prut în ultimii 42 de ani (1978 - 2019), acest lucru a fost realizat pe baza ecuației de distribuție Gumbel (Bhat et al., 2019b), exprimată ca:

$$X_T = \underline{X} + K\sigma_x \text{ (Ecuația 3);}$$

unde,

X_T = deversarea probabilă specifică unei perioade de revenire de T ani (magnitudinea inundației);

\underline{X} = valoarea medie a debitelor maxime anuale considerate;

σ_x = deviația standard a debitelor maxime anuale considerate;

K = factorul frecvenței, exprimat ca și: $K = \frac{Y_T - Y_n}{S_n}$ (Ecuția 4);

Y_T = variația redusă, exprimată ca și: $-\left[LnLn\left(\frac{T}{T-1}\right)\right]$ (Ecuția 5);

Y_n și S_n = media și deviațiile standard așteptate ale extremelor reduse ce se regăsesc în tabelul lui Gumbel, în funcție de mărimea eșantionului de date considerat (numărul de ani analizat), urmând următorii pași: (1) calculul valorii medii \underline{X} și a deviației standard σ_x considerând valorile debitelor maxime anuale (în cazul nostru, aceste valori au fost egale cu: $\underline{X} = 996,21$ și $\sigma_x = 755,52$); (2) selectarea din cadrul tabelului lui Gumbel a valorilor Y_n și S_n specifice (în cazul nostru, având în vedere dimensiunea eșantionului de 42 de ani, valorile selectate au fost egale cu 0,5448 respectiv 1,1458); (3) în funcție de perioadele de revenire considerate inițial - T, variația redusă Y_T este calculată folosind Ecuția 5; (4) calculul factorului frecvenței K, folosind Ecuția 4; (5) deversările probabile corespunzătoare diferitelor perioade de revenire considerate inițial și probabilitățile de apariție corespundente au fost calculate conform Ecuției 3; (6) în funcție de aceste valori obținute la pasul (5), o probabilitate de apariție și perioadă de revenire a fost calculată pentru debitul maxim înregistrat la stația hidrometrică Rădăuți-Prut pe perioada inundației ce a avut loc pe râul Prut în perioada 24 – 27 Iunie 2020 (vezi secțiunea: 5.2.1 Obținerea unei hărți de hazard la inundații pentru sectorul mijlociu al râului Prut situat între Oroftiana și Rădăuți-Prut folosind exclusiv imagini satelitare radar Sentinel-1). Calculele menționate au fost realizate folosind aplicația Microsoft Excel.

4.3.2.2 Metoda modelării hidraulice 2D

În raport cu rețeaua de drenaj (râuri, canale de curgere, etc.), modelele hidraulice descriu mișcarea apei în trei direcții: o direcție în aval - de-a lungul canalului râului, o direcție laterală (de exemplu, ori de câte ori apa începe să se reverse peste limitele albiei minore) și o direcție pe verticală care practic definește adâncimea/înălțimea apei (Betsholtz & Nordlof, 2017). Fenomenul de curgere a apelor râurilor a fost descris pentru prima dată de Saint Venant în anul 1871 (Gharbi et al., 2016). Modelul bidimensional utilizat în cadrul lucrării de față (implementat în soluția software – HEC-RAS), folosește ecuațiile Saint Venant 2D (bidimensionale), ale curgerii mediate pe adâncime, cunoscute ca și

ecuațiile privind simularea curgerii apei cu adâncime mică (ecuațiile apelor mici - shallow water equations) alături de metoda de calcul 2D Diffusive Wave și spre deosebire de modelele 1D, acestea sunt preferate atunci când este nevoie de o precizie hidrodinamică mai mare (de exemplu atunci când apa unei inundații se revarsă semnificativ în zonele adiacente albiei minore unui râu, de obicei în albia majoră a acestuia) (Nistoran et al., 2008; Ernst et al., 2010; Iordache, 2013; Vozinaki et al., 2017). Modelele bidimensionale simulează inundațiile cu presupunerea că adâncimea apei într-o direcție verticală poate fi neglijată, în comparație cu celelalte două dimensiuni (permițând apei să se deplaseze atât longitudinal cât și lateral) (Dasallas et al., 2019).

4.3.3 Metode specifice SIG

4.3.3.1 Metoda digitizării (a vectorizării)

Această metodă utilizată împreună cu metoda interpretării vizuale a imaginilor satelitare a contribuit la extragerea informațiilor cu privire la valorile coeficientului de backscatter – împrăștiere specifice suprafețelor acvatice din cadrul imaginilor satelitare radar Sentinel-1.

4.3.3.2 Metoda geostatistică de interpolare Natural Neighbor

Această metodă a fost folosită în realizarea modelului digital de elevație LiDAR (disponibil inițial în format vector 3D).

4.3.3.3 Metoda suprapuneri datelor

Această metodă a fost folosită în vederea realizării produselor cartografice (hărți ce delimitează extinderea spațială a inundațiilor (derivate din imagini satelitare) și hărți de hazard la inundații).

4.3.3.4 Metoda cartografiei digitale

Această metodă ce constă în principal în editare grafică a dus la realizarea efectivă a produselor menționate în cadrul secțiunii anterioare 4.3.3.3 Metoda suprapuneri datelor.

Metodele, datele și soluțiile software menționate au fost utilizate într-un mod integrat care a dus la elaborarea unor metodologii care au urmărit aplicații concrete. În acest sens au fost elaborate trei metodologii particulare cu privire la posibilitățile de evaluare a hazardului la inundații în arealul de N-E al României.

4.4 Metodologie 1 - Evaluarea hazardului la inundații folosind imagini satelitare optice (Landsat și Sentinel-2), metoda clasificări supervizate, metoda indicilor spațiali și SIG.

4.4.1 Etape metodologice

În acest caz, evaluarea hazardului la inundații și producerea de materiale cartografice cu privire la hazardul la inundații (derivate din imagini satelitare), s-a realizat urmând 5 pași metodologici: (1) selectarea imaginilor satelitare disponibile, descărcarea și pre procesarea acestora; (2) operații între benzi – calculul indicelui NDWI; (3) clasificarea imaginilor satelitare în clase - zone cu apă/inundate, mixte (clasa mixtă include urme de sol umed și zone umede care au făcut parte din intensitatea maximă a inundației) și zone de teren uscat (neinundate); (4) evaluarea preciziei clasificări imaginilor satelitare; (5) producerea de hărți privind extinderea spațială a inundațiilor (eventual hărți de hazard) (Figura 2).

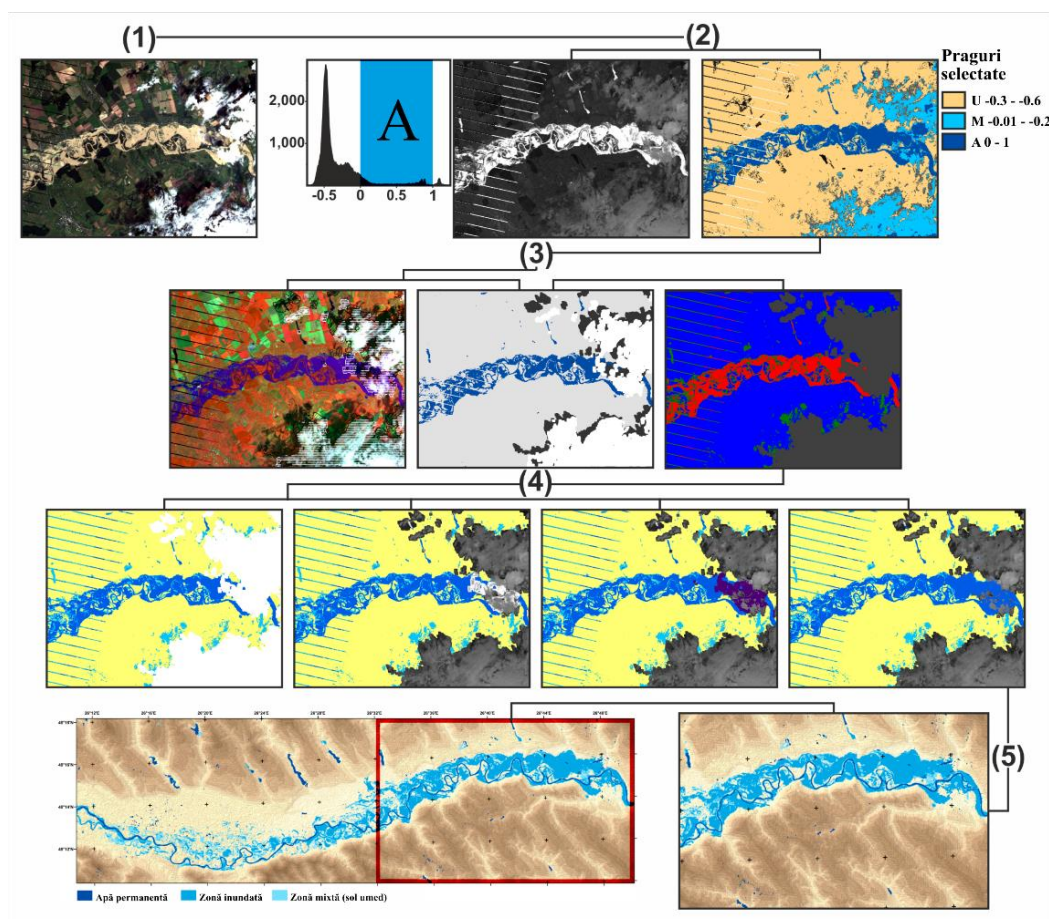


Figura 2 Procesul de clasificare (de la stânga la dreapta) utilizând: (1) o imagine satelitară Landsat (RGB: 321) care ilustrează o mare inundație (24 Iulie 2008 pe râul Prut); (2) indicele: MNDWI B2 / B5 afișând valorile sale în praguri de referință pentru - apă (A) (albastru), mixt (M) (albastru

deschis) și pentru zone uscate (U) (maro deschis); (3) imaginea Landsat (RGB: 472), masca aplicată norilor și rezultatul clasificării; (4) exportul vectorului fără date sub masca de nori, suprapunerea acestuia cu MNDWI, suprapunerea acestuia cu vectorul rezultat din aplicarea pragurilor de referință pentru apă asupra MNDWI, rafinare vectorială cu recuperare automată și manuală a datelor aflate sub nori cu densitate scăzută; (5) producerea hărților de hazard și risc (Sursa: [Romanescu et al., 2017](#)).

4.4.1.1 Datele hidrologice și inventarierea inundațiilor

Pentru a identifica zonele afectate de inundații din regiunea de N-E a României, au fost analizate datele hidrologice furnizate de Administrațiile bazinale ale râurilor Prut și Siret. Selecția inundațiilor istorice (1991, 2005, 2008 și 2010), s-a realizat interogând baza de date oferită de aceste entități administrative, cu privire la principalele evenimente hidrologice și baza disponibilității datelor satelitare Landsat și Sentinel-2. În total, șase imagini satelitare care surprind inundațiile cele mai catastrofale, care au avut loc în N-E României în perioada 1991-2010 au fost descărcate de pe portalul (USGS) United States Geological Survey - website (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

4.4.1.2 Pre-procesarea imaginilor satelitare

Imaginile disponibile sunt corectate doar din punct de vedere geometric ([Irish, 1998](#)). Consistența radiometrică a imaginilor satelitare este dificil de întreținut datorită modificărilor caracteristicilor senzorilor, condițiilor atmosferice, luminii, unghiului de incidență solar, unghiului de vedere al senzorului, al răspunsului spectral ([Chen et al., 2005](#); [Du et al., 2002](#); [Lillesand & Kiefer, 1994](#)). Din acest motiv, preprocesarea imaginilor a fost necesară. Imaginile Landsat au fost pre-procesate/prelucrate în două etape: (1) o etapă ce constituie calibrarea radiometrică și (2) o etapă ce constituie o corecție atmosferică; aceste două etape fiind necesare pentru normalizarea imaginilor satelitare ([Coppin et al., 2004](#); [Du, et al., 1998](#); [Roy et al., 2016](#); [Schott, 1997](#); [Song et al., 2001](#)).

După pre-procesarea prealabilă și calculul indicelui modificat normalizat de diferențiere al apei (MNDWI), a fost efectuată o clasificare supervizată a imaginilor satelitare (folosind algoritmul de clasificare Maximum Likelihood) ([Jiang et al., 2014](#); [Otukey & Blaschke, 2010](#)). Algoritmul de clasificare Maximum Likelihood, este unul dintre cel mai utilizat în clasificarea imaginilor satelitare, având o aplicabilitate ridicată și în extragerea corpurilor de apă ([Du, et al., 2002](#); [Zhang et al., 2016](#)). Primul pas în extragerea pixelilor acoperiți cu apă a constat în identificarea mai multor zone de interes (training areas – zone în care cunoaștem în proporție de 100% zonele aflate în teren). Astfel s-au identificat zone acoperite cu apă (W), zone mixte (M) – sol umed care a fost

acoperit de apele inundației în cadrul extinderii sale maxime și zone uscate (D) care nu au fost submerse. Aceste zone de interes au fost delimitate pe baza indicelui modificat normalizat de diferențiere al apei (MNDWI), pe valorile căruia s-au stabilit 3 praguri de referință. Clasa/zona acoperită de apă a fost limitată la valorile pozitive ale MNDWI (0-1), pragul clasei mixte a fost stabilit în intervalul -0.2 și 0, iar clasa zonei uscate a fost atribuită valorilor negative (-0.2 la -1).

O mască de nori a fost realizată utilizând software open source F-mask pentru detectarea automată a norilor și umbrelor acestora în scenele Landsat TM / ETM + (Zhu, Wang, & Woodcock, 2015). Softul ENVI a fost folosit pentru realizarea clasificării propriu zise. După o prealabilă caracterizare statistică a zonelor de interes identificate cu ajutorul indicelui MNDWI, imaginile au fost clasificate în 3 clase: zone acoperite cu apă, zone mixte umede, zone uscate lipsite pe prezența apei. Pentru a evalua acuratețea clasificărilor, a fost realizată o matrice de corelație/comparație. Pentru a realiza matricea de corelație s-a apelat la ajutorul hărților de inundații furnizate de platforma online SERTIT (Regional Service of Remote Sensing and Image Processing), o platformă online a Universității din Strasbourg (<http://sertit.u-strasbg.fr/RMS/>). Datele obținute de aici au fost folosite ca hărți de referință în evaluarea rezultatelor clasificărilor supervizate întreprinse. S-a procedat prin digitizarea manuală a zonelor cuprinse de inundații furnizate de hărțile SERTIT pentru a le putea compara cu rezultatele clasificării. Acuratețea generală obținută după rularea instrumentului de verificare a matricei de corelație a fost peste 85%. Valoarea indexului Kappa a fost de peste 0.8, susținând astfel consecvența clasificării. Vectorul apei permanente a fost extras folosindu-se date satelitare puse la dispoziție de platforma satelitară Sentinel-2.

Ultimul pas înainte de producerea hărților cu privire la delimitarea extinderii spațiale a inundațiilor a constat în rafinarea vectorilor și recuperarea datelor aflate sub norii cu densitate scăzută și în zonele de lipsă date din cadrul scenelor Landsat 7 ETM +. Această procedură a fost realizată prin suprapunerea vectorului obținut prin aplicarea pragului de referință al apei pe valorile (MNDWI), care afișează corect zonele de inundație în zonele acoperite cu norii de densitate mică, cu vectorul de clasificare obținut în urma clasificării supervizate. Zonele de lipsa date de pe scenele Landsat ETM + au fost de asemenea corectate manual.

4.5 Metodologie 2 - Evaluarea hazardului la inundații folosind imagini satelitare radar (Sentinel-1), metoda manipulării histogramei, legile probabilistice de analiză a frecvențelor inundațiilor și SIG.

Metodologia de cartografiere a inundațiilor și implicit producerea de materiale cartografice cu privire la delimitarea spațială a acestora propusă, a fost realizată folosind imagini satelitare radar Sentinel-1 și arhitectura software open source oferită de ESA (European Space Agency) numită SNAP (The Sentinel Application Platform) (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>). Arhitectura SNAP este ideală pentru prelucrarea și analizarea datelor satelitare Sentinel-1 pentru observarea Pământului. Funcțiile softului includ: deschiderea unui produs, explorarea componentelor produsului, cum ar fi benzile, măștile, accesarea instrumentelor de navigare și a informațiilor despre pixeli. Pentru această aplicație au fost utilizate patru imagini satelitare Sentinel-1 (Nivel 1) format Ground Range Detected (GRD) care ilustrează un eveniment hidrologic recent localizat în nord-estul României (pe râul Prut) în perioada 24.06.2020 – 27.06.2020 (Tabelul 1).

Tabelul 1 Imaginile satelitare Sentinel-1 considerate în cadrul prezentei metodologii.

ID	Identificator imagine	Satelit	Data și ora achiziției imaginii	Tipul de produs	Mod achiziție	Polarizarea
A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200624T042904_20200624T042929_033154_03D73C_540B	S1A	2020-06-24 T04:29:04.880Z	GRD	IW	VV VH
B	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200625T042007_20200625T042036_022185_02A1B4_C73E	S1B	2020-06-25 T04:20:07.597Z	GRD	IW	VV VH
C	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200626T160915_20200626T160940_022207_02A256_2724	S1B	2020-06-26 T16:09:15.797Z	GRD	IW	VV VH
D	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200627T160148_20200627T160213_033205_03D8C4_F195	S1A	2020-06-27 T16:01:48.625Z	GRD	IW	VV VH

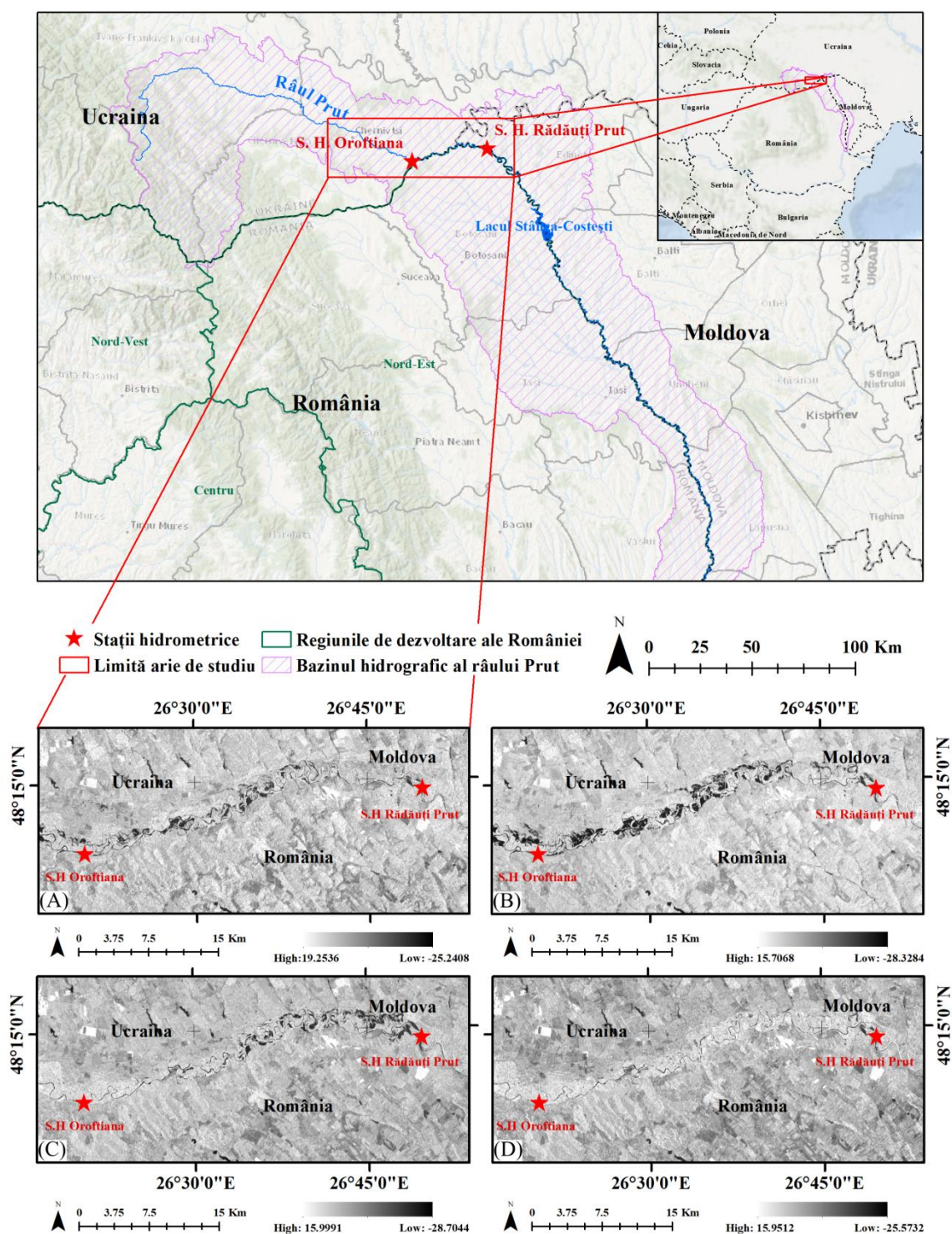


Figura 3 Localizarea ariei de studiu din cadrul metodologiei nr. 2 (sectorul mijlociu al râului Prut, situat la granița dintre Ucraina, România și Republica Moldova) și imaginile satelitare considerate în studiul de față.

Deoarece aceste patru imagini considerate au reușit a surprinde toate fazele de dezvoltare a inundației (Figura 3 (A), (B), (C), (D)), elaborarea unei hărți care să ilustreze extinderea maximă a acesteia a fost posibilă. Mai mult, corelația acestora cu un debit

specific unei perioade de revenire (calculat statistic pe baza valorilor de debit înregistrate la stația hidrometrică Rădăuți-Prut), a condus la transformarea acestei hărți ce delimitează extinderea spațială maximă a unei inundații într-o hartă de hazard de sine stătătoare.

4.5.1 Etape metodologice ale fluxului de lucru

4.5.1.1 Preprocesarea imaginilor satelitare Sentinel-1

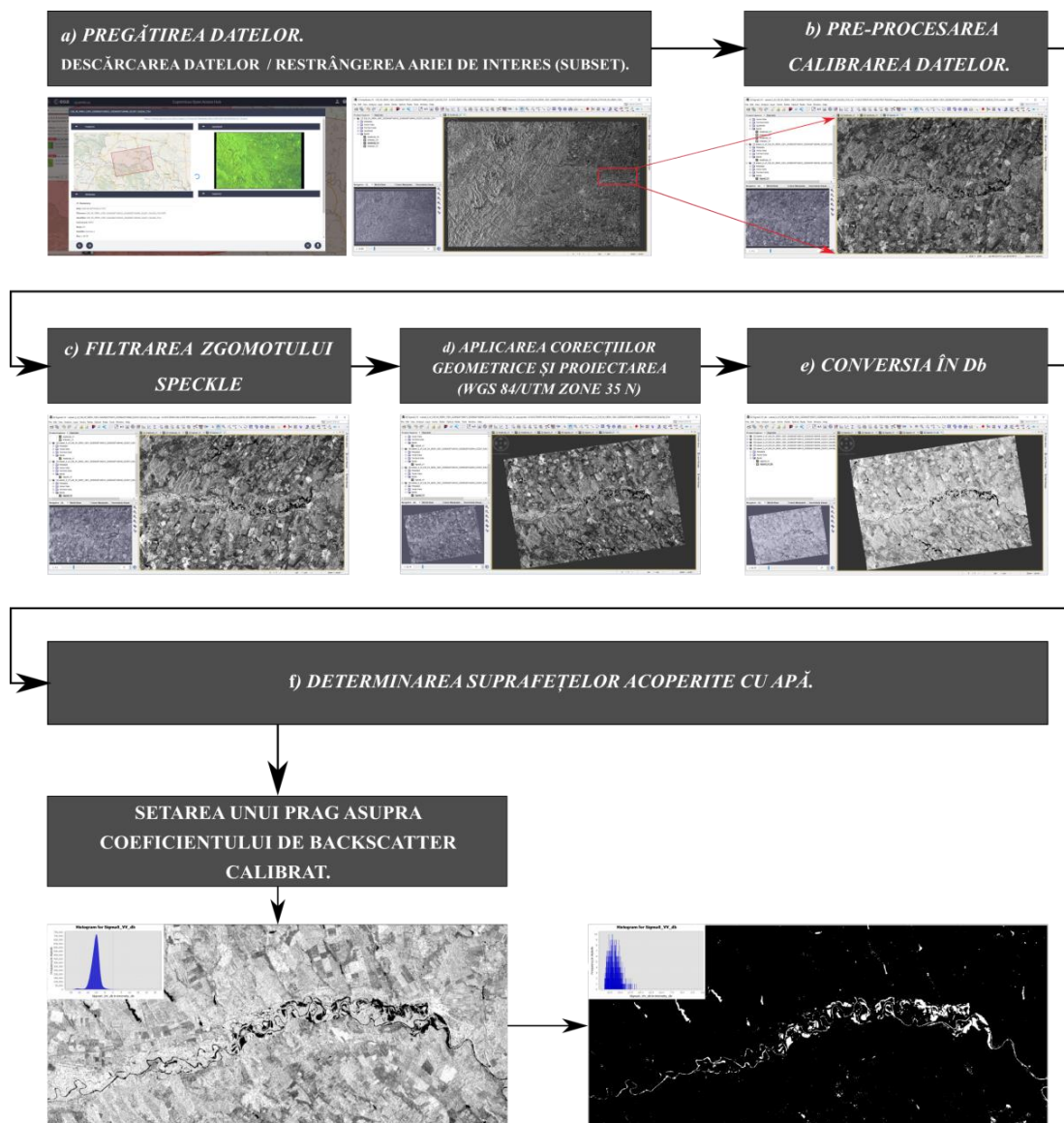


Figura 4 Procesul de extragere al informațiilor cu privire la suprafețele inundate din imaginile satelitare radar Sentinel-1 folosind metoda manipulării histogramei și al coeficientului de backscatter (prelucrare după [Filipponi, 2019](#); [Uddin et al., 2019](#); [Carreño Conde & De Mata Muñoz, 2019](#)).

4.5.1.2 Extragerea pixelilor aferenți apei

Extragerea informațiilor din imagini satelitare radar (SAR) se poate realiza folosind diferite metode ([Matgen et al., 2011](#); [Rahman & Di, 2017](#)). Printre acestea, manipularea valorilor coeficientului de backscatter (împrăștiere) și implicit stabilirea unei valori prag care să separe pixeli specifici apei de ceilalți este cea mai utilizată ([Behnamian et al., 2017](#); [Chini et al., 2019](#); [Carreño Conde & De Mata Muñoz, 2019](#); [Liang & Liu, 2020](#)). Această metodă poate fi utilizată pentru a diferenția pixelii de apă, reprezentați de valorile scăzute ale coeficientului de backscatter (împrăștiere), de pixelii ce ilustrează alte suprafețe (uscate), caracterizați de valori ridicate în cadrul histogramei unei imagini radar (Sentinel-1 în cazul nostru) ([Gstaiger et al., 2012](#)). Valoarea pragului a fost determinată prin analiza valorilor coeficientului de backscatter (împrăștiere) corespunzătoare unei serii de puncte digitizate manual prin interpretare vizuală, de-a lungul cursului râului Prut și în cele mai vizibile zone inundate. În acest sens, pentru fiecare imagine Sentinel-1, a fost achiziționat un set diferit de puncte în zone care se suprapun cu pixeli întunecați, de intensitate mică care reprezintă apa. În acest fel, extragerea valorilor pixelilor aferenți punctelor digitizate, a stabilit un interval specific suprafețelor acoperite cu apă care se regăsesc în fiecare imagine. Valorile cele mai mari ale intervalelor egale cu -19 db (imaginea A), -20,5 db (imaginea B), -21 db (imaginea C) și -20,5 db (imaginea D), au setat valoarea prag pe baza căreia au fost separate clasele de apă și suprafețe uscate. În consecință, toate valorile sub aceste praguri au fost considerate reprezentative pentru clasa de apă și, respectiv, pentru zonele inundate ([Figura 5 \(A\), \(B\)](#)). Informații detaliate cu privire la abordarea metodologică de extracție a zonelor inundate din cadrul imaginilor satelitare Sentinel-1 adoptată în cadrul acestui flux de lucru pot fi găsite și în [Carreño Conde & De Mata Muñoz, 2019](#).

În continuare, un strat/layer (format raster - Geotiff) care ilustrează apa și zonele uscate pentru toate imaginile considerate a fost obținut. În scopul integrării datelor, s-a realizat, de asemenea și o conversie în format vectorial (Shapefile) ([Figura 5 \(C\)](#)). Cum clasa de apă detectată este constituită din zone inundate și corpuri de apă permanente, pentru a evidenția doar zonele inundate, a fost necesar o extragere a corpurilor de apă permanente din setul de date inițial ([Rahman și Thakur, 2018](#)). Acest lucru a fost realizat cu ajutorul instrumentelor SIG (folosind metoda suprapunerii datelor) și datele cu privire la apele permanente oferite de către platforma OpenStreetMap.

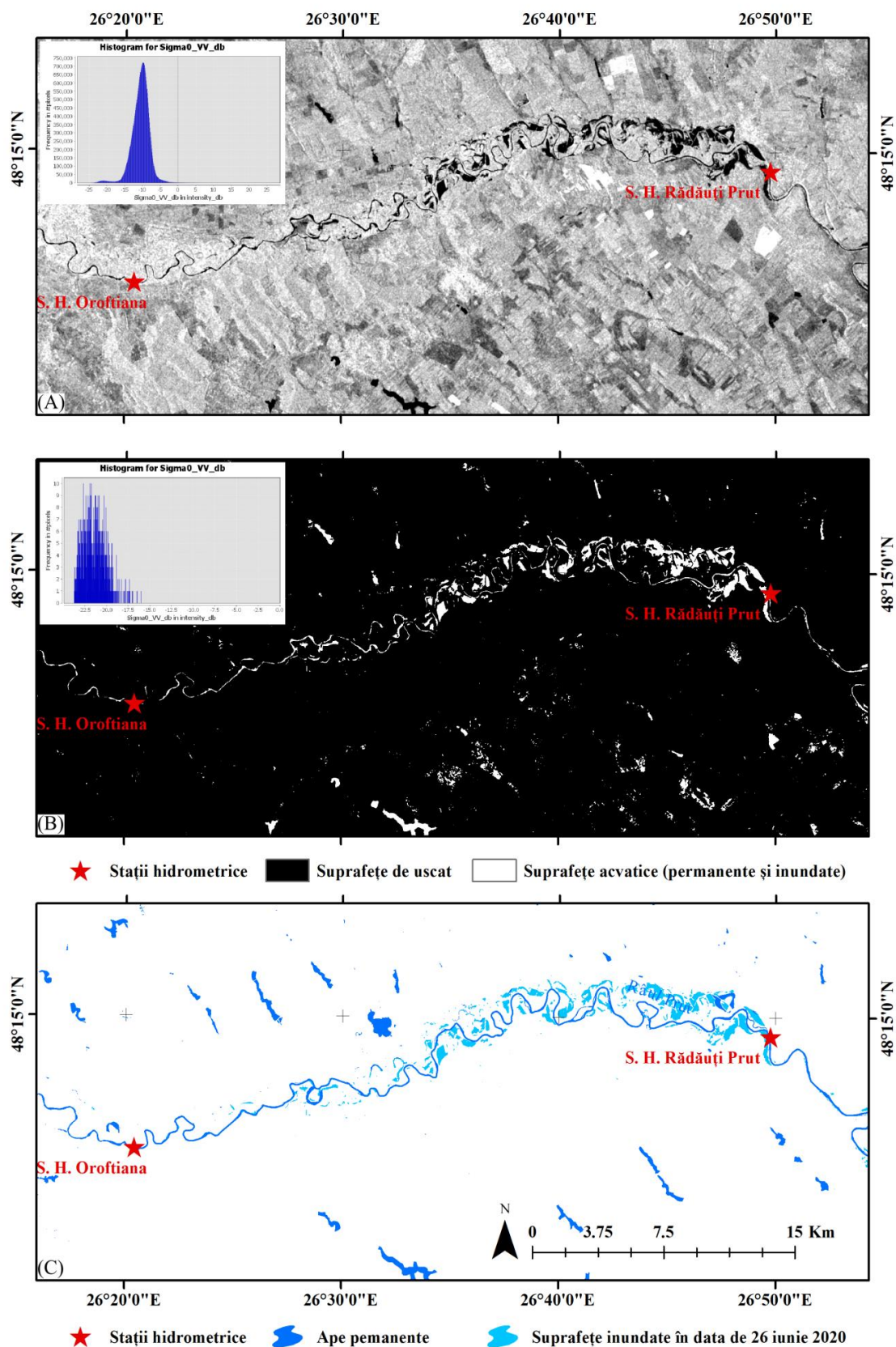


Figura 5 Manipularea histogramei și al coeficientului de backscatter, exportul în format raster (Geotiff) al pixelilor specifici apei și conversia în format vector (Shapefile).

4.5.1.3 Validarea rezultatelor

Validarea rezultatelor obținute (ce a constat în patru seturi de date cu privire la suprafețele inundate, specifice celor patru imagini satelitare Sentinel-1 considerate), s-a realizat prin corelarea extinderii inundației obținute în data de 26 iunie 2020 (**Figura 6 (A)**), cu alte două seturi de date distincte ce au constat într-un vector cu delimitarea inundației din data de 26 iunie 2020 pus la dispoziție de COPERNICUS Emergency Management Service – Mapping (EMSR445_AOI01_DEL_PRODUCT_r1_VECTORS_v1_vector.zip) (**Figura 6 (B)**), bazat de asemenea pe aceeași imagine Sentinel-1 și într-o imagine aeriană a evenimentului furnizată de redacția de știri *realitateadebotosani.net* și care a fost surprinsă în data de 25 iunie 2020 (sursa imaginii aeriene: <https://realitateadebotosani.net/prutul-a-invadat-o-suprafata-mare-a-localitatii-radauti-prut-galerie-foto/> - link accesat la data de 20.08.2020) (**Figura 6 (E)**). Compararea dintre cele două seturi de date (a celor doi vectori specifici zonelor inundate din data de 26 iunie 2020) a fost realizată prin cuantificarea gradului de suprapunere. Analiza celor două seturi de date a relevat un grad de suprapunere de peste 95%, fapt care a fost considerat satisfăcător în scopul validării metodologiei adoptate în cadrul prezentului flux de lucru (**Figura 6 (C)**). **Figura 6** descrie în detaliu procesul de validare adoptat.

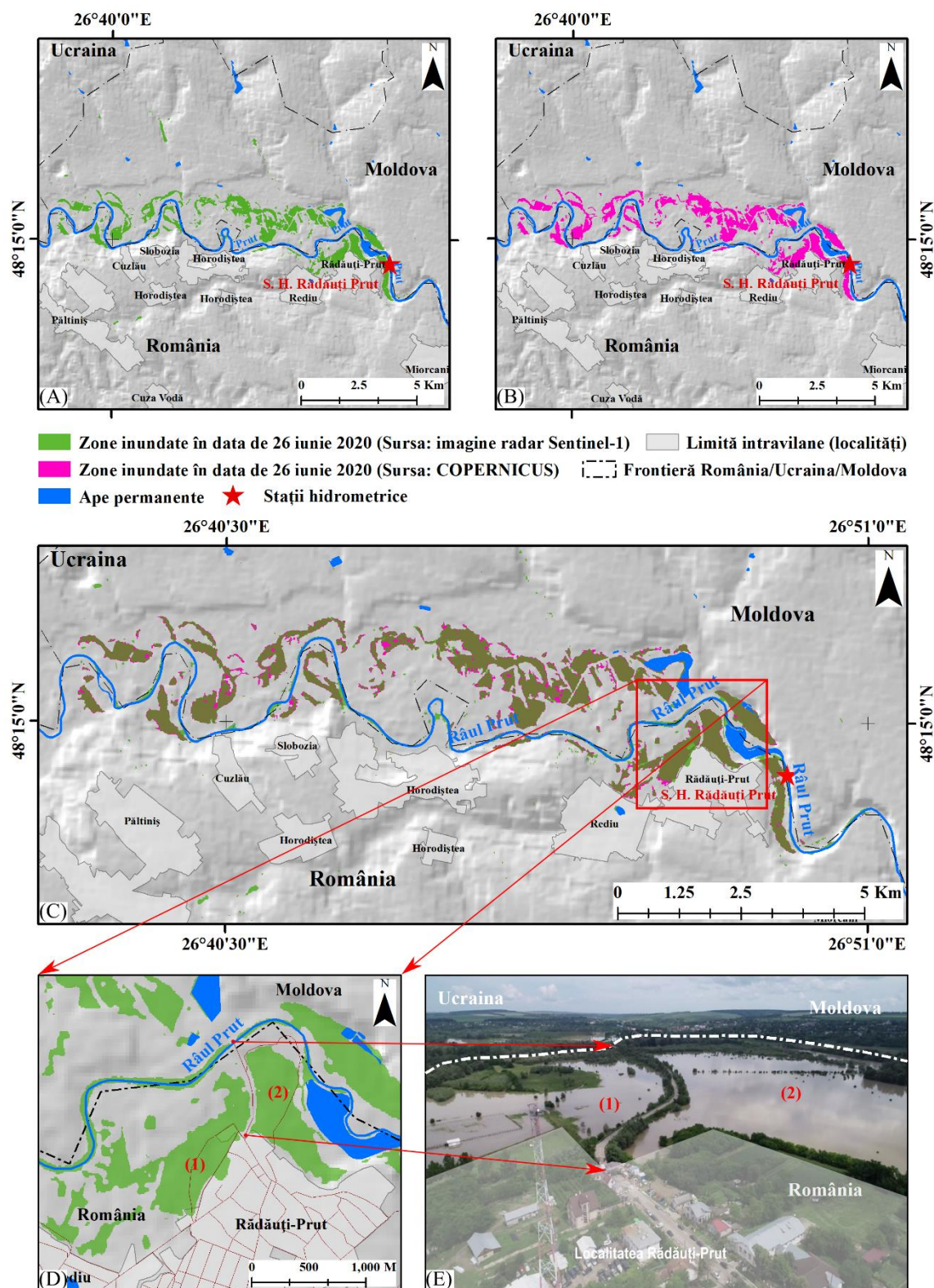


Figura 6 Procesul de validare al rezultatelor - (A) Zonele inundate în data de 26 iunie 2020 (extrase din imaginea satelitară Sentinel-1 corespundentă), (B) Zonele inundate în data de 26 iunie 2020 puse la dispoziție de COPERNICUS Emergency Management Service, (C) Realizarea suprapunerii celor două seturi de date distincte, (D, E) Corelarea zonelor inundate din data de 26 iunie (harta A), cu o imagine aeriană achiziționată în data de 25 iunie 2020 (zona Rădăuți-Prut).

4.6 Metodologie 3 - Evaluarea hazardului la inundații folosind metoda modelării hidraulice 2D, un model digital de elevație LiDAR (cu acuratețe ridicată) și SIG

4.6.1 Etape metodologice

4.6.1.1 Achiziția și pregătirea datelor de intrare (necesare modelări hidraulice 2D)

Figura 7 rezumă etapele prezentului flux de lucru, evidențiind procesul de obținere a datelor hidrologice, a datelor specifice topografiei locale – modelul LiDAR, precum și pași cheie urmați în modelarea hidraulică 2D folosind soluția software GIS - HEC-RAS.

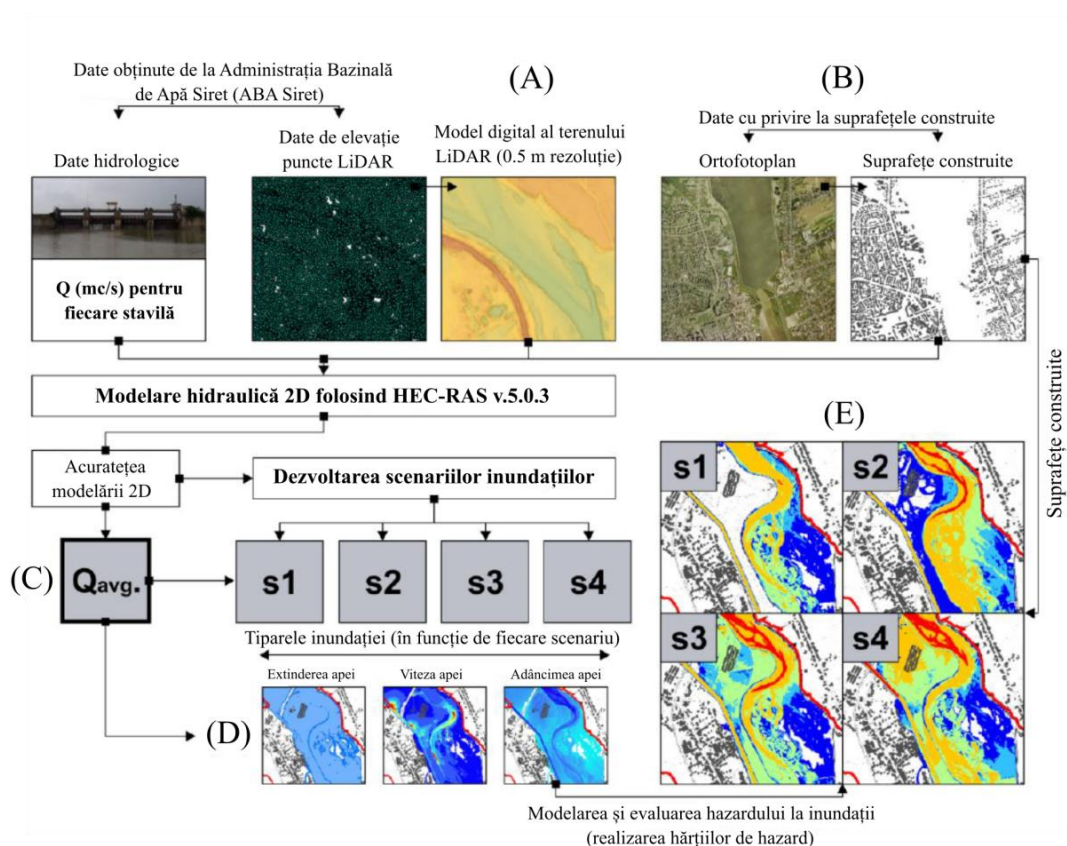


Figura 7 Diagrama fluxului de lucru aferent procesului de modelare hidraulică 2D utilizând date hidrologice provenite de la Sw1 și date topografice de înaltă rezoluție (sub forma unui model digital de elevație LiDAR), în zona urbană și periurbană a orașului Bacău. (A) Generarea modelului digital de elevație LiDAR pe baza unui set de date brute în format vector (tip punct), cu o densitate spațială între 0.5 m și 3 m (pus la dispoziție de către ABA Siret); (B) digitalizarea manuală a clădirilor utilizând un ortofotoplan de înaltă rezoluție și integrarea acestor date în cadrul MDE; (C) dezvoltarea celor cinci scenarii de curgere a apei ($Q_{avg.}$, s1 – s4), folosind metoda modelări hidraulice 2D și aplicația software HEC-RAS v.5.0.3, (D) determinarea hazardului la inundații în funcție de fiecare scenariu în parte și exportul straturilor individuale specifice (de exemplu, extinderea inundației, viteza inundației, adâncimea inundației); (E) evaluarea hazardului la inundații în conformitate cu metodologia propusă de Ministerul Infrastructurii Terestre și Transporturilor din Japonia (MLIT) (Sursa: [Mihu-Pintile et al., 2019](#)).

4.6.1.2 Obținerea modelului digital al terenului LiDAR

Modelul digital al terenului utilizat în cadrul acestei aplicații tehnice a constat într-un model de înaltă rezoluție specific tehnologiei LiDAR. Acest tip de modele ilustrează topografia zonei de studiu cu un grad ridicat de precizie, atât pe orizontală cât și pe verticală, acest aspect fiind o caracteristică esențială pentru metodele de modelare hidraulică 2D (Brovelli et al., 2004; Sanders, 2007; Liu, 2008). Datele cu privire la model, au fost puse la dispoziție de Administrația Națională Apele Române (ANAR) și Administrația Bazinală de Apă Siret (ABA Siret), și au constat într-un set de date brute în format vector (tip punct), cu o densitate spațială între 0.5 m și 3 m. În acest sens mai mult de 7.833×10^6 puncte au fost considerate în procesul de obținere a modelului digital care a implicat de asemenea și o metodă de interpolare spațială, numită Natural Neighbor. Metoda Natural Neighbor a fost preferată deoarece aceasta este o metodă simplă și eficientă care folosește o medie a valorilor observațiilor învecinate pentru a determina o valoare inițial necunoscută (Sibson, 1981). Pentru a surprinde cât mai multe detalii topografice, modelul digital a fost realizat și exportat în format raster la o rezoluție de 0.5 m.

4.6.1.3 Datele hidrologice

Datele hidrologice utilizate ca parametri de intrare a modelării hidraulice propuse de aplicația de față, au fost extrase din regulamentul oficial de funcționare a amenajării hidrotehnice Bacău I (rB1 și H-pp), aferent anului 2012 și care a fost pus la dispoziție de către ABA Siret. Conform reglementărilor legislative naționale STAS 4273/83 și STAS 4273/82, lacul de acumulare Lilieci (rB1) este încadrat (după înălțimea barajului și volumul capacității de stocare) în a treia categorie de importanță pentru care debitul de calcul este cel cu asigurarea de Q2% (interval de recurență de 50 de ani, cu un debit de 1050 mc/s) iar debitul de verificare este cel de Q0.5% (interval de recurență de 500 de ani, cu un debit de 1670 mc/s) (Tabelul 2). Cu toate că barajul este încadrat în clasa a treia de importanță, descărcătorul acestuia (Sw1) și digurile acumulării au fost proiectate să tranziteze și debite care corespund celei de-a doua categorii de importanță: Q1% (interval de recurență 100 de ani, cu un debit de 1140 mc/s) și Q0.5% (interval de recurență 1000 ani, cu un debit de 2100 mc/s). Hidrocentrala H-pp este situată la aproximativ 1726 m de descărcătorul Sw1, pe un canal special proiectat de direcționare a apei (canal de derivație cu nivel liber) și este echipată cu două turbine Kaplan cu un debit maxim instalat de 180 mc/s.

Tabelul 2 Volumul de apă conținut (milioane m³) în lacul de acumulare rB1 în funcție de cota suprafeței libere (m) și de scenariul (s1-s4) dezvoltat în cadrul aplicației de față.

Cota suprafeței libere (m)	172.1	177.8	178.1	178.6	179.1	179.2	179.6	179.	180.1
Volumul de apă înmagazinat (mil. m ³)	0	4.8	5.41	6.77	8.18	8.4	9.66	10.1	11.18
Scenariu de inundație		s1		s2		s3		s4	

4.6.1.4 Modelarea hidraulică

Un model 2D simulează o inundație într-un mod mult mai precis (fînd capabile să reproducă într-un mod mult mai realist mișcările secundare ale apei în meandre, în zonele de confluență, în zone puternic amenajate antropic, etc.). Acesta ia în considerare variabilitatea debitului în timp cât și două dintre cele trei dimensiuni spațiale, x și y. Acest aspect îl face mai potrivit pentru studii de caz care iau în considerare: inundarea luncilor râurilor (a câmpiilor de inundare, caracterizate de un grad ridicat de planaritate), zonele urbane, accidentele hidrotehnice (deversări peste baraje, ruperea barajelor), unde este de așteptat ca apa să se răspândească pe o zonă deschisă, plană, nelimitată și neapărat în mai multe direcții ([Alkema, 2007](#)). Lansarea software-ului HEC-RAS (versiunea 5.0), în 2016, a integrat capacitatea de modelare 2D a unui flux nepermanent oferind astfel posibilitatea de a analiza propagarea apei pe o suprafață predefinită, care de obicei se găsește sub forma unui model digital al terenului ([Brunner, 2016](#); [Brunner & CEIWR-HEC, 2016](#)). Algoritmul de modelare 2D (implementat în cadrul soluției software – HEC-RAS), folosește ecuațiile Saint Venant 2D (bidimensionale), ale curgerii mediate pe adâncime, cunoscute ca și ecuațiile privind simularea curgerii apei cu adâncime mică (ecuațiile apelor mici - *shallow water equations*) ([Ecuația \(6\)](#)), ori ecuațiile *2D Diffusive Wave* ([Ecuația \(7\)](#) și [\(8\)](#)).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 p g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + pf + \frac{\partial}{\rho \partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\rho \partial y} (h \tau_{xy}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 q g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + qf + \frac{\partial}{\rho \partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\rho \partial x} (h \tau_{xy}) \quad (8)$$

unde h este adâncimea apei (m), p și q sunt componentele vitezei mediate pe adâncime, pe direcțiile x (a curgerii), respectiv y (perpendiculară pe direcția curgerii) (m²s⁻¹), ζ este cota

suprafeței libere a apei (m), g este accelerația gravitațională (ms^{-2}), n este coeficientul de rugozitate Manning ($\text{m}^{-1/3} \text{s}$), ρ este densitatea apei (kg m^{-3}), τ_{xx} , τ_{yy} , and τ_{xy} sunt componentele stresului de forfecare (eforturile tangențiale de frecare), f este parametrul Coriolis (s^{-1}).

Când ecuațiile 2D Diffusive Wave sunt selectate, termenii inerțiali ai ecuațiilor dinamicii fluxului - a conservării momentului sunt neglijăți $\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = 0$ (Ecuația 7); $\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) = 0$ (Ecuația 8) (Quiroga et al., 2017; Muthusamy et al., 2019; Costabile et al., 2020). Datorită timpului de calcul mult mai rapid și a proprietăților privind stabilitatea mult mai ridicate, ecuațiile 2D Diffusive Wave au fost preferate în cadrul prezentului studiu (Brunner & CEIWR-HEC, 2016). În acest fel, curgerea apei în cadrul câmpiei de inundație a fost aproximată ca o undă de propagare bidimensională în care apa poate curge în orice direcție pe baza topografiei definite și a rezistenței la curgere determinată de tipul de utilizare a terenului (a coeficientului de rugozitate Manning) (Bates & De Roo, 2000; Vozinaki et al., 2017). Un model 2D constă într-un grid de calcul 2D care grupează și discretizează râul și zonele adiacente acestuia într-o colecție de celule individuale (interconectate) și care sunt utilizate pentru a caracteriza topografia de bază (Leandro et al., 2009; Alzahrani, 2017). Zona de curgere 2D este regiunea (limita selectată de utilizator) unde va fi modelat fluxul de apă. Aceasta se suprapune neapărat cu aria de studiu și cu limitele modelului digital al terenului.

Un grid tip poligon cu dimensiunea celulei de 5 m a fost generat pentru a determina spațiul dintre celulele rețelei de calcul. Datorită dimensiunii celulelor relativ mică (5 m), o caracterizare completă a particularităților terenului (a topografiei) a fost posibilă. În acest sens mai mult de 2000000 de celule au fost generate; prin urmare introducerea unor linii de rupere (en: *breaklines*, de-a lungul digurilor și/sau canalelor principale) (pentru a surprinde în detaliu trăsăturile acestora) nu a fost necesară. Rețeaua de calcul definită a fost utilizată pentru a controla și modela fluxul de apă, în toată zona 2D delimitată precum și de la celulă la celulă. Având în vedere topografia de bază și rețeaua de calcul, soluția software HEC-RAS a surprins relațiile detaliate elevație – volum și proprietățile hidraulice specifice fiecărei celule (elevație vs. suprafață, perimetru ud și rugozitate), valorile cotei de suprafață a apei fiind calculate pentru fiecare centroid specific fiecărei celule a rețelei de calcul (Brunner & CEIWR-HEC, 2016). Coeficienții de rugozitate Manning, specifici fiecărei clase de acoperire a terenului au fost stabiliți în conformitate cu Gallegos et al., 2009 (Figura 8).

După crearea geometriei de curgere (a rețelei de calcul) și după stabilirea coeficienților de rugozitate, următorul pas a constat în stabilirea condițiilor de limită (în secțiunile de intrare și de ieșire). Pentru a simula diferite scenarii de inundare, date cantitative, cu privire la condițiile de curgere (hidrografe și condiții de adâncime normale reprezentând panta medie a albiei), au fost atribuite limitelor superioare și inferioare a rețelei de calcul 2D.

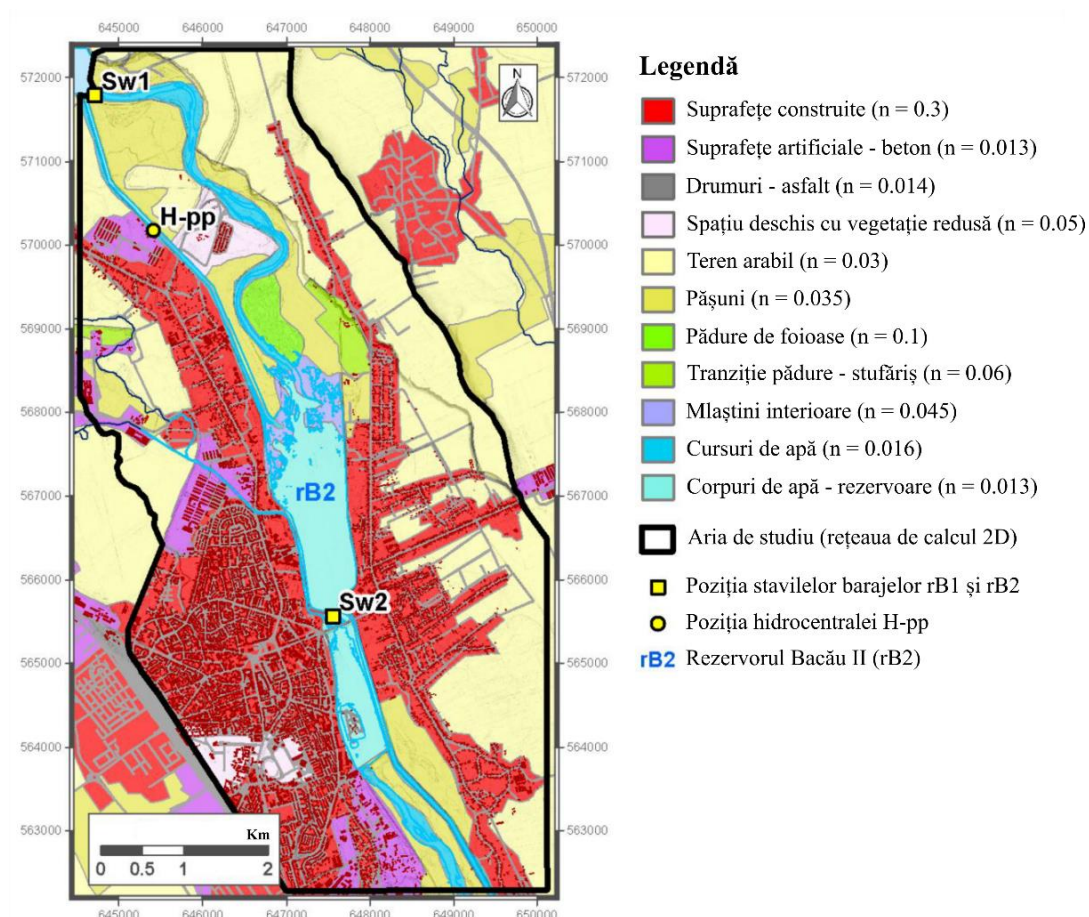


Figura 8 Harta utilizării terenului în zona de studiu și valoarea coeficientului de rugozitate Manning specific fiecărei clase conform Gallegos et al., 2009 (Sursa: Mihu-Pintile et al., 2019).

În acest sens, patru scenarii de inundații au fost simulate, iar pentru fiecare scenariu în parte au fost introduse câte două hidrografe (cu o durată de 24 de ore, cu valori înregistrate la interval de o oră) și condiții limită de adâncime normală. Condițiile de limită specifice zonei din amonte (mai exact hidrografele reprezentând debitul) au fost situate (din punct de vedere spațial) în două locații, în aval de barajul Lilieci (rB1): în dreptul hidrocentralei aferentă barajului (H-pp) pe canalul controlat și în dreptul albiei naturale a râului (unde apa din lacul de acumulare, debitul de servitute este eliberat) (Sw1). Condiția de limită specifică limitei inferioare rețelei de calcul 2D, (din aval), a constat în panta

hidraulică medie a secțiunii de râu analizată cu o valoare de 0.0001 mm (eredev nî dnâva) ¹⁻ caracteristicile topografice ale zonei de studiu).

Pentru a asigura stabilitatea modelului, pasul de timp a fost estimat în conformitate cu criteriul Courant – Friedrichs – Lewy (Brunnr & CEIWR-HEC, 2016) (Ecuția 9).

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta x} \leq 1.0 \text{ (with } C_{max} = 3.0) \text{ or } \Delta T \leq \frac{\Delta x}{V} \text{ (with } C = 1.0) \text{ (Ecuția 9)}$$

unde C este numărul Courant, V este viteza undei de viitură (m/s), ΔT este pasul timpului de calcul (s) și ΔX este dimensiunea medie a celulei (m). Conform Ecuției 12, un pas de timp de 10 s, a fost selectat (pași mai mari de timp nu au oferit o stabilitate modelului). Pentru a rula o simulare de 24 h la un pas de timp de 10 s, modelarea 2D a durat între ~3 h (în cazul scenariului Qavg. generat pe baza debitului mediu al râului), și ~12 h (în cazul scenariilor s1 – s4). Adâncimea apei inundației, viteza acesteia și alte rezultate asociate au fost obținute pentru fiecare oră, luând în considerare intervalul de ieșire al hidrografului.

4.6.1.6 Dezvoltarea scenariilor

Scenariile de inundații s-au bazat pe datele hidrologice extrase din regulamentul oficial de funcționare al amenajării hidrotehnice Bacău 1 (denumit și lacul de acumulare Lilieci) (rB1). Condițiile limită din amonte (pentru toate cele 5 scenarii dezvoltate) au fost bazate pe hidrografe care au avut o perioadă de desfășurare de 24 h cu o rezoluție temporală de 1h (având astfel valori înregistrate la nivelul fiecărei ore). Scenariul Qavg. (bazat pe valorile medii eliberate din lacul de acumulare Lilieci), delimitează extinderea spațială a apei (și celelalte componente asociate – ex: viteza și adâncimea acesteia) luând în considerare un debit de 34 mc/s situat la hidrocentrala H-pp a lacului de acumulare (pe canalul controlat) și un debit de 2.8 mc/s localizat la stavilele principale ale barajului, unde apa este eliberată în albia minoră a râului Bistrița (pentru a asigura debitul de servitute al acestuia). Scenariul 1 (s1) ia în considerare debitul mediu (Q = 34 mc/s) eliberat în dreptul hidrocentralei H-pp și debitul maxim de apă deversat (Q = 490 mc/s) în cazul deschiderii complete a unei stavile a barajului (Sw1) aferent aceluiași lac de acumulare Lilieci (rB1). În cazul debitului eliberat pe albia naturală a râului (în dreptul stavilelor), valoarea maximă de 490 mc/s a fost folosită în simulare doar pe perioada unei ore, în timp ce pentru celelalte 23 de ore rămase, debitul folosit fiind cel al valorii medii de Q = 2.8 mc/s. Scenariul 2 (s2) a fost realizat considerând modelarea curgerii apei la un debit de Q = 34 mc/s la H-pp și de Q = 980 mc/s la Sw1, atunci când două stavile ale barajului sunt complet deschise.

Distribuția perioadelor de timp a fost similară cu cea descrisă pentru scenariul 1 (s1). Pentru scenariul 3 (s3) s-au folosit aceiași parametri ca și pentru s1 și s2, cu excepția faptului că s-a luat în calcul un debit de apă $Q = 1470 \text{ mc/s}$ eliberat în caz de deschidere a 3 stăvilor ale barajului Sw1. Ultimul scenariu (s4) a simulat un debit $Q = 1960 \text{ mc/s}$, posibil în cazul deschiderii a tuturor celor patru stăvilor, ceilalți parametri rămânând neschimbați. O privire de ansamblu asupra scenariilor și a variabilelor considerate de acestea este prezentată în [Tabelul 3](#).

Tabelul 3 Caracteristicile și parametrii scenariilor dezvoltate în cadrul studiului de față.

Codul scenariului dezvoltat	Numărul stăvilor deschise (Sw1 ¹ and H-pp ²)	Nr. de ore/Stăvilor deschise (Sw1 ¹)	Nr. De ore/Simularea 2D	$Q^3 \text{ (m}^3/\text{s)}$ (Sw1 ¹ + H-pp ²)	Total $Q^3 \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q^4 \text{ (%)}$ din Sw1 ¹
Qavg.	Debitul de servitute și H-pp _{avg}	24 h	24 h	2.8 + 34	36.8	-
Scenariul 1.–s1	1 și H-pp _{avg}	1 h	24 h	490 + 34	524	25
Scenariul 2.–s2	2 și H-pp _{avg}	1 h	24 h	980 + 34	1014	50
Scenariul 3.–s3	3 și H-pp _{avg}	1 h	24 h	1470 + 34	1504	75
Scenariul 4.–s4	4 și H-pp _{avg}	1 h	24 h	1960 + 34	1994	100

¹ Sw1: Locația stăvilor lacului de acumulare Bacău 1;

² H-pp: Hidrocentrala lacului de acumulare Bacău 1 - H-pp;

³ Q: Debitele (m³/s);

⁴ Q: Procentul (%) deversat din capacitatea totală a lacului de acumulare

CAPITOLUL 5 – REZULTATE OBȚINUTE

5.1 Rezultate obținute în urma implementării metodologiei nr. 1 - hărți ce delimitează extinderea spațială a inundațiilor din ultimi 30 ani din regiunea de N-E a României (derivate din imagini satelitare optice).

5.1.1 Principalele evenimente de inundație din ultimii 30 ani.

5.1.1.1 Inundațiile din sectorul inferior al bazinului Siret (din anii 1991 și 2005).

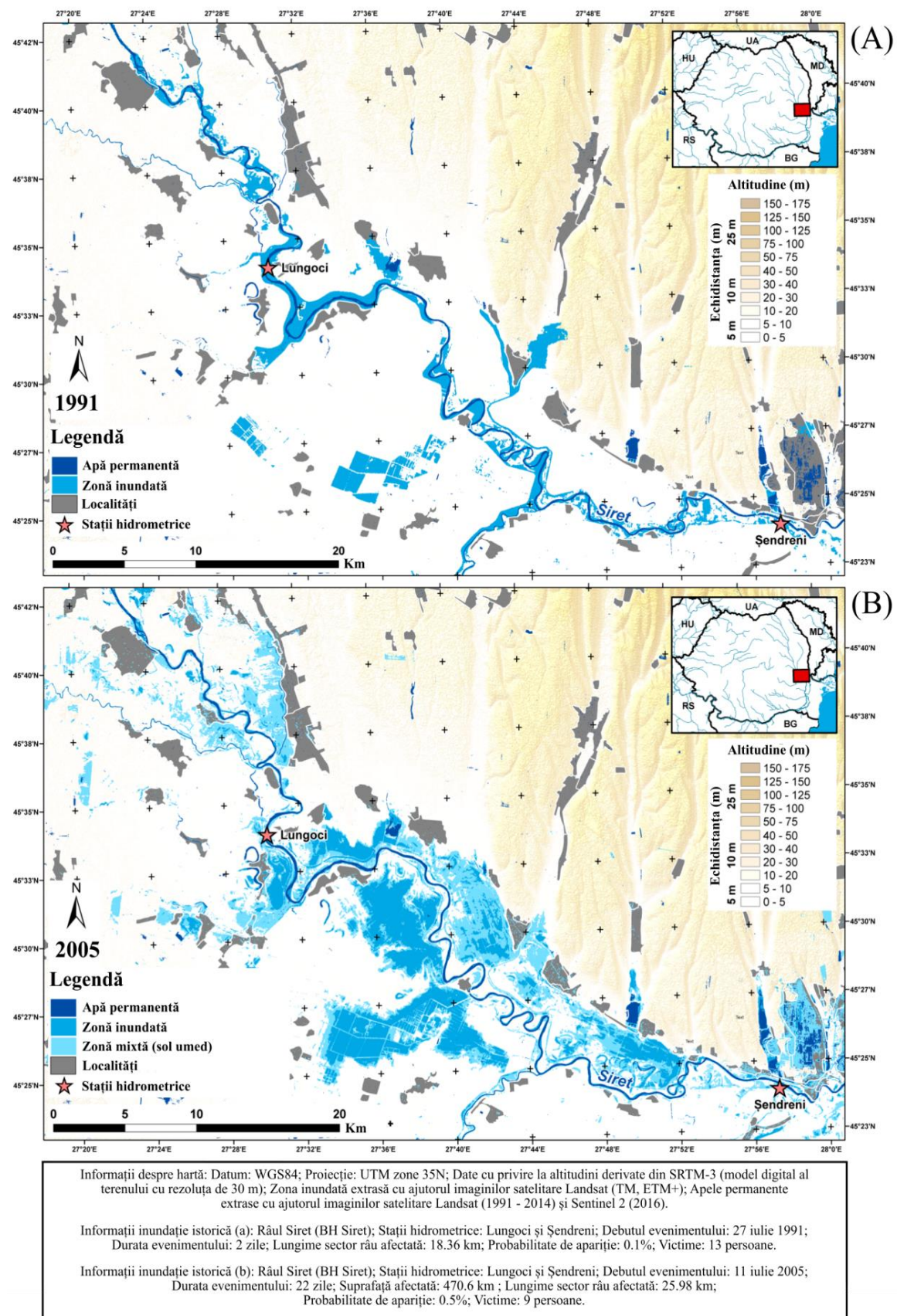


Figura 9 Inundațiile din ultimii 30 de ani de pe râul Siret (a) 27 iulie 1991 și (b) 11 iulie 2005, extrase din scenele Landsat TM și Landsat ETM + de la 1 august 1991 respectiv 31 iulie 2005 (Sursa: [Romanescu et al., 2017](#)).

5.1.1.2 Inundațiile din sectorul mijlociu al bazinului Siret (1991, 2008 și 2010)

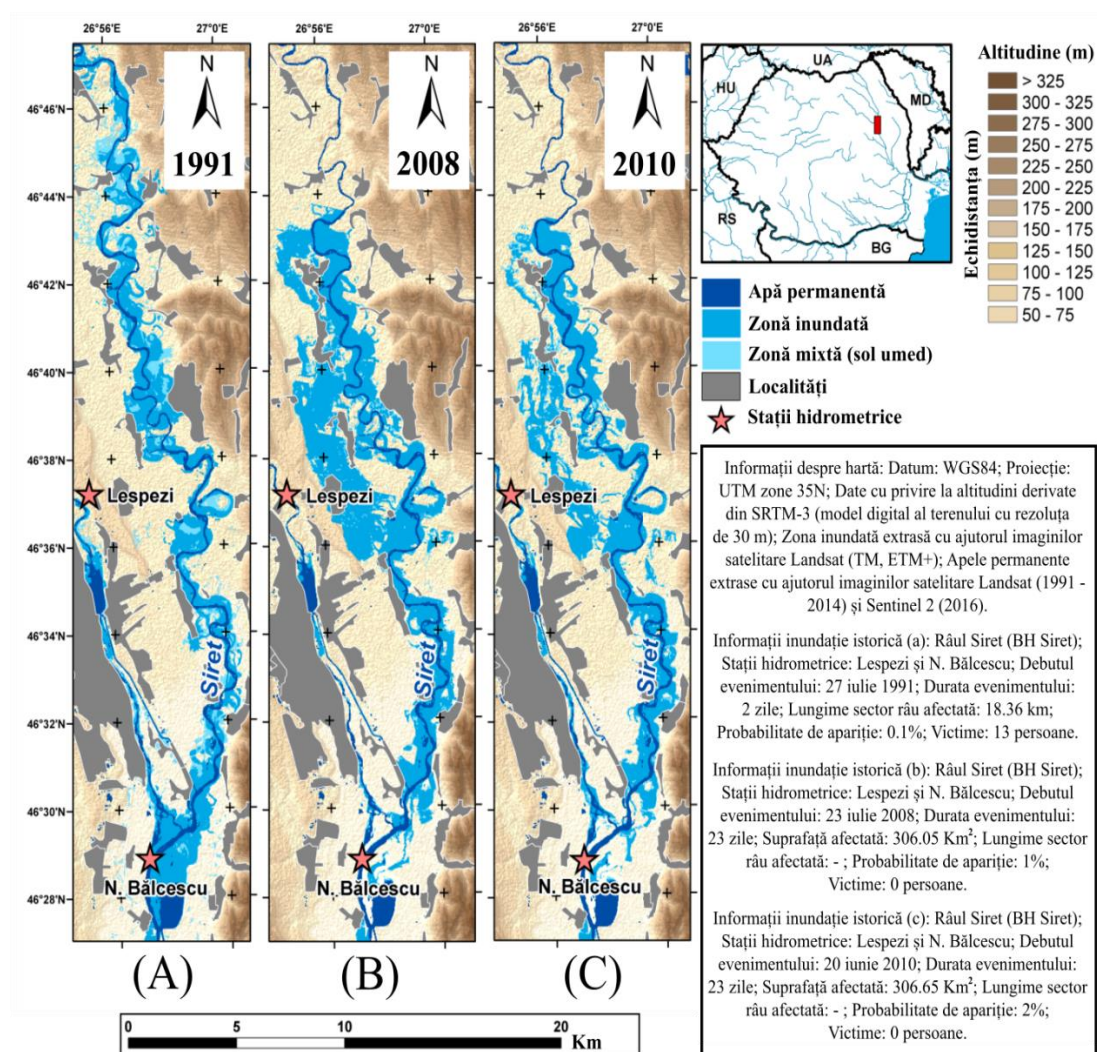


Figura 10 Inundațiile din sectorul mijlociu al râului Siret - (a) 27 iulie 1991, (b) 23 iulie 2008 și (c) 20 iunie 2010, extrase din Landsat TM și Landsat ETM + din data de 31 iulie 1991, 29 iulie 2008 și 3 iulie 2010 (Sursa: [Romanescu et al., 2017](#)).

5.1.1.3 Inundația de pe râul Jijia (bazinul Prut) din anul 1991

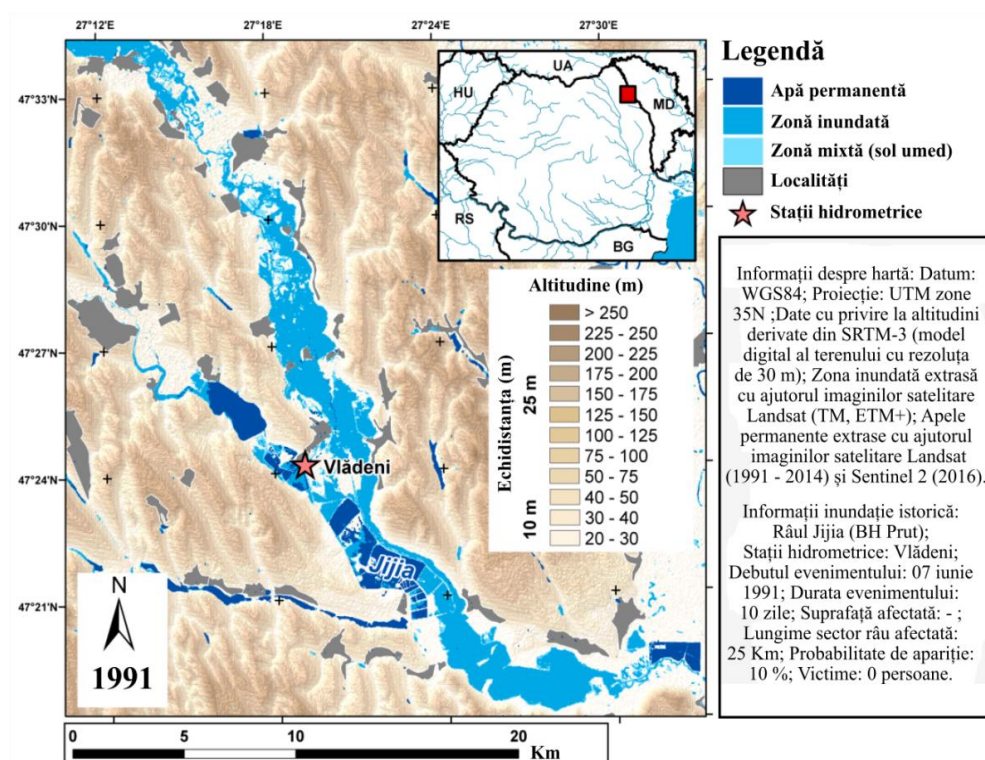


Figura 11 Inundația de pe râul Jijia - 7 iunie 1991, extrasă din imaginea satelitară Landsat TM achiziționată în data de 22 iunie 1991 (Sursa: [Romanescu et al., 2017](#)).

5.1.1.4 Inundația din sectorul superior al râului Prut, din amonte de lacul de acumulare Stânca Costești (2008).

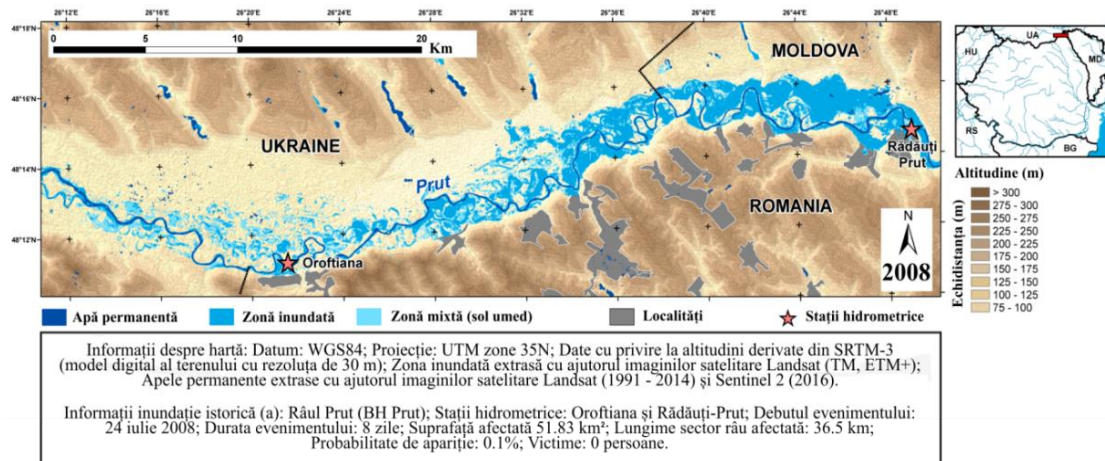


Figura 12 Inundația istorică de pe râul Prut - 24 iulie 2008, extrasă din imaginea satelitară Landsat ETM + achiziționată în data de 29 iulie 2008 (Sursa: [Romanescu et al., 2017](#)).

5.2 Rezultate obținute în urma implementării metodologiei nr. 2 – Harta de hazard la inundații pentru sectorul mijlociu al râului Prut situat între Oroftiana și Rădăuți-Prut

5.2.1 Obținerea unei hărți de hazard la inundații pentru sectorul mijlociu al râului Prut situat între Oroftiana și Rădăuți-Prut folosind exclusiv imagini satelitare radar Sentinel-1.

Datorită disponibilității imaginilor satelitare radar Sentinel-1, o cartografiere zilnică a evenimentului care a debutat pe teritoriul României în data de 24 iunie 2020 a fost posibilă. După extragerea suprafețelor inundate din cele patru imagini satelitare considerate (Figura 13 (A), (B), (C), (D)), o hartă (derivată din imagini satelitare) cu privire la extinderea maximă a inundației ce a durat între 24 iunie 2020 și 27 iunie 2020 a fost realizată cu succes (Figura 13 (E)). Datorită faptului că această hartă delimitează extinderea spațială maximă a unei inundații (surprinzând detaliile zilnice cu privire la fazele de dezvoltare ale unde de viitură), s-a luat în considerare posibilitatea convertirii acesteia într-o hartă de hazard la inundații (cu o probabilitate de apariție atribuită). Pentru a stabili o probabilitate de apariție a inundației menționate, o analiză statistică a valorilor maxime de debit înregistrate în ultimii 42 de ani, la stația hidrometrică Rădăuți-Prut (din anul 1978 și până în anul 2019) a fost realizată. Utilizând legea de probabilitate Gumbel, următoarele rezultate au fost obținute (Tabelul 4).

Tabelul 4 Frecvențele inundațiilor estimate la stația hidrometrică Rădăuți-Prut situată pe râul Prut, în funcție de distribuția Gumbel.

Perioadele de revenire (T)	Probabilitatea de apariție (%)	Variația redusă (Y_t)	Factorul frecvenței (K)	Deversarea probabilă specifică unei perioade de revenire de T ani (X_T) (m ³ /s)
1000	0.1	6.907255	5.5528495	5191.5417
100	1	4.600149	3.539316	3670.2634
33.3	3	3.491366	2.571624	2939.1456
20	5	2.970195	2.116770	2595.4911
10	10	2.250367	1.488538	2120.8451
5	20	1.499939	0.833600	1626.0222

Având în vedere deversările probabile calculate în [Tabelul 4](#) și debitul maxim de 2965 m³/s, înregistrat la stația hidrometrică Rădăuți-Prut în timpul evenimentului de inundație care a avut loc între 24 și 27 iunie 2020 pe cursul mijlociu al Prutului, o perioadă de revenire de 33,67 ani și o probabilitate de apariție de 2,97 % au fost stabilite. Acest lucru a condus la conversia hărții cu privire la extinderea maximă a inundației derivată din imaginile satelitare radar Sentinel-1, într-o hartă de hazard la inundații cu o probabilitate și o perioadă de revenire atribuită ([Figura 13 \(E\)](#)).

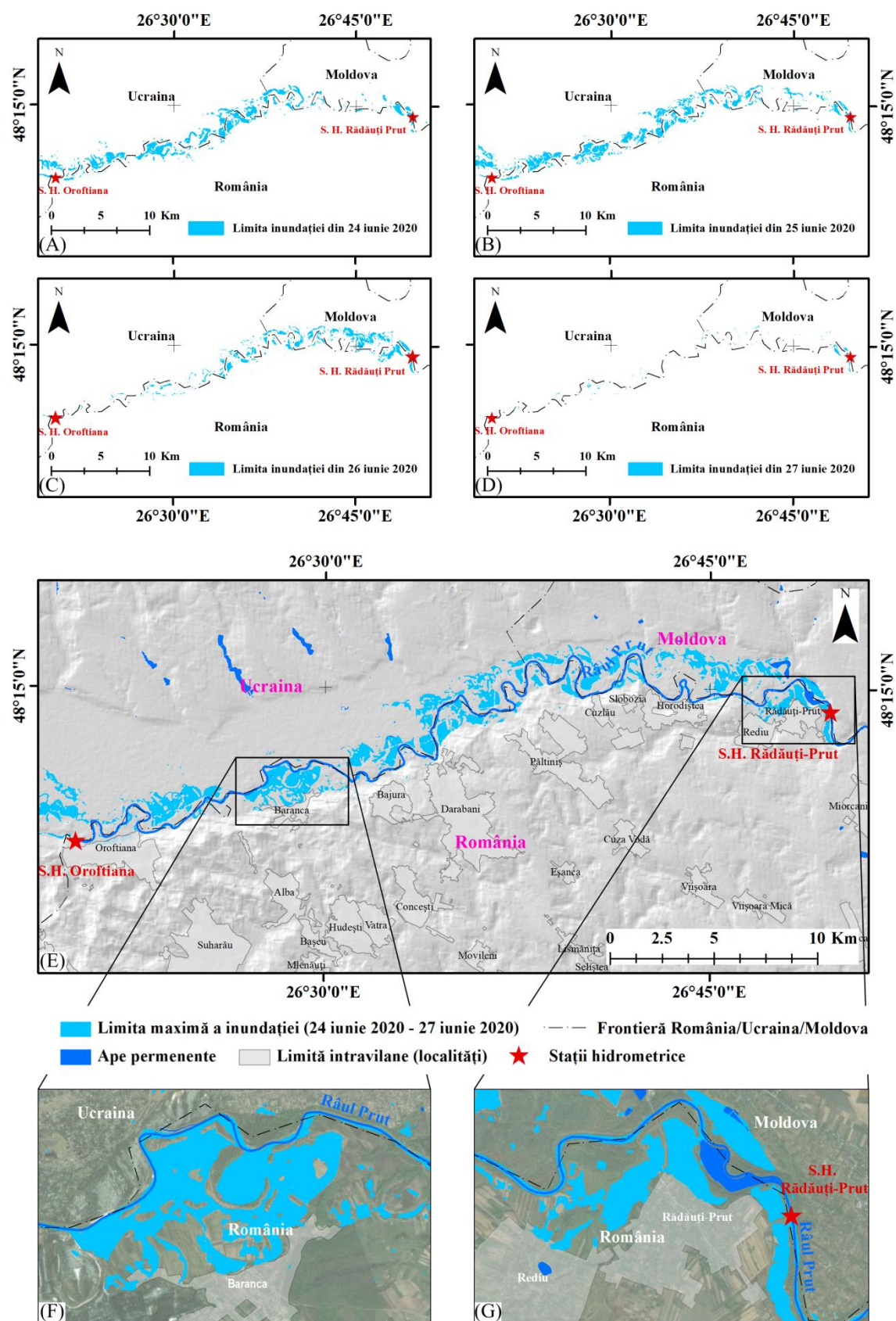


Figura 13 Procesul de obținere a hărții de hazard la inundații cu probabilitate de depășire 2.97%, pentru sectorul mijlociu al râului Prut situat între Oroftiana și Rădăuți-Prut.

5.3 Rezultate obținute în urma implementării metodologiei nr. 3 – Hărți de hazard la inundații pentru sectorul inferior al râului Bistrița ce traversează zona urbană și periurbană a orașului Bacău

Modelarea 2D a fost implementată utilizând versiunea HEC-RAS 5.0.3 care împreună cu funcționalitatea RAS Mapper a oferit un mediu integrat, prielnic manipulării datelor spațiale și non spațiale necesare și de asemenea, exportului rezultatelor obținute. În acest fel, caracteristicile distribuite spațial ale inundațiilor simulate cum ar fi: extinderea spațială (limitele inundațiilor), adâncimea, cota și viteza apei au putut fi vizualizate și exportate sub forma unor animații (surprinzând astfel etapele de dezvoltare ale acestora pe parcursul celor 24 h) și respectiv sub forma unor produse cartografice (pe baza cărora vor fi elaborate hărțile de hazard la inundații). În urma rulării celor 4 scenarii, a căror particularități pot fi consultate în [Tabelul 3](#), fișiere tip raster și vector (specifice fiecărei variabile distribuite spațial menționată anterior) au fost exportate.

5.3.1 Limitele spațiale ale inundațiilor

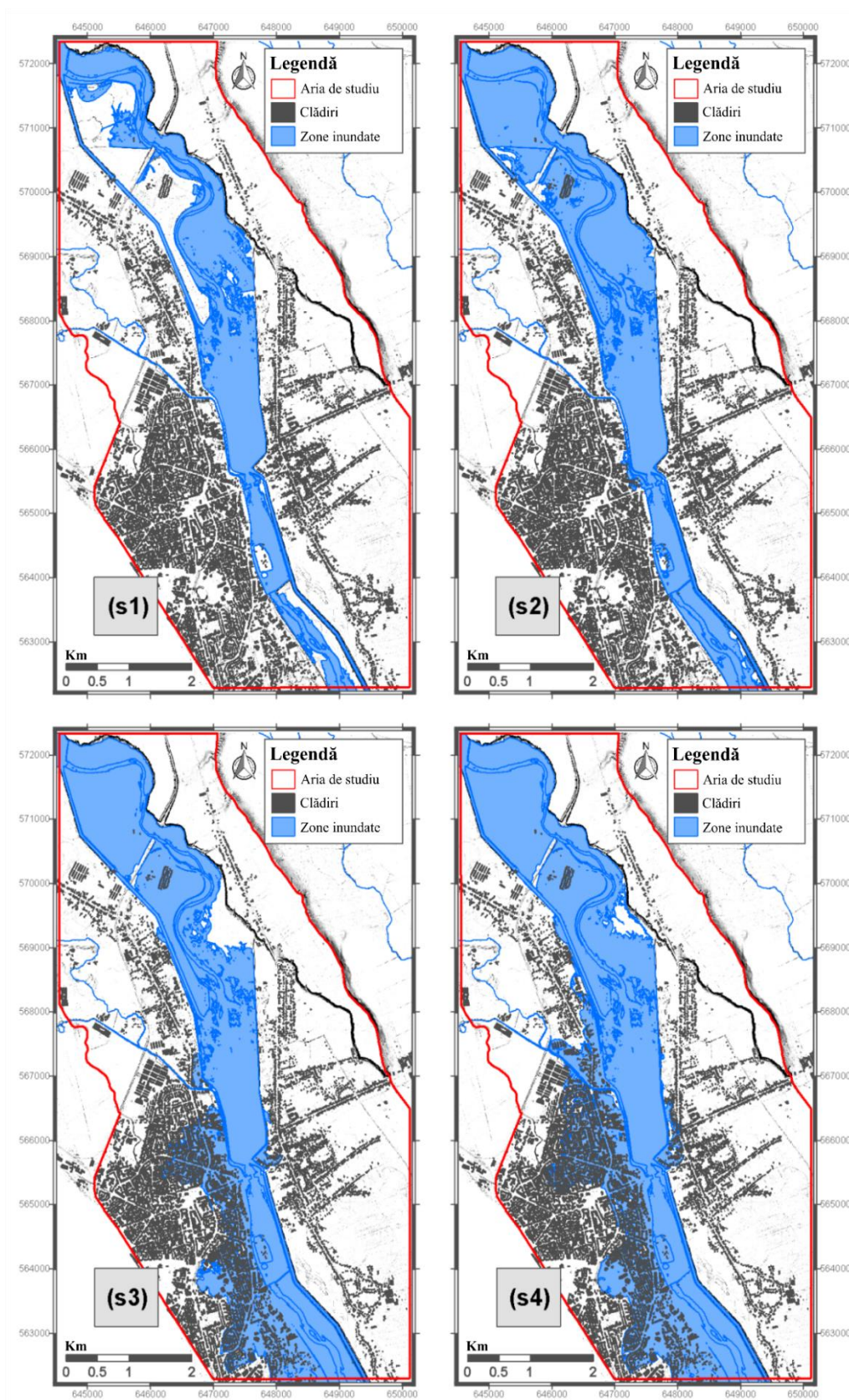


Figura 14 Limitele inundațiilor derivate în urma modelării hidraulice 2D, în funcție de scenariile s1 – s4 prezentate în Tabelul 3 (Sursa: [Mihu-Pintile et al., 2019](#)).

5.3.2 Viteza de curgere a apei la inundație

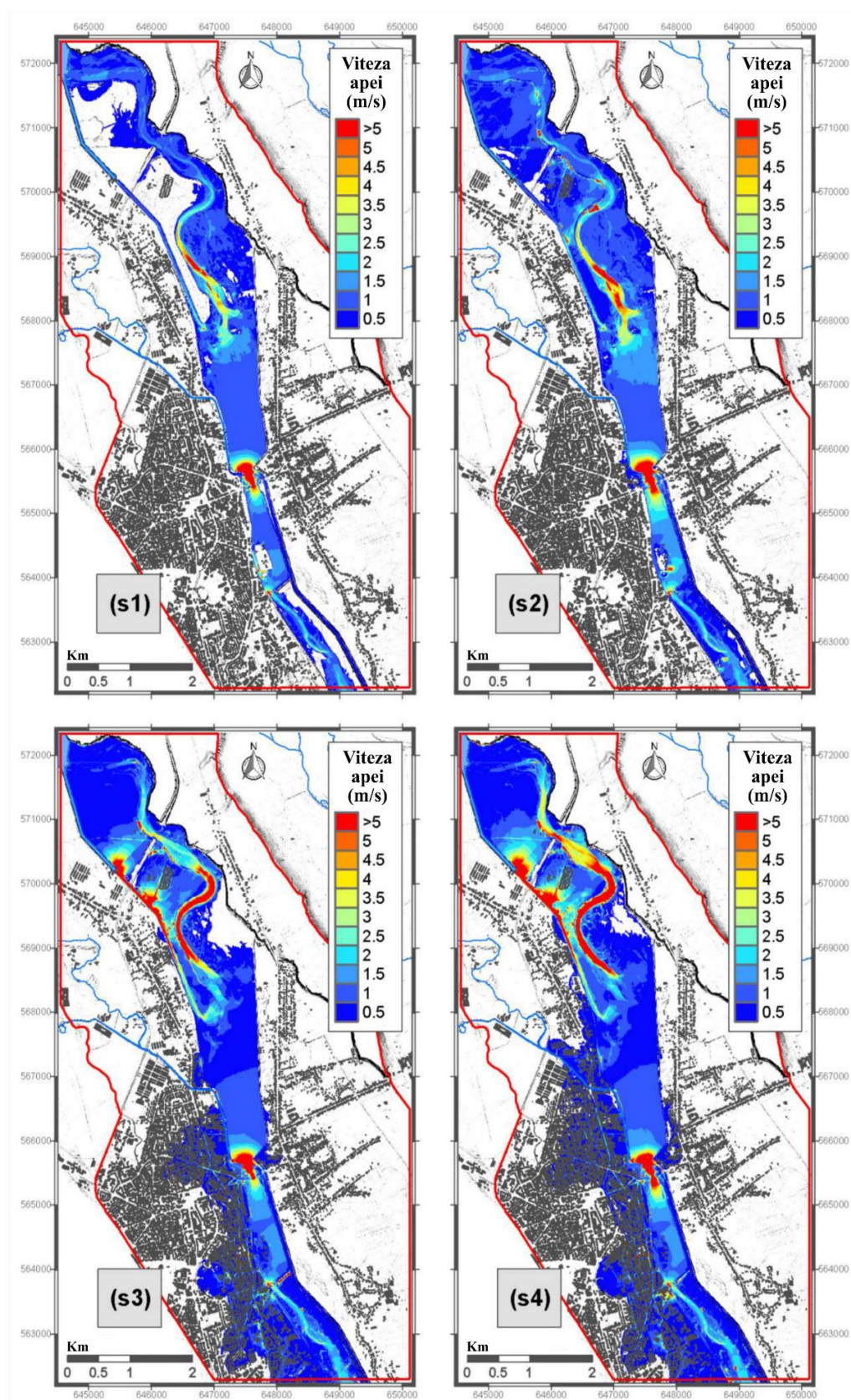


Figura 15 Viteza apei derivată în urma modelării hidraulice 2D, în funcție de scenariile s1 – s4 prezentate în Tabelul 3 (Sursa: [Mihu-Pintile et al., 2019](#)).

5.3.3 Adâncimea apei la inundație

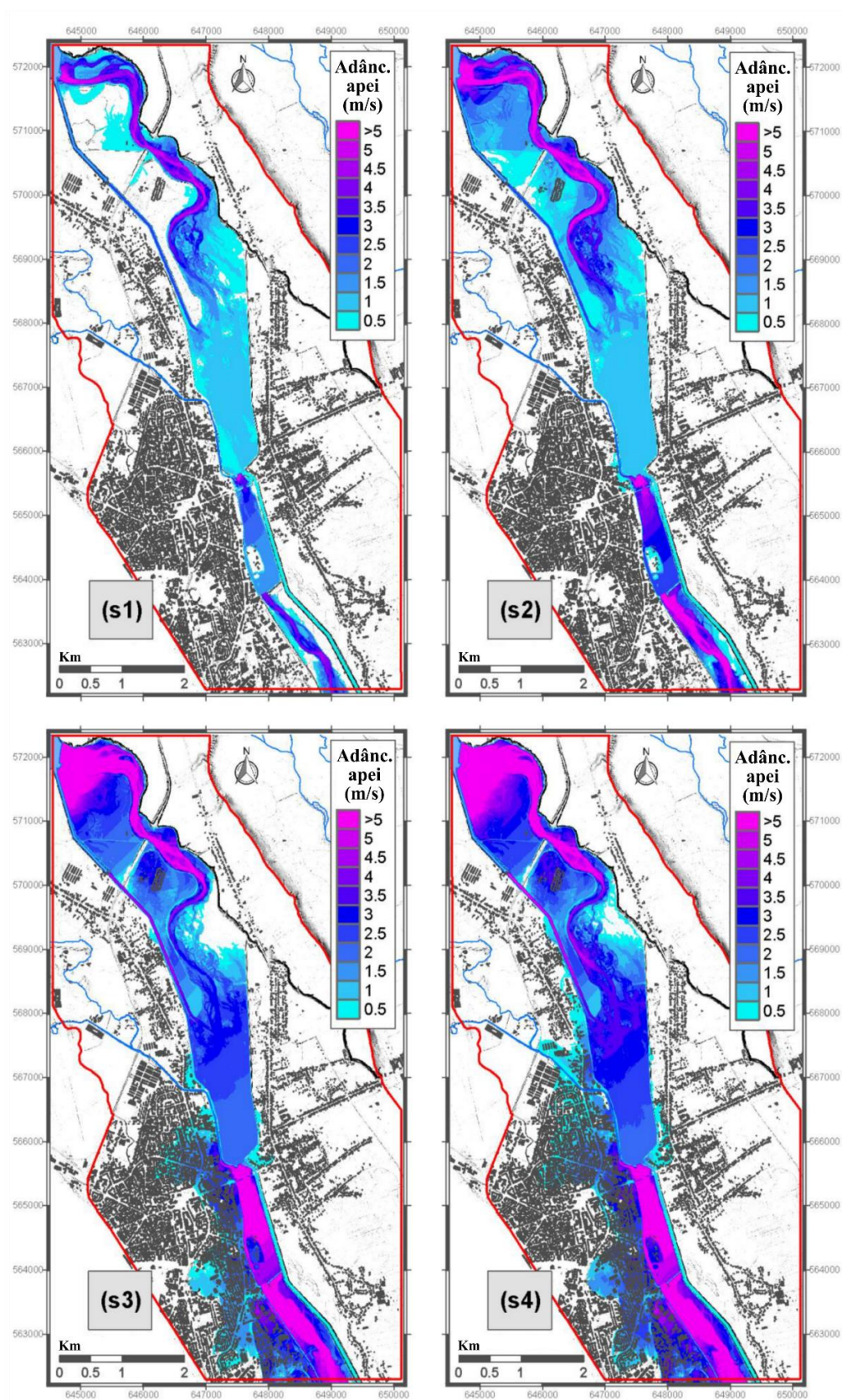


Figura 16 Adâncimea apei derivată în urma modelării hidraulice 2D, în funcție de scenariile s1 – s4 prezentate în Tabelul 3 (Sursa: [Mihu-Pintile et al., 2019](#)).

5.3.4 Evaluarea hazardului la inundații

De obicei, evaluarea hazardului la inundații se bazează pe anumite variabile cuantificabile spațial cum ar fi: limitele spațiale ale inundațiilor, viteza apei și adâncimea acesteia, variabile ce ar putea indica vulnerabilitatea și expunerea zonelor construite (și a altor obiective de interes), în cazul producerii unor evenimente hidrologice cu un posibil impact distructiv. În cadrul studiului de față evaluarea hazardului la inundații a fost realizată folosind datele cu privire la extinderea spațială a inundațiilor și a adâncimii apei asociată (pentru fiecare scenariu dezvoltat în parte s1 – s4), viteza apei nefiind luată în considerare deoarece aceasta este o variabilă constantă în toate cele 4 scenarii de inundații elaborate (> 80% din suprafața totală construită fiind afectată de viteze ale apei < 1 m). Pentru a genera categoriile de pericol la inundații, adâncimea apei (specifică fiecărui scenariu), a fost clasificată în conformitate cu criteriile Ministerului Infrastructurii Terestre și a Transporturilor din Japonia (MLIT) (Quiroga et al., 2016). În acest fel, cinci categorii de hazard la inundații: H1 – pericol foarte scăzut (adâncimea apei < 0.5 m); H2 – pericol scăzut (adâncimea apei 0.5 – 1 m); H3 – pericol mediu (adâncimea apei între 1 și 2 m); H4 – pericol ridicat (adâncimea apei între 2 și 5 m); H5 – pericol extrem (adâncimea apei de peste 5 m). Metodologia de clasificare a hazardului la inundații (conform criteriilor menționate mai sus) este descrisă în detaliu în Tabelul 5.

Tabelul 5 Clasificarea hazardului la inundații pe baza adâncimii apei conform MLIT (Quiroga et al., 2016).

Hazardul la inundații	Adâncimea apei (m)	Clasele de hazard	Descrierea hazardului
H1	<0.5	Scăzut	Inundația nu prezintă pericol pentru oameni iar evacuarea acestora se poate efectua pe jos.
H2	0.5–1	Mediu	Inundația prezintă pericole pentru copii în același timp evacuarea adulților pe jos devenind dificilă; evacuarea devine mai complicată.
H3	1–2	Ridicat	Adâncimea inundației poate cauza victime prin înec; oamenii ar putea fi în siguranță în casele lor.
H4	2–5	Foarte ridicat	Oamenii sunt expuși chiar și în interiorul caselor lor; în acest caz se recomandă evacuarea către acoperișul caselor.
H5	>5	Extrem	Structurile construite, cum ar fi locuințele, pot fi acoperite integral de inundație; oamenii pot fi înecați chiar și în cazul evacuării spre acoperișul caselor.

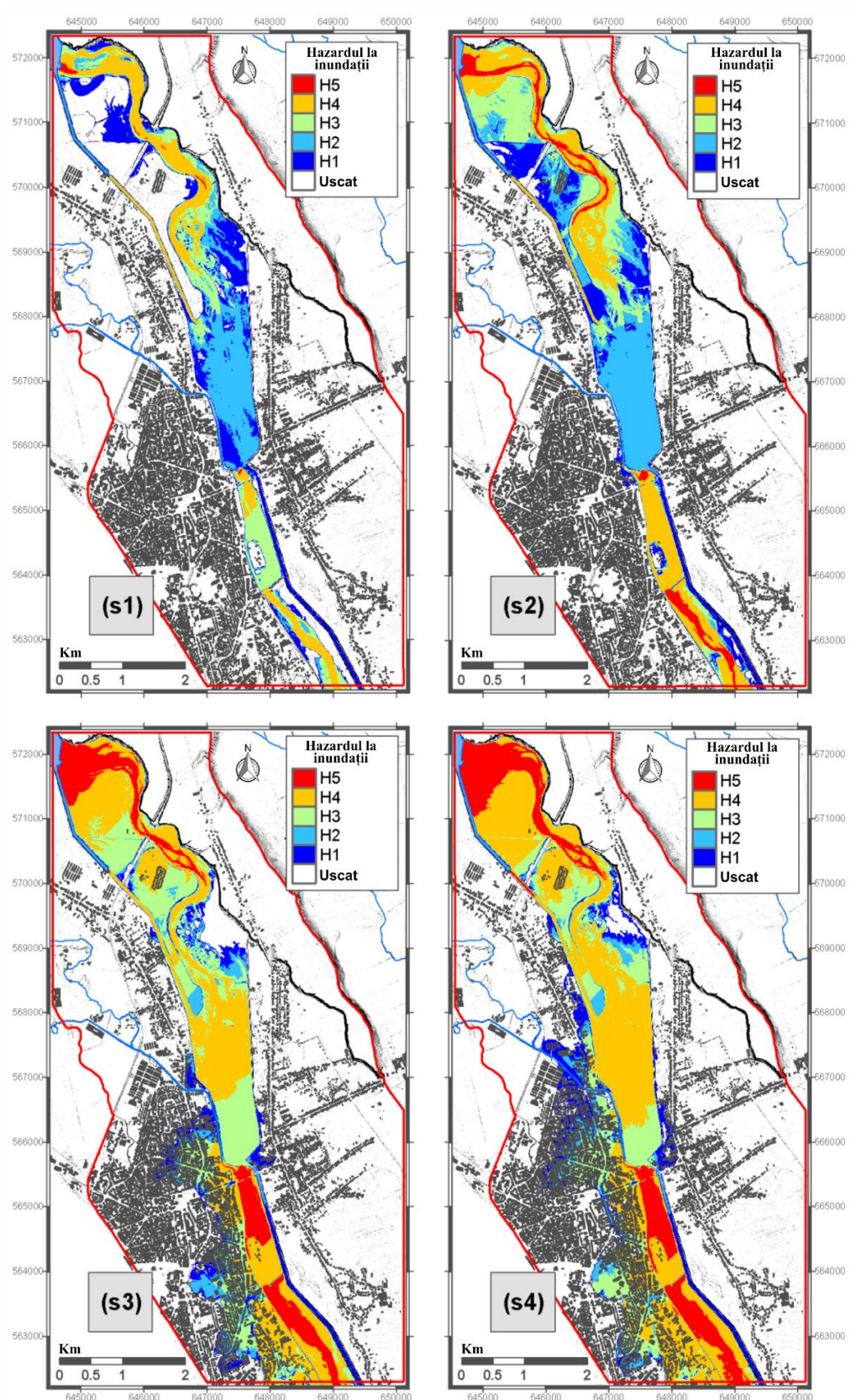


Figura 17 Hărți de hazard obținute în urma clasificării adâncimii apei la inundație conform criteriilor MLIT. Nivelul de pericol specific zonei a fost stabilit astfel pentru fiecare dintre cele 4 scenarii (s1 – s4) prezentate în Tabelul 3 (Sursa: [Mihu-Pintile et al., 2019](#)).

DISCUȚII

Metodologiile nr. 1 și 2 ce integrează: (1) imagini satelitare optice (Landsat și Sentinel-2), metoda clasificări supervizate, metoda indicilor spațiali și SIG; (2) imagini satelitare radar (Sentinel-1), metoda manipulării histogramei, legile probabilistice de analiză a frecvențelor inundațiilor (metoda Gumbel) și SIG, reprezintă două metodologii de evaluare a hazardului la inundații validate de literatura de specialitate internațională și națională (Romanescu et al., 2017). Pe baza disponibilității și îmbogățirii fondului de date satelitare din ultimii anii, aceste metodologii au început a fi din ce în ce mai aplicate, mai ales în zonele unde modelarea hidraulică este imposibil de realizat (datorită indisponibilității unui model digital al terenului la o rezoluție adecvată, ex: LiDAR). În acest sens, punerea în aplicare a acestora în cadrul regiunii de N-E a României, a condus la elaborarea unor noi modalități de evaluare a hazardului la inundații (alternative modelării hidrologice) și implicit la noi posibilități de realizare a hărților cu privire la delimitarea spațială a inundațiilor (derivate din imagini satelitare) și a hărților de hazard la inundații în regiune. Având în vedere faptul că la nivel național hărțile de hazard la inundații oficiale au fost realizate prin utilizarea metodologiilor și programelor de modelare (84%) și prin metode simplificate (16%), cele două metodologii bazate pe utilizarea imaginilor satelitare optice și/sau radar, vin ca o completare a practicilor oficiale existente.

Aplicarea unei metodologii de modelare hidraulică 2D și utilizarea unui model digital al terenului - LiDAR îmbunătățit, la o rezoluție de 0.5 m (într-un mediu SIG, HEC-RAS, RAS Mapper), s-a dovedit a fi combinația ideală în vederea delimitării precise a limitelor inundațiilor ipotetice (probabile), în funcție de diferite valori de debit și de asemenea în stabilirea gradului de expunere și vulnerabilitate al populației din zona urbană și periurbană a orașului Bacău. Datorită capacității de a surprinde într-un mod mult mai precis condițiile hidraulice complexe care pot fi întâlnite în albiile minore și majore inundabile, caracterizate de altitudine joasă (de exemplu, canale, confluențe, poduri, drumuri, maluri, alte elemente naturale sau artificiale etc.), modelul hidraulic 2D adoptat, a putut reproduce comportamentul hidraulic al râului într-un mod mult mai realist. Mai mult, pe lângă extinderea spațială a inundațiilor, prin adoptarea acestei metodologii au putut fi derivate și alte variabile georeferențiate spațial ca: adâncimea, viteza și cota suprafeței libere a apei.

Prin, implementarea acestei metodologii la scară locală (și mai ales prin utilizarea unui model digital al terenului - LiDAR îmbunătățit, la o rezoluție de 0.5 m), s-a adus o

îmbunătățire concretă a metodologiei oficiale (adoptată la nivel național) și implicit pentru zona de studiu considerată. Hărțile de hazard dezvoltate astfel, oferă o nouă perspectivă asupra pericolului la care se expun locuitorii orașului Bacău și a localităților limitrofe (mai ales în cazul în care barajul lacului de acumulare Lilieci II ar ceda sau ar fi supus unei administrări defectuoase). Totodată acestea oferă gradul de precizie necesar desfășurării anumitor activități de promovare a investițiilor și ale proiectării anumitor elemente de infrastructură (ex: stații de epurare ale apelor uzate, anumite structuri rutiere, etc.), aspecte ce sunt omise la momentul actual de hărțile de hazard la inundații oficiale. Un alt element de noutate pe care această metodologie l-a adus constă în surprinderea distribuției vitezei apei (aspect neluat în considerare în procesul de elaborare a hărților de hazard la inundații oficiale și momentan indisponibil la nivel național) (Figura 15).

CONCLUZII

Concluzii în urma implementării metodologiei nr. 1

Pentru cartografierea rapidă a inundațiilor (ce au avut loc în trecut), utilizarea imaginilor open-source (Landsat și Sentinel-2) s-a dovedit o practică benefică, oferind un acces imediat asupra statusului inundațiilor și asupra unor stadii de dezvoltare ale acestora. În zonele inundabile, joase altitudinal, adâncimea apei inundațiilor este scăzută, însă suprafața acoperită de ape este mare, acest aspect oferind posibilitatea de a fi cartografiată. De asemenea, în cadrul acestei metodologii ne-am bazat și pe faptul că perioada de inundare a unei zone umede (predispusă la inundații) are un caracter continuu - persistent și astfel poate fi cartografiată și în zilele imediat următoare vârfului inundației.

În cadrul acestei metodologii s-a realizat cu succes cartografierea inundațiilor istorice ce au avut loc în cadrul bazinelor hidrografice ale râurilor Siret și Prut în ultimii 30 de ani. În acest sens, hărți cu privire la extinderea spațială a inundațiilor (derivate din imagini satelitare), ale evenimentelor de inundație istorice au fost realizate (în funcție de disponibilitatea acestora în cadrul arhivei de date Landsat). Metodele de cartografiere aplicate aici, s-au dovedit eficiente din punct de vedere ale costurilor financiare și al timpului alocat, producția de hărți ale evenimentelor de inundație menționate neimplicând costuri financiare. Cu toate că, aceste hărți ale evenimentelor de inundație istorice au fost corelate cu anumite probabilități de inundație (datorită debitului maxim înregistrat în acest sens la stații hidrometrice din apropiere), acestea nu pot fi considerate hărți de hazard la inundații de sine stătătoare deoarece nu surprind unda de viitură în toate stadiile de dezvoltare.

Aceste hărți nu fac altceva decât să reprezinte spațial un moment temporal exact și precis al inundației. Pentru a realiza hărți de hazard la inundații (folosind exclusiv imagini satelitare și metode specifice), o serie de condiții sunt necesare a fi îndeplinite cumulativ. Printre acestea, disponibilitatea cel puțin zilnică a imaginilor satelitare, pe tot parcursul temporal al unde de viitură este imperativă. Chiar și cu aceste neajunsuri tehnice și metodologice enumerate, utilitatea acestor produse cartografice este consemnată în transpunerea acestora (de către autoritățile competente și/sau factorii de decizie), în instrumente de informare a publicului cu privire la evenimentele din trecut (pentru a conștientiza riscul la inundații la care poate fi expus în viitor și astfel să dobândească forme de comportament adecvate în cazul producerii unui alt eveniment similar în viitor). Rezultatele obținute, sub forma de hărți cu privire la extinderea spațială a inundațiilor (derivate din imagini satelitare), se încadrează ca date suplimentare privind hărțile de hazard și risc la inundații oficiale, disponibile la nivel național și care pot fi consultate accesând pagina oficială a Administrației Naționale Apele Române (<http://apele-romane.ro/ro/page/harti-de-hazard-si-risc>).

Concluzii în urma implementării metodologiei nr. 2

Hărțile cu privire la extinderea spațială a inundațiilor (derivate din imagini satelitare) pot fi utilizate cu succes în evaluarea hazardului la inundații din zonele transfrontaliere, unde granița este reprezentată de un râu. De cele mai multe ori, în acest sens, imaginile satelitare reprezintă singura opțiune de realizare a hărților de hazard. Acesta este și cazul sectorului superior al râului Prut (graniță naturală între Ucraina, România și Republica Moldova) care în ultimii ani a înregistrat episoade de inundații majore. În acest caz, lipsa datelor topografice de rezoluție înaltă (a modelului digital de elevație - LiDAR) dar și existența reglementărilor legislative diferite privind managementul riscului la inundații (dintre cele trei țări, România fiind singura țară membră a Uniunii Europene), face ca evaluarea hazardului la inundații să fie nerealizabilă în acest moment prin metode hidraulice de modelare. Din acest motiv, cartografierea inundațiilor ce au avut loc în trecut folosind imagini satelitare constituie o soluție ideală în încercările de identificare a zonelor cu potențial ridicat de inundație și implicit în realizarea hărților de hazard. Realizarea unei hărți de hazard la inundații utilizând exclusiv imagini satelitare este un proces dificil de realizat, acest lucru fiind condiționat de corelații cu date statistice provenite de la stațiile hidrometrice (pentru a stabili probabilitatea de apariție a inundației), dar și de existența

unor imagini satelitare capabile a surprinde unda de inundație pe tot parcursul ei spațial și temporal.

De asemenea, în aceste circumstanțe, adâncimea sau viteza apei este dificil de determinat. Cu toate acestea, în încercarea de cartografiere a unei inundații ce a avut loc pe râul Prut (în sectorul de râu menționat anterior), în luna iunie a anului 2020, condiția de disponibilitate și continuitate a imaginilor satelitare (pe întreg parcursul unde de viitură) a fost îndeplinită. Imaginile satelitare radar Sentinel-1 (datorită rezoluției temporale ridicate și a posibilității de achiziție a imaginilor indiferent de condițiile meteorologice), au reușit să surprindă evenimentul hidrologic pe întreaga durată a acestuia (de la activarea acestuia în data de 24.06.2020 pe teritoriul Ucrainei până la trecerea unde de viitură în data de 27.06.2020, pe teritoriul situat între România și Rep. Moldova).

Astfel, implementarea acestei metodologii a dus la îndeplinirea obiectivului specific nr. 1 și anume la realizarea unei hărți de hazard la inundații folosind exclusiv date și metode specifice teledetecției. În același timp, această metodologie propusă poate fi cu ușurință extrapolată, reprezentând o soluție alternativă pentru sectoarele de râu în care acest tip de informație lipsește sau este incomplet.

Concluzii în urma implementării metodologiei nr. 3

Metodologia adoptată, a fost aplicată cu succes și a permis dezvoltarea a 5 scenarii de simulare a inundațiilor (scenarii care au luat în considerare valori de debit reale (Q_{avg}) și ipotetice ($s1 - s4$), evacuate/sau care ar putea fi evacuate din cadrul lacului de acumulare Lilieci) și care s-au întins temporal pe o perioadă de 24 h ([Tabelul 3](#)). Abordarea bazată pe scenarii de simulare a inundațiilor a permis testarea capacității de curgere a apei în întreaga albie a râului Bistrița, poziționată în aval de lacul de acumulare Lilieci (rB1), reușind totodată a determina, valoarea de debit critică care ar putea declanșa un eveniment de inundație în această zonă.

Scenariul Q_{avg} , dezvoltat pe baza deversărilor reale, operate în anul 2012 de administrația amenajării hidrotehnice Lilieci (rB1), s-a dovedit a fi satisfăcător, în ceea ce privește validarea celor patru scenarii ipotetice ($s1 - s4$).

Referitor la scenariile $s1$ și $s2$, acestea au reușit a menține cantitatea de apă eliberată din acumularea Lilieci (rB1), în interiorul digurilor de protecție aflate în albia râului Bistrița (în aval de rB1). Conform acestor două scenarii, un debit de până la $980 \text{ m}^3/\text{s}$, eliberat timp de o oră (în dreptul stăvilor barajului ($Sw1$), atunci când două stăvile ale acestuia sunt complet deschise) și $34 \text{ m}^3/\text{s}$ eliberați timp de 24 de ore, prin turbinele

hidrocentralei H-pp, reprezentând debitul mediu anual turbinat (din care rezultă un debit maxim cumulat Sw1 - H-pp specific unei singure ore de 1014 m³/s), poate fi gestionat de lucrările hidrotehnice din aval. Inundațiile ipotetice aferente acestor două scenarii nu afectează elemente de infrastructură (civile sau industriale), localizate în afara digurilor de protecție. Scenariul 2 (s2), permite eliberarea a 6.465.600 m³ de apă (în perioada de 24 de ore aferentă simulării și conform hidrografului de intrare), ilustrând întinderea spațială unei inundații posibile, în cazul în care aproximativ toată apa conținută în acumularea Lilieci (rB1) ar fi evacuată. Conform regulamentului de exploatare al amenajării hidrotehnice - Lilieci (rB1) și a curbei de capacitate a acesteia, la o altitudine a cotei suprafeței apei de 178.64 m, lacul de acumulare înmagazinează 6.770.000 m³ de apă (această valoare situându-se peste nivelul normal de retenție - NNR). Considerând acest fapt, scenariul 2 (s2) stimulează eliberarea a mai mult de 95% din această cantitatea de apă. Cu toate acestea, chiar și în cazul acestui scenariu catastrofal, apele nu se revarsă peste elementele de protecție hidrotehnică aferente râului Bistrița și câmpiei sale inundabile din aval de rB1.

Revărsarea peste elementele de protecție în zona urbană și periurbană a orașului Bacău începe cu scenariul 3 (s3), care simulează o inundație cauzată de un debit cumulat de 1470 m³/s, scurs timp de o oră (în dreptul stavilelor barajului (Sw1), atunci când trei stavile ale acestuia sunt complet deschise) și de 34 m³/s eliberați timp de 24 de ore, prin turbinele hidrocentralei H-pp. Acest scenariu delimitează spațial o inundație ipotetică determinată de un debit maxim cumulat (Sw1 - H-pp) specific unei ore de 1504 m³/s și permite evacuarea din cadrul acumulării Lilieci (rB1) a unui volum total de 8.229.600 m³ de apă. Conform regulamentului de exploatare al amenajării hidrotehnice, acest volum de apă corespunde în mare măsură cu nivelul maxim de exploatare - NME de 8.180.000 m³ (volum care poate fi conținut în lacul de acumulare dacă cota suprafeței apei ar atinge un nivel de aproximativ 179.14 m).

Metodologia adoptată în acest caz a permis surprinderea unor posibile inundații, ce ar putea fi declanșate de anumite descărcări operate în cadrul amenajării hidrotehnice Lilieci (rB1). Rezultatele modelării 2D, sub forma unor parametri spațiali ca: extinderea inundației, adâncimea apei, viteza apei și cota suprafeței libere a apei au fost exportate și prelucrate în așa fel încât anumite întrebări cu privire la hazardul la inundații (specific zonei de studiu), să poată primi răspunsuri concrete. În acest fel, evaluarea hazardului la inundații și a expunerii suprafețelor construite localizate în aval de lacul de acumulare Lilieci (rB1) a fost realizată cu succes. Produsele cartografice obținute, sub forma hărților de hazard la inundații (care iau în considerare adâncimea apei) cât și cuantificarea gradului

de expunere al construcțiilor afectate de inundațiile specifice scenariilor dezvoltate, constituie elemente de bază în cadrul procesului de management al inundațiilor (care în acest caz particular este puternic influențat de prezența acumulării Lilieci – rB1). Pe baza acestora numeroase măsuri și activități specifice managementului riscului la inundații (ce vizează diminuarea efectelor negative produse de inundații), pot fi schițate și puse în aplicare.

Metodologia adoptată în cadrul acestui flux de lucru a dus la îndeplinirea obiectivului specific nr. 2 ce a constat în aplicarea la scară locală a unei metode de modelare hidraulică 2D și implicit realizarea de hărți de hazard la inundații considerând factorii locali ce guvernează posibilitatea producerii unei inundații. Totodată ținta obiectivului specific nr. 3 a fost atinsă, această metodologie fiind capabilă a îmbunătății și completa hărțile de hazard la inundații oficiale deja existente, astfel încât acestea să se preteze activităților de promovare a investițiilor și ale proiectării anumitor elemente de infrastructură (ex: stații de epurare ale apelor uzate, anumite structuri rutiere, etc.).

MENTIUNI

Cele trei metodologii de evaluare a hazardului la inundații propuse și dezvoltate în cadrul acestei lucrări de doctorat au fost materializate și validate de următoarele publicații științifice ISI:

- Metodologia nr. 1 a fost publicată în Journal Of Maps, factor de impact în anul 2019: 2.365.
Romanescu, G., Cîmpianu, C.I., Mihu-Pintilie, A., & Stoleriu, C.C. (2017). Historic flood events in NE Romania (post-1990), Journal of Maps, 13:2, 787-798, doi: <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1383944>.
- Metodologia nr. 3 a fost publicată în Water, factor de impact în ultimii 5 ani: 2.709.
Mihu-Pintilie, A., Cîmpianu, C.I., Stoleriu, C.C., Pérez, M.N., & Paveluc, L.E. (2019). Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach. Water, 11, 1832, doi: <https://doi.org/10.3390/w11091832>.
- Metodologia nr. 2 se află în curs de publicare.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Abburu, S., & Golla, S.B. (2015). Satellite Image Classification Methods and Techniques: A Review. *International Journal of Computer Applications* (0975-8887), Vol. 119, No.8.
- Abdalla, R., & Esmail, M. (2019). Introduction to Disaster and Emergency Management Science. In: *WebGIS for Disaster Management and Emergency Response. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development)*. Springer, Cham, doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-03828-1_1.
- Abdelkarim, A., Al-Alola, S.S., Alogayell, H.M., Mohamed, S.A., Alkadi, I.I., & Ismail I.Y. (2020). Integration of GIS-Based Multicriteria Decision Analysis and Analytic Hierarchy Process to Assess Flood Hazard on the Al-Shamal Train Pathway in Al-Qurayyat Region, Kingdom of Saudi Arabia. *Water*, 12, 1702, doi:https://doi.org/10.3390/w12061702.
- Abrams, M., Tsu, H., Hulley, G., Iwao, K., Pieri, D., Cudahy, T., & Kargel, J. (2015). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 38, 292-301, ISSN 0303-2434, doi:https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.01.013.
- Acharya, T.D., Subedi, A., & Lee, D.H. (2018). Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors*, 18, (8), 2580, doi:https://doi.org/10.3390/s18082580.
- Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., Martinez-Peiró, M., & De la Hoz-Franco, E. (2018). Real-Time Early Warning System Design for Pluvial Flash Floods - A Review. *Sensors*, 18, 2255, doi:10.3390/s18072255.
- Adamson, M. (2018). Flood Risk Management In Europe: The EU 'Floods' Directive and a Case Study of Ireland. *International Journal of River Basin Management*, Volume 16, Issue 3, 261-272, doi:10.1080/15715124.2018.1437744.
- Adger, W.N. (2006). Vulnerability, *Global Environmental Change*, Vol. 16, Issue 32, 268-281, ISSN 0959-3780, doi: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.
- Adjim, H., Djedid, A., & Hamma, W. (2017). Urbanism, climate change and floods: Case of Tlemcen city in Algeria. *Urbanism. Architecture. Constructions*, 9, (1), 71-80.
- Adlyansah, A.L., Husain R., & Pachri, H. (2019). Analysis Of Flood Hazard Zones Using Overlay Method With Figused-Based Scoring Based On Geographic Information Systems: Case Study In Parepare City South Sulawesi Province. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 280 012003.
- Agard, J., & Schipper, E.L.F., Editorial Board Co-Chairs, (2014). Glossary Annex II 1757. In: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.) IPCC 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Aggarwal, A. (2016). Exposure, hazard and risk mapping during a flood event using open source geospatial technology. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7, 4, 1426-1441, doi:10.1080/19475705.2015.1069408.
- Aggarwal, S. (2004). Principles of Remote Sensing. În Sivakumar, M.V.K., Roy, P.S., Harmsen, K., & Saha, S.K. (edit.), *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland.
- Agrawal, S., & Khairnar, G.B. (2019). A comparative assessment of Remote Sensing imaging techniques: Optical, SAR and LIDAR. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-5/W3.
- Ahlqvist, O. (2009). Overlay (in GIS), Editor(s): Rob Kitchin, Nigel Thrift, *International Encyclopedia of Human Geography*, Elsevier, 48-55, ISBN 9780080449104, doi:https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00487-9.

- Ahmadalipour, A., & Moradkhani, H. (2019). A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996–2017. *Journal of Hydrology*, Vol. 578, 124106, ISSN 0022-1694, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124106>.
- Akter, T., Quevauviller, P., Eisenreich, S.J., & Vaes, G. (2018). Impacts of climate and land use changes on flood risk management for the Schijn River, Belgium. *Environmental Science & Policy*, Vol. 89, 163-175, ISSN 1462-9011, doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.07.002>.
- Al Faisal, A., Al Kafy, A., & Roy, S. (2018). Integration of Remote Sensing and GIS Techniques for Flood Monitoring and Damage Assessment: A Case Study of Naogaon District, Bangladesh. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 07, (02), doi:10.4172/2469-4134.1000236.
- Alahacoon, N., Matheswaran, K., Pani, P., & Amarnath, G. (2018). A Decadal Historical Satellite Data and Rainfall Trend Analysis (2001–2016) for Flood Hazard Mapping in Sri Lanka. *Remote Sens.*, 10, 448, doi:10.3390/rs10030448.
- Albano, R., Mancusi, L., Sole, A., & Adamowski, J. (2015). Collaborative Strategies for Sustainable EU Flood Risk Management: FOSS and Geospatial Tools-Challenges and Opportunities for Operative Risk Analysis. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 4, 2704-2727.
- Albano, R., Samela, C., Crăciun, I., Manfreda, S., Adamowski, J., Sole, A., Sivertun, Å., & Ozunu, A. (2020). Large Scale Flood Risk Mapping in Data Scarce Environments: An Application for Romania. *Water*, 12, 1834, doi:<https://doi.org/10.3390/w12061834>.
- Albu, L-M., Enea, A., Iosub, M., & Breabăn, I-G. (2020). Dam Breach Size Comparison for Flood Simulations. A HEC-RAS Based, GIS Approach for Drăcșani Lake, Sitna River, Romania. *Water*, 12, (4), 1090, doi:<https://doi.org/10.3390/w12041090>.
- Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47, 107-124.
- Al-doski, J., Mansor, S.B., & Mohd Shafri H.J. (2013). Image Classification in Remote Sensing. *Journal of Environment and Earth Science*, Vol. 3, No.10, ISSN 2224-3216 (Paper) ISSN 2225-0948 (Online).
- Alexander, D. (1991). Natural Disasters: A Framework for Research and Teaching. *Disasters*, 15, 209-226, doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1991.tb00455.x>.
- Alexander, D. (1995). A Survey of the Field of Natural Hazards and Disaster Studies. In: Carrara, A., & Guzzetti, F. (eds) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 5. Springer, Dordrecht, doi:https://doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_1.
- Alexander, D. (1997). The Study of Natural Disasters, 1977-97: Some Reflections on a Changing Field of Knowledge. *Disasters*, 21, (4), 284-304, doi:10.1111/1467-7717.00064.
- Alexander, D. (1999). *Natural Disasters*, Kluwer Academic Publishers, ISBN 978-0-412-04741-1.
- Alexander, D. (2000). *Confronting Catastrophe: New Perspectives on Natural Disasters*, New York: Oxford University Press.
- Alexander, D. (2013). Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 2707-2716, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/2707/2013/, doi:10.5194/nhess-13-2707-2013.
- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F., & Bianchi, A. (2015). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, Vol. 35, 199-212, ISSN 0959-3780, doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004>.
- Ali, K., Bajracharya, R.M., & Koirala, H.L. (2016). A Review of Flood Risk Assessment. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, Vol. 1, 4, ISSN: 2456-1878, doi:<http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/1.4.62>.
- Alkema, D. (2007). *Simulating Floods: On the Application of a 2D-hydraulic Model for Flood Hazard and Risk Assessment*. Ph.D. Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, ITC Enschede, Enschede, The Netherlands, Disponibil online: <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/23283> (accesat la data de 23 Aprilie 2019).
- Alkema, D., & Middelkoop, H. (2005). The Influence of Floodplain Compartmentalization on Flood Risk within the Rhine–Meuse Delta. *Natural Hazards*, 36, 125-145, doi:10.1007/978-1-4020-4200-3_2.

- Allen, S.K., Ballesteros-Canovas, J., Randhawa, S.S., Singha, A.K., Huggel, C., & Stoffel, M. (2018). Translating the concept of climate risk into an assessment framework to inform adaptation planning: Insights from a pilot study of flood risk in Himachal Pradesh, Northern India. *Environmental Science & Policy*, Volume 87, 1-10, ISSN 1462-9011, doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.013>.
- Alzahrani, A.S. (2017). Application of Two-Dimensional Hydraulic Modeling in Riverine Systems Using HEC-RAS, Master Thesis, Master of Science in Civil Engineering, University of Dayton, Dayton, OH, USA, 2017, Disponibil online: https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=dayton (accesat la data de 23 Aprilie 2019).
- Andre, G. (2012). Natural hazard mapping across the world. A comparative study between a social approach and an economic approach to vulnerability. *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 602, doi: <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25297>.
- Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., Bianconi, R., & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for Small-Scale Flood Hazard Mapping. *Water*, 12, 1717.
- Apostol, L. (2008). The Mediterranean cyclones-the role in ensuring water resources and their potential of climatic risk, in the East of Romania, *Present Env Sust Develop*, 2, 143-163.
- Armaș, I. (2006). Risc și vulnerabilitate. Metode de evaluare în geomorfologie, Ed. Univ. din București (200 p., 54 fig., 12 anexe). ISBN 973-725-545-3.
- Armaș, I., Damian, R., Șandric, I., & Osaci-Costache, G. (2003). Vulnerabilitatea versanților la alunecări de teren în sectorul subcarpatic al Văii Prahovei, Editura Fundației România de Măine, București.
- Armenakis, C., Du, E.X., Natesan, S., Persad, R.A., & Zhang, Y. (2017). Flood Risk Assessment in Urban Areas Based on Spatial Analytics and Social Factors. *Geosciences*, 7, (4), 123, doi:<https://doi.org/10.3390/geosciences7040123>.
- Arseni, M., Rosu, A., Calmuc, M., Calmuc, V.A., Iticescu, C., & Georgescu, L.P. (2020). Development of Flood Risk and Hazard Maps for the Lower Course of the Siret River, Romania. *Sustainability*, 12, (16), 6588, doi:<https://doi.org/10.3390/su12166588>.
- Aryal, D., Wang, L., Adhikari, T.R., Zhou, J., Li, X., Shrestha, M., Wang, Y., & Chen, D. (2020). A Model-Based Flood Hazard Mapping on the Southern Slope of Himalaya. *Water*, 12, 540, doi:<https://doi.org/10.3390/w12020540>.
- Asare-Kyei, D., Forkuor, G., Venus, V. (2015). Modeling Flood Hazard Zones at the Sub-District Level with the Rational Model Integrated with GIS and Remote Sensing Approaches. *Water*, 7, (7), 3531-3564, doi:<https://doi.org/10.3390/w7073531>.
- Aschbacher, J., & Milagro-Pérez, M.P. (2012). The European Earth monitoring (GMES) programme: Status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 120, 3-8, doi:10.1016/j.rse.2011.08.028.
- Asokan, A., Anitha, J., Ciobanu, M., Gabor, A., Naaji, A., Hemanth, D.J. (2020). Image Processing Techniques for Analysis of Satellite Images for Historical Maps Classification—An Overview. *Applied Sciences*, 10, (12), 4207, doi:<https://doi.org/10.3390/app10124207>.
- Astité, S.W., Medjerab, A., Belabid, N.E., El Mahmoudi, N., El Wartiti, M., & Kemmon, S. (2015). Cartography of flood hazard by overflowing rivers using hydraulic modeling and geographic information system: Oued El Harrach case, (North of Algeria). *Revista de Teledetección*, 44, 67-79, doi:10.4995/raet.2015.3985.
- Atkinson, P. (2009). Geoinformatics - Volume II, Encyclopedia of Life Support Systems, Eolss Publishers Co. Ltd.
- Badea, A. (2016). Note de curs teledetecție. USAMV/FIFIM-MTC.
- Badea, A., & Negula, I. (2012). Utilizarea teledetecției pentru mediu și agricultură, Note de curs. Universitatea de Științe Agronomice și Medicină Veterinară București.
- Bajabaa, S., Masoud, M. & Al-Amri, N. (2014). Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). *Arab J Geosci*, 7, 2469-2481, doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-013-0941-2>.
- Baker, V.R. (1987). Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of Hydrology*, 96, (1-4), 79-99, doi:10.1016/0022-1694(87)90145-4.

- Balica, S., & Wright, N.G. (2009). A network of knowledge on applying an indicator-based methodology for minimizing flood vulnerability. *Hydrol. Process.*, 23, 2983-2986, doi:https://doi.org/10.1002/hyp.7424.
- Balica, S., Douben, N., & Wright, N. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water science and technology: A journal of the International Association on Water Pollution Research*. 60, 2571-80, doi: 10.2166/wst.2009.183.
- Balica, S.F. (2007). Development and Application of Flood Vulnerability Indices for Various Spatial Scales. *Water Science and Engineering*, Delft, UNESCO-IHE. MSc.
- Balica, S.F., Wright, N.G., van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts, *Nat. Hazards*, 64, 73-105, doi:https://doi.org/10.1007/s11069-012-0234-1.
- Banholzer, S., Kossin, J., & Donner, S. (2014). The Impact of Climate Change on Natural Disasters. In Singh, A., & Zommers, Z. (eds.) *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. Springer, Dordrecht, doi:https://doi.org/10.1007/978-94-017-8598-3_2.
- Bankoff, G. (2003). Constructing vulnerability: The historical, natural and social generation of flooding in metropolitan Manila. *Disasters*, 27, 224-238.
- Banks, J.C., Camp, J.V., & Abkowitz, M.D. (2014). Adaptation planning for floods: a review of available tools. *Nat. Hazards*, 70, 1327-1337, doi:10.1007/s11069-013-0876-7.
- Banuc, G. (2018). Evaluarea hazardului inundațiilor Dunării în zona municipiului Galați, Teză de doctorat, Universitatea "Alexandru Ioan Cuza" din Iași, Facultatea de Geografie și Geologie, Școala Doctorală de Geoștiințe, Iași.
- Barredo, J., de Roo, A., & Lavalle, C. (2007). Flood risk mapping at European scale. *Water science and technology: A journal of the International Association on Water Pollution Research*, 56, 11-7, doi:10.2166/wst.2007.531.
- Barredo, J.I. (2006). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Nat Hazards*, 42, 125-148, doi:https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2.
- Barredo, J.I. (2009). Normalised flood losses in Europe: 1970-2006. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 97–104, doi:https://doi.org/10.5194/nhess-9-97-2009.
- Barrett, E. C., & Curtis L.F. (1976). *Introduction to Environmental Remote Sensing*. New York: Macmillan, 472 p.
- Barrett, E. C., & Curtis L.F. (1999). *Introduction to Environmental Remote Sensing* (4th ed.). Stanley Thornes (Publishers) Ltd., 447 p.
- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M. C., Naulet, R., Lemaitre, F., & Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 583-592, doi:https://doi.org/10.5194/nhess-3-583-2003.
- Barrows, H. (1923). *Geography as Human Ecology*. *Annals of the Association of American Geographers* 13, 1–14.
- Bates, P.D., & De Roo, A. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *J. Hydrol.*, 236, 54-77.
- Batista, C.M. (2018). Coastal Flood Hazard Mapping. In: Finkl C., Makowski C. (eds) *Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_356-1.
- Bădilă, A. (2007). Managementul riscului de dezastru, Ghid de lucru pentru ONG-urile de mediu în prevenirea dezastrelor.
- Bălțeanu, D., & Costache, A., (2006). Conceptul de vulnerabilitate. Aplicații în Geografie, *Revista Geografică*, t. XII, p. 5-12.
- Băncilă, G. (2011). Hazards induced in Eastern Romania by Mediterranean retrograde cyclones. Case study for the 22-27 July 2008 interval. *Riscuri și catastrofe*, Nr. X, Vol. 9, Nr. 2/2011.
- Beden, N., & Ulke Keskin, A. (2021). Flood map production and evaluation of flood risks in situations of insufficient flow data. *Nat Hazards*, 105, 2381-2408, doi:https://doi.org/10.1007/s11069-020-04404-y.
- Behnamian, A., Banks, S., White, L., Brisco, B., Millard, K., Pasher, J., Chen, Z., Duffe, J., Bourgeau-Chavez, L., & Battaglia, M. (2017). Semi-Automated Surface Water Detection with

- Synthetic Aperture Radar Data: A Wetland Case Study. *Remote Sensing*, 9, (12), 1209, doi:<https://doi.org/10.3390/rs9121209>.
- Below, R., Wirtz, A., & Guha-Sapir, D. (2009). Disaster Category Classification and Peril Terminology for Operational Purposes, 20 p.
 - Ben Khalfallah, C., & Saidi, S. (2018). Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 142, 44-51, doi:[10.1016/j.jafrearsci.2018.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.004).
 - Benito, G., & Hudson, P. (2010). Flood hazards: The context of fluvial geomorphology. In Alcántara-Ayala, I., & Goudie, A. (eds.), *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention* (111-128). Cambridge: Cambridge University Press. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527.010>.
 - Benito, G., Brázdil, R., Herget, J., & Machado, M. J. (2015a). Quantitative historical hydrology in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 3517-3539, doi:<https://doi.org/10.5194/hess-19-3517-2015>.
 - Benito, G., Lang, M., Barriandos, M. et al. (2004). Use of Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Review of Scientific Methods. *Natural Hazards*, 31, 623-643, doi:<https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000024895.48463.eb>.
 - Benito, G., Macklin, M.G., Zielhofer, C., Jones, A.F., & Machado, M.J. (2015b). Holocene flooding and climate change in the Mediterranean. *CATENA*, 130, 13-33, ISSN 0341-8162, doi:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.014>.
 - Bennett, J. (2010). OpenStreetMap, Packt Publishing Ltd.
 - Berens, P. (2006). Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR). In *Advanced Radar Signal and Data Processing* (pp. 3-1 – 3-14). Educational Notes RTO-EN-SET-086, Paper 3. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>.
 - Berz, G., Kron, W., Loster, T., Rauch, E., Schimetschek, J., Schmieder, J., Siebert, A., Smolka, A., & Wirtz, A. (2001). World Map of Natural Hazards – A Global View of the Distribution and Intensity of Significant Exposures. *Natural Hazards*, 23, (2/3), 443-465, doi:<https://doi.org/10.1023/A:1011193724026>.
 - Betsholtz, A., & Nordlöf, B. (2017). Potentials and Limitations of 1D, 2D and Coupled 1D-2D Flood Modeling in HEC-RAS - A Case Study on Høje River. Teză de masterat, Division of Water Resources Engineering, Department of Building & Environmental Technology, Lund University, Lund, Sweden. Disponibil online: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8904721&fileId=8904723> (accesat la data de 23 Aprilie 2019).
 - Bhat, M.S, Ahmad, B., Alam, A., Farooq, H., & Ahmad, S. (2019a). Flood hazard assessment of the Kashmir Valley using historical hydrology. *J Flood Risk Management*, 12(Supl. 1), e12521, doi:<https://doi.org/10.1111/jfr3.12521>.
 - Bhat, S.M., Alam, A., Ahmad, B., Kotlia, B.S., Farooq, H., Taloor, A.K., & Ahmad, S. (2019b). Flood frequency analysis of river Jhelum in Kashmir basin. *Quaternary International*, 507, 288-294, ISSN 1040-6182, doi:<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.09.039>.
 - Bilaşco, S. (2007). Determinarea debitului maxim utilizând metoda hidrografului unitar, Geographia Napocensis, Edit. Casa Cartii de Stiinta, 2007, Cluj-Napca.
 - Bilaşco, S., & Csaba, H. (2016). Cartografierea digitală a benzilor de inundabilitate pe baza statisticii, a calculelor hidraulice şi a analizei spaţiale GIS, Editura Casa Cărţii de Ştiinţă, Cluj-Napoca, ISBN 978-606-17-0907-6.
 - Bioresita, F., Puissant, A., Stumpf, A., & Malet, J-P. (2018). A Method for Automatic and Rapid Mapping of Water Surfaces from Sentinel-1 Imagery. *Remote Sensing*, 10, (2), 217, doi:<https://doi.org/10.3390/rs10020217>.
 - Birkmann, J. (2006). *Measuring Vulnerability to Natural Hazards*, United Nations University Press, Tokyo, Japan.
 - Birkmann, J., Cardona, O.D., Carreño M.L et al. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Nat Hazards*, 67, 193-211, doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5>.