

Analiza pe termen lung și predicția seriilor hydrometeorologice în contextul schimbărilor climatice. Studiu de caz

Rezumat

Coordonatori științifici,

Conf. dr. hab. ing. DUMITRIU Cristian Ștefan

Prof. dr. hab.ing. BĂRBULESCU Alina

Doctorand,

SALIBA Youssef

BUCUREȘTI, 2026

CONȚINUT

1	INTRODUCERE	3
1.1	Contextul studiului.....	4
1.2	Obiectivele studiului	5
2	ZONA DE STUDIU ȘI DATELE HYDROMETEOROLOGICE.....	6
2.1	Poziția geografică	6
2.2	Relieful și caracteristicile climatice	6
2.3	Date meteorologice	7
2.4	Pregătirea datelor	7
3	CARACTERIZAREA STATISTICĂ ȘI REGIONALIZAREA SERIILOR DE PRECIPITAȚII.....	7
4	STRUCTURA TEMPORALĂ, DETECȚIA PUNCTELOR DE SCHIMBARE ȘI OMOGENIZARE	9
5	INTERPOLARE SPAȚIALĂ	11
6	MODELAREA CORELAȚIEI FOLOSIND COPULE.....	13
7	CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI CONCLUZII.....	15
7.1	Contribuții personale.....	15
7.2	Publicații.....	20
7.3	Prezentări la conferințe	21
	BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	22

1 INTRODUCERE

Fenomenele hidrometeorologice exercită o influență directă asupra sistemelor naturale, așezărilor umane, agriculturii, resurselor de apă, precum și asupra proiectării și exploatării infrastructurii civile. Precipitațiile și temperatura reprezintă două dintre cele mai importante variabile, deoarece ele controlează disponibilitatea apei, apariția perioadelor uscate și umede, dezvoltarea condițiilor de secetă, formarea scurgerii și intensitatea extremelor hidrologice. Prin urmare, evoluția lor pe termen lung este esențială pentru înțelegerea variabilității climatice regionale și pentru sprijinirea deciziilor legate de managementul resurselor de apă, protecția mediului și planificarea infrastructurii.

În ultimele decenii, datorită schimbărilor climatice a crescut necesitatea realizării unor studii regionale detaliate asupra seriilor hidrometeorologice. Tendințele climatice generale sunt discutate de obicei la scară continentală sau globală, însă efectele lor se manifestă la nivel local prin modificări ale frecvenței, intensității, duratei și distribuției spațiale a evenimentelor hidroclimatice. Din acest motiv, colectarea și analiza seriilor lungi de date rămâne indispensabilă. Acestea permit studierea persistenței temporale, a comportamentului sezonier, a schimbărilor bruște, a contrastelor spațiale și a posibilelor interacțiuni dintre variabilele climatice. Cu toate acestea, interpretarea unor astfel de serii necesită instrumente statistice adecvate, deoarece seriile hidroclimatice sunt rareori simple, independente, normal distribuite sau omogene din punct de vedere spațial.

Analiza precipitațiilor și a temperaturii este deosebit de importantă în regiunile în care disponibilitatea apei este limitată și unde contrastele climatice sunt pronunțate în spațiu. Dobrogea, situată în sud-estul României, reprezintă o astfel de regiune. Poziția sa geografică, între Dunărea Inferioară și Marea Neagră, determină un cadru hidroclimatic specific, influențat de efectele maritime, condițiile continentale, relieful local și coridorul Dunării. Regiunea se caracterizează, în general, prin uscăciune recurentă și prin contraste între zonă de coastă și interior. Aceste caracteristici fac ca Dobrogea să fie adecvată pentru studierea variabilității hidroclimatice regionale, dar impun, în același timp, constrângeri metodologice importante.

Prezenta teză investighează serii lunare lungi de precipitații și temperatură din Dobrogea. Lucrarea își propune să descrie, să modeleze și să interpreteze comportamentul spațial și temporal al variabilelor hidroclimatice din regiune. Studiul nu tratează precipitațiile și temperatura doar ca serii temporale izolate. Acesta examinează, de asemenea, modul în care stațiile sunt organizate în spațiu, cum apar dependența temporală și posibilele discontinuități în

înregistrări, cum pot fi estimate valorile în locații nemăsurate și cum interacționează precipitațiile și temperatura în situații hidroclimatice compuse.

1.1 Contextul studiului

Studiul seriilor hidroclimatice lungi s-a dezvoltat considerabil datorită disponibilității tot mai mari a arhivelor de observații și necesității de a evalua riscurile legate de climă la scară regională. În hidrologie, climatologie și ingineria mediului, astfel de analize sunt utilizate pentru a identifica tendințe, tipare de variabilitate, evenimente extreme, discontinuități, regiuni omogene și dependențe între variabile. Aceste aspecte sunt relevante deoarece planificarea pe termen lung nu se poate baza doar pe observații izolate sau pe intervale climatice scurte. În schimb, este necesară o descriere statistică a comportamentului temporal și spațial al variabilelor care controlează disponibilitatea apei și riscul hidroclimatic.

Seriile de precipitații sunt adesea dificil de analizat deoarece distribuțiile lor sunt asimetrice și puternic afectate de valori extreme. În regiunile aride sau semiaride, cantități mici de precipitații pot fi înregistrate multe luni, în timp ce un număr mai mic de luni pot prezenta valori mari. Acest lucru generează un comportament non-Gaussian și complică utilizarea procedurilor statistice clasice. Seriile de temperatură sunt mai omogene decât cele de precipitații, dar conțin, de asemenea, o sezonabilitate accentuată, persistență temporală și posibile modificări în medie. Prin urmare, o analiză de încredere a înregistrărilor hidroclimatice trebuie să înceapă prin recunoașterea faptului că ipotezele standard nu sunt întotdeauna valabile.

O altă problemă importantă este heterogenitatea spațială. Stațiile meteorologice situate în aceeași regiune administrativă sau geografică nu descriu neapărat același regim hidroclimatic. Diferențele de altitudine, distanța față de mare, expunerea locală, relieful și circulația atmosferică regională pot produce comportamente statistice diferite de la o stație la alta. În Dobrogea, contrastul dintre stațiile de coastă și cele din interior este deosebit de relevant. Prin urmare, analiza regională nu trebuie să presupună că întreaga rețea de stații este omogenă. Este necesar să se determine dacă stațiile formează grupuri hidroclimatice coerente și dacă unele stații se comportă diferit față de restul rețelei.

Discontinuitățile temporale reprezintă o dificultate suplimentară. O înregistrare hidrometeorologică lungă poate conține schimbări bruște cauzate de variabilitatea climatică, dar și de factori neclimatici, cum ar fi modificările instrumentelor de măsură, relocarea stațiilor, modificările mediului local sau schimbările în procedurile de observație. Detectarea acestor puncte de schimbare este importantă deoarece ele pot afecta interpretarea tendințelor și a

variabilității pe termen lung. Cu toate acestea, detectarea punctelor de schimbare în seriile hidroclimatice lunare nu este simplă. Sezonalitatea și dependența serială pot crea schimbări aparente sau le pot masca pe cele reale. Din acest motiv, modelarea temporală trebuie realizată împreună cu analiza punctelor de schimbare.

Interpolarea spațială este, de asemenea, o problemă centrală în studiile hidroclimatice. Observațiile sunt disponibile doar în locațiile stațiilor, în timp ce aplicațiile practice necesită adesea estimări în locații în care nu există stații. Metodele deterministe clasice, cum ar fi IDW sau funcțiile spline, folosesc ipoteze de distanță și netezime pentru a estima informația spațială lipsă. Metodele geostatistice, în special krigingul ordinar, utilizează structura de covarianță spațială a datelor. Mai recent, abordările de învățare bazate pe grafuri au permis ca rețeaua de stații să fie reprezentată ca un sistem de noduri conectate, unde relațiile spațiale pot fi învățate din date. Compararea acestor abordări este utilă pentru a evalua dacă interpolarea clasică rămâne suficientă sau dacă metodele adaptive bazate pe învățare pot îmbunătăți predicția.

Interacțiunea dintre precipitații și temperatură este un alt aspect relevant al riscului hidroclimatic. Multe evenimente importante sunt compuse, rezultând din apariția simultană sau condiționată a mai multor stări climatice. De exemplu, condițiile calde și uscate pot fi asociate cu stresul generat de secetă, în timp ce condițiile reci și umede pot reflecta mecanisme sezoniere diferite. Astfel de situații nu pot fi descrise complet prin studierea separată a precipitațiilor și a temperaturii. De asemenea, ele nu pot fi întotdeauna sintetizate printr-un singur coeficient de corelație, deoarece dependența poate varia în funcție de sezon, prag și tipul de eveniment. Din acest motiv, modelele bazate pe copule sunt utile deoarece permit separarea comportamentului marginal al fiecărei variabile de structura lor de dependență.

Cercetarea prezentată în această teză se poziționează la intersecția acestor probleme. Aceasta utilizează înregistrări lunare lungi de la stațiile din Dobrogea pentru a studia variabilitatea precipitațiilor și a temperaturii prin analize descriptive, temporale, spațiale și de dependență, considerate ca părți complementare ale aceleiași investigații hidroclimatice.

1.2 Obiectivele studiului

Obiectivul general al tezei este de a dezvolta și aplica o abordare statistică pentru analiza pe termen lung a seriilor hidrometeorologice din Dobrogea, România, în contextul schimbărilor climatice. Studiul se concentrează în principal pe înregistrările lunare de precipitații și temperatură și își propune să obțină o descriere mai clară a structurii lor spațiale, a comportamentului temporal, a reconstrucției predictive și a dependenței comune.

Obiectivele specifice ale tezei sunt următoarele:

- De a caracteriza proprietățile statistice ale arhivelor hidroclimatice, în special ale seriilor lunare de precipitații, acordând atenție non-normalității, eterogenității mediei, comportamentului varianței și efectului transformărilor asupra interpretării datelor.
- De a identifica subregiunile hidroclimatice din Dobrogea folosind metode de clusterizare (grupare) și de a evalua dacă rețeaua de stații prezintă o organizare spațială coerentă sau un comportament atipic al unor stații.
- De a modela structura temporală a seriilor de precipitații și temperatură prin luarea în considerare a sezonality și a dependenței seriale, astfel încât analizele ulterioare să nu se bazeze pe ipoteze nerealiste de independență.
- De a detecta posibilele puncte de schimbare în seriile hidroclimatice lungi și de a conecta detectarea acestora cu procedurile de omogenizare bazate pe serii de referință și comparații de tip țintă–referință.
- De a evalua metodele de interpolare spațială pentru precipitațiile lunare, incluzând metode deterministe, kriging ordinar și predicție bazată pe grafuri, în cadrul unui design de validare bazat pe omiterea individuală a stațiilor (station-wise holdout).
- De a analiza dependența dintre precipitații și temperatură folosind o abordare bazată pe funcții copulă, cu accent pe probabilitățile comune și condiționate relevante pentru situațiile hidroclimatice cald–uscat, rece–umed, cald–umed și rece–uscat.

2 ZONA DE STUDIU ȘI DATELE HYDROMETEOROLOGICE

2.1 Poziția geografică

Dobrogea este situată în sud-estul României, între Dunărea Inferioară și Marea Neagră. Aceasta include un sector continental interior, un sector de coastă și zona influențată de Delta Dunării. Această poziție geografică conferă regiunii un caracter hidroclimatic distinct, deoarece este afectată atât de influențe continentale, cât și maritime.

2.2 Relieful și caracteristicile climatice

Regiunea se caracterizează în general printr-un relief jos, altitudini moderate și contraste spațiale importante între zonele de coastă și cele din interior. Proximitatea Mării Negre moderează condițiile de temperatură și umiditate de-a lungul coastei, în timp ce zonele

interioare sunt mai expuse influențelor climatice continentale. Dobrogea este, de asemenea, una dintre cele mai aride regiuni din România, ceea ce face ca studiul variabilității precipitațiilor să fie deosebit de relevant.

2.3 Date meteorologice

Datele utilizate în teză au fost furnizate de Administrația Națională de Meteorologie din România. Baza de date principală conține înregistrări lunare de precipitații de la 46 de stații meteorologice pentru perioada 1965–2005. O a doua bază de date conține înregistrări pereche lunare de precipitații și temperatură de la 10 stații pentru perioada 1965–2019. Pentru analiza predicției spațiale s-a folosit un subset de 42 de stații.

2.4 Pregătirea datelor

Datele au fost organizate ca serii temporale lunare pentru fiecare stație. Informațiile geografice asociate stațiilor, inclusiv coordonatele, altitudinea și distanța față de Marea Neagră, au fost de asemenea incluse atunci când analizele spațiale au impus acest lucru. Bazele de date finale au fost verificate din punct de vedere al completitudinii și au fost pregătite pentru analizele statistice prezentate în secțiunile următoare.

3 CARACTERIZAREA STATISTICĂ ȘI REGIONALIZAREA SERIILOR DE PRECIPITAȚII

Prima analiză efectuată în cadrul tezei privește comportamentul statistic al înregistrărilor lunare de precipitații. Această etapă a fost necesară deoarece seriile de precipitații nu pot fi interpretate corect fără a examina mai întâi proprietățile lor de distribuție și diferențele de la o stație la alta. În Dobrogea, precipitațiile sunt caracterizate prin numeroase luni cu cantități scăzute sau moderate și prin mai puține luni cu valori ridicate. Acest lucru generează distribuții asimetrice și face ca utilizarea directă a ipotezelor gaussiene clasice să fie discutabilă.

Arhiva lunară de precipitații a fost analizată mai întâi la nivel de stație și la nivel regional. Analiza a arătat că seriile originale de precipitații au fost predominant non-gaussiene. Distribuția regională cumulată a fost pozitiv asimetrică și leptocurtică, având un coeficient de asimetrie global de aproximativ 1,852 și o boltire de aproximativ 6,058. Acest lucru indică prezența unei cozi lungi la dreapta, produsă de cantități lunare episodice mari de precipitații. Testul de normalitate Lilliefors aplicat seriilor originale a respins ipoteza de normalitate. Prin

urmare, arhiva de precipitații nu a putut fi tratată ca o colecție de serii distribuite normal. Pentru a îmbunătăți comportamentul statistic al datelor, s-a aplicat o transformare Yeo–Johnson. După transformare, distribuția regională a devenit mai simetrică, iar diagnosticele de tip quantilă–quantilă au arătat o concordanță mai bună cu distribuția gaussiană de referință. La nivel de stație, transformarea a îmbunătățit normalitatea pentru majoritatea seriilor, deși zece stații au rămas în continuare non-gaussiene la nivelul de semnificație de 5%.

Analiza s-a concentrat apoi pe diferențele dintre stații. Obiectivul a fost de a determina dacă arhiva de precipitații poate fi considerată omogenă în ceea ce privește comportamentul mediei și al varianței. Pentru seriile transformate ale stațiilor care au atins o adecvare gaussiană aproximativă, s-au folosit teste parametrice. Pentru stațiile care au rămas non-gaussiene, s-au utilizat teste bazate pe ranguri. Rezultatele au arătat că seriile lunare de precipitații sunt puternic eterogene în structura mediei. Unele stații au prezentat un comportament similar, dar tiparul general a fost unul marcat de diferențe importante între stații.

Structura varianței a fost mai puțin eterogenă decât structura mediei. Testele de varianță, inclusiv procedurile Brown–Forsythe și Fligner–Killeen, au furnizat dovezi mai slabe de eterogenitate a varianței. Testul global Fligner–Killeen nu a respins egalitatea varianțelor, furnizând o p-valoare de 0,854. Astfel, cea mai importantă diferență la nivelul setului de serii a privit comportamentul mediu al precipitațiilor, în timp ce diferențele de varianță au fost mai puțin pronunțate.

Comparația dintre datele originale și cele transformate a confirmat că concluziile principale au fost stabile. Transformarea a îmbunătățit proprietățile distribuției datelor, dar nu a schimbat interpretarea generală a setului de precipitații. Mulțimea de serii a rămas eterogenă în medie, iar testele asupra eterogenității varianței au rămas comparativ mai slabe. Acest lucru arată că transformarea nu a creat în mod artificial concluziile principale, ci doar a îmbunătățit condițiile statistice pentru analizele următoare.

După această caracterizare statistică, s-a examinat dacă seriile de precipitații pot fi organizate în grupuri hidroclimatice. Scopul a fost de a determina dacă rețeaua de stații are o structură internă, mai degrabă decât să se comporte ca o mulțime aleatorie de stații. În acest scop, seriile lunare de precipitații au fost reprezentate ca vectori ai stațiilor și au fost luate în considerare diferite măsuri de disimilaritate. Aceste măsuri au permis compararea stațiilor în funcție de comportamentul precipitațiilor lor în timp.

Înainte de aplicarea algoritmilor de clusterizare, a fost evaluată tendința datelor de a forma grupuri. Rezultatele au indicat că arhiva stațiilor conține o structură nealeatorie și că, prin

urmare, clusterizarea a fost justificată. Analiza Componentelor Principale (PCA) a fost apoi aplicată pentru a reduce dimensionalitatea reprezentărilor stațiilor. Spațiul PCA reținut a conținut 22 de componente și a explicat aproximativ 81% din varianța totală. Această reprezentare redusă a păstrat modurile dominante de covariabilitate temporală, limitând în același timp efectul zgomotului și al redundanței din înregistrările originale de 492 de luni.

Au fost apoi comparate mai multe abordări de clusterizare. Analiza a inclus k-means, k-medoids și DBSCAN. Aceste metode nu descriu datele în același mod. K-means tinde să formeze grupuri compacte în jurul centroidelor, k-medoids folosește stații observate reprezentative, în timp ce DBSCAN identifică grupuri dense și poate lăsa stațiile atipice în afara clusterelor principale. Această din urmă proprietate a fost importantă în prezenta teză, deoarece unele stații s-ar putea să nu aparțină în mod natural niciunui grup regional dens.

Validarea nu a selectat o singură soluție de clusterizare ca fiind optimă pentru toate criteriile. Unele măsuri de stabilitate au favorizat soluțiile k-medoids cu un număr mai mare de clustere, în timp ce criteriile de compactitate și separare au susținut o soluție k-means mai simplă, cu două clustere. De asemenea, DBSCAN a produs o structură cu două grupuri, dar cu avantajul suplimentar de a identifica stațiile atipice ca fiind valori aberante (outliers). Din acest motiv, soluția DBSCAN a fost reținută ca regionalizare de referință. Aceasta a oferit o structură regională parsimonioasă și a evitat încadrarea forțată a tuturor stațiilor în grupuri atunci când comportamentul lor nu era suficient de similar cu cel al clusterelor dense de stații.

În concluzie, caracterizarea statistică și regionalizarea setului de serii precipitații condus la trei rezultate importante. În primul rând, precipitațiile lunare din Dobrogea sunt predominant non-gaussiene, cu o asimetrie puternică cauzată de valori episodice ridicate de precipitații. În al doilea rând, rețeaua de stații este eterogenă în principal în ceea ce privește comportamentul mediu al precipitațiilor, în timp ce diferențele de varianță sunt mai puțin pronunțate. În al treilea rând, clusterizarea a confirmat că rețeaua are o structură regională internă, DBSCAN oferind cea mai potrivită regionalizare operațională deoarece combină o partiție în două grupuri cu identificarea stațiilor atipice.

4 STRUCTURA TEMPORALĂ, DETECȚIA PUNCTELOR DE SCHIMBARE ȘI OMOGENIZARE

Această secțiune analizează comportamentul temporal al seriilor hidrometeorologice lunare. Seriile lungi de precipitații și temperaturi nu sunt doar eterogene din punct de vedere

spațial, ci și structurate temporal. Seriile lunare prezintă variație sezonieră, posibile persistențe seriale și posibile modificări ale regimului lor mediu. Din acest motiv, detectarea punctelor de schimbare nu a fost tratată ca o operațiune izolată, ci ca o parte integrantă a modelării temporale a seriilor. Studiul formulează detectarea punctelor de schimbare ca pe o problemă de estimare comună, în care locația punctelor de schimbare, structura deterministă a mediei lunare și structura de dependență stocastică sunt estimate împreună. Această formulare este necesară deoarece, în înregistrările hidrometeorologice, o discontinuitate aparentă poate fi produsă de sezonalitate, autocorelație sau variabilitate aleatorie, în timp ce o discontinuitate reală poate fi parțial ascunsă dacă structura temporală a observațiilor este ignorată. Prin urmare, analiza temporală nu elimină mai întâi dependența pentru a căuta apoi rupturile în mod separat. În schimb, utilizează un cadru unitar de modelare în care schimbările de regim, efectele lunare și reziduul stocastic sunt luate în considerare simultan.

Seriile lunare au fost reprezentate prin separarea părții deterministe a semnalului de componenta aleatoare rămasă. Componenta deterministă descrie structura regulată a seriei, incluzând efectul lunar, o tendință liniară și posibilele modificări de regim. Componenta stocastică descrie variabilitatea rămasă după eliminarea acestei structuri. Reziduul stocastic a fost reprezentat folosind modele autoregresive periodice, cum ar fi PAR/PARMA.

Detectarea punctelor de schimbare s-a realizat utilizând criteriul MDL (Minimum Description Length), comparând diferite reprezentări posibile ale aceleiași serii și reținând modelul care oferă cel mai bun compromis între calitatea ajustării (goodness of fit) și complexitatea modelului. Prin urmare, un punct de schimbare este reținut doar atunci când îmbunătățirea adusă modelului este suficientă pentru a justifica parametrii suplimentari introduse prin segmentare. De asemenea, au fost utilizate reprezentări Fourier pentru a descrie dependența sezonieră într-o formă parsimonioasă. În loc să se estimeze independent doisprezece parametri lunari, forma Fourier permite reprezentarea tiparului sezonier cu mai puțini termeni atunci când datele susțin o astfel de simplificare. Problema de optimizare rezultată a fost explorată folosind un algoritm genetic multi-insulă (multi-island genetic algorithm), deoarece numărul de configurații posibile ale punctelor de schimbare și ale structurilor de dependență temporală este de natură combinatorială.

Procedura a fost verificată inițial prin simulări controlate. Au fost generate serii lunare sintetice cu locații cunoscute ale punctelor de schimbare și cu o structură cunoscută a dependenței sezoniere. Scopul a fost de a evalua cât de bine poate procedura să recupereze punctele de schimbare impuse în condiții controlate. Studiul de simulare a arătat că metoda se

comportă conservator atunci când decalajele sunt slabe, în timp ce fiabilitatea segmentării reținute se îmbunătățește pe măsură ce magnitudinea decalajului devine mai clară.

Prima aplicație empirică a privit seria lunară de precipitații de la stația Jurilovca. Pentru această stație s-a reținut un singur punct de schimbare, localizat în iulie 2014. Segmentarea ajustată a separat seria transformată a precipitațiilor în două regimuri și a identificat o deplasare ascendentă a mediei ajustate după punctul de schimbare. Modelul selectat a fost $K = 1$, $m_1 = 595$, $p = 0$, $q = 0$ și $L = 3$, cu o valoare MDL de 313,449. Astfel, componenta reziduală nu a necesitat persistență autoregresivă, iar variabilitatea stocastică rămasă a fost reprezentată prin varianța inovațiilor modulată sezonier.

Un al doilea studiu de caz a privit omogenizarea seriei lunare de precipitații de la Sulina. Seria țintă a fost comparată cu o serie de referință compusă, construită pe baza stațiilor Jurilovca și Tulcea. Procedura MDL-GA a identificat un punct de schimbare în seria diferențelor țintă–referință, corespunzător lunii mai 2004. Factorul de ajustare estimat a fost $\hat{\delta} = -4.59$, având primul regim drept linie de bază. Această abatere negativă a indicat o eroare mecanică (bias) descendentă post-schimbare în diferențele țintă–referință. Prin urmare, omogenizarea a crescut valorile de la Sulina de după anul 2004 prin scăderea acestei abateri. După corecție, seria ajustată a diferențelor țintă–referință nu a mai prezentat nicio discontinuitate reziduală.

În concluzie, analiza temporală a arătat că înregistrările hidrometeorologice lunare trebuie studiate prin metode care iau în considerare structura sezonieră, dependența temporală și posibilele schimbări de regim. Studiul de caz Jurilovca a ilustrat detectarea unei schimbări de regim a mediei cu o structură reziduală parsimonioasă, în timp ce studiul de caz Sulina a arătat modul în care o discontinuitate detectată poate fi tradusă într-o corecție de omogenizare folosind o serie de referință și diferențele țintă–referință.

5 INTERPOLARE SPAȚIALĂ

Această secțiune se referă la predicția spațială a precipitațiilor lunare în rețeaua de stații din Dobrogea. Analiza a fost realizată pe subsetul de 42 de stații de precipitații și a avut ca scop evaluarea preciziei cu care precipitațiile de la o stație pot fi reconstituite pe baza observațiilor disponibile la stațiile rămase. Au fost comparate mai multe metode de interpolare sub aceleași criterii de validare. Metodele deterministe au inclus IDW, ponderea bazată pe nuclee (kernel-based weighting) și thin-plate splines. Aceste metode estimează precipitațiile pe baza ipotezelor

de distanță sau de netezime. Krigingul ordinar a fost utilizat ca reper geostatistic (benchmark), deoarece încorporează structura de covarianță spațială a câmpului de precipitații. În plus față de aceste metode clasice, a fost implementat un model de predicție bazat pe grafuri, în care stațiile au fost reprezentate ca noduri, iar relațiile spațiale dintre ele au fost codificate prin informații geografice, cum ar fi distanța și contrastele locale.

Validarea s-a efectuat folosind un design de omitere individuală a stațiilor (station-wise holdout). Fiecare stație a fost eliminată pe rând din setul de observații și predicționată pe baza stațiilor rămase. Performanța predictivă a fost evaluată folosind RMSE, MAE și R^2 , cu erorile exprimate în milimetri pe lună.

Rezultatele cumulate au arătat că krigingul ordinar a fost cea mai performantă metodă clasică. Acesta a obținut $RMSE = 14,97$ mm, $MAE = 9,68$ mm și $R^2 = 0.812$. Metodele deterministe au produs erori ușor mai mari, cu $RMSE = 15,80$ mm pentru ponderea inversă a distanței, $15,71$ mm pentru ponderea bazată pe nuclee și $16,01$ mm pentru funcțiile spline în placă subțire. Modelul bazat pe grafuri a produs cea mai puternică performanță globală, cu $RMSE = 11,36$ mm, $MAE = 7,16$ mm și $R^2 = 0.892$.

Comparația la nivel de stație a confirmat acest rezultat. Dintre abordările clasice, krigingul ordinar a avut cel mai mic RMSE mediu la nivel de stație, egal cu $14,71$ mm. Valorile corespunzătoare au fost de $15,51$ mm pentru ponderea inversă a distanței, $15,43$ mm pentru ponderea bazată pe nuclee și $15,65$ mm pentru funcțiile spline în placă subțire. Modelul bazat pe grafuri a redus RMSE-ul mediu la nivel de stație la $11,15$ mm, ceea ce corespunde unei reduceri medii de aproximativ 24,2% relativ la krigingul ordinar. Îmbunătățirea a fost observată la toate cele 42 de stații evaluate.

Erorile de interpolare nu au fost uniforme în întreaga zonă de studiu. Unele stații, inclusiv Sulina, Lipnița, Dobromir, Peștera, Altân Tepe și Pietreni, au fost mai dificil de reconstruit folosind metodele clasice. La Sulina, de exemplu, krigingul ordinar a produs un RMSE de $18,66$ mm, în timp ce predicția bazată pe grafuri a redus eroarea cu aproximativ $8,11$ mm. Rezultatele au arătat, de asemenea, un tipar sezonier: pentru krigingul ordinar, RMSE-ul lunar a variat de la $9,41$ mm în aprilie până la $20,74$ mm în iulie, indicând faptul că precipitațiile din sezonul cald au fost mai dificil de interpolat.

În concluzie, krigingul ordinar a rămas cea mai de încredere metodă clasică pentru interpolarea precipitațiilor lunare în Dobrogea. Cu toate acestea, modelul bazat pe grafuri a produs cea mai bună performanță predictivă globală. Avantajul său a fost observat în metricile cumulate, în comparația la nivel de stație și la stațiile unde interpolarea clasică a fost mai puțin

eficientă. Acest rezultat indică faptul că predicția spațială în rețeaua Dobrogei beneficiază de pe urma utilizării atât a relațiilor geografice, cât și a informațiilor învățate de la stație la stație, în loc să se bazeze doar pe reguli fixe de distanță sau pe un singur model de covarianță.

6 MODELAREA CORELAȚIEI FOLOSIND COPULE

În această secțiune s-a studiat dependența dintre temperatura și precipitațiile lunare. Analiza a fost realizată la stația Tulcea, utilizând seria de date lunare pereche temperatură–precipitații din perioada ianuarie 1965 – decembrie 2019. Obiectivul a fost de a determina dacă interacțiunea dintre cele două variabile poate fi descrisă printr-o măsură de asociere globală sau dacă se modifică în funcție de tipul de eveniment hidrometeorologic compus luat în considerare.

Înainte de modelarea dependenței, structura temporală marginală a fiecărei variabile a fost eliminată. Temperatura a fost reprezentată prin reziduuri standardizate, în timp ce precipitațiile au fost reprezentate prin inovații filtrate. Aceste serii filtrate au fost apoi transformate pe intervalul unitar prin transformata integralei de probabilitate (probability integral transform). Această etapă a permis separarea comportamentului marginal al fiecărei variabile de structura de dependență dintre ele.

Analiza bazată pe funcții copulă s-a concentrat pe patru configurații compuse: cald–uscat, rece–umed, cald–umed și rece–uscat. Aceste configurații nu au fost tratate ca cazuri echivalente, deoarece fiecare descrie o situație hidroclimatică diferită. Evenimentele cald–uscat și rece–umed corespund unor combinații în care anomaliile de temperatură și precipitații amplifică o anumită stare climatică. Evenimentele cald–umed și rece–uscat descriu tipul opus de combinație, în care cele două variabile se deplasează în direcții mai puțin concordante.

Au fost comparate mai multe familii de funcții copulă folosind metoda pseudo-verosimilității maxime, AIC și BIC. Copula Frank a fost reținută pentru toate cele patru configurații compuse transformate. Familia selectată a trecut, de asemenea, testele globale de adecvare, iar comparația dintre curbele de depășire condiționată empirice și cele ajustate a arătat că aceasta a reprodus principalele tipare de dependență la praguri finite. Modelul rezultat a fost astfel utilizat ca linie de bază (baseline) parsimonioasă pentru interpretarea probabilităților evenimentelor compuse la praguri practice.

La pragul operațional $u = v = 0.90$, reperul de independență pentru depășirea comună este 0,0100. Rezultatele au arătat că ambele configurații, cald–uscat și rece–umed, au depășit

acest reper, având probabilități comune observate de 0,0196 și rapoarte de amplificare de 1,969. Aceasta înseamnă că aceste două configurații compuse au apărut cu aproximativ 97% mai des decât s-ar fi așteptat în condiții de independență. Prin contrast, configurațiile cald–umed și rece–uscat au fost reprimite în raport cu independența, având probabilități observate de 0,0015 și, respectiv, 0,0030, cu rapoarte de amplificare de 0,151 și 0,303. Testele de permutare au confirmat că aceste abateri de la independență au fost susținute din punct de vedere statistic.

Rezultatele modelului copulă de bază arată că dependența dintre precipitații și temperatură la Tulcea este specifică fiecărui tip de eveniment. Șocurile de tip cald–uscat și rece–umed au fost amplificate în raport cu independența, în timp ce șocurile de tip cald–umed și rece–uscat au fost reprimite. Astfel, dependența nu poate fi reprezentată adecvat printr-un singur coeficient de corelație global; ea trebuie interpretată pe sectoare de evenimente compuse și pe praguri.

Teza a examinat apoi dacă structura de dependență cald–uscat a rămas stabilă în timp. Această configurație a fost selectată pentru analiza stabilității temporale deoarece a fost amplificată în rezultatele de bază și este deosebit de relevantă într-o regiune semiaridă. Înregistrarea a fost împărțită în subperioade (timpurie și recentă), iar comparația s-a realizat folosind asocierea pe bază de ranguri, diagnosticele pe bază de copulă empirică, probabilitățile cald–uscat la praguri finite, secvențele mobile Kendall și scanările pentru puncte de schimbare. Aceste teste nu au oferit dovezi coerente ale unei schimbări structurale în dependența cald–uscat pe parcursul perioadei 1965–2019.

De asemenea, a fost efectuată o analiză condiționată lunar pentru co-apariția stărilor cald–uscat. La pragul median $u = v = 0.50$, probabilitățile empirice au fost ușor peste reperul de independență în majoritatea lunilor, dar intervalele de încredere s-au suprapus în general cu linia de independență. La pragul practic $u = v = 0.90$, lunile mai și septembrie au arătat cea mai clară amplificare, cu probabilități empirice de 0,0545 și factori de amplificare de 5,45. La pragul rar $u = v = 0.95$, înregistrarea a fost prea scurtă pentru a susține o inferență stabilă specifică fiecărei luni.

În concluzie, analiza bazată pe funcții copulă a arătat că dependența dintre temperatură și precipitații la Tulcea este specifică fiecărui eveniment compus și depinde de prag. Configurațiile cald–uscat și rece–umed au fost amplificate în raport cu independența, în timp ce configurațiile cald–umed și rece–uscat au fost reprimite. Dependența cald–uscat nu a prezentat o schimbare structurală coerentă pe parcursul perioadei studiate, dar comportamentul său condiționat lunar a indicat semnale mai puternice în anumite luni, în special în mai și

septembrie. Această parte a tezei completează astfel analizele temporale și spațiale anterioare, arătând modul în care precipitațiile și temperatura interacționează în situații hidroclimatice compuse.

7 CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI CONCLUZII

Această secțiune finală consolidează lucrarea dezvoltată în cadrul tezei prin identificarea principalelor contribuții personale obținute din analizele hidroclimatice efectuate pentru Dobrogea și prin situarea acestora în contextul activității științifice mai largi desfășurate pe parcursul perioadei doctorale. Scopul este de a clarifica aportul metodologic, computațional și empiric adus de teză, iar apoi de a prezenta concluziile generale și lista de diseminare asociată acestor rezultate.

7.1 Contribuții personale

Contribuțiile originale ale acestei teze sunt organizate în conformitate cu întrebările de cercetare formulate în Introducere și cu secvența secțiunilor analitice prezentate în acest rezumat. Acestea privesc atât dezvoltările metodologice, cât și rezultatele empirice obținute pentru caracterizarea hidroclimatică a Dobrogei. Obiectivul lor comun este de a susține o inferență defensibilă din punct de vedere statistic într-un cadru marcat de heterogenitate spațială, dependență sezonieră, posibile discontinuități artificiale, monitorizare neregulată și variabile hidroclimatice care interacționează.

Teza a reunit serii complete de precipitații lunare, serii pereche lunare de precipitații–temperatură și predictorii auxiliari necesari pentru modelarea spațială. Arhiva de precipitații conține înregistrări lunare de la 46 de stații meteorologice pentru perioada 1965–2005, în timp ce arhiva de serii pereche precipitații–temperatură conține 10 stații pentru perioada 1965–2019. De asemenea, a fost pregătit un subset de 42 de stații pentru componenta de interpolare spațială. Teza a documentat caracteristicile de distribuție ale acestor arhive și a stabilit, prin comparații la nivel de arhivă, că înregistrările de la stații nu pot fi tratate ca o colecție omogenă de serii cu proprietăți comune de medie și varianță.

O contribuție specifică a acestei etape empirice a fost evaluarea detaliată a adecvării distribuționale, a heterogenității mediei, a comportamentului varianței și a efectelor transformărilor. S-a arătat că seriile originale de precipitații sunt predominant non-gaussiene, cu o distribuție regională asimetrică la dreapta și leptocurtică. Transformarea Yeo–Johnson a îmbunătățit comportamentul distribuțional al arhivei, dar nu a eliminat toate abaterile de la

normalitate. Analiza a arătat, de asemenea, că diferențele dintre stații sunt mai pronunțate în comportamentul mediei decât în cel al varianței.

În ceea ce privește componenta de regionalizare, teza dezvoltă o strategie în care analiza de cluster este tratată ca o problemă de selecție de model și validare, mai degrabă decât ca un exercițiu pur exploratoriu. Lucrarea nu se bazează pe un singur algoritm, o singură definiție a similarității sau un singur indice de validare. Aceasta compară mai multe reprezentări ale stațiilor, măsuri alternative de disimilaritate, reducerea dimensionalității prin Analiza Componentelor Principale (PCA) și trei paradigme de clusterizare cu inducții metodologice (inductive biases) diferite: k-means, k-medoids și DBSCAN. Prin urmare, contribuția nu se limitează la obținerea unei partiții a rețelei de stații, ci se extinde la construcția unei logici de validare prin care partițiile alternative pot fi judecate în termeni de rigoare statistică și interpretabilitate geografică.

O contribuție computațională în R a fost adăugată acestei etape de regionalizare. Deoarece instrumentele standard din pachetul NbClust sunt organizate în principal în jurul clusterizării ierarhice și k-means, au fost dezvoltate funcții suplimentare pentru a permite compararea metodelor k-medoids și DBSCAN sub o filosofie de validare similară. Funcția NbClust2 extinde logica NbClust adăugând `method = "kmedoids"` și păstrând calculul mai multor indici interni de validare, tabelul `All.index`, ieșirea `Best.nc` și selecția numărului preferat de clusteri pe baza regulii majorității. Indicele Beale a fost omis în mod intenționat, deoarece nu a fost calculat în această implementare. Acest lucru a făcut posibilă evaluarea k-medoids cu un set extins de indici, în loc de a o trata ca pe o metodă de clusterizare secundară sau inspectată manual.

O a doua implementare de clusterizare a fost dezvoltată pentru DBSCAN. Deoarece DBSCAN este controlat de ε și `minPts`, și nu de un număr fix de clusteri, a fost creată o grilă de validare separată. Rutina evaluează combinațiile candidate de ε și `minPts` și calculează indicii interni care pot fi transferați în mod semnificativ către clusterizarea bazată pe densitate. Aceștia includ Silhouette, Hubert, C-index, Davies–Bouldin, Gamma, Gplus, Tau, Frey, McClain, CCC, Scott, Marriot, TrCovW, TraceW, Friedman și Rubin. Codul sintetizează, de asemenea, valorile preferate ale parametrilor pentru fiecare indice și aplică o logică bazată pe regula majorității pentru a identifica o configurație DBSCAN defensibilă. În acest fel, teza nu doar că a aplicat DBSCAN, ci a adaptat infrastructura de validare astfel încât regionalizarea bazată pe densitate să poată fi comparată cu k-means și k-medoids într-un mod transparent.

Sub acest design comparativ, soluția DBSCAN reținută a oferit o organizare parsimonioasă în două grupuri, identificând în același timp stațiile atipice. Acest rezultat a furnizat un strat regional operațional pentru analizele ulterioare și a evitat forțarea tuturor stațiilor în grupuri compacte atunci când comportamentul lor nu era suficient de similar cu cel al clusterilor regionali denși.

În ceea ce privește componenta temporală, teza dezvoltă o abordare orientată spre dependență (dependence-aware), în care seriile lunare sunt modelate printr-o componentă deterministă explicită a mediei și o componentă reziduală stocastică autoregresivă periodică. Estimarea punctelor multiple de schimbare este formulată sub principiul Lungimii Minime de Descriere (Minimum Description Length – MDL), astfel încât ajustarea modelului și complexitatea acestuia să fie echilibrate în cadrul aceluiași criteriu de inferență. O altă contribuție constă în introducerea reprezentărilor compresate Fourier ale dependenței sezoniere slabe, pentru a reduce efortul de codificare fără a degrada semnificativ reprezentarea verosimilității. Problema de căutare rezultată este rezolvată printr-un algoritm genetic multi-insulă (multi-island genetic algorithm).

Componenta temporală conține, de asemenea, o contribuție majoră de implementare. Teza a dezvoltat un sistem computațional în R și Rcpp/C++ pentru detecția punctelor de schimbare și omogenizarea seriilor hidroclimatice lunare. Acest sistem include codificarea pe bază de cromozomi a segmentărilor admisibile, restricții de fezabilitate, evoluție multi-insulă, migrație, reporniri programate, diferențiere țintă–referință, construcția de referințe composite și ajustare specifică fiecărui regim. La nivel numeric, acesta încorporează rezolvitori liniari stabilizați, construcția autocovarianței periodice, recursiuni de inovații, evaluarea verosimilității, estimarea sezonieră Yule–Walker, ajustarea iterativă GLS-PAR și diagnosticul reziduurilor. În baza de cod mai largă pentru serii temporale, au fost dezvoltate și rutine de ajustare și selecție de model de tip PAR/PARMA, astfel încât reprezentări temporale diferite să poată fi estimate și comparate în cadrul unui flux computațional consecvent.

Această implementare a transformat metodologia temporală într-un instrument operațional. A permis ca pozițiile punctelor de schimbare, parametrii regimului determinist al mediei și structura dependenței stocastice să fie estimate împreună. În aplicația empirică, cazul Jurilovca a arătat cum criteriul MDL poate reține un punct de schimbare menținând în același timp o componentă stocastică reziduală parsimonioasă, în timp ce cazul Sulina a arătat cum o discontinuitate detectată poate fi tradusă într-o corecție de omogenizare prin construcția unei referințe composite și ajustarea specifică regimului.

O altă contribuție privește predicția spațială într-o rețea neregulat distribuită. Teza nu limitează comparația la interpolarea deterministă clasică. Aceasta plasează ponderea inversă a distanței, ponderea bazată pe nuclee, funcțiile spline în placă subțire, krigingul ordinar și învățarea bazată pe grafuri sub un design comun de validare prin omitere individuală a stațiilor (station-wise holdout). Acest lucru oferă o comparație mai echitabilă decât evaluările bazate pe proceduri de calibrare neconsecvente sau definiții diferite ale țintei. În cadrul acestui design, krigingul ordinar se evidențiază ca fiind cel mai puternic benchmark clasic, dar modelul bazat pe grafuri oferă cea mai favorabilă performanță predictivă globală.

Contribuția privind învățarea pe grafuri este atât metodologică, cât și computațională. Rețeaua de stații a fost reprezentată ca un graf, în care stațiile sunt noduri, iar relațiile spațiale sunt Muchii. A fost utilizat pachetul PyTorch Geometric deoarece oferă structura de date de graf necesară: caracteristici ale nodurilor, indici ai muchiilor, atribute ale muchiilor, valori țintă și măști. Această reprezentare a permis combinarea atributelor stațiilor (cum ar fi longitudinea, latitudinea, altitudinea, faza sezonieră, precipitațiile și decalajele temporale scurte) cu informații relaționale (cum ar fi distanța și contrastul de altitudine).

Arhitectura reținută nu a fost un model GNN generic de tip „cutie neagră”. A fost un model calibrat de atenție context-către-țintă pe două scări (two-scale context-to-target attention) cu context decalat. În cadrul designului de omitere a unei stații (leave-one-station-out), stația țintă a fost tratată ca neobservată și a primit doar informații fără scurgeri de date (non-leaking), cum ar fi locația, altitudinea și faza sezonieră. Stațiile de context conțineau informații geografice, precipitațiile curente, decalaje scurte ale precipitațiilor și indicatori de mască. Modelul a utilizat codificatoare separate pentru țintă și context, atenție de tip query-key-value, scoruri de atenție ponderate cu distanța pe două scări, ponderi de atenție normalizate prin softmax, agregarea contextului și un cap de predicție a ieșirii. Ponderile de atenție joacă astfel rolul unor ponderi de interpolare învățate, dar acestea nu sunt fixate prin reguli de distanță inversă și nu sunt obținute dintr-un sistem kriging. Ele sunt învățate din caracteristicile țintei, caracteristicile contextului, sezonalitate, decalaje, distanță și parametri de atenție antrenabili.

Acest flux de lucru bazat pe învățarea pe grafuri a inclus armonizarea datelor de la stații, construcția grafurilor din relații geografice și topografice, pregătirea seturilor de date cu noduri mascate sub validarea de tip leave-one-station-out, antrenarea cu funcții de pierdere robuste și evaluarea comparativă în raport cu interpolatorii clasici. Implementarea a oferit cea mai puternică performanță globală și a îmbunătățit RMSE-ul la nivel de stație în raport cu krigingul ordinar la toate stațiile evaluate. Prin urmare, contribuția nu constă doar în faptul că un model

neural a produs erori mai mici, ci în faptul că rețeaua de stații a fost reprezentată ca un graf spațial în care proximitatea geografică, diferențele de altitudine, influența marină și contextul temporal de scurtă durată au putut fi combinate în mod adaptiv.

În ceea ce privește componenta de dependență, teza construiește șocuri marginale filtrate și standardizate și le studiază dependența prin intermediul funcțiilor copulă. Analiza nu modelează direct observațiile lunare brute de temperatură și precipitații. În schimb, elimină structura temporală marginală, standardizează reziduurile și inovațiile filtrate, le transformă pe intervalul unitar prin transformata integralei de probabilitate și apoi modelează structura de dependență rămasă. Această opțiune permite separarea comportamentului marginal al fiecărei variabile de structura comună care guvernează co-apariția.

Fluxul de lucru pentru funcțiile copulă a fost implementat în R. Acesta combină prelucrarea specifică fiecărei variabile, ajustarea marginală parametrică, standardizarea prin transformata integralei de probabilitate și transformările orientate pe evenimente în configurații cald–uscat, rece–umed, cald–umed și rece–uscat. Familiile candidate de funcții copulă sunt ajustate și comparate folosind metoda pseudo-verosimilității maxime, AIC și BIC. Modelele selectate sunt apoi interpretate prin structura copulei empirice, contururile ajustate, probabilitățile de depășire comună la praguri finite, curbele de depășire condiționată, rapoartele de amplificare în raport cu independența, diagnosticele de stabilitate temporală, măsurile mobile de dependență, scanările pentru puncte de schimbare și probabilitățile cald–uscat condiționate lunar.

Analiza bazată pe funcții copulă arată că dependența precipitații–temperatură este specifică fiecărui eveniment și fiecărui prag. Configurațiile cald–uscat și rece–umed sunt amplificate în raport cu independența, în timp ce configurațiile cald–umed și rece–uscat sunt reprimite. Mecanismul de dependență cald–uscat nu prezintă o schimbare structurală coerentă în timp, deși manifestarea sa condiționată lunar este sezonieră, cu cea mai vizibilă amplificare practică în mai și septembrie. Contribuția acestei părți a tezei constă, prin urmare, atât în metodologie, cât și în interpretarea hidroclimatică: riscul evenimentelor compuse depinde de sectorul specific al distribuției comune și nu poate fi dedus adecvat doar din măsuri globale de asociere.

La cel mai general nivel, principala contribuție a tezei de doctorat este integrativă. Teza nu prezintă un set de aplicații fără legătură între ele, efectuate pe un set de date comun. În schimb, ea articulează o linie de inferență conectată în care caracterizarea statistică, regionalizarea, modelarea temporală orientată pe dependență, corecția discontinuităților, reconstrucția spațială

și analiza evenimentelor compuse sunt tratate ca părți interconectate ale unei singure probleme hidroclimatice. În acest sens, teza oferă atât o caracterizare fundamentată empiric a Dobrogei, cât și o bază metodologică transferabilă pentru studii hidroclimatice efectuate pe rețele de stații heterogene, unde o inferență de încredere necesită tratamentul comun al organizării spațiale, discontinuităților temporale, reconstrucției predictive și dependenței multivariate.

7.2 Publicații

Rezultatele obținute pe parcursul cercetării doctorale au fost diseminate prin articole publicate în reviste de specialitate, o lucrare prezentată la o conferință indexată Scopus și prezentări la alte conferințe. Acestea sunt conectate direct cu principalele direcții ale tezei: caracterizarea seriilor de precipitații, clusterizarea și regionalizarea, detecția punctelor de schimbare, omogenizarea și modelarea dependenței hidroclimatice compuse prin copule.

Articole în jurnale indexate Web of Science

1. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “A Multi-Method Approach to Analyzing Precipitation Series and Their Change Points in Semi-Arid Climates: The Case of Dobrogea.” *Water*, 2025, 17, 391. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17030391> (Q2)
2. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Genetic-algorithm based changepoints detection and homogenization of precipitation series.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2026, 40, 8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-025-03142-6> (Q1)
3. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Copula-based assessment of compound warm-dry climate risk: a 55-year analysis of dependence structure stability in Tulcea, Romania.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2026, 40, 59. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-026-03180-8> (Q1).
4. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Homogenization of Monthly Precipitation Series: A Case Study from Romania.” *Romanian Journal of Physics*, 2026, 71, 801. DOI: <https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2026.71.801> (Q2).
5. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Detecting Undocumented Shifts in Seasonal Precipitation: An MDL-Driven Periodic Autoregressive Segmenter with Fourier Compression and Genetic Search.” *Water Resources Management*, 2026, 40, 344. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-026-04734-9> (Q1).
6. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Beyond Correlation: Quantifying Compound Hydro-Climatic Shocks with Copulas.” *Environmental and Ecological Statistics*, 33, 2026, 1451-1500. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10651-026-00736-3> (Q1).

Alături de lucrările legate direct de teză, pe parcursul perioadei doctorale au fost elaborate și alte publicații. Aceste studii nu fac parte din nucleul empiric formal al studiului privind Dobrogea, dar sunt conectate metodologic cu acesta prin interpolare spațială, analiză de sensibilitate, reconstrucție spațio-temporală, reducerea dimensionalității, clusterizare și interpretarea riscului de mediu.

1. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Downscaling MERRA-2 Reanalysis PM2.5 Series over the Arabian Gulf by Inverse Distance Weighting, Bicubic Spline Smoothing, and Spatio-Temporal Kriging.” *Toxics*, 2024, 12, 177. (Q1). DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12030177>
2. Bărbulescu, A.; Saliba, Y. “Sensitivity Analysis of the Inverse Distance Weighting and Bicubic Spline Smoothing Models for MERRA-2 Reanalysis PM2.5 Series in the Persian Gulf Region.” *Atmosphere*, 2024, 15, 748. (Q2). DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15070748>
3. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “A Comparative Evaluation of Spatial Interpolation Techniques for Maximum Temperature Series in the Montreal Region, Canada.” *Romanian Reports in Physics*, 2024, 76, 701. (Q2). DOI: <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.701>
4. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Assessing Pollution with Heavy Metals and Its Impact on Population Health.” *Toxics*, 2025, 13, 52. (Q1). DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics13010052>

These related publications extend the methodological scope developed during the doctoral period. They show that the statistical tools used in the thesis, especially interpolation, validation, sensitivity analysis, dimensionality reduction, and environmental-risk assessment, were also applied to other environmental datasets and geographical contexts.

Conferințe indexate în Scopus

1. Saliba, Y.; Bărbulescu, A.; Dumitriu, C. Ștefan. “A critical approach to clustering precipitation series in the Dobrogea region, Romania.” *E3S Web of Conferences*, 2025, 608, 05027. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560805027>

7.3 Prezentări la conferințe

1. Saliba, Y.; Bărbulescu, A.; Dumitriu, C. Ș. “A critical approach to clustering precipitation series in the Dobrogea region, Romania.” Presented at the EU-CONEXUS EENVIRO Research Conference 2024, Bucharest, Romania, 29–31 October 2024.

2. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Identifying Change Points in Seasonal Hydrological Data using a Genetic Algorithm Approach.” Presented at MadeAI 2025 – Modelling, Data Analytics and AI in Engineering, Porto, Portugal, 7–9 July 2025.
3. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “A copula approach for analyzing the hydro-meteorological shocks.” Presented at CIBv2025 International Scientific Conference: Civil Engineering and Building Services, Braşov, Romania, 6–7 November 2025.
4. Saliba, Y.; Bărbulescu, A. “Does a copula quantify compound temperature–precipitation risk in Tulcea, Romania?” Presented at the 8th Edition of the Doctoral School Conference, Technical University of Civil Engineering Bucharest, Bucharest, Romania, 13 November 2025.
5. Saliba, Y.; Bărbulescu, A.; Dumitriu, C. Ştefan. “Detected Latent Seasonal Precipitation Patterns with Genetic Search and Fourier Compression.” Presented at the 6th World Conference on Climate Change and Global Warming, Copenhagen, Denmark, November 2025.
6. Bărbulescu, A.; Saliba, Y. “Assessing the precipitation series variability at the regional scale in the Dobrogea region based on a long data series set.” Accepted for presentation at the Hydroinformatics Conference, Zaragoza, Spain, 22–26 June 2026.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Abdi, A.; Hassanzadeh, Y.; Ouarda, T.B.M.J. Regional frequency analysis using Growing Neural Gas network. *Journal of Hydrology*, 2017, 550, 92–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.047>
- Abdi, H.; Williams, L.J. Newman–Keuls Test and Tukey Test. *The SAGE Encyclopedia of Research Design*, 2022. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:246896240>
- Aksoy, H.; Gedikli, A.; Unal, N.E.; Kehagias, A. Fast segmentation algorithms for long hydrometeorological time series. *Hydrological Processes*, 2008, 22(23), 4600–4608. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7064>
- Alba, E.; Tomassini, M. Parallelism and evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(5), 443–462. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2002.800880>
- Alexandersson, H. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 1986, 6(6), 661–675. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Allan, R.P.; Arias, P.A.; Berger, S.; Canadell, J.G.; Cassou, C.; Chen, D.; et al. IPCC: Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2021, 3–32.
- Asadieh, B.; Krakauer, N.Y. Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(11), 5863–5874. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-5863-2017>

- Bandoc, G.; Prăvălie, R. Climatic water balance dynamics over the last five decades in Romania's most arid region, Dobrogea. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(11), 1307–1327. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-015-1236-1>
- Bărbulescu, A. A New Method for Estimation the Regional Precipitation. *Water Resources Management*, 2016, 30(1), 53–63. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1152-2>
- Bărbulescu, A.; Dumitriu, C.Ș. Shifts in Precipitation Variability near the Danube Delta Biosphere Reserve (1965–2019). *Water*, 2025, 17(18), 2692. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17182692>
- Bărbulescu, A.; Postolache, F. Are the Regional Precipitation and Temperature Series Correlated? Case Study from Dobrogea, Romania. *Hydrology*, 2023, 10(5), 109. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology10050109>
- Bărbulescu, A.; Postolache, F.; Dumitriu, C.Ș. Estimating the precipitation amount at regional scale using a new tool, climate analyzer. *Hydrology*, 2021, 8(3), 125. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8030125>
- Bezdek, J.C.; Hathaway, R.J. VAT: A tool for visual assessment of cluster tendency. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2002, 3, 2225–2230. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2002.1007487>
- Bloomfield, P.; Hurd, H.L.; Lund, R.B. Periodic correlation in stratospheric ozone data. *Journal of Time Series Analysis*, 1994, 15(2), 127–150. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9892.1994.tb00181.x>
- Brassel, K.E.; Reif, D. A Procedure to Generate Thiessen Polygons. *Geographical Analysis*, 1979, 11(3), 289–303. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00695.x>
- Bro, R.; Smilde, A.K. Principal component analysis. *Analytical Methods*, 2014, 6(9), 2812–2831. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3ay41907j>
- Brock, G.; Pihur, V.; Datta, S.; Datta, S. CValid: An R package for cluster validation. *Journal of Statistical Software*, 2008, 25(4), 1–22. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i04>
- Bronstein, M.M.; Bruna, J.; LeCun, Y.; Szlam, A.; Vandergheynst, P. Geometric Deep Learning: Going beyond Euclidean data. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, 34(4), 18–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2693418>
- Brown, M.B.; Forsythe, A.B. Robust tests for the equality of variances. *Journal of the American Statistical Association*, 1974, 69(346), 364–367. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482955>
- Buishand, T.A. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 1984, 73(1–2), 51–69. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90032-5)
- Caliński, T.; Harabasz, J. A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics*, 1974, 3(1), 1–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/03610927408827101>
- Cantú-Paz, E. Migration policies, selection pressure, and parallel evolutionary algorithms. *Journal of Heuristics*, 2001, 7(4), 311–334. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011375326814>
- Cochran, D.; Orcutt, G.H. Application of Least Squares Regression to Relationships Containing Auto-Correlated Error Terms. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, 44(245), 32–61. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483290>
- Conover, W.J.; Johnson, M.E.; Johnson, M.M. A comparative study of tests for homogeneity of variances, with applications to the outer continental shelf bidding data. *Technometrics*, 1981, 23(4), 351–361. <https://doi.org/10.1080/00401706.1981.10487680>
- Cressie, N. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2015.

- Dallal, G.E.; Wilkinson, L. An analytic approximation to the distribution of Lilliefors's test statistic for normality. *The American Statistician*, 1986, 40(4), 294–296. <https://doi.org/10.1080/00031305.1986.10475419>
- Davies, D.L.; Bouldin, D.W. A Cluster Separation Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1979, PAMI-1(2), 224–227. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>
- Dunn, J.C. Well-separated clusters and optimal fuzzy partitions. *Journal of Cybernetics*, 1974, 4(1), 95–104. DOI: <https://doi.org/10.1080/01969727408546059>
- Dunn, O.J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, 1964, 6(3), 241–252. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
- Ester, M.; Kriegel, H.P.; Sander, J.; Xu, X. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1996, 226–231.
- Fay, M.P.; Proschan, M.A. Wilcoxon-Mann-Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules. *Statistics Surveys*, 2010, 4, 1–39. DOI: <https://doi.org/10.1214/09-SS051>
- Fisher, R.A. Statistical Methods for Research Workers. In Kotz, S.; Johnson, N.L. (eds.), *Breakthroughs in Statistics*, Springer Series in Statistics, Springer, New York, 1992, 66–70. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_6
- Fligner, M.A. A class of two-sample distribution-free tests for scale. *Journal of the American Statistical Association*, 1979, 74(368), 889–893. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481050>
- Gallagher, C.; Lund, R.; Robbins, M. Changepoint detection in daily precipitation data. *Environmetrics*, 2012, 23(5), 407–419. DOI: <https://doi.org/10.1002/env.2146>
- Goovaerts, P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, 1997.
- Hao, Z.; Singh, V.P.; Hao, F. Compound extremes in hydroclimatology: A review. *Water*, 2018, 10(6), 718. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10060718>
- Hartigan, J.A.; Wong, M.A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Applied Statistics*, 1979, 28(1), 100–108. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346830>
- Hopkins, B.; Skellam, J.G. A new method for determining the type of distribution of plant individuals. *Annals of Botany*, 1954, 18(2), 213–227. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083391>
- Hutchinson, M.F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4), 385–403. DOI: <https://doi.org/10.1080/02693799508902045>
- Jain, A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(8), 651–666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>
- Joe, H. Dependence Modeling with Copulas. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, London, New York, 2014.
- Kaufman, L.; Rousseeuw, P.J. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. John Wiley & Sons, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470316801>
- Killick, R.; Fearnhead, P.; Eckley, I.A. Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *Journal of the American Statistical Association*, 2012, 107(500), 1590–1598. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745>
- Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, 220(4598), 671–680. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Leonard, M.; Westra, S.; Phatak, A.; Lambert, M.; van den Hurk, B.; McInnes, K.; Risbey, J.; Schuster, S.; Jakob, D.; Stafford-Smith, M. A compound event framework for

- understanding extreme impacts. *WIREs Climate Change*, 2014, 5(1), 113–128. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.252>
- Levene, H. Robust tests for equality of variances. *Journal of the American Statistical Association*, 1960, 69(346), 364–367.
 - Li, J.; Heap, A.D. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. *Geoscience Australia, Record 2008/23*, 2008. <https://www.ga.gov.au/bigobj/GA12526.pdf>
 - Li, J.; Shen, Y.; Chen, L.; Ng, C.W.W. Rainfall Spatial Interpolation with Graph Neural Networks. In *Database Systems for Advanced Applications. DASFAA 2023, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13946, Springer, Cham, 2023, 175–191. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30678-5_14
 - Li, S.; Lund, R. Multiple changepoint detection via genetic algorithms. *Journal of Climate*, 2012, 25(2), 674–686. DOI: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4055.1>
 - Lloyd, S.P. Least Squares Quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, 28(2), 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>
 - Lu, Q.; Lund, R.; Lee, T.C.M. An MDL approach to the climate segmentation problem. *The Annals of Applied Statistics*, 2010, 4(1), 299–319. DOI: <https://doi.org/10.1214/09-AOAS289>
 - Lund, R.; Li, B. Revisiting climate region definitions via clustering. *Journal of Climate*, 2009, 22(7), 1787–1800. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2455.1>
 - Lund, R.; Shao, Q.; Basawa, I. Parsimonious periodic time series modeling. *Australian and New Zealand Journal of Statistics*, 2006, 48(1), 33–47. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-842X.2006.00423.x>
 - MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1967, 1, 281–297. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571135649659368064>
 - Mann, H.B.; Whitney, D.R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1947, 18(1), 50–60. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
 - Matheron, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 1963, 58(8), 1246–1266. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>
 - Nelsen, R.B. *An Introduction to Copulas*. Springer, 2006.
 - Pagano, M. On Periodic and Multiple Autoregressions. *The Annals of Statistics*, 1978, 6(6), 1310–1317. <https://www.jstor.org/stable/2958718>
 - Patton, A.J. Modelling asymmetric exchange rate dependence. *International Economic Review*, 2006, 47(2), 527–556. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1468-2354.2006.00387.x>
 - Pettitt, A.N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 1979, 28(2), 126–135. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>
 - Prăvălie, R.; Bandoc, G. Aridity Variability in the Last Five Decades in the Dobrogea Region, Romania. *Arid Land Research and Management*, 2015, 29(3), 265–287. DOI: <https://doi.org/10.1080/15324982.2014.977459>
 - Reeves, J.; Chen, J.; Wang, X.L.; Lund, R.; Lu, Q.Q. A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(6), 900–915. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAM2493.1>
 - Rissanen, J. Modeling by shortest data description. *Automatica*, 1978, 14(5), 465–471. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(78\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0005-1098(78)90005-5)
 - Roberts, D.R.; Bahn, V.; Ciuti, S.; Boyce, M.S.; Elith, J.; Guillera-Arroita, G.; et al. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*, 2017, 40(8), 913–929. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.02881>

- Rosenblatt, M. Remarks on a Multivariate Transformation. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1952, 23(3), 470–472. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729394>
- Rousseeuw, P.J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1987, 20, 53–65. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. Downscaling MERRA-2 Reanalysis PM2.5 Series over the Arabian Gulf by Inverse Distance Weighting, Bicubic Spline Smoothing, and Spatio-Temporal Kriging. *Toxics*, 2024, 12, 177. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12030177>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. A Comparative Evaluation of Spatial Interpolation Techniques for Maximum Temperature Series in the Montreal Region, Canada. *Romanian Reports in Physics*, 2024, 76, 701. DOI: <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.701>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. A Multi-Method Approach to Analyzing Precipitation Series and Their Change Points in Semi-Arid Climates: The Case of Dobrogea. *Water*, 2025, 17, 391. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17030391>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. Assessing Pollution with Heavy Metals and Its Impact on Population Health. *Toxics*, 2025, 13, 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics13010052>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. Genetic-algorithm based changepoints detection and homogenization of precipitation series. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2026, 40, 8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-025-03142-6>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. Copula-based assessment of compound warm-dry climate risk: a 55-year analysis of dependence structure stability in Tulcea, Romania. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2026, 40, 59. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-026-03180-8>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. Homogenization of Monthly Precipitation Series: A Case Study from Romania. *Romanian Journal of Physics*, 2026, 71, 801. DOI: <https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2026.71.801>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. Detecting Undocumented Shifts in Seasonal Precipitation: An MDL-Driven Periodic Autoregressive Segmenter with Fourier Compression and Genetic Search. *Water Resources Management*, 2026, 40, 344. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-026-04734-9>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A. Beyond Correlation: Quantifying Compound Hydro-Climatic Shocks with Copulas. *Environmental and Ecological Statistics*, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10651-026-00736-3>
- **Saliba, Y.**; Bărbulescu, A.; Dumitriu, C.Ș. A critical approach to clustering precipitation series in the Dobrogea region, Romania. *E3S Web of Conferences*, 2025, 608, 05027. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560805027>
- Seneviratne, S.I.; Zhang, X.; Adnan, M.; Badi, W.; Dereczynski, C.; Di Luca, A.; et al. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2021.
- Shao, Q.; Lund, R. Computation and characterization of autocorrelations and partial autocorrelations in periodic ARMA models. *Journal of Time Series Analysis*, 2004, 25(3), 359–372. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9892.2004.00356.x>
- Shepard, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*, 1968, 517–524. DOI: <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Shuman, D.I.; Narang, S.K.; Frossard, P.; Ortega, A.; Vandergheynst, P. The emerging field of signal processing on graphs: Extending high-dimensional data analysis to networks and

- other irregular domains. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(3), 83–98. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2235192>
- Sklar, A. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges. *Publications de l'Institut Statistique de l'Université de Paris*, 1959, 8(3), 229–231.
 - Student. The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 1908, 6(1), 1–25. DOI: <https://doi.org/10.2307/2331554>
 - Vecchia, A.V. Periodic Autoregressive-Moving Average (PARMA) Modeling with Applications to Water Resources. *Journal of the American Water Resources Association*, 1985, 21(5), 721–730. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1985.tb00167.x>
 - Veličković, P.; Cucurull, G.; Casanova, A.; Romero, A.; Lio, P.; Bengio, Y. Graph attention networks. 2018. <https://arxiv.org/abs/1710.10903>
 - Wahba, G. Spline Models for Observational Data. *CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics*, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1137/1.9781611970128>
 - Welch, B.L. On the Comparison of Several Mean Values: An Alternative Approach. *Biometrika*, 1951, 38(3/4), 330–336. DOI: <https://doi.org/10.2307/2332579>
 - White, H. Maximum Likelihood Estimation of Misspecified Models. *Econometrica*, 1982, 50(1), 1–25. DOI: <https://doi.org/10.2307/1912526>
 - Wilks, D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4th edition. Elsevier, 2020.
 - Wu, Z.; Pan, S.; Chen, F.; Long, G.; Zhang, C.; Yu, P.S. A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(1), 4–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>
 - Yeo, I.K.; Johnson, R.A. A new family of power transformations to improve normality or symmetry. *Biometrika*, 2000, 87(4), 954–959. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/87.4.954>
 - Zhang, W.; Furtado, K.; Wu, P.; Zhou, T.; Chadwick, R.; Marzin, C.; et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Science Advances*, 2021, 7(31), eabf8021. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf8021>
 - Zhao, S.; Chen, Z.; Xiong, Z.; Shi, Y.; Saha, S.; Zhu, X.X. Beyond Grid Data: Exploring graph neural networks for Earth observation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, 13(1), 175–208. DOI: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2024.3493972>
 - Zheng, C.; Fan, X.; Wang, C.; Qi, J.; Chen, C.; Chen, L. INCREASE: Inductive Graph Representation Learning for Spatio-Temporal Kriging. *Proceedings of the ACM Web Conference 2023*, 2023, 673–683. DOI: <https://doi.org/10.1145/3543507.3583525>
 - Zscheischler, J.; Westra, S.; Van Den Hurk, B.J.J.M.; Seneviratne, S.I.; Ward, P.J.; Pitman, A.; et al. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6), 469–477. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>
 - Zscheischler, J.; Martius, O.; Westra, S.; Bevacqua, E.; Raymond, C.; Horton, R.M.; et al. A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, 1(7), 333–347. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>