

SVILUPPO E VALIDAZIONE DI METODOLOGIE PER LA GESTIONE DEL RISCHIO IDRAULICO SOTTO SCENARI DI CAMBIAMENTO CLIMATICO NELLE AREE COSTIERE

Ph.D. in Ingegneria Ambientale ed Idraulica – XXXVI ciclo

Dottorando

Ing. Mario Giannini

Supervisore

Prof. Francesco Cioffi

Anno Accademico 2021-2023



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

1.	INTRUDUZIONE GENERALE	1
2.	PARTE I – LE PROIEZIONI FUTURE DEL REGIME PLUVIOMETRICO NELLA REGIONE LAZIO E NELLA PIANE PONTINA: ALLUVIONI E SICCITÀ	6
3.	DATI E METODI.....	10
3.1.	DATI.....	10
3.2.	STACKED ENSEMBLE LEARNING AND NONHOMOGENEOUS HIDDEN MARKOV MODEL DOWNSCALING TECHNIQUE	11
3.3.	PRE-PROCESSAMENTO DEI DATI.....	13
3.4.	STACKED ENSEMBLE LEARNING MODEL	15
3.4.1.	EXTREME GRADIENT BOOSTING	16
3.4.2.	RANDOM FOREST	17
3.4.3.	IL MODELLO DI ENSEMBLE LEARNING CHE INTEGRA I MODELLI XGBOOST E RF.....	18
3.4.4.	TUNING DEI PARAMETRI E VALIDAZIONE DEL ELM	19
3.5.	NONHOMOGENEOUS HIDDEN MARKOV MODEL.....	20
3.5.1.	DEFINIZIONE DI PIOGGE INTENSE E SICCITÀ	22
3.5.2.	INDICI DI ERRORE PER LA VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DELLE SIMULAZIONI DA GCM.....	23
4.	RISULTATI.....	24
4.1.	PRECIPITAZIONI ANNUALI ED ESTREME.....	24
4.1.1.	PERIODO STORICO.....	24
4.1.2.	PROIEZIONI FUTURE.....	27
4.2.	SICCITÀ.....	28
4.2.1.	PERIODO STORICO.....	28
4.2.2.	PROIEZIONI FUTURE.....	31
5.	PARTE II – IL SISTEMA DI EARLY WARNING DELLE ALLUVIONI NEL PARCO ARCHEOLOGICO DI SIBARI.....	33
6.	INTRODUZIONE AI SISTEMI EARLY WARNING	35
7.	CONTESTO DI RIFERIMENTO	44

7.1.	CENNI STORICI.....	46
7.2.	IL PARCO ARCHEOLOGICO DI SIBARI	47
7.3.	VULNERABILITÀ IDRAULICA DEL SITO	49
8.	LA METODOLOGIA.....	51
9.	I MODELLI.....	53
9.1.	IL MODELLO IDRAULICO.....	54
9.1.1.	EQUAZIONI DI GOVERNO.....	55
9.1.2.	MODELLO NUMERICO	56
9.1.3.	INTEGRAZIONE TEMPORALE	58
9.1.4.	DISCRETIZZAZIONE DEI FLUSSI NUMERICI.....	61
9.1.5.	DISCRETIZZAZIONE DEL TERMINE SORGENTE	68
9.1.6.	TERMINE DI PRECIPITAZIONE E INFILTRAZIONE NEL SWE 2D	72
9.1.7.	TRATTAMENTO DELL'INTERFACCIA UMIDO/SECCO	74
9.1.8.	CONDIZIONI AL CONTORNO	75
9.1.9.	CONDIZIONI AL CONTORNO DI MONTE.....	75
9.1.10.	SISTEMA DI POMPAGGIO.....	76
9.1.11.	I SIFONI.....	76
9.2.	IL MODELLO IDROLOGICO.....	78
9.2.1.	MODELLO SCS-CN.....	81
9.3.	IL MODELLO SURROGATO	85
9.3.1	FASE DI ADDESTRAMENTO	85
9.3.2	FASE OPERATIVA.....	88
9.3.3	DECOMPOSIZIONE DIMENSIONALE - PCA.....	89
9.3.4	CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS.....	91
9.3.5	ADDESTRAMENTO E OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO SURROGATO.....	93
9.3.6	OTTIMIZZAZIONE E ADDESTRAMENTO DEGLI ALGORITMI.....	96
9.4.	IL MODELLO DI PREVISIONE COSMO-IT	100
9.4.1.	LA RACCOLTA DELLE OSSERVAZIONI	101
9.4.2.	LA DETERMINAZIONE DELLO STATO INIZIALE TRAMITE L'ASSIMILAZIONE DATI	102

9.4.3.	LA PREVISIONE CON IL MODELLO NUMERICO E LA POST-ELABORAZIONE	105
9.4.4.	LA VERIFICA DELLE PREVISIONI	108
9.5.	IL MODELLO DI ROTTURA ARGINALE	109
10.	APPLICAZIONE AL CASO DI STUDIO.....	117
10.1.	DATI PRECIPITAZIONE PER L'ANALISI E LA RICERCA DEGLI EVENTI PASSATI.....	118
10.1.1.	DATASET RADAR FORMATO DATAMET -RADAR PROTEZIONE CIVILE -SRI	118
10.1.2.	DATASET RADAR FORMATO BUFR -RADAR PROTEZIONE CIVILE-SRI	119
10.1.3.	DATASET RADAR FORMATO TIFF -RADAR PROTEZIONE CIVILE-SRT	119
10.1.4.	DATASET STAZIONI PLUVIOMETRICHE ARPACAL.....	119
10.1.5.	DATASET CMCC- PRECIPITAZIONI CUMULATE- RIANALISI.....	121
10.1.6.	DATASET PREVISIONI AERONAUTICA MILITARE	123
10.2.	MODELLO IDROLOGICO	123
10.3.	VALIDAZIONE DEL MODELLO SURROGATO	126
10.4.	MODELLO DI ROTTURA ARGINALE	131
11.	<i>VERIFICA DELLA FASE OPERATIVA DEL SISTEMA DI ALLERTA RAPIDA APPLICATA AD UN EVENTO REALE</i>	<i>134</i>
11.1.	STEP 0.....	136
11.2.	STEP 1	145
11.3.	STEP 2.....	147
11.4.	STEP 3.....	149
12.	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	153
13.	BIBLIOGRAFIA.....	161
	APPENDICE 1- TEST NUMERICI MODELLO IDRAULICO.....	169

Figura 1-Obiettivi dell'Agenda 2030 relazionati all'acqua	2
Figura 2-Localizzazione Regione Lazio, Italia	9
Figura 3-Grafico tecnico del downscaling dell'Ensemble-NHMM	13
Figura 4- Schema di addestramento del modello di Ensemble	18
Figura 5-Media annua delle precipitazioni con finestra mobile di 15 anni dalle stazioni pluviometriche e dai modelli climatici globali (GCMs). (a) Cluster Est, (b) Cluster Nord, e (c) Cluster Sud.	25
Figura 6- Proiezioni al 2100 della precipitazione media annuale con una media mobile di 15 anni.	27
Figura 7-Serie temporali di (a) SPI-3, (b) SPI-6 e (c) SPI-12 per i tre cluster.	30
Figura 8-Flusso dei dati per l'analisi del rischio idrogeologico	43
Figura 9- Sequenze Diagramma del flusso di analisi del rischio meteo-idrogeologico.....	43
Figura 10-AOI del progetto.....	46
Figura 11 Area di Sibari (Parco archeologico).....	48
Figura 12 Dettaglio Museo della Sibarite (Google Heart).....	48
Figura 13 Ingresso area archeologica, nel dettaglio Porta nord, Parco del cavallo e Prolungamento strada (Google Heart).....	49
Figura 14- schema sistema di early warning.....	51
Figura 15-Flussi numerici di quantità di moto attraverso la faccia delle celle	62
Figura 16-Dominio superficiale.....	69
Figura 17-Schematizzazione della definizione delle variabili di infiltrazione nel metodo Green Ampt variabili utilizzate in FHM-	73
Figura 18- Schema Sifone in dominio bidimensionale.....	76
Figura 19- quote idrauliche nelle celle di controllo	77
Figura 20- Schema dei processi di deflusso di un bacino (USACE 1998-USACE 200)	79
Figura 21- Schema del framework di addestramento.	87
Figura 22 - Schema del framework operativo.	89
Figura 23 - Esempio di rete neurale convolutive per un problema di classificazione (Tabian et al 2019)	93
Figura 24 - Varianza cumulata spiegata in funzione del numero di componenti principali per a) precipitazione, b) allagamento e c) velocità.....	94
Figura 25 - Prime 8 autoimmagini del campo di precipitazione, ordinate secondo varianza spiegata.....	95
Figura 26 - Prime 8 autoimmagini del campo di allagamento, ordinate secondo varianza spiegata.....	95
Figura 27 - Prime 8 autoimmagini del campo di velocità, ordinate secondo varianza spiegata.	96
Figura 28 - Descrizione della forma della rete utilizzata per l'addestramento – allagamento h.....	97
Figura 29 - Descrizione della forma della rete utilizzata per l'addestramento - velocità u.	98
Figura 30 - Curve di apprendimento, a) MSE vs Nr. di epoche, allagamento h, b) MAE vs Nr. di epoche, velocità u per database di addestramento (linea nera continua) e validazione (rossa tratteggiata).	99
Figura 31-Descrizione schematica dei flussi di informazione associati al sistema di previsioni numeriche del servizio Meteorologico dell'AM.....	104
Figura 32-schema del sistema di previsioni numeriche operativo del Servizio Meteorologico dell'AM.....	108
Figura 33-schema rottura argine per sifonamento(Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2002)	111
Figura 34-confronto stazioni pluviometriche - CMCC	122
Figura 35- schema modello idrologico.....	124

Figura 36-schema modello idrologico	124
Figura 37 -confronto dati misurati e simulazione modello idrologico-A) Farneto del Principe, B) Traversa di Tarsia	125
Figura 38-Output del modello per un caso di addestramento: a) allagamento predetto, b) allagamento originale, c) velocità predetta e d) velocità originale. I campi di allagamento sono espressi in metri [m] e le velocità in metri al secondo [m/s]......	127
Figura 39-Output del modello per un caso di addestramento (validazione): a) allagamento predetto, b) allagamento originale, c) velocità predetta e d) velocità originale	128
Figura 40 - Simulazione del 2000, campi di allagamento e velocità in vari istanti temporali.	130
Figura 41- tratto di argine del Fiume Carti più impattante	131
Figura 42- schema modello monodimensionale	132
Figura 43 curva di fragilità	133
Figura 44- Mappa pericolosità Protezione Civile	135
Figura 45- Step 0.....	136
Figura 46- Campi di Previsione delle Precipitazione modello Idrologico	144
Figura 47-Step 2.....	145
Figura 48-Esempio file Control	146
Figura 49-letogrammi sottobacini	146
Figura 50-Step 3.....	147
Figura 51- idrogrammi di uscita dal modello idrologico -previsione	148
Figura 52- Step 3.....	149
Figura 53- Previsione campi tiranti- modello surrogato.....	151
Figura 54-Previsione campi velocità- modello surrogato	151
Figura 55- Previsione campi di velocità- modello surrogato	151
Figura 56 Previsione campi tiranti- modello surrogato- modalità rottura argine	152
Figura 57-Fasi di valutazione di impatto archeologi (G. Campeol, C. Pizzinato)	154
Figura 58-Lago oscillante: schema equilibrato. Schema del primo ordine (più croci). Schema del secondo ordine (più croci). Soluzione iniziale e topografia del fondo (linee solide e tratteggiate).	169
Figura 59- <i>Lago oscillante con resistenza aerodinamica: schema equilibrato. In a) è mostrata la soluzione analitica e la topografia del fondale (linea nera) ottenuta in (Sampson et al., 2004); in b) lo schema del primo ordine (croci di volte) (linea azzurra) e in c) lo schema del secondo ordine (più croci) ottenuto da FHM-2D (linea verde).</i>	173
Figura 60-Prova di rottura della diga: a) soluzione analitica; b) con estensioni del primo ordine; e c) con estensioni del secondo ordine.	176
Figura 61-Flusso transcritico $Z(x)$, $h(x, t) + Z(x)$ senza urti. In a è rappresentata la soluzione analitica; in b quella ottenuta dal primo ordine e in c quella dall'estensione del secondo ordine	177
Figura 62- $Z(x)$, $h(x, t) + Z(x)$ Flusso transcritico con urto. In a è rappresentata la soluzione analitica; in b quella ottenuta dal primo ordine e in c quella dall'estensione del secondo ordine.	177
Figura 63-Flusso subcritico $Z(x)$, $h(x, t) + Z(x)$. In a è rappresentata la soluzione analitica; in b quella ottenuta dal primo ordine e in c quella dall'estensione del secondo ordine.....	178
Figura 64-Gobba ellittica utilizzata per il caso di test. Il livello di contorno più basso è a 0,01 e la gobba ha un'altezza di 0,8.	179
Figura 65-Risultati del test d'urto in 2D.....	179

Figura 66-Topografia dettagliata del bacino idrografico (da Cea et al, 2010)	180
Figura 67-Campi di velocità calcolati al tempo $t = 20$ s nella prova di deflusso con pendenza.....	181
Figura 68-Ietografia di uscita ottenuta da FHM-2D utilizzando il primo e il secondo ordine di accuratezza per un diverso numero di celle di calcolo 348x192 e 256x128.....	181
Figura 69-Ietografia di uscita ottenuta in Cea et al, 2010 utilizzata per il confronto con i risultati di FHM-2D.....	182
Figura 70-L'impostazione di fondo degli esempi numerici. La figura illustra il caso di un drenaggio urbano con ostacoli come le case.	182
Figura 71-Scarico in uscita in funzione del tempo ottenuto da (Chertock et al., 2015). Sull'asse x è stato riportato il tempo in secondi e sull'asse y la portata.....	183
Figura 72-Scarico in uscita in funzione del tempo ottenuto con FHM-2D: le figure a, b, c, d sono riferite al primo ordine di precisione e rispettivamente a 100, 200, 400 e 800 m di dimensione della griglia di calcolo; e, f, g, h sono riferite al secondo ordine di precisione e rispettivamente a 100, 200, 400 e 800 m di dimensione della griglia di calcolo.....	184
Tabella 1-Parameter settings in the ensemble learning model.....	19
Tabella 2-CVRMSE della precipitazione media annuale	24
Tabella 3-Metriche statistiche delle medie della frequenza totale delle precipitazioni estreme simulate dai GCM rispetto alle osservazioni per i tre cluster.	26
Tabella 4-Metriche statistiche delle medie della quantità totale di precipitazioni estreme simulata dai GCM rispetto alle osservazioni per i tre cluster.	26
Tabella 5-Variazioni percentuali della frequenza e intensità degli eventi estremi di precipitazione.....	28
Tabella 6-Informazioni statistiche sulle siccità meteorologiche, agricole e idrologiche nella pianura dell'Agro-Pontino nel periodo 1951-2014 basate su dati pluviometrici. I risultati sono i cluster Est, Nord e Sud in sequenza.....	30
Tabella 7-Variazioni percentuali delle statistiche delle siccità per periodi future in relazione a quelle del periodo di riferimento 1990-2014.	31
Tabella 8-Dati scaricati dalla piattaforma dell'Aeronautica Militare.....	42
Tabella 9- Schema.....	52
Tabella 10- descrizione eventi	94
Tabella 11- dataset stazioni pluviometriche.....	120
Tabella 12- eventi significativi	121
Tabella 13 caratteristiche modello idrologico	124
Tabella 14 - Distribuzione statistica dello scarto quadratico medio di Figura 37.....	127
Tabella 15 - Distribuzione statistica dello scarto quadratico medio di Figura 38.....	128
Tabella 16-4 Valori numeri indicatori di sensibilità archeologica (G. Campeol, C. Pizzinato, 2007)	155
Tabella 17-Livello di sensibilità ottenuta e relativo valore numerico (G. Campeol, C. Pizzinato, 2007)	156
Tabella 18-Livelli di RTC e azioni attuative (Campeol G., Pizzinato C., 2007)	157
Tabella 19-parametri e relativi punteggi (D. Calaon, C. Pizzinato, 2011)	159
Tabella 20-livelli ed azioni possibili (D. Calaon, C. Pizzinato, 2011).....	159

1. INTRUDUZIONE GENERALE

Negli ultimi decenni numerose aree costiere sono state colpite da eventi estremi idrologici quali alluvioni o siccità. Si ricordano a tal proposito gli effetti devastanti delle alluvioni prodotte dall'uragano Sandy che ha colpito l'area di NY (Xian et al., 2015), l'uragano Katrina a New Orleans (Eamon et al., 2007), l'Uragano Harvey a Houston (Scotti et al. 2020), l'acqua alta nella città di Venezia nel 2019 (Lionello et al., 2021). Prolungate siccità hanno colpito zone costiere, quali per esempio il Delta del Mekong, amplificando i fenomeni di subsidenza, di intrusione salina negli acquiferi costieri e riducendo la disponibilità d'acqua per usi agricoli e civili (Nguyen et al., 2020).

Numerosi studi hanno evidenziato come in futuro le zone costiere del Mediterraneo saranno soggette a maggiori rischi conseguenti a precipitazioni estreme e siccità. (Hochman et al., 2022; Insua-Costa et al., 2022); tali rischi mostrano una significativa caratteristica di non uniformità, con tendenze alla siccità nelle regioni più meridionali e maggiori precipitazioni in quelle settentrionali (Tramblay e Somot, 2018; Zittis et al., 2021).

In Italia molte aree costiere presentano un elevato grado di vulnerabilità a tali fenomeni idrologici estremi, in particolare le aree di bonifica in conseguenza delle modeste elevazioni del terreno sul livello del mare, nonché dell'eccessivo sovrasfruttamento delle acque sotterranee (Antonioli et al., 2017, Mitra et al., 2021).

Il rischio idraulico in aree costiere è destinato ad aggravarsi per l'effetto combinato dell'incremento della popolazione (si prevede un incremento della popolazione residente nelle aree costiere del 25% nel 2050), dei fenomeni di subsidenza conseguenti a sovra sfruttamento dei corpi idrici sotterranei, dell'innalzamento del livello marino prodotto dal riscaldamento globale, nonché dall'intensificazione in frequenza e intensità dei già citati eventi estremi idrologici, alluvioni e siccità (IPCC, 2019).

In tale contesto numerosi autori concordano sulla necessità di sviluppare metodologie in grado di identificare politiche e azioni per la mitigazione del rischio idraulico. Essi sottolineano come tali azioni debbano essere sostenibili dal punto di vista sociale, ambientale ed economico e che inoltre debbano essere in grado di rispondere efficacemente alle problematiche poste dal cambiamento climatico (Merz et. al. 2014).

Protezione dell'ambiente, sviluppo economico e inclusione sociale costituiscono gli elementi portanti della agenda 2030, sottoscritta nel Settembre 2015 da 193 Paesi membri dell'ONU. L'Agenda identifica 17 obiettivi principali di sviluppo sostenibile articolati in 169 sotto-obiettivi.

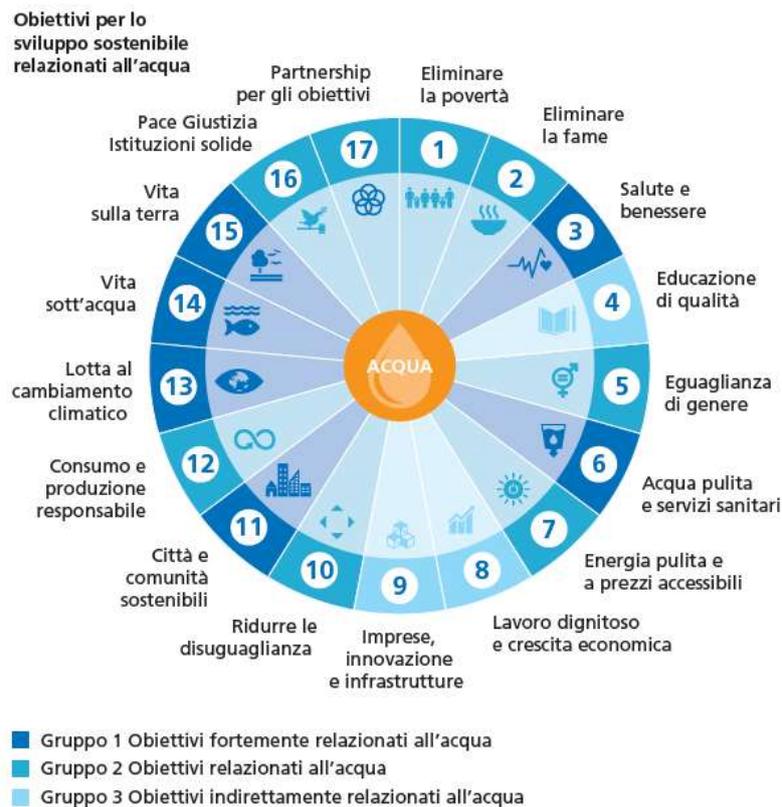


Figura 1-Obiettivi dell'Agenda 2030 relazionati all'acqua

Tra questi, l'obiettivo 6 – garantire a tutti la disponibilità e gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico sanitarie- è quello fa esplicito riferimento all'acqua ma, come evidenziato in figura 1 (Ward,2018), di fatto tutti gli obiettivi dell'Agenda 2030 sono relazionati all'acqua. Obiettivi di riferimento nell'ambito delle problematiche relative al rischio idraulico in aree costiere sono : 6.1-7 Garantire una gestione sostenibile della risorsa idrica in quantità e qualità da permettere un adeguata disponibilità di acqua potabile alle comunità nonché un adeguato trattamento delle acque usate per proteggere e risanare gli ecosistemi, che in larga misura, costituiscono anche i luoghi di approvvigionamento delle acque; 6.6 proteggere e risanare entro il 2030 gli ecosistemi legati all'acqua, comprese le montagne, le foreste, le paludi, i fiumi, le falde acquifere e i laghi; 13.2 integrare le misure di cambiamento climatico nelle politiche, strategie e pianificazione nazionali; 15.3 combattere la desertificazione, ripristinare le terre degradate, comprese quelle colpite da desertificazione, siccità e inondazioni, e battersi per ottenere un mondo privo di degrado del suolo entro il 2030.

Gli accordi di Parigi, nello stesso anno 2015, sulla limitazione delle emissioni di gas serra, nonché Conferenza delle Nazioni Unite a Sendai sulla riduzione del rischio di disastri (Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030) rimarcano come le maggiori sfide poste dal cambiamento climatico a scala planetaria riguardano questioni legate alla sicurezza dell'acqua che si manifestano a scala locale o regionale in termini di scarsità delle risorsa idrica, siccità, rischi di alluvione prodotti da più intensi e frequenti eventi idrologici estremi, nonché incrementi di temperatura in grado di alterare la qualità degli habitat acquatici e la loro biodiversità (UN Office for Disaster Risk Reduction, October 2015).

Gli indirizzi dell'Agenda 2030 sono stati recepiti sia dal Green Deal Europeo, sia dal Piano di Ripresa e Resilienza (PRNN). Quest'ultimo strumento ha tra le finalità principali anche quella di sostenere investimenti e riforme che contribuiscano ad attuare il cosiddetto accordo di Parigi e gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite dell'Agenda 2030, in coerenza con il Green Deal europeo, ossia quella strategia di crescita dell'Europa volta a promuovere l'uso

efficiente delle risorse, il ripristino della biodiversità, la riduzione dell'inquinamento e la difesa dalle catastrofi naturali. L'accesso ai finanziamenti del PRNN è condizionato al fatto che in nessun caso, le opere e gli interventi progettuali violino il principio del "Do No Significant Harm (DNSH)".

Secondo tale principio un'attività arreca un danno significativo:

1. alla mitigazione dei cambiamenti climatici se porta a significative emissioni di gas serra (GHG);
2. all'adattamento ai cambiamenti climatici se determina un maggiore impatto negativo del clima attuale e futuro, sull'attività stessa o sulle persone, sulla natura o sui beni;
3. all'uso sostenibile o alla protezione delle risorse idriche e marine se è dannosa per il buono stato dei corpi idrici (superficiali, sotterranei o marini) determinandone il loro deterioramento qualitativo o la riduzione del potenziale ecologico;
4. all'economia circolare, inclusa la prevenzione, il riutilizzo ed il riciclaggio dei rifiuti, se porta a significative inefficienze nell'utilizzo di materiali recuperati o riciclati, ad incrementi nell'uso diretto o indiretto di risorse naturali, all'incremento significativo di rifiuti, al loro incenerimento o smaltimento, causando danni ambientali significativi a lungo termine;
5. alla prevenzione e riduzione dell'inquinamento se determina un aumento delle emissioni di inquinanti nell'aria, nell'acqua o nel suolo;
6. alla protezione e al ripristino di biodiversità e degli ecosistemi se è dannosa per le buone condizioni e resilienza degli ecosistemi o per lo stato di conservazione degli habitat e delle specie, comprese quelle di interesse per l'Unione.

È evidente come il rispetto del principio del DNSH imponga una radicale modifica dei tradizionali approcci progettuali fino ad ora seguiti per identificare e dimensionare interventi e opere di mitigazione del rischio idraulico da eventi idrologici estremi. Alla visione spesso

settoriale finalizzata alla soddisfazione di un particolare obiettivo, per esempio la sola difesa dalle alluvioni, se ne contrappone un'altra, che può essere definita olistica, secondo la quale il raggiungimento dello obiettivo specifico sia da perseguire tenendo in conto contestualmente anche di altri obiettivi altrettanto importanti, in modo tale da realizzare opere che pur difendendo il territorio da un determinato rischio, per esempio il rischio alluvionale, non determinino una maggiore vulnerabilità del territorio e delle sue risorse idriche per esempio a siccità (Ward et al., 2020), o che risultino non sostenibili dal punto di vista sociale, economico e ambientale secondo quanto definito nei punti 1-6 sopra elencati.

Centrale ai fini della riduzione del rischio idraulico associato agli eventi alluvionali sono le previsioni delle precipitazioni che devono essere effettuate a differenti orizzonti di tempo: da quelli caratteristici dei sistemi di allerta rapida (early warning systems) delle ore o di alcuni giorni finalizzate alla gestione dell'emergenza in atto o comunque imminente, fino a quelli su scale decennali propri delle proiezioni climatiche volte a pianificare le opere e le azioni di riduzioni del rischio idraulico alluvionale.

Con questo orientamento in mente, in questa tesi, vengono sviluppati due distinti studi entrambi volti a contenere l'impatto dei fenomeni estremi alluvionali. Il primo degli studi è relativo alle proiezioni climatiche a scala locale della regione Lazio con specifico focus alla Piana Pontina, effettuate con un modello ibrido di machine learning e downscaling statistico, finalizzate a investigare l'eventuale modifica del regime delle precipitazioni prodotto dal cambiamento climatico. Il secondo degli studi è relativo allo sviluppo di un sistema di allerta rapida delle alluvioni per l'area archeologica di Sibari. Entrambi gli studi utilizzano approcci avanzati di intelligenza artificiale. Tali approcci di machine learning integrano quelli più tradizionali attinenti all'idraulica e alla idrologica consentendo di realizzare strumenti di previsione degli eventi estremi alle differenti scale temporali più robusti ed efficaci.

2. PARTE I – LE PROIEZIONI FUTURE DEL REGIME PLUVIOMETRICO NELLA REGIONE LAZIO E NELLA PIANE PONTINA: ALLUVIONI E SICCITÀ

Sommario

I modelli di circolazione globale (GCMs) sono ampiamente utilizzati per predire le condizioni climatiche future in tutto il mondo, come ad esempio temperatura e precipitazioni. Tuttavia, per guidare modelli che si occupano degli impatti a livello locale, sono necessari input con una maggiore precisione spaziale. L'algoritmo del modello nascosto di Markov non omogeneo (NHMM) è comunemente impiegato per ridurre statisticamente le previsioni delle precipitazioni dei GCMs. Al fine di migliorare l'accuratezza del tradizionale NHMM nella riproduzione delle caratteristiche spazio-temporali delle precipitazioni in siti geografici specifici, specialmente in presenza di precipitazioni estreme, abbiamo sviluppato un nuovo framework per la riduzione delle previsioni delle precipitazioni. Questo modello a livelli include due fasi: (1) l'istituzione di un modello di apprendimento dell'insieme per predire le probabilità di occorrenza di differenti livelli di precipitazioni giornaliere aggregate in diversi siti e (2) la costruzione di uno schema di riduzione delle previsioni delle precipitazioni NHMM per quantità giornaliere a livello di singoli pluviometri, utilizzando gli output del modello di apprendimento dell'insieme come predittori. Come dimostrano i risultati ottenuti per lo studio di caso nella Regione Lazio, il nostro modello di riduzione delle previsioni delle precipitazioni risulta estremamente efficiente e superiore al NHMM nella simulazione della variabilità delle precipitazioni e delle precipitazioni estreme.

Introduzione

Il rapporto più recente del Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC) ha messo in luce conclusioni rilevanti, tra cui il riscaldamento senza precedenti del clima dovuto all'influenza umana (IPCC, 2021). È stato dimostrato che i pericoli climatici legati all'acqua e i

molteplici rischi per gli ecosistemi e gli insediamenti umani aumentano con il riscaldamento globale (Sammen et al., 2022; Tabari, 2021), soprattutto nelle città costiere a bassa altitudine (Toimil et al., 2020; Vousdoukas et al., 2018).

Sebbene il modello di circolazione globale (GCM) possa fornire utili dati su larga scala sulle variabili climatiche per le proiezioni future, la sua risoluzione spaziale orizzontale è troppo grossolana per essere efficacemente utilizzata nella gestione dell'acqua a livello di bacino o regionale (Christensen & Kjellström, 2020; Wang et al., 2020). Inoltre, le simulazioni delle precipitazioni effettuate dai GCM sono notevolmente inaccurate, con una sottovalutazione significativa delle precipitazioni intense a causa delle limitazioni nel processo di modellizzazione (Huang et al., 2020; Kang et al., 2015). Queste carenze spesso portano a incertezze considerevoli nelle proiezioni climatiche (Her et al., 2019; Norris et al., 2021; Yang et al., 2020). È quindi fondamentale sviluppare strategie per ridurre in modo significativo tali errori, soprattutto per quanto riguarda le precipitazioni estreme.

Il downscaling statistico è un approccio ampiamente utilizzato per migliorare le proiezioni delle precipitazioni per i GCM. Wilby e Wigley (1997) hanno esaminato le tecniche comuni di downscaling per affrontare il problema della risoluzione grossolana dei modelli climatici rispetto ai dati osservati. Queste tecniche possono essere categorizzate in quattro gruppi principali: regressione, classificazione meteorologica, generatori di tempo stocastico e modellazione mesoscala. In linea di massima, le variabili meteorologiche locali vengono considerate come predittori, mentre le informazioni sulla circolazione atmosferica su larga scala dei GCM vengono utilizzate come predittori. Diversi autori hanno esplorato il potenziale del modello nascosto di Markov non omogeneo (NHMM), un approccio che mostra promesse come generatore di tempo stocastico e strumento diagnostico per rilevare le relazioni tra le precipitazioni su diversi siti e le variabili di circolazione atmosferica su larga scala (Cioffi et al., 2016, 2017; Shahriar et al., 2021; Siabi et al., 2021). Le assunzioni chiave di questo approccio includono la dipendenza dell'occorrenza giornaliera delle precipitazioni su un numero finito

di stati meteorologici non osservati e la dipendenza delle probabilità di transizione dagli stati precedenti e dai predittori atmosferici dipendenti dal tempo.

I predittori potenziali per il NHMM comprendono principalmente l'altezza geopotenziale (GP), la pressione al livello del mare, i campi di vento, la temperatura dell'aria, l'umidità e le loro combinazioni. Poiché i dati originali possono essere ad alta dimensionalità, è spesso necessario utilizzare un'analisi delle componenti principali per ridurre la complessità e individuare i comportamenti dominanti dei predittori atmosferici su larga scala. La selezione dei predittori può essere complessa e richiedere criteri statistici per valutare l'accuratezza delle combinazioni potenziali.

Nonostante i successi del downsizing NHMM in diverse applicazioni, è noto che questo approccio fornisce simulazioni inaccurate delle precipitazioni, specialmente negli eventi estremi e in determinate stagioni. Queste limitazioni possono essere affrontate con modifiche leggere al framework NHMM, ad esempio mediante l'implementazione di uno schema di modellazione gerarchica.

Nel nostro studio, abbiamo adottato un approccio di apprendimento dell'insieme per prevedere la probabilità di occorrenza di diversi livelli di precipitazioni giornaliere in più siti. Abbiamo selezionato l'altezza geopotenziale (GP) a 500 hPa e il trasporto integrato verticalmente del vapore acqueo (IVT) come fattori chiave che influenzano l'occorrenza delle precipitazioni. Le probabilità previste sono state utilizzate come predittori per modellare le probabilità di transizione degli stati nascosti nel NHMM, e abbiamo valutato se questa differenza nei predittori possa migliorare l'accuratezza delle simulazioni NHMM.

L'obiettivo dello studio è quello di descrivere le proiezioni future del regime pluviometrico nella regione Lazio e nella pianura Pontina con specifico riferimento agli eventi estremi alluvioni e siccità, ottenute sviluppando e utilizzando un modello di downscaling statistico definito "Stacked Ensemble Learning and Nonhomogeneous Hidden Markov Model". Tale modello consente di riprodurre le caratteristiche delle piogge cumulate giornaliere a scala locale in funzione delle configurazioni atmosferiche alla grande scala come descritte da specifici

predittori, che nel caso specifico sono il trasporto di vapore integrato sull'intera colonna atmosferica (Integrated vapor transport IVT) e l'altezza del geopotenziale a 850 hPa.

Il lavoro si è articolato nello : (1) sviluppare un modello di apprendimento dell'insieme per prevedere la probabilità di eventi di precipitazioni giornaliere con diverse intensità; (2) migliorare l'accuratezza del modello NHMM nella simulazione delle precipitazioni, in particolare degli eventi estremi; e (3) proiettare le future precipitazioni e i possibili cambiamenti negli eventi estremi per la Regione Lazio Figura 2.

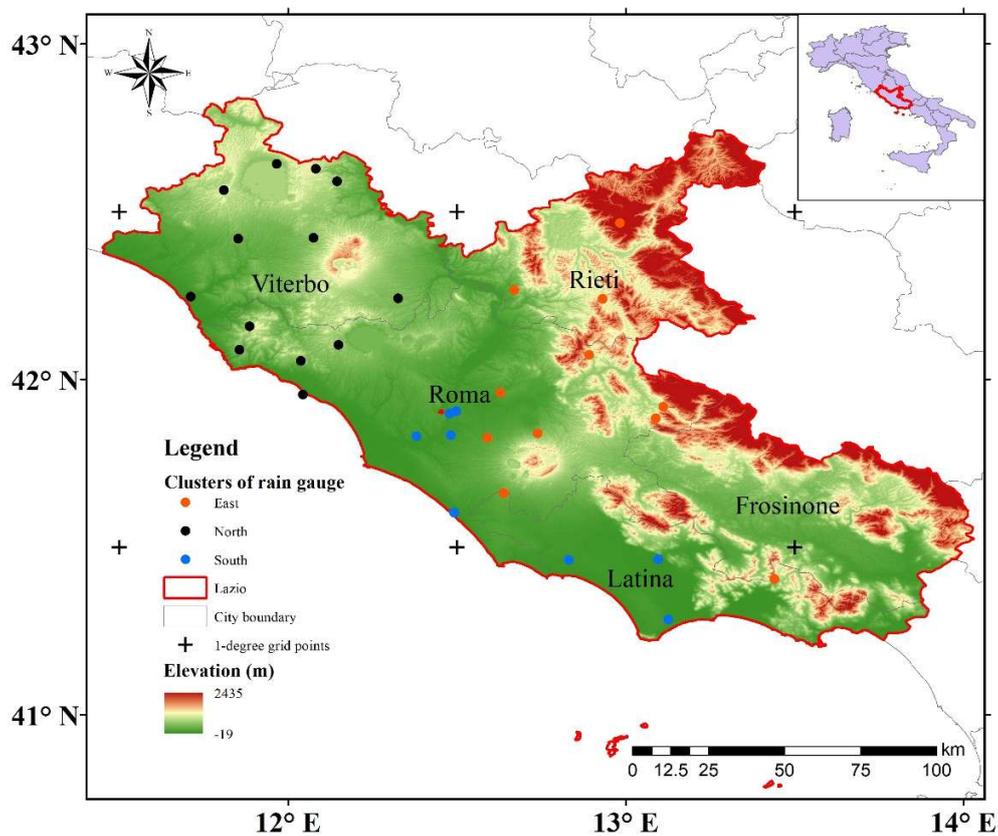


Figura 2-Localizzazione Regione Lazio, Italia

3. DATI E METODI

3.1.DATI

Lo studio prende in esame il dominio di figura 1 corrispondente alla regione Lazio (Figura 1).

Nello studio sono state utilizzate le serie temporali delle precipitazioni giornaliere registrate da 32 pluviometri nel periodo 1951–2014. La figura 2 mostra la distribuzione spaziale dei pluviometri.

Per quanto riguarda le proiezioni future del clima sono stati scaricate le simulazioni effettuate utilizzando cinque modelli generali di circolazione atmosferica e oceanica nell'ambito del CMIP6 (Couple model Intercomparison project) dal World Climate Research Program (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/>), tra cui il CESM2-WACCM (CESM2, T192×T288), MPI-ESM1-2-HR (MPI, T192×T384), MRI-ESM2-0 (MRI, T160×T320), NorESM2-MM (NorESM2, T192×T288) e TaiESM1 (T192×T288). Questi GCM integrano i modelli atmosferici, oceanici, di ghiaccio marino e di superficie terrestre. Ad esempio, MPI-ESM1-2-HR utilizza ECHAM6.3 per l'atmosfera, MPIOM per l'oceano e il ghiaccio marino e JSBACH per i modelli della superficie terrestre (Müller et al., 2018). I cinque GCM in entrambi gli esperimenti storici (1951-2014) e futuri (2015-2100) hanno le variabili di altezza geopotenziale a 850 hPa, vento da est, vento da nord e umidità specifica da 1000 hPa a 250 hPa, su scala giornaliera. Per omogeneizzare i risultati delle simulazioni dai differenti modelli i dati originali con una risoluzione spaziale di 0,9–1,5° sono stati interpolati in 1° utilizzando il metodo bilineare. In questo studio, sono stati selezionati tre scenari di concentrazione rappresentativi, ovvero percorsi di forzatura radiativa bassa (SSP126), media (SSP245) e alta (SSP585) per descrivere i possibili stati climatici futuri durante il 21° secolo. La differenza più significativa tra questi scenari è il grado di riscaldamento globale futuro come limitato da diversi livelli di emissione di gas serra e di aerosol e differenti strategie di sviluppo socioeconomico. Coerentemente con tali scenari, la temperatura media globale aumenterebbe di 0,4–2,1°C per SSP126 e persino di 2,4–5,6°C per SSP585 entro la fine di questo secolo (Tebaldi et al., 2021).

3.2. STACKED ENSEMBLE LEARNING AND NONHOMOGENEOUS HIDDEN MARKOV MODEL DOWNSCALING TECHNIQUE

In questo paragrafo e seguenti, vengono descritti i modelli "Stacked Ensemble Learning Model" e il Nonhomogeneous Hidden Markov Model ("Ensemble-NHMM") specificatamente sviluppati per effettuare il downscaling a scala locale delle precipitazioni nella regione Lazio. La costruzione del modello prevede tre distinte fasi: a) il preprocessing dei dati, b) lo sviluppo dello stacked ensemble learning model; c) lo sviluppo del NHMM. Nella prima fase i dati relativi alle precipitazioni giornaliere e ai dati di rianalisi sono preprocessati per renderli idonei ad essere utilizzati nelle fasi successive. Viene quindi costruito il modello Stacked Ensemble Learning Model. Tale modello trasforma -per ciascuna classe di stazioni pluviometriche- i predittori atmosferici IVT e GPH850 nella probabilità che la pioggia giornaliera media della classe ricada in una predefinita classe di percentile. Tali probabilità costituiscono il predittore dell'NHMM che permette il calcolo per ciascun pluviometro della precipitazione giornaliera.

Il modello di Ensemble-NHMM pertanto prevede in due passaggi: 1) simulare le probabilità di occorrenza delle precipitazioni giornaliere aggregate per ciascuna classe di pluviometri in funzione di predittori atmosferici su larga scala ; 2) utilizzare tali probabilità come predittori del modello NHMM. La Figura 2 mostra brevemente lo schema della tecnica di downscaling di Ensemble-NHMM sviluppata.

Per quanto riguarda i predittori atmosferici, studi precedenti (Conticello et al. 2018,2020; Qin et al. 2022) hanno dimostrato che l'altezza del geopotenziale a 850 hPa e del trasporto del vapore acqueo integrato verticalmente rappresentano efficacemente quelle caratteristiche della circolazione atmosferica alla grande scala che più di altre influenzano il regime di precipitazione (Cioffi et al., 2017). Diversamente dal tradizionale metodo di downscaling mediante NHMM, dove tali predittori sono applicati direttamente come variabile esogene di input al modello, nello schema qui proposto si introduce un predittore intermedio che consiste

nella matrice di probabilità di occorrenza delle precipitazioni giornaliere medie delle stazioni pluviometriche appartenenti a una classe. In tale matrice le righe sono relative allo specifico giorno del periodo considerato e le colonne a cinque diversi percentili delle precipitazioni giornaliere medie della classe di pluviometri aggregati (senza pioggia, 0,1 mm/giorno–30, 30–60, 60–95, >95). La matrice di probabilità è ottenuta dal modello Stacked Ensemble Learning Model, che integra algoritmi di machine learning quali l' XGBoost e il Random Forest. Come mostrato nella Figura 3, gli input per la fase di apprendimento dello Stacked Ensemble Learning Model sono le componenti principali (PC) dell'altezza geopotenziale a 850 hPa (sono stati selezionati solo i primi 20 PC spiegati con una varianza superiore al 90%) e i valori dell'IVT nei punti della griglia del modello di rianalisi più prossimi alla regione Lazio. Gli output, sempre per la fase di apprendimento del modello Stacked Ensemble Learning Model, sono costituiti dal livello del percentile delle precipitazioni giornaliere medie delle stazioni pluviometriche appartenenti ad una determinata classe.

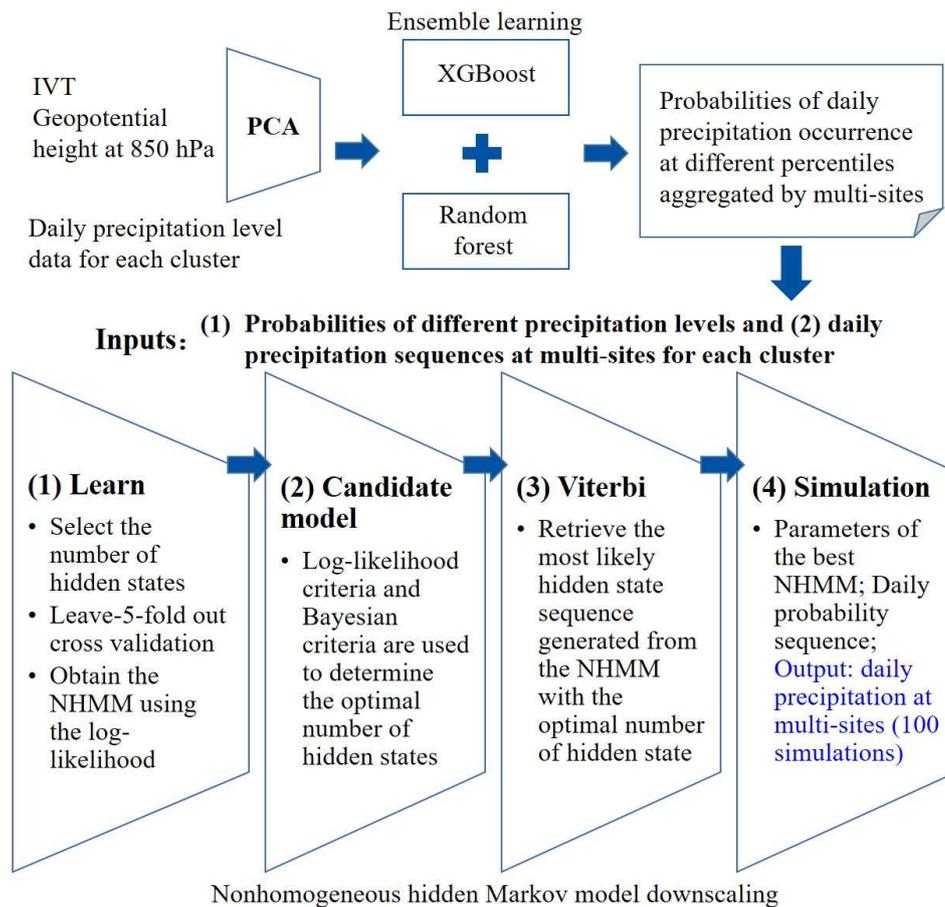


Figura 3-Grafico tecnico del downscaling dell'Ensemble-NHMM

3.3.PRE-PROCESSAMENTO DEI DATI

Il preprocessamento dei dati si è articolato in : a) individuazioni delle classi di pluviometri aggregati (cluster) sulla base del livello di sincronizzazione temporale delle serie temporali delle precipitazioni giornaliere; b) calcolo per ogni giorno del periodo considerato della precipitazione media dell'insieme di stazioni pluviometriche appartenenti alla classe; c) calcolo del percentile della precipitazione media e assegnazione a un determinato intervallo di percentili; d) identificazione dei predittori atmosferici e riduzione dei dati mediante applicazione della tecnica delle Componenti principali.

Per quanto concerne quanto di cui al punto a), utilizzando la procedura suggerita in Conticello et al. (2018) i pluviometri sono aggregati in classi spazialmente omogenee sulla base del loro livello di sincronizzazione delle precipitazioni più intense. Utilizzando il metodo della modularità sono stati identificate le tre classi di pluviometri aggregati come mostrati in figura 1 che abbiamo etichettato come "Est", "Nord" e "Sud" con riferimento alla loro posizione spaziale.

Per ognuna delle classi sopra definite e per ciascun giorno del periodo considerato, è stata calcolata la precipitazione media delle stazioni pluviometriche appartenenti alla classe; tale precipitazione media è stata assegnata a un predefinito intervallo di percentile: nessun evento (I) <0.1 mm; precipitazioni molto deboli (II) <30esimo percentile; precipitazioni leggere (III) <60esimo percentile; precipitazioni moderate (IV) < 95esimo percentile; precipitazioni estreme (V) >95esimo percentile.

Due predittori atmosferici sono stati selezionati come input al modello “ Stacked ensemble learning model” : l’altezza di geopotenziale a 850 hPa e l’IVT.

Abbiamo scelto i due predittori sulla base delle seguenti considerazioni: IVT quantifica l’intensità del trasporto di umidità che colpisce una data regione geografica specifica e quindi la probabile intensità delle precipitazioni. L’altezza di geopotenziale rappresenta le caratteristiche della circolazione atmosferica e in particolare la struttura del flusso del fluido. Insieme, questi due predittori descrivono la direzione e l’intensità del trasporto di umidità. Prima dell’addestramento, i due predittori devono essere sottoposti alla preelaborazione dei dati (ad esempio, standardizzazione e riduzione della dimensionalità). Le sequenze IVT e GP giornaliere sono state standardizzate utilizzando il metodo z-score, che è adimensionale. Abbiamo quindi estratto i valori IVT standardizzati corrispondenti alla posizione geografica dei pluviometri e una variabile indipendente $[[IVT_set]]_{(t,m)}$ ($t=1,\dots,T$; $m=1,\dots,M$), dove T e M sono rispettivamente il numero totale di giorni dal 1960 al 2015 e il numero di pluviometri in un cluster.

Dai dati di rianalisi per il periodo 1960-2015 sono state ricostruite le serie temporali storiche dei campi di altezza di geopotenziale 850 hPa per un dominio identificato nell'intervallo di latitudine 0-80° N e di longitudine 90°O e 70°E. Inoltre sono state ricostruite le serie storiche dell'IVT in 8 punti del grigliato dei dati di rianalisi più prossimi alla regione Lazio a partire dai campi di velocità del vento meridionali e zonali e dell'umidità specifica a differenti quote utilizzando la seguente relazione:

$$IVT = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{100 \text{ hPa}} qV dp$$

Essendo g l'accelerazione di gravità, q l'umidità specifica e V la velocità nelle sue componenti zonale e meridionale, p_0 e 100 hPa la pressione rispettivamente al livello marino e in quota.

Le serie storiche dei campi di altezza di geopotenziale sono state quindi ridotte in dimensione utilizzando le Componenti principali. Sono state selezionate come input al modello "Stacked ensemble learning model" 20 componenti principali che spiegavano il 90% della varianza.

3.4.STACKED ENSEMBLE LEARNING MODEL

Obiettivo del modello "stacked ensemble learning model" è predire la probabilità di predefiniti livelli di precipitazione media delle stazioni pluviometriche appartenenti a un specifica classe territoriale in funzione dei valori dei predittori atmosferici, GP_850 e IVT rappresentativi del trasporto di umidità alla grande scala. Costituiscono parte suddetto modello i sub-modelli Extreme Gradient Boosting (XGboost) e Random Forest (RF) di cui viene fornita una breve descrizione nei paragrafi seguenti.

3.4.1. EXTREME GRADIENT BOOSTING

XGboost è un modello sviluppato da Chen and Guestrin (2016) finalizzato a risolvere problemi di classificazione multipla e regressioni.

Sia $D = \{(x_i, y_i)\}$ una serie temporale di dati di apprendimento del modello, nel nostro caso $x_i \in \{(IVT_set_{t,m}, GP_850_{t,p})\}$ per $1 < i < m + p$, e $y_i \in \{Y_t\}$ l'appartenenza a un predeterminato livello di percentile della pioggia media per i pluviometri all'interno di una determinata classe territoriale.

Il valore \hat{y}_i in funzione di valori noti di x_i può essere calcolato dalla relazione seguente:

$$\hat{y}_i = \Phi(x_i) = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in \mathcal{F} \quad (2)$$

dove K è il numero degli alberi decisionali del modello, \mathcal{F} rappresenta tutte le possibili classificazioni e alberi della regressione, $f_k(x_i)$ rappresenta l'output del k -esimo albero dell' i -esimo campione.

XGBoost si basa sulla minimizzazione di una funzione obiettivo O , espressa dall' Eq. (3):

$$O(\Phi) = \sum_i l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (3)$$

$$\Omega(f_k) = \gamma\alpha + \frac{1}{2}\lambda\|w\|^2 \quad (4)$$

dove il primo termine, $\sum_i l(y_i, \hat{y}_i)$, è la funzione di danno o di costo che misura il grado di accuratezza con cui un il modello riproduce la serie di dati empirici originaria, nello specifico la differenza fra y_i and \hat{y}_i ; Ω è un termine di regolarizzazione che quantifica la complessità del modello per evitare l'overfitting; γ and λ sono dei coefficienti di penalità per ogni nodo foglia dell'albero decisionale: α and w sono rispettivamente il numero totale dei nodi foglia e il loro peso.

L'algoritmo XGBoost usa un apprendimento incrementale per ottimizzare la funzione obiettivo. Nella t -esima iterazione un nuovo albero è aggiunto come segue:

$$O^t = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(x_i)) + \Omega(f_t) \quad (5)$$

dove n è il numero dei campioni. L'espansione in termini del secondo ordine della serie di Taylor fornisce

$$O^t \cong \sum_{i=1}^n [l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) + g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t^2(x_i)] + \Omega(f_t) \quad (6)$$

$$g_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}} l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) \quad (7)$$

$$h_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}}^2 l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) \quad (8)$$

Dove g_i e h_i sono il derivare parziali di l del primo e secondo ordine. Quindi la riduzione dell'errore dopo la divisione dell'albero decisionale può essere ottenuta da

$$O_{split} = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sum_{i \in L} g_i)^2}{\sum_{i \in L} h_i + \lambda} + \frac{(\sum_{i \in R} g_i)^2}{\sum_{i \in R} h_i + \lambda} - \frac{(\sum_{i \in I} g_i)^2}{\sum_{i \in I} h_i + \lambda} \right] - \gamma \quad (9)$$

Dove I_L e I_R sono I nodi sinistro e destro dopo la divisione.

3.4.2. RANDOM FOREST

Random Forest (RF) è uno dei più popolari algoritmi di apprendimento di insieme basato su alberi decisionali (Breiman, 1996). Il concetto chiave dell'RF è che alberi multipli o reti possono ottenere predizioni più accurate di alberi decisionali o reti singole (Genuer et al., 2017). In questa applicazione viene utilizzato un algoritmo di RF le cui fasi principali si articolano nel modo seguente:

- (1) Generazione casuale di set di dati multipli utilizzando la tecnica di bagging sampling da un data set originale di apprendimento;
- (2) Sviluppo per ogni data set di un albero decisionale e calcolo della predizione da ciascuno di essi;
- (3) Predizione finale ottenuta da un opportuna combinazione delle predizioni da ciascun albero decisionale.

3.4.3. IL MODELLO DI ENSEMBLE LEARNING CHE INTEGRA I MODELLI XGBOOST E RF

In questo studio per calcolare le probabilità che le precipitazioni medie di un insieme di pluviometri appartenenti a una classe territoriale ricadano in un determinato intervallo di percentile, i modelli XGboost e RF sono integrati in un modello di apprendimento di insieme (Ensemble Learning Model, ELM). ELM è un algoritmo che apprende come combinare in modo ottimale le previsioni ottenute da più efficienti modelli di machine learning quali quelli descritti in precedenza. L'algoritmo è strutturato su più livelli: i dati originali sono divisi in n serie di dati per l'addestramento dei modelli base. Ad un primo livello le previsioni dai modelli base sono combinate da un meta-modello che apprende come combinare al meglio le previsioni dei modelli di base e viene addestrato su diverse previsioni fatte dai singoli modelli di base; i dati non utilizzati per addestrare i modelli di base vengono inviati al meta-modello, vengono fatte le previsioni e queste previsioni, insieme agli output attesi, forniscono le coppie di input e output del set di dati di addestramento utilizzato per adattare il meta-modello. Il meta-modello così addestrato è quindi utilizzato per effettuare la previsione finale. In figura 4 è mostrato lo schema del ELM utilizzato in questo studio.

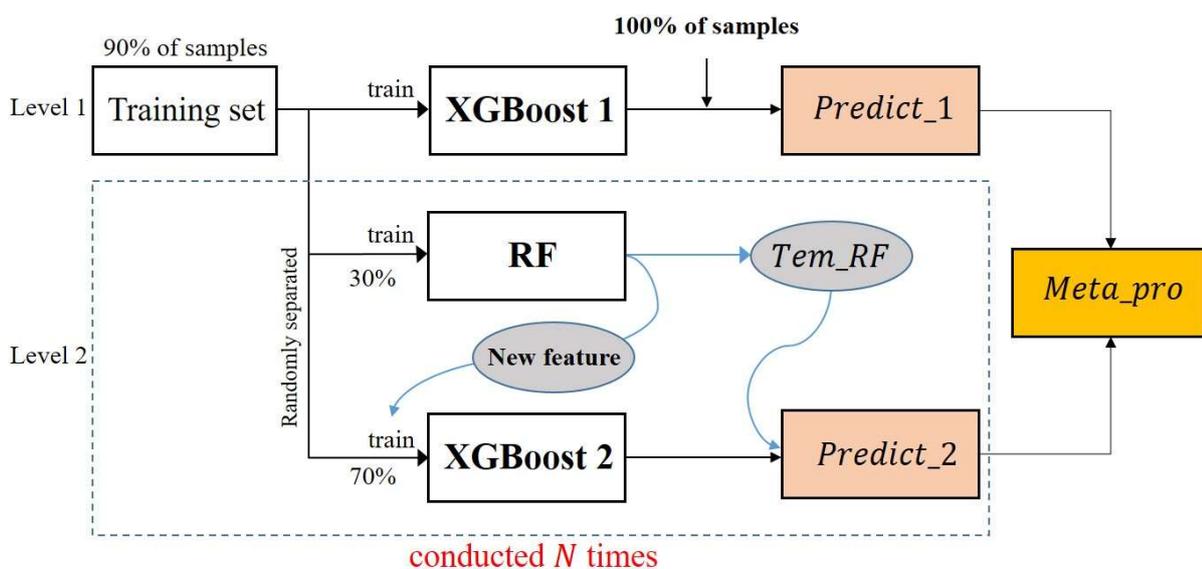


Figura 4- Schema di addestramento del modello di Ensemble

Con riferimento alla figura, al primo livello il 90% dei campioni è casualmente selezionato per creare la serie di dati per l'addestramento del primo modello XGboost1. Al secondo livello il 30% della serie di dati di addestramento sono estratti casualmente per addestrare il modello di RF. I rimanenti 70% di dati sono utilizzati per addestrare il modello di XGboost2. Al secondo livello tale procedimento è ripetuto n volte con n=120. Le predizioni fatte al primo livello e al secondo livello sono quindi utilizzate per ottenere le predizioni finali come media delle n+1 previsioni indipendenti.

Il risultato finale è una matrice con c colonne e T righe che contiene i valori di probabilità che le precipitazioni giornaliere medie di un insieme di pluviometri, appartenenti ad una data classe territoriale, ricadano in predefiniti intervalli di percentile. Quindi, le possibili configurazioni della circolazione atmosferica alla grande scala, descritte dai campi di GP850 e dall'IVT, sono sintetizzate nell'informazione relativa all'informazione su tale probabilità. Naturalmente la somma delle probabilità di ciascuna riga della matrice è pari a 1.

3.4.4. TUNING DEI PARAMETRI E VALIDAZIONE DEL ELM

Il modello ELM è stato implementato in Rstudio usando la versione di R 4.1.3. La tabella 1 riporta i parametri specifici di settaggio dei modelli XGboost e RF, mentre la tabella 2 mostra la matrice di confusione utilizzata per valutare la capacità del modello ELM nel simulare le probabilità dei differenti livelli di precipitazioni medie.

Tabella 1-Parameter settings in the ensemble learning model.

	Parameter	Explanation	Value
XGBoost	booster	Specify the type of booster	gbtree
	objective	Specify the learning task of the model	multi:softprob
	max.depth	Maximum depth of a tree	8*, 11**
	eta	Learning rate	0.1*, 0.46**
	nrounds	Number of rounds	1200*, 60**

	min_child_weight	Minimum weight for a child leaf node	3*, 10**
	subsample	Ratio of training samples	0.8
	eval_metric	Evaluation metrics for validation	mlogloss
RF	ntree	Number of trees	100
	ntry	Number of variables randomly used as candidates at each split	7

3.5. NONHOMOGENEOUS HIDDEN MARKOV MODEL

Il modello NHMM è un doppio processo stocastico che coinvolge due variabili: le osservazioni delle piogge cumulate giornaliere di un insieme multivariato di stazioni pluviometriche e un numero finito e numerabile di stati nascosti discreti (hidden states).

Tali variabili possono essere definite come segue:

Sia $\mathbf{R}_t = (R_t^1, \dots, R_t^M)$ un vettore multivariato della registrazione di precipitazioni giornaliere da M pluviometri nel giorno t, si ammette che le osservazioni \mathbf{R}_t al tempo t sono indipendenti da tutte le altre variabili nel modello fino al tempo t e siano condizionate dallo stato nascosto al \mathbf{S}_t al tempo t, cioè la probabilità $P(\mathbf{R}_t | \mathbf{R}_{1:t-1}, \mathbf{S}_{1:t}) = P(\mathbf{R}_t | \mathbf{S}_t)$;

Sia $S_t = (1, \dots, s)$ lo stato nascosto (o stato del tempo) al giorno t la cui transizione di probabilità $(S_t | S_{1:t-1}; X_{1:t}) = P(S_t | S_{t-1}; X_t)$ è modellata come un processo Markoviano del primo ordine ed è condizionata da variabili esogene X_t che rappresentano l'influenza di predittori atmosferici sulla probabilità di transizione degli stati.

L'identificazione dei parametri del modello – numero degli stati nascosti e momenti delle funzioni di densità di probabilità predefinite – viene effettuata massimizzando la log-likelihood formulata come

$$l = \log P(R|X) = \log \sum_S [P(S_1 | X_1) \prod_{t=2}^T P(S_t | S_{t-1}, X_t)] [\prod_{t=1}^T P(R_t | S_t)]$$

dove $P(R_t|S_t)$ is la probabilità di emissioni di R_t dallo stato S_t , $P(R_t|S_{1:t}, R_{1:t-1}) = P(R_t|S_t)$ rappresenta variabili addizionali (predittori); S_t dipende da S_{t-1} e X_t .

In questo studio le variabili esogene X_t sono relative alla probabilità che le precipitazioni medie giornaliere dei pluviometri appartenenti ad una specifica classe territoriale ricadano all'interno di predefiniti intervalli di percentile. Tali variabili sono calcolate mediante il modello ELM in funzione dei campi di GP850 e IVT e rappresentano quindi l'influenza delle condizioni della circolazione atmosferica alla grada scala che influenza il trasporto di umidità e quindi le precipitazioni locali. La probabilità di transizione degli stati nascosti, condizionata dal predittore X_t , è modellata attraverso una regressione logistica multinomiale.

$$P(S_t = j|S_{t-1} = i, X_t = x) = \frac{\exp(\sigma_{ji} + \rho_j x^t)}{\sum_{h=1}^H \exp(\sigma_{jh} + \rho_h x^t)} \quad (11)$$

dove H denota il numero degli stati nascosti. Una funzione indipendente delta-gamma è stata inoltre selezionata per modellare le probabilità di emissione. Il metodo della massima verosimiglianza è utilizzato per l'identificazione dei parametri (Moon, 1996), mentre la più probabile sequenza di stati nascosti viene generata usando l'algoritmo di Viterbi. Due criteri - Log-likelihood and Bayesian information criteria- erano selezionati per identificare il numero degli stati nascosti più appropriati. Utilizzando tali criteri, applicando il metodo della cross-validation, l'ottimo numero di stati nascosti risultava pari a 6.

Rispetto al metodo generalmente seguito nelle applicazioni del NHMM di utilizzare direttamente i predittori atmosferici per costruire il modello di downscaling, viene quindi proposta una nuova struttura di modelli di downscaling. ELM-NHMM che utilizza un predittore intermedio ottenuto come output dall'ELM, cioè probabilità che le precipitazioni medie giornaliere dei pluviometri appartenenti ad una specifica classe territoriale ricadano all'interno di predefiniti intervalli di percentile. Per verificare l'accuratezza della nuova struttura di modelli di downscaling sono stati condotti degli esperimenti di confronto fra lo schema NHMM tradizionale e quello ELM-NHMM (Jiang et al. 2023).

3.5.1. DEFINIZIONE DI PIOGGE INTENSE E SICITÀ

Le precipitazioni estreme si riferiscono alle piogge giornaliere che superano la soglia del 95-esimo percentile delle serie temporali dei giorni piovosi dal 1960 al 2015 (vengono considerati solo i giorni con una quantità superiore a 0,1 mm). Secondo la definizione fornita in Cioffi et al. (2014), vengono definite per ciascun anno rispettivamente il numero di giorni nell'anno in cui la pioggia supera il percentile indicato e la somma delle precipitazioni relative a tali giorni.

Per quanto riguarda la caratterizzazione delle siccità di differenti durate temporali, si è fatto riferimento all'indice di precipitazione standardizzato (SPI). Tale indice quantifica il deficit di precipitazione per diverse scale temporali; ognuna di queste scale riflette l'impatto della siccità sulla disponibilità della risorsa idrica. Valori negativi dell'SPI indicano periodi di minore precipitazione rispetto alla media. Valori inferiori a -2 sono caratteristici di condizioni di siccità severa (Livada e Assimakopoulos, 2007). Discussioni dettagliate sull'utilizzo e l'interpretazione dell'indice SPI sono largamente presenti in letteratura (Asadi Zarch et al., 2015; Bhunia et al., 2020; Bonaccorso et al., 2015; Cammalleri et al., 2022). Per una regione specifica, l'SPI con risoluzioni temporali di 1 o 3, 6, 12 mesi possono rappresentare differenti tipi di siccità: siccità meteorologica, siccità agricola o idrologica. L'SPI di durate di 1 o 3 mesi viene spesso utilizzato per riflettere la siccità meteorologica. Una carenza di precipitazioni entro 3-6 mesi potrebbe introdurre una sensibile riduzione dell'umidità del suolo e inibire la resa delle colture provocando una siccità agricola. Inoltre, siccità di durata annuale o pluriennale possono produrre una siccità idrologica, cioè una riduzione dei flussi a corpi idrici superficiali e/o sotterranei e il conseguente rischio di esaurimento delle risorse idriche disponibili in un dato territorio (Barker et al., 2016).

In questo studio si è fatto riferimento a SPI con scale di 3, 6 e 12 mesi per caratterizzare le anomalie delle precipitazioni dove valori di $SPI \leq -1$ identificano le condizioni di siccità. Per un periodo specifico sono state definite la frequenza totale degli eventi di siccità (TFD), la

durata media della siccità (MDD), la severità media della siccità (MDS) e l'intensità media della siccità (MDI) (Mishra et al., 2009). Se con DD si indica l'intervallo di tempo dall'inizio alla fine di un periodo di siccità e DS la somma degli SPI negativi durante un periodo di siccità DD, MDD e MDS rappresentano il valore medio dei due indicatori di cui sopra durante un predefinito periodo di tempo, mentre MDI è il rapporto tra MDS e MDD. L'intensità media della siccità MDI consente di quantificare il grado di severità della siccità (Liberato et al., 2021).

3.5.2. INDICI DI ERRORE PER LA VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DELLE SIMULAZIONI DA GCM

Sono stati selezionati due indicatori per valutare la performance dell'Ensemble-NHMM e dell'NHMM. Il primo è il coefficiente di variazione dell'errore quadratico medio (CVRMSE), che quantifica la deviazione standard delle differenze tra simulazioni e osservazioni senza unità. L'altro è il coefficiente di correlazione (CC), che viene utilizzato per stimare la relazione lineare tra simulazioni e osservazioni.

$$CVRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n obs_i} \quad (4)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - \overline{sim})(obs_i - \overline{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (sim_i - \overline{sim})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2}} \quad (5)$$

dove *sim* e *obs* indicano rispettivamente le simulazioni e le osservazioni dell'Ensemble-NHMM (o NHMM) e del pluviometro, e *n* è il numero totale di campioni.

4. RISULTATI

4.1. PRECIPITAZIONI ANNUALI ED ESTREME

4.1.1. PERIODO STORICO

Per valutare la capacità dei differenti modelli GCM di rappresentare il regime pluviometrico osservato durante il periodo storico, ed in particolare le precipitazioni medie annue nonché la frequenza e l'ammontare di quelle estreme annue, si è fatto riferimento al quantificazione dell'errore attraverso l'uso del coefficiente di variazione dell'errore quadratico medio CVRMSE dato dalla seguente relazione:

$$CVRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n obs_i}$$

In tabella 2 sono riportati i valori del CVRMSE per ciascuno dei modelli GCM utilizzati con riferimento alla precipitazione media annua. L'esame della tabella evidenzia che non ci sono significative differenze nei valori del CVRMSE relativi ai vari modelli esaminati che ragionevolmente riproducono gli andamenti osservati in modo sufficientemente accurato come per altro evidenziato in figura 5 per i tre gruppi di stazioni omogenee.

Tabella 2 CVRMSE della precipitazione media annuale per tre differenti valori di intervallo di tempo della media mobile per i tre gruppi di stazioni pluviometriche spazialmente omogenee.

Tabella 2-CVRMSE della precipitazione media annuale

	East			North			South		
	1a	5a	15a	1a	5a	15a	1a	5a	15a
CESM2	0.176	0.111	0.078	0.181	0.097	0.063	0.169	0.085	0.050
MPI	0.180	0.115	0.079	0.183	0.095	0.060	0.176	0.083	0.047
MRI	0.178	0.111	0.076	0.180	0.094	0.057	0.174	0.084	0.050
NorESM2	0.174	0.112	0.078	0.176	0.094	0.059	0.166	0.079	0.047
TaiESM1	0.183	0.114	0.077	0.179	0.097	0.062	0.174	0.084	0.049

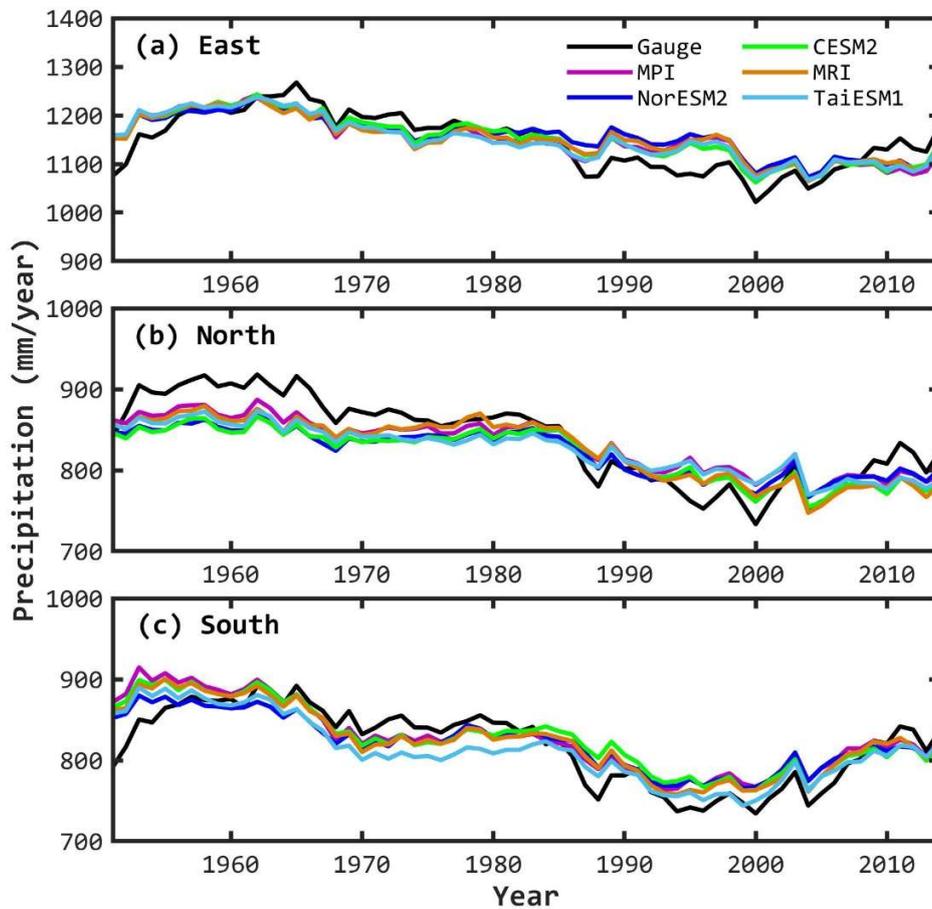


Figura 5-Media annua delle precipitazioni con finestra mobile di 15 anni dalle stazioni pluviometriche e dai modelli climatici globali (GCMs). (a) Cluster Est, (b) Cluster Nord, e (c) Cluster Sud.

In tabella 3 e 4 sono riportati i valori del CVRMSE e di altro indice di errore per quanto riguarda la frequenza annua e l'ammontare di precipitazione giornaliera che annualmente superano la soglia del 95esimo percentile. Gli ulteriori indici di errore sono il coefficiente di correlazione CC e l'indice di errore di sovrastima e sottostima delle simulazioni rispetto ai valori osservati RB. La definizione di CC ed RB sono rispettivamente le seguenti:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - \overline{sim})(obs_i - \overline{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (sim_i - \overline{sim})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2}}$$

$$RB = \frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)}{\sum_{i=1}^n obs_i}$$

L'esame delle tabelle evidenzia come gli indici di errore per tutti i modelli forniscano valori molto prossimi, cioè come tutti i modelli GCM esaminati presentino un analogo grado di accuratezza delle simulazioni nel riprodurre le principali caratteristiche degli eventi estremi osservati nel periodo storico. Questi risultati sembrano indicare che non c'è uno specifico modello migliore in senso assoluto rispetto ad altri e pertanto tutti devono essere utilizzati per effettuare le proiezioni future del regime pluviometrico della regione in esame.

Tabella 3-Metriche statistiche delle medie della frequenza totale delle precipitazioni estreme simulate dai GCM rispetto alle osservazioni per i tre cluster.

	East			North			South		
	CVRMSE	RB	CC	CVRMSE	RB	CC	CVRMSE	RB	CC
CESM2	0.13	7.95	0.95	0.09	5.08	0.92	0.08	7.13	0.87
MPI	0.13	9.15	0.95	0.09	3.33	0.91	0.07	5.95	0.89
MRI	0.13	7.82	0.95	0.09	3.77	0.92	0.08	6.52	0.87
NorESM2	0.13	8.19	0.95	0.09	4.63	0.91	0.07	5.72	0.88
TaiESM1	0.13	7.89	0.94	0.09	4.45	0.91	0.05	3.42	0.84

Tabella 4-Metriche statistiche delle medie della quantità totale di precipitazioni estreme simulata dai GCM rispetto alle osservazioni per i tre cluster.

	East			North			South		
	CVRMSE	RB	CC	CVRMSE	RB	CC	CVRMSE	RB	CC
CESM2	0.13	10.43	0.82	0.15	12.45	0.85	0.13	11.71	0.76
MPI	0.14	11.64	0.82	0.13	10.69	0.83	0.12	10.48	0.80
MRI	0.13	10.25	0.82	0.13	10.56	0.83	0.12	11.05	0.79
NorESM2	0.14	10.51	0.82	0.14	12.05	0.83	0.12	10.40	0.77
TaiESM1	0.14	10.27	0.80	0.14	11.76	0.83	0.10	7.98	0.77

4.1.2. PROIEZIONI FUTURE

Precipitazioni medie annue.

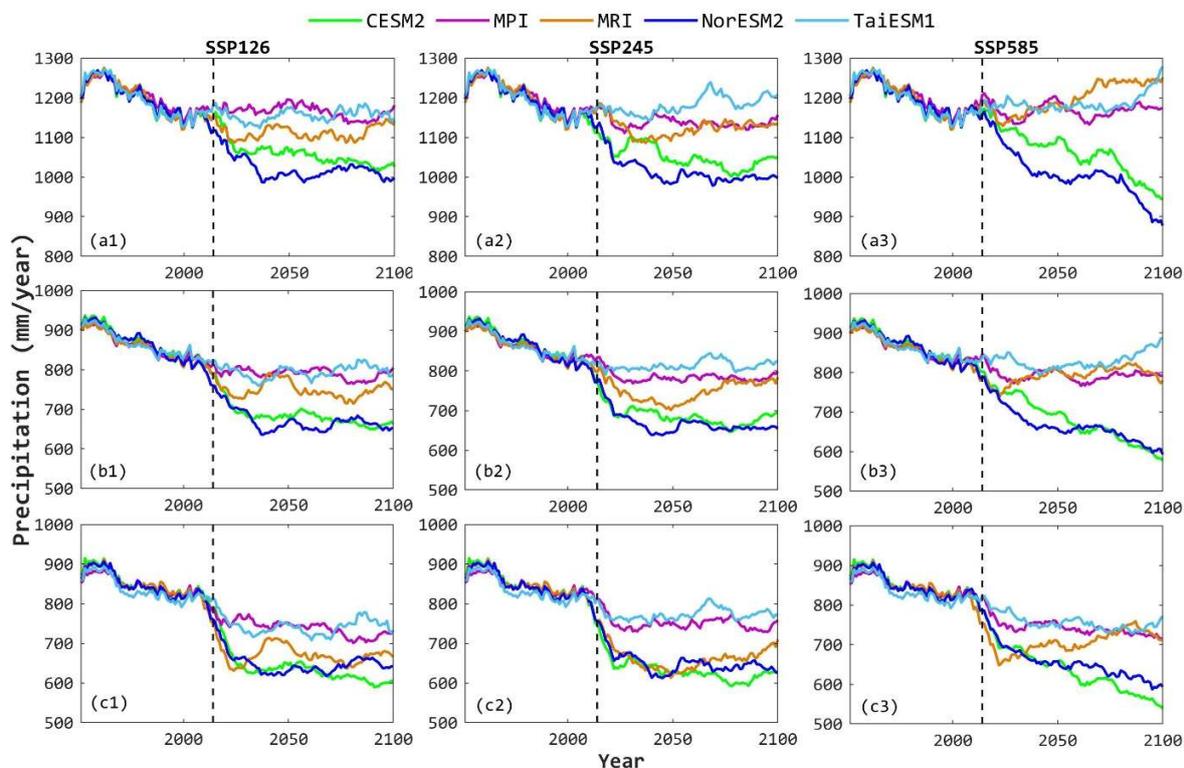


Figura 6- Proiezioni al 2100 della precipitazione media annuale con una media mobile di 15 anni.

In figura 6 sono mostrati i risultati delle proiezioni future della precipitazione media annua per tutti i GCM selezionati e per i tre gruppi di stazioni pluviometriche spazialmente omogenee (dall'alto in basso Nord, Est e Sud) e per i tre scenari di mitigazione SSP126, SSP245 e SSP585.

Dalla figura si evidenzia, sebbene con significative differenze fra i differenti modelli GCM, una tendenza per tutti i gruppi di stazioni ad una riduzione della precipitazione media annua, che risulta molto più pronunciata nel caso dello scenario di mitigazione SSP585.

Per il gruppo Sud, corrispondente alla Piana Pontina tale tendenza è evidente per tutti i modelli esaminati e per tutti gli scenari, con riduzioni percentuali al 2100, rispetto alla media del periodo storico 1960-2015, variabili tra il 64% e 88% per lo scenario peggiore SSP585.

Precipitazioni estreme

Le variazioni percentuali della frequenza e intensità degli eventi estremi di precipitazione per differenti intervalli temporali del XXI secolo e per i tre gruppi sono mostrati nella Tabella 5 i valori riportati in tabella fanno riferimento alla media delle frequenze e delle intensità ottenute dai differenti modelli GCM esaminanti. Dalle analisi condotte per tre diversi scenari di emissione nel periodo 2023-2100 emerge per il gruppo Nord una riduzione modesta della intensità e della frequenza degli eventi, per il gruppo Est un aumento più pronunciato della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi mentre nel gruppo Sud una riduzione più significativa rispetto agli altri gruppi della frequenza degli eventi che risultano comunque più intensi.

Tabella 5-Variazioni percentuali della frequenza e intensità degli eventi estremi di precipitazione

		ssp126			ssp245			ssp585		
95th	extreme	2023-2048	2049-2074	2075-2100	2023-2048	2049-2074	2075-2100	2023-2048	2049-2074	2075-2100
intensity	east	4.127078	4.014497	3.970071	4.013959	3.973343	4.043591	3.873643	3.9152563	3.840552
	north	-1.253801	-1.383524	-1.10644	-1.617704	-1.528798	-1.277523	-1.58693	-1.47866	-1.62448
	south	2.45015	2.339253	2.438315	2.509354	2.496745	2.63436	2.353906	2.4735775	2.28716
frequency	east	6.533657	6.981101	3.858086	4.06682	2.048382	2.334345	4.72302	5.4384234	6.036677
	north	-2.142575	-1.925629	-4.46193	-3.786409	-4.910973	-3.525317	-3.681215	-3.766453	-2.73105
	south	-10.35617	-12.56293	-16.198	-11.44093	-12.74845	-12.34458	-12.69573	-13.54423	-15.5042

4.2. SICCATÀ

4.2.1. PERIODO STORICO

La Figura 7 mostra le serie temporali degli SPI con scale da 3, 6 e 12 mesi dal 1951 al 2014. Per ciascun gruppo l'SPI è stato calcolato con riferimento alla precipitazione media delle stazioni pluviometriche appartenente allo specifico gruppo. Si nota che l'evoluzione temporale delle fasi di siccità e umidità per i tre gruppi è fondamentalmente sincronizzata. In base alle frequenze risultanti degli SPI < -2, abbiamo notato che la probabilità di una siccità estrema su scala di 3 mesi è maggiore rispetto a SPI-6; per l'SPI-12 tale probabilità risulta ancora minore. Dagli andamenti mostrati in figura emerge inoltre che le condizioni di siccità nella pianura Pontina si sono aggravate negli ultimi 15 anni. Inoltre, nel gruppo nord, la probabilità di siccità

estrema per la siccità idrologica SPI -12 nel periodo 2000-2014 è superiore rispetto al periodo precedente (Figura 7c).

Le informazioni statistiche sugli eventi di siccità meteorologica, agricola e idrologica per i tre cluster sono presentate nella Tabella 6. La soglia assunta per identificare la condizione di siccità è $SPI < -1$. Nel complesso, gli eventi a breve termine (meteorologici) sono più frequenti rispetto alla siccità idrologica, risultato coerente con la Figura 7. In base alla frequenza totale delle siccità, Pianura Pontina ha subito meno eventi di siccità rispetto alle parti sud ed est durante il periodo 1951-2014, ma la severità della siccità è stata peggiore. In particolare, la durata media in mesi per i tre tipi di siccità nel cluster nord è rispettivamente di 3,55, 5,76 e 8,64, dove la severità è la somma degli SPI durante ciascun periodo di siccità. In termini di intensità media della siccità, la pianura del nord Agro-Pontino (MDI di SPI-3, -1,56) è inferiore rispetto a quella dell'est (-1,63) e del sud (-1,65) per la siccità meteorologica, mentre la regione meridionale ha l'intensità più alta tra i tre tipi di siccità.

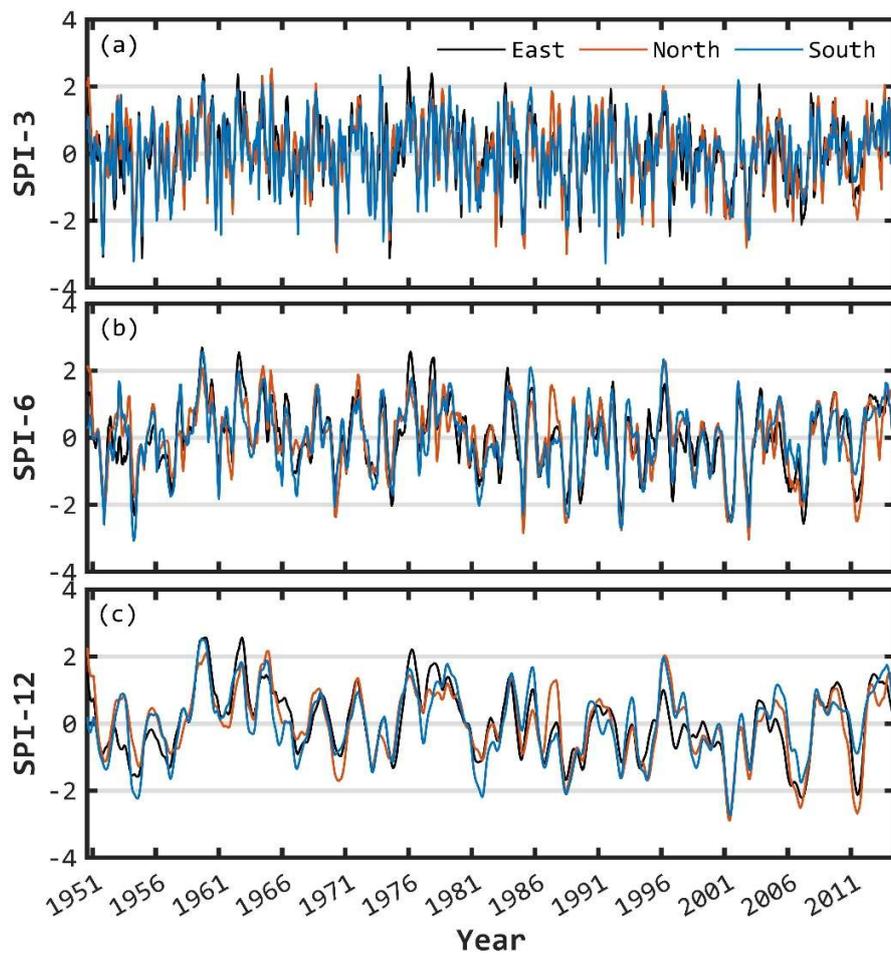


Figura 7-Serie temporali di (a) SPI-3, (b) SPI-6 e (c) SPI-12 per i tre cluster.

Tabella 6- Informazioni statistiche sulle siccità meteorologiche, agricole e idrologiche nella pianura dell'Agro-Pontino nel periodo 1951-2014 basate su dati pluviometrici. I risultati sono i cluster Est, Nord e Sud in sequenza.

	Total frequency	Mean drought duration	Mean drought severity	Mean drought intensity
SPI-3	30/29/30	3.23/3.55/3.10	-5.17/-5.66/-5.22	-1.63/-1.56/-1.65
SPI-6	23/21/24	5.22/5.76/5.00	-8.23/-9.53/-8.21	-1.49/-1.53/-1.56
SPI-12	15/14/15	8.13/8.64/8.60	-11.92/-13.80/-13.04	-1.34/-1.43/-1.43

Sono state valutate le prestazioni dei modelli climatici globali (GCMs) confrontando le simulazioni delle caratteristiche delle siccità nel periodo storico (1951-2014) con i valori

osservati. Tale confronto ha evidenziato la capacità dei modelli GCM esaminanti di riprodurre con sufficiente accuratezza le caratteristiche statiche delle siccità per i differenti gruppi.

4.2.2. PROIEZIONI FUTURE

Al fine di valutare le variazioni future delle statistiche delle condizioni di siccità si è assunto come periodo di riferimento l'intervallo temporale 1990-2014 e rispetto a questo analizzate le variazioni statistiche per tre periodi futuri relativi all'inizio, alla meta e alla fine del XXI secolo per i differenti scenari.

In tabella 7 sono riportate le variazioni percentuali delle statistiche delle siccità per periodi futuri suddetti in relazione a quelle del periodo di riferimento 1990-2014. L'esame della tabella mostra che per tutti gli scenari di mitigazione una riduzione della frequenza degli eventi di siccità, ma questi risultano di maggior durata e severità in particolare per le siccità meteorologiche SPI-3. Tali condizioni accompagnate dagli aumenti delle temperature possono produrre significative riduzioni dell'umidità del suolo che possono avere un impatto significativo sull'agricoltura.

Tabella 7-Variazioni percentuali delle statistiche delle siccità per periodi future in relazione a quelle del periodo di riferimento 1990-2014.

			Total frequency of drought			Mean drought duration			Mean drought severity			Mean drought intensity		
			Early	Mid	Late	Earl	Mid	Late	Early	Mid	Late	Early	Mid	Late
SSP 126	SPI-3	East	-17.2	-32.1	-22.9	21.7	65.2	70.3	16.7	55.6	60.6	-4.7	-10	-9.6
		North	-13.5	-32.6	-22.8	-10.6	51.7	56	-13.7	40.6	45.9	-2.7	-10.7	-10.4
		South	-5.8	-24.9	-15.2	-6.7	61	67	-8.8	51.6	57.5	-1.9	-9.6	-9.5
	SPI-6	East	-16.9	-16.5	-5.2	-8.4	-5.6	-2.7	-11.9	-8.2	-5.3	-4.2	-3.5	-3.1
		North	-18.9	-16.4	-4.4	-14.2	-14.8	-12.3	-20.4	-20.6	-17.5	-6.4	-5.6	-5.3
		South	-20.3	-15.8	-4.8	-2.2	-1.6	2.1	-5.4	-4.8	-1.1	-3.9	-3.6	-3.5
	SPI-12	East	-28.1	-3.4	-7	-1.9	-27.4	-2.7	-2	10.4	-23.9	5.9	4.3	-2
		North	-30.5	-11.8	-18.8	-7.6	-29.4	-14.8	-20.1	3.7	-22.1	-7.7	-13.8	-6.9
		South	-28.5	-1.5	-2.4	-1.6	-23.3	-4.1	-5.9	-1.3	-18.3	4.3	4.1	-1.1
		East	-14.3	-30.8	-22.6	-6.1	68.5	65.6	-8.5	59.3	57.2	-2.7	-9.9	-9.3

SSP 245	SPI-3	North	-13.4	-30.5	-24.3	-8.9	59.4	52.9	-11.9	48.2	41.2	-2.6	-10.8	-11
		South	-9.8	-25.7	-15.3	7.8	63.3	60.7	4.6	53.9	50.4	-3.4	-9.8	-10.2
	SPI-6	East	-18.7	-15.4	-4.8	-8.5	-3.2	-5.7	-11.6	-5.4	-7.8	-4.2	-3.2	-3
		North	-17.6	-13.9	-6.1	-11.9	-10.4	-14.1	-17.9	-16.1	-20.2	-6	-5.7	-5.9
		South	-20.5	-16.5	-5	-3.1	-0.2	-1.8	-7.1	-3.3	-5.5	-4.7	-3.8	-4.2
	SPI-12	East	-32.6	-5.1	-1.1	24.8	-28.5	8.3	7.4	-1.3	-25.7	2.6	0.3	-1.8
		North	-29.2	-9.8	-16.4	-6.2	-26.5	-4.1	-10.6	-6	-26.2	-15.1	-22.6	-7.8
		South	-27.8	-2.7	-4	-1	-24.9	2	4.2	11.8	-19.6	-2.1	-3.8	-2.5
	SSP 585	SPI-3	East	-13.5	-33.5	-17.2	-5	59.9	68.1	-6.8	47.2	60.5	-1.9	-11.5
North			-18.7	-33.2	-17.2	-10.7	54.7	59.7	-13.8	42.8	49.3	-3	-11.3	-10.4
South			-11.9	-25.4	-7.7	-8.4	60.6	68	-11.1	50.7	60.3	-2.4	-10.3	-9
SPI-6		East	-18.3	-18.1	1.9	-8.8	-8.7	-3.9	-12.3	-13.3	-5.4	-4.3	-5.1	-2.8
		North	-25.4	-17.2	2.7	-14.7	-13.1	-10.4	-20.8	-19.2	-15.7	-6.5	-6.2	-5.3
		South	-26.2	-16.4	3.7	-4.8	-1.8	2.6	-10.1	-5.3	0.7	-5.6	-4.4	-3
SPI-12		East	-30.8	-7.6	-7.3	13.5	-31.3	-5.7	-4	21.6	-19.7	10.6	9.9	-1.6
		North	-29.2	-9.8	-16.4	-6.2	-26.5	-4.1	-10.6	-6	-26.2	-15.1	-22.6	-7.8
		South	-34.9	-13.9	-10.3	22.7	-26.1	1.3	0	-2.6	-13.4	9.2	10.2	0.2

5. PARTE II – IL SISTEMA DI EARLY WARNING DELLE ALLUVIONI NEL PARCO ARCHEOLOGICO DI SIBARI.

In questa parte del lavoro, viene sviluppato un modello surrogato come parte del sistema di allerta rapida per la gestione delle inondazioni improvvise in tempo reale del sito archeologico di Sibari situato nella zona nord-orientale della Calabria.

La previsione degli eventi di inondazione, sotto forma di mappe di profondità e velocità della corrente sul dominio comprendente il sito archeologico, è basato su due diversi input: a) la distribuzione spazio-temporale delle precipitazioni derivante dalle previsioni meteo fornite dall'aeronautica militare fino a 36 ore; b) e dagli idrogrammi di piena generati mediante un modello idrologico nelle sezioni di chiusura dei bacini del fiume Crati e del fiume Coscile a monte dell'area di studio.

Questa attività di sviluppo del modello surrogato si inserisce in una più generale attività sviluppata in collaborazione con la società Egeos, per conto di Leonardo S.p.A, finalizzata a realizzare un sistema di nowcasting/ forecasting per il sito specifico, consistente in una serie di piattaforme per l'acquisizione, la gestione, l'elaborazione e la fruizione dei dati di previsione delle precipitazioni fornite dall'Aeronautica Militare, unitamente ai risultati derivanti dal modello surrogato.

Questa parte della tesi è organizzata nel modo seguente:

- Nel capitolo 6 verranno introdotti i sistemi di allerta rapida e saranno analizzati: a) gli usi; b) le tipologie, c) i casi di applicazione. Successivamente seguirà una descrizione generale della struttura del sistema di allerta rapido sviluppato per il Parco Archeologico di Sibari.
- Nel Capitolo 7 -verrà presentato l'area di studio con particolare riferimento: a) aspetti morfologici della piana di Sibari; b) aspetti storici della città di Sibari; c) descrizione del Parco Archeologico di Sibari; d) la vulnerabilità idraulica del sito.

- Nel Capitolo 8 -verrà proposta la metodologia utilizzata per la costruzione de sistema di allerta rapido con particolare riferimento ai modelli utilizzati.
- Nel capitolo 9- verrà proposto l'applicazione della metodologia al caso studio e saranno esaminati i dati utilizzati e i test effettuati per la validazione sia dei dati che dei modelli.
- Nel Capitolo 10 - varrà analizzato un caso reale ed in particolare verrà mostrata ed analizzata tutta la catena di funzionamento del sistema di allerta rapido.
- Nel capitolo 11 -verrà verificato il sistema sviluppato utilizzando dei dati in real-time
- Nel Capitolo 12- nell'ultimo capitolo seguirà una critica ai risultati ottenuti.

6. INTRODUZIONE AI SISTEMI EARLY WARNING

Un sistema di allerta rapido è un insieme di procedure, strumenti e mezzi finalizzati a monitorare, rilevare e comunicare tempestivamente ai cittadini e agli enti interessati situazioni di pericolo o emergenza. L'obiettivo principale di questi sistemi è quello di ridurre il rischio di danni a persone, beni e ambiente, informando tempestivamente e in modo accurato sulla minaccia imminente.

Questi sistemi possono essere implementati a diversi livelli, da quello locale a quello nazionale o internazionale, e coinvolgono:

1. Monitoraggio e rilevamento: Utilizzano sensori, stazioni meteo, reti di monitoraggio sismico e idrologico, satelliti e altri strumenti per rilevare eventi potenzialmente pericolosi come terremoti, inondazioni, incendi, tempeste, ecc.
2. Analisi e valutazione del rischio: I dati raccolti vengono analizzati per valutare il potenziale impatto dell'evento e per determinare l'area interessata e le possibili conseguenze.
3. Sistemi di allerta precoce: Basandosi sull'analisi dei dati e dei rischi, vengono emessi avvisi e allerte tempestivi alle autorità locali, alle comunità coinvolte e al pubblico in generale. Questi avvisi possono essere diffusi tramite sistemi di comunicazione come messaggi SMS, avvisi radiofonici, sirene, applicazioni mobili, social media, ecc.
4. Piani di evacuazione e gestione dell'emergenza: Vengono sviluppati e attivati piani specifici per gestire l'emergenza in corso, inclusi percorsi di evacuazione, punti di raccolta sicuri, assistenza alle persone vulnerabili e coordinamento delle risorse di soccorso.
5. Educazione e sensibilizzazione: Vengono condotte campagne informative per educare la popolazione su come rispondere agli avvisi di emergenza, sui comportamenti da adottare in caso di pericolo e sull'importanza della preparazione personale.

Questi sistemi di allerta sono fondamentali per ridurre il numero di vittime e minimizzare i danni durante situazioni di emergenza, consentendo alle persone di agire prontamente e prendere decisioni informate per la propria sicurezza. La collaborazione e la coordinazione tra enti pubblici, organizzazioni di protezione civile e la comunità sono essenziali per il corretto funzionamento di tali sistemi.

I metodi di stima e previsione delle piene (nowcasting o Early Warning), sono sistemi creati per lavorare su scale temporali brevi, tipicamente da 2 a 1 o 2 giorni. Attualmente tali sistemi offrono una misura primaria per mitigare i danni e per evitare vittime derivanti da eventi di precipitazioni estreme. I sistemi di nowcasting sono fondamentali per la sicurezza pubblica ed in particolare sono utilizzati in paesi in via di sviluppo, dove la costruzione di soluzioni ingegneristiche su larga scala, cioè di infrastrutture per la mitigazione degli effetti legati ad eventi alluvionali risulta problematico dal punto di vista economico o ambientale (Zanchetta e Coulibaly 2020). Lo strumento di allerta rapida delle piene dovrebbe garantire una previsione accurata della distribuzione temporale e spaziale dell'estensione delle inondazioni nelle aree interessate, nonché della profondità dell'acqua e della velocità della corrente nelle aree soggette ad allagamento. Utilizzando queste informazioni è possibile emettere degli avvertimenti tempestivi, come ad esempio l'evacuazione delle zone potenzialmente soggette ad inondazioni. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario poter disporre della in tempo reale o prevista della distribuzione spaziale e temporale delle precipitazioni, da trasformare in aree da allagamento. Per quanto riguarda le misure in tempo reale si può fare riferimento ai dati provenienti da stazioni di misura dei livelli all'interno dei corpi idrici o la distribuzione spaziale delle precipitazioni in tempo reale, come ad esempio le distribuzioni di precipitazioni basate su dati radar meteo ad alta risoluzione spaziale e temporale (tipicamente 1 km² e 5 minuti), e disponibili in tempo reale (Sokol et al.2021; Hapuarachchiet al. 2011; Barr et al.2020; Seo et al.2015). Il vantaggio sull'uso dei sistemi radar meteorologici riguarda la possibilità di utilizzare dei metodi di nowcasting delle precipitazioni, consentendo di anticipare l'estensione e l'intensità dalla precipitazione per una determinata area (Prudden et al.

2020;Franchetal.2020).Un altro tipo di dato pluviometrico che è possibile utilizzare è quello derivante dalle stazioni pluviometriche a terra, tuttavia, l'elevata distanza tra le stazioni e in molti casi il differente intervallo di campionamento del dato pluviometrico(tipicamente 25 km e 5-60 minuti) rende difficile la ricostruzione di campi di precipitazione affidabili, inoltre questi strumenti sono soggetti ad elevata manutenzione che determina l'efficienza del dato misurato, in altri casi ancora ,gli stessi strumenti durante eventi intensi di precipitazioni accompagnati da forti venti sono affetti da errori di sovrastima inficiando così la misurazione delle precipitazioni e rendendo il dato inutilizzabile.

Per le previsioni su un arco temporale di alcuni giorni si può fare riferimento ai modelli meteorologici quali per esempio il modello europeo sviluppato dall'ECMWF, o a modelli regionali con risoluzioni spaziali fino a 1 km e temporali in genere oraria.

Il problema centrale della previsione degli allagamenti è quello di tradurre le distribuzioni di pioggia in mappe di profondità e velocità del flusso a terra con una risoluzione sufficientemente accurata da poterne valutare l'impatto. In generale si richiede una risoluzione di alcuni metri al massimo (< 5 m.). La migliore soluzione in termini di precisione per la determinazione delle mappe di allagamento e di tutti i parametri del flusso , risulta quello di utilizzare modelli idraulici bidimensionale basati sulle equazioni delle acque basse nei quali vengono applicate direttamente le precipitazioni, la cui ricostruzione del dominio di integrazione è effettuata sulla base di modelli digitali del terreno ad alta risoluzione spaziale unitamente e su di una classificazione ad alta risoluzione della copertura del suolo. Comunque, l'utilizzo in tempo reale dei modelli idraulici bidimensionali per acque poco profonde è limitato dai tempi di calcolo elevati, in particolare laddove le aree da simulare presentano una notevole estensione. Sebbene siano state sviluppate diverse strategie per accelerare la computazione (Henonin et al. 2013; Apel et al. 2016; Smithetal.2015;Glenisetal.2013, Vacondio et al 2019) dei modelli idraulici, la diretta applicazione di tali modelli alla previsione di eventi alluvionali risulta ancora problematica. Un'alternativa all'utilizzo dei modelli idraulici è l'uso di modelli

surrogati basati sull'applicazione di tecniche di machine learning. Tali modelli surrogati, se opportunamente addestrati, offrono un'elevata efficienza sia in termini di velocità di calcolo che di accuratezza. Il potenziale predittivo di modelli surrogati opportunamente addestrati su dati e/o da simulazioni idrauliche è evidenziato nella recensione di Mosavi et al. (2018), che presenta un'ampia varietà di algoritmi di machine learning di apprendimento utilizzati per la previsione puntuale delle piene. La letteratura esistente mostra come la maggior parte degli approcci attuali si concentra sulla previsione della massima profondità dell'acqua (Kabir et al. 2020; Hosseinyetal.2020) o sullo sviluppo di mappe della pericolosità delle inondazioni (Bermúdez et al. 2019), tuttavia, come mostrato da (Bignami et al. 2019), il rischio idraulico durante un evento di piena dipende sia dalla velocità che dalla profondità della corrente: livelli di piena con bassa profondità ma ad alta velocità può essere altrettanto pericolosa quanto un livello di piena con una maggiore profondità e velocità più bassa. Sempre in (Bignami et al. 2019), sulla base di esperimenti sono state costruite delle curve di rischio idraulico che tengono conto dell'effetto combinato della velocità e della profondità della corrente, questo al fine di determinare il differente impatto su persone, oggetti potenzialmente galleggianti come automobili e su edifici. Un esempio di utilizzo diretto delle curve di rischio suddette all'interno di un modello surrogato è stato proposto (da Cioffi et. al 2024).

Il sistema surrogato ideato da (Cioffi et.al 2024) per il nowcasting e per l'allerta rapida delle inondazioni improvvise si basa sulla previsione spazio-temporale del rischio di inondazione, utilizzando una rete neurale multistrato perceptron. Questa rete viene addestrata su un insieme di dati dettagliati generati da simulazioni bidimensionali in acque poco profonde, che includono sia eventi reali che sintetici. I dati vengono validati rispetto a marcatori derivanti da social media ed ottenuti da eventi reali. Per mantenere la semplicità dell'algoritmica, il modello surrogato si basa su valori discreti del rischio idraulico locale, rappresentati da un flag che assume valori da 0 a 3 (Bignami et al.2019). La previsione di questi valori discreti si basa sulle mappe di profondità e velocità del flusso ottenute da un modello idraulico bidimensionale ad alta risoluzione. Questo approccio presenta almeno due vantaggi significativi: a) un processo

di apprendimento automatico più semplice, dato che l'output è una variabile discreta; b) fornisce agli operatori per la gestione delle emergenze informazioni chiare sul rischio di inondazione in un'area specifica, con una risoluzione spaziale equivalente a quella della mappa topografica utilizzata per il training. Ciò consente ai decisori di valutare i rischi in tempo reale e di intraprendere tempestivamente adeguate azioni di mitigazione

Comunque, non sempre è possibile disporre di curve di rischio idraulico, come nel particolare caso esaminato nella presente tesi, incentrata sul rischio alluvionale di un'area archeologica, dove il legame fra rischio idraulico e parametri della corrente non è ancora stato definito in relazione alle caratteristiche di vulnerabilità dei singoli elementi architettonici. L'unicità delle caratteristiche costruttive, dello stato di conservazione e del valore storico dei singoli elementi architettonici impedisce di fatto una generalizzazione delle curve di rischio idraulico che possono essere identificate solo a valle di una stretta attività di collaborazione con gli archeologi responsabili dello specifico sito.

Questo ha implicato, in questa tesi, la necessità di costruire un modello surrogato in grado di simulare i campi di profondità e velocità della corrente alluvionale.

Costruire un modello surrogato di questo è un compito complesso, poiché implica l'addestramento del modello per entrambe le variabili che caratterizzano la corrente – tirante e velocità (Issermann et al. (2020) e Bermúdez et al. (2019)).

La letteratura sugli algoritmi di apprendimento automatico potenzialmente utilizzabili a questo fine è piuttosto estesa. Ad esempio, Chang et al. (2010, 2014, 2018, 2019) hanno testato diverse famiglie di algoritmi di apprendimento automatico come mappe auto-organizzanti, tecniche di clustering e reti neurali. Questi ultimi sono stati sfruttati con successo nella previsione e nel nowcasting per il rischio d'inondazioni (Debbarma et al. 2019; Kim and Boukouvala 2019) in una vasta gamma di applicazioni, come la trasformazione della pioggia caduta in idrogrammi di piena (Ghalkhani et al. 2013), ed estrazione delle dinamiche di allagamento dai dati simulati con solutori ad alta fedeltà (Qian et al. 2019). Più

recentemente, (Kabir et al.2020) hanno sviluppato un sistema di modelli di deep learning per la previsione veloce di inondazione fluviali con l'obiettivo di emulare i risolutori numerici. (Lin et al.2013) hanno sviluppato un algoritmo SVM (support vector machine) per generare mappe inondazioni a partire dalle portate alla sezione di chiusura di un bacino. (Berkhahn et al.2019) hanno testato un applicazione simile a quella di (Lin et.all 2019) con lo scopo di prevedere le inondazioni improvvise in ambito urbano utilizzando precipitazioni spazialmente uniformi.

La metodologia utilizzata basata su reti convoluzionali rappresenta un miglioramento rispetto all' architettura basata su reti feed-forward precedentemente utilizzata nel caso di St. Lucia (Cioffi, F et.all 2024). Le reti feed-forward, infatti, richiedono una intensa preprocessazione dei dati per permettere l'analisi di sequenze storiche, rendendo il sistema fortemente dipendente anche dalla risoluzione delle immagini di partenza. Inoltre, questa operazione deve essere iterata per ogni campo considerato, rendendo il preprocessing particolarmente lento se vengono utilizzati dei database ad alta dimensionalità, come quelli provenienti dalle simulazioni Shallow-water. Tuttavia, l'architettura feed-forward è particolarmente poco onerosa in termini di costi computazionali dell'addestramento, rendendola particolarmente adatta per sistemi di calcolo basati su CPU. Le architetture basate su CNN, invece, riescono ad operare direttamente con le immagini o con proiezioni latenti delle stesse, riducendo in maniera sensibile le operazioni di preprocessazione dei dati, consentendo allo stesso tempo una migliore generalizzazione dei modelli appresi.

Dopo una disamine preliminare di algoritmi disponibili, e valutato i pro e i contro di ciascun approccio, in questo lavoro abbiamo deciso di sviluppare un modello surrogato basato sulle reti neurali convoluzionali (Convolution neural network , di seguito CNN). Per impartire alla rete neurale una memoria della storia temporale di precipitazioni, è stata utilizzata una tecnica di preelaborazione presa in prestito dagli algoritmi di visione come applicato da (Toygar e Adnan 2003). Come mostrato da Mosavi et al. (2018), questo approccio può raggiungere gli stessi risultati di altre reti neurali appositamente progettate per l'elaborazione temporale, ad

es. reti neurali ritardate o ricorrenti affittare reti neurali, tuttavia, con complessità ridotta e costo computazionale.

Con l'obiettivo di analizzare e valutare il rischio idraulico in nowcasting/forecasting connesso a fenomeni di allagamento per il parco archeologico di Sibari, nel presente lavoro di dottorato è stato sviluppato un sistema di allerta precoce basato su intelligenza artificiale, in particolare un modello surrogato, in grado di determinare le possibili vulnerabilità e fornire indicazioni per la gestione del rischio idraulico.

Tale tipologia di modelli, se adeguatamente addestrato, può approssimare accuratamente un fenomeno caratterizzato da opportuni dati in ingresso, con migliori livelli di performance in termini di velocità computazionale, rispetto ad un modello idraulico tradizionale. In particolare, è in grado di riconoscere la condizione atmosferica corrente (sulla base dei dati disponibili) più simile a quelle avvenute in passato e proporre in tempi molto rapidi la mappa di inondazione e pericolosità più probabile, dando quindi la possibilità di effettuare analisi anche in fase di now/forecasting di un evento estremo.

I dati di input necessari al modello surrogato sono i seguenti:

- Dati di previsione dei campi di precipitazione derivanti dal modello COSMO-IT e forniti dall'Aeronautica Militare. In particolare, in fase di addestramento del modello, sono stati utilizzati i dati storici sugli eventi calamitosi passati e ricavati dal CMCC;
- Modello digitale del terreno accurato (risoluzione spaziale di un 1metri) che viene generato nell'ambito del progetto;
- Carta Uso del suolo;
- Informazioni inerenti agli eventi passati (data, quantitativo pluviometrico ed aree allagate).

L'architettura del sistema di allerta, che ha come elemento centrale il modello surrogato, è composta da diverse piattaforme che lavorano a cascata, in particolare tra le piattaforme implementate all'interno del sistema di allerta troviamo:

- Piattaforma per il riconoscimento del grado di allerta: nello specifico questa piattaforma ha l'obiettivo di monitorare i bollettini meteo derivanti dalla Protezione Civile e relativi all'area d'interesse al fine di riconoscere un colore arancione dal bollettino della Protezione Civile ed innescare l'inizio delle elaborazioni da parte del sistema.
- Piattaforma X2030: questa subsistema sviluppata da Leonardo S.p.A , nello specifico ,in una prima fase si occupa di inviare una richiesta di acquisizione dati delle previsioni di precipitazione fornite dall'Aeronautica Militare, successivamente la stessa invia i dati acquisiti ad una seconda piattaforma -AWARE – per le future elaborazioni , infine X2030 dopo aver acquisito le elaborazioni effettuate da AWARE, archivia e rende disponibile i dati per la gestione del possibile rischio idraulico .

I dati che vengono scaricati dal FTP dell'Aeronautica Militare sono i seguenti:

Nome	Descrizione	Formato	Freq. di Aggiornam.
TP	Total precipitation = cumulata oraria delle precipitazioni pluvialia kg m^{**2}	Raster (grib)	1 ora
SF	Water equivalent of accumulated snow depth = quantità equivalente di acqua liquida immagazzinata nel manto nevoso. Indica la colonna d'acqua che teoricamente si avrebbe se l'intero manto nevoso si sciogliesse istantaneamente kg m^{**2}	Raster (grib)	1 ora

Tabella 8-Dati scaricati dalla piattaforma dell'Aeronautica Militare

- Piattaforma AWARE- questa piattaforma costituisce il cuore del sistema di allerta, all'interno di essa sono implementati tutta una serie di tool sia per la gestione degli input dei dati grezzi di previsione delle precipitazioni derivanti dall'Aeronautica Militare sia per gli output finali del modello surrogato , all'interno di AWARE inoltre troviamo il modello idrologico e il modello surrogato i quali lavorando a cascata forniscono in pochi minuti le mappe di pericolosità idraulica per il sito archeologico di Sibari .

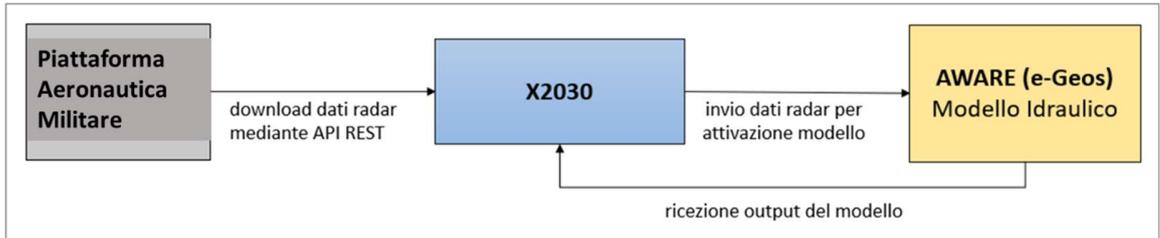


Figura 8-Flusso dei dati per l'analisi del rischio idrogeologico

Il seguente diagramma riassume le interazioni tra i sistemi nell'ambito di un'istanza di richiesta di elaborazione:

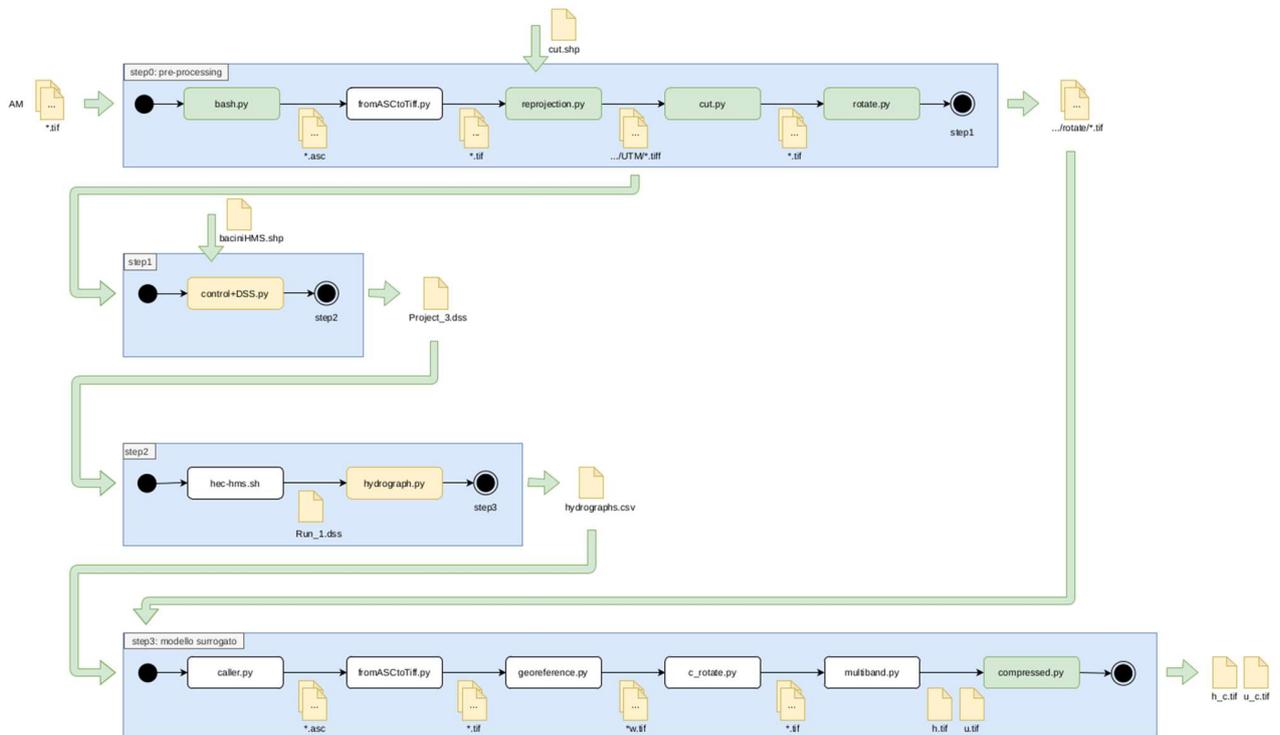


Figura 9- Sequenze Diagramma del flusso di analisi del rischio meteo-idrogeologico

7. CONTESTO DI RIFERIMENTO

Il sito archeologico oggetto del presente studio si colloca nella porzione costiera della piana di Sibari.

La piana di Sibari, situata nella regione nord-orientale della Calabria e affacciata sul Mar Ionio, è una pianura alluvionale caratterizzata da una conformazione geologica complessa. Ad est, si affaccia sul Golfo di Taranto, mentre a nord-nord-ovest è delimitata dalla catena montuosa del Pollino, composta da rocce carbonatiche mesozoiche. Sul lato continentale, a sud-sud-est, è circoscritta dalla catena montuosa della Sila, formata da rocce intrusive e metamorfiche (Guerricchio e Melidoro 1975) (Cafaro et al. 2013).

La piana di Sibari è una fossa tettonica delimitata da vari sistemi di faglie, con il più importante orientato nord-est-sud-ovest verso il settore settentrionale (Cafaro et al. 2013). Questa caratteristica causa una condizione di subsidenza, contrariamente alla tendenza di sollevamenti tettonici nella regione Calabria durante il Pleistocene medio e l'Olocene (Antonioli et al. 2006; Westaway 1993).

L'evoluzione del paesaggio nel tempo è stata influenzata da diversi fattori, come il sollevamento tettonico, le variazioni climatiche che hanno modificato il regime fluviale e la formazione di conoidi fossili. I fiumi Crati e Coscile hanno contribuito al cambiamento del paesaggio, con i loro tratti terminali che si sono uniti e separati nel corso del tempo (Van Leusen 2002).

La stratigrafia del suolo nella piana di Sibari presenta una sequenza di circa 400 m di depositi continentali e sedimenti marini. La sezione stratigrafica rivela litotipi sedimentari appartenenti al tardo Olocene nei primi 35 m sotto il livello del mare, seguiti da argille e argille siltose dell'inizio dell'Olocene tra i 35 e i 70 m e ghiaie e sabbie grossolane del Pleistocene superiore a

oltre 70 m di profondità. Livelli di torba organica suggeriscono la presenza passata di paludi lungo la pianura alluvionale (Cafaro, Cotecchia e Lenti 2011).

Dal punto di vista idrologico, la piana di Sibari presenta acquiferi multistrato, con il primo a una profondità di 1-2 m costituito da uno strato sabbioso, e il secondo a 70-80 m composto da uno strato ghiaioso-sabbioso. Quest'ultimo viene utilizzato principalmente per l'agricoltura attraverso pozzi che prelevano acqua dalla falda (Guerricchio 1992; Polemio e Petrucci 2003). Dopo la scoperta della città antica di Sibari, la falda freatica è stata abbassata attraverso pozzi e opere di bonifica. Ciò ha consentito gli scavi archeologici nel parco, che comprende tre siti specifici: il Parco del Cavallo, Casa Bianca e Stombi (Guerricchio e Melidoro 1975).

Vista la notevole estensione dell'area di studio -di circa 2500 km² -, la stessa è stata suddivisa in due distinte aree come riportato in Figura 3 e caratterizzate come segue:

- L'Area Montana si estende a monte della piana di Sibari dove al suo interno troviamo la catena montuosa della Sila e la catena montuosa del Pollino , mentre la sezione di chiusura è individuata dalla confluenza del Fiume Crati con il Fiume Coscile, il tutto per estensione di circa 2420 km². L'area così definita è stata utilizzata per effettuare simulazioni di tipo idrologico attraverso l'utilizzo del software Hec-HMS al fine di determinare le condizioni al contorno di monte dell'area di costiera (modello bidimensionale).
- L'Area di Costiera (Piana di Sibari): Tale area, all'interno della quale si colloca il parco archeologico di Sibari (Figura 10) , si estende a valle della confluenza tra il Fiume Crati e il Fiume Coscile fino ad una distanza dalla linea di costa di circa 250 m, il tutto per un estensione di circa 80 km². L'area così definita è stata utilizzata per effettuare simulazioni idrauliche attraverso l'adozione di un modello idraulico delle acque basse ad elevata risoluzione spaziale e temporale sviluppato dall'Università La Sapienza di Roma.

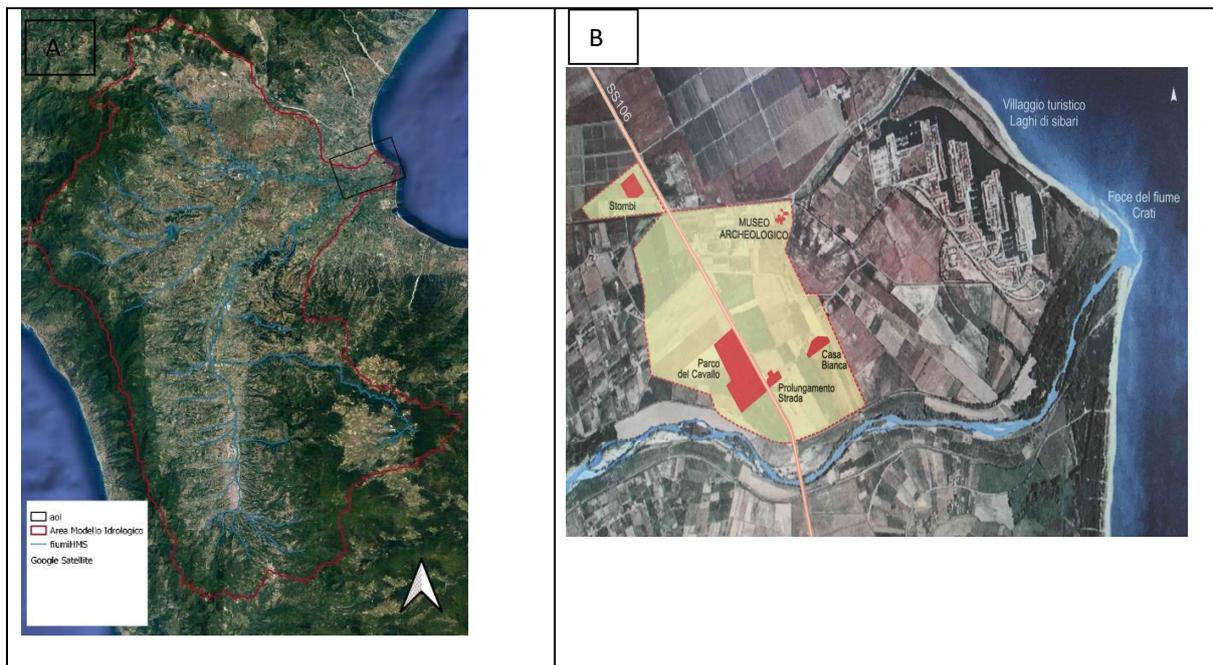


Figura 10-AOI del progetto

7.1. CENNI STORICI

La zona della piana di Sibari fu abitata fin dall'antichità da popolazioni locali che si insidiarono presso la località "Favella della corte". Il vero sviluppo della zona lo si ebbe però con l'arrivo dei colonizzatori greci nel VIII secolo a.C che fondarono, tra i fiumi Crati e Coscile, la polis di Sybaris. Grazie alla fertilità del territorio, la città fu in grado di espandersi arrivando a governare su 25 città fino a diventare uno dei centri principali di tutta la Magna Grecia. A seguito della sconfitta inflitta dai crotonesi, che deviarono il corso del fiume Crati per sommergere la città, la polis venne distrutta. Fu successivamente ricostruita da coloni ateniesi nel IV secolo a.C, ma anche in questo caso la nuova città (prenderà il nome di Thurii) fu assoggettata dai lucani. Con l'Impero Romano si ebbe la terza costruzione della città nel Nell'84 a.C, con il nome di Copia. Lo sviluppo si interruppe a seguito di dissesti idrogeologici che causarono un impaludamento della zona provocando il completo abbandono dell'area da parte della popolazione. Gli storici sono d'accordo che il declino della città di Sibari si deve tanto ad una serie di rivalità e guerre, tanto a fenomeni naturali di inondazione che costrinsero le popolazioni ad abbandonare l'area.

7.2. IL PARCO ARCHEOLOGICO DI SIBARI

L'area di Sibarys attualmente si trova nel comune di Cassano allo Jonio, in provincia di Cosenza. Si sviluppa all'interno della piana di Sibari a quote del terreno prossime o inferiori a quelle marine. A sud, l'area del parco è delimitata dall'argine del fiume Crati che si colloca a quote superiori rispetto a quelle della piana, rendendo la zona particolarmente suscettibile al rischio alluvionale. Se si considera, inoltre, la vulnerabilità intrinseca degli elementi archeologici presenti all'interno dell'area archeologica si capisce la necessità di adottare sistemi di controllo, e di difesa, da eventi di piena.

Negli scavi sono state rinvenute diverse le unità abitative: in particolare una serie di tipiche domus romane con giardini e vari ambienti abitativi, alcuni dei quali riccamente decorati con pitture murali e mosaici pavimentali. Ben conservati risultano essere:

- il teatro, a pianta semicircolare, è l'edificio pubblico più importante dell'area;
- il tempio rettangolare del I secolo d. C.

Nella zona di "Prolungamento strada" e "Casa Bianca" (figure 11 e 13) "i principali ritrovamenti portati alla luce sono due edifici denominati Plateia B, meglio conservati e visibili, e Plateia C. (le plateiai erano le strade principali): Il settore Casa Bianca risulta essere particolarmente ricco di reperti, conservando le tracce di varie strutture, tra cui quelle di un muro detto Lungo Muro, che caratterizzava le mura appartenenti alla colonia ellenistica. Inoltre, sono stati rinvenuti un grande santuario denominato "santuario delle divinità orientali", un'altra struttura sacra risalente all'età imperiale, un edificio pubblico ed infine un ultimo santuario. Nella zona di "Stombi" (figura 12), attualmente non aperta al pubblico, sono stati rinvenuti gran parte dei resti della città antica di Sibari. Tutti i reperti trovati all'interno della piana sono stati conservati ed esposti nel "Museo archeologico nazionale della Sibaritide", rappresentando, insieme all'area archeologica, uno dei siti più importanti per l'età arcaica e classica di tutto il mediterraneo.



Figura 11 Area di Sibari (Parco archeologico)



Figura 12 Dettaglio Museo della Sibarite (Google Heart)



Figura 13 Ingresso area archeologica, nel dettaglio Porta nord, Parco del cavallo e Prolungamento strada (Google Heart)

7.3. VULNERABILITÀ IDRAULICA DEL SITO

Come evidenziato in precedenza la piana di Sibari presenta caratteristiche geomorfologiche uniche e in continua evoluzione all'interno del territorio calabrese: area di bonifica con gran parte della piana con elevazioni prossime o al disotto del livello medio marino, tali da richiedere l'adozione di stazioni di pompaggio per mantenere i terreni asciutti. Queste caratteristiche fanno sì che tutta l'area risulti particolarmente vulnerabile dal punto di vista idraulico e soggetta a frequenti allagamenti. Le opere di bonifica (canali, pozzi e impianti idrovori), per il drenaggio delle acque superficiali risultano fondamentali per la gestione e salvaguardia del territorio sia in condizioni ordinarie e ancor più durante eventi di precipitazione intensi; tuttavia, dal punto di vista idraulico la maggiore criticità per la piana di Sibari è legata alla presenza del Fiume Crati. Il Fiume Crati è un corso d'acqua naturale che nasce nella catena montuosa della Sila estendendosi per circa 91 km in direzione nord-nord est

dove prima di giungere in prossimità dalla piana di Sibari incontra il suo principale affluente il fiume Coscile, il quale convoglia le portate derivanti dalla catena montuosa del Pollino, successivamente il Fiume Crati prosegue il suo percorso attraversando da ovest verso est la piana di Sibari per poi sfociare nel mar Ionio. Proprio nell'ultimo tratto del Fiume Crati si riscontrano le principali criticità idrauliche dovute da un lato al carattere pensile del tratto di fiume, come conseguenza dei progressivi innalzamenti del fondo del Fiume Crati legato al trasporto solido e il successivo innalzamento degli argini per la protezione delle aree limitrofe al fiume, e dall'altro lato alla subsidenza a cui è soggetta la piana di Sibari, e che determina quote dei terreni limitrofe al corso d'acqua minori del fondo dell'alveo. Questa caratteristica negli anni ha comportato il verificarsi di diversi eventi in cui, a causa di copiose precipitazioni, si sono verificate rotture arginali nel tratto finale del Fiume Crati. Negli ultimi 18 anni la piana di Sibari ha subito ben 6 episodi di allegamenti legati alla rottura arginale del Fiume Crati. Storicamente le aree più interessate hanno riguardato i territori di Cassano allo Jonio, Terranova di Sibari e Corigliano-Cassano. Le aree investite dall'esondazione del Fiume Crati riguardano principalmente aree a destinazione agricola e limitrofe al corso del fiume, tuttavia, durante gli eventi meteorici del 2013 e del 2018 il Parco Archeologico di Sibari fu investito dalle acque del Fiume Crati ed in particolare a seguito dell'eventi del gennaio 2013 il parco fu chiuso per 4 anni e riaperto al pubblico solo nel 2017.

Con specifico riferimento al Parco Archeologico gli eventi del passato hanno evidenziato come tutti gli elementi architettonici del parco sono sottoposti ad un continuo stress dovuto alla presenza dell'acqua le cui conseguenze più importanti sono causate dall'umidità: quest'ultima è causa della crescita incontrollata della vegetazione che danneggia le strutture ed aumenta sensibilmente l'erosione del terreno rendendo meno stabili le costruzioni che poggiano su di esso. Altra problematica legata all'inondazioni è la presenza di fango che necessita di essere rimosso dal sito, come successe durante l'ultima esondazione del fiume Crati dove 200 metri cubi di acqua si riversano sul sito trascinando con sé, oltre il fango, numerosi detriti che causarono innumerevoli danni.

8. LA METODOLOGIA

Alla luce delle considerazioni sviluppate nel paragrafo precedente emerge che due i fattori che possono determinare l'allagamento del sito archeologico: 1) piogge intense che interessano direttamente l'area archeologica e la regione costiera depressa limitrofa; 2) la rottura dell'argine in sinistra idraulica del fiume Crati.

Ai fini del processo di sviluppo del sistema di early warning questi due fattori di rischio devono essere adeguatamente tenuti in conto nello sviluppo della modellazione della trasformazione in rischio alluvionale delle distribuzioni temporali e spaziali di pioggia predette.

In figura 14 è mostrato uno schema dell'intero sistema di early warning con l'indicazione dei vari modelli utilizzati.

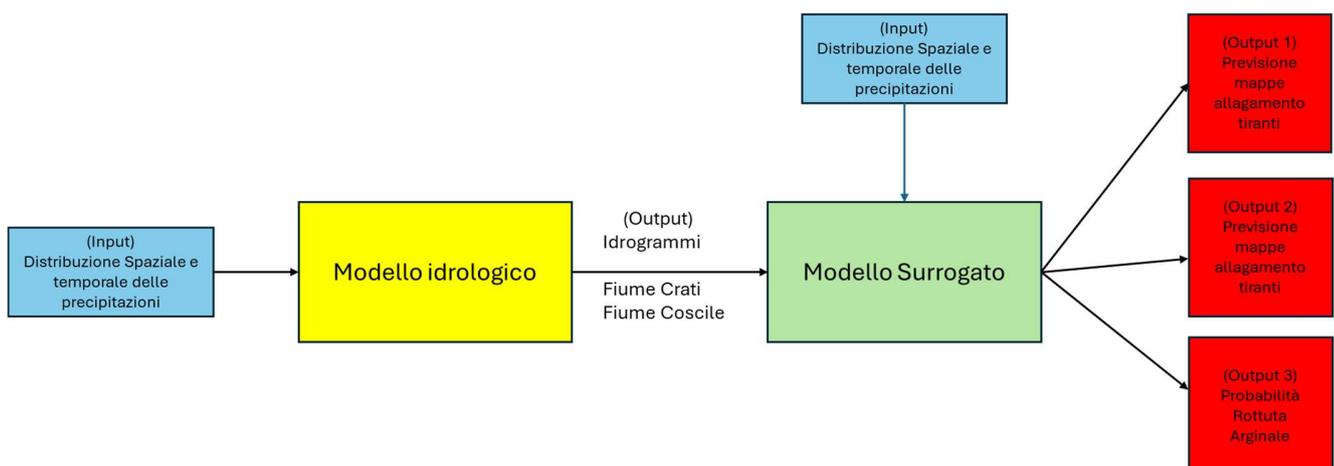


Figura 14- schema sistema di early warning

In particolare si evidenziano: 1) un modello idrologico per la determinazione delle portate del fiume Crati e Coscile di input al modello surrogato e finalizzato a individuare il rischio di rottura dell'argine la cui probabilità di tale evento viene modellata secondo lo schema proposto da (D'Oria et al 2019); 2) un modello surrogato che consente di calcolare la velocità e il tirante idrico prodotto dalle forzanti distribuzione delle piogge e portate alle sezioni di ingresso del fiume Crati.

Nel seguito vengono descritti i vari modelli messi a punto. Va osservato che il primo passaggio nel processo di sviluppo di un modello surrogato consiste nella creazione di un database ad alta precisione che funga da vero e proprio punto di riferimento, ovvero dati affidabili già validati. In quest'ottica, è stato creato e validato un risolutore delle equazioni delle acque poco profonde (SWE) in-house, attraverso il confronto con la letteratura e con casi di test realistici. Successivamente, questo risolutore è stato impiegato per generare un database di modelli relativi alle inondazioni e al deflusso. Il dataset così ottenuto viene quindi utilizzato per addestrare un modello surrogato basato sull'intelligenza artificiale, impiegando adeguate tecniche di preelaborazione per minimizzare i costi computazionali. L'intelligenza artificiale così addestrata viene infine utilizzata per il nowcasting, ovvero per predire specificatamente il livello di rischio associato alle inondazioni in scenari di eventi estremi reali, la tabella 9 riassume gli input, i modelli numerici e gli output utilizzati nelle tre fasi, di generazione, addestramento e fase operativa del sistema di allerta rapida.

Tabella 9- Schema

Moduli	Generazione Dati	Machine Learning	Fase Operativa
Input(s)	Distribuzione spaziale e temporale dei campi di precipitazione +idrogrammi di Piena Fiume Crati e Coscile	Addestramento con l'utizzo dei risultati provenienti dal modello idraulico + campi di precipitazione +idrogrammi di piena	Distribuzione dei campi di precipitazione derivanti da modelli di previsione meteo (Aeronatica Militare)
Tools Numerici	Risolutore bidimensionale equazioni acque basse+ modello idrologico	CNN(Rete neurale Convulazionale)- Addestramento	CNN (Rete neurale Convulazionale)- Addestramento- invio
Output(s)	Mappe delle aree allagabili , informazioni su tirante e velocità della corrente	Intelligenza artificiale	Previsione delle mappe di allagamento

9. I MODELLI

Nel presente capitolo saranno analizzati i modelli utilizzati per la creazione del sistema di allerta rapido per il Parco Archeologico di Sibari. I modelli che saranno presentati riguardano:

- Modello idraulico- modello numerico bidimensionale per la risoluzione dell'equazioni delle acque poco profonde ad alta risoluzione spaziale sviluppato da Cioffi et al. 2024. Questo modello è stato utilizzato per simulare gli effetti delle precipitazioni che cadono all'interno dell'area costiera per la determinazione delle aree allagabili.
- Modello Idrologico- il modello utilizzato riguarda il modello idrologico Hec-HMS sviluppato dal Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America per l'analisi delle portate generate da bacini idrografici, il modello è stato utilizzato per determinare le portate che si generano all'interno dell'area montana- così come già definita nel capitolo 7.1, per il Fiume Crati e il Fiume Coscile .
- Modello Surrogato- il modello surrogato basato su intelligenza artificiale di tipo CNN è stato addestrato sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni idrologiche ed idrauliche con l'obiettivo di sviluppare uno strumento tale da restituire sulla base delle previsioni di precipitazione proveniente dall'Aeronautica Militare, le possibili mappe di allagamento all'interno dell'area costiera con tempi computazionali contenuti e compatibili con un sistema di Early Warning.
- Modello COSMO-IT- il modello previsionale COSMO-IT sviluppato dall'Aeronautica Militare , fornisce al sistema di allerta rapido gli input legati alla distribuzione delle previsioni fino a 48 h .
- Modello di rottura arginale- il modello proposto ha lo scopo di valutare in termini di probabilità di fallimento dell'argine del Fiume Crati, in prossimità del Sito Archeologico – Parco del Cavallo- per effetto di sifonamento.

9.1. IL MODELLO IDRAULICO

Il modello idraulico utilizzato per la simulazione degli eventi passati e per la successiva fase di addestramento del modello surrogato, descritto in Cioffi et al. 2024, è stato ulteriormente sviluppato per tener conto della presenza nell'area di studio di sistemi di pompaggio, sifoni e altri manufatti. Le equazioni presenti nel codice sono state prese come riferimento dai documenti di: (Audusse et al., 2004) per le equazioni di governo, per la discretizzazione del flusso del primo ordine di Lax-Friedrichs e infine per l'estensione del primo e del secondo ordine della discretizzazione della sorgente; (Hou, J. et al., 2015) per la discretizzazione del flusso del secondo ordine di TVD MUSCL; (Jameson A. et al., 1981) e (Marqués, J. M. F., 2000), rispettivamente, per la discretizzazione Runge-Kutta del quarto ordine e Forward Euler per lo schema esplicito e per la discretizzazione della derivata temporale. Infine, per i parametri di precipitazione e infiltrazione sono stati utilizzati rispettivamente i lavori di (Cesas, Lane. et al., 2010) e (Chow et al. 1988).

Il codice proposto supera le limitazioni presenti in molti codici di calcolo commerciali attualmente disponibili dettaglio il codice sviluppato consente: 1) è un codice parallelo che riduce significativamente i tempi di calcolo a parità di risoluzione spaziale; 2) risolve la presenza di discontinuità e cambi di regime sub/supercritico del flusso; 3) consente una distribuzione arbitraria delle precipitazioni; 4) consente la possibilità di modellare elementi idraulici come impianti di sollevamento e sifoni.

Il modello numerico creato è chiamato FHM-2D ed è caratterizzato da una schematizzazione bidimensionale in grado di risolvere le equazioni delle acque basse alla stessa risoluzione del DEM. Di seguito è riportata una descrizione della numerica applicata al modello.

9.1.1. EQUAZIONI DI GOVERNO

Le equazioni bidimensionali integrate in profondità (SWE) si ottengono integrando le equazioni di Navier-Stokes sulla profondità del flusso con le seguenti ipotesi: distribuzione uniforme della velocità in direzione verticale, fluido incomprimibile, distribuzione della pressione idrostatica e piccola pendenza del fondo. Le equazioni di continuità e di quantità di moto sono:

$$\begin{cases} h_t + (hu)_x + hv_y = 0 \\ (hu)_t + (hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)_x + huv_y = -ghz_x \\ (hv)_t + (huv)_x + (hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)_y = -ghz_y \end{cases}$$

(1)

È possibile scrivere questo sistema in forma conservativa:

$$q_t + F(q)_x + G(q)_y = q_t + \text{div}(F(q)) = S(x, y, q)$$

(2)

Dove:

$$q = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, F(q) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix}, G(q) = \begin{bmatrix} huv \\ huv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}$$

$$S(x, y, q) = s_z + s_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -ghz_x(x, y) \\ -ghz_y(x, y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -ghs_{fx} \\ -ghs_{fy} \end{bmatrix}, F = [F \ G]$$

Dove q è il vettore centrato sulla cella delle incognite discrete; $F(q)$ e $G(q)$ sono i flussi numerici; u e v sono le componenti di velocità nelle direzioni x e y , rispettivamente; h è la profondità dell'acqua; g è l'accelerazione dovuta alla gravità; $z_x(x, y)$ e $z_y(x, y)$ sono le pendenze del letto nelle direzioni x e y , s_{fx} e s_{fy} sono le pendenze di attrito nelle direzioni x e y , rispettivamente. Nel modello, le pendenze di attrito sono stimate utilizzando la formula di Manning

$$s_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

dove n è il coefficiente di rugosità di Manning. In generale, l'influenza della rugosità del fondo prevale sullo sforzo di taglio turbolento tra le celle. Pertanto, i termini di stress effettivo sono stati trascurati nel calcolo.

9.1.2. MODELLO NUMERICO

Per l'equazione (8) su un volume di controllo rettangolare viene formulato un metodo a volumi finiti centrato su una cella, dove le variabili dipendenti del sistema sono memorizzate al centro della cella e rappresentate come costanti a quote costanti. Integrando l'equazione (8) sull'area dell'i-esimo volume di controllo, si ottiene :

$$\int_{A_i} \frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} d\Delta + \int_{A_i} \nabla \cdot E dA = \int_{A_i} S dA$$

(3)

dove $E = F(q)_i + G(q)_i$ e A_i è l'area del volume di controllo. Utilizzando il teorema della divergenza, il secondo integrale sul lato sinistro dell'equazione 9 può essere sostituito da un integrale di linea intorno al volume di controllo

$$\int_{A_i} \frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} d\Delta + \oint_{\Gamma_i} \nabla \cdot E dA = \int_{A_i} S dA$$

(4)

dove Γ_i è il confine dell'i-esimo volume di controllo e n è il vettore unitario verso l'esterno normale al confine.

Approssimando l'integrale di linea con la regola della quadratura del punto medio, l'Eq. (10) può essere scritto come

$$\frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} d\Delta = -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^4 E * n_{ij} \Delta \Gamma_{ij} + S_{ij}$$

(5)

dove i e j indicano rispettivamente la i -esima cella e il j -esimo bordo della cella; q_{ij} e S_{ij} sono le quantità medie

immagazzinate al centro della i -esima cella; n_{ij} è il vettore normale unitario verso l'esterno al j -esimo bordo; $\Delta\Gamma_{ij}$ è la lunghezza del j -esimo bordo; ed E è il flusso numerico attraverso il bordo, calcolato con un metodo esatto o con un metodo di calcolo. solutore di Riemann approssimativo.

Pertanto, valutando i flussi ai bordi delle celle e applicando la FVM e il teorema della divergenza, si ottiene il seguente schema semidiscreto:

$$\Delta x \Delta y \frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} + \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2},j} - \vec{F}_{i-\frac{1}{2},j} \right) + \left(\vec{G}_{j+\frac{1}{2}} - \vec{G}_{j-\frac{1}{2}} \right) = \Delta x \Delta y \vec{S}_{ij}$$

(6)

dove Δx e Δy denotano una maglia di dimensioni eventualmente variabili

$\Delta x = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$ e $\Delta y = y_{i+1/2} - y_{i-1/2}$. Lo scopo di questo studio è quello di sviluppare un risolutore cartesiano non lineare per acque poco profonde che consenta di:

- Topografia arbitraria da input DEM → griglia strutturale adattata alla griglia DEM
- Formulazione ben bilanciata per la conservazione discreta del lago a riposo → discretizzazione del termine sorgente
- Capacità di transizione automatica bagnato/asciutto → FVM con solutore Riemann approssimato
- Cattura automatica dei salti idraulici FVM con solutore di Riemann approssimato
- Trattamento implicito dei termini di attrito con coefficiente di Manning variabile nello spazio → Trattamento specifico del termine di attrito sul fondo
- Precipitazione spazio-temporale arbitraria
- Implementazione MPI completamente parallela
- Funziona in poche ore

Le equazioni delle acque basse sono un sistema iperbolico non lineare di leggi di conservazione (con un termine sorgente dovuto alla topografia). Per un problema di questo

tipo, in cui si possono formare urti nella soluzione, i metodi dei volumi finiti si sono dimostrati molto efficaci.

Il modello sviluppato consente di risolvere le equazioni dei bassi fondali con un metodo implicito ai volumi finiti con discretizzazione temporale mediante metodo Runge-kutta del quarto ordine e metodo a schema esplicito di Eulero del primo ordine. I flussi, invece, sono discretizzati, per il primo ordine di accuratezza, con un solutore di Riemann approssimato - Lax friedrichs (LF) e, per il secondo ordine, con MUSCL - schema TVD (Total Variation Diminishing).

9.1.3. INTEGRAZIONE TEMPORALE

Runge Kutta 4th ordine

Gli schemi di integrazione temporale di ordine superiore sono necessari quando il flusso numerico è approssimato da schemi di ordine superiore. Uno degli schemi di ordine superiore è il metodo Runge-Kutta del quarto ordine (RK4). Il metodo RK4 ha un'accuratezza del quarto ordine. Ciò significa che l'errore per passo è dell'ordine di $O\Delta(t^5)$, mentre l'errore totale è dell'ordine di $O\Delta(t^4)$. La maggiore accuratezza di RK4 è compensata da un'elevata capacità di calcolo. richieste.

$$\Delta x \Delta y \frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} + \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2}j} - \vec{F}_{i-\frac{1}{2}j} \right) + \left(\vec{G}_{j+\frac{1}{2}} - \vec{G}_{j-\frac{1}{2}} \right) = \Delta x \Delta y \vec{S}_{ij}$$

se consideriamo

$$RHS_i = \left[\left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2}j} - \vec{F}_{i-\frac{1}{2}j} \right) + \left(\vec{G}_{j+\frac{1}{2}} - \vec{G}_{j-\frac{1}{2}} \right) + \Delta x \Delta y \vec{S}_{ij} \right]$$

Possiamo scrivere

$$\frac{\partial \vec{q}_{ij}^n}{\partial t} = RHS_i(\vec{q}_{ij}^n)$$

dove n indica il livello temporale.

La soluzione dell'equazione $\frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t}$ all'n-esimo istante temporale è

$$\vec{q}_{ij}^{n+1} = \vec{q}_{ij}^n + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = RHS_i(\vec{q}_{ij}^n)$$

$$k_2 = RHS_i(\vec{q}_{ij}^{n+1})$$

$$\vec{q}_{ij}^{n+1*} = \vec{q}_{ij}^n + \frac{\Delta t}{2}k_1$$

$$k_3 = RHS_i(\vec{q}_{ij}^{n+1**})$$

$$(\vec{q}_{ij}^{n+1**}) = \vec{q}_{ij}^n + \frac{\Delta t}{2}k_2$$

$$k_4 = RHS_i(\vec{q}_{ij}^{n+1***})$$

$$(\vec{q}_{ij}^{n+1***}) = \vec{q}_{ij}^n + \frac{\Delta t}{2}k_3$$

Metodo a schema esplicito di Eulero

Come accennato in precedenza, oltre allo schema di RK4, qui è stato applicato il metodo di discretizzazione temporale di Eulero del primo ordine. In questa sezione è stato spiegato lo schema adottato. Se consideriamo l'equazione (5)

$$\frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} d\Delta = -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^4 E * n_{ij} \Delta \Gamma_{ij} + S_{ij}$$

Dall'espansione della serie di Taylor si possono ottenere diverse discretizzazioni per questa equazione. Ad esempio, se i è l'indice spaziale e n l'indice temporale,

$$\bar{q}_{ij}^{n+1} = \bar{q}_{ij}^n + \frac{\partial q}{\partial t} \Big|_i^n \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \Big|_i^n \Delta t^2 + O(\Delta t^3)$$

e la derivata temporale può essere approssimata come

$$\frac{\partial q}{\partial t} \Big|_i^n = \frac{q^{n+1} - q^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \Big|_i^n \Delta t + O(\Delta t^2)$$

che è una discretizzazione in avanti del primo ordine. Inoltre

$$F(q_{ij}^n)_{i+1} = F(q_{ij}^n) + \frac{\partial F(q)}{\partial x} \Big|_i^n \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(q)}{\partial x^2} \Big|_i^n \Delta x^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F(q)}{\partial x^3} \Big|_i^n \Delta x^3 + O(\Delta x^4)$$

$$F(q_{ij}^n)_{i-1} = F(q_{ij}^n) + \frac{\partial F(q)}{\partial x} \Big|_i^n \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(q)}{\partial x^2} \Big|_i^n \Delta x^2 - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F(q)}{\partial x^3} \Big|_i^n \Delta x^3 + O(\Delta x^4)$$

$$G(q_{ij}^n)_{j+1} = G(q_{ij}^n) + \frac{\partial G(q)}{\partial y} \Big|_i^n \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G(q)}{\partial y^2} \Big|_i^n \Delta y^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 G(q)}{\partial y^3} \Big|_i^n \Delta y^3 + O(\Delta y^4)$$

$$G(q_{ij}^n)_{j-1} = G(q_{ij}^n) + \frac{\partial G(q)}{\partial y} \Big|_i^n \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G(q)}{\partial y^2} \Big|_i^n \Delta y^2 - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 G(q)}{\partial y^3} \Big|_i^n \Delta y^3 + O(\Delta y^4)$$

e sottraendo le due equazioni, rispettivamente per F e G, si ottiene una discretizzazione del secondo ordine centrata sullo spazio

$$\frac{\partial F(q_{ij}^n)}{\partial x} \Big|_i^n = \frac{F(q_{ij}^n)_{i+1} - F(q_{ij}^n)_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F(q_{ij}^n)}{\partial x^3} \Big|_i^n \Delta x^2 + O(\Delta x^3)$$

$$\frac{\partial G(q_{ij}^n)}{\partial y} \Big|_i^n = \frac{G(q_{ij}^n)_{j+1} - G(q_{ij}^n)_{j-1}}{2\Delta y} - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 G(q_{ij}^n)}{\partial y^3} \Big|_i^n \Delta y^2 + O(\Delta y^3)$$

Allora l'equazione (5) può essere scritta in forma discretizzata come

$$\frac{q_{ij}^{n+1} - q_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{F(q_{ij}^n)_{i+1} - F(q_{ij}^n)_{i-1}}{2\Delta x} + \frac{G(q_{ij}^n)_{j+1} - G(q_{ij}^n)_{j-1}}{2\Delta y} = \bar{S}_{ij}$$

da cui risulta il seguente algoritmo numerico

$$q_{ij}^{n+1} = q_{ij}^n + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} \left(F(q_{ij}^n)_{i+1} - F(q_{ij}^n)_{i-1} \right) + \left(G(q_{ij}^n)_{i+1} - G(q_{ij}^n)_{i-1} \right) + \overline{S}_{ij}$$

Questo schema, del primo ordine nel tempo e del secondo nello spazio, è chiamato schema esplicito di Eulero.

9.1.4. DISCRETIZZAZIONE DEI FLUSSI NUMERICI

Lax Friedrichs - Risolutore approssimativo di Riemann

In generale, uno schema robusto e ben bilanciato per le equazioni delle acque poco profonde deve soddisfare alcune proprietà matematiche, come preservare l'assenza di negatività dell'altezza dell'acqua h , essere ben bilanciato, cioè preservare lo stato stazionario discreto, essere coerente con le equazioni delle acque poco profonde e soddisfare una disuguaglianza di entropia discreta.

Nel codice SWE per uno schema accurato del primo ordine, tutte le incognite del sistema sono approssimate sulla stessa maglia e i flussi numerici sono calcolati con un solutore di Riemann approssimato di Lax Friedrichs. Questo metodo è conservativo e accurato al primo ordine, quindi piuttosto dissipativo. Questo metodo è esplicito e del primo ordine nel tempo e nello spazio $O(\Delta t) + O(\frac{\Delta x^2}{\Delta t})$. In queste condizioni, il metodo è stabile se e solo se è soddisfatta la seguente condizione:

$$\left| \frac{\Delta t}{\Delta x} \right| \leq 1$$

Il metodo di Lax-Friedrichs è classificato come avente dissipazione del secondo ordine e dispersione del terzo ordine (Chow et al., 1988). Per le funzioni che presentano discontinuità, lo schema presenta una forte dissipazione e dispersione (Thomas et al., 1995).

Se consideriamo l'equazione (6)

$$\Delta x \Delta y \frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} + \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2}j} - \vec{F}_{i-\frac{1}{2}j} \right) + \left(\vec{G}_{i+\frac{1}{2}j} - \vec{G}_{i-\frac{1}{2}j} \right) = \Delta x \Delta y \vec{S}_{ij}$$

dove $\vec{F}_{i+\frac{1}{2},j}, \vec{F}_{i-\frac{1}{2},j}, \vec{G}_{i,j+\frac{1}{2}}, \vec{G}_{i,j-\frac{1}{2}}$ sono i flussi di quantità di moto presenti sulle facce della cella (figura 14).

Qui vogliamo mostrare come è stato discretizzato il flusso nel caso monodimensionale.

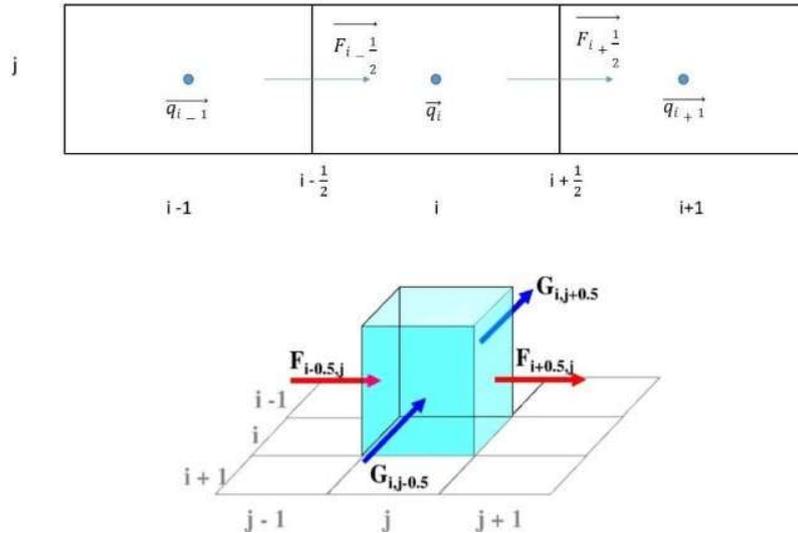


Figura 15-Flussi numerici di quantità di moto attraverso la faccia delle celle

La funzione di flusso numerico è definita come

$$\vec{F}_{i+\frac{1}{2}} = \vec{F}(\vec{q}_{i-1}^-, \vec{q}_{i+1}^+)$$

Dove $\vec{q}_{i-1}^-; \vec{q}_{i+1}^+$ sono i valori delle interfacce e sono derivati da una ricostruzione idrostatica locale. Il calcolo numerico

I flussi $\vec{F}_{i\pm\frac{1}{2},j}$ corrisponde ad una combinazione non lineare di approssimazioni del primo e del secondo ordine alla funzione di flusso continuo

$$\vec{F}_{i+\frac{1}{2},j} = \vec{F}^+(\vec{q}_i^{\square}, \alpha) + \vec{F}^-(\vec{q}_{i+1}^{\square}, \alpha)$$

dove i termini dell'equazione sono rispettivamente

$$\vec{F}^+(\vec{q}_i^{\square}, \alpha) = \frac{1}{2}(\vec{F}(q_i) + \alpha \vec{q}_i)$$

$$\vec{F}^-(\vec{q}_{i+1}, \alpha) = \frac{1}{2}(\vec{F}(q_{i+1}) + \alpha \vec{q}_{i+1})$$

dove $\vec{F}(q_i) = hu$ e $\alpha = \max(|u_i| + \sqrt{gh_i}, |u_{i+1}| + \sqrt{gh_{i+1}})$. Questa discretizzazione è stata utilizzata per dimostrare che lo schema è in grado di catturare in modo robusto le regioni secche dove $h_i = 0$. Se $h_i = 0$, si ha che

$h_{i+1/2}^- = 0$ e $h_{i-1/2}^+ = 0$. Se questi termini sono zero anche i flussi saranno 0 e quindi otteniamo che $\vec{F}_{i+1/2}^- = 0$ e $\vec{F}_{i-1/2}^+ = 0$. Prima di studiare la non negatività di h dobbiamo definire $\frac{dh_i}{dt}$ che rappresenta la variazione di h nel tempo.

$$\frac{dh_i}{dt} = -\frac{1}{h}[\vec{F}_{i+1/2} - \vec{F}_{i-1/2}]$$

$$\frac{dh_i}{dt} = -\frac{1}{h}[(uh)_{i+1/2} + (uh)_{i-1/2}]$$

$$\frac{dh_i}{dt} = -\frac{1}{h} \left[\frac{1}{2} \left((h_{i+1/2} u_{i+1/2} + \alpha h_{i+1/2}) + (h_i u_i + \alpha h_i) \right) + \frac{1}{2} \left((h_{i-1/2} u_{i-1/2} + \alpha h_{i-1/2}) + (h_i u_i + \alpha h_i) \right) \right]$$

$$\frac{dh_i}{dt} = -\frac{1}{h} \left[\frac{1}{2} \left((h_{i+1/2} u_{i+1/2} + \alpha h_{i+1/2}) \right) + \frac{1}{2} \left((h_{i-1/2} u_{i-1/2} + \alpha h_{i-1/2}) \right) \right]$$

$$\frac{dh_i}{dt} = -\frac{1}{h} \left[\frac{1}{2} \left(h_{i+1/2} (-u_{i+1/2} + \alpha) \right) + \left(h_{i-1/2} (u_{i-1/2} + \alpha) \right) \right]$$

La positività di h richiede che $\frac{dh_i}{dt} \geq 0$, di conseguenza abbiamo $h_{i+1/2}^- \geq 0$ e $h_{i-1/2}^+ \geq 0$. Allora è possibile scrivere

$$\frac{1}{h} \left[\frac{1}{2} \left(h_{i+1/2} (-u_{i+1/2} + \alpha) \right) + \left(h_{i-1/2} (u_{i-1/2} + \alpha) \right) \right] \geq 0$$

$$\frac{1}{2} \left(-h_{i+1/2} u_{i+1/2} - \alpha h_{i+1/2} + h_{i-1/2} u_{i-1/2} + \alpha h_{i-1/2} \right) \geq 0$$

Se $h_{i+1/2}^- \geq 0$ e $h_{i-1/2}^+ \geq 0$ possiamo escluderli dall'equazione precedente così da ottenere

$$\frac{1}{2} (-u_{i+1/2} - \alpha + u_{i-1/2} + \alpha) \geq 0$$

Possiamo scrivere $\begin{cases} \alpha - u_{i+1/2} \geq 0 \\ \alpha + u_{i-1/2} \geq 0 \end{cases}$

Abbiamo non negatività di h quando α è definito come:

$$\alpha = \max\left(\left|u_{i+\frac{1}{2}}\right|, \left|u_{i-\frac{1}{2}}\right|\right)$$

DIMOSTRAZIONE

Da un lato, è noto che i sistemi iperbolici delle leggi di conservazione possono sviluppare discontinuità nella soluzione dopo un tempo finito anche per condizioni iniziali uniformi, e che quindi le soluzioni possono essere intese solo in senso debole. D'altro canto, l'iperbolicità permette di determinare la soluzione di uno speciale problema di valore iniziale discontinuo, il problema di Riemann. Se prendiamo la (6)

$$\Delta x \Delta y \frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} + \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2}j} - \vec{F}_{i-\frac{1}{2}j} \right) + \left(\vec{G}_{j+\frac{1}{2}i} - \vec{G}_{j-\frac{1}{2}i} \right) = \Delta x \Delta y \vec{S}_{ij}$$

È possibile scrivere nella forma non lineare

$$\frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} = (A, B) \nabla(\vec{q}_{ij}) = \vec{S}_{ij}$$

La matrice jacobiana $A \pm$ sono

$$A = \frac{\partial F^\pm}{\partial q} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c^2 - u^2 & 2u & 0 \\ -uv & v & u \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{\partial G^\pm}{\partial q} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -uv & v & u \\ c^2 - v^2 & 0 & 2v \end{bmatrix}$$

Le incognite sono tre, la profondità dell'acqua e le due componenti della velocità, e quindi sono necessarie tre equazioni. Le informazioni utilizzate per trovare la soluzione nel primo ordine di approssimazione passano attraverso la linea del mondo e due curve bicaratteristiche selezionate. Nello schema upwind del primo ordine, gli autovalori svolgono un ruolo simile a quello delle curve bicaratteristiche e a quello della linea del mondo, ma vengono calcolati su

ogni bordo di cella e contribuiscono alla discretizzazione delle tre equazioni di conservazione (massa e quantità di moto).

A seconda del numero di Froude normale adimensionale, il cono caratteristico ha una forma diversa. In una data cella, è possibile definire un cono caratteristico e aggiornare il valore delle tre incognite nella cella utilizzando le informazioni trasportate dalle linee caratteristiche in entrata.

Considerando l'eq. (5) è possibile scrivere la matrice jacobiana J_n del flusso normale ($E \cdot n$) nel seguente modo

$$\frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} d\Delta = -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^4 E * n_{ij} \Delta \Gamma_{ij} + S_{ij}$$

$$J_n = \frac{\partial E * n}{\partial \vec{q}_{ij}} = \frac{\partial F}{\partial \vec{q}_{ij}} n_x + \frac{\partial G}{\partial \vec{q}_{ij}} n_y$$

e può essere espresso come

$$J_n = \begin{bmatrix} 0 & n_x & n_y \\ \left(gh - \frac{P_x^2}{h^2}\right) n_x - \frac{P_x P_y}{h^2} n_y & \frac{P_y}{h} n_y + \frac{2P_x}{h} n_x & \frac{P_x}{h} n_y \\ \left(gh - \frac{P_y^2}{h^2}\right) n_y - \frac{P_x P_y}{h^2} n_x & \frac{P_y}{h} n_x & \frac{P_x}{h} n_x + \frac{2P_y}{h} n_y \end{bmatrix}$$

dove $P_x = hu$ e $P_y = hv$. Gli autovalori di J_n sono una rappresentazione delle velocità caratteristiche al

$$a_1 = un_x + vny + c,$$

$$a_2 = un_x + vny,$$

$$a_3 = un_x + vny - c.$$

Gli autovettori corrispondenti sono:

$$e^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ u + cn_x \\ v + cn_y \end{bmatrix} \quad e^2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -cn_y \\ cn_x \end{bmatrix} \quad e^3 = \begin{bmatrix} 1 \\ u - cn_x \\ v - cn_y \end{bmatrix}$$

Considerando le velocità caratteristiche $e^1 = e^2 = e^3 = e^{\pm}$, per consentire la non negatività dell'altezza e all'interno della cella si ha che

$$J_n^+ \rightarrow a \geq 0$$

$$J_n^- \rightarrow a \leq 0$$

$$J_n^+ \rightarrow a^+ = u + e \pm c \geq 0 \text{ quando } a \geq |u \pm c|$$

$$J_n^- \rightarrow a^- = u + e \pm c \leq 0 \text{ quando } a \leq |u \pm c|$$

Discretizzazione del flusso con schema TVD

L'accuratezza spaziale del secondo ordine può essere ottenuta introducendo più punti o celle di controvento negli schemi. Il metodo utilizzato per la generazione di schemi di controvento del secondo ordine è basato sull'estrapolazione variabile, questo metodo è spesso indicato in letteratura come approccio MUSCL ("Monotone Upstream centered Schemes for Conservation Laws"). L'uso di limitatori non lineari in tale procedura, ha come scopo quello di limitare l'ampiezza dei gradienti che compaiono nella soluzione, evitando così la formazione di nuovi estremi, inoltre permette agli schemi di upwind del primo ordine di poter essere trasformati in schemi TVD ad alta risoluzione con l'appropriata definizione di tali limitatori non lineari, assicurando la conservazione del monotono e la diminuzione della variazione totale dei metodi.

Le espressioni per calcolare i flussi secondo la procedura MUSCL e le definizioni dei limitatori di flusso non lineari utilizzate in questo lavoro, che incorporano le proprietà TVD, sono definite come segue.

Le variabili conservate all'interfaccia $(i+1/2,j)$ possono essere considerate come il risultato di una combinazione di estrapolazioni all'indietro e in avanti. Per un'estrapolazione lineare unilaterale all'interfaccia tra i valori mediati nelle due celle a monte (i,j) e $(i-1,j)$, si ha:

$$\vec{q}_{i+1/2,j}^L = \vec{q}_{i,j} + \frac{\varepsilon}{2} (\vec{q}_{i,j} - \vec{q}_{i-1,j}^L), cell(i,j)$$

$$\vec{q}_{i+1/2,j}^R = \vec{q}_{i,j} + \frac{\varepsilon}{2} (\vec{q}_{i+2,j}^R - \vec{q}_{i+1,j}^R), cell(i+1,j)$$

che porta a uno schema del secondo ordine completamente unilaterale. Se lo schema del primo ordine è definito dal flusso numerico

$$\vec{F}_{i+1/2,j} = \vec{F}(\vec{q}_{i,j}; \vec{q}_{i+1,j})$$

il flusso numerico accurato nello spazio del secondo ordine si ottiene da

$$\vec{F}_{i+1/2,j}^2 = \vec{F} \left(\vec{q}_{i+1/2,j}^L; \vec{q}_{i+1/2,j}^R \right)$$

I metodi di splitting vettoriale del flusso di ordine superiore o di splitting per differenza di flusso si ottengono da:

$$\vec{F}_{i+1/2,j}^2 = \vec{F}^+ \left(\vec{q}_{i+1/2,j}^L \right) + \vec{F}^- \left(\vec{q}_{i+1/2,j}^R \right)$$

Tutti gli schemi di upwind del secondo ordine coinvolgono necessariamente almeno cinque punti o celle di maglia. Per raggiungere soluzioni di ordine elevato senza oscillazioni intorno alle discontinuità, si ricorre a limitatori non lineari, sostituendo il termine ε nelle equazioni (7-8) con questi limitatori agli stati sinistro e destro dell'interfaccia di flusso. Per definire tali limitatori,

è necessario calcolare il rapporto tra le variazioni consecutive delle variabili conservate. Questi rapporti sono definiti come segue:

$$r_{i+\frac{1}{2},j}^+ = \frac{\vec{q}_{i+1,j} - \vec{q}_{i,j}}{\vec{q}_{i,j} - \vec{q}_{i+1,j}}$$

e

$$r_{i+\frac{1}{2},j}^- = \frac{\vec{q}_{i+2,j} - \vec{q}_{i,j}}{\vec{q}_{i+1,j} - \vec{q}_{i,j}}$$

dove i limitatori non lineari agli stati sinistro e destro dell'interfaccia di flusso sono definiti da

$$\psi^L = \psi\left(r_{i+\frac{1}{2},j}^+\right)$$

$$\psi^L = \psi\left(1/r_{i+\frac{1}{2},j}^+\right)$$

per gli esperimenti numerici sono state considerate due opzioni di limitatori non lineari. Questi limitatori sono definiti come segue:

$$\psi^{VL} = \frac{r_l + |r_l|}{1 + r_l} \quad \text{Limitatore di Van Leer}$$

e

$$\psi^{MIN} = (r_l) = \text{signal}_l(\text{MAX}(0, \text{MIN}(|r_l|, \text{signal}_l))) \quad \text{limitatore minmod.}$$

con "l" che varia da 1 a 4 (spazio bidimensionale), con signal_l uguale a 1 se $r_l \geq 0$ e -1 altrimenti, r_l è il rapporto tra le variazioni consecutive della variabile conservata l.

9.1.5. DISCRETIZZAZIONE DEL TERMINE SORGENTE

Primo ordine

Nelle condizioni di stato stazionario di un lago in quiete si ha

$$H + z = \text{Cost}, u = 0$$

$$\Delta x \frac{\partial \vec{q}_{ij}}{\partial t} + \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2},j} - \vec{F}_{i-\frac{1}{2},j} \right) = \Delta x \vec{S}_{ij}$$

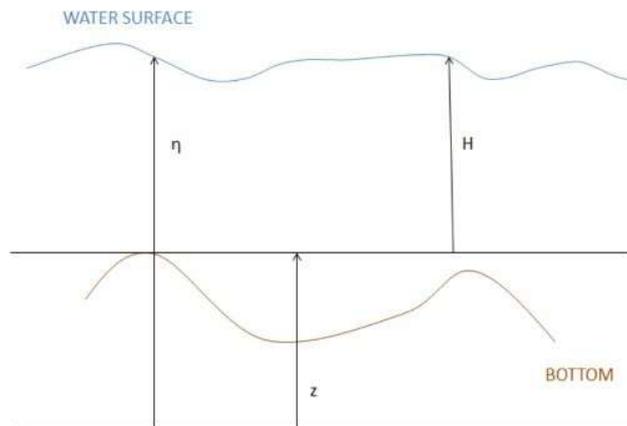


Figura 16-Dominio superficiale

dove $\eta = H + z$

$$S_i = \begin{pmatrix} 0 \\ -gHB \end{pmatrix} \text{ quando } B = \nabla z$$

$$S_i = \begin{pmatrix} 0 \\ -gH\nabla z \end{pmatrix}$$

Per l'i-esima cella della griglia abbiamo questa approssimazione del termine sorgente

$$-\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} gH\nabla z = \left(\frac{g}{2} H_{i+\frac{1}{2}}^2 - \frac{g}{2} H_{i-\frac{1}{2}}^2 \right)$$

A questo punto possiamo scrivere

$$S_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{g}{2} H_{i+\frac{1}{2}}^2 - \frac{g}{2} H_{i-\frac{1}{2}}^2 \end{pmatrix}$$

Per l'equilibrio dei termini del flusso di quantità di moto e della sorgente di quantità di moto possiamo scrivere

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{gh^2}{2} \right) = -hg \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)$$

$$F_{i+\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}} = S_{i+\frac{1}{2}} - S_{i-\frac{1}{2}}$$

dove $S_{i+\frac{1}{2}}$ e $S_{i-\frac{1}{2}}$ sono

$$S_{i+\frac{1}{2}} = \frac{g}{2} H_{i+\frac{1}{2}}^2 -$$

$$S_{i-\frac{1}{2}} = \frac{g}{2} H_{i-\frac{1}{2}}^2 +$$

A questo punto dobbiamo definire le altezze $H_{i+1/2}$ e $H_{i-1/2}$. $F_{i+1/2}$ e $F_{i-1/2}$ saranno mostrate nella sezione successiva. Per $z+H=\text{cost}$ e $u=0$ per il lago in condizioni di riposo abbiamo seguito l'equilibrio idrostatico

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{dz_i}{dx}$$

$$H_{i+\frac{1}{2}}^- = H_i - \frac{\Delta x_i}{2} \left(\frac{z_{i+\frac{1}{2}} - z_i}{\frac{\Delta x_i}{2}} \right) = H_i + z_{i+1} - z_{i+\frac{1}{2}}$$

$$H_{i-\frac{1}{2}}^+ = H_{i+1} - \frac{\Delta x_{i+1}}{2} \left(\frac{z_{i+1} + z_{i+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta x_i}{2}} \right) = H_{i+1} + z_{i+1} - z_{i+\frac{1}{2}}$$

$$H_{i+\frac{1}{2}}^- = \max\left(0, H_i + z_i - z_{i+\frac{1}{2}}\right) \text{ e } H_{i-\frac{1}{2}}^+ = \max\left(0, H_{i+1} + z_{i+1} - z_{i+\frac{1}{2}}\right)$$

Con le altezze della topografia definite come

$$z_{i+\frac{1}{2}} = \max\left(0, H_i + z_i - z_{i+\frac{1}{2}}\right)$$

ESTENSIONE DEL SECONDO ORDINE

Partendo da un metodo del primo ordine, un modo comune per ottenere un'estensione del secondo ordine è, per una ricostruzione idrostatica, calcolare i flussi da valori ricostruiti limitati su entrambi i lati di ogni interfaccia piuttosto che da valori centrati sulle celle. In questo modo si ottiene uno schema del secondo ordine ben bilanciato:

$$\Delta x \frac{\partial \vec{q}_i}{\partial t} + \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2}} - \vec{F}_{i-\frac{1}{2}} \right) = \Delta x (\vec{S}_i + \vec{S}_{ci})$$

dove

$$\vec{F}_{i+\frac{1}{2}} = \vec{F}(\vec{q}_{i-1}^-, \vec{q}_{i+1}^+)$$

$$\vec{q}_{i-1}^- = \begin{bmatrix} h_{i+\frac{1}{2}}^- \\ h_{i+\frac{1}{2}}^- u_{i,dx} \end{bmatrix}$$

$$\vec{q}_{i+1}^+ = \begin{bmatrix} h_{i+\frac{1}{2}}^+ \\ h_{i+\frac{1}{2}}^+ u_{i+1,lf} \end{bmatrix}$$

Per $z+H=\text{cost}$ e $u=0$ per il lago in condizioni di riposo si ha il seguente equilibrio idrostatico

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{dz_i}{dx}$$

$$H_{i-\frac{1}{2}}^- = H_{i,dx} - \frac{\Delta x_i}{2} \left(\frac{z_{i+\frac{1}{2},dx} - z_i}{\frac{\Delta x_i}{2}} \right) = H_{i,dx} - z_{i+\frac{1}{2},dx} + z_i$$

$$H_{i+\frac{1}{2}}^+ = H_{i,lf} - \frac{\Delta x_{i+1}}{2} \left(\frac{z_{i+1} + z_{i+\frac{1}{2},lf}}{\frac{\Delta x_i}{2}} \right) = H_{i+1,lf} + z_{i+1} - z_{i+\frac{1}{2},lf}$$

$$H_{i+\frac{1}{2}}^- = \max\left(0, H_{i,dx} - z_{i+\frac{1}{2},dx} + z_i\right) \text{ e } H_{i+\frac{1}{2}}^+ = \max\left(0, H_{i+1,lf} + z_{i+1} - z_{i+\frac{1}{2},lf}\right)$$

con le altezze della topografia definite come

$$z_{i+\frac{1}{2}} = \max\left(0, H_i + z_{i,dx} - z_{i+\frac{1}{2},lf}\right)$$

9.1.6. TERMINE DI PRECIPITAZIONE E INFILTRAZIONE NEL SWE 2D

Se consideriamo la SWE 2D (1)

$$\begin{cases} h_t + (hu)_x + hv_y = 0 \\ (hu)_t + (hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)_x + huv_y = -ghz_x + ghS_{fx} \\ (hv)_t + (huv)_x + (hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)_y = -ghz_y + ghS_{fy} \end{cases}$$

In questo caso, per aggiungere le precipitazioni nel modello, abbiamo modificato la SWE 2D nel modo seguente

$$\begin{aligned} h_t + (q)_x + (q)_y &= R - f \\ (q_x)_t + \left(\frac{qx^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2\right)_x + \left(\frac{qxqy}{h}\right)_y &= -ghz_x - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial h\tau_{x,x}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{x,y}^e}{\partial y} + RV_x - fu_x \\ (q_y)_t + (huv)_x + \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)_y &= -ghz_y - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial h\tau_{x,y}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{y,y}^e}{\partial y} + RV_y - fv_y \end{aligned}$$

Dove, oltre ai termini descritti sopra, (qx, qy) sono le due componenti del deflusso unitario e R è l'intensità di pioggia, $\tau_{xxe}, \tau_{xye}, \tau_{yye}$ sono gli sforzi di taglio turbolenti e alla fine Vx, Vy sono le due componenti orizzontali della velocità di pioggia e f è il tasso di infiltrazione. L'intensità di pioggia R è imposta direttamente in ogni punto spaziale, contribuendo al deflusso superficiale. Nei flussi terrestri la profondità dell'acqua è molto ridotta e la turbolenza è prodotta principalmente dall'attrito del letto. In questa situazione, gli effetti delle sollecitazioni turbolente possono essere trascurati e quindi non sono stati inclusi nei calcoli.

Il tasso di infiltrazione viene calcolato in ogni punto spaziale utilizzando la formulazione di Green-Ampt (Chow et al. 1988) (Figura 17). Il tasso di infiltrazione potenziale viene quindi calcolato come:

$$f(x, t) = k_s \left(1 + \frac{(h(x, t) + \varphi(x)\Delta\theta)}{F(x, t)} \right)$$

$$F(x, t) = \int_0^t f(x, t) dt$$

$$L(x, t) = \frac{F(x, t)}{\Delta\theta}$$

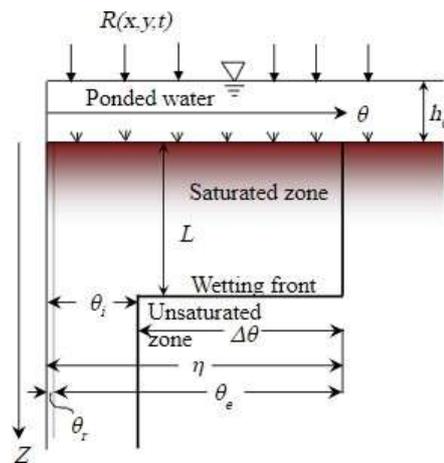


Figura 17-Schematizzazione della definizione delle variabili di infiltrazione nel metodo Green Ampt variabili utilizzate in FHM-

dove k_s è la conducibilità idraulica satura del terreno, h è la profondità dell'acqua sulla superficie del letto, ϕ

è l'aspirazione nella regione non satura del terreno, $\Delta\theta = \phi - \theta_i$ è la variazione del contenuto di umidità del suolo all'avanzare del fronte di saturazione, θ_i è il contenuto di umidità iniziale del suolo, ϕ è la porosità del suolo e L è la larghezza della regione satura del suolo. Il tasso di infiltrazione effettivo è uguale all'infiltrazione potenziale

tranne quando la profondità dell'acqua è troppo piccola e non c'è abbastanza acqua da infiltrare, nel qual caso l'infiltrazione viene calcolata dalla profondità dell'acqua disponibile. L'evapotraspirazione non viene considerata, poiché è trascurabile negli eventi meteorici urbani.

9.1.7. TRATTAMENTO DELL'INTERFACCIA UMIDO/SECCO

I calcoli del flusso numerico in prossimità dell'interfaccia bagnato/asciutto richiedono un'attenzione particolare. Il problema fondamentale è il calcolo della velocità quando la profondità dell'acqua h si avvicina al valore zero. La velocità viene calcolata dal vettore di variabili conservative $W = [h, hu]^T$ come $u = (h, hu)$. A causa dell'imprecisione numerica dei calcolatori, la velocità può raggiungere valori non fisicamente grandi quando $h \rightarrow 0$.

Il metodo più semplice per affrontare questo problema consiste nell'impostare un limite che sia piccolo ma più grande della precisione numerica del computer. Questa tolleranza definisce se un volume finito è sommerso o meno. Tutti i valori del vettore delle variabili conservative sono considerati nulli quando la profondità dell'acqua è inferiore a questa costante. Piccole variazioni di questo valore non influiscono molto sui risultati numerici, quando si calcolano casi senza attrito. Tuttavia, il modello diventa più sensibile alle variazioni ϵ per i problemi di attrito del letto, parametrizzati dall'espressione di Manning. Ciò è dovuto al fatto che la formula di Manning richiede la divisione per h , che può risultare in una previsione non realistica dello sforzo di taglio nelle regioni poco profonde in prossimità dei confini bagnato/asciutto. Un altro modo per far fronte a questo fenomeno è quello di impostare la celerità del flusso a zero nel volume finito che confina con l'interfaccia bagnato/secco. Ma questo può ipoteticamente causare problemi quando non c'è un'interfaccia bagnato/asciutto nel dominio di calcolo e questo dominio è coperto da un piccolo strato d'acqua. L'ultimo modo indicato in questo codice è quello di utilizzare la seguente relazione

$$u = \frac{h(hu)}{h^2 + \epsilon_v}$$

dove ϵ_v è una piccola costante positiva. Questa relazione è semplice e poco impegnativa dal punto di vista computazionale, ma per i calcoli quando $h > \epsilon_v$ la velocità viene calcolata con un errore che dipende dal rapporto tra h^2 e ϵ_v .

9.1.8. CONDIZIONI AL CONTORNO

I confini del dominio bidimensionale in cui si cerca una soluzione numerica del problema del flusso di terra sono le diverse parti della linea di contorno esterna del campo. Come in ogni altro problema di confine nella fluidodinamica computazionale, si pone innanzitutto il problema del numero di condizioni fisiche al contorno necessarie in ogni punto limite. Per aiutarci, la teoria delle caratteristiche in 2D ci dice che, a seconda del valore della velocità normale attraverso il punto limite

$$U^* n = u_n^x + v_n^y$$

e il numero di Froude locale $Fr = u^*n/c$, le possibilità sono

- Afflusso supercritico: $u^*n \leq -c$, \Rightarrow tutte le variabili devono essere imposte.
- Afflusso subcritico: $-c < u^*n \leq 0$, \Rightarrow devono essere imposte due variabili.
- Deflusso supercritico: $u^*n > c$, \Rightarrow nessuna delle variabili deve essere imposta.
- Deflusso subcritico: $0 < u^*n \leq c$, \Rightarrow deve essere imposta una variabile.

9.1.9. CONDIZIONI AL CONTORNO DI MONTE

La trattazione della condizione di monte per i corpi idrici in campo bidimensionale è imposta utilizzando un termine sorgente \dot{m} , questa sorgente viene suddivisa in modo uguale all'interno di un numero minimo di celle (numero minimo 3). Il termine sorgente viene calcolato in ogni punto spaziale utilizzando la formulazione del bilancio di massa.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(hu) = \dot{m} \quad (7)$$

In condizioni stazionarie il secondo termine al primo membro può essere riscritto come segue:

$$\int_{\partial A} hu_n dl = \int_A \dot{m} ds \quad (8)$$

Dove A è l'area delle celle selezionate precedentemente per la definizione della condizione al contorno, dalla relazione precedente è possibile ricavare il valore di \dot{m} come segue:

$$\dot{m} = \frac{Q}{A} \quad (9)$$

9.1.10. SISTEMA DI POMPAGGIO

Anche nel caso di sistemi di pompaggio in campo bidimensionale la trattazione avviene attraverso l'utilizzo di un termine sorgente \dot{m} . In questo caso dopo aver definito le celle di controllo (monte e valle) dove sottrarre e aggiungere il termine sorgente \dot{m} , lo stesso è calcolato come definito nell'equazione 9. In particolare, nell'equazione 9 il valore di \dot{m} sarà funzione delle caratteristiche della pompa ed in particolare il valore di portata Q sarà determinata dal tirante all'interno delle celle di controllo di monte $Q = Q(h)$.

9.1.11. I SIFONI

Nel caso di sistemi di bypass idraulici (i Sifoni) all'interno del dominio bidimensionale la trattazione avviene utilizzando un termine sorgente \dot{m} . dopo aver definito le celle di controllo (monte e valle), la lunghezza L della condotta e il raggio R della tubazione che viene assunta circolare, come mostrato in figura 18.

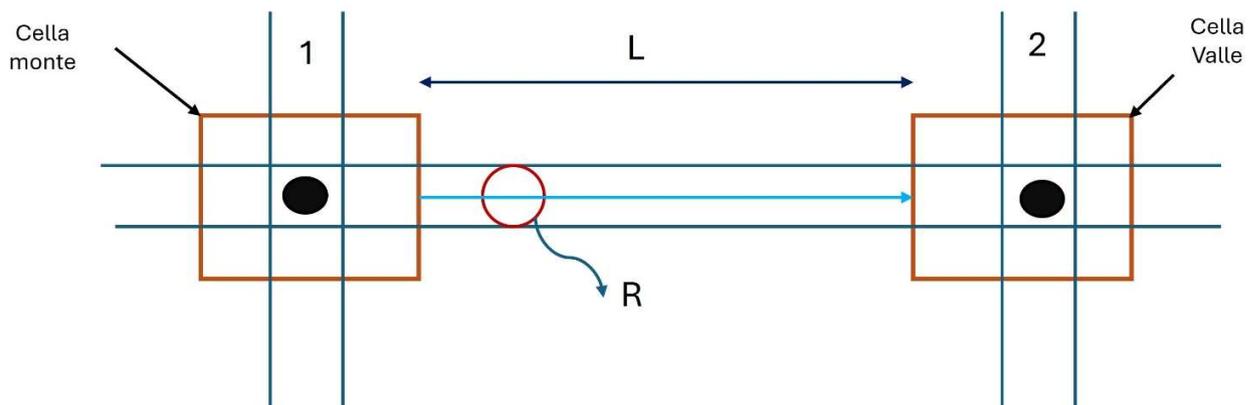


Figura 18- Schema Sifone in dominio bidimensionale

Dopo aver determinate le quote Z_1 e Z_2 nella cella di monte e di valle, come riportato in figura 19



Figura 19- quote idrauliche nelle celle di controllo

È possibile calcolare il valore di \dot{m} come riportato sfruttando l'equazione 9, possiamo scrivere:

$$\dot{m} = \frac{Q}{A} = \frac{C}{A} (Z_1 - Z_2)$$

Dove C viene determinato utilizzando l'equazione di Darcy-Weisbach come segue:

$$C = 2\pi \left(\frac{R^5 g}{L' w f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Il modello idraulico delle acque basse è stato sottoposto a una serie di test di benchmark per verificarne l'efficienza e l'accuratezza. I risultati di tali test sono riportati in appendice 1.

9.2. IL MODELLO IDROLOGICO

Il software utilizzato per la schematizzazione dell'area montana è HEC-HMS, sistema d'analisi dell'istituto Hydrologic Engineering Center (HEC), del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.

Il software è stato realizzato per permettere di simulare e di stimare gli apporti nei bacini idrografici legati alle precipitazioni, questo permette una modellazione idrologica di un bacino attraverso l'utilizzo di elementi concettuali che lo rappresentano e dei processi fisici che avvengono in essi. La scelta di utilizzare questo software è stata dettata dal risultare il più testato e affidabile nel descrivere gli aspetti idrologici in varie zone geografiche oltre che ad essere molto duttile nello schematizzare una grande serie di situazioni come, ad esempio, la presenza di dighe o sbarramenti fluviali che si possono trovare all'interno sia di bacini idrografici che a piccole aree urbane o naturali. Gli ideogrammi prodotti dal software possono essere utilizzati direttamente o insieme con altri software per studi sulla disponibilità idrica, drenaggio urbano, previsione dei flussi, impatto della futura urbanizzazione, progettazione degli sfioratori dei serbatoi, riduzione dei danni delle inondazioni, regolazione delle pianure alluvionali e funzionamento dei sistemi. Altro vantaggio che offre il software riguarda la possibilità di poter essere utilizzato in un ambiente Linux a differenza di molti altri software il cui unico ambiente è Windows, questa possibilità come sarà meglio esplicitata nei prossimi capitoli, ha permesso di utilizzare il software sia per la fase di calibrazione e validazione del modello idrologico sia per l'utilizzo operativo in real-time all'interno della catena di modelli per il sistema di allerta rapida.

I modelli incorporati nel programma sono caratterizzati da flusso non stazionario, ossia descrivono le variazioni del flusso nel corso del tempo. Tale descrizione delle variazioni temporali del flusso è ottenuta risolvendo equazioni differenziali che delineano una componente del sistema idrologico. La soluzione di equazioni differenziali temporali richiede sempre la conoscenza dello stato iniziale del sistema all'avvio della simulazione. Risolvere tali

equazioni implica ottenere un rapporto che descrive come l'output varia in risposta a modifiche negli input, nei parametri e in altre variabili chiave del processo modellato. Le equazioni di instradamento, in particolare, forniscono il valore di $\Delta Q/\Delta t$, che rappresenta la velocità di variazione del flusso rispetto al tempo. Partendo da un valore iniziale del flusso Q , ad un certo istante temporale insieme al tasso di variazione dei valori successivi vengono calcolati utilizzando un approccio ricorsivo basato sulla seguente equazione:

$$Q_t = Q_{t-\Delta t} + \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right) \quad (10)$$

Nell'equazione fornita, $Q_{t-\Delta t}$ indica la condizione iniziale, il valore noto da cui iniziano i calcoli. Specificare le condizioni iniziali è essenziale per l'utilizzo di qualsiasi modello incluso nel programma. Nei modelli di calcolo del volume, le condizioni iniziali riflettono lo stato iniziale di umidità del suolo nel bacino idrografico. Per i modelli di deflusso, invece, le condizioni iniziali rappresentano il deflusso all'inizio dell'analisi di una tempesta. Nei modelli di instradamento, queste condizioni iniziali indicano i flussi nel canale all'avvio della tempesta. Infine, nei modelli di detenzione dello stoccaggio, la condizione iniziale corrisponde allo stato di stoccaggio all'inizio dell'evento. Uno schema sintetico di come viene schematizzato un modello di tipo idrologico è riportato nella Figura 20

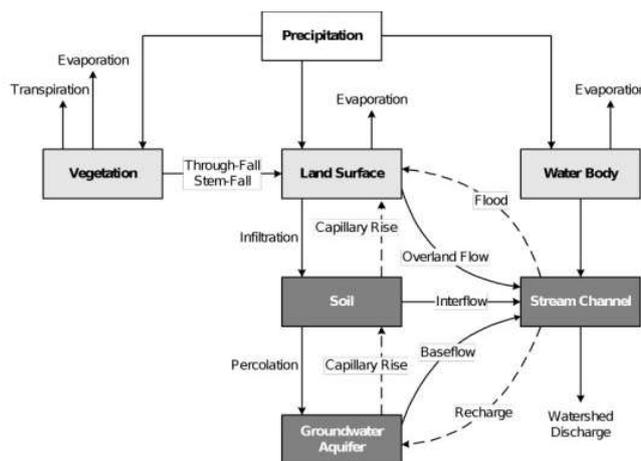


Figura 20- Schema dei processi di deflusso di un bacino (USACE 1998-USACE 200)

All'interno di un bacino idrografico dal punto di vista idrologico, la maggior parte dell'acqua proveniente dalle precipitazioni ritorna nell'atmosfera attraverso processi come l'evaporazione, il deflusso attraverso i corpi idrici e la traspirazione della vegetazione. Durante eventi temporaleschi, l'evaporazione e la traspirazione tendono a diminuire a causa delle condizioni meteorologiche associate alle precipitazioni, che riducono la radiazione solare e aumentano l'umidità relativa. La brevità degli eventi meteorici, tuttavia, non influisce significativamente sul bilancio idrico totale legato ad evaporazione e traspirazione.

Le precipitazioni possono cadere direttamente sulla vegetazione, depositandosi successivamente sulla superficie, fenomeno noto come caduta passante o flusso dello stelo. L'acqua sulla superficie terrestre può formare ristagni o infiltrarsi a seconda del terreno, della copertura del suolo e dell'umidità precedente. Dopo l'infiltrazione, l'acqua viene temporaneamente immagazzinata negli strati superiori del terreno, potenzialmente riemergendo per azione capillare. Quando si raggiunge una zona di saturazione, l'acqua inizia a muoversi verticalmente e, in alcuni casi, orizzontalmente, con il punto di saturazione noto come campo di capacità.

L'interflusso (flusso sotterraneo orizzontale) è influenzato da strati ostacolanti, come quelli di argilla, e può svilupparsi sopra o appena sopra questi strati. L'acqua percola verticalmente attraverso la gravità, nota come percolazione, entrando infine nella falda acquifera sotterranea. L'acqua nella falda acquifera si muove lentamente e può ritornare nei canali o torrenti. In alcune condizioni, l'acqua superficiale può ricaricare la falda acquifera.

Il software Hec-HMS viene utilizzato per la schematizzazione di tutti questi processi idrologici, adottando approcci di modellazione diversificati in base ai dati disponibili, al tipo di analisi e alla descrizione dell'area di studio. Esso impiega metodi distinti per l'elaborazione dei dati meteorologici, il calcolo dell'infiltrazione, la rappresentazione del deflusso diretto e del flusso superficiale, la descrizione del flusso di base e il calcolo del flusso all'interno dei canali, contribuendo così a valutare il flusso risultante alla uscita del bacino idrografico.

9.2.1. MODELLO SCS-CN

Il modello SCS-Curve Number è un metodo utilizzato per stimare la quantità di deflusso superficiale generata da precipitazioni piovose su terreni con diversi tipi di copertura e utilizzo del suolo. È stato sviluppato dal Servizio di Conservazione del Suolo degli Stati Uniti (SCS, ora Natural Resources Conservation Service, NRCS) per valutare l'impatto delle precipitazioni sul deflusso superficiale e per progettare strutture di drenaggio e controllo dell'erosione.

Il modello si basa su un'analisi della superficie terrestre considerando fattori come la permeabilità del suolo, la copertura vegetale, l'infiltrazione dell'acqua e la capacità del terreno di trattenere l'acqua. Assegna un numero detto "Curve Number" (CN) a diversi tipi di suolo e copertura del terreno, che riflette la capacità del terreno di assorbire l'acqua.

Questo numero, che varia solitamente da 0 a 100, aiuta a determinare la quantità di precipitazione che si trasformerà in deflusso superficiale, considerando anche la saturazione del terreno. Valori bassi di Curve Number indicano terreni con maggiore capacità di assorbimento dell'acqua (come foreste dense), mentre valori più alti indicano terreni con maggiore impermeabilità (come suoli compatti o aree urbanizzate).

Il modello SCS-Curve Number è ampiamente utilizzato per valutare il deflusso superficiale e contribuisce alla gestione delle risorse idriche, alla progettazione di opere di ingegneria idraulica e alla prevenzione dell'erosione del suolo.

Il modello utilizza diversi parametri per valutare la quantità di deflusso superficiale generata dalle precipitazioni. I principali parametri includono:

1. **Tipo di suolo:** Classifica il suolo in base alla sua permeabilità e capacità di assorbire l'acqua. I diversi tipi di suolo hanno Curve Number (CN) specifici associati, che rappresentano la capacità di infiltrazione dell'acqua nel terreno.

2. **Copertura del terreno:** Considera la tipologia di vegetazione o copertura presente sulla superficie terrestre. Differenti tipi di vegetazione influenzano l'evapotraspirazione e l'assorbimento dell'acqua, contribuendo quindi al valore del Curve Number.
3. **Condizioni di umidità del suolo:** La saturazione del suolo influisce sulla sua capacità di assorbire ulteriori quantità di acqua. Terreni già saturi tenderanno a generare più deflusso superficiale rispetto a quelli più asciutti.
4. **Quantità di precipitazione:** La quantità e l'intensità della precipitazione influenzano direttamente la quantità di deflusso superficiale. Piogge più intense o prolungate possono superare la capacità di assorbimento del terreno, generando un aumento del deflusso superficiale.
5. **Il tempo di corrivazione (T):** nel modello SCS-Curve Number, T è chiamato anche tempo di lag, è una stima del tempo che l'acqua impiega a fluire attraverso un bacino idrografico, dalla parte più alta fino al punto di deflusso, come un fiume o un punto di scarico.
6. **Il tempo di inizializzazione (T')**: nel modello SCS-Curve Number può essere stimato considerando vari fattori del bacino idrografico, inclusi la morfologia del terreno, la pendenza, la vegetazione e altri parametri idrologici. Questo tempo rappresenta la fase iniziale in cui inizia il deflusso superficiale dopo l'inizio della precipitazione.

L'equazione che combina questi parametri per calcolare il deflusso superficiale è:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (11)$$

Dove:

- Q è il deflusso superficiale.
- P è la precipitazione.

- S è il potenziale assorbimento dell'acqua del terreno (calcolato in base al Curve Number).

Il modello considera l'interazione di questi parametri per stimare la quantità di acqua che diventerà deflusso superficiale a seguito di una precipitazione, contribuendo così alla gestione delle risorse idriche e alla prevenzione dell'erosione del suolo.

L'equazione per la determinazione del tempo di corrivazione nel modello SCS-Curve Number è spesso approssimata utilizzando una formula empirica che considera il tempo di inizializzazione (T') e il tempo di concentrazione (T_c).

Una formula comunemente utilizzata per stimare il tempo di corrivazione è la seguente:

$$T_{corr} = T' + T_c \quad (12)$$

- T_{corr} è il tempo totale di corrivazione.
- T' è il tempo di inizializzazione, che rappresenta il ritardo iniziale prima che l'acqua inizi a defluire dal bacino.
- T_c è il tempo di concentrazione, che indica il tempo che l'acqua impiega a raggiungere il punto di deflusso una volta che ha iniziato a fluire nel bacino.

Il tempo di inizializzazione (T') è spesso stimato utilizzando formule empiriche basate sul Curve Number massimo del bacino, come menzionato in precedenza.

Una formula empirica spesso utilizzata per stimare il tempo di inizializzazione è:

$$T' = 0.2 * CN_{max}^{0.6} \quad (13)$$

Dove:

- T' è il tempo di inizializzazione.
- CN_{max} è il valore massimo del Curve Number per il bacino idrografico.

Il valore massimo del Curve Number (CN_{max}) può essere determinato in base alle caratteristiche predominanti del suolo e della copertura del bacino. Questa formula fornisce

una stima approssimativa del tempo di inizializzazione e può variare a seconda delle condizioni specifiche del bacino.

Tuttavia, è importante notare che l'accuratezza del calcolo dipende dalla disponibilità di dati dettagliati sul bacino, come la distribuzione del suolo, la vegetazione, la topografia e l'idrologia del sito. In alcuni casi, potrebbe essere necessario utilizzare modelli più complessi o dati specifici per ottenere stime più precise del tempo di inizializzazione nel contesto del modello SCS-Curve Number.

Il tempo di concentrazione (T_c) è una stima del tempo di viaggio dell'acqua lungo il percorso di deflusso. Questo può essere calcolato considerando la morfologia del bacino, la lunghezza del deflusso e la velocità di deflusso.

Una delle formule empiriche comuni per calcolare il tempo di concentrazione è la seguente:

$$T_c = 0.007 * L^{0.6} * (1 + 0.2 * P)^{0.5}$$

(14)

Dove:

- T_c è il tempo di concentrazione in ore.
- L è la lunghezza del percorso di deflusso in metri.
- P è la pendenza media del percorso di deflusso espressa come frazione (ad esempio, 0,05 per una pendenza del 5%).

Questa formula considera la lunghezza del percorso di deflusso e la pendenza media del terreno lungo questo percorso. Tuttavia, è importante notare che questa è solo una delle molte formule approssimative utilizzate per stimare il tempo di concentrazione e l'accuratezza dipende dalla complessità e dalle caratteristiche specifiche del bacino.

9.3.IL MODELLO SURROGATO

Il flusso di lavoro seguito è strutturato in due fasi distinte: fase di addestramento e operativa. L'obiettivo della prima è addestrare i differenti modelli di machine learning su dati noti (training), mentre nella seconda i modelli già addestrati vengono utilizzati per l'utilizzo in tempo reale della previsione di eventi reali (inferenze). Segue uno schema e una descrizione delle due fasi.

9.3.1 FASE DI ADDESTRAMENTO

L'obiettivo della fase di addestramento è quello di risolvere in maniera supervisionata un problema di regressione (supervised). La fase di addestramento e ottimizzazione del modello è strutturata in quattro fasi distinte: a) processamento dei dati di input; b) proiezione sullo spazio latente; c) addestramento e ottimizzazione del modello; d) memorizzazione e immagazzinamento dei parametri del modello.

Processamento dei dati di input

Nella prima fase i dati di input vengono processati ed eventualmente filtrati. I dati in ingresso sono costituiti da due tipologie differenti in base allo strumento utilizzato per la loro generazione. La prima tipologia di dati di input è costituita dagli idrogrammi di piena del fiume Crati e del fiume Coscile, generati tramite il modello idrologico applicato all'intero dominio montano costituito dai bacini del fiume Crati e del fiume Coscile. La seconda tipologia è caratterizzata dai dati di input provenienti dalle simulazioni del solutore Shallow-Water applicato al dominio costiero di cui alla figura 10b, ed è costituito da sequenze temporali e spaziali di pioggia che interessano il dominio stesso, nonché dagli idrogrammi di piena del fiume Crati e del fiume Coscile a cui corrispondono altrettanti campi di velocità e di allagamento del dominio costiero. Ciascun campo è visualizzabile come una immagine in bianco e nero, in cui al valore numerico della singola cella corrisponde il valore di luminosità del singolo pixel. Come frequentemente effettuato nella pratica di intelligenza artificiale, i dati

vengono divisi in due sotto-dataset di addestramento, corrispondente al 70% dei dati iniziali, e a un dataset di validazione.

Proiezione sullo spazio latente

Le immagini provenienti dalle simulazioni del solutore Shallow Water presentano una dimensionalità troppo elevata per consentirne la diretta processazione da un algoritmo di computer vision. Per tener conto del fatto che i campi di velocità e di profondità della corrente nel dominio costiero dipendono da dalle precipitazioni occorse dall'inizio dell'evento meteorico i campi di precipitazione a un dato istante sono cumulati agli istanti precedenti dall'inizio dell'evento. Tali campi sono processati mediante Principal Component Analysis (PCA), proiettando i dati di partenza in uno spazio latente a dimensionalità ridotta. In particolare, si è ricorso all'implementazione per dataset di grandi dimensioni nella forma di Incremental PCA. Questa proiezione ha l'ulteriore vantaggio di mettere in evidenza le aree della mappa con maggiore varianza di valori e pertanto di ridurne l'influenza sul modello di intelligenza artificiale. L'output di questo processo è costituito dai corrispettivi score di PCA.

Addestramento e ottimizzazione del modello

L'algoritmo di intelligenza artificiale è costituito da una rete neurale convoluzionaria (CNN) a due passi. Nella prima parte della rete vengono forniti in ingresso gli score della PCA relativi alla pioggia e processato attraverso una combinazione di livelli convoluzionali e di max pooling. L'output della prima parte della rete viene poi concatenato ai valori agli idrogrammi dei fiumi Crati e Coscile provenienti dal modello idrologico. In output al secondo passo della CNN è presente una rete densa, il cui output layer è costituito dai corrispondenti valori di tirante idrico e di velocità dell'acqua. L'algoritmo è addestrato tramite back-propagation e ottimizzato attraverso un algoritmo di ricerca di griglia. Lo schema dell'addestramento e ottimizzazione del modello è mostrato in figura 21.

Memorizzazione e immagazzinamento dei parametri del modello

L'output della fase di addestramento del modello è costituito dai loadings della PCA e dal grafo della CNN addestrata. Entrambi i modelli sono memorizzati per un utilizzo nella fase operativa.

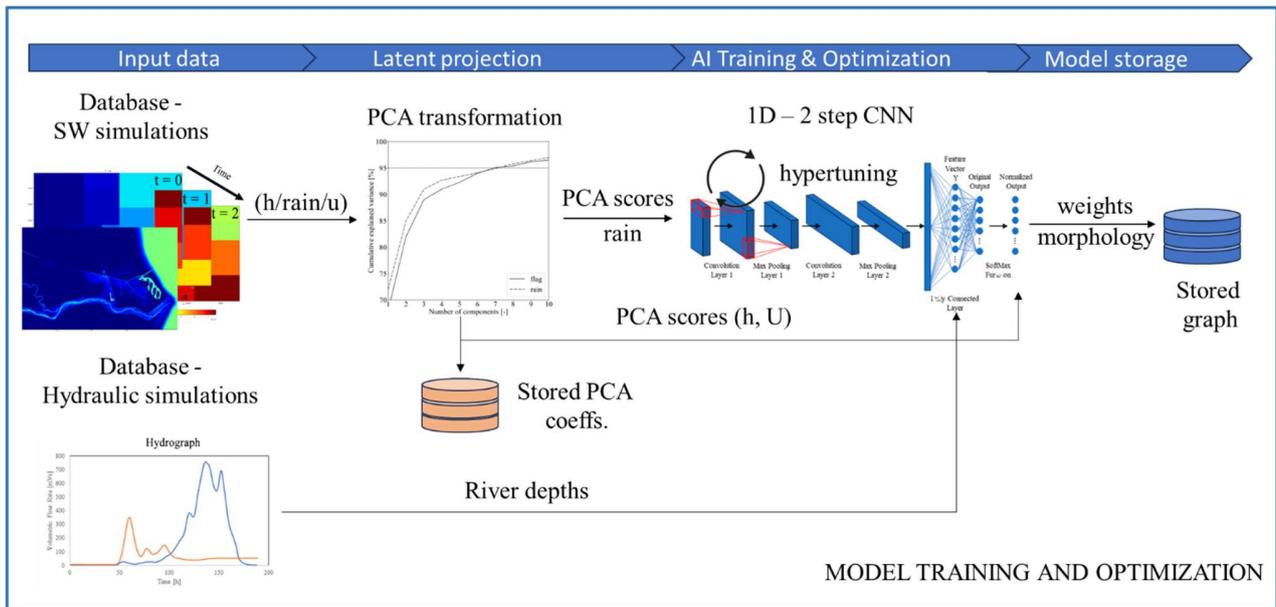


Figura 21- Schema del framework di addestramento.

9.3.2 FASE OPERATIVA

La fase operativa è strutturata in 5 fasi successive: a) Dati di input; b) Proiezione sullo spazio latente; c) Inferenza; d) Ricostruzione dei campi di profondità e velocità del flusso; e) Ottimizzazione e addestramento degli algoritmi

Dati di input

I dati di input sono costituiti da sequenze temporali e spaziali di pioggia ricadenti sul dominio costiero- provenienti da misure radar o da simulazioni da modelli di circolazione atmosferica ad alta risoluzione spaziale- e dai corrispettivi idrogrammi alle sezioni di ingresso al dominio del fiume Crati e Coscile provenienti da simulazioni del modello idrologico.

Proiezione sullo spazio latente

I valori di pioggia sono proiettati sullo spazio latente, utilizzando i loadings delle PCA precedentemente salvati. L'output di questa fase è costituito dagli score delle PCA corrispondenti alle sequenze di pioggia cumulate in maniera analoga a quanto fatto nella fase di addestramento.

Inferenza

Gli score della PCA relativi alla pioggia e gli idrogrammi dei fiumi Crati e Coscile vengono entrambi forniti al grafo di CNN precedentemente salvato, ottenendo in output gli score delle profondità e della velocità h e u del flusso nel dominio costiero.

Ricostruzione dei campi di profondità e velocità del flusso

Gli score di PCA predetti dalla rete CNN vengono ricostruiti nello spazio fisico attraverso una proiezione inversa delle PCA, così ottenendo le sequenze di allagamento e velocità del flusso nel dominio.

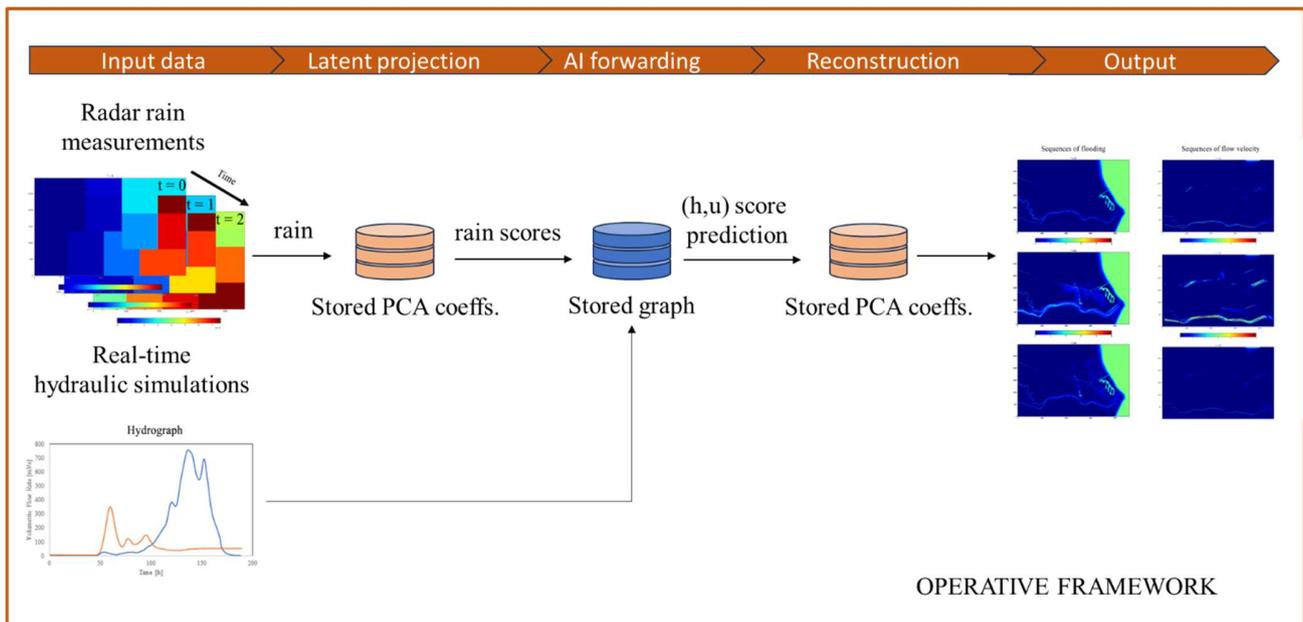


Figura 22 - Schema del framework operativo.

9.3.3 DECOMPOSIZIONE DIMENSIONALE - PCA

Come precedentemente descritto, i dati di input alla fase di addestramento sono costituiti da sequenze di campi di pioggia, velocità e profondità del flusso nel dominio costiero e dagli idrogrammi dei fiumi Crati e Coscile. Sebbene gli idrogrammi siano una semplice sequenza temporale di valori scalari, gli altri campi - di pioggia, di profondità e di velocità del flusso - presentano una elevata dimensionalità. Infatti, ciascun campo istantaneo è una immagine con un numero di pixel corrispondente a $n_x \times n_y = 2948 \times 4576$ pixel. In aggiunta, ciascuna simulazione è costituita da una sequenza temporale di campi con una frequenza di campionamento di 60 minuti, che per periodi piovosi di alcuni giorni possono comportare sequenze temporali di oltre 200 campionamenti. Questa elevata dimensionalità ha comportato l'impossibilità di addestrare la rete neurale CNN direttamente i dati nel loro formato originale, imponendo la necessità di una riduzione dei dati attraverso la proiezione dei campi di profondità, velocità e precipitazione in uno spazio latente tramite Principal Component Analysis (PCA).

La PCA è infatti uno strumento popolare nel riconoscimento di pattern e nella riduzione dei dati, che proietta dati multidimensionali in una nuova base ortogonale, dove lungo i nuovi assi la varianza dei dati è massimizzata. In questo processo, il numero di nuovi assi necessari per descrivere l'insieme di dati originale può essere drasticamente ridotto rispetto al numero originale di caratteristiche. Il principale svantaggio di PCA è il notevole costo computazionale (Jolliffe et al 2016.), poiché il numero di voci di dati è limitato dalla memoria fisica disponibile. Per questa applicazione sarebbe necessario mantenere in memoria l'intero set di dati di simulazione che facilmente include diversi terabyte di dati, rendendo questo approccio impraticabile per un database costruito su simulazioni ad alta fedeltà. Per superare il limite di memoria imposto da PCA, è stato proposto un algoritmo di PCA incrementale chiamato IPCA, (Zhao et al. 2006.) che consente dati di input sparsi. L'algoritmo IPCA costruisce un'approssimazione a basso rango per i dati di input utilizzando una quantità di memoria indipendente dal numero di campioni di dati di input, mantenendo un singolo set di dati di simulazione alla volta, mantenendo la stessa precisione in termini di varianza spiegata (Ross DA et al 2008). In IPCA, i componenti principali sono derivati utilizzando il metodo della covarianza, che si basa sui seguenti passaggi:

- (1) derivare il vettore medio, eseguendo una media degli esempi di ciascuna delle colonne della matrice dei dati, ottenendo un array di 1 per Npixels;
- (2) sottrarre il vettore medio derivato in (1) a ciascuna delle righe, ottenendo un array $T \times N_{\text{pixels}}$, X' ;
- (3) calcolare la matrice di covarianza X_c da X' ;
- (4) calcolare gli autovalori (scores) e gli autovettori (loadings) di X_c e ordinare i risultati in ordine decrescente di varianza spiegata. I vettori di loadings formano una nuova base per i dati;
- (5) selezionare il numero di componenti principali per spiegare almeno il 95% della varianza e scartare le componenti rimanenti;
- (6) proiettare i dati originali sulla nuova base ridotta;

(7) memorizzare la nuova base (origine e assi) per un uso successivo.

La trasformazione IPCA restituisce matrici di scores e loadings per ogni simulazione numerica. I due parametri rappresentano rispettivamente gli autovalori e gli autovettori della matrice di covarianza. Il numero di componenti P è selezionato per rappresentare più del 95% della varianza cumulata. Processando i dati tramite IPCA è possibile per ogni istante delle simulazioni calcolare gli score di pioggia, allagamento e velocità. La processazione completa del dataset fornisce altrettante matrici di loadings, anche dette autoimmagini. Si ricorda che per tenere conto dell'effetto sui campi di velocità e profondità del flusso ad un dato istante dell'accumulo di pioggia negli istanti precedenti dall'inizio dell'evento, i campi di pioggia vengono prima cumulati e successivamente processati tramite PCA.

9.3.4 CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Le reti neurali convoluzionali sono una categoria di algoritmi di intelligenza artificiale che include diverse architetture di reti e vengono utilizzati per risolvere compiti di addestramento profondo. Sono particolarmente efficaci in compiti che prevedono il riconoscimento delle immagini, di pattern e di relazioni spazio-temporali. Esse sono alla base di molti sistemi di visione macchina. Le reti neurali convolutive sono costituite da tre tipologie di layer in cascata (Figura 2315): livelli convoluzionali, di pooling e una rete neurale direttamente connessa:

- **Layer convoluzionali:** essi rappresentano l'aspetto cardine del meccanismo di funzionamento delle reti convoluzionali. A seconda della complessità della rete, uno o più di questi livelli possono essere trovati in cascata. In ciascuno dei livelli sono presenti uno o più filtri che insieme costituiscono il cosiddetto kernel, che analizza le immagini in ingresso. È possibile analizzare sia immagini in bianco e nero, come nel caso della nostra applicazione, che immagini a colori su più livelli. I filtri si muovono su porzioni delle immagini analizzando le feature. Il kernel restituisce quindi una versione processata delle immagini di partenza. La convoluzione sfrutta tre concetti importanti: sparse interaction, parameter sharing ed equivariant representation. I layer normali di

una rete neurale utilizzano la moltiplicazione di matrici tramite una matrice di parametri che descrivono l'interazione tra l'unità di input e di output. Ciò significa che ogni unità di output interagisce con ogni unità di input. Nelle reti convoluzionali invece, il kernel è reso più piccolo rispetto all'input. Ad esempio, un'immagine può avere milioni o migliaia di pixel, ma durante il suo filtro tramite il kernel possiamo rilevare informazioni significative che riguardano decine o centinaia di pixel. Ciò significa che è necessario memorizzare meno parametri, riducendo non solo il requisito di memoria del modello ma migliorando anche l'efficienza statistica del modello. Se calcolare una caratteristica in un punto spaziale (x_1, y_1) è utile, allora dovrebbe essere utile anche in un altro punto spaziale, diciamo (x_2, y_2) . Questo significa che, per una singola fetta bidimensionale, ovvero per la creazione di una mappa di attivazione, i neuroni sono costretti a utilizzare lo stesso set di pesi. In una rete neurale tradizionale, ogni elemento della matrice dei pesi viene utilizzato una volta e poi non viene più rivisitato, mentre la rete di convoluzione ha parametri condivisi, ovvero il *parameter sharing*, per ottenere un output, i pesi applicati a un input sono gli stessi dei pesi applicati altrove. Grazie alla condivisione di parametri, gli strati della rete neurale convoluzionale avranno la proprietà di equivarianza rispetto alla traslazione e alla rotazione. Ciò significa che se cambiamo l'input in un certo modo, l'output cambierà allo stesso modo.

- **Layer di pooling:** anche i livelli di pooling sono costituiti da dei filtri, con lo scopo di riassumere dimensionalmente le informazioni provenienti dai layer convoluzionali. Esistono diverse modalità con cui può essere effettuata questa operazione di campionamento, come L2-neighborhood, media pesata e max pooling. Quest'ultimo, il più popolare, considera il massimo valore incontrato in un settore.

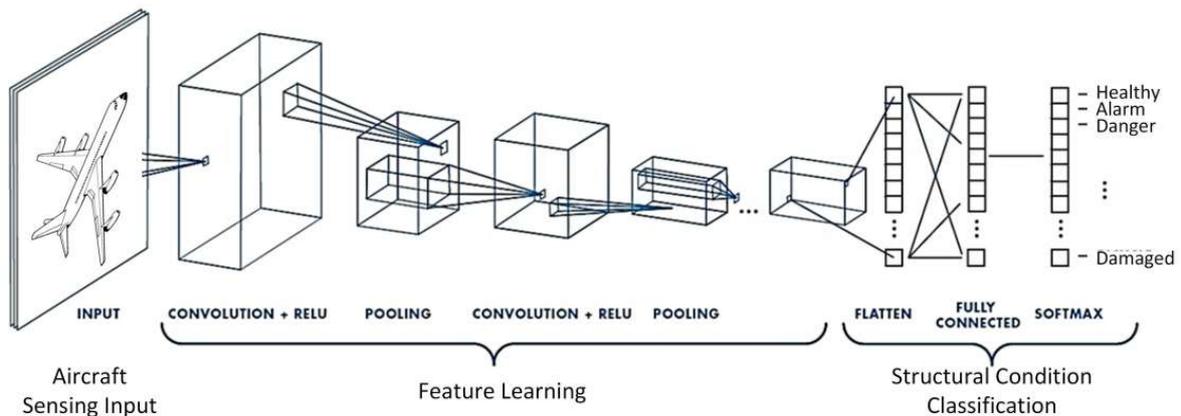


Figura 23 - Esempio di rete neurale convolutive per un problema di classificazione (Tabian et al 2019)

- **Layer connesso:** I layer connessi sono costituiti da uno o più livelli di reti neurali feed-forward. Sono spesso chiamati anche fully-connected perché ogni neurone di un livello è connesso con ciascuno dei neuroni dei livelli precedenti e successivi.

9.3.5 ADDESTRAMENTO E OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO SURROGATO.

Di seguito i risultati ottenuti dall'addestramento e ottimizzazione dello specifico modello surrogato.

Decomposizione in componenti principali

Come precedentemente descritto le immagini relative ai campi di precipitazione, profondità e velocità del flusso sono state processate utilizzando una proiezione in componenti principali. L'algoritmo utilizzato è la PCA incrementale, implementata in *sklearn* (<https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.decomposition.IncrementalPCA.html>). Il numero di componenti principali è stato fissato a 32, in modo tale da spiegare cumulativamente più del 95% della varianza. Come evidente dalla Figura 2423, il numero scelto è più che sufficiente per preservare il contenuto di informazioni del database di partenza. Di seguito la Tabella 9 riporta una sintesi delle caratteristiche degli eventi utilizzati per l'addestramento del modello surrogato – durata ore evento e massima portata determinata per il Fiume Crati.

Data	Durata ore	Max Portata m ³ /s
-13/11/1993	120	60.5
- 8/4/1994	192	128.3
- 25/2/1995	72	51.8
- 26/4/1995	216	244.4
- 2/1/1996	192	214.2
- 28/3/1996	120	110.5
- 11/5/1996	72	22.2
- 26/9/1996	144	160
- 3/10/1996	192	767.1
- 18/11/1996	144	32.8
- 25/12/1996	144	193.2
- 14/10/1997	144	36.2
- 13/11/1997	168	106.5
- 20/11/1997	144	89.1
- 3/12/1997	144	68.6
- 20/1/1998	168	232.6
- 1/2/1998	144	398.3
- 5/5/1998	144	966.8
- 8/2/1999	48	1358.2
- 9/9/2000	192	804.1
- 28/12/2004	240	717.4
- 19/12/2008	312	812.1
- 21/06/2009	192	347.8
- 24/1/2013	504	1516.4
-26/5/2015	144	132.5
- 15/8/2015	72	121.2
- 28/11/2018	192	153.9
- 12/11/2019	25	86.7
- 19/07/2021	72	103.4

Tabella 10- descrizione eventi

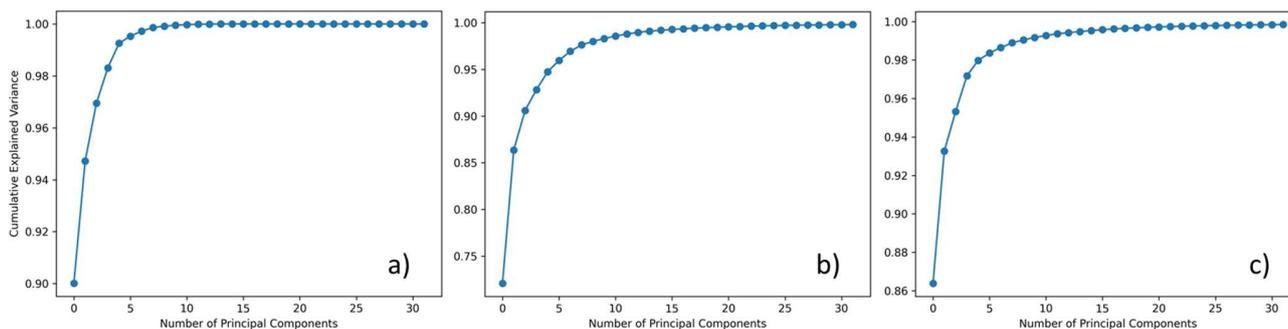


Figura 24 - Varianza cumulata spiegata in funzione del numero di componenti principali per a) precipitazione, b) allagamento e c) velocità.

nelle Figura 25-26-27 sono riportate le prime 8 autoimmagini di ciascuno dei campi processati, ordinate in modo tale che la prima componente sia quella con maggiore varianza spiegata. Le prime autoimmagini di velocità e allagamento mostrano componenti non nulle solo nell'area del fiume Crati. Le altre autoimmagini di allagamento fanno riferimento a porzioni diverse

dell'area di allagamento, testimoniando la bontà del processo di decomposizione così generato. Le altre autoimmagini di velocità fanno invece riferimento sempre ad aree interessate dai fiumi.

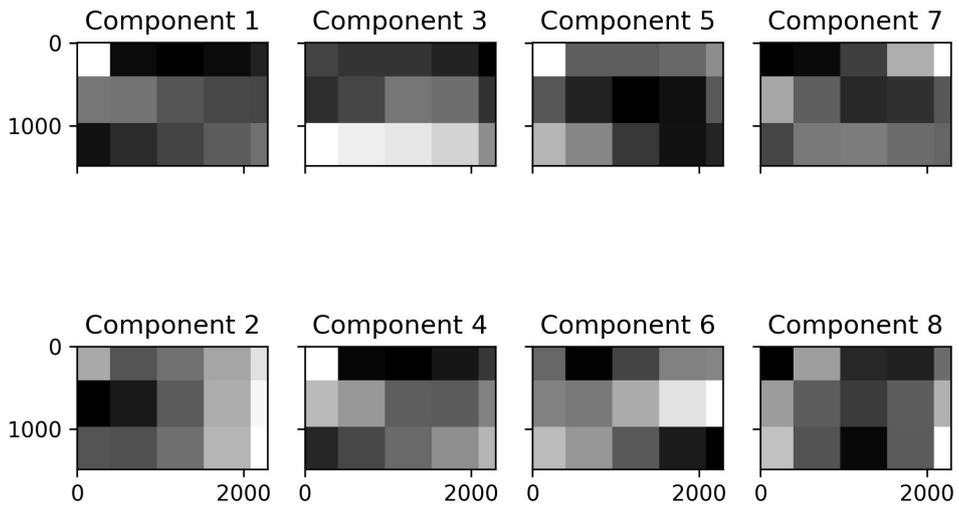


Figura 25 - Prime 8 autoimmagini del campo di precipitazione, ordinate secondo varianza spiegata.

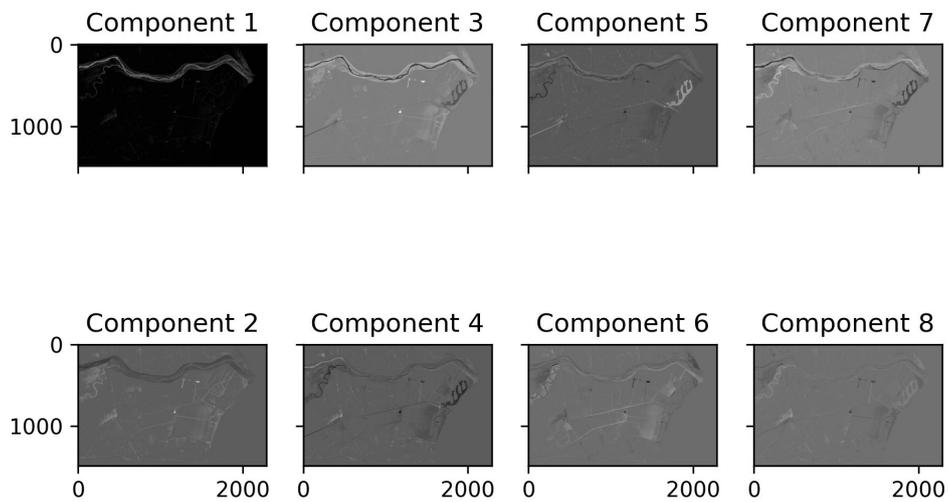


Figura 26 - Prime 8 autoimmagini del campo di allagamento, ordinate secondo varianza spiegata.

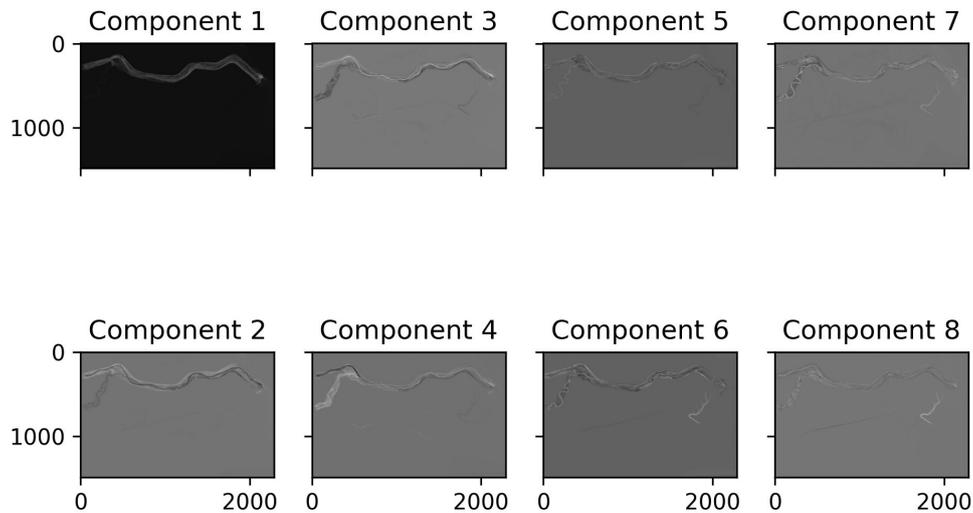


Figura 27 - Prime 8 autoimmagini del campo di velocità, ordinate secondo varianza spiegata.

9.3.6 OTTIMIZZAZIONE E ADDESTRAMENTO DEGLI ALGORITMI

Gli algoritmi di intelligenza artificiale sono stati ottimizzati utilizzando un algoritmo di grid-search. Nella fase di addestramento il 20% dei dati iniziali è stato utilizzato come dato di addestramento, con l'80% utilizzato come dati di addestramento vero e proprio. L'addestramento è stato condotto utilizzando un batch-training, con ciascun batch pari a circa il 20% dei dati iniziali. La convergenza della fase di addestramento è stata ottenuta tramite l'utilizzo di un sistema di early stopping fissato a 30 epoche. L'addestramento è stato condotto utilizzando l'implementazione di KerasGPU (<https://www.tensorflow.org/guide/gpu?hl=it>), su una workstation equipaggiata con una GPU Nvidia A5000. Il tempo di addestramento è dipendente dalla morfologia della rete, con ciascun addestramento richiedente in media 0.5h. Gli algoritmi sono stati ottimizzati per ottenere l'errore minore. I parametri di ottimizzazione scelti sono stati:

- Numero di livelli, dimensione dei filtri dei layer convoluzionali
- Numero di layer e numero di neuroni dei livelli fully connected, funzioni di attivazione
- Funzione di costo target per l'addestramento

Sono stati addestrati due modelli differenti, differenziati in base se in output ci siano le profondità o le velocità. I due algoritmi già ottimizzati sono riportati in figura 28 e Figura 29.

Model: "h_cnn"

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
input_1 (InputLayer)	[(None, 32, 1)]	0	[]
conv1d (Conv1D)	(None, 31, 32)	96	['input_1[0][0]']
max_pooling1d (MaxPooling1D)	(None, 15, 32)	0	['conv1d[0][0]']
flatten (Flatten)	(None, 480)	0	['max_pooling1d[0][0]']
input_2 (InputLayer)	[(None, 2)]	0	[]
dense (Dense)	(None, 128)	61568	['flatten[0][0]']
dense_1 (Dense)	(None, 1)	3	['input_2[0][0]']
concatenate (Concatenate)	(None, 129)	0	['dense[0][0]', 'dense_1[0][0]']
dense_2 (Dense)	(None, 128)	16640	['concatenate[0][0]']
dense_3 (Dense)	(None, 128)	16512	['dense_2[0][0]']
dense_4 (Dense)	(None, 32)	4128	['dense_3[0][0]']
=====			
Total params: 98,947			
Trainable params: 98,947			
Non-trainable params: 0			

Figura 28 - Descrizione della forma della rete utilizzata per l'addestramento – allagamento h.

Model: "u_cnn"

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
input_1 (InputLayer)	[(None, 32, 1)]	0	[]
conv1d (Conv1D)	(None, 31, 64)	192	['input_1[0][0]']
max_pooling1d (MaxPooling1D)	(None, 15, 64)	0	['conv1d[0][0]']
flatten (Flatten)	(None, 960)	0	['max_pooling1d[0][0]']
input_2 (InputLayer)	[(None, 2)]	0	[]
dense (Dense)	(None, 128)	123008	['flatten[0][0]']
dense_1 (Dense)	(None, 2)	6	['input_2[0][0]']
concatenate (Concatenate)	(None, 130)	0	['dense[0][0]', 'dense_1[0][0]']
dense_2 (Dense)	(None, 128)	16768	['concatenate[0][0]']
dense_3 (Dense)	(None, 128)	16512	['dense_2[0][0]']
dense_4 (Dense)	(None, 32)	4128	['dense_3[0][0]']

=====
Total params: 160,614
Trainable params: 160,614
Non-trainable params: 0
=====

Figura 29 - Descrizione della forma della rete utilizzata per l'addestramento - velocità u.

Le due strutture sono simili e si differenziano solo per la profondità del lato convoluzionale della rete. Entrambe hanno una struttura two-step. Infatti, sono i campi di pioggia – ricordiamo nella loro versione latente risultante dalla PCA – vengono processati dalla parte convolutiva. I livelli del fiume Crati e Coscile vengono prima processati tramite un singolo layer fully-connected e poi concatenati all'output del layer convolutivo. In uscita troviamo invece la struttura fully-connected con 2 layer nascosti. Tutti i layer feed-forward sono attivati con una funzione tangente iperbolica, ad eccezione dell'ultimo livello che è attivato linearmente. Sia in ingresso che in uscita dai modelli troviamo un campo a 32 dimensioni, che è risultante dalla decomposizione tramite PCA dei campi di pioggia, allagamento e velocità.

Le curve di addestramento in cui sono riportati gli errori del modello in funzione del numero di epoche sono visualizzate in Figura 30. L'algoritmo che predice i campi di allagamento è stato

addestrato utilizzando come metrica di errore lo scarto quadratico medio (MSE), in particolare lo scarto quadratico medio indica la discrepanza quadratica media tra i valori osservati e quelli stimati, mentre per le velocità si è ricorso a un errore assoluto medio (MAE), dove l'errore assoluto medio rappresenta la minima distanza tra il valore predetto e quello effettivo. Come è possibile osservare, gli algoritmi raggiungono un addestramento soddisfacente dopo circa 1000 epoche, con l'addestramento che si è protratto fino a 1200 e 1400 epoche rispettivamente per h e u.

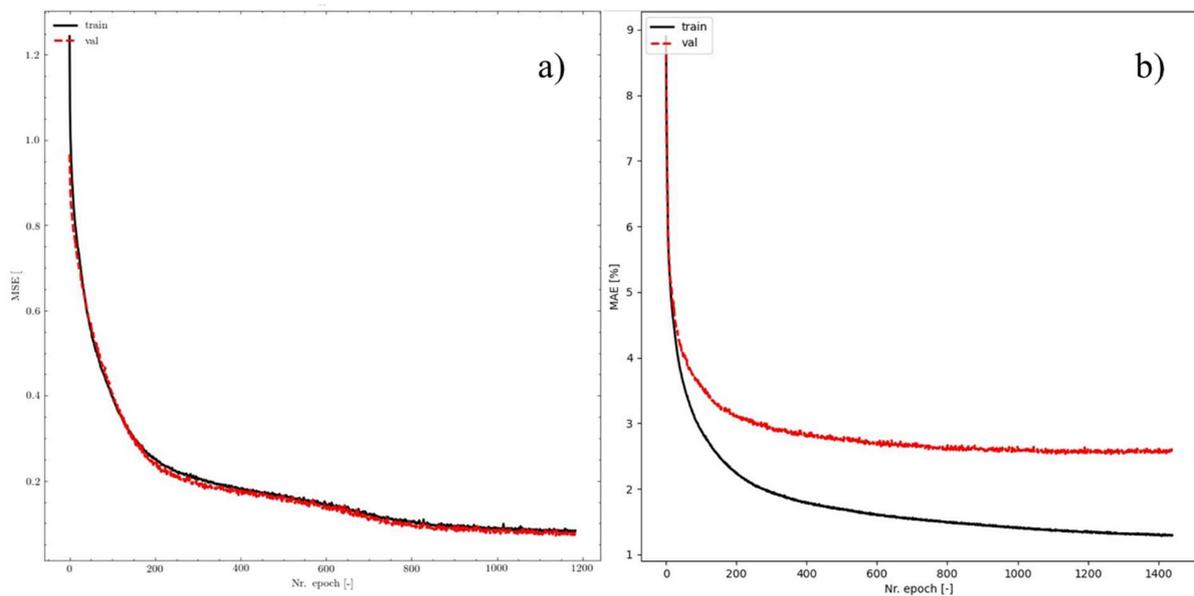


Figura 30 - Curve di apprendimento, a) MSE vs Nr. di epoche, allagamento h, b) MAE vs Nr. di epoche, velocità u per database di addestramento (linea nera continua) e validazione (rossa tratteggiata).

9.4.IL MODELLO DI PREVISIONE COSMO-IT

La previsione numerica del tempo (*Numerical Weather Prediction - NWP*) è un settore della meteorologia altamente specializzato e in continua evoluzione. La variazione del tempo meteorologico, cioè di grandezze come la temperatura, il vento, l'umidità, ecc., è descritta da un sistema di equazioni, detto “modello matematico”, che rappresentano i processi dinamico-fisici che agiscono in atmosfera. Tali equazioni non hanno una soluzione esatta e sono risolte con metodi approssimati che considerano l'atmosfera suddivisa in un certo numero di volumi di dimensione finita, la cui dimensione caratterizza la risoluzione spaziale di un modello numerico.

I centri di previsione operativa, come il Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aerospaziale (CNMCA), sono in grado di produrre informazioni con dettaglio dell'ordine di pochi chilometri, utilizzando modelli numerici di previsione così complessi da richiedere l'uso di super-calcolatori. Il sistema di calcolo ad alta prestazione utilizzato dal Servizio Meteo dell'AM è concepito con architettura ibrida CPU-GPGPU, basata su tecnologia *Intel Broadwell* e *NVIDIA Kepler*. Il super-calcolatore è entrato ufficialmente in produzione nella seconda metà del 2016 ed è tuttora in fase di sviluppo e ammodernamento tecnologico. Le prestazioni di picco sono nell'ordine delle centinaia di TeraFlop.

Il processo di produzione della previsione numerica può essere comunemente suddiviso in quattro fasi:

- La raccolta delle osservazioni
- La determinazione dello stato iniziale tramite l'assimilazione dati
- La previsione col modello numerico e la post-elaborazione
- La verifica delle previsioni

9.4.1. LA RACCOLTA DELLE OSSERVAZIONI

La raccolta delle osservazioni meteorologiche avviene nel quadro di cooperazione stabilito dal Programma World Weather Watch (WWW) dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM/WMO). Le osservazioni, sul territorio nazionale, così come nel resto del mondo, sono effettuate nell'ambito del World Weather Watch rispettando i dettami del Global Observing System (GOS), il cui scopo è quello di regolamentare e garantire le osservazioni dello stato dell'atmosfera e della superficie oceanica, al fine di consentire analisi, previsioni e avvisi per il monitoraggio del clima e dell'impatto ambientale. Tutte le osservazioni sono scambiate, a livello mondiale, per mezzo del Global Telecommunication System (GTS), a sua volta elemento del World-Weather-Watch.

Ogni Nazione è tenuta a raccogliere i propri dati di osservazione meteorologica per la trasmissione sulle reti di telecomunicazione del GTS. Il CNMCA di Pratica di Mare, in qualità di Regional Telecommunication Hub per la regione VI - Europa, oltre a raccogliere i dati del territorio nazionale riceve i dati di Malta, Grecia, Turchia e Libano per la successiva ritrasmissione ed accentra, inoltre, tutti i dati dell'area europea.

Il WMO Information System (WIS) rappresenta l'evoluzione del sistema GTS per il programma WWW. In tale ambito il CNMCA, con il supporto del RESIA-GSIM, svolge la funzione duplice di Data Collection and Production Centre (DCPC), rispettivamente in qualità di RTH e di Regional Specialized Meteorological Centre per la Meteorologia Marina e l'oceanografia sul Mediterraneo (REC-MMO-MED).

Inoltre il CNMCA è dotato di sistemi per la ricezione e il processamento dei dati tele-rilevati dai satelliti meteorologici, sia mediante ricezione diretta in banda L e X, sia attraverso la rete EUMETCAST gestita dall'agenzia europea EUMETSAT. È importante sottolineare che il CNMCA, in virtù di recenti accordi bilaterali dell'AM con altre Pubbliche Amministrazioni e Enti Privati, riceve anche altre osservazioni ad alta densità sul territorio nazionale (ISPRA, DPC, ecc.), esterne al circuito GTS.

I messaggi di osservazione ricevuti sono acquisiti, decodificati e trasformati nel formato standard BUFR (Binary Universal Form for the Representation of meteorological data), accreditato come “standard” dall’organizzazione meteorologia mondiale WMO, dal software SAPP (Scalable Acquisition and Pre-Processing) sviluppato dal Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF). Il sistema SAPP è impiegato in AM per pre-processare in modo ottimale e continuo le osservazioni necessarie alla produzione dei campi di analisi, per le verifiche delle previsioni numeriche, per le esigenze operative legate all’attività di nowcasting, per effettuare il monitoraggio della qualità dei dati osservativi ricevuti, nonché per standardizzare il formato delle varie osservazioni locali disponibili a livello nazionale e non presenti sul circuito internazionale GTS.

9.4.2. LA DETERMINAZIONE DELLO STATO INIZIALE TRAMITE L'ASSIMILAZIONE DATI

Il settore dell'assimilazione dei dati (*Data Assimilation*) si occupa di trovare il migliore stato iniziale possibile dell'atmosfera, considerate tutte le osservazioni raccolte a disposizione in una certa finestra temporale. Tali dati, irregolarmente distribuiti nello spazio e nel tempo, sono analizzati con l’impiego di algoritmi statistico-numeric, al fine di ottenere la migliore stima dello stato dell’atmosfera (analisi), rappresentato su di un grigliato tridimensionale regolare ad un istante di tempo definito. L’uso delle osservazioni per l’inizializzazione di un modello numerico è una peculiarità dei centri meteorologici operativi. Il Servizio Meteo dell'AM vanta un’esperienza più che decennale in questo campo; ciò gli ha consentito di mantenere un ruolo di primo piano anche a livello mondiale. Il Servizio Meteo dell’AM, infatti, ha utilizzato per anni la tecnica variazionale 3DVAR e utilizza attualmente un sistema di assimilazione dati basato sulla tecnica del filtro di Kalman stocastico (*Ensemble Kalman Filter - EnKF*), che è il risultato dei più recenti e avanzati studi nel settore. La particolare versione di EnKF usata al CNMCA (Bonavita, Torrisi e Marcucci, 2008, 2010) è nota come *Local Ensemble Transform Kalman*

Filter (LETKF) ed è operativa dal 1° giugno 2011. L'analisi LETKF viene utilizzata operativamente per inizializzare il modello COSMO-ME per la previsione deterministica e il sistema COSMO-MEPS per le previsioni probabilistiche. Il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare è stato il primo, nel panorama mondiale, ad utilizzare operativamente uno schema di assimilazione dati di tipo *ensemble* (non ibrido) per inizializzare un sistema di previsione deterministico a scala regionale. Lo schema LETKF è utilizzato operativamente, dal novembre 2018, anche per la determinazione delle condizioni iniziali in una configurazione ad altissima risoluzione (scala locale) che copre il territorio italiano.

L'analisi LETKF è calcolata operativamente nelle seguenti configurazioni operative:

- Ogni 3 ore sul dominio Euro-Mediterraneo, utilizzando 40 membri (*ensemble* di previsioni a breve termine), del modello COSMO con una risoluzione orizzontale di 0.0625° (~7 km) e 49 livelli verticali, e un membro deterministico utilizzato per inizializzare la corsa deterministica COSMO-ME e il sistema COSMO-ME EPS;
- Ogni ora sul dominio italiano, utilizzando 40 membri (*ensemble* di previsioni a breve termine), del modello COSMO con una risoluzione orizzontale di 0.02° (~2.2 km) e 65 livelli verticali, e un membro deterministico utilizzato per inizializzare la corsa deterministica COSMO-IT e il sistema COSMO-IT EPS.

Il SAPP fornisce, ai sistemi di assimilazione operativa, osservazioni:

- di superficie: SYNOP (anche non-GTS), SHIP, BUOY;
- da Wind PROFILER/PILOT/RADAR;
- da radiosondaggio (anche nella fase di discesa delle sonde);
- da aeroplano (AIREP, AMDAR, MODE-S);

- derivate da satellite (Atmospheric Motion Vectors da Meteosat, venti da scatterometro da Metop);
- di radianza da satellite (sensori AMSUA/MHS su NOAA/Metop, ATMS su NPP/NOAA).

Nuove osservazioni (informazioni da stazioni GPS, profili di temperatura da IASI di NOAA/Metop, osservazioni di “soil moisture” derivate da satellite e da osservazioni ad alta risoluzione provenienti da reti osservative di enti non AM) sono attualmente fornite al sistema di monitoraggio della “qualità” dei dati osservativi, in vista di un loro uso operativo nel prossimo futuro. In tale sistema le osservazioni ricevute sono confrontate con la corrispondente previsione a breve termine del sistema di assimilazione operativo, in modo da ottenere informazioni statistiche sulla loro qualità e disponibilità.

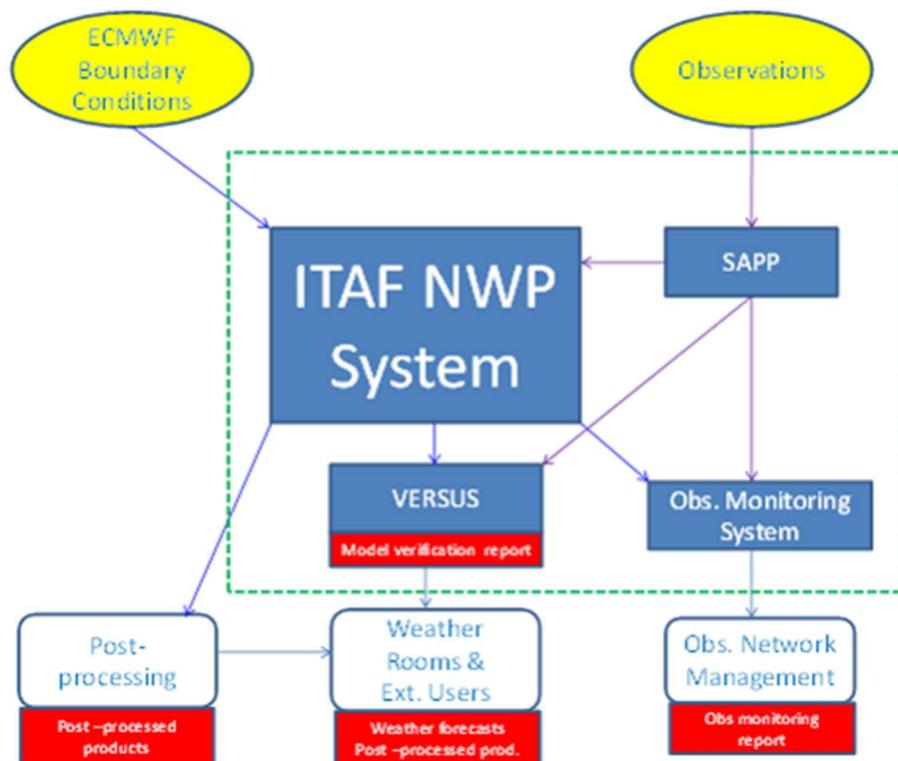


Figura 31-Descrizione schematica dei flussi di informazione associati al sistema di previsioni numeriche del servizio Meteorologico dell'AM.

9.4.3. LA PREVISIONE CON IL MODELLO NUMERICO E LA POST-ELABORAZIONE

La previsione numerica è ottenuta utilizzando le equazioni di un modello fisico-matematico della circolazione atmosferica nota la conoscenza dello stato iniziale dell'atmosfera e delle eventuali condizioni al contorno, qualora si tratti di un modello ad area limitata, ossia non su dominio globale. Una stima accurata delle condizioni iniziali e un buon modello numerico sono gli elementi fondamentali di un accurato sistema di previsione numerica. Gli algoritmi di post-elaborazione sono applicati ai campi di previsione del modello numerico per ottenere informazioni aggiuntive e fornire dati di facile interpretazione.

Negli ultimi anni i modelli atmosferici ad alta risoluzione hanno raggiunto un livello di affidabilità sempre più elevato divenendo strumenti di largo impiego nelle attività di previsione a brevissimo e breve termine dei centri meteorologici operativi. In questo ambito il CNMCA utilizza operativamente il modello non-idrostatico sviluppato nell'ambito del consorzio COSMO (Consortium for Small-Scale Modelling) istituito tra i Servizi Meteorologici Nazionali di Germania, Svizzera, Italia, Grecia, Polonia, Romania, Russia e Israele.

Il modello COSMO è utilizzato in modalità "deterministica" in due configurazioni:

- COSMO-ME, integrato fino a 72 ore su una griglia con passo di 5 km e 45 livelli verticali; esso copre l'Europa centro-meridionale ed il bacino del Mediterraneo con quattro corse al giorno (00, 06, 12, 18 UTC) e utilizza come stato iniziale i campi d'analisi prodotti dal sistema di assimilazione di tipo probabilistico del CNMCA e, come condizioni al contorno, i campi del modello ECMWF-HRES;
- COSMO-IT, in grado di risolvere la convezione intensa e che viene quindi utilizzato per la previsione a brevissimo termine. Nello specifico COSMO-IT è integrato quattro volte al giorno (00, 06, 12, 18 UTC) fino a 30 (06,18UTC) o 48 (00,12UTC) ore, su una griglia che copre l'Italia con passo di 2.2 km e 65 livelli verticali, e, con condizioni al contorno,

del modello ECMWF-HRES. COSMO-IT, è inizializzato con l'analisi deterministica prodotta dalla configurazione ad altissima risoluzione del sistema di assimilazione di tipo ensemble (LETKF) che è calcolata ogni ora utilizzando 40 membri e la stessa tipologia di osservazioni usata nel sistema di assimilazione di COSMO-ME.

È stato recentemente implementato sullo scenario italiano il modello ICON, il nuovo modello non idrostatico a griglia icosaedrica adottato dal consorzio COSMO a partire dal 2020. Attualmente il modello è usato nella configurazione ICON-IT, in grado di risolvere la convezione intensa. Nello specifico ICON-IT è integrato due volte al giorno (00 e 12 UTC) fino a 48 ore su una griglia che copre l'Italia (passo di 2.2 km e 65 livelli verticali). ICON-IT utilizza le condizioni al contorno del modello ECMWF-HRES ed è inizializzato con l'analisi deterministica prodotta dalla configurazione ad altissima risoluzione del sistema di assimilazione di tipo ensemble (LETKF) che è calcolata ogni ora utilizzando 40 membri e la stessa tipologia di osservazioni usata nel sistema di assimilazione di COSMO-IT.

Il CNMCA è dotato di un sistema di previsioni probabilistiche che consente anche di determinare l'incertezza associata alla previsione deterministica. In modalità probabilistica (*Ensemble Prediction System - EPS*) il modello COSMO è usato nella configurazione:

- COSMO-ME EPS, costituito da 20+1 membri integrati su una griglia con passo di 7 km e 45 livelli verticali, che copre l'Europa centro-meridionale ed il bacino del Mediterraneo, con due corse al giorno (00 e 12 UTC), per previsioni fino a 72 ore. COSMO-ME EPS usa una selezione delle condizioni iniziali prodotte dal sistema LETKF e condizioni al contorno dall'EPS di ECMWF.
- COSMO-IT EPS, costituito da 20 membri integrati su una griglia con passo di 2.2 km e 65 livelli verticali, che copre l'Italia, con due corse al giorno (00 e 12 UTC), per previsioni fino a 48 ore. COSMO-IT EPS usa una selezione delle condizioni iniziali prodotte dal sistema LETKF ad altissima risoluzione e condizioni al contorno da ECMWF-EPS.

Recentemente il CNMCA è stato nominato *Regional Specialized Meteorological Centre (RSMC)* nei settori *Local Area Deterministic - Numerical Weather Prediction* e *Local Area Ensemble - Numerical Weather Prediction* nell'ambito del programma *Global Data Processing and Forecasts System (GDPFS)* del WMO. Un sottoinsieme dei prodotti numerici COSMO-ME e COSMO-ME EPS a risoluzione degradata è pertanto reso disponibile quotidianamente in aderenza al requisito primario del GDPFS di favorire lo scambio di dati e prodotti meteorologici tra gli Stati Membri.

Il CNMCA collabora con ARPA-ER e ARPA-Piemonte, nell'ambito dell'accordo LAMI, per lo sviluppo del modello COSMO ed il suo utilizzo operativo per le previsioni sul territorio nazionale ai fini di protezione civile. In collaborazione con ISMAR-CNR è stato sviluppato un sistema di previsione dello stato del mare (NETTUNO) basato sul modello COSMO e sul modello delle onde (WAM). Il sistema NETTUNO esiste in diverse configurazioni: deterministica (configurazione a risoluzione 3' sul mar Mediterraneo e 1' sui mari intorno l'Italia) e probabilistica (NETTUNO-ME EPS). Le uscite dei modelli numerici sono rielaborate in modo da ottenere delle informazioni aggiuntive e fornire dati di facile interpretazione all'utente.

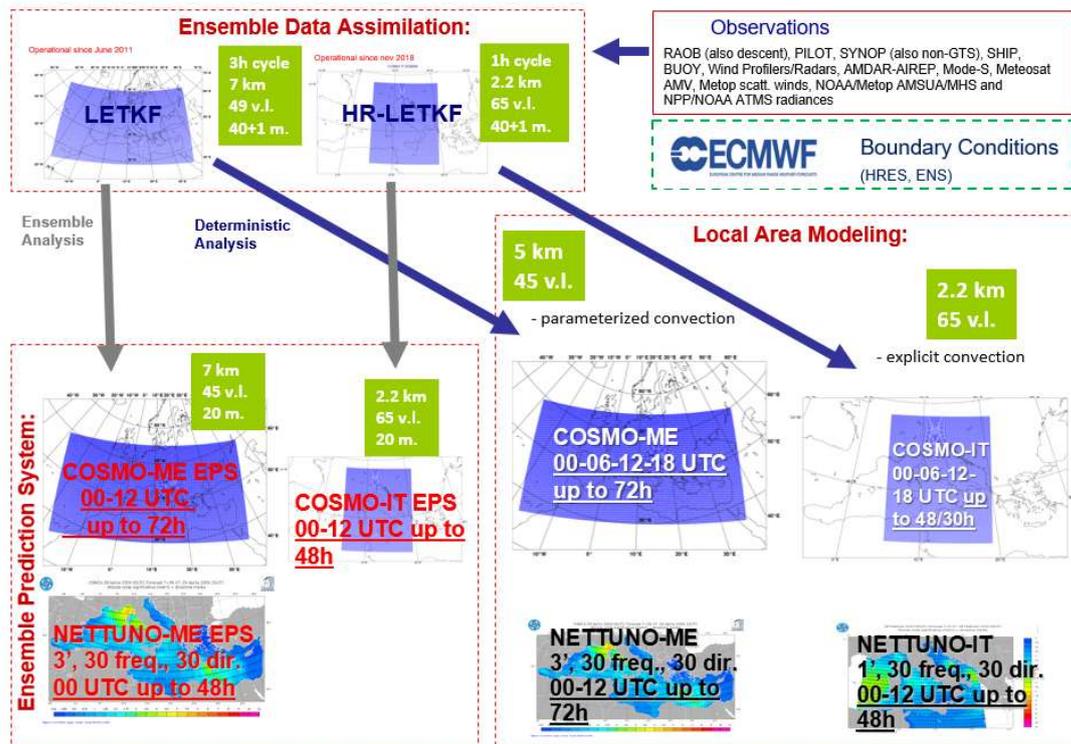


Figura 32-schema del sistema di previsioni numeriche operativo del Servizio Meteorologico dell'AM

9.4.4. LA VERIFICA DELLE PREVISIONI

Nell'ultima fase del processo NWP le previsioni di un modello numerico valide a un certo istante sono confrontate con le corrispondenti osservazioni o analisi per la determinazione oggettiva di alcune grandezze statistiche (errore medio, scarto quadratico medio, ecc.). I valori di tali grandezze, calcolati in un periodo di tempo sufficientemente lungo dal punto di vista statistico, forniscono informazioni sulla bontà della previsione numerica. Il Servizio Meteo dell'AM ha sviluppato nell'ambito del consorzio COSMO il sistema Versus, che costituisce uno strumento flessibile e configurabile per la verifica delle previsioni numeriche. Tale sistema permette di effettuare verifiche statistiche su tutti i modelli operativi presso il COMET e sul modello globale di riferimento ECMWF- HRES. Report mensili e trimestrali per opportuni parametri al suolo ed in quota vengono redatti e resi pubblici sul sito del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, come pure report specifici ad uso interno e per gli scopi scientifici del consorzio COSMO. Tutti i riferimenti riguardanti il modello

atmosferico COSMO-IT sono stati ricavati dal sito ufficiale (<https://www.meteoam.it/it/modellistica-numerica-servizio-meteorologico-aeronautica>), vista la complessità e l'alta specializzazione dei contenuti presenti in questo capitolo, gli aspetti sopra descritti sono stati riportate in calce e fanno riferimento alle informazioni UFFICIALI fornite dall'Aeronautica Militare Italiana.

9.5.IL MODELLO DI ROTTURA ARGINALE

Storicamente, le dighe e gli argini hanno spesso subito cedimenti a causa di vari eventi. Tuttavia, la maggior parte dei cedimenti nelle dighe di terra è stata causata principalmente da livelli di piena. Esistono diversi meccanismi che possono provocare cedimenti, tra cui:

- Eventi di alluvione
- Infiltrazioni/sifonamento (interni e sotto la diga)
- Frane
- Terremoti
- Fallimenti delle fondamenta
- Guasti/malfunzionamenti delle apparecchiature (cancelli, ecc.)
- Cedimenti strutturali
- Crollo a monte della diga
- Svaso rapido
- Sabotaggio
- Rimozione pianificata

Nel caso specifico del Fiume Crati, è stato sviluppato un modello di rottura dell'argine focalizzato sul fenomeno di sifonamento. Questa scelta è motivata dalla morfologia particolare del Fiume Crati e della Pianura di Sibari, nonché da eventi passati, come le inondazioni del 2013 e 2018, che hanno colpito il sito archeologico di Sibari a causa dell'esondazione del Fiume Crati e altri eventi legati alle rotture arginali del fiume in diverse aree della Pianura di Sibari.

Il tratto finale del Fiume Crati presenta una configurazione pensile, con il fondo del fiume a quote più elevate rispetto al terreno circostante. Questa conformazione, in presenza di elevati livelli d'acqua, può causare collassi arginali legati al sifonamento. Durante il sifonamento, l'acqua erode internamente la struttura (diga o argine) con sufficiente velocità, provocando il trasporto del materiale fuori dalla struttura, indebolendola e portando infine al collasso.

Il processo di filtrazione è rappresentato come un flusso all'interno di un tubo in pressione con uscita da un orifizio. L'erosione interessa la parte esterna della struttura, e man mano che il foro si allarga, il materiale si stacca e cade nell'acqua in movimento. Se il foro diventa sufficientemente grande, il materiale sovrastante potrebbe sprofondare, aumentando il flusso attraverso la breccia e accelerando il processo di rottura.

A questo punto, l'idraulica del flusso cambia da pressione/orifizio a sbarramento a cielo aperto. L'erosione della testa prosegue verso il basso, e in base al volume d'acqua dietro la struttura, la breccia può continuare ad allargarsi fino a raggiungere il letto naturale del canale, entrando in una fase di allargamento.

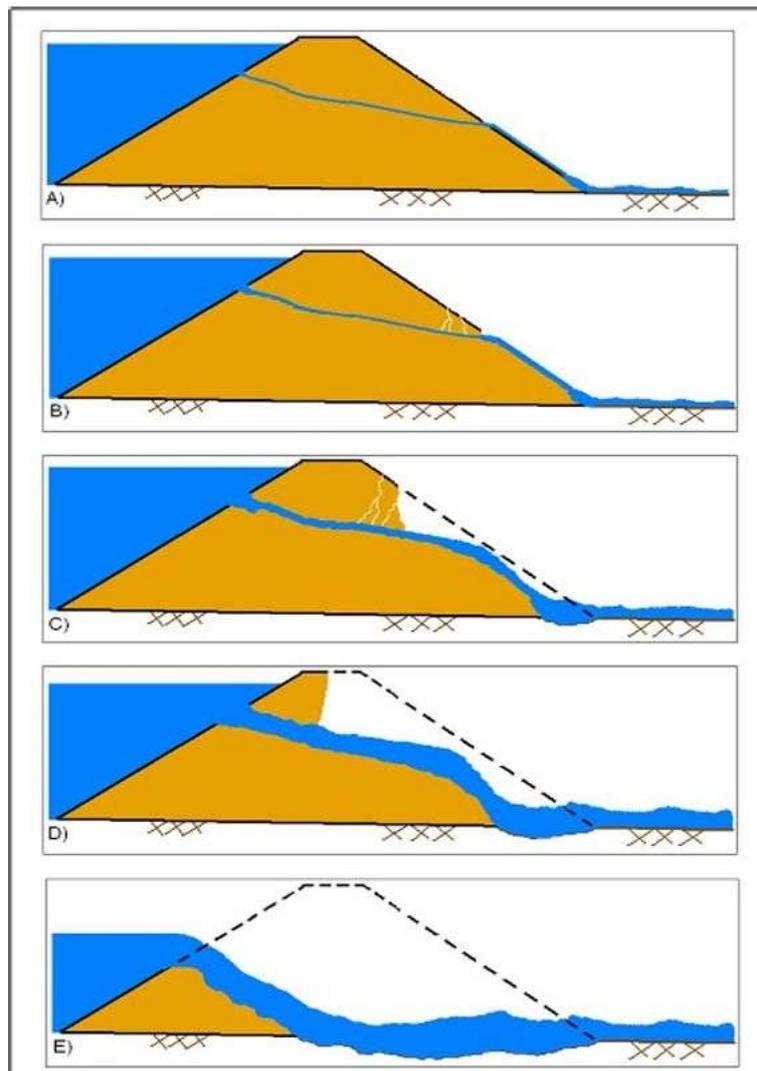


Figura 33-schema rottura argine per sifonamento(Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2002)

Una volta descritte le modalità di collasso di una struttura di ritenzione per effetto di fenomeni di sifonamento, si è passati ad implementare un modello di probabilità di rottura. Il modello utilizzato segue quanto proposto da (D'Oria et al 2019), il modello si compone di tre moduli principali.

Il primo modulo consiste in un modello probabilistico di rottura degli argini che ha l'obiettivo di descrivere l'affidabilità di un sistema discretizzato di argini, preselezionando le potenziali sezioni suscettibili di rottura e identificando potenziali scenari di rottura. Un modello idrodinamico combinato 1D-2D viene utilizzato per simulare simultaneamente il percorso della

piena fluviale tra gli argini principali attraverso un modello 1D e, in caso di rottura di un argine, la successiva inondazione dell'area soggetta a inondazione attraverso un modello 2D. Infine, i risultati delle simulazioni numeriche vengono elaborati nel terzo modulo attraverso un modello di analisi di probabilità spaziale per calcolare mappe probabilistiche di inondazione e di pericolosità.

I presupposti principali del metodo sono

1. L'analisi viene eseguita per un evento di piena di progetto con un determinato periodo di ritorno.
2. Tra i vari meccanismi di rottura degli argini si considerano solo fenomeni di sifonamento.
3. I dati topografici, la distribuzione spaziale del coefficiente di scabrezza, sia nel canale fluviale che nell'area soggetta a inondazione e le condizioni al contorno del fiume a monte e a valle sono trattati in maniera deterministiche, cioè come input del modello privi di incertezza. Solo la porosità degli argini è considerata una variabile stocastica nel ricavare le funzioni di fragilità per effetto di sifonamento.
4. Le caratteristiche geometriche delle brecce (lunghezza e forma) sono trattate in modo deterministico e sono fissate a priori.
5. Il cedimento dell'argine può avvenire solo durante la fase ascendente dell'onda di piena, quando il carico idraulico aumenta con il tempo. Inoltre, si ipotizza che il carico sia applicato separatamente sulle successive sezioni di argine prestabilite, in modo sequenziale da monte a valle in base alla propagazione della piena nel fiume.
della piena nel fiume.
6. Gli scenari di rottura multipli sono ignorati, cioè si esclude che l'argine possa rompersi in diversi punti durante lo stesso evento di piena.

La funzione di fragilità è uno strumento matematico utilizzato nella valutazione del rischio al fine di fornire una descrizione della capacità di resistenza di una struttura di protezione soggetta a un carico esterno USACE (1998). Questo concetto viene applicato anche agli argini di terra in nell'analisi del pericolo di alluvione, considerando diversi meccanismi di cedimento come evidenziato da (Apel et al., 2006; Camici et al., 2017; Dawson et al., 2005; Hall et al., 2003; Mazzoleni et al., 2015; USACE, 1999; Vorogushyn et al., 2009; Wolff, 1997).

L'affidabilità di un sistema di difesa è descritta da una funzione di stato limite G , questa è definita come la differenza tra la resistenza limite R del sistema di protezione e il carico esterno L come evidenziato da (FLOODsite, 2007; Marijnissen et al., 2019; Mazzoleni et al., 2015; Vorogushyn et al., 2009)

$$G = R - L \quad (15)$$

Ne consegue che il cedimento avviene quando $G < 0$. In presenza di fenomeni di sifonamento l'equazione che descrive l'affidabilità del sistema di difesa può essere scritta come segue:

$$G = j_c - J \quad (16)$$

Dove j_c rappresenta il gradiente critico di prevalenza idraulica che innesca il fenomeno di sifonamento, questo dipende alle proprietà geotecniche dell'argine, e J rappresenta la pendenza della linea di pendenza idraulica del flusso che si infiltra attraverso l'argine. Successivamente j_c come evidenziato da Khilar et al. (1985) può essere scritto come:

$$j_c = C \frac{1-n}{n} \quad (0 \leq n \leq 1) \quad (17)$$

Dove C è una costante positiva adimensionale pari a 0.237 e quindi l'equazione (16) precedente può essere riscritta come:

$$G = C \frac{1-n}{n} - \frac{\eta}{L} \quad (18)$$

in cui η rappresenta il livello dell'acqua nel fiume in riferimento all'altezza della punta dell'argine a terra, e L è la lunghezza orizzontale proiettata di un percorso di infiltrazione idealizzato. L è considerata una funzione decrescente di η (che dipende dalla pendenza interna dell'argine). La pendenza interna dell'argine in modo semplificato si può assumere che approssimi la lunghezza di infiltrazione dell'acqua nel caso di infiltrazione passante nel nucleo dell'argine.

Se la porosità viene trattata come una variabile stocastica nell'equazione (18), la funzione di affidabilità $G(n; \eta)$ diventa anch'essa una variabile stocastica, descrivendo il comportamento della fondazione stocastica, descrivendo in modo probabilistico l'affidabilità del sistema di argini per un dato carico idraulico η .

Secondo la regola di trasformazione delle variabili stocastiche (Henderson & Plashko, 2006), la funzione di densità di probabilità di $G(n)$ diventa una variabile stocastica.

$$f_G = f_{n(G)} \left| \frac{dn}{dG} \right| \quad (19)$$

Dove f_n è la funzione di densità di probabilità della variabile n e $n(G)$ indica l'inverso della funzione definita nell'equazione 18.

$$n(G) = \frac{c}{c + \frac{\eta}{L} + c'} \quad (20)$$

$$\left| \frac{dn}{dG} \right| = \frac{c}{(c + \frac{\eta}{L} + c')^2} \quad (21)$$

Assumendo una semplice funzione di densità di probabilità f_n di n è possibile ricavare un'espressione analitica per f_G dall'equazione (19) utilizzando le equazioni (20) e (21) otteniamo la funzione di probabilità cumulativa $P_G(G)$ che può essere ottenuta per integrazione. Poiché lo stato limite di guasto del sistema di protezione è raggiunto per $G = 0$, P_G è calcolato a $G = 0$ e fornisce la probabilità $P_G(G \leq 0 | \eta)$ di un cedimento dell'argine dovuto al sifonamento in funzione del carico idraulico η che rappresenta la funzione di fragilità $P_f(\eta)$ per il sifonamento in una sezione di argine selezionata.

Nel caso in esame è stata assunta una distribuzione di densità di probabilità triangolare per la porosità n dell'argine, con n che varia da $n_{min} = 0,25$ a $n_{max} = 0,55$. Questo intervallo è tipicamente definito per terreni eterogenei compattati, che tipicamente costituiscono argini e fondazioni in terra.

Il valore di n_0 è impostato a 0,45 in modo che la distribuzione della densità di probabilità di n sia asimmetrica verso i valori più alti dell'intervallo di porosità, tipici dei sedimenti fini. I valori medi e mediani di n sono rispettivamente 0,417 e 0,423 circa.

In accordo con quanto riportato da [14], all'interno del caso studio si è utilizzata una distribuzione di densità di probabilità triangolare per la distribuzione di porosità degli argini in accordo con [20], con n compreso tra n_{min} e n_{max} e definita come segue:

$$f_n(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } n < n_{min} \\ p_0 \frac{n-n_{min}}{n_0-n_{min}} & \text{if } n_{min} \leq n \leq n_0 \\ p_0 \left(1 - \frac{n-n_0}{n_{max}-n_0}\right) & \text{if } n_0 \leq n \leq n_{max} \\ 0 & \text{if } n > n_{max} \end{cases} \quad (22)$$

dove p_0 indica la densità di probabilità corrispondente al valore modale n_0 ($n_{min} < n_0 < n_{max}$) ed è pari a $2(n_{max} - n_{min})^{-1}$ in modo che $\int_{n_{min}}^{n_{max}} f_n(n) dn = 1$, Sostituendo le equazioni (17), (15) e (16) nell'equazione (14) si ottiene

$$f_G(G) = \begin{cases} 0 & \text{if } G < G_{min} \\ p_0 \left[1 - \frac{1}{n_{max}-n_0} \left[\frac{c}{c+\frac{q}{L}+c} - n_0 \right] \right] \frac{c}{(c+\frac{q}{L}+c)^2} & \text{if } G_{min} \leq G \leq G_0 \\ \frac{p_0}{n_0-n_{min}} \left(\frac{c}{c+\frac{q}{L}+c} - n_{min} \right) \frac{c}{(c+\frac{q}{L}+c)^2} & \text{if } G_0 \leq G \leq G_{max} \\ 0 & \text{if } G > G_{max} \end{cases} \quad (23)$$

con $G_{min}=G(n_{max})$, $G_0=G(n_0)$ e $G_{max}=G(n_{min})$. La probabilità cumulativa della variabile stocastica G può essere ottenuta dall'equazione (18) mediante integrazione:

$$P_G(G) = \begin{cases} 0 & \text{if } G < G_{min} \\ p_0 C \left(1 + \frac{n_0}{n_{max} - n_0}\right) \left(\frac{1}{G_{min} + \frac{\eta}{L} + C} - \frac{1}{G_{\square} + \frac{\eta}{L} + C}\right) - \frac{p_0 C^2}{2(n_{max} - n_0)} \left[\frac{1}{[G_{min} + \frac{\eta}{L} + C]^2} - \frac{1}{[\frac{\eta}{L} + C]^2}\right] & \text{if } G_{min} \leq G \leq G_0 \\ \vdots & \\ P_{G_0} + p_0 C \left(\frac{n_{min}}{n_0 - n_{min}}\right) \left(\frac{1}{G_{\square} + \frac{\eta}{L} + C} - \frac{1}{G_0 + \frac{\eta}{L} + C}\right) - \frac{p_0 C^2}{2(n_0 - n_{min})} \left[\frac{1}{[G_{\square} + \frac{\eta}{L} + C]^2} - \frac{1}{[G_0 + \frac{\eta}{L} + C]^2}\right] & \text{if } G_0 \leq n \leq G_{max} \\ \vdots & \\ 1 & \text{if } G > G_{max} \end{cases} \quad (24)$$

dove PG0 indica la probabilità cumulativa in corrispondenza di G=G0. Si può facilmente verificare che PG è uguale a uno per G=Gmax. La PG calcolata a G=0 secondo l'equazione (18) fornisce la probabilità PG(G≤0|η) di cedimento dell'argine in funzione del carico idraulico η, che rappresenta la funzione di fragilità Pf(η) in una sezione selezionata.

$$P_G(G) = \begin{cases} 0 & \text{if } G < G_{min} \\ p_0 C \left(1 + \frac{n_0}{n_{max} - n_0}\right) \left(\frac{1}{G_{min} + \frac{\eta}{L} + C} - \frac{1}{\frac{\eta}{L} + C}\right) - \frac{p_0 C^2}{2(n_{max} - n_0)} \left[\frac{1}{[G_{min} + \frac{\eta}{L} + C]^2} - \frac{1}{[\frac{\eta}{L} + C]^2}\right] & \text{if } G_{min} \leq G \leq G_0 \\ \vdots & \\ P_{G_0} + p_0 C \left(\frac{n_{min}}{n_0 - n_{min}}\right) \left(\frac{1}{\frac{\eta}{L} + C} - \frac{1}{G_0 + \frac{\eta}{L} + C}\right) - \frac{p_0 C^2}{2(n_0 - n_{min})} \left[\frac{1}{[\frac{\eta}{L} + C]^2} - \frac{1}{[G_0 + \frac{\eta}{L} + C]^2}\right] & \text{if } G_0 \leq n \leq G_{max} \\ \vdots & \\ 1 & \text{if } G > G_{max} \end{cases} \quad (25)$$

10. APPLICAZIONE AL CASO DI STUDIO

L'applicazione al caso di studio ha imposto lo svolgimento di una serie di attività preliminari consistenti nel:

- Identificazione del dataset di precipitazione di pioggia e nevosa ottimale di input al sistema di modelli e per la calibrazione degli stessi;
- calibrazione del modello idrologico;
- addestramento e validazione del modello surrogato.
- determinazione della curva di fragilità;

L'attività i cui al punto 1 consiste nell'analizzare i dati pluviometrici provenienti da diverse fonti al fine di selezionare il dataset più performante nella descrizione di eventi di pioggia estrema passati, e il dataset di previsione da utilizzare nella fase operativa. In questa fase sono stati analizzati e testati i seguenti dataset: a) stazione pluviometriche (ARPACAL); b) acquisizione dati radar meteorologici (Protezione Civile/Leonardo); c) dataset di rianalisi (CMCC) d) dataset previsione delle precipitazioni dell'Aeronautica Militare.

L'attività di cui al punto 2 è finalizzata alla verifica dell'accuratezza con cui il modello idrologico riesce a replicare eventi passati sulla base delle precipitazioni ottenute dal migliore dataset scelto nel test precedente. Tale fase di calibrazione consiste nel determinare i parametri del modello idrologico - quali il coefficiente di infiltrazione, i tempi di corrivazione dei bacini e i lag time dei corsi d'acqua- in grado di replicare le misurazioni di portata e livello ottenute nelle varie stazioni di misura disponibili.

L'attività di cui al punto 3 è strutturata in due fasi distinte: fase di validazione e operativa. L'obiettivo della prima è verificare su dati indipendenti l'accuratezza del modello surrogato nelle due differenti configurazioni con e senza rottura dell'argine, mentre nella seconda i modelli già addestrati e validati vengono utilizzati per l'utilizzo in tempo reale su eventi reali.

L'attività di cui al punto 4 è caratterizzata da due fasi : una prima fase condotta tramite simulazioni bidimensionali al fine di determinare la regione di argine del Fiume Crati che a seguito di collasso possa impattare più significativamente sul Parco Archeologico , ed una seconda fase condotta attraverso simulazioni monodimensionali dalle quali sono stati ricavati i tiranti associati a diversi valori di portata transitante all'interno del Fiume Crati, utilizzati successivamente per la determinazione della curva di fragilità.

Nel seguito tali attività vengono descritte in dettaglio. A completezza delle analisi effettuate in Appendice 1 si allegano i test di benchmarking tratti dalla letteratura ed effettuati sul modello idraulico bidimensionale.

10.1. DATI PRECIPITAZIONE PER L'ANALISI E LA RICERCA DEGLI EVENTI PASSATI

Lo studio e l'analisi dei dataset di pioggia costituisce la base sulla quale è possibile effettuare lo studio degli eventi che in passato hanno caratterizzato e determinato condizioni di criticità per una determinata area. La comprensione di questi dati, dunque, risulta essere di notevole importanza al fine di individuare gli eventi storicamente più gravosi ed utilizzarli per la calibrazione del modello idrologico e l'addestramento dell'AI. Di seguito sono riportati per ogni dataset analizzato i rispettivi risultati ottenuti.

10.1.1. DATASET RADAR FORMATO DATAMET -RADAR PROTEZIONE CIVILE -SRI

Il primo set di dati fornito dalla PRC riguarda una sequenza temporale di alcuni eventi per l'anno 2020, il dato fornito presenta un formato di tipo DATAMET delle intensità di pioggia con risoluzione temporale di 15 min .Il dataset così fornito è risultato inutilizzabile poiché l'intervallo temporale risulta essere troppo ristretto(1 anno) , inoltre la gestione dello stesso necessita l'utilizzo di software proprietario ,per tale motivo non è stato possibile utilizzarlo.

10.1.2. DATASET RADAR FORMATO BUFR -RADAR PROTEZIONE CIVILE-SRI

Il secondo set di dati fornito dalla PRC riguarda una sequenza temporale di alcuni eventi per l'anno 2019, il dataset si presenta in formato di tipo BUFR e all'interno sono presenti le intensità di pioggia con risoluzione temporale di 15 min. Il dataset così fornito è risultato inutilizzabile poiché oltre a necessitare di software proprietario lo stesso formato necessita di una chiave di composizione del dato, per tale motivo non è stato possibile utilizzarlo.

10.1.3. DATASET RADAR FORMATO TIFF -RADAR PROTEZIONE CIVILE-SRT

Il terzo set di dati analizzato riguarda i dati derivanti dai radar della PRC, nello specifico nel dataset è presente una sequenza continua di dati acquisita dal 2016 al 2019, il dataset si presenta in formato TIFF delle cumulate di pioggia con risoluzione temporale di 1 h e risoluzione spaziale di 2 km. Il dataset prima del suo utilizzo ha subito una fase di pre-processing di georeferenziazione trasformando il dato dal sistema di coordinate WGS84-EPG:4326 al sistema di coordinate UTM 33N-EPG:32633. La fase di analisi è stata condotta confrontando i valori misurati dalle stazioni a terra con i valori dei singoli pixel corrispondenti alle stazioni pluviometriche, l'analisi così effettuata ha permesso di evidenziare una sottostima importante del dato derivante dall'acquisizione radar oltre che una cronica mancanza di dati durante gli eventi a più alto impatto meteorico al punto che il deficit di dati in alcuni casi è risultato essere anche di diverse ore. Viste le criticità sopra elencate non è stato possibile utilizzare questo dato al fine delle attività successive.

10.1.4. DATASET STAZIONI PLUVIOMETRICHE ARPACAL

Il quarto set di dati analizzato e testato riguarda il dataset derivante dalle registrazioni di alcune stazioni presenti all'interno dell'area di studio e fornito da ARPACAL, i dati così ottenuti dalle stazioni pluviometriche si presentano suddiviso in due formati differenti, un formato TXT per le registrazioni che coprono il periodo 1990-2000 e un formato CSV per le registrazioni che coprono il periodo 2001-2022. Di seguito è presente una lista delle stazioni fornite dall'ARPACAL, il periodo di acquisizione e il formato dai dati.

N°	Stazioni Pluviometriche	Periodo di acquisizione				Formato	
		1990-2000	2001-2022	2002-2022	2005-2022	TXT	CSV
1	Acri	X			Δ	x	Δ
2	Camigliatello	X	O			x	o
3	Cecita	X	O			x	o
4	Cosenza	X	O			x	o
5	Domanico	X	O			x	o
6	Montalto_Uffago	X	O			x	o
7	Paola	X	O			x	o
8	San_Pietro	X	O			x	o
9	San Sosti	X	O			x	o
10	Torano	X	O			x	o
11	Cassano allo Ionio				Δ		Δ
12	Cerchiara di Calabria				Δ		Δ
13	Papasidero				Δ		Δ
14	Lungro			□			□
15	Fitterizzi			□			□
16	Corigliano Calabro			□			□
17	Castrovillari Camerata				Δ		Δ

Tabella 11- dataset stazioni pluviometriche

I test condotti hanno dimostrato la possibilità di utilizzare questo dataset, alla luce del lungo periodo di osservazione e completezza del dato, tuttavia, anche in questo dataset sono stati riscontrati dei buchi nelle registrazioni che comunque non hanno inficiato sulla possibilità di utilizzo. Vista la robustezza del dato lo stesso è stato utilizzato per la ricerca degli eventi di maggiore impatto sull'area di studio. Sulla base delle misurazioni pluviometriche delle stazioni a terra fornite dall'ARPACAL è stato possibile individuare un numero significativo di eventi per il periodo 1990-2022. La ricerca degli eventi passati più importanti è stata effettuata mediante una doppia analisi, la prima volta ad identificare gli eventi che hanno generato portate di notevole rilevanza per il fiume Crati, la seconda volta ad identificare gli eventi che localmente hanno investito la sola area costiera determinando possibili insufficienze della rete di drenaggio. Per questi eventi la classificazione è avvenuta selezionando i valori di cumulata giornaliera di ogni stazione che ricadono al di sopra di un determinato percentile, dapprima è stato calcolato per ogni stazione il 96esimo percentile e successivamente si sono ricercate tutte le date nelle quali, tutte o un numero sufficiente di stazioni ($n \geq 10$) contemporaneamente avessero superato il proprio percentile di riferimento, di seguito è riportato la lista degli eventi pluviometrici significativi.

Lista Eventi			
Data	Area Interesse	Tipo di Evento	Impatto
-13/11/1993	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 8/4/1994	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 25/2/1995	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 26/4/1995	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 2/1/1996	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 28/3/1996	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 11/5/1996	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 26/9/1996	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 3/10/1996	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 18/11/1996	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 25/12/1996	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 14/10/1997	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 13/11/1997	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 20/11/1997	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 3/12/1997	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 20/1/1998	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 1/2/1998	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 5/5/1998	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 8/2/1999	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 9/9/2000	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 28/12/2004	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 19/12/2008	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Rottura argine
- 21/06/2009	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 24/1/2013	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Allagamento Parco del Cavallo
-26/5/2015	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 15/8/2015	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 28/11/2018	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Rottura argine
- 12/11/2019	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense
- 19/07/2021	Bacino Del Crati	> 96simo percentile	Pioggie intense

Tabella 12- eventi significativi

10.1.5. DATASET CMCC- PRECIPITAZIONI CUMULATE- RIANALISI

Viste le difficoltà nel poter utilizzare i dataset di pioggia derivanti da acquisizione radar si è deciso di esplorare un dataset di rianalisi fornito dal CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici) [https://dds.cmcc.it/#/dataset/era5-downscaled-over-italy/VHR-REA IT 1989 2020 hourly](https://dds.cmcc.it/#/dataset/era5-downscaled-over-italy/VHR-REA_IT_1989_2020_hourly). il set di dati contiene una rianalisi ERA5 ridimensionata dinamicamente, originariamente disponibile con una risoluzione orizzontale di ≈ 31 km x 31 km, a 2,2 km x 2,2 km. Il downscaling dinamico è stato condotto direttamente per il progetto (foreground) attraverso il Regional Climate Model (RCM) COSMO5.0_CLM9 e INT2LM 2.06. Il

RCM COSMO CLM è attualmente sviluppato dalla CLM-Community, con la quale il CMCC collabora dal 2008 (informazioni aggiuntive su COSMO CLM). La risoluzione temporale degli output è oraria (come per ERA5). I run coprono l'intero territorio italiano (e le aree limitrofe secondo il necessario confine di calcolo) in modo da fornire un dataset molto dettagliato (in termini di risoluzione spazio-temporale) e completo (in termini di campi meteorologici) di dati climatologici almeno per l'ultimo 30 anni (01/1989-10/2020). La copertura temporale del set di dati va dal 01/01/1989 00:00 al 31/12/2020 23:00 e la risoluzione temporale è 1 ora. I test condotti su questo dataset riguardano la comparazione tra i valori di pioggia misurati delle singole stazioni con i valori di pioggia associati al singolo pixel sopra ogni stazione pluviometrica. La figura 34 che segue mostra la comparazione tra i valori misurati e quelli presenti all'interno dei dati di pioggia del CMCC.

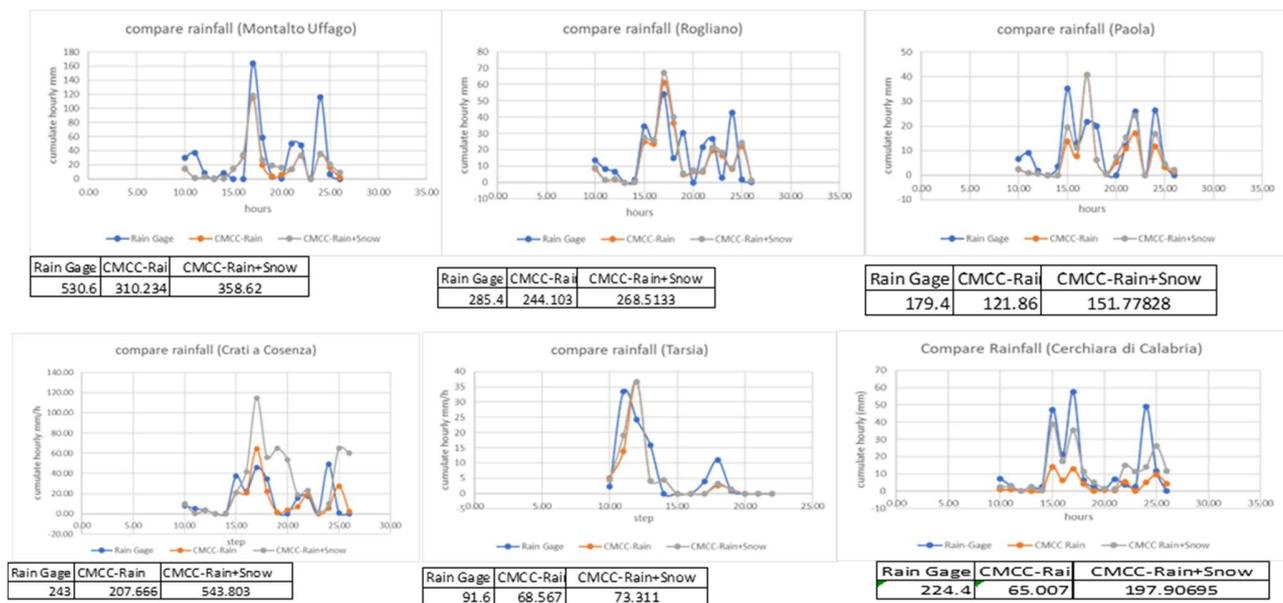


Figura 34-confronto stazioni pluviometriche - CMCC

Dai test condotti sui dati del CMCC è emerso che per l'area in oggetto giocano un ruolo fondamentale le precipitazioni nevose, la figura 34 Mostra la comparazione tra i valori misurati da alcuni pluviometri con i dati ottenuti dal CMCC, la comparazione è stata effettuata in due diverse modalità la prima tenendo conto della sola precipitazione pluviali e la seconda tenendo

conto anche dall'apporto delle precipitazioni nevose. I test condotti hanno dimostrato la buona affidabilità dei dati provenienti dal CMCC, nello specifico l'utilizzo del dataset relativo alle precipitazioni pluviali unitamente a quelle nevose ha permesso di ottenere valori molto simili a quelli registrati dalle stazioni pluviometriche, i benefici dei risultati ottenuti in questa parte di test saranno resi più evidenti nella fase di test successivo, quello relativo al modello idrologico.

10.1.6. DATASET PREVISIONI AERONAUTICA MILITARE

Come già evidenziato in precedenza questa fase di test ha avuto come unico scopo la verifica e la validazione del dataset per i soli aspetti spaziali e temporali del dato, nello specifico si è analizzato la congruità delle informazioni contenute all'interno del dataset fornito dall'aeronautica militare, quali: campi di precipitazione pluviale e nevosa; copertura area d'interesse ed infine periodo di previsione compatibile con la durata di tipica di eventi significativi. I test effettuati hanno dimostrato l'affidabilità del dato risultando performante nell'utilizzo in real-time all'interno del sistema di allerta rapida.

10.2. MODELLO IDROLOGICO

I test condotti sul modello idrologico riguardano la capacità dello stesso nel replicare nel modo più affidabile possibile gli andamenti di livello misurati dalle stazioni di monitoraggio presenti nella diga di Farneto del Principe e di Tarsia utilizzando come input i dati di precipitazione ottenuti dal CMCC. Dopo aver creato un modello in grado di replicare nel modo più affidabile possibile la suddivisione e il numero di bacini presenti nell'area in oggetto si è passati alla fase di test o calibrazione del modello idrologico. La fase di calibrazione consiste nello stimare nel modo più affidabile possibile i parametri utili al modello per la simulazione degli eventi passati e nel dettaglio nella simulazione e determinazione delle portate che si possono generare da un determinato bacino a seguito sulla base di un input di pioggia. La figura 36 mostra il dominio di calcolo e la schematizzazione utilizzata, la tabella 13 mostra una sintesi delle caratteristiche

presenti all'interno del modello come: a) numero di bacini; b) numero di corsi d'acqua; c) numero di strutture (dighe/traverse).

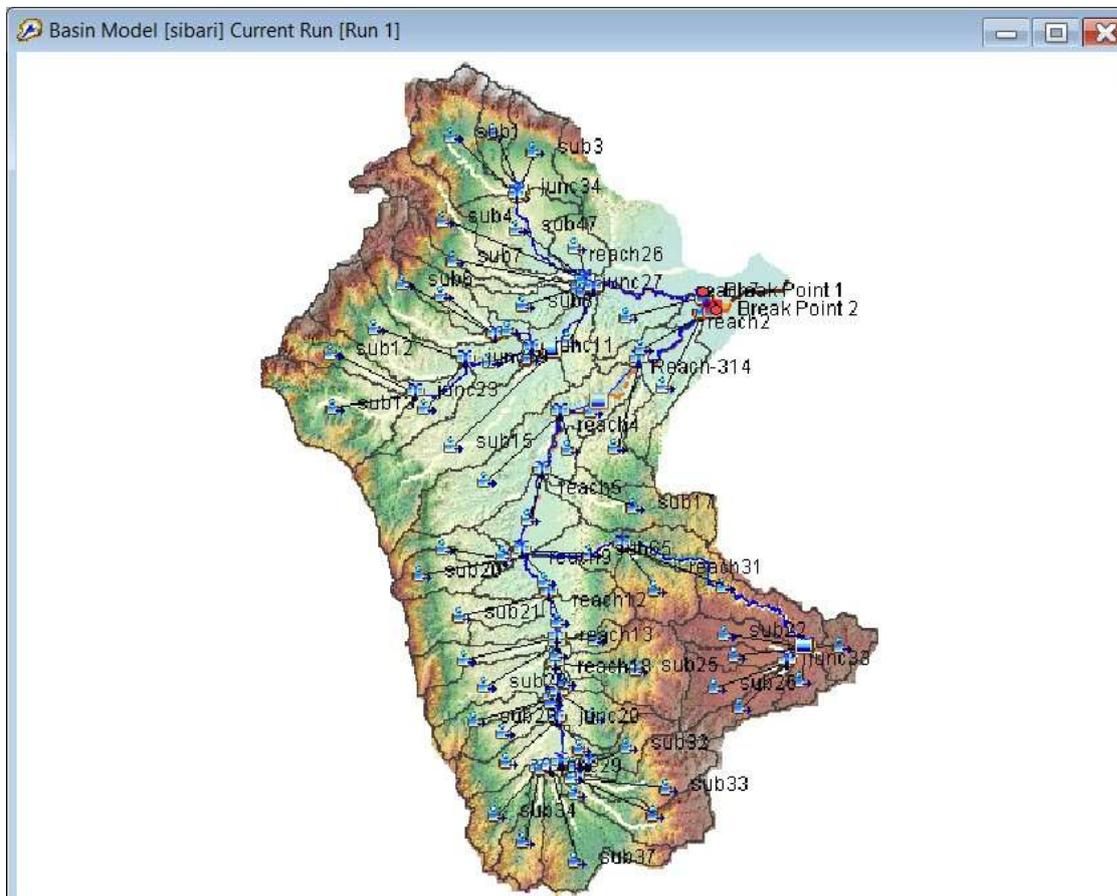


Figura 36-schema modello idrologico

Bacini	corsi d'acqua	strutture
72	35	3

Tabella 13 caratteristiche modello idrologico

Per ognuno degli elementi caratterizzanti il modello numerico sono stati calibrati i seguenti parametri:

- Bacini
 - Curve number
 - Tempo di corrivazione
 - Tempo di ritardo

- Portata di base
- Corsi d'acqua
 - Tempo di ritardo
 - Infiltrazione

La fase di calibrazione ha permesso di ottenere un modello idrologico in grado di replicare nel modo più affidabile possibile la risposta dei singoli bacini, i risultati ottenuti in questa fase unitamente ai dati di input legati alle precipitazioni provenienti dal CMCC sono evidenti nella figura 37.

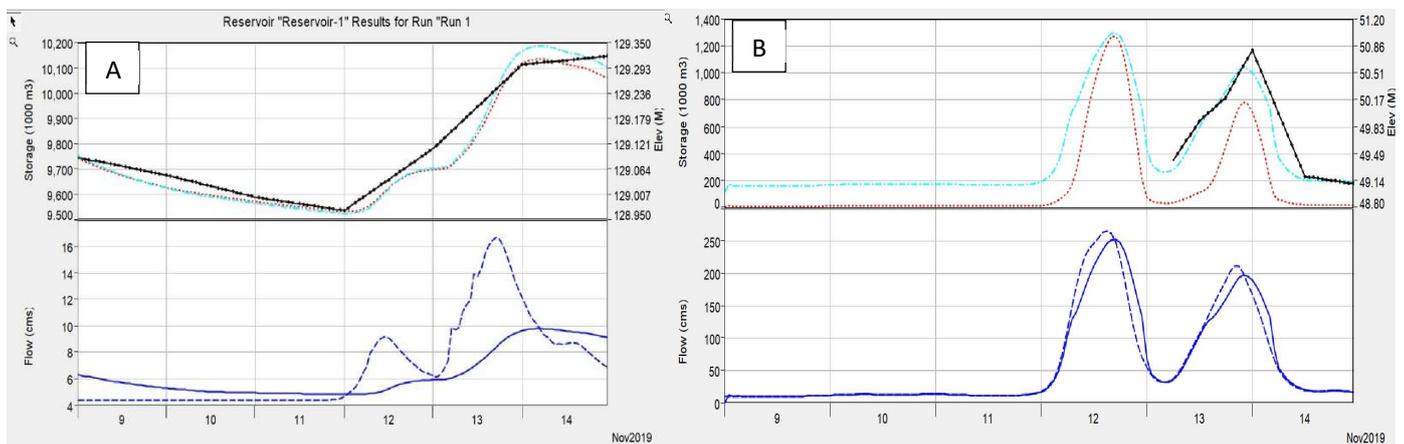


Figura 37 -confronto dati misurati e simulazione modello idrologico-A) Farneto del Principe, B) Traversa di Tarsia

La figura 37 mostra il confronto tra l'andamento del livello misurato dalla stazione di Farneto del Principe e quello misurato dalla stazione della traversa di Tarsia, i dati delle misurazioni sono stati forniti dal CONSORZIO DI BONIFICA INTEGRALE DEI BACINI DELLO JONIO COSENTINO e fanno riferimento all'evento del 12-14 novembre 2019, le misurazioni ottenute sono state confrontate con i risultati simulati dal modello idrologico durante l'evento ed utilizzando come dato di input le precipitazioni ottenute dal CMCC. Il confronto tra i risultati derivanti dal modello idrologico e quelli registrati avviene analizzando i trend di colore nero(registrato) e quello ciano(simulato) presenti nella figura 37, l'analisi tra i due segnali

permette di apprezzare come i risultati ottenuti dalla simulazione risultano essere molto robusti e pressoché coincidenti con quelli registrati. Per la quantificazione dell'errore commesso dal modello idrologico nel simulare l'evento del novembre 2019 si è utilizzato l'errore quadratico medio principale (RMSE). L'indice l'RMSE calcola la radice quadrata della media degli errori quadratici di due segnali, questo indice risulta essere più sensibile ai valori anomali rispetto ad altre metriche di precisione, in particolare un valore di RMSE più basso indica un modello più preciso, generalmente valori di RMSE maggiori di 0.8 definiscono modelli di scarso grado di calibrazione, valori di RMSE compresi tra 0.5 e 0.8 definiscono modelli con un buon grado di calibrazione ed infine valori di RMSE compresi tra 0 e 0.5 definiscono modelli con un eccellente grado di calibrazione. Nello specifico per la Diga di Farneto del Principe il programma ha restituito un valore di RMSE pari a 0.2, mentre per la traversa di Tarsia il valore di RMSE si è attestato a 0.4, che sulla base dei range di RMSE sopra citati, permettono di classificare il modello idrologico con un grado elevato di calibrazione.

10.3. VALIDAZIONE DEL MODELLO SURROGATO

In questa sezione sono riportati i risultati per l'addestramento degli algoritmi di machine learning per i campi di allagamento e velocità. Figura 38 riporta i campi di allagamento e di velocità predetti (a,c) confrontati con i corrispondenti campi originari direttamente provenienti dal solutore Shallow Water per un istante non iniziale di una simulazione. È possibile osservare come ci sia un'ottima capacità dei due modelli di riprodurre il comportamento del solutore, particolarmente evidente nei campi di velocità. I livelli predetti sono in ottimo accordo nelle zone di interesse, ovvero i fiumi Crati e Coscile, con delle deviazioni osservate prevalentemente in zone isolate di scarsa significatività. L'errore per entrambi i campi è riportato in Tabella 14. L'errore è stato calcolato come scarto quadratico per entrambi i modelli, confrontando i valori predetti e quelli calcolati pixel per pixel. I quartili estremali (25% e 75%) sono entrambi molto bassi ($<1E-2$). Allo stesso modo il valore medio dell'errore resta confinato a valori inferiori a $10E-4$. Una analisi simile è stata condotta anche per un caso di validazione, i cui risultati sono

riportati in Figura 39 e in **Errore**. L'origine riferimento non è stata trovata. Tabella 15. Le metriche riportate testimoniano come il modello non sia in una condizione di overfitting.

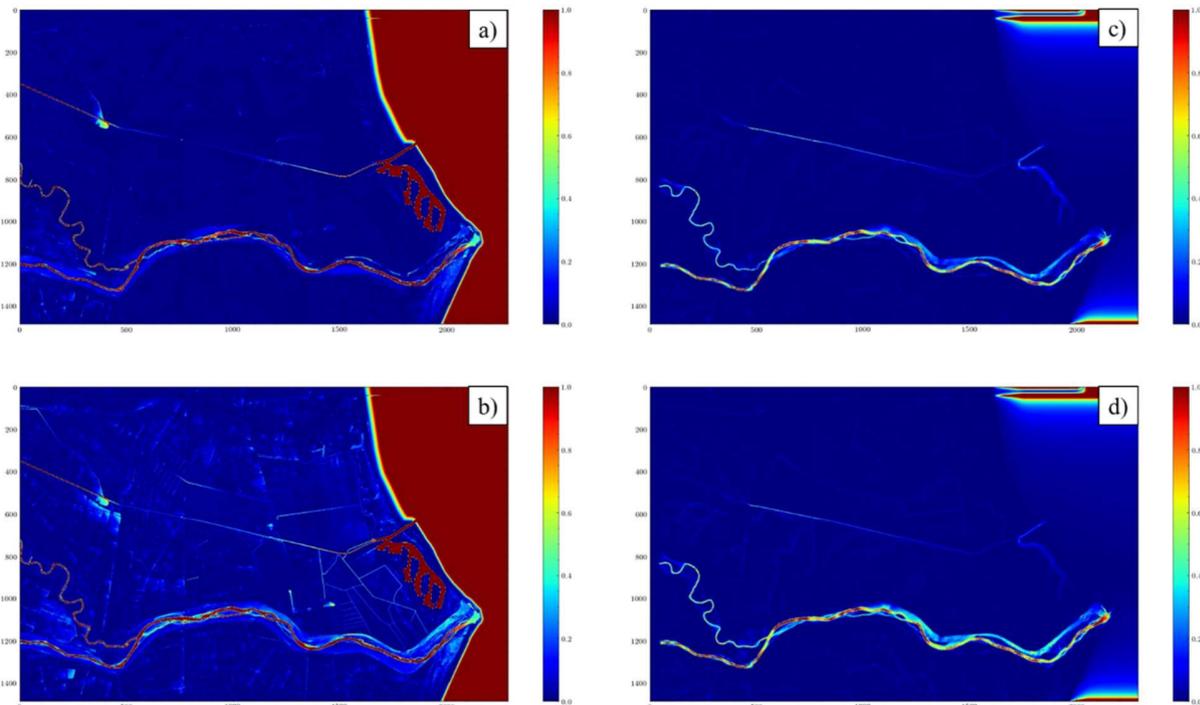


Figura 38-Output del modello per un caso di addestramento: a) allagamento predetto, b) allagamento originale, c) velocità predetta e d) velocità originale. I campi di allagamento sono espressi in metri [m] e le velocità in metri al secondo [m/s].

Tabella 14 - Distribuzione statistica dello scarto quadratico medio di Figura 37

	H	u
mean	-0.02097	-0.00313
std	0.061553	0.018663
min	-1.61817	-0.66565
25%	-0.01602	-0.00079
50%	-2.06E-05	-3.78E-05
75%	0.000377	0.000107
max	0.537207	0.3291

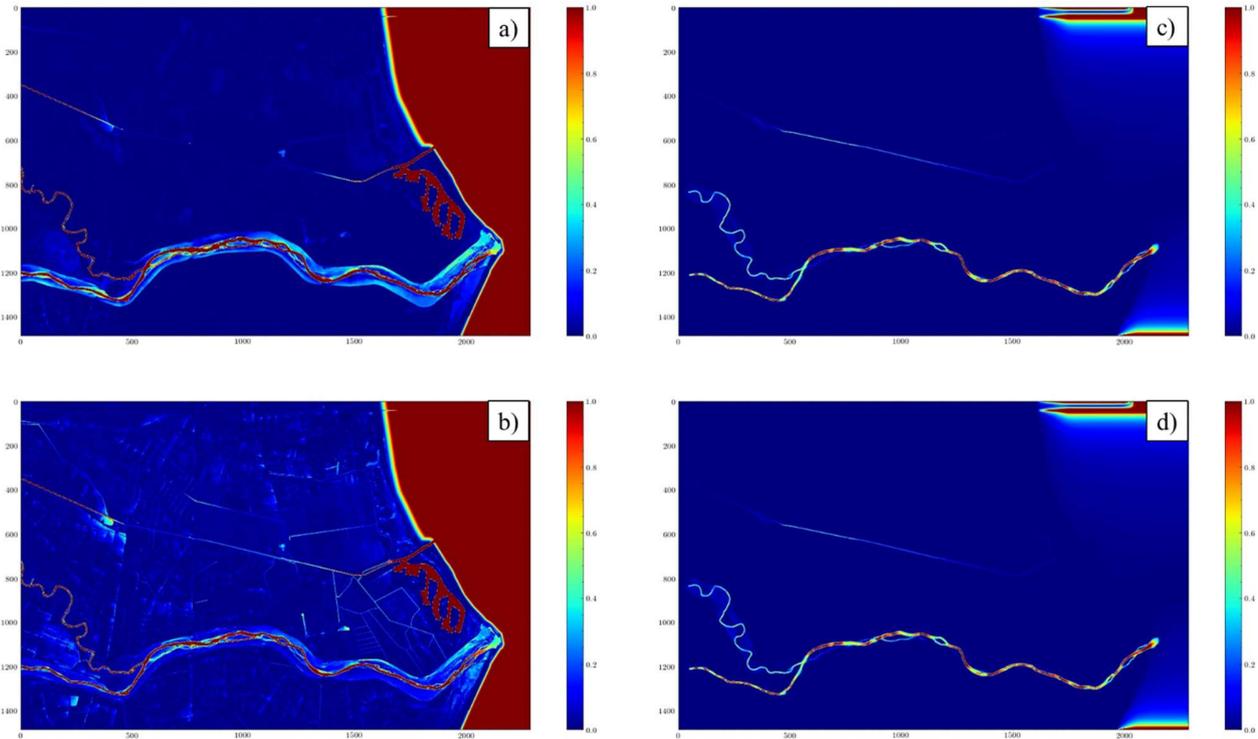


Figura 39-Output del modello per un caso di addestramento (validazione): a) allagamento predetto, b) allagamento originale, c) velocità predetta e d) velocità originale

Tabella 15 - Distribuzione statistica dello scarto quadratico medio di Figura 38

	h	u
mean	-0.01991	0.000328
std	0.066833	0.001853
min	-1.34818	-0.0418
25%	-0.01238	-4.80E-06
50%	-1.59E-05	1.07E-05
75%	0.000296	7.52E-05
max	0.652871	0.042761

I risultati riportati in questa sezione fanno riferimento alla simulazione di un evento completo, corrispondente a un evento estremo verificatosi nel 2000. In questa fase, è stato sfruttato il framework operativo riportato in Figura 20. Pertanto, al modello sono stati forniti unicamente come input i campi di pioggia provenienti dal radar e i livelli del fiume Crati e Coscile, utilizzando i modelli addestrati in precedenza nel framework di addestramento (Figura 21)

come modelli surrogati. Il caso del 1999 è stato escluso dal database di addestramento; pertanto, questo può essere considerato come caso *out-of-the box*. La predizione in vari istanti temporali è riportata in Figura 40. Diversi aspetti possono essere evidenziati dall'analisi dei diversi campi: a) i modelli sono in grado di rappresentare un fenomeno non stazionario, con l'innalzamento dei livelli dei fiumi correttamente rappresentata; b) i tre tiranti idrici principali sono sufficientemente rappresentati ed evidenti nei campi di velocità e c) le correlazioni spaziali tra i vari punti dei tiranti sono perfettamente riprodotte, senza discontinuità evidenti nell'immagine.

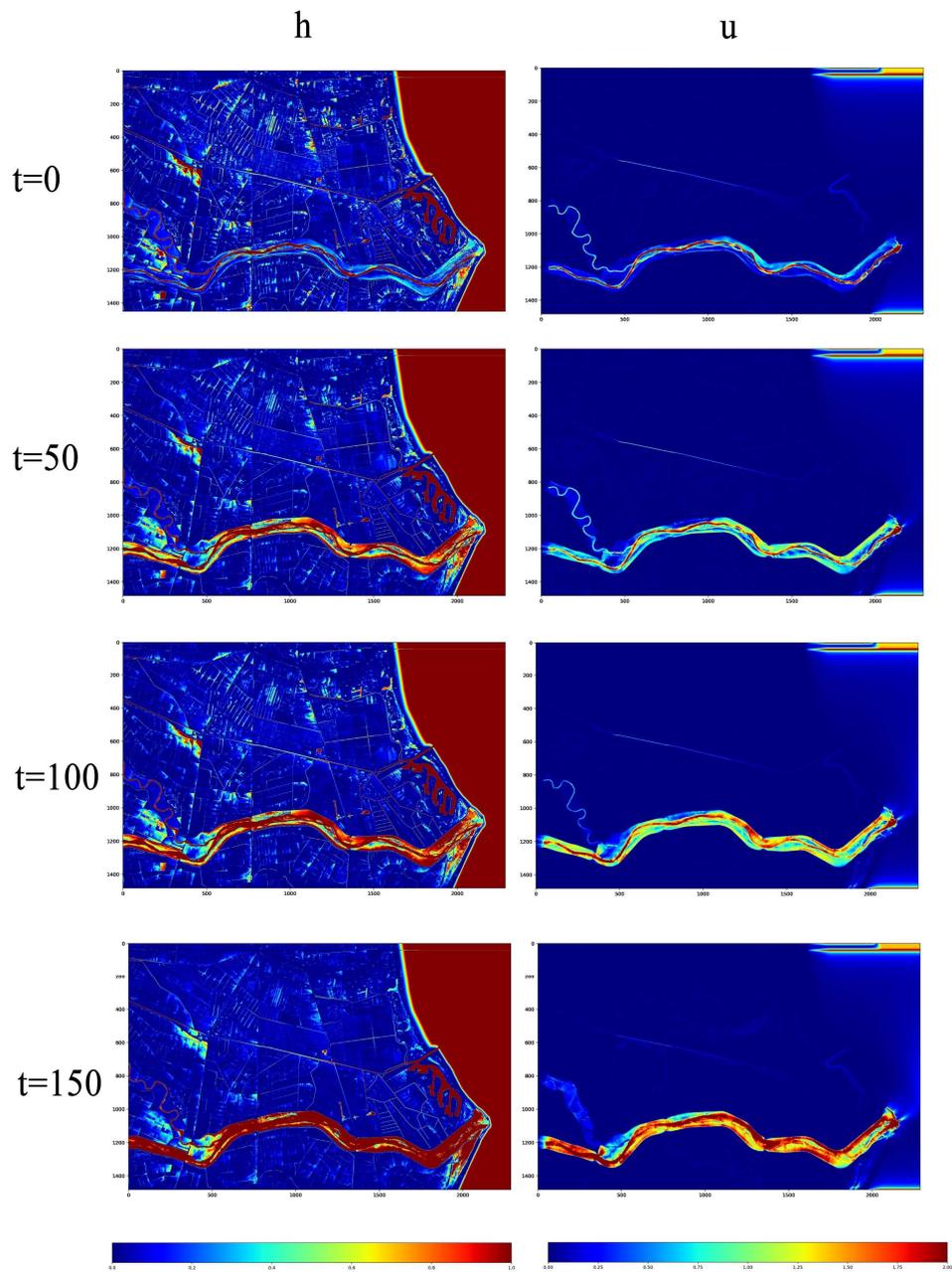


Figura 40 - Simulazione del 2000, campi di allagamento e velocità in vari istanti temporali.

10.4. MODELLO DI ROTTURA ARGINALE

Al fine di determinare la curva di probabilità di rottura arginale come quanto descritto nel capitolo precedentemente, si è reso necessario effettuare alcuni test al fine di individuare la porzione di argine in sinistra idraulica del Fiume Crati, che, a seguito di collasso, determinasse il massimo impatto sul Parco Archeologico di Sibari. I test preliminari sono stati effettuati mediante simulazioni bidimensionali ed imponendo la rottura dell'argine. Successivamente a queste simulazioni si è valutato: a) se gli allagamenti prodotti dall'esonazione del Fiume Crati per vari scenari di rottura arginale avessero investito il Parco Archeologico; b) per ognuna delle simulazioni che avessero generato allagamenti, si è valutato l'estensione e il massimo tirante all'interno del Parco Archeologico. Le simulazioni condotte in campo di bidimensionale hanno permesso di determinare una specifica porzione di argine del Fiume Crati posta a circa 100 m dal sito del Parco del Cavallo che a seguito di collasso genererebbe il massimo impatto in termini di aree allagate e tirante, in Figura 41 è mostrata l'ubicazione del tratto di argine individuato.



Figura 41- tratto di argine del Fiume Crati più impattante

Una volta determinato il tratto di argine più impattante sul sito archeologico si è passati ad una nuova serie di simulazioni al fine di determinare i valori di tirante all'interno dell'alveo del Fiume Crati da poter utilizzare per la costruzione della curva di fragilità. Le nuove simulazioni sono state condotte con l'utilizzo di un modello idraulico monodimensionale per un tratto del Fiume Crati che si estende per circa 7 km dalla confluenza del Fiume Crati con il Fiume Coscile fino al Mar Ionio. il modello implementato per queste simulazioni è stato costruito utilizzando 128 sezioni trasversali con interasse di 50 m e ricavate dal modello digitale del terreno e fornito dal ministero dell'ambiente con risoluzione di 1 m X 1 m , la figura 41 mostra il modello monodimensionale. Le condizioni al contorno utilizzate per queste simulazioni riguardano, due condizioni di monte costituite da due idrogrammi , uno per il Fiume Crati e uno per il Fiume Coscile per una portata di picco complessiva di fino a circa 1800 m³/s, ed una condizione di valle dove si è imposto il livello medio marino.

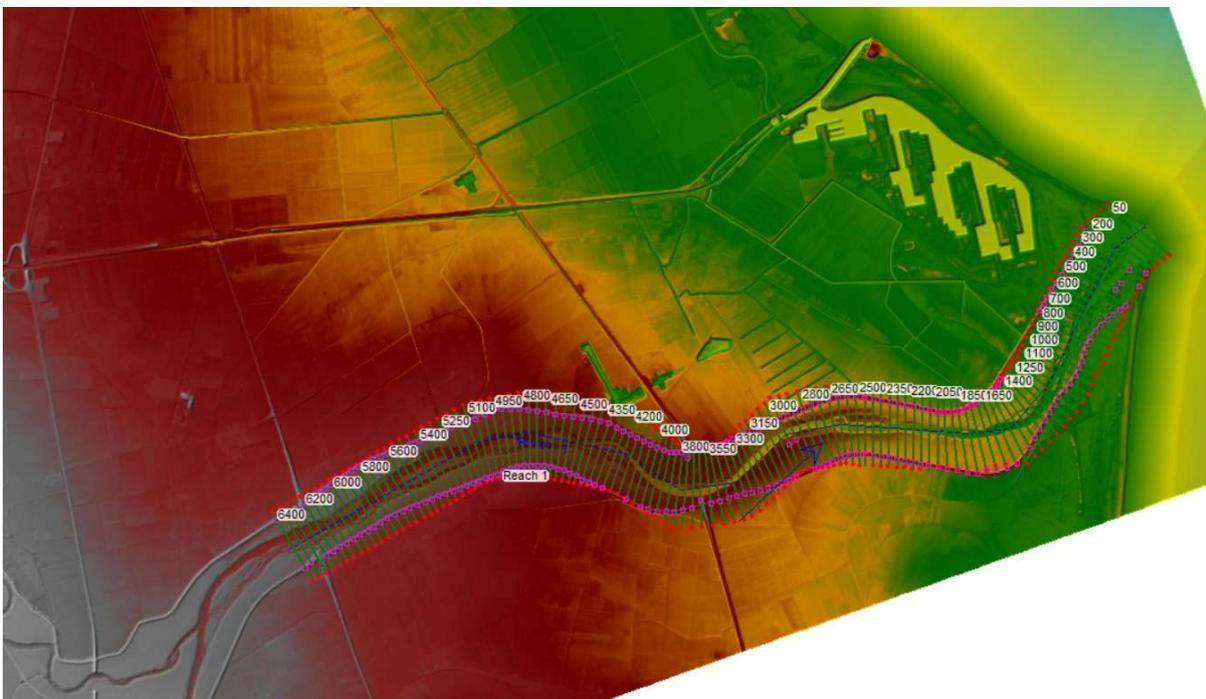


Figura 42- schema modello monodimensionale

Le simulazioni così effettuate hanno permesso di determinare per ogni valore di portata, un valore di tirante all'interno del tratto di Fiume Crati. I valori di tirante ricavati dalle simulazioni, successivamente sono stati utilizzati per la determinazione della curva di fragilità, in figura 43 è riportato l'andamento della curva di fragilità in funzione dei tiranti determinati.

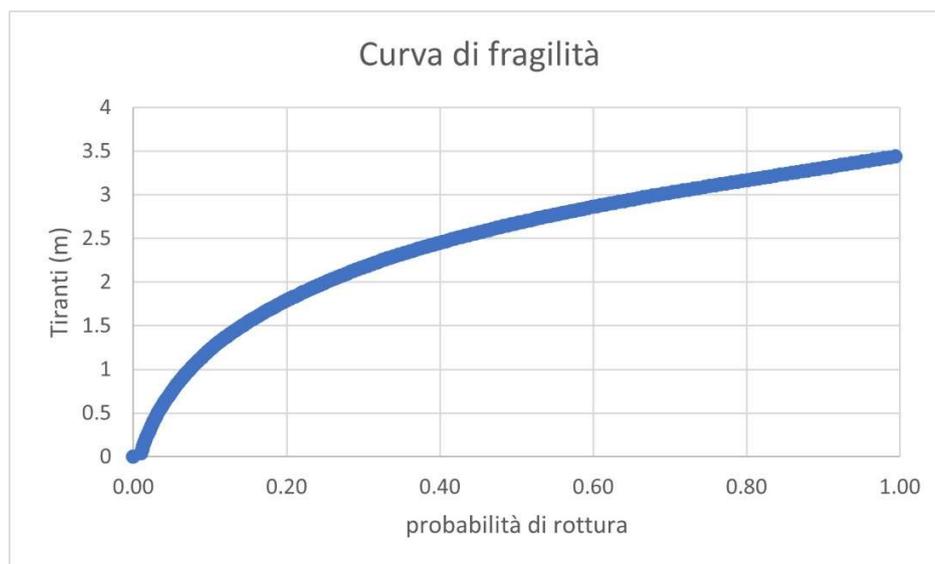


Figura 43 curva di fragilità

11. VERIFICA DELLA FASE OPERATIVA DEL SISTEMA DI ALLERTA RAPIDA APPLICATA AD UN EVENTO REALE

In questo capitolo verrà illustrato un caso applicativo di tutto il sistema di allerta. Il test che verrà illustrato è stato condotto sull'evento meteorologico che ha investito tutta la penisola italiana dal 07/02/1999 al 08/02/1999, tale simulazione rientra all'interno degli eventi storici che sono stati individuati precedentemente e che è stato escluso dall'addestramento del modello surrogato. Dal punto di vista meteorologico l'evento è stato generato dalla presenza di una bassa di origine atlantica sul bacino del mediterraneo nell'area compresa tra la Sardegna e l'Algeria e caratterizzata da una struttura ciclonica, la quale ha dato luogo ad intense precipitazioni a carattere temporalesco su gran parte della penisola Italiana, comprese le regioni del Sud Italia.

Per il caso applicativo è stata effettuata una simulazione sui dati ottenuti dal CMCC che copre l'intero evento meteorologico. Per il test inoltre è stato effettuato un override del sistema, in particolare il sistema di allerta è stato attivato su di un'allerta di colore giallo da parte della Protezione Civile per la Regione Calabria a differenza di quanto settato operativamente che prevede l'attivazione solo in caso di allerta di colore arancione.

Con riferimento alla figura 1, la piattaforma X2030 dopo aver rilevato un colore giallo dal bollettino della Protezione Civile per l'area d'interesse, come evidenziato in figura 43, il sistema simula un invio di richiesta di acquisizione delle previsioni di precipitazione all'FTP dell'Aeronautica Militare.



Figura 44- Mappa pericolosità Protezione Civile

Dopo aver ricevuto i dati dall' Aeronautica Militare il sistema X2030 invia i dati alla piattaforma AWARE per le successive elaborazioni. Con riferimento alla Figura 8, il sistema AWARE suddivide il processo di elaborazione in 4 step.

11.1. STEP 0

Diagramma di flusso: Modello_Idraulico_v2

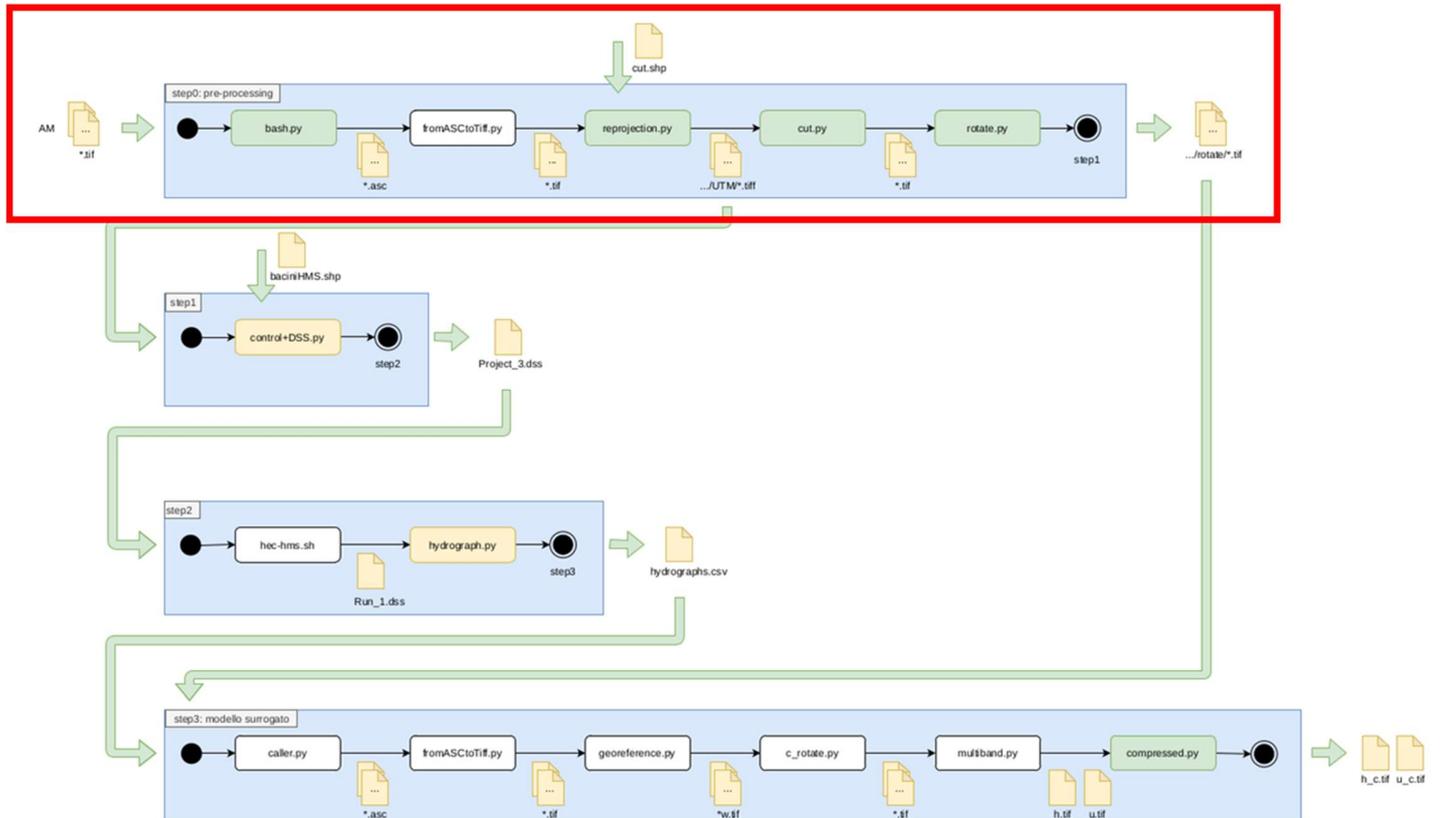
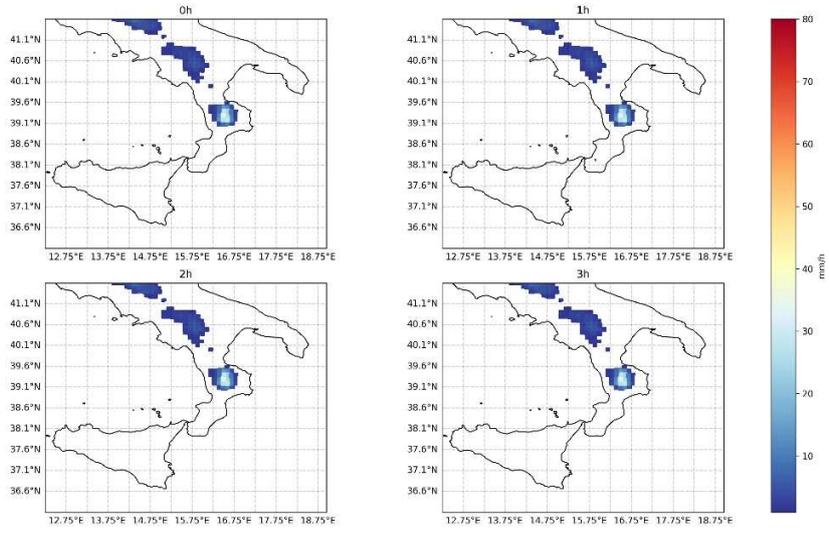


Figura 45- Step 0

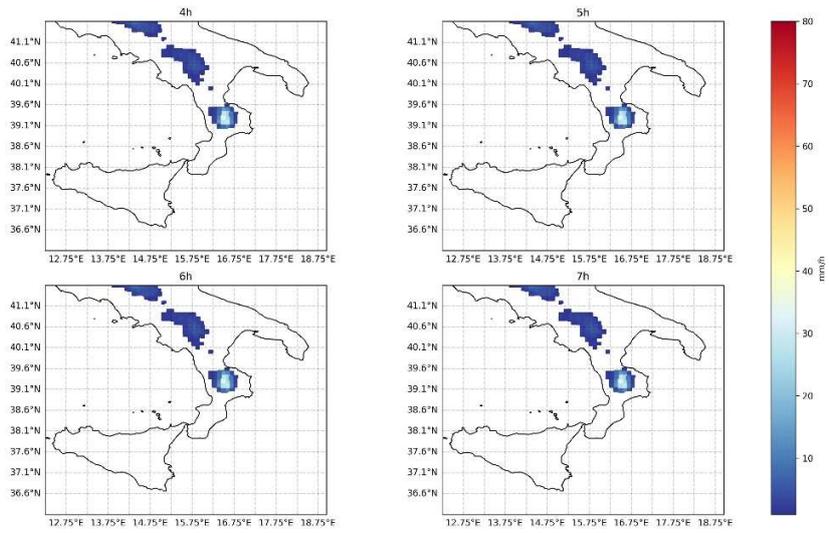
Una volta acquisiti i dati grezzi contenuti i campi di precipitazione nevosa e pluviale dell'Aeronautica Militare, la piattaforma AWARE avvia lo Step 0. In questa fase una serie di tools sviluppati appositamente in Python hanno il compito di pre-processare il dato grezzo al fine di rendere lo stesso utilizzabile dal modello idrologico e dal modello surrogato. La prima fase di pre-processamento è gestita dal codice `bash.py`, il codice ha il compito di trasformare i dati grezzi da formato GRIB fornito dall'Aeronautica Militare in un file ASC, inoltre lo stesso si occupa di aggregare il dato della precipitazione nevosa con quella pluviale al fine di ottenere un'unica informazione di precipitazione. Successivamente alla prima fase i codici

fromASCtoTiff.py e reproject.py trasformano i dati da formato ASC a formato Tiff e riproiettandoli da EPSG-4326 a UTM-WGS84 FUSO 33 N .A questo punto i raster vengono predisposti in due dataset differenti. Il primo dataset predisposto per il modello idrologico viene generato ritagliando dal dataset originale e per ogni istante temporale i campi di precipitazione che ricadano all'interno dominio di calcolo del modello idrologico, come mostrato in figura 46, successivamente a questa fase i dati generati sono archiviati per essere utilizzati nello Step 1. Il secondo dataset predisposto per l'utilizzo diretto all'interno del modello surrogato viene generato ritagliando per ogni istante temporale i campi di precipitazione che ricadano all'interno del dominio di calcolo del modello surrogato, i dati generati in questa fase sono archiviati per essere utilizzati nello Step 3.

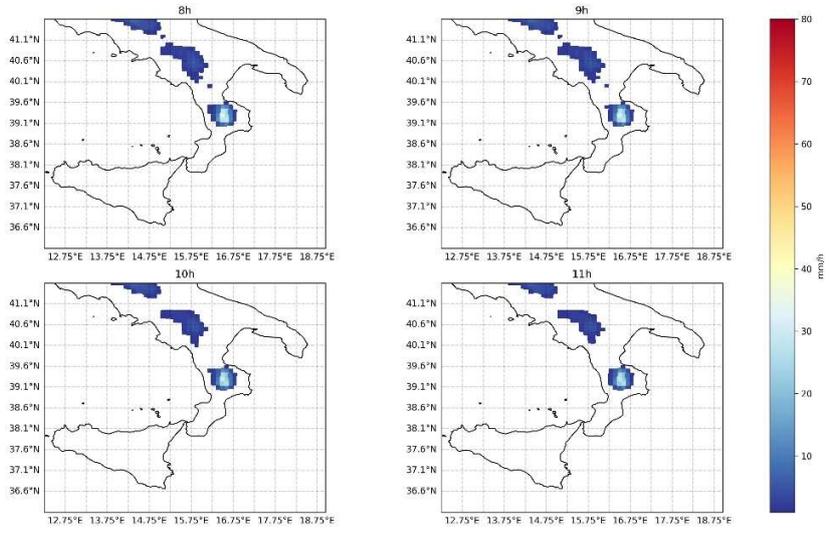
Rainfall from 07/02/1999 at 00:00 to Rainfall from 07/02/1999 at 03:00



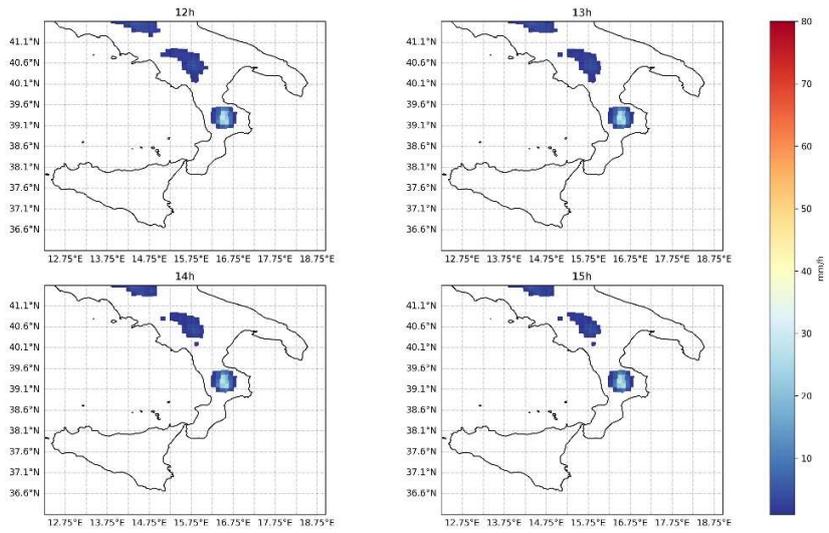
Rainfall from 07/02/1999 at 04:00 to Rainfall from 07/02/1999 at 07:00



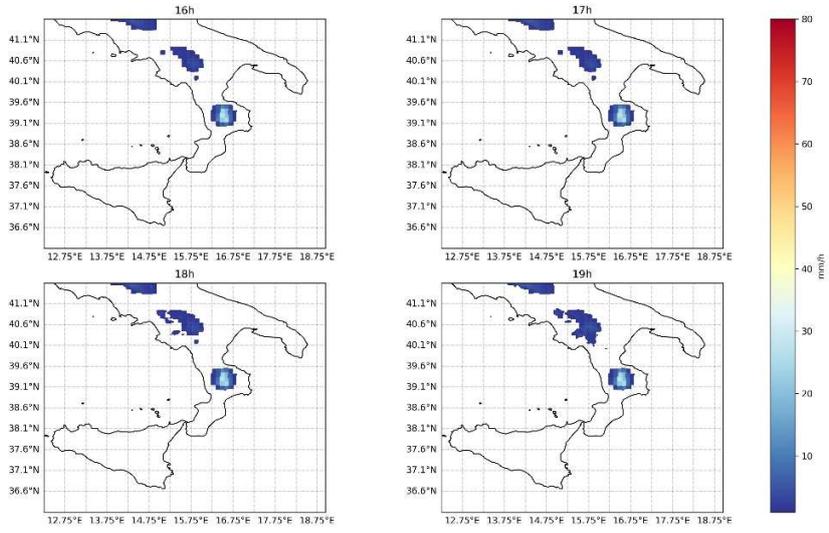
Rainfall from 07/02/1999 at 08:00 to Rainfall from 07/02/1999 at 11:00



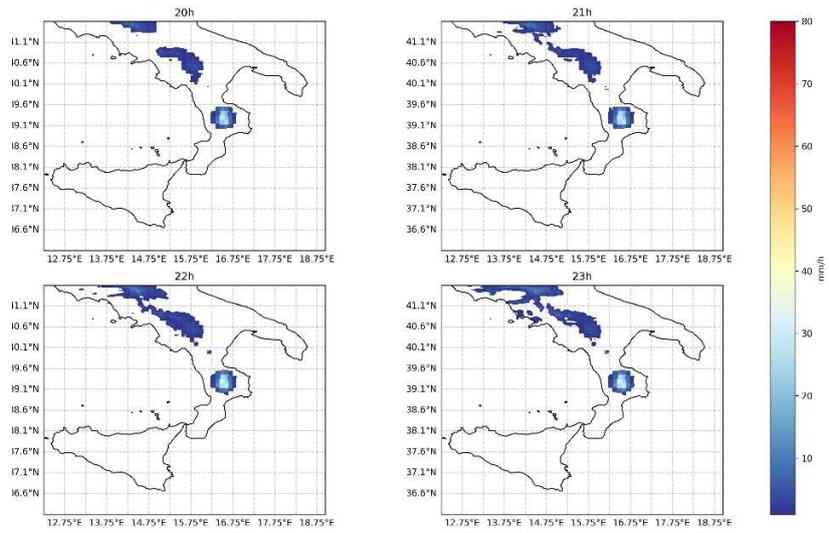
Rainfall from 07/02/1999 at 12:00 to Rainfall from 07/02/1999 at 15:00



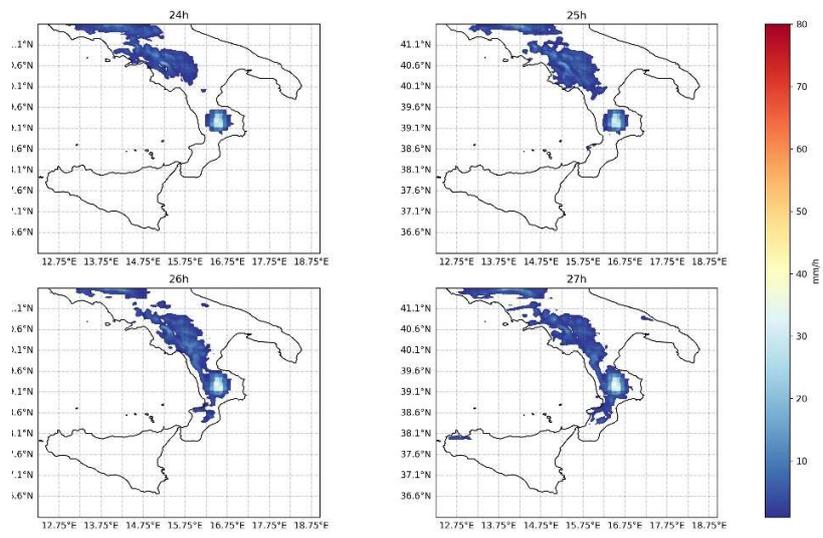
Rainfall from 07/02/1999 at 16:00 to Rainfall from 07/02/1999 at 19:00



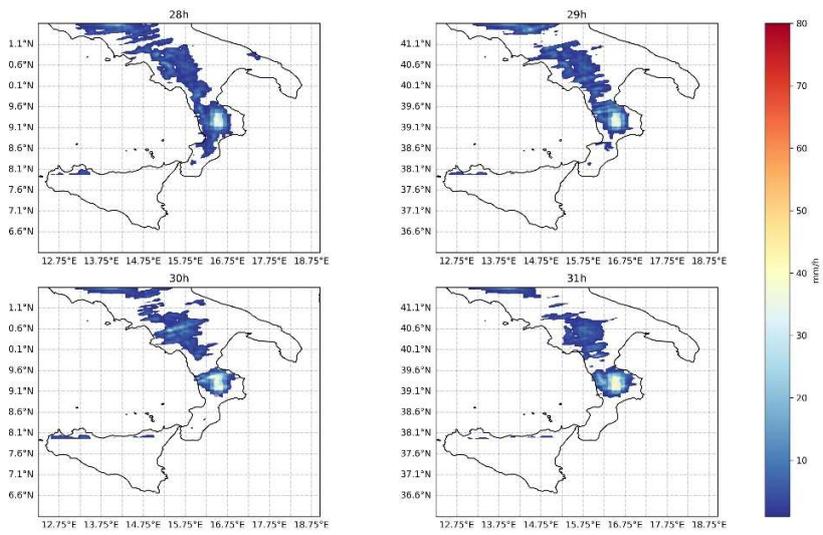
Rainfall from 07/02/1999 at 20:00 to Rainfall from 07/02/1999 at 23:00



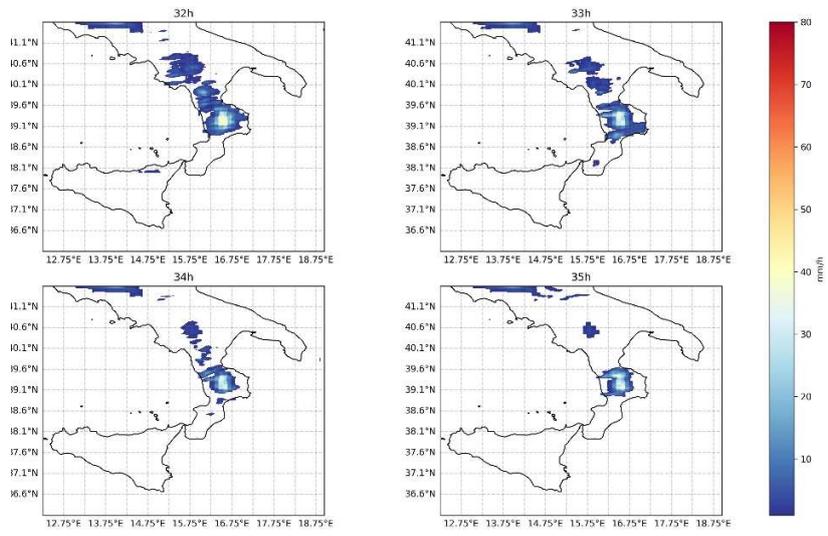
Rainfall from 08/02/1999 at 00:00 to Rainfall from 08/02/1999 at 03:00



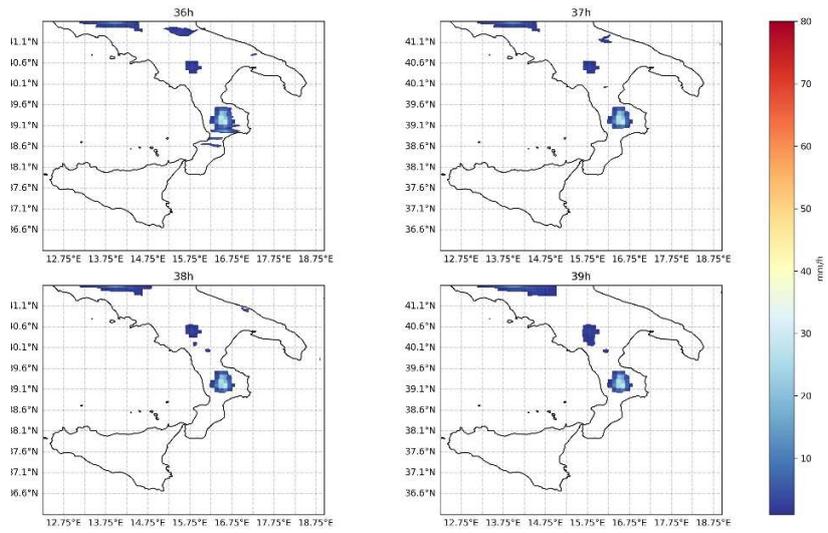
Rainfall from 08/02/1999 at 04:00 to Rainfall from 08/02/1999 at 07:00



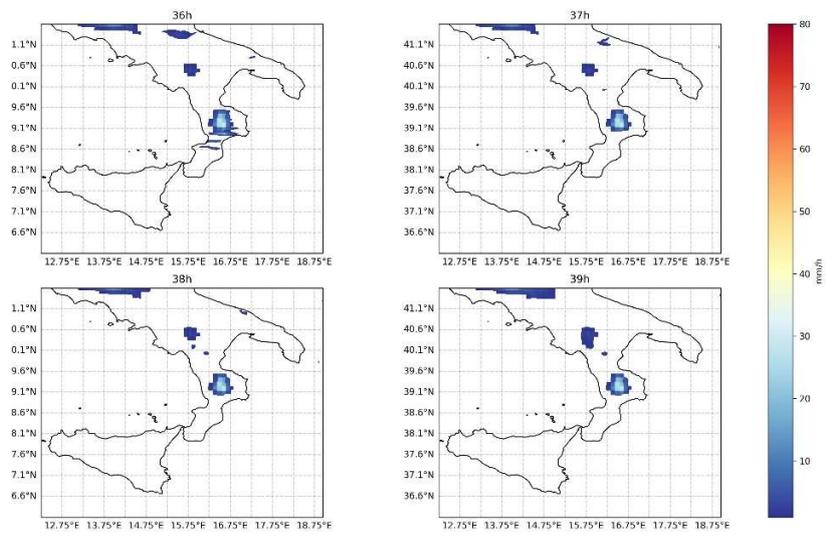
Rainfall from 08/02/1999 at 08:00 to Rainfall from 08/02/1999 at 11:00



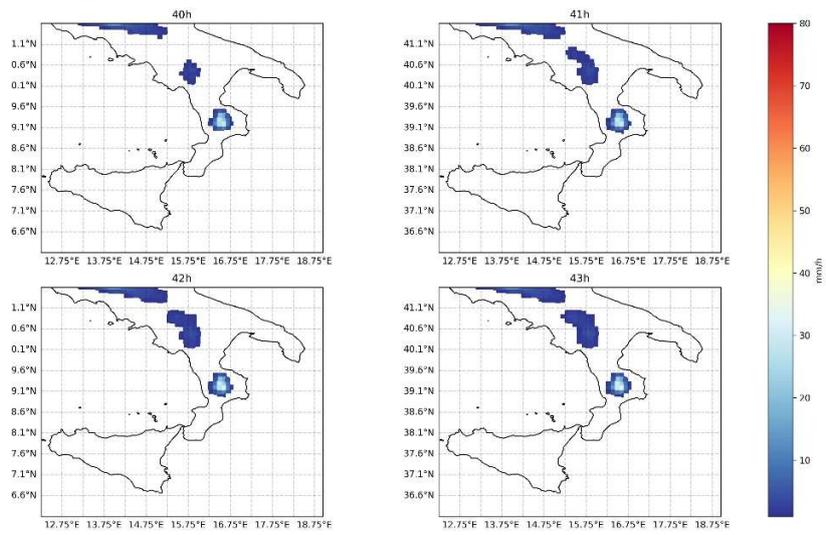
Rainfall from 08/02/1999 at 12:00 to Rainfall from 08/02/1999 at 15:00



Rainfall from 08/02/1999 at 12:00 to Rainfall from 08/02/1999 at 15:00



Rainfall from 08/02/1999 at 16:00 to Rainfall from 08/02/1999 at 19:00



Rainfall from 08/02/1999 at 20:00 to Rainfall from 08/02/1999 at 23:00

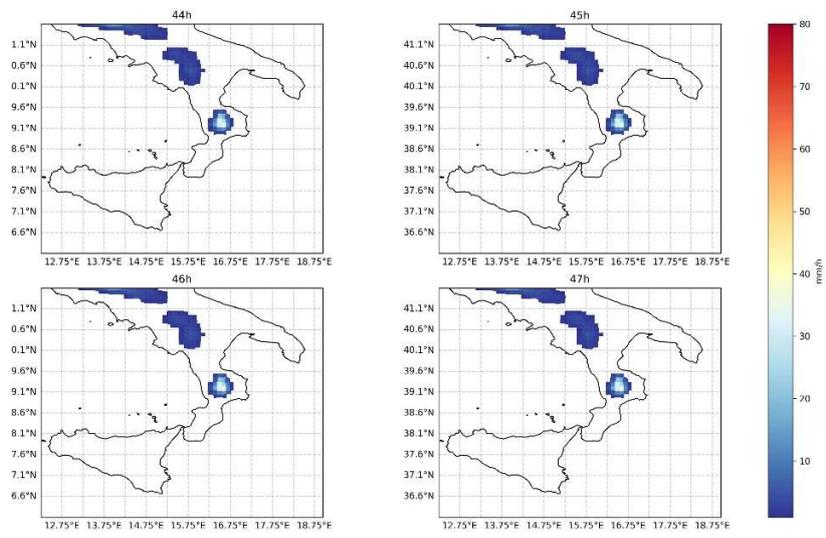


Figura 46- Campi di Previsione delle Precipitazione modello Idrologico

11.2. STEP 1

Diagramma di flusso: Modello_Idraulico_v2

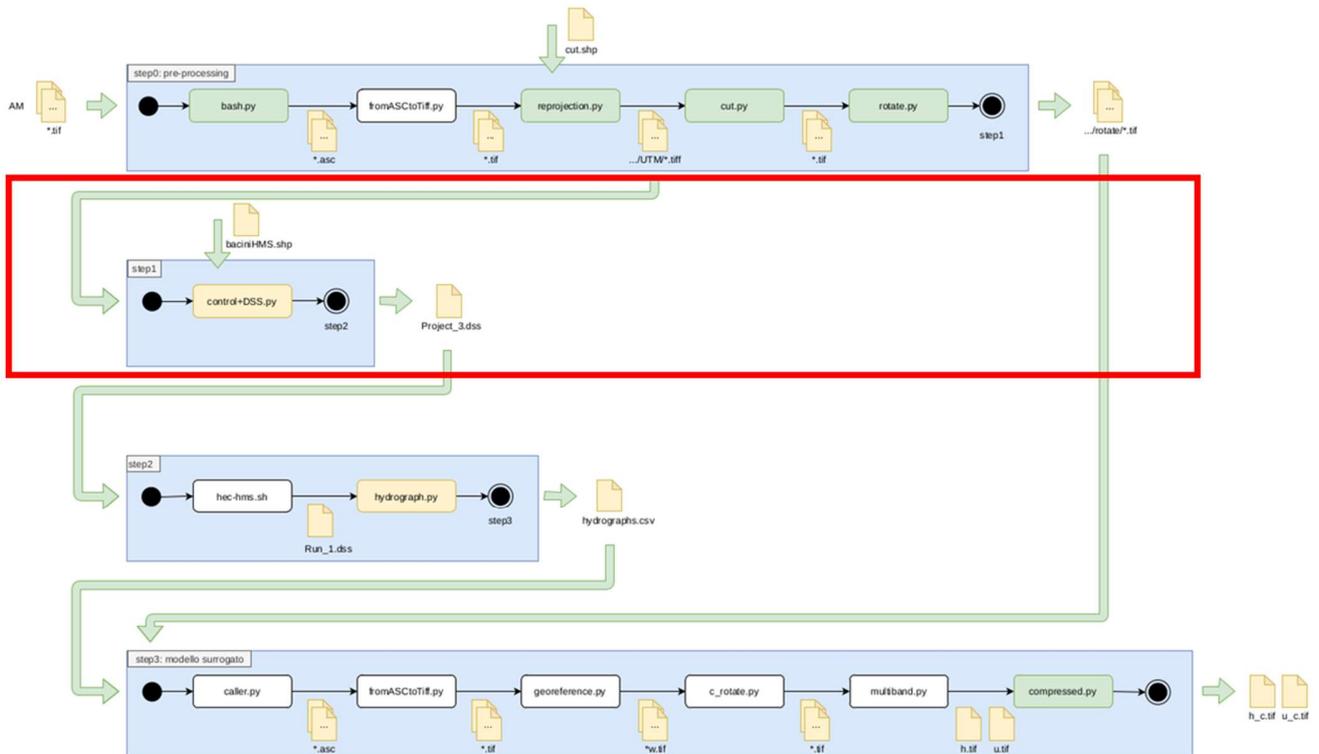


Figura 47-Step 2

Una volta generati i campi di precipitazione nello Step 0, questi vengono elaborati ed associati al modello idrologico. In questa fase uno specifico tool -Control+DSS.py- estrae per ogni sottobacino che costituisce il modello idrologico il valore medio della precipitazione per ogni istante temporale in modo da generare un ietogramma di pioggia per ogni singolo sottobacino e allo stesso tempo definire una distribuzione di pioggia per l'intero modello.

Contestualmente alla fase appena descritta lo stesso tool predispone la scrittura di 2 files, il primo, il file Control del modello idrologico nel quale vengono definiti i parametri di inizio e fine della simulazione, figura 48.

```

Control: Control 1
Last Modified Date: 14 April 2024
Last Modified Time: 20:26:33
Version: 4.10
Time Zone ID: Europe/Berlin
Time Zone GMT Offset: 3600000
Start Date: 6 February 1999
Start Time: 24:00
End Date: 8 February 1999
End Time: 23:00
Time Interval: 60
End:

```

Figura 48-Esemio file Control

il secondo, il file Project.dss , nel quale vengono scritti gli ietogrammi per ognuno dei sottobacini ,di seguito in Figura 49 sono riportati gli ietogrammi per l'intervallo di previsione dal 27/02/2024 alle ore 00:00 fino al 28/02/2024 alle ore 23:00.

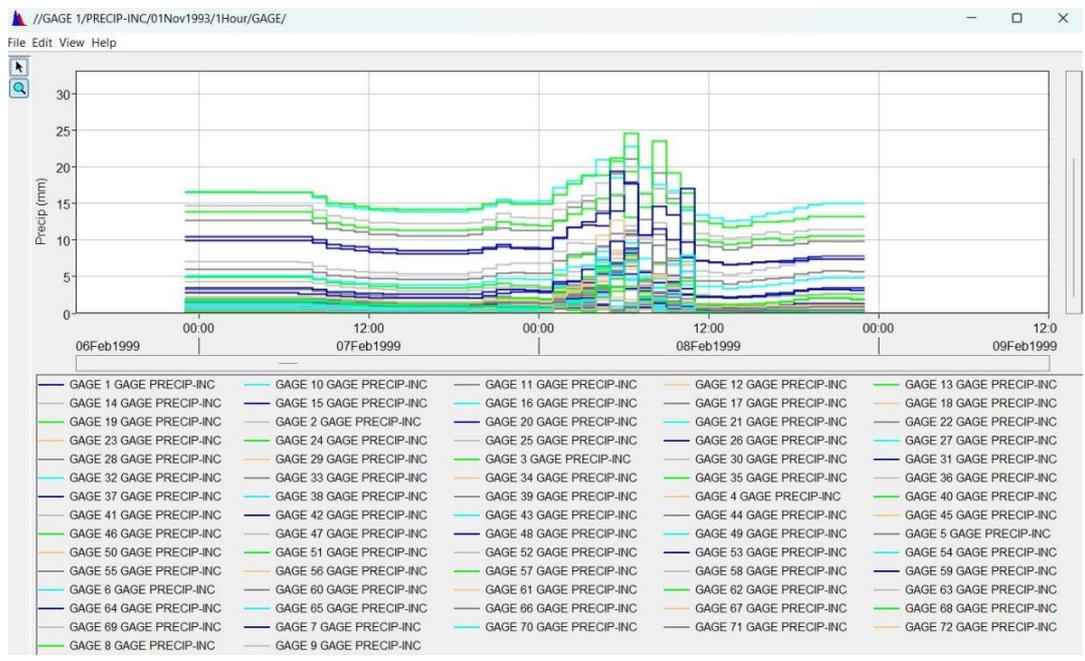


Figura 49-Ietogrammi sottobacini

11.3. STEP 2

Diagramma di flusso: Modello_Idraulico_v2

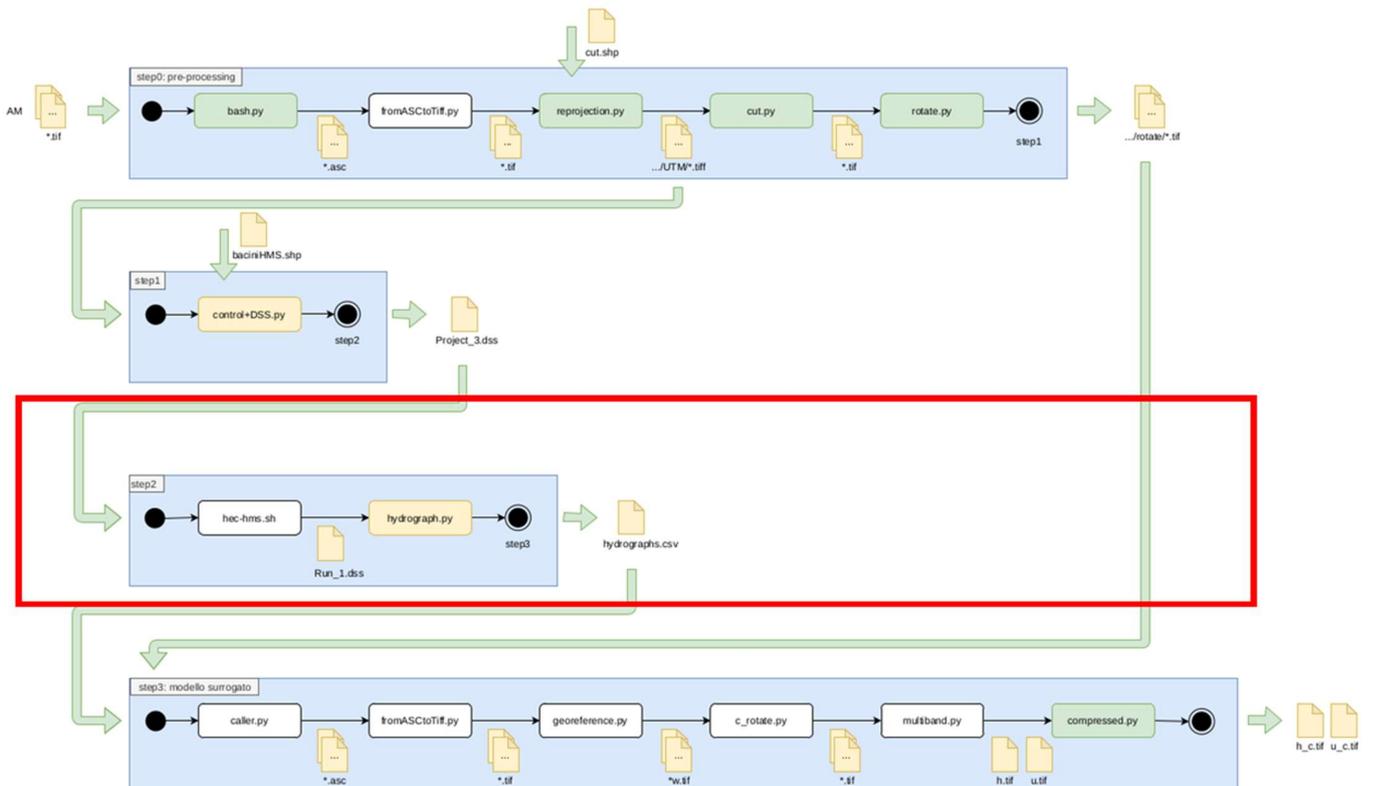


Figura 50-Step 3

In questa fase, sulla base degli input generati nello Step 1, viene avviato il primo modello che compone il sistema di allerta, nello specifico il modello idrologico. Completata la simulazione idrologica un nuovo tool estrae due idrogrammi, uno per il Fiume Crati ed uno per il Fiume Coscile. Gli idrogrammi così ottenuti, figura 51, saranno utilizzati nel successivo Step 3 per imporre le condizioni al contorno di monte per il dominio di calcolo del modello surrogato.

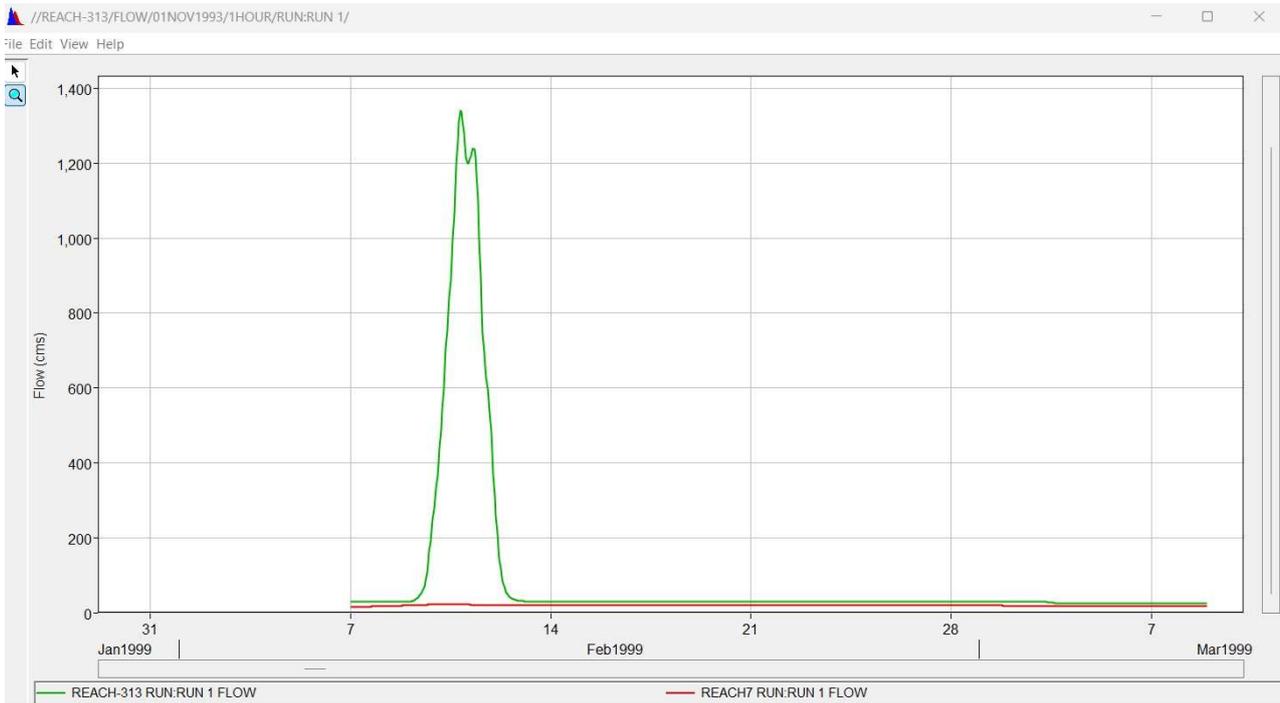


Figura 51- idrogrammi di uscita dal modello idrologico -previsione

11.4. STEP 3

Diagramma di flusso: Modello_Idraulico_v2

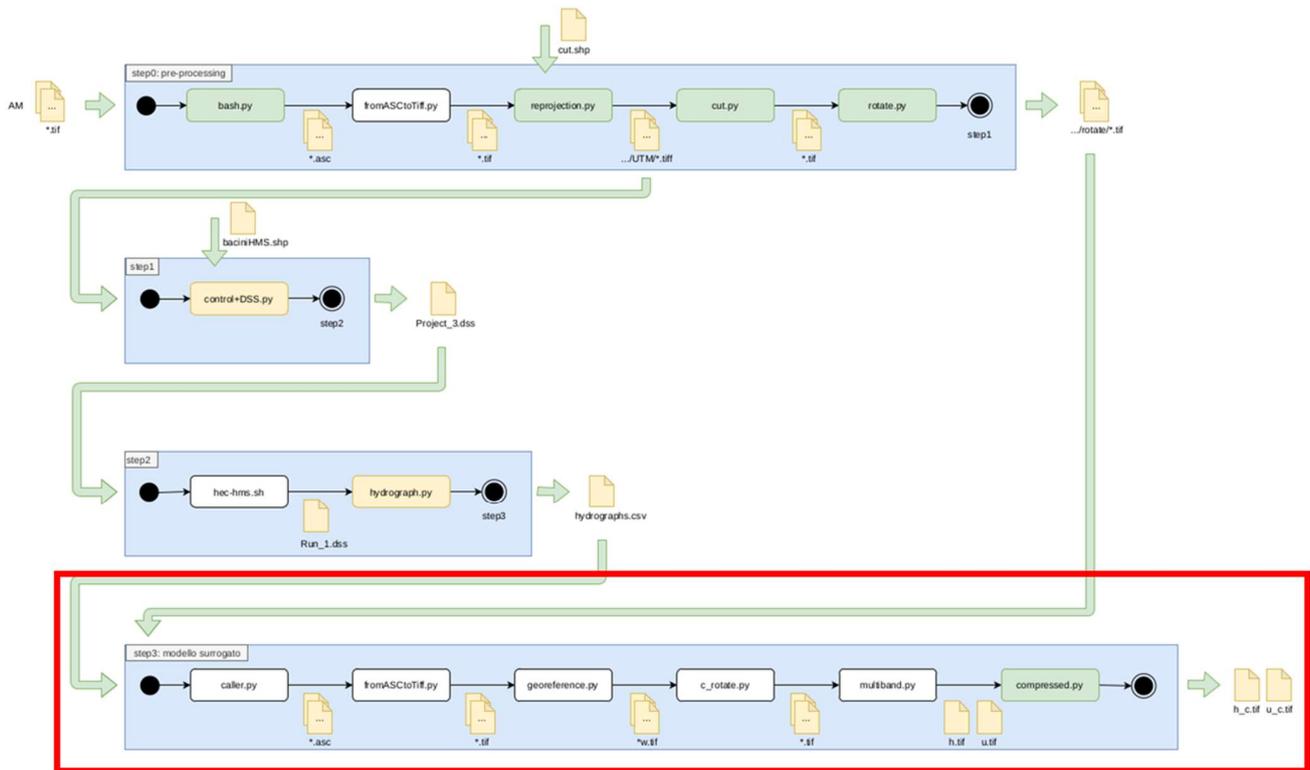


Figura 52- Step 3

Lo Step 3 riguarda l'ultima fase del sistema di allerta rapido dove all'interno è presente il modello surrogato che ha il compito di determinare sulla base delle precipitazioni ottenute nello Step 0 e sugli idrogrammi ottenuti nello Step 2: a) le possibili aree di allagamento in condizione di non rottura arginale del Fiume Crati per il Sito Archeologico di Sibari e restituire una mappa dei possibili allagamenti legata ai tiranti ed una legata alle velocità della corrente; b) determinare una probabilità di rottura arginale sulla base dei tiranti che si instaurano nel tratto di Fiume Crati individuato nel paragrafo 10.4 ; c) sulla base della probabilità di rottura arginale determinare le possibili aree di allagamento legate alla rottura dell'argine del Fiume Crati, così da quantificare i possibili impatti sul Sito Archeologico di Sibari, restituendo le

possibili mappe di allagamento relative ai tiranti. Successivamente alle elaborazioni del modello surrogato tutta una serie di codici , quali : 1) fromAsctoTiff.py; 2) georeferce.py; 3) c_rotate.py; 4) multiband.py , hanno il compito di: a)trasformare le mappe generate dal modello surrogato da formato ASC in formato TIFF; b) georeferenziare le mappe in UTM-WGS84 FUSO 33 N; c) applicare una contro-rotazione alle mappe in modo da poterle visualizzare in modo corretto in ambiente GIS; d) aggregare tutti gli istanti temporali delle mappe per ogni componente (tirante e velocità) al fine di ottenere un unico raster multiband. Di seguito in figura 53 sono stati estrapolati alcuni istanti rappresentati la previsione dei tiranti derivanti dal modello surrogato, per gli stessi istanti temporali la figura 54 la previsione della distribuzione delle velocità.

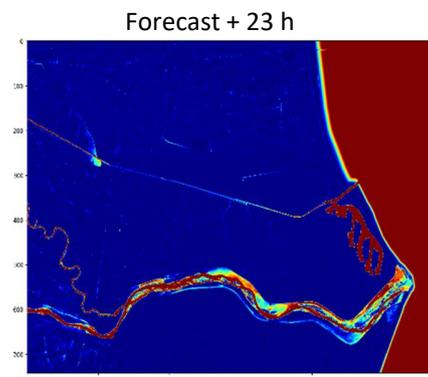
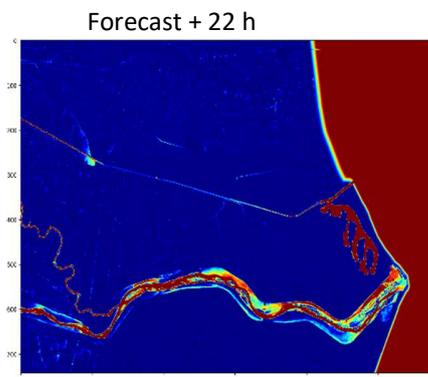
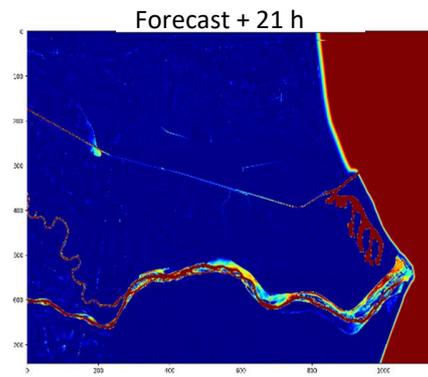
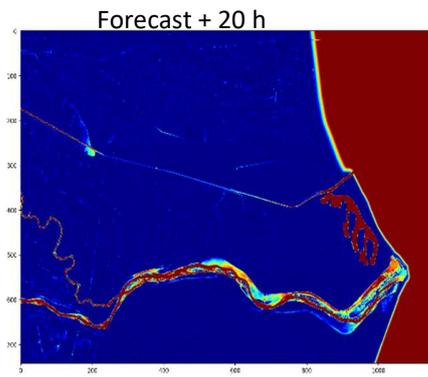


Figura 53- Previsione campi tiranti- modello surrogato

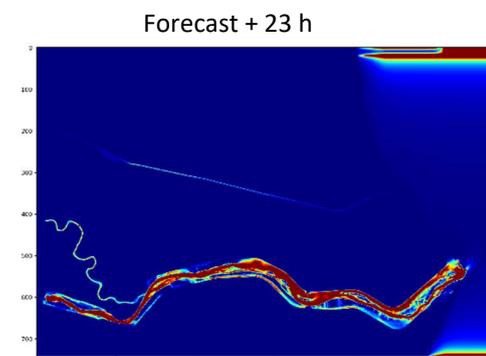
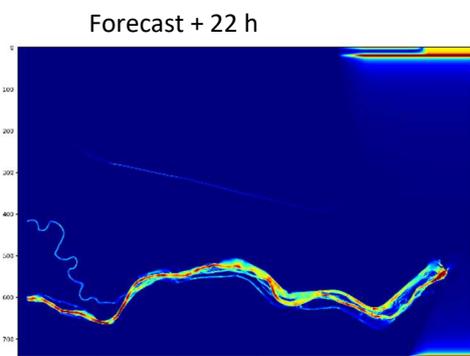
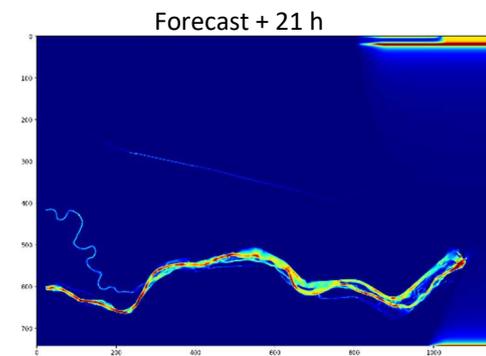
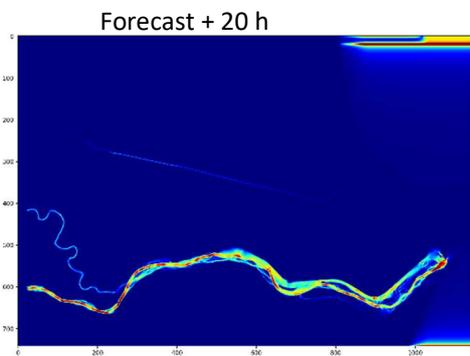


Figura 54-Previsione campi velocità- modello surrogato

A seguito dell'esecuzione del primo modello di previsione , come già evidenziato il modello surrogato calcola la probabilità di rottura dell'argine in destra idraulica del fiume Crati così come definito nel paragrafo 10.4 e successivamente restituisce una nuova serie di mappe relativi ai tiranti e le velocità che si potrebbero verificare sul Parco Archeologico di Sibari a seguito dell'esondazione del fiume Crati, la figura 56 mostra alcuni istanti dei possibili campi di tiranti a seguito di rottura arginale.

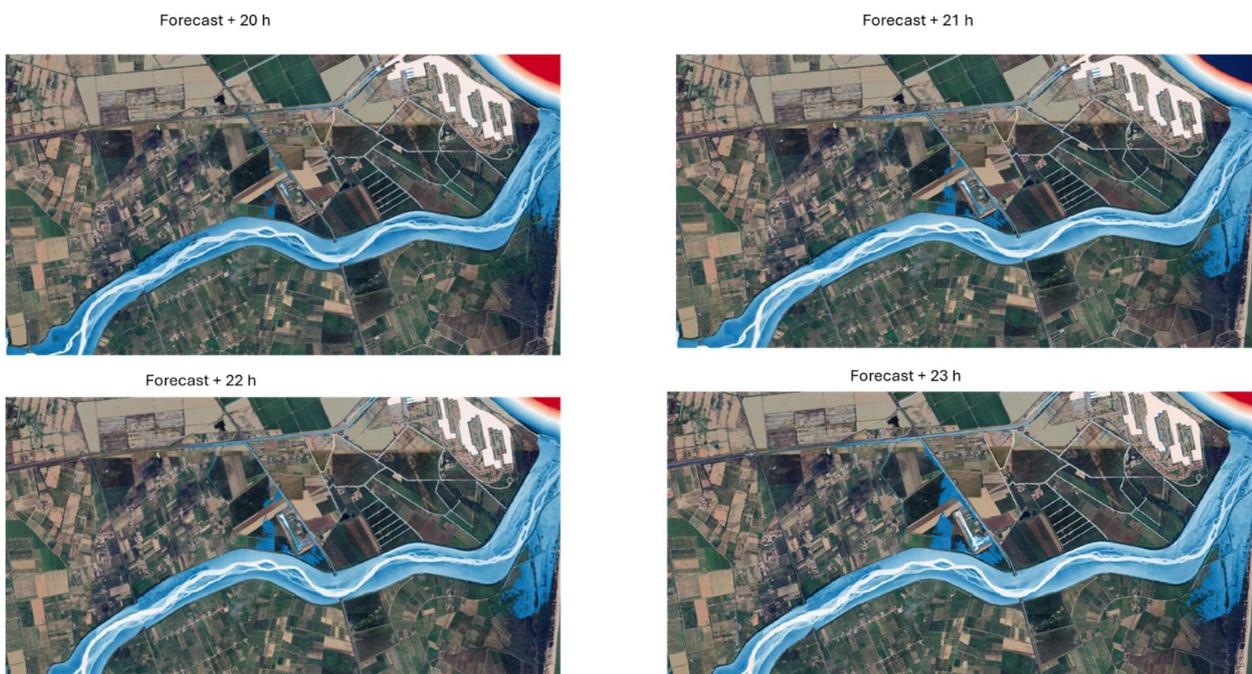


Figura 56 Previsione campi tiranti- modello surrogato- modalità rottura argine

12. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il sistema di allerta rapido implementato per il Parco Archeologico di Sibari ha dimostrato di essere un efficace e tempestivo strumento nell'identificare rapidamente le aree più suscettibili agli allagamenti. Questo avviene tramite l'utilizzo di dati quali le precipitazioni e i diagrammi di piena in ingresso, e produce in output mappe dettagliate degli allagamenti. I risultati ottenuti tramite il modello surrogato, addestrato con un'ampia gamma di simulazioni provenienti da un modello bidimensionale per le acque basse, e utilizzando dati sulle precipitazioni da eventi reali passati, risultano essere paragonabili a quelli ottenibili con gli approcci più tradizionali basati su simulazioni numeriche 2D.

Tuttavia, dal punto di vista operativo, attualmente il sistema di allerta raggiunge solo parte del suo massimo potenziale. Questo è dovuto al fatto che la sua operatività è legata esclusivamente ai dati in ingresso forniti dal modello di previsione climatica COSMO-IT dell'Aeronautica Militare riguardanti le precipitazioni nevose e piovose. Nonostante ciò, fin dalla fase di progettazione, il sistema è stato concepito per essere in grado di lavorare con una vasta gamma di dati al fine di renderlo più flessibile e adattabile alle reali condizioni atmosferiche.

In particolare, se si disponesse di dati in tempo reale, il sistema può integrare informazioni provenienti da diverse fonti, come stazioni pluviometriche o dati radar meteorologici con le previsioni dell'Aeronautica Militare al fine di migliorare la precisione delle previsioni delle dinamiche idrauliche. Inoltre, il sistema di allerta, soprattutto il modello idrologico, può assimilare dati provenienti da satelliti per stimare l'umidità del suolo iniziale, necessaria per impostare correttamente i parametri iniziali per l'infiltrazione, o utilizzare misurazioni di portata provenienti da stazioni di monitoraggio fluviale per determinare con precisione le portate iniziali.

Sviluppi futuri riguardanti l'analisi del rischio idraulico in ambito archeologico riguardano un altro aspetto che in questa prima fase del progetto non è stato completamente analizzato, poiché legato a studi specialistici effettuati da parte di archeologici. I risultati ottenuti pur restituendo informazioni sui tiranti e velocità della corrente, tuttavia, non danno informazioni sul rischio idraulico che ogni singolo elemento architettonico incorre per il verificarsi di determinati valori di tirante e velocità. Al fine di rendere l'analisi del rischio archeologico più dettagliata in ambito valutativo, l'analisi implica un dettagliato censimento dei beni, al fine di creare una ricomposizione scientifica dei dati per arrivare ad una ricostruzione territoriale nelle diverse epoche sulla base della quale poter fare le relative previsioni di sussistenza. La valutazione dell'impatto archeologico dovrà essere concepita come una procedura che determina in anticipo quali modifiche potrebbero essere inglobate nella componente ambientale archeologica a seguito di un certo intervento antropico. Nella definizione del rischio archeologico è possibile utilizzare l'approccio proposto da G. Campeol e C. Pizzinato (2007), dove la valutazione di impatto di un sito archeologico è divisa in diverse fasi:

1. Analisi: studio delle epoche e delle fasi storicamente e archeologicamente rilevanti;
2. Sensibilità: valutazione quantitativo/qualitativo delle diverse epoche storiche;
3. Valutazione del rischio: valutazione quantitativo/qualitativo del rischio.

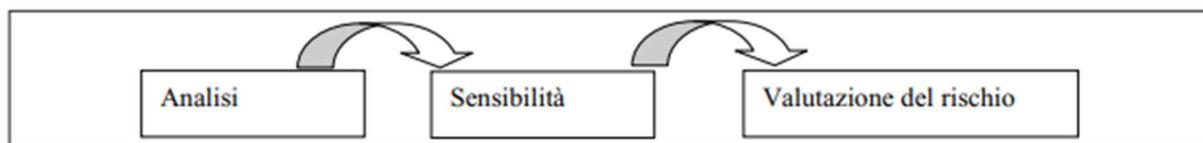


Figura 57-Fasi di valutazione di impatto archeologi (G. Campeol, C. Pizzinato)

Nella fase di analisi, si valutano le epoche storiche di maggior interesse dal punto di vista storico-archeologico; successivamente, viene raccolto ed analizzato tutto il materiale disponibile sia esso edito o inedito, carte topografiche o relazioni tecnico-scientifico riguardanti gli scavi.

Nella fase di sensibilità si ha come obiettivo quello di analizzare la sensibilità degli elementi architettonici in base al periodo storico. “Per sensibilità si intende il valore di unicità che viene conferito all’oggetto appartenente ad un determinato periodo storico, utilizzando come parametri l’antichità, la rarità e il livello di conservazione, nonché il pregio artistico”.

Naturalmente i parametri vanno rapportati al singolo bene in quanto un oggetto può essere un’unicità in un contesto ed essere comune in un altro. Per evitare errori di valutazione è utile individuare una serie di indicatori dei diversi livelli di sensibilità che può assumere un bene definendo in seguito una gerarchia qualitativa dei vari livelli. Tali indicatori saranno:

- Rarità
- Unicità
- Antichità
- Stato di conservazione
- Pregio artistico

A tali indici verrà assegnato un valore numerico da 1 a 4:

Indicatore	Valore numerico			
Rarità	4 - Molto raro	3 - Piuttosto raro	2- Discretamente raro	1 - Comune
Unicità	4 - Unico		1 - Non unico	
Antichità	4 - Preistoria	3 - età classica	2 - medioevo	1 - Post medioevo
Stato di conservazione	4 - Ottimo	3 - Buono	2 - Discreto	1 - Pessimo
Pregio artistico	4 - Molto alto	3 - Alto	2 - Medio	1 - Basso

Tabella 16-4 Valori numeri indicatori di sensibilità archeologica (G. Campeol, C. Pizzinato, 2007)

Dalla somma dei valori ottenuti da ogni indicatore può essere impostata una gerarchia del livello di sensibilità archeologica:

Sensibilità	Punteggio ottenuto
Molto bassa	4
Bassa	Da 5 a 9
Media	Da 10 a 14
Alta	Da 15 a 19
Molto alta	20

Tabella 17-Livello di sensibilità ottenuta e relativo valore numerico (G. Campeol, C. Pizzinato, 2007)

Il livello di rischio può essere definito in un range che va da 0 a 3 dove:

- Rischio nullo = 0
- Rischio basso = 1
- Rischio medio = 2
- Rischio alto = 3

Ogni epoca storica può essere rappresentata da un rischio parziale a cui viene attribuito un range di valori tra 0 e 3 definito a seconda delle caratteristiche del sito: ad esempio per siti di epoca romana il valore 0 viene attribuito se nel sito non esistono riferimenti all'epoca di appartenenza, mentre il valore 3 viene attribuito ad una zona fortemente contestualizzata e quindi densa di segni identificativi. Per ogni periodo storico può essere calcolato il rischio totale come:

$$R_T = S \cdot R_p$$

Dove con S e R_p sono stati indicati la sensibilità e il rischio parziale, rispettivamente.

Dalla somma del rischio totale per ogni periodo storico si ottiene il rischio totale cumulativo:

$$R_{TC} = \sum R_T$$

In base al valore degli elementi precedentemente introdotti si ha che il rischio totale cumulativo può assumere valori nel range 0 ÷ 60 ottenendo quattro diversi livelli a cui corrispondono altrettante azioni che devono essere attuate in campo archeologico:

Livello aggregato di Rischio Totale Cumulativo	Indagini archeologiche
Rischio Totale Cumulativo Alto = 41÷60;	Scavo archeologico (stratigrafico)
Rischio Totale Cumulativo Medio = 21÷40;	Indagini preventive (survey, carotaggi, saggi di scavo, georadar, prospezioni geofisiche e geochimiche), in base alle indicazioni motivate delle autorità competenti
Rischio Totale Cumulativo Basso = 1÷20;	Assistenza archeologica nel corso del cantiere
Rischio Totale Cumulativo Nullo = 0.	Nessuna attività investigativa archeologica

Tabella 18-Livelli di RTC e azioni attuative (Campeol G., Pizzinato C., 2007)

Come detto precedentemente, per la gestione e la tutela del patrimonio archeologico è importante considerare la varietà dei resti archeologici e trovare un compromesso nell'uso del territorio che contiene lo specifico sito.

Successivamente C. Pizzinato, partendo dalle conclusioni tratte nella pubblicazione del 2007, propone delle modifiche ai criteri di valutazione del rischio archeologico. In primo luogo, propone di unire gli indicatori di "rarietà" e "unicità" in un unico parametro chiamato "rarietà in relazione all'area e al periodo storico"; inoltre viene totalmente eliminato il "pregio artistico" in quanto ai fini della ricostruzione storica assumono lo stesso valore sia elementi, oggetti, di uso comune che quelli preziosi. Si può parlare, quindi, di potenziale e di valore di un sito: nel primo caso vengono definiti gli indicatori utili nello stabilire le probabilità di rinvenire in un preciso luogo un deposito archeologico; viene calcolato sulla base di:

- Dati storici disponibili;
- Densità di reperti individuati nelle indagini precedenti.
- Valore associativo;

- Attendibilità delle misurazioni.

Altre caratteristiche fondamentali di un sito, continua C. Pizzinato, sono la posizione del sito dall'area di progetto, la vulnerabilità del sito e infine le dimensioni per il valore archeologico interviene un ulteriore parametro, denominato "stato di conservazione" di fondamentale importanza perché si tratta di un valore che dovrà essere continuamente aggiornato in quanto i siti archeologici sono soggetti ad usura e perdono di valore nel corso degli anni e il loro decadimento è soggetto anch'esso a valutazione.

criteri di definizione del valore di un contesto archeologico				
rarietà in relazione all'area e al periodo storico	unico 4	raro 3	conosciuto 2	comune 1
stato di conservazione	ottimo 4	buono 3	discreto 2	pessimo 1
criteri di definizione del potenziale				
dati storici	alta 4	media 3	bassa 2	molto bassa 1
densità di reperti	alta 4	media 3	bassa 2	molto bassa 1
valore associativo	alto 4	medio 3	basso 2	molto basso 1
attendibilità di lettura	alta 4	media 3	bassa 2	molto bassa 1
criteri di definizione del rischio/probabilità				
vulnerabilità	alta 4	media 3	bassa 2	molto bassa 1
posizione	coincidente 4	contigua (100 m) 3	limitrofa (1 km) 2	lontana (2 km) 1

dimensioni del sito/deposito; monumentalità	molto esteso/ non amovibile 4	esteso/ non amovibile 3	contenuto/ amovibile 2	molto contenuto/ amovibile 1
---	----------------------------------	----------------------------	---------------------------	---------------------------------

Tabella 19-parametri e relativi punteggi (D. Calaon, C. Pizzinato, 2011)

Dopo aver definito i punteggi di ogni parametro si può passare al calcolo del rischio totale cumulativo (in analogia con la precedente proposta di Campeol, Pizzinato nel 2007), questa volta, per ogni area o sito, dato dal prodotto tra la somma del potenziale e del valore archeologico e il rischio:

$$R_{TC} = (v + p) \cdot r$$

Il range del R_{TC} è $0 \div 288$:

- $0 \rightarrow$ rischio totale cumulativo nullo;
- $1 - 96 \rightarrow$ rischio totale cumulativo basso;
- $96 - 192 \rightarrow$ rischio totale cumulativo medio;
- $192 - 288 \rightarrow$ rischio totale cumulativo alto.

livello aggregato di rischio totale cumulativo	indagini archeologiche
rischio alto	scavo archeologico preventivo
rischio medio	indagini archeologiche preventive (survey, carotaggi, saggi di scavo, georadar, prospezioni geofisiche e geochimiche)
rischio basso	assistenza archeologica ai lavori di scavo
rischio nullo	nessuna attività archeologica

Tabella 20-livelli ed azioni possibili (D. Calaon, C. Pizzinato, 2011)

Una possibile soluzione che propone C. Pizzinato è quella della compilazione di una scheda di valutazione da parte dell'archeologo. Quest'ultimo deve essere in grado di attribuire un certo valore ai vari parametri che automaticamente si tradurranno in una valutazione complessiva di rischio. Per la compilazione di tale scheda vanno rispettate delle condizioni minime:

- I valori di rischio sono attribuiti da un preciso piano o progetto;
- I valori fanno riferimento ad un'analisi di un'area sufficientemente ampia, cioè non intervengono all'interno di singoli siti.

Sono state fornite, inoltre, diverse indicazioni:

- Definire l'area di studio;
- Definire le caratteristiche del sito fondamentali;
- Numerare le singole unità archeologiche (per un'unità archeologica si intendono i singoli elementi archeologici presenti in un territorio);
- Nel caso di sovrapposizione di aree, queste vanno segnalate;
- Vanno compilati tutti i punti della scheda anche senza certezza assoluta della risposta.

13. BIBLIOGRAFIA

1. Antonioli, F., Anzidei, M., Amorosi, A., Presti, V. L., Mastronuzzi, G., Deiana, G., ... & Vecchio, A. (2017). Sea-level rise and potential drowning of the Italian coastal plains: Flooding risk scenarios for 2100. *Quaternary Science Reviews*, 158, 29-43.
2. Cioffi, F.; Gallerano, F. Management strategies for the control of eutrophication processes in Fogliano lagoon (Italy): A long-term analysis using a mathematical model. *Appl. Math. Model.* 2001, 25, 385–426.
3. Cioffi, F., De Bonis Trapella, A., & Conticello, F. R. (2018). Efficiency assessment of existing pumping/hydraulic network systems to mitigate flooding in low-lying coastal regions under different scenarios of sea level rise: The Mazzocchio area study case. *Water*, 10(7), 820.
4. Cioffi, F., De Bonis Trapella, A., Giannini, M., & Lall, U. (2022). A Flood Risk Management Model to Identify Optimal Defence Policies in Coastal Areas Considering Uncertainties in Climate Projections. *Water*, 14(9), 1481.
5. Conticello, F., Cioffi, F., Merz, B., & Lall, U. (2018). An event synchronization method to link heavy rainfall events and large-scale atmospheric circulation features. *International Journal of Climatology*, 38(3), 1421-1437.
6. Cioffi F., Conticello F., Lall U., Merz B., Telesca V. (2018). Analisi delle configurazioni atmosferiche che determinano eventi di pioggia intensa nella regione lazio. proiezioni per il XXI secolo. *L'Acqua*, n. 2 pag. 23
7. DeConto, R. M., & Pollard, D. (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531(7596), 591–597. <https://doi.org/10.1038/nature17145>
8. Eamon, Christopher D., Patrick Fitzpatrick, and Dennis D. Truax. "Observations of structural damage caused by Hurricane Katrina on the Mississippi Gulf Coast." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 21, no. 2 (2007): 117-127
9. Lionello, Piero, Robert J. Nicholls, Georg Umgiesser, and Davide Zanchettin. "Venice flooding and sea level: past evolution, present issues, and future projections (introduction to the special issue)." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21, no. 8 (2021): 2633-2641.
10. Lionello, Piero, and Luca Scarascia. "The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming." *Regional Environmental Change* 18.5 (2018): 1481-1493
11. Lionello, Piero, and Luca Scarascia. "The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast." *Regional Environmental Change* 20.1 (2020): 1-16
12. Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., ... Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2, 383–406
13. Mitra, S., & Srivastava, P. (2021). Comprehensive Drought Assessment Tool for Coastal Areas, Bays, and Estuaries: Development of a Coastal Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(1), 04020055.
14. Scotti, Vincenzo, Mario Giannini, and Francesco Cioffi. "Enhanced flood mapping using synthetic aperture radar (SAR) images, hydraulic modelling, and social media: A case study of Hurricane Harvey (Houston, TX)." *Journal of Flood Risk Management* 13, no. 4 (2020): e12647.
15. Ward P.J., *The geography of future water challenges*, 2018
16. Ward, P. J., de Ruiter, M. C., Mård, J., Schröter, K., Van Loon, A., Veldkamp, T., ... & Wens, M. (2020). The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies. *Water Security*, 11, 100070.
17. Xian, Siyuan, Ning Lin, and Adam Hatzikyriakou. "Storm surge damage to residential areas: a quantitative analysis for Hurricane Sandy in comparison with FEMA flood map." *Natural Hazards* 79, no. 3 (2015): 1867-1888

18. Asadi Zarch, M. A., Sivakumar, B. & Sharma, A. (2015), Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526(183-195).
19. Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A. & Svensson, C. (2016), From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2483-2505.
20. Bhunia, P., Das, P. & Maiti, R. (2020), Meteorological drought study through SPI in three drought prone districts of West Bengal, India. *Earth Systems and Environment*, 4(1), 43-55.
21. Bonaccorso, B., Cancelliere, A. & Rossi, G. (2015), Probabilistic forecasting of drought class transitions in Sicily (Italy) using standardized precipitation index and North Atlantic oscillation index. *Journal of Hydrology*, 526(136-150).
22. Cammalleri, C., Spinoni, J., Barbosa, P., Toreti, A. & Vogt, J. V. (2022), The effects of non-stationarity on SPI for operational drought monitoring in Europe. *International Journal of Climatology*, 42(6), 3418-3430.
23. Cioffi, F., Conticello, F., Lall, U., Marotta, L. & Telesca, V. (2017), Large scale climate and rainfall seasonality in a Mediterranean Area: Insights from a non-homogeneous Markov model applied to the Agro-Pontino plain. *Hydrological Processes*, 31(3), 668-686.
24. Conticello, F., Cioffi, F., Merz, B. & Lall, U. (2018), An event synchronization method to link heavy rainfall events and large-scale atmospheric circulation features. *International Journal of Climatology*, 38(3), 1421-1437.
25. Hochman, A., Marra, F., Messori, G., Pinto, J. G., Raveh-Rubin, S., Yosef, Y. & Zittis, G. (2022), Extreme weather and societal impacts in the eastern Mediterranean. *Earth System Dynamics*, 13(2), 749-777.
26. Insua-Costa, D., Senande-Rivera, M., Llasat, M. C. & Miguez-Macho, G. (2022), A global perspective on western Mediterranean precipitation extremes. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1), 9.
27. Liberato, M. L. R., Montero, I., Gouveia, C., Russo, A., Ramos, A. M. & Trigo, R. M. (2021), Rankings of extreme and widespread dry and wet events in the Iberian Peninsula between 1901 and 2016. *Earth System Dynamics*, 12(1), 197-210.
28. Livada, I. & Assimakopoulos, V. D. (2007), Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology*, 89(3), 143-153.
29. Mishra, A. K., Singh, V. P. & Desai, V. R. (2009), Drought characterization: a probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(1), 41-55.
30. Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Meehl, G., Moss, R., Bauer, S. E., Boucher, O., Brovkin, V., Byun, Y. H., Dix, M., Gualdi, S., Guo, H., John, J. G., Kharin, S., Kim, Y., Koshiro, T., Ma, L., Olivié, D., Panickal, S., Qiao, F., Rong, X., Rosenbloom, N., Schupfner, M., Séférian, R., Sellar, A., Semmler, T., Shi, X., Song, Z., Steger, C., Stouffer, R., Swart, N., Tachiiri, K., Tang, Q., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E., Wyser, K., Xin, X., Yang, S., Yu, Y. & Ziehn, T. (2021), Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth Syst. Dynam.*, 12(1), 253-293.
31. Trambly, Y. & Somot, S. (2018), Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289-302.
32. Zittis, G., Bruggeman, A. & Lelieveld, J. (2021), Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean. *Weather and Climate Extremes*, 34(100380).

33. Zanchetta AD, Coulibaly P. 2020. Recent advances in real-time pluvial flash flood forecasting. *Water*. 12(2):570. doi: 10.3390/w12020570.
34. Sokol Z, Szturc J, Orellana-Alvear J, Popová J, Jurczyk A, Céleri R. 2021. The role of weather radar in rainfall estimation and its application in meteorological and hydrological modelling—a review. *Remote Sens*. 13(3):351. doi: 10.3390/rs13030351.
35. Hapuarachchi H, Wang Q, Pagano T. 2011. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes*. 25(18):2771–2784. doi: 10.1002/hyp.v25.18.
36. Barr S, Johnson S, Ming X, Peppas M, Dong N, Wen Z, Robson C, Smith L, James P, Wilkinson D. 2020. Flood-prepared: a nowcasting system for real-time impact adaptation to surface water flooding in cities. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inform Sci*. 6:9–15.
37. Seo DJ, Habib E, Andrieu H, Morin E. 2015. Hydrologic applications of weather radar. *J Hydrol*. 531:231–233. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.010.
38. Prudden R, Adams S, Kangin D, Robinson N, Ravuri S, Mohamed S, Arribas A. 2020. A review of radar-based nowcasting of precipitation and applicable machine learning techniques. *arXiv preprint arXiv:200504988*.
39. Franch G, Nerini D, Penedesini M, Coviello L, Jurman G, Furlanello C. 2020. Precipitation nowcasting with orographic enhanced stacked generalization: improving deep learning predictions on extreme events. *Atmosphere*. 11(3):267. doi: 10.3390/atmos11030267
40. Henonin J, Russo B, Mark O, Gourbesville P. 2013. Real-time urban flood forecasting and modelling—a state of the art. *J Hydroinform*. 15(3):717–736. doi: 10.2166/hydro.2013.132
41. Apel H, Martínez Trepát O, Hung NN, Chinh DT, Merz B, Dung NV. 2016. Combined fluvial and pluvial urban flood hazard analysis: concept development and application to Can Tho City, Mekong Delta, Vietnam. *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 16(4):941–961. doi: 10.5194/nhess-16-941-2016
42. Smith LS, Liang Q, Quinn PF. 2015. Towards a hydrodynamic modelling framework appropriate for applications in urban flood assessment and mitigation using heterogeneous computing. *Urban Water J*. 12(1):67–78. doi: 10.1080/1573062X.2014.938763
43. Glenis V, McGough AS, Kutija V, Kilsby C, Woodman S. 2013. Flood modelling for cities using cloud computing. *J Cloud Comput: Adv Syst Appl*. 2(1):7. doi: 10.1186/2192-113X-2-7
44. Mosavi A, Ozturk P, Chau Kw. 2018. Flood prediction using machine learning models: literature review. *Water*. 10(11):1536. doi: 10.3390/w10111536
45. Kabir S, Patidar S, Xia X, Liang Q, Neal J, Pender G. 2020. A deep convolutional neural network model for rapid prediction of fluvial flood inundation. *J Hydrol*. 590:125481. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125481
46. Hosseiny H, Nazari F, Smith V, Nataraj C. 2020. A framework for modeling flood depth using a hybrid of hydraulics and machine learning. *Sci Rep*. 10(1):1–14. doi: 10.1038/s41598-020-65232-5
47. Bermúdez M, Ceal L, Puertas J. 2019. A rapid flood inundation model for hazard mapping based on least squares support vector machine regression. *J Flood Risk Manag*. 12(S1):e12522. doi: 10.1111/jfr3.v12.S1
48. Bignami DF, Rosso R, Sanfilippo U. 2019. *Flood proofing in urban areas*. Springer.
49. Issermann M, Chang FJ, Jia H. 2020. Efficient urban inundation model for live flood forecasting with cellular automata and motion cost fields. *Water*. 12(7):1997. doi: 10.3390/w12071997
50. Chang LC, Amin MZM, Yang SN, Chang FJ. 2018. Building ANN-based regional multi-step-ahead flood inundation forecast models. *Water*. 10(9):1283. doi: 10.3390/w10091283

51. Chang LC, Chang FJ, Yang SN, Kao I, Ku YY, Kuo CL, Amin IM. 2019. Building an intelligent hydroinformatics integration platform for regional flood inundation warning systems. *Water*. 11(1):9. doi: 10.3390/w11010009
52. Chang LC, Shen HY, Chang FJ. 2014. Regional flood inundation now cast using hybrid som and dynamic neural networks. *J Hydrol*. 519:476–489. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.07.036
53. Chang LC, Shen HY, Wang YF, Huang JY, Lin YT. 2010. Clustering-based hybrid inundation model for forecasting flood inundation depths. *J Hydrol*. 385(1–4):257–268. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.02.028
54. Debbarma S, Choudhury P, Roy P, Kumar R. 2019. Analysis of precipitation variability using memory based artificial neural networks. *Int J Appl Metaheuristic Comput*. 10(1):29–42. doi: 10.4018/IJAMC
55. Kim SH, Boukouvala F. 2019. Machine learning-based surrogate modeling for data-driven optimization: a comparison of subset selection for regression techniques. *Optim Lett*. 14:1–22.
56. Ghalkhani H, Golian S, Saghafian B, Farokhnia A, Shamseldin A. 2013. Application of surrogate artificial intelligent models for real-time flood routing. *Water Environ J*. 27(4):535–548. doi: 10.1111/wej.2013.27.issue-4
57. Qian K, Mohamed A, Claudel C. 2019. Physics informed data driven model for flood prediction: application of deep learning in prediction of urban flood development. arXiv preprint arXiv:190810312.
58. Kabir S, Patidar S, Xia X, Liang Q, Neal J, Pender G. 2020. A deep convolutional neural network model for rapid prediction of fluvial flood inundation. *J Hydrol*. 590:125481. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125481
59. Lin GF, Lin HY, Chou YC. 2013. Development of a real-time regional inundation forecasting model for the inundation warning system. *J Hydroinformatics*. 15(4):1391–1407. doi: 10.2166/hydro.2013.202
60. Berkhahn S, Fuchs L, Neuweiler I. 2019. An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods. *J Hydrol*. 575:743–754. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.066
61. Toygar Ö, Adnan A. 2003. Face recognition using PCA, LDA and ICA approaches on colored images. *Istanbul Univ J Elect Electron Eng*. 3(1):735–743.
62. Guerricchio, G., and G. Melidoro. 1975. "Ricerche di geologia applicata all'archeologia della città di Sibaris sepolta." *Geologia Applicata e Idrogeologia* 10: 107–128
63. Cafaro, F., F. Cotecchia, V. Lenti, and R. Pagliarulo. 2013. "Interpretation and Modelling of the Subsidence at the Archeological Site of Sibaris (Southern Italy)." In *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, edited by E. Bilotta, A. Flora, S. Lirer, and C. Viggiani. London: Taylor & Francis Group.
64. Antonioli, F., L. Ferranti, K. Lambeck, S. Kershaw, V. Verrubbi, and G. Dai Pra. 2006. "Late Pleistocene to Holocene Record of Changing Uplift Rates in Southern Calabria and Northeastern Sicily (Southern Italy, Central Mediterranean Sea)." *Tectonophysics* 422: 23–40. doi:10.1016/j.tecto.2006.05.003.
65. Weisberg, S. 1985. *Applied Linear Regression*. New York, NY: John Wiley & Sons. Westaway, R. 1993. "Quaternary Uplift of Southern Italy." *Journal of Geophysical Research* 98: 21741–21772. doi:10.1029/93JB01566
66. Ferranti, L., E. Santoro, E. Mazzella, C. Monaco, and D. Morelli. 2009. "Active Transpression in the Northern Calabria Apennines, Southern Italy." *Tectonophysics* 476: 226–251. doi:10.1016/j.tecto.2008.11.010.
67. Santoro, E., M. E. Mazzella, L. Ferranti, A. Randisi, E. Napolitano, S. Rittner, and U. Radtke. 2009. "Raised Coastal Terraces along the Ionian Sea Coast of Northern Calabria, Italy, Suggest Space and Time Variability of Tectonic Uplift Rates." *Quaternary International* 206: 78–101. doi:10.1016/j.quaint.2008.10.003.
68. Van Leusen, M. 2002. "Pattern to Process: Methodological Investigations into the Formation and Interpretation of Spatial Patterns in Archaeological Landscapes." PhD diss., University of Groningen.

69. Cafaro, F., F. Cotecchia, and V. Lenti. 2011. "Criticità nella modellazione geotecnica della subsidenza dell'area di Sibari (Calabria)." Paper presented at the Annual Conference for the IARG Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Torino, Italy, July 4–6.
70. Guerricchio, A. 1992. "Lineamenti geomorfologici-idrogeologici della piana di Sibari e problemi di salvaguardia degli scavi archeologici." In *Sibari e la sibaritide*, Atti del trentaduesimo Convegno di studi sulla Magna Grecia, edited by A. Stazio and S. Ceccoli, 863–881. Taranto: ISAMG Publication.
71. Polemio, M., and O. Petrucci 2003. "The Drought and the Lowering of the Groundwater Resources: An Example from Calabria Region (Southern Italy)." Paper presented at the International Conference on Hydrology of the Mediterranean and Semi-arid Regions Montpellier, France, April 1–4.
72. Ferranti, L., R. Pagliarulo, F. Antonioli, and A. Randisi. 2011. "'Punishment for the Sinner': Holocene Episodic Subsidence and Steady Tectonic Motion at Ancient Sybaris (Calabria, Southern Italy)." *Quaternary International* 232: 56–70. doi:10.1016/j.quaint.2010.07.014.
73. Audusse, E., Bouchut, F., Bristeau, M. O., Klein, R., & Perthame, B. T. (2004). A fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 25(6), 2050-2065.
74. Hou, J., Liang, Q., Zhang, H., & Hinkelmann, R. (2015). An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations. *Environmental Modelling & Software*, 66, 131-152.
75. Jameson, A., Schmidt, W., & Turkel, E. (1981, June). Numerical solution of the Euler equations by finite volume methods using Runge Kutta time stepping schemes. In 14th fluid and plasma dynamics conference (p. 1259).
76. Marqués, J. M. F., (2000) Introduction to the Finite Volumes Method. Application to the Shallow Water Equations.
77. Casas, A., Lane, S., Yu, D., Benito, G., (2010). A method for parameterising roughness and topographic sub grid scale effects in hydraulic modelling from Li- DAR data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1567–1579. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-14-1567-2010>.
78. Chow V. T., Maidment D. R., and Mays L.W., (1988), Applied Hydrology. McGraw- HillBook Co., New York. 1988. 572 PP.
79. US Army Corps of Engineers, USACE (1998) HEC-1 flood hydrograph package user's manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2000) Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual.
80. US Army Corps of Engineers,,USACE (2014) Using HEC-RAS for Dam Break Studies TD-39
81. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2002) Hydrologic Modeling System HEC-HMS Applications Guide. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.CHAPTER 2
82. Jolliffe IT, Cadima J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 374(2065):20150202.
83. Zhao H, Yuen PC, Kwok JT. 2006. A novel incremental principal component analysis and its application for face recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics).* 36(4):873–886. 26.
84. Ross DA, Lim J, Lin RS, Yang MH. 2008. Incremental learning for robust visual tracking. *International journal of computer vision.* 77(1-3):125–141.
85. Tabian, I.; Fu, H.; Sharif Khodaei, Z. A Convolutional Neural Network for Impact Detection and Characterization of Complex Composite Structures. *Sensors* 2019, 19, 4933. <https://doi.org/10.3390/s19224933>
86. WONG, Poh Poh, et al. Coastal systems and low-lying areas. *Climate change*, 2014, 2104: 361-409.

87. Bignami, Daniele Fabrizio, Renzo Rosso, and Umberto Sanfilippo. *Flood proofing in urban areas*. Cham: Springer, 2019.
88. Musolino, G., R. Ahmadian, and R. A. Falconer. "Comparison of flood hazard assessment criteria for pedestrians with a refined mechanics-based method." *Journal of Hydrology X* 9 (2020): 100067.
89. F. Cioffia , L. Tieghib , M. Gianninia and S. Pirozzolia . "Flash Flooding Prediction Through Surrogate Modelling of Shallow Water Equations: St. Lucia Island Case Study" *Journal of Applied Water Engineering and Research* (2024).....
90. Ferreira, Tiago M., and Pedro P. Santos. "An integrated approach for assessing flood risk in historic city centres." *Water* 12.6 (2020): 1648.
91. Drdácák, Miloš F. "Flood damage to historic buildings and structures." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 24.5 (2010): 439-445.
92. US Army Corps of Engineers, USACE (1998) HEC-1 flood hydrograph package user's manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2000) Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual.
93. US Army Corps of Engineers,,USACE (2014) Using HEC-RAS for Dam Break Studies TD-39
94. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2002) Hydrologic Modeling System HEC-HMS Applications Guide. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.CHAPTER 2
95. D'Oria, M., A. Maranzoni, and Maurizio Mazzoleni. "Probabilistic assessment of flood hazard due to levee breaches using fragility functions." *Water Resources Research* 55.11 (2019): 8740-8764.
96. Schultz, M. T., Gouldby, B. P., Simm, J. D., & Wibowo, J. L. (2010). Beyond the factor of safety: Developing fragility curves to characterize system reliability (Report No. ERDC-SR-10-1). Geotechnical and Structures Laboratory. Washington: US Army Corps of Engineers
97. Apel,H.,Thieken,A.H.,Merz,B.,&Blöschl,G.(2006).Aprobabilisticmodellingsystemforassessingfloodrisks.Natura Hazards,38(1–2), 79–100.<https://doi.org/10.1007/s11069-005-8603-7>
98. Camici, S., Barbetta, S., & Moramarco, T. (2017). Levee body vulnerability to seepage: The case study of the levee failure along the Foenna stream on 1 January 2006 (central Italy). *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 314–325. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12137>
99. Dawson, R., Hall, J., Sayers, P., Bates, P., & Rosu, C. (2005). Sampling-based flood risk analysis for fluvial dike systems. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 388–402. <https://doi.org/10.1007/s00477-005-0010-9>
100. Hall, J. W., Dawson, R. J., Sayers, P. B., Rosu, C., Chatterton, J. B., & Deakin, R. (2003). A methodology for national-scale flood risk assessment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Maritime and Engineering*, 156(3), 235–248. <https://doi.org/10.1680/wame.2003.156.3.235>
101. Mazzoleni, M., Barontini, S., Ranzi, R., & Brandimarte, L. (2015). Innovative probabilistic methodology for evaluating the reliability of discrete levee reaches owing to piping. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5), 04014067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943.5584.0001055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943.5584.0001055)
102. USACE (1999). Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies. (Engineer Technical Letter 1110-2-556). Washington: US Army Corps of Engineers.
103. Vorogushyn, S., Merz, B., & Apel, H. (2009). Development of dike fragility curves for piping and micro-instability breach mechanisms. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1383–1401. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1383-2009>
104. Wolff, T. F. (1997). Geotechnical reliability of levees. Paper presented at the USACE Hydrology and Hydraulics Workshop on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies, Pacific Grove, California

105. FLOODsite (2007). Failure mechanisms for flood defence structures. Report Number T04-06-01. www.floodsite.net
106. Marijnissen, R., Kok, M., Kroeze, C., & van Loon-Steensma, J. (2019). Re-evaluating safety risks of multifunctional dikes with a probabilistic risk framework. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(4), 737–756. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-737-2019>
107. Khilar, K. C., Fogler, H. S., & Gray, D. H. (1985). Model for piping-plugging in earthen structures. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(7), 833–846. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:7\(833\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:7(833))
108. Henderson, D., & Plaschko, P. (2006). Stochastic variables and stochastic processes. In *Stochastic differential equations in science and engineering* (pp. 1–54). Singapore: World Scientific Publishing. https://doi.org/10.1142/9789812774798_0001
109. Ferreira, Tiago M., and Pedro P. Santos. "An integrated approach for assessing flood risk in historic city centres." *Water* 12.6 (2020): 1648.
110. Westaway, R. 1993. "Quaternary Uplift of Southern Italy." *Journal of Geophysical Research* 98: 21741–21772. doi:10.1029/93JB01566.
111. Drdácák, Miloš F. "Flood damage to historic buildings and structures." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 24.5 (2010): 439-445.
112. US Army Corps of Engineers, USACE (1998) HEC-1 flood hydrograph package user's manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2000) Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual.
113. US Army Corps of Engineers, USACE (2014) Using HEC-RAS for Dam Break Studies TD-39
114. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. USACE (2002) Hydrologic Modeling System HEC-HMS Applications Guide. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. CHAPTER 2
115. D'Oria, M., A. Maranzoni, and Maurizio Mazzoleni. "Probabilistic assessment of flood hazard due to levee breaches using fragility functions." *Water Resources Research* 55.11 (2019): 8740-8764.
116. Schultz, M. T., Gouldby, B. P., Simm, J. D., & Wibowo, J. L. (2010). Beyond the factor of safety: Developing fragility curves to characterize system reliability (Report No. ERDC-SR-10-1). Geotechnical and Structures Laboratory. Washington: US Army Corps of Engineers
117. Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B., & Blöschl, G. (2006). A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards*, 38(1–2), 79–100. <https://doi.org/10.1007/s11069-005-8603-7>
118. Camici, S., Barbetta, S., & Moramarco, T. (2017). Levee body vulnerability to seepage: The case study of the levee failure along the Foenna stream on 1 January 2006 (central Italy). *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 314–325. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12137>
119. Dawson, R., Hall, J., Sayers, P., Bates, P., & Rosu, C. (2005). Sampling-based flood risk analysis for fluvial dike systems. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 388–402. <https://doi.org/10.1007/s00477-005-0010-9>
120. Hall, J. W., Dawson, R. J., Sayers, P. B., Rosu, C., Chatterton, J. B., & Deakin, R. (2003). A methodology for national-scale flood risk assessment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Maritime and Engineering*, 156(3), 235–248. <https://doi.org/10.1680/wame.2003.156.3.235>
121. Mazzoleni, M., Barontini, S., Ranzi, R., & Brandimarte, L. (2015). Innovative probabilistic methodology for evaluating the reliability of discrete levee reaches owing to piping. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5), 04014067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943.5584.0001055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943.5584.0001055)

122. Khilar, K. C., Fogler, H. S., & Gray, D. H. (1985). Model for piping-plugging in earthen structures. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(7), 833–846. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:7\(833\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:7(833))

APPENDICE 1- TEST NUMERICI MODELLO IDRAULICO

Per capire se il codice numerico fosse robusto e in grado di fornire risultati corretti, sono stati condotti diversi test di benchmarking, tratti dalla letteratura. Di seguito sono riportati i casi analizzati con i rispettivi risultati ottenuti.

1) LAGO OSCILLANTE

Questo test di benchmarking, trovato in (Audusse et al., 2004), è indicativo della robustezza di un solutore in quanto coinvolge condizioni di bagnato-secco. Siamo interessati al caso di un lago oscillante con fondo non piatto e sponde non verticali. Il lago è inizialmente a riposo, ma una piccola perturbazione sinusoidale colpisce la superficie libera:

$$z(x) = 0,5(1 - 0,5(\cos(\pi(x - 0,5)/0,5) + 1))$$

$$h(0, x) = \max(0, 0,4 - z(x) + 0,04 \sin((x - 0,5)/0,25) - \max(0, -0,4 + z(x))).$$

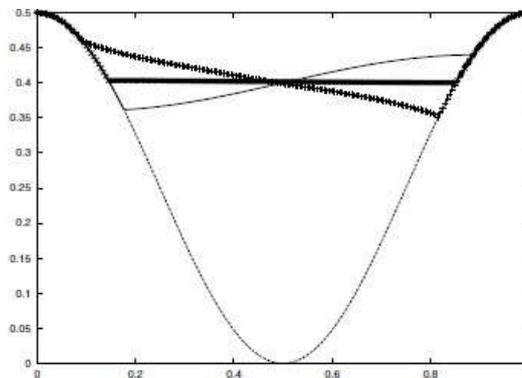


Figura 58-Lago oscillante: schema equilibrato. Schema del primo ordine (più croci). Schema del secondo ordine (più croci). Soluzione iniziale e topografia del fondo (linee solide e tratteggiate).

Questa analisi è molto importante perché ci permette di dimostrare che il flusso oscilla a ogni time step e che quindi il codice è in grado di trattare un'interfaccia tra una cella bagnata e una cella asciutta su ogni sponda del lago. La Figura 58 mostra i risultati ottenuti con lo schema ben bilanciato con 200 punti a $t = 19,87$ s. Questo tempo è stato individuato

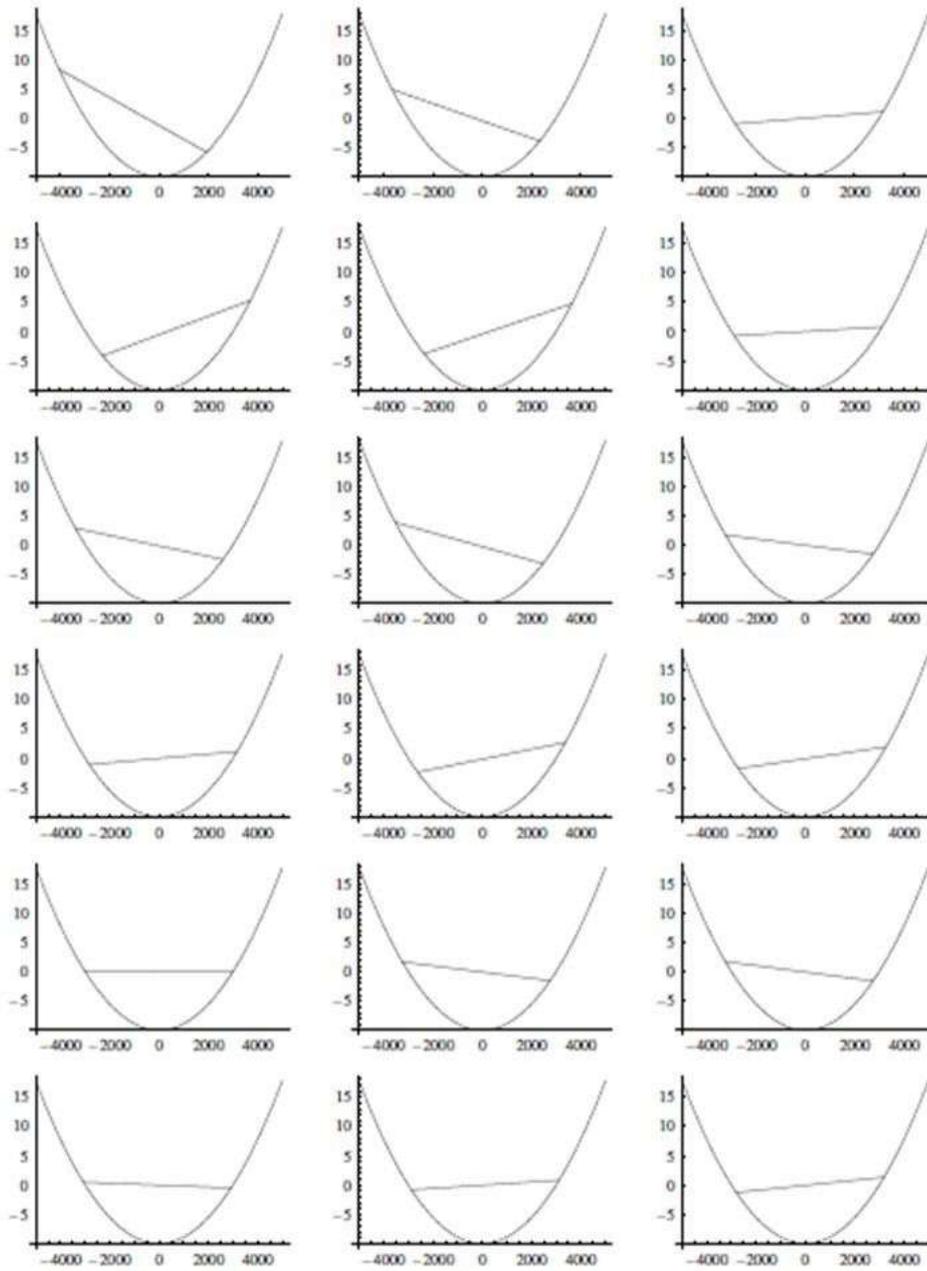
perché corrisponde a quello in cui il flusso raggiunge il livello massimo sulla riva sinistra. Entrambi gli schemi ben bilanciati del primo e del secondo ordine sono robusti, ma lo schema del primo ordine smorza le oscillazioni molto più rapidamente. Come accade anche nel test di Audusse, l'FHM-2D ha riprodotto cinquanta oscillazioni per tornare a riposo. D'altra parte, lo schema del secondo ordine ben bilanciato mantiene il regime periodico fino alla precisione della macchina.

2) LAGO OSCILLANTE CON TRASCINAMENTO

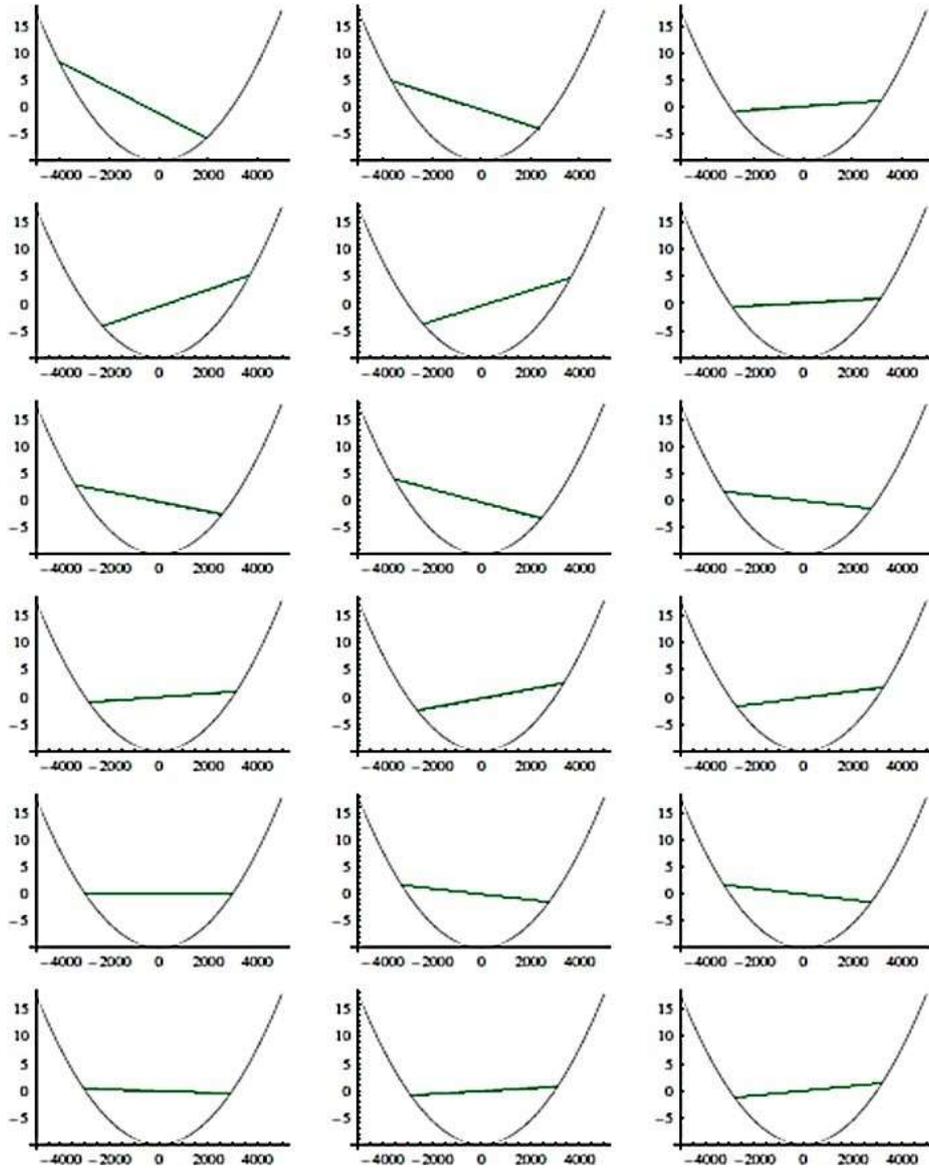
Questo test di benchmarking è stato trovato nel documento (Sampson et al., 2004) e viene rappresentato il movimento del fluido in un canale parabolico in cui alle pareti viene applicata una resistenza $\tau = 0,001 \text{ s}^{-1}$. I risultati mostrati nella Figura 58 si riferiscono a quelli che vanno da $t = 0 \text{ s}$ a $t = 3400 \text{ s}$, con incrementi di 200

s. L'FHM-2D riporta gli stessi risultati per ogni tempo trovato nell'articolo preso come riferimento dalla letteratura, dimostrando anche in questo caso una buona precisione. Anche in questo caso, tuttavia, lo schema del secondo ordine ben bilanciato si è dimostrato più robusto, considerando che il primo ordine ha riprodotto oscillazioni leggermente più rapide.

a)



b)



c)

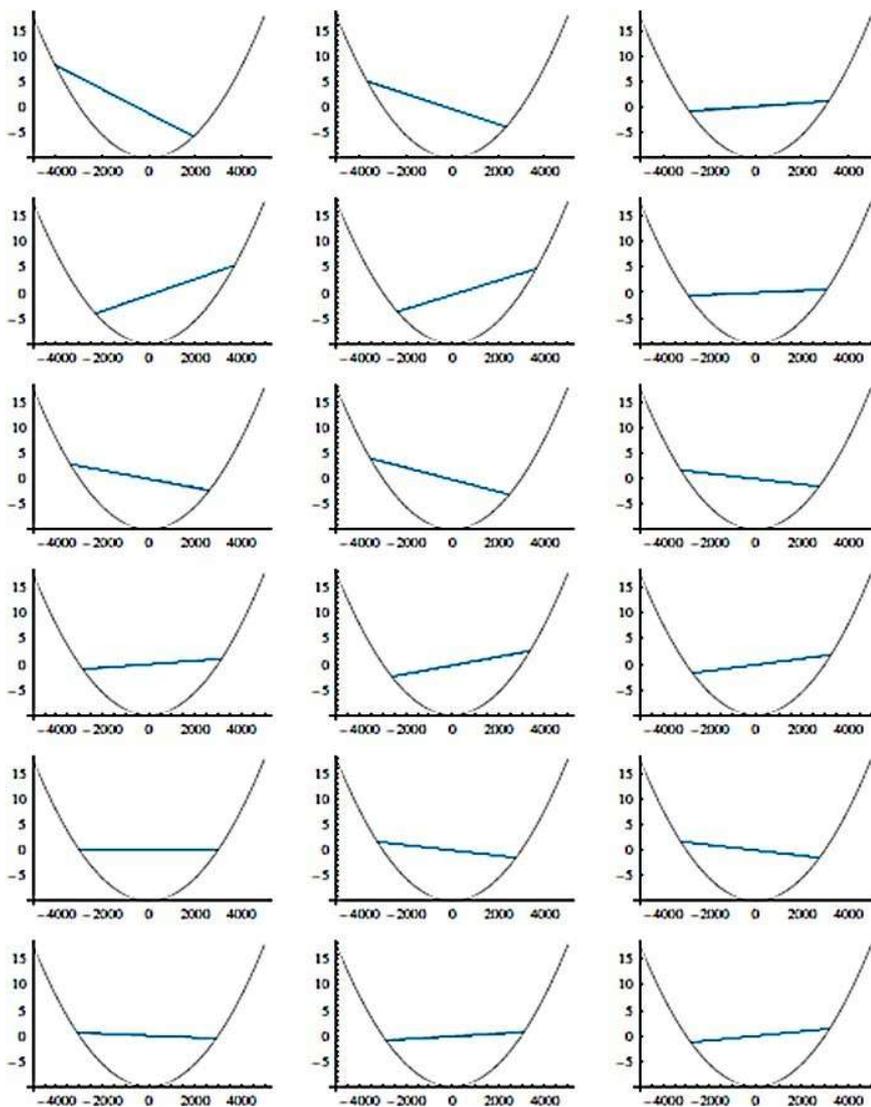


Figura 59- Lago oscillante con resistenza aerodinamica: schema equilibrato. In a) è mostrata la soluzione analitica e la topografia del fondale (linea nera) ottenuta in (Sampson et al., 2004); in b) lo schema del primo ordine (croci di volte) (linea azzurra) e in c) lo schema del secondo ordine (più croci) ottenuto da FHM-2D (linea verde).

3) ROTTURA DELLA DIGA

La rottura di una diga è un test di riferimento per la validazione dei modelli teorici. Numerosi schemi a volumi finiti sono stati applicati alla risoluzione di problemi di rottura di dighe (Zoppou e Roberts, 1999; Wan et al., 2002; Lai et al., 2005). Tuttavia, la risoluzione del problema di Riemann richiede l'applicazione dei metodi classici di controventamento, ampiamente utilizzati come i più accurati nell'approccio ai Volumi Finiti (Roe, 1981; Toro, 2016);

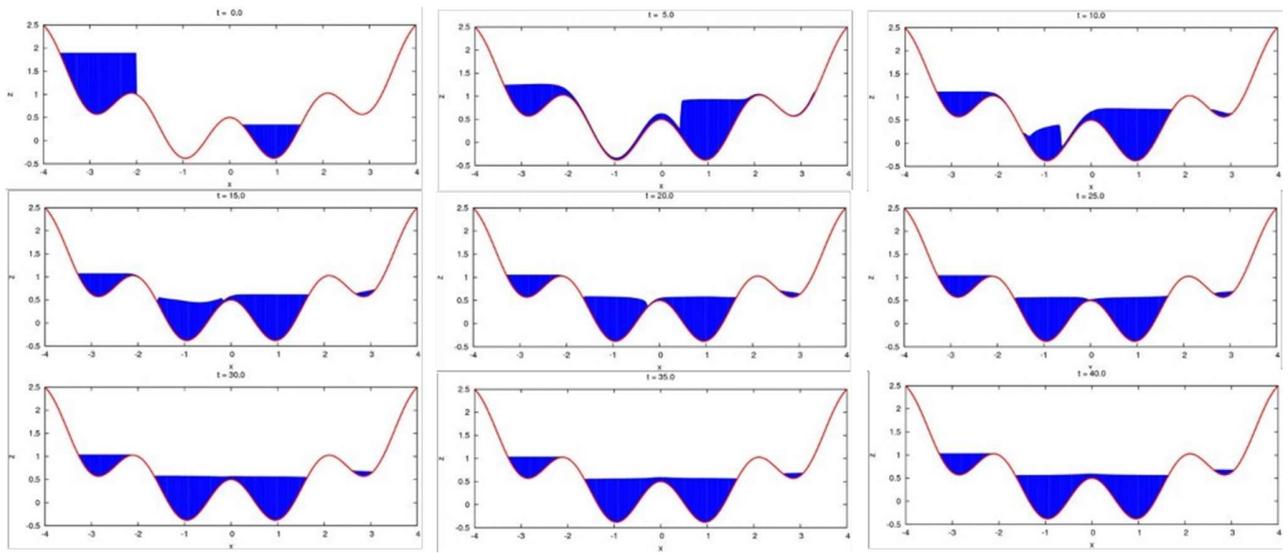
LeVeque, 2002), è generalmente piuttosto complicato, per la complessità dell'autostruttura, in tutti i problemi di correnti multifase, in cui il numero di equazioni di conservazione è superiore a due (Altinakar et al., 2010).

Pertanto, dopo aver descritto l'importanza di condurre questo test, mostriamo i risultati ottenuti utilizzando il test proposto nel Gerris esempi (Versione 1.3.2) al seguente link:

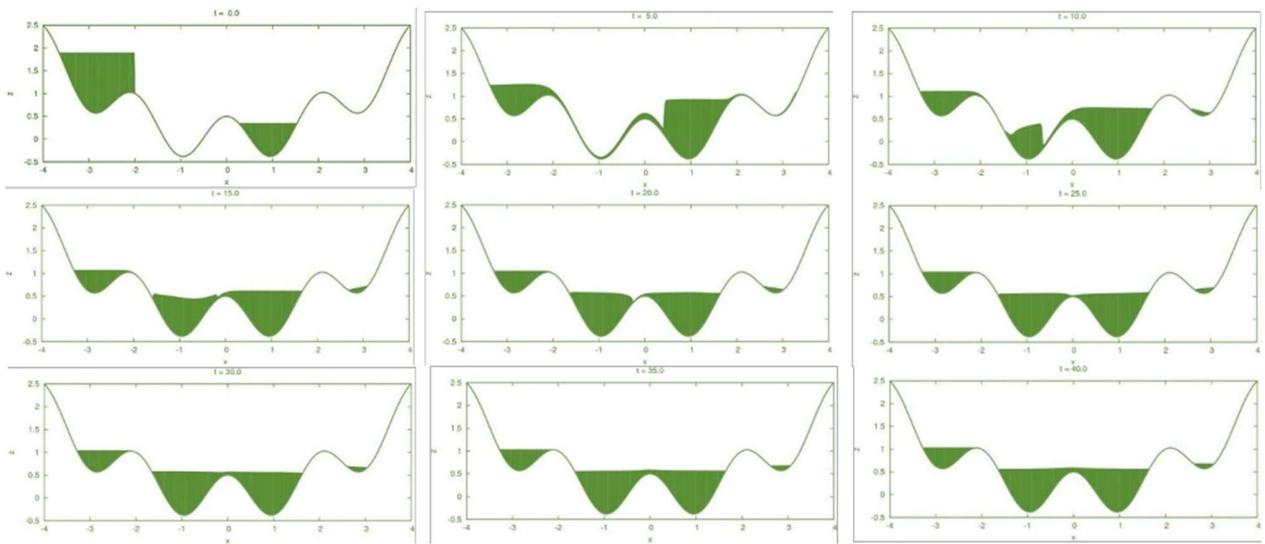
<http://gerris.dalembert.upmc.fr/gerris/examples/examples/dam.html#htoc23>. In questo esempio sono state descritte tutte le equazioni utili alla ricostruzione della geometria complessa, tutte le condizioni al contorno e infine tutti i time frame utili alla comprensione della bontà dei risultati ottenuti con FHM-2D.

Il test è stato eseguito sia per l'accuratezza del primo ordine con Lax-Friedrichs sia per l'accuratezza del secondo ordine con il TVD-MUSCL, presentato in FHM-2D. Come riportato nel link web, la durata della simulazione è stata di 40 secondi. Nella figura 60 a è mostrata, a diversi passi temporali, la soluzione ottenuta dall'autore per il caso di studio proposto nel suo esempio, e in b e c i risultati ottenuti con FHM-2D, rispettivamente per il primo e il secondo ordine.

a)



b)



c)

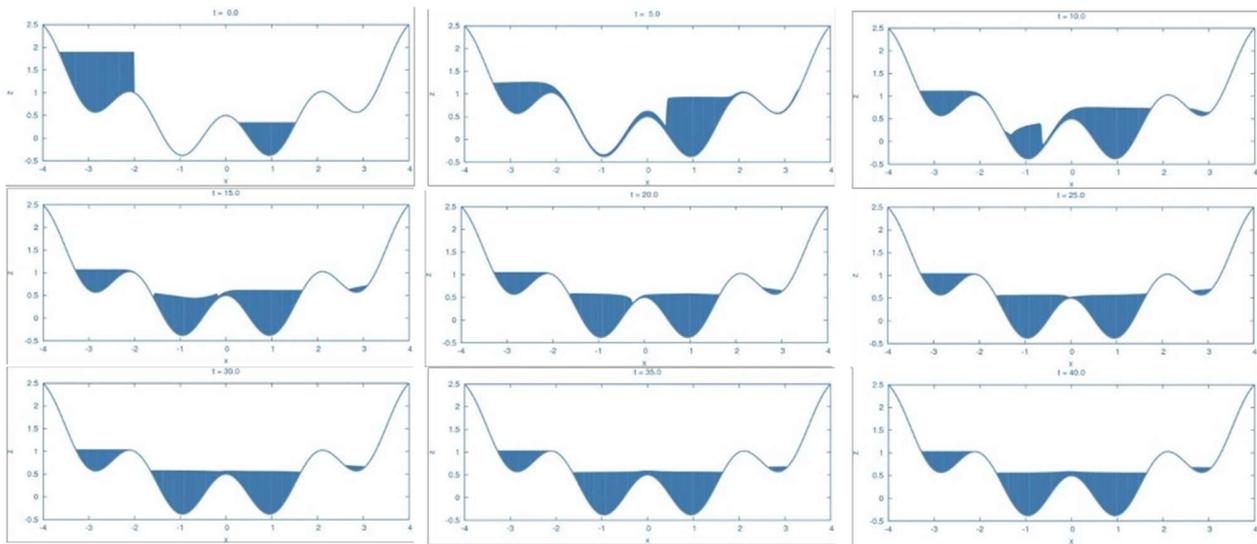


Figura 60-Prova di rottura della diga: a) soluzione analitica; b) con estensioni del primo ordine; e c) con estensioni del secondo ordine.

Per entrambi gli ordini di accuratezza, FHM-2D ha mostrato un comportamento eccellente, essendo stato in grado di riprodurre la stessa tendenza riscontrata nel caso di studio fondato sul web in ogni istante temporale.

4) IL FLUSSO STABILE SU UN DOSSO IN UN CANALE RETTANGOLARE

Lo scopo di questo problema è calcolare il flusso stazionario su un dosso in un canale rettangolare a larghezza costante. La larghezza del canale è costante, $B(x) = 1$ m, la lunghezza è $L = 25$ m e la topografia del fondo è data da:

$$Z_x = \begin{cases} 0.2 - 0.05(x - 10)^2 & \text{se } 8 \leq x \leq 12 \\ 0 & \text{altimenti} \end{cases} \quad (26)$$

A seconda delle condizioni al contorno e iniziali, il flusso può essere transcritto con e senza shock stazionario, oppure supercritico. Tutti i casi di studio sono stati tratti da (Vazquez-Cendón, 1999) e sono condotti sia per il primo che per il secondo ordine di precisione. I grafici riferiti all'analisi riportati in a riportano la soluzione analitica, mentre in b con il verde quella ottenuta dal primo ordine e, infine, in c con il blu quella dal secondo ordine di precisione.

- Flusso transcritto senza shock (Figura 61):

- A valle. Il livello dell'acqua $h = 0,66$ m è imposto solo quando il flusso è subcritico.
- A monte. Il deflusso è imposto $Q = 1,53$ m³ /s.

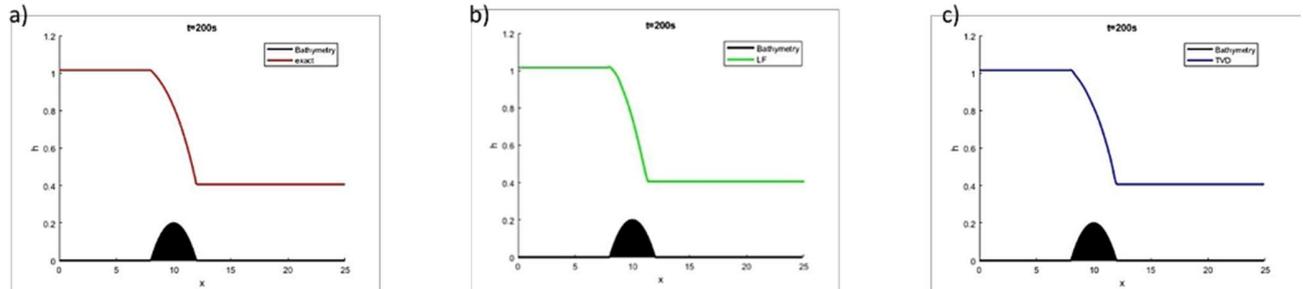


Figura 61-Flusso transcritico $Z(x)$, $h(x, t) + Z(x)$ senza urti. In a è rappresentata la soluzione analitica; in b quella ottenuta dal primo ordine e in c quella dall'estensione del secondo ordine

- Flusso transcritico con shock (Figura 56):
- A valle. Viene imposto il livello dell'acqua $h = 0,33$ m.
- A monte. Viene imposto il deflusso $Q = 0,18$ m³ /s.³

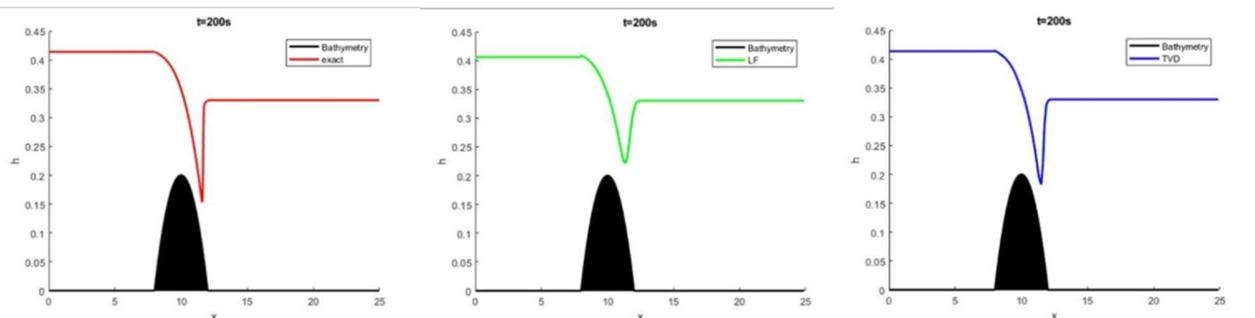


Figura 62- $Z(x)$, $h(x, t) + Z(x)$ Flusso transcritico con urto. In a è rappresentata la soluzione analitica; in b quella ottenuta dal primo ordine e in c quella dall'estensione del secondo ordine.

- Flusso subcritico (Figura 62):
- A valle. Il livello dell'acqua $h = 2$ m è imposto.
- A monte. Viene imposto il deflusso $Q = 4,42$ m³ /s.³

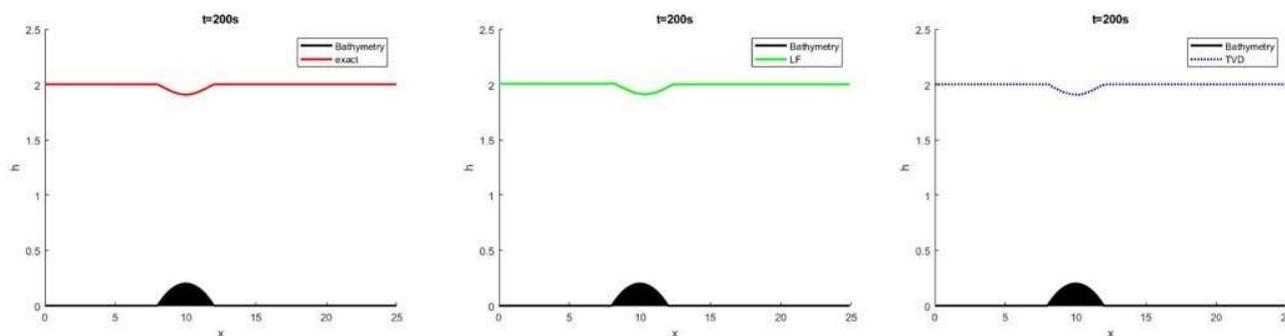


Figura 63-Flusso subcritico $Z(x)$, $h(x, t) + Z(x)$. In a è rappresentata la soluzione analitica; in b quella ottenuta dal primo ordine e in c quella dall'estensione del secondo ordine.

Nei tre casi, come condizioni iniziali, abbiamo assunto un livello d'acqua costante pari al livello imposto a valle e la portata pari a zero.

Il confronto dei risultati con le soluzioni analitiche associate illustra le migliori prestazioni della discretizzazione in situazioni critiche. Il livello dell'acqua è stato scelto per mostrare i risultati numerici perché è più rilevante della portata, in quanto è pari a zero per i tre casi. Prendiamo $CFL = 1$, $\Delta x = 0,25$ m, $t = 200$ s, dove si raggiunge lo stato stazionario.

Questa scelta di Δx è sufficiente per calcolare correttamente le soluzioni in Figura 61 e in Figura 63. Nella Figura 64 l'urto può essere ottenuto con maggiore precisione se si aumenta il numero di nodi.

Il bump test è stato riprodotto anche in 2D (Figura 65) e la prova è stata ripresa, per avere un confronto in termini di risultati ottenuti, da (Le Veque et al., 1998). L'urto bidimensionale utilizzato è stato rappresentato dall'Eq. 9, che ha un'altezza massima di 0,8 al centro del quadrato unitario.

$$B(x,y) = 0,8 \exp(-50((x-0,5)^2 + (y-0,5)^2)) \quad (9)$$

La profondità è stata impostata come $h(x,y) = 1 - B(x,y)$ corrispondente a una superficie piana e la velocità iniziale è zero, in modo che la superficie rimanga indisturbata. Il dominio utilizzato per il caso di prova è lo stesso di quello utilizzato in (LeVeque, 1998), ovvero un dominio rettangolare di dimensioni $[0,2] \times [0,1]$, come rappresentato nella figura 58.

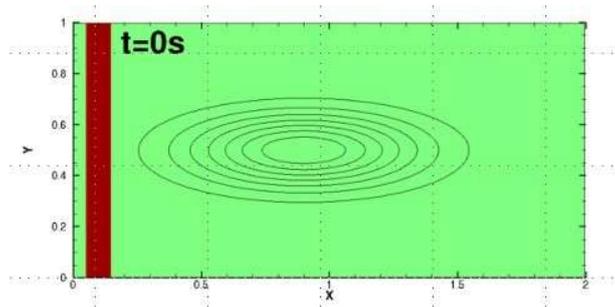


Figura 64-Gobba ellittica utilizzata per il caso di test. Il livello di contorno più basso è a 0,01 e la gobba ha un'altezza di 0,8.

Le condizioni al contorno sono state uguali a quelle scelte da (LeVeque, 1998) e in generale è stata imposta l'estrapolazione di ordine zero sull'intero dominio al contorno. La durata del caso di prova è stata fissata a $t=1,8$ s. Nella figura 64, sono riportate a sinistra le soluzioni analitiche ottenute da LeVeque e a destra quelle ottenute da FHM-2D, rispettivamente per il primo e il secondo ordine di precisione. Dalla figura è possibile comprendere come FHM-2D sia stato in grado di riprodurre, istante per istante, per entrambi gli ordini di precisione, la stessa soluzione ottenuta dal documento di LeVeque.

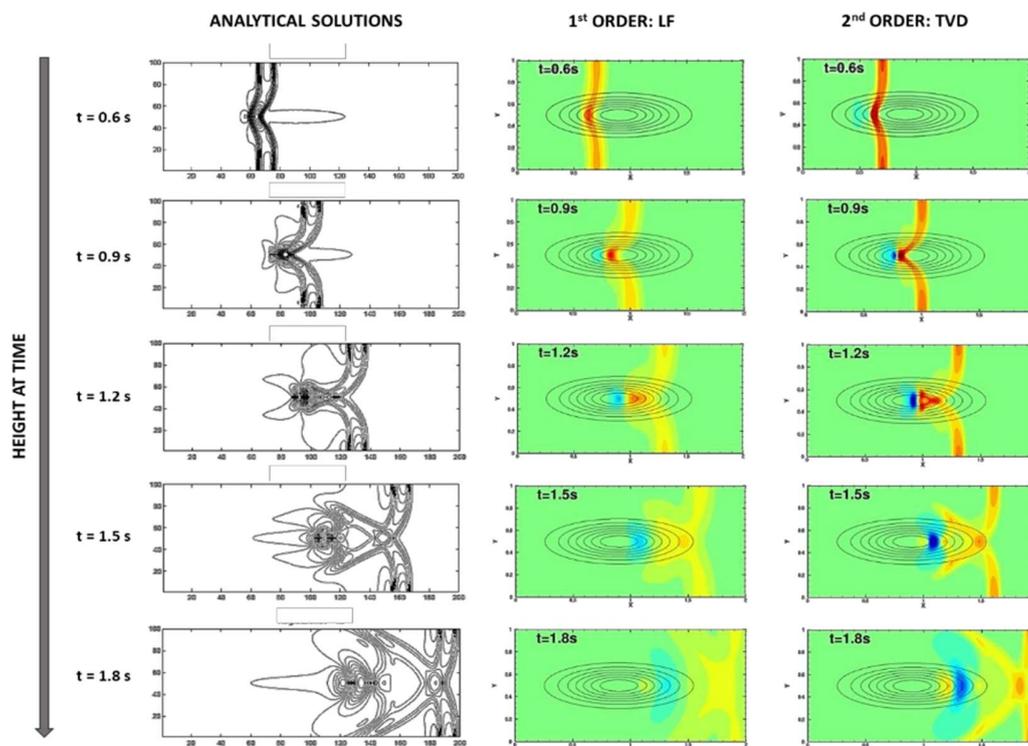


Figura 65-Risultati del test d'urto in 2D

5) TEST DI DEFLUSSO

Il test relativo al deflusso è stato effettuato prendendo come riferimento quello realizzato da (Cea et al., 2010). L'analisi ha visto l'applicazione di una precipitazione in una vasca rettangolare di dimensioni 2 x 2,5 m formata da tre piani con una pendenza approssimativa del 5% (Figura 66).

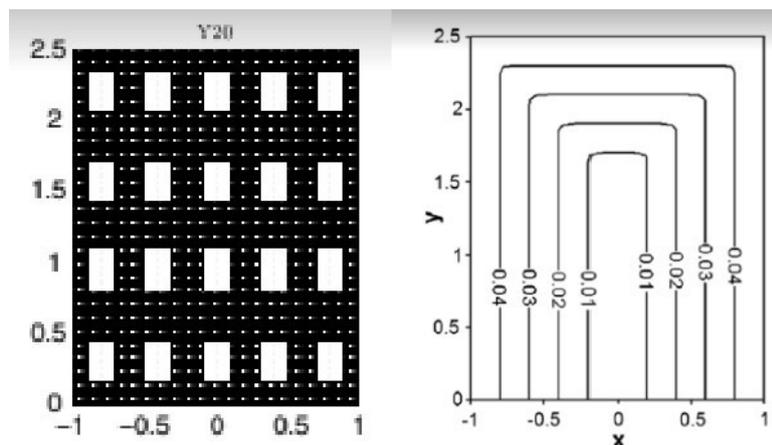


Figura 66-Topografia dettagliata del bacino idrografico (da Cea et al, 2010)

La superficie del letto è impermeabile e quindi non è necessario considerare l'infiltrazione. Le precipitazioni sono state simulate con una griglia di 100 ugelli distribuiti uniformemente sul bacino.

L'unica variabile misurata negli esperimenti è stata l'idrografia di scarico generata all'uscita del bacino.

Al confine di uscita è stata utilizzata una condizione limite di deflusso libero. Il parametro di tolleranza bagnato-secco è stato impostato a 10^{-6} m. La maglia numerica per ogni configurazione deve essere sufficientemente fine per risolvere adeguatamente il flusso attorno agli edifici. Il coefficiente Manning utilizzato per il test è stato di $0,016 \text{ s/m}^{1/3}$. Nella Figura 67e nella Figura 68 sono rappresentati i risultati ottenuti per entrambi gli ordini di precisione.

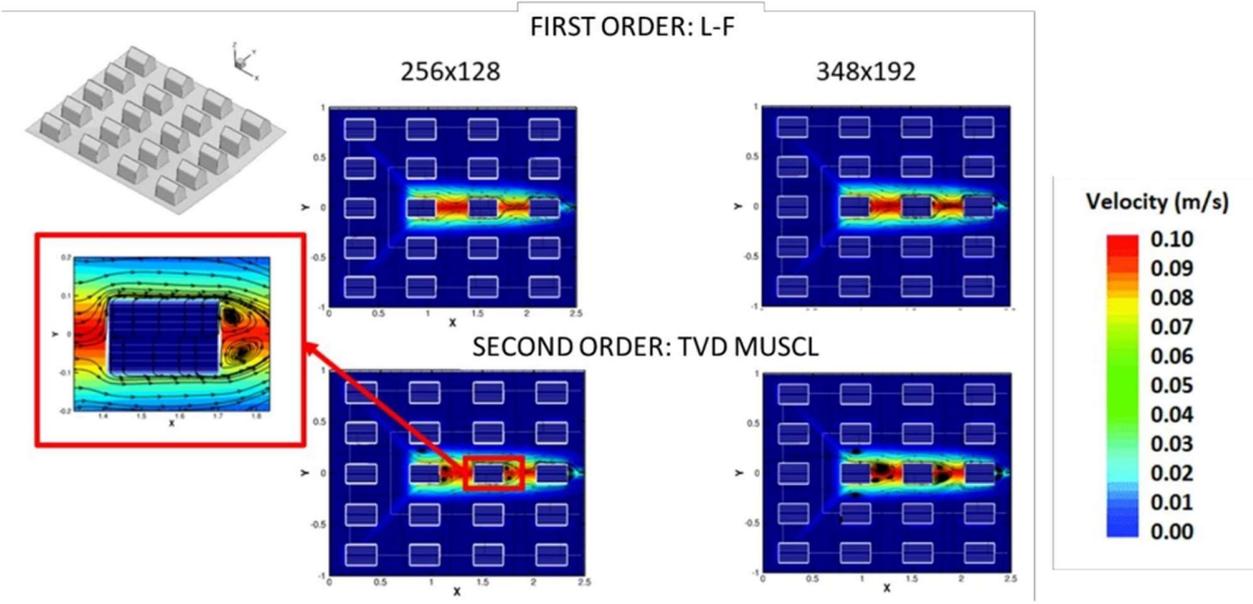


Figura 67-Campi di velocità calcolati al tempo $t = 20$ s nella prova di deflusso con pendenza

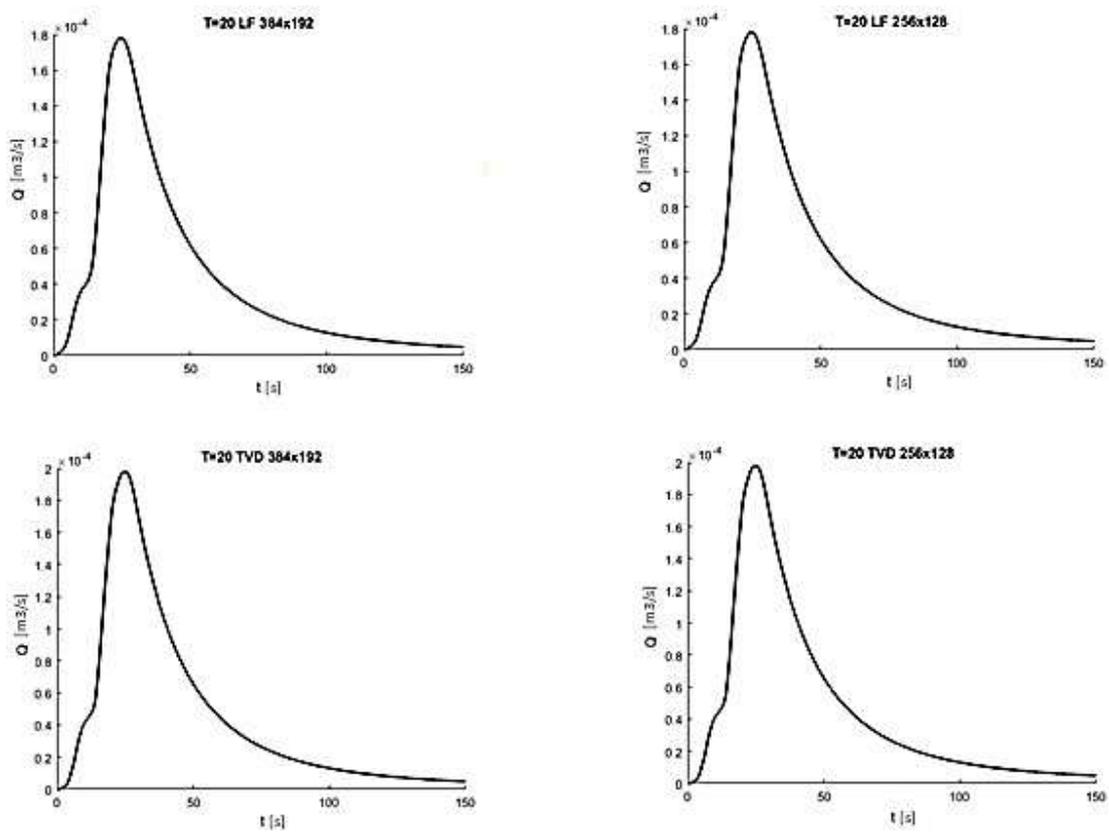
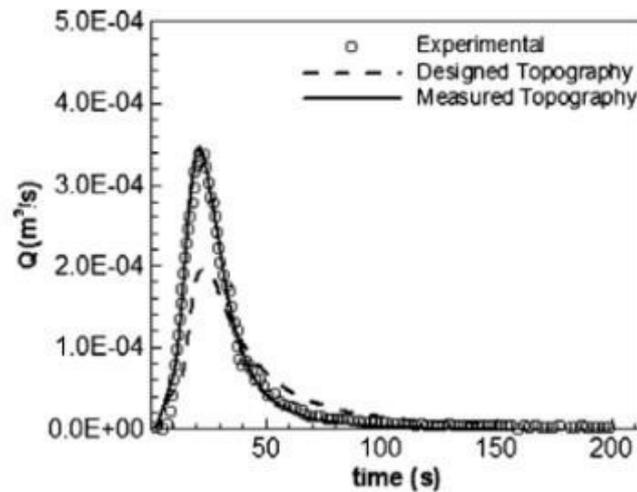


Figura 68-letografia di uscita ottenuta da FHM-2D utilizzando il primo e il secondo ordine di accuratezza per un diverso numero di celle di calcolo 348x192 e 256x128.

Le portate ottenute e confrontate con quelle prese come riferimento in (Cea et al., 2010), mostrate nella Figura 69, danno valori molto vicini indipendentemente dall'ordine di accuratezza e dalla discretizzazione delle celle utilizzata. Nel caso del primo ordine c'è una leggera sottostima della portata calcolata con FHM2D.



(a) Geometry Y20. Hyetography Q25T20.

Figura 69-letografia di uscita ottenuta in Cea et al, 2010 utilizzata per il confronto con i risultati di FHM-2D.

Infine, è stato condotto un altro test per comprendere il comportamento del codice numerico in presenza di una pendenza (Figura 70).

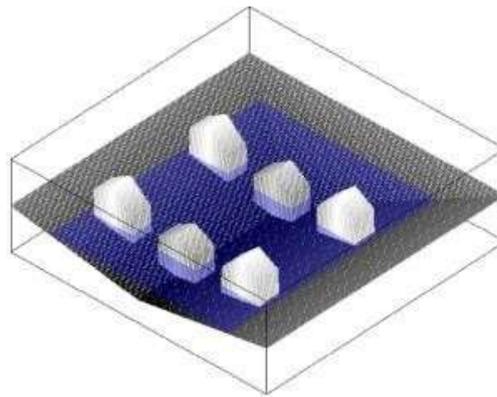


Figura 70-L'impostazione di fondo degli esempi numerici. La figura illustra il caso di un drenaggio urbano con ostacoli come le case.

In tutti gli esempi riportati nei testi successivi, la costante di gravitazione $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e il parametro minmod $\theta=1,3$. In questo esempio, è stato applicato un coefficiente d'equipaggio Manning di $0,002 \text{ s/m}^{1/3}$ e una pendenza di $0,05$.

In Figura 71, è stata riportata la soluzione analitica ottenuta in (Chertock et al., 2015) che è stata replicata, nel caso di test con FHM-2D, per diverse dimensioni di griglia, precisamente 100, 200, 400 e 800 m e per entrambi gli ordini di precisione .

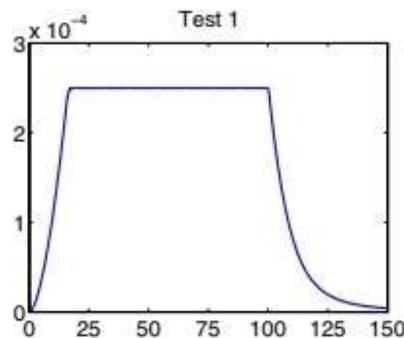


Figura 71-Scarico in uscita in funzione del tempo ottenuto da (Chertock et al., 2015). Sull'asse x è stato riportato il tempo in secondi e sull'asse y la portata.

Nella figura 72 sono mostrati i grafici della prima componente del flusso numerico sul bordo destro del dominio di calcolo in funzione del tempo. Si noti che si tratta di un'approssimazione dello scarico in uscita, che è una grandezza misurabile in ambito sperimentale. Le simulazioni sono state eseguite nel dominio 2-D di larghezza $0,2$, per cui tutti i valori di scarica della Figura 72 devono essere moltiplicati per il fattore $0,2$ per essere confrontati con quelli dell'articolo di Chertock.

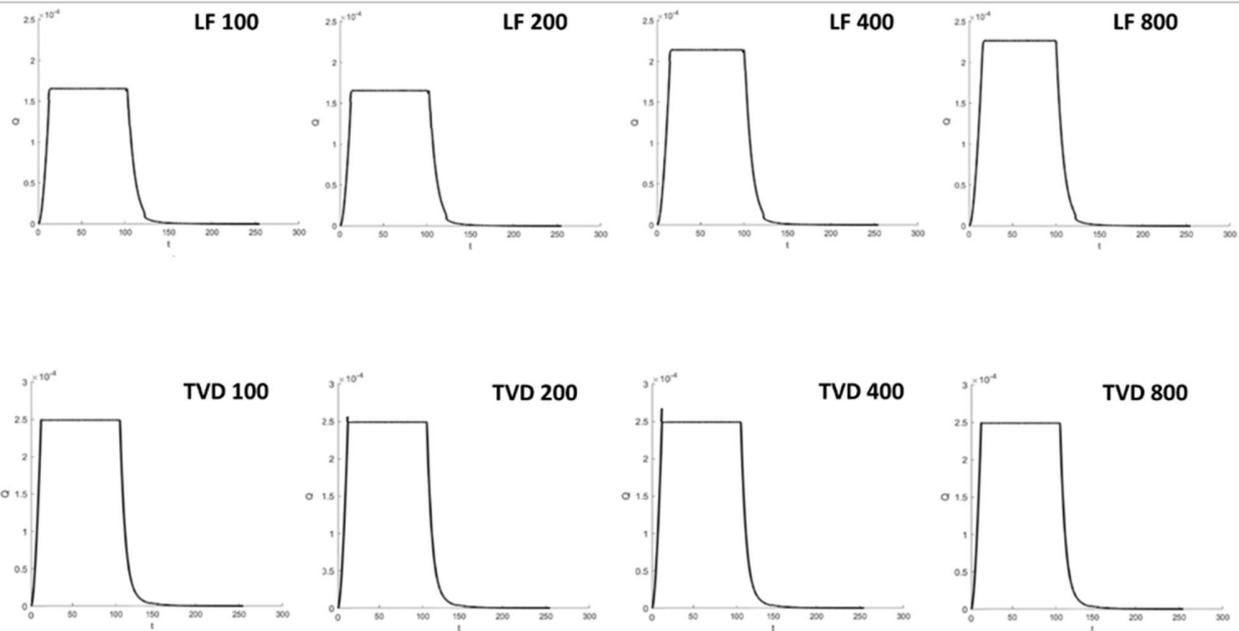


Figura 72-Scarico in uscita in funzione del tempo ottenuto con FHM-2D: le figure a, b, c, d sono riferite al primo ordine di precisione e rispettivamente a 100, 200, 400 e 800 m di dimensione della griglia di calcolo; e, f, g, h sono riferite al secondo ordine di precisione e rispettivamente a 100, 200, 400 e 800 m di dimensione della griglia di calcolo