

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale



TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

**Stima della vulnerabilità e dei danni subiti
dagli edifici soggetti a inondazione
nel tratto focivo del torrente Petronio a Riva Trigoso**

Relatrice:

Dott. Ing. Ilaria Ferrando

Candidata:

Alexandra Cristiana Girtonea

Correlatore:

Prof. Ing. Giorgio Roth

Luglio 2026

Sommario

Il presente lavoro di tesi si propone di definire e applicare un metodo rigoroso, speditivo e quantitativo per la stima dei danni economici e strutturali causati dalle inondazioni agli edifici, con focus sul caso studio del tratto terminale del torrente Petronio a Riva Trigoso (Sestri Levante, GE).

L'elaborato si articola attraverso un flusso di lavoro integrato che combina idraulica, sistemi GIS e analisi economico-finanziaria, sviluppandosi secondo le seguenti fasi metodologiche:

- analisi dello stato di fatto: utilizzando dati ufficiali della Regione Liguria e il software QGIS con il plugin FloodD2B, sono stati analizzati i battenti idrici e le velocità per diversi tempi di ritorno (50, 200, 500 anni). Gli edifici sono stati classificati secondo la tassonomia del Joint Research Centre (JRC) per stimare i danni attesi tramite funzioni di danno-altezza;
- identificazione degli interventi di mitigazione: attraverso un'analisi visiva delle criticità del tratto, sono stati definiti interventi strutturali quali il rifacimento del ponte stradale (considerato soltanto per l'analisi costi e benefici), la riprofilatura dell'alveo e il ripristino delle arginature;
- analisi costi-benefici: è stato implementato un modello economico per confrontare i costi delle opere con i benefici derivanti dalla riduzione del danno atteso annuo;
- modellazione idraulica pre-intervento e post-intervento: tramite simulazioni 1D e 2D si sono ricavati i layer dei battenti idrici che hanno permesso nel caso bidimensionale un confronto di quello che è lo stato attuale del layer cartografico regionale identificando le divergenze. Gli interventi sono stati inoltre simulati tramite il software HEC-RAS per ottenere nuovi profili idraulici, permettendo di valutare l'abbattimento del rischio residuo mediante un confronto diretto tra lo stato di fatto e lo scenario post-opera.

Il fine ultimo della ricerca è dimostrare come questo approccio possa costituire uno strumento di supporto alle decisioni per le autorità locali e gli enti di pianificazione nella gestione resiliente del territorio e nella definizione delle priorità di intervento.

Abstract

This thesis aims to define and apply a rigorous, expedient, and quantitative method for estimating the economic and structural damage to buildings caused by flooding, focusing on the case study of the final reach of the Petronio in Riva Trigoso (Sestri Levante, GE).

The study is based on an integrated workflow that combines hydraulics, GIS systems, and economic-financial analysis, developed through the following methodological phases:

- analysis of the current state: using official data from the Liguria Region and QGIS software with the FloodD2B plugin, water depths and velocities were analyzed for various return periods (50, 200, and 500 years). Buildings were classified according to the Joint Research Centre (JRC) taxonomy to estimate expected damages using depth-damage functions;
- identification of mitigation measures: through a visual analysis of the reach's critical issues, structural interventions were defined, such as the reconstruction of the road bridge (considered only for the cost-benefit analysis), channel reprofiling, and the restoration of embankments;
- cost-benefit analysis: an economic model was implemented to compare the costs of the works with the benefits derived from the reduction of the Expected Annual Damage;
- pre- and post-intervention hydraulic modeling: through 1D and 2D simulations, water depth layers were generated. In the two-dimensional case, this allowed for a comparison with the existing regional cartographic layer, identifying variations. Furthermore, the interventions were simulated using HEC-RAS software to obtain new hydraulic profiles, enabling an assessment of residual risk mitigation through a direct comparison between the baseline state and the post-project scenario.

The ultimate goal of this research is to demonstrate how this approach can serve as a decision-support tool for local authorities and planning agencies in resilient territory management and in defining intervention priorities.

Indice

Sommario	I
Abstract.....	II
Simbologia	
Introduzione	1
1 – Caratteristiche del bacino idrografico del torrente Petronio.....	4
1.1 – Inquadramento.....	4
1.2 – Assetto fisico – caratteristiche morfologiche	5
1.3 – Caratteristiche vegetazionali e di uso del suolo	7
1.3.1 – Distribuzione della vegetazione e assetto insediativo	7
1.3.2 – Funzionalità idrogeologica del sistema suolo-soprassuolo.....	8
1.3.3 – Parametrizzazione idrologica: Indici e Curve Number	9
1.4 – Caratteristiche geologiche	10
1.4.1 – La copertura sedimentaria.....	11
1.4.2 – Assetto tettonico e strutturale	12
1.5 – Caratteristiche geomorfologiche	12
1.5.1 – Influenza litostrutturale sul modellamento dei versanti.....	13
1.5.2 – Depositi superficiali e coperture detritiche.....	13
1.5.3 – Forme e processi gravitativi.....	13
1.5.4 – L'impronta antropica	14
1.6 – Aspetti idrologici e pendenza del versante.....	15
1.7 – Caratteristiche climatiche	17
1.7.1 – Lineamenti termometrici e influssi maini.....	17
1.7.2 – Regime delle precipitazioni ed effetto orografico	17
1.7.3 – Circolazione atmosferica e dinamiche locali	18
1.8 – Sfruttamento delle acque.....	18
2 – Eventi alluvionali.....	20
2.1 – Gli eventi storici alluvionali del torrente Petronio	20

2.1.1 – Cronologia degli eventi.....	21
2.1.2 – Analisi delle criticità.....	21
3 – Quadro normativo italiano.....	23
3.1 – Pianificazione di Bacino.....	23
3.2 – Linee di intervento strutturali	24
3.2.1 – Difese spondali e arginature	25
3.2.2 – Sistemazioni idraulico-forestali (Settore montano).....	25
3.2.3 – Adeguamento dei manufatti di attraversamento	25
3.2.4 – Gestione delle aree di pertinenza fluviale.....	25
3.3 – Linee di intervento non strutturali.....	26
3.3.1 – Sistemi di previsione e monitoraggio (Allertamento)	27
3.3.2 – Gestione e manutenzione ordinaria	27
3.3.3 – Cultura del rischio e protezione civile.....	27
4 – Mappe di rischio e pericolosità alluvione.....	28
4.1 – Dalla Direttiva Alluvioni alle mappe di rischio e pericolosità.....	28
4.2 – Mappa di Pericolosità e di Rischio del bacino del Petronio	29
4.3 – Misure di prevenzione, protezione e preparazione.....	32
4.4 – Valutazione del rischio alluvione	32
4.4.1 – Tipologie di approccio alla valutazione del rischio.....	33
4.4.2 – Metodologie di analisi: Qualitativa, Semi-quantitativa e Quantitativa ..	34
4.4.3 – Analisi probabilistica del rischio alluvione	35
4.5 – Hazard.....	35
4.6 – Esposizione e Vulnerabilità.....	37
4.6.1 – L’Esposizione degli elementi a rischio.....	37
4.6.2 – La Vulnerabilità: definizioni e dimensioni	38
4.6.3 – Indicatori della vulnerabilità fisica degli edifici.....	38
4.6.4 – Modelli di valutazione: dalle curve di danno agli indici sintetici.....	39
5 – Modello di calcolo.....	40
5.1 – Software GIS: QGIS	40

5.2 – DTM – Digital Terrain Model	41
5.3 – Reticolo idrografico e Bacini idrografici	43
5.4 – Caratteristiche del plugin FloodD2B	44
5.4.1 – Le curve di danno JRC (Joint Research Center).....	44
5.4.2 –Tassonomia degli elementi esposti e classificazione.....	46
5.4.3 – Determinazione del danneggiamento fisico ed economico	46
5.5 – Analisi del processo di calcolo pre-interventi di opere per la difesa del territorio	47
5.5.1 – Layer “Battenti e velocità”	47
5.5.2 – Layer vettoriale “Edificato”	51
5.5.3 – Metodologia di stima del danno tramite il plugin FloodD2B.....	54
6 – Analisi Costi e Benefici degli interventi di mitigazione idraulica.....	60
6.1 – Analisi visiva multi-temporale dell’alveo del torrente Petronio tramite rilevamento storico	60
6.1.1 – Zona di foce e tratto terminale arginato (Riva Trigoso)	60
6.1.2 – Zona sub-urbana a monte della zona di foce	64
6.1.3 – Zona a monte del ponte ferroviario	67
6.2 – Analisi visiva dello “stato di fatto” dell’alveo del torrente Petronio tramite visualizzazione 3D	69
6.3 – Stima dei Costi di Realizzazione e calcolo del Costo Annuo Equivalente.....	73
6.4 – Analisi dei Benefici (danni evitati)	74
6.5 – Calcolo del rapporto Benefici/Costi.....	76
7 – Analisi idraulica – HEC-RAS.....	77
7.1 – Preparazione dei dati necessari per l’analisi idraulica su QGIS.....	77
7.2 – Software di analisi fluviale: HEC-RAS	78
7.2.1 – Modellazione monodimensionale (1D)	78
7.2.2 – Modellazione bidimensionale (2D)	79
7.2.3 – Il modulo RAS Mapper e l’interoperabilità con i sistemi GIS	79
7.3 – Analisi idraulica 1D dello stato di fatto su HEC-RAS.....	80
7.3.1 – Definizione del regime di moto permanente (Steady Flow Data) e condizioni al contorno	87

7.3.2 – Risultati del calcolo in condizione di moto permanente monodimensionale	88
7.4 – Risultati del processo 1D dello stato di fatto con il plugin Flood2B.....	99
7.4.1 – Layer “Battenti” derivante da analisi 1D con il software HEC-RAS.....	101
7.4.2 – Layer vettoriale “Edificato”	104
7.4.3 – Metodologia di stima del danno tramite il plugin Flood2B.....	106
7.5 – Analisi idraulica 1D dello stato di progetto su HEC-RAS.....	112
7.5.1 – Riprofilatura del fondo alveo.....	112
7.5.2 – Inserimento delle arginature (levees).....	114
7.6 – Simulazione idraulica e restituzione grafica post-intervento.....	117
7.7 – Risultati del processo 1D dello stato di progetto con il plugin Flood2B.....	121
7.7.1 – Layer “Battenti” derivante da analisi 1D con il software HEC-RAS.....	121
7.7.2 – Layer vettoriale “Edificato”	124
7.7.3 – Metodologia di stima del danno tramite il plugin Flood2B.....	128
7.8 – Analisi idraulica 2D dello stato di fatto su HEC-RAS.....	133
7.8.1 – Definizione del regime di moto non permanente (Unsteady Flow Data) e condizioni al contorno.....	136
7.8.2 – Risultati del calcolo in condizione di moto non permanente bidimensionale.....	138
7.9 – Risultati del processo 2D dello stato di progetto con il plugin Flood2B.....	140
7.9.1 – Layer “Battenti” derivante da analisi 2D con il software HEC-RAS.....	142
7.9.2 – Layer vettoriale “Edificato”.....	145
7.9.3 – Metodologia di stima del danno tramite il plugin Flood2B.....	147
7.10 – Analisi idraulica 2D dello stato di progetto su HEC-RAS.....	152
7.10.1 – Riprofilatura del fondo alveo.....	152
7.10.2 – Inserimento delle arginature.....	153
7.11 – Simulazione idraulica e restituzione grafica post-interventi.....	154
7.12 – Risultati del processo 2D dello stato di progetto con il plugin Flood2B.....	156
7.12.1 – Layer “Battenti” derivante da analisi 2D con il software HEC-RAS.....	156
7.12.2 – Layer vettoriale “Edificato”.....	158

7.12.3	– Metodologia di stima del danno tramite il plugin FloodD2B.....	162
8	– Analisi dei dati.....	168
8.1	– Analisi e confronto dei dati ottenuti da simulazione 1D.....	168
8.1.1	– Confronto del pelo libero pre e post-interventi.....	168
8.1.2	– Confronto della velocità del flusso dell’acqua pre e post-interventi.....	174
8.1.3	– Confronto del Numero di Froude pre e post-interventi.....	180
8.1.4	– Analisi dell’estensione dell’area inondata e dei livelli di battente pre e post-interventi.....	185
8.1.5	– Analisi dei volumi d’acqua esondati pre e post-interventi.....	192
8.1.6	– Analisi del danno economico pre e post-interventi.....	193
8.1.7	– Analisi della percentuale di danno degli edifici pre e post-interventi.....	201
8.1.8	– Confronto tra danno economico e percentuale di danno degli edifici.....	207
8.2	– Analisi e confronto dei dati ottenuti da simulazione 2D.....	211
8.2.1	– Confronto tra il layer “Battenti” del modello pre-interventi e la cartografia regionale.....	211
8.2.2	– Analisi dell’estensione dell’area inondata e la differenza tra i livelli idrici pre-interventi e cartografia regionale.....	214
8.2.3	– Analisi dei volumi di esondazione dal confronto tra il layer pre-interventi e la cartografia regionale.....	220
8.2.4	– Analisi degli edifici coinvolti dall’inondazione per i layer pre-interventi e cartografia regionale.....	221
8.2.5	– Valutazione del danno economico: confronto tra modello pre-interventi e cartografia regionale.....	223
8.2.6	– Valutazione del danno percentuale strutturale: confronto tra modello pre-interventi e cartografia regionale.....	227
8.2.7	– Confronto tra il layer “Battenti” del modello pre e post-interventi.....	233
8.2.8	– Confronto tra il layer della velocità del flusso del modello pre e post-interventi.....	236
8.2.9	– Analisi dell’estensione dell’area inondata e la differenza tra i livelli idrici pre e post-interventi.....	239
8.2.10	– Analisi dei volumi di esondazione dal confronto tra il layer pre e post-	

interventi.....	245
8.2.11 – Valutazione del danno economico: confronto tra modello pre e post- interventi.....	246
8.2.12 – Valutazione del danno percentuale strutturale: confronto modello pre e post-interventi.....	250
9 – Considerazioni sui risultati ottenuti	258
9.1 – Metodo alternativo 1: modellazione idraulica 1D.....	258
9.2 – Metodo alternativo 1: modellazione idraulica 2D	258
Conclusioni e prospettive future.....	260
Bibliografia e sitografia	262

Simbologia

Abbreviazioni e acronimi

ACB	Analisi Costi-Benefici
ARPAL	Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente Ligure
B/C	Rapporto Benefici/Costi
CN	Curve Number
CRIM	Capacità di Ritenzione Idrica Massima
DTM	Digital Terrain Model
EAD	Expected Annual Damage
EPSG	European Petroleum Survey Group
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
GIS	Geographic Information System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
JRC	Joint Research Centre
LiDAR	Light Detection and Ranging
PAI	Piano di Assetto Idrogeologico
PGRA	Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni
QGIS	Quantum Geographic Information System
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCS-CN	Soil Conservation Service - Curve Number
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TR	Tempo di Ritorno
UTM	Universal Transverse Mercator

Introduzione

Le inondazioni rappresentano uno dei rischi naturali più critici e frequenti per i Paesi dell'Unione Europea, determinando impatti severi sulla sicurezza delle popolazioni, sull'integrità del territorio e sulla stabilità del sistema socio-economico. Nel contesto attuale, caratterizzato dal riscaldamento globale, le proiezioni climatiche indicano un incremento della frequenza e dell'intensità degli eventi idrologici estremi. A questo scenario si somma un costante aumento della vulnerabilità dovuto alla crescita della popolazione mondiale, che ha raggiunto gli 8,2 miliardi nel 2025 e a un tasso di urbanizzazione che, secondo le Nazioni Unite, passerà dal 29% a un previsto 70% entro il 2050. Tale espansione antropica comporta un aumento delle superfici impermeabili, ad intensificare gli effetti distruttivi dei fenomeni meteorologici.

L'Italia, per la sua conformazione geomorfologica, presenta un'esposizione al rischio particolarmente elevata. Dati recenti indicano che circa 3 milioni di famiglie e quasi 7 milioni di abitanti risiedono in aree a rischio inondazione o frana (ISPRA, 2021). Oltre il 10% degli edifici nazionali ricade in zone a pericolosità idraulica media, e le attività produttive esposte superano le 640.000 unità. La catastrofica alluvione che ha colpito l'Emilia-Romagna nel maggio 2023 è solo l'ennesimo monito della necessità di strategie di gestione del rischio più efficaci e rapide.

La Fig. mostra, nella mappa di sinistra, gli edifici situati in aree a pericolosità media e la loro percentuale rispetto al totale regionale; in particolare, per il territorio ligure, si osserva che questi ultimi rappresentano il 12,1% dell'intero patrimonio edilizio regionale. Nella mappa di destra viene illustrato il numero di abitanti residenti nelle medesime zone a rischio medio P2: nello specifico, sul territorio ligure, il 17,5% della popolazione è esposto al pericolo di inondazione.

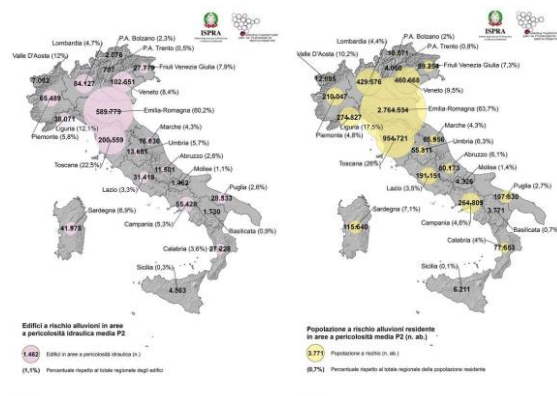


Fig. Edifici e persone a rischio alluvione in aree con livelli medi di rischio di inondazione.

La Direttiva 2007/60/CE (Direttiva Alluvioni) ha introdotto l'obbligo per gli Stati membri di implementare mappe di pericolosità e di rischio, strumenti essenziali per la pianificazione dello sviluppo e la gestione delle emergenze. Tali mappe individuano le aree interessate da esondazioni secondo tre scenari di probabilità: elevata (T50 anni), media (T200 anni) e scarsa (T500 anni).

Tuttavia, la quantificazione del rischio non può prescindere da un'analisi approfondita della vulnerabilità, definita come la propensione di un elemento esposto a subire danni in funzione delle proprie caratteristiche, in quanto è un parametro multidimensionale che dipende da fattori fisici (qualità dei materiali, manutenzione), organizzativi (preparazione della protezione civile) e attitudinali (consapevolezza della popolazione).

Ai fini pratici e ingegneristici, per superare la difficoltà di modellare variabili sociali complesse, si ricorre a funzioni di danno empiriche. Queste correlano direttamente la profondità dell'inondazione al grado di danno subito, permettendo una valutazione rapida e standardizzata della vulnerabilità su scala urbana.

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di definire e applicare un metodo rigoroso, speditivo e quantitativo per la stima dei danni economici e strutturali causati dalle alluvioni agli edifici, focalizzandosi sul caso studio del tratto terminale del torrente Petronio nel comune di Sestri Levante (GE), in corrispondenza dell'abitato di Riva Trigoso. L'analisi viene condotta attraverso una catena modellistica e valutativa integrata che combina l'ingegneria idraulica, i Geographic Information System (GIS) e l'analisi economico-finanziaria delle opere pubbliche.

Per raggiungere tale obiettivo, il lavoro di tesi si articola secondo le seguenti fasi metodologiche:

- analisi dello stato di fatto in ambiente GIS: in questa prima fase viene valutata la pericolosità nello stato attuale utilizzando i dati ufficiali di "Battenti e velocità" forniti dal Geoportale della Regione Liguria per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni. Tramite il software GIS QGIS (versione 3.24.3) e l'utilizzo del plugin FloodD2B, lo stato informativo dell'edificato è stato integrato e classificato secondo la tassonomia del Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea. Sfruttando le funzioni di danno-altezza standardizzate JRC è stata eseguita una prima stima economica dei danni attesi sullo stato di fatto e dei danni strutturali in percentuale in maniera automatizzata;
- analisi visiva e scelta degli interventi mitigativi: sulla base delle aree di inondabili individuate e in stretta coerenza con le pianificazioni e le linee guida dell'Autorità di Bacino, viene condotta un'analisi visiva volta a identificare le principali criticità strutturali del tratto. Vengono inoltre definiti gli interventi mirati alla mitigazione del rischio idraulico:

- rifacimento strutturale del ponte stradale per eliminare l'ostruzione delle pile in alveo e favorire il deflusso;
 - interventi di pulizia e riprofilatura morfologica dell'alveo per rimuovere i depositi di sedimenti e la vegetazione infestante;
 - rifacimento e manutenzione straordinaria delle arginature esistenti per contrastare i fenomeni erosivi e incrementare i franchi di sicurezza.
- analisi Costi-Benefici: è stato implementato un modello economico per stimare la sostenibilità e la convenienza ingegneristica dell'investimento. I costi complessivi di realizzazione e manutenzione delle opere vengono convertiti in un Costo Annuo Equivalente. I benefici vengono quantificati in termini di riduzione del danno atteso annuo (Expected Annual Damage);
- modellazione idraulica post-intervento in HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System - versione 7.0.1): validata la convenienza economica preliminare degli interventi, si passa alla fase di simulazione idraulica numerica tramite il software HEC-RAS. In questa fase viene modificata la geometria dell'alveo dello stato di fatto, inserendo modifiche proposte in fase di scelta degli interventi di mitigazione, ad esempio nuove quote arginali di progetto e riprofilatura del fondo alveo. La simulazione permette di ricavare i nuovi profili di pelo libero e, di conseguenza, di esportare un layer georeferenziato di inondabilità (contenente i nuovi tiranti idrici e velocità) relativo allo scenario "post-intervento";
- stima del danno residuo e analisi comparativa: il layer idraulico post-intervento generato in HEC-RAS viene importato in QGIS e processato con il plugin FloodD2B, applicando la medesima tassonomia JRC utilizzata in precedenza. Infine, viene eseguita un'analisi di confronto diretto tra i risultati dei due passaggi sul plugin (Stato di Fatto vs Scenario Post-Intervento). Tale comparazione quantitativa consente di valutare in maniera quantitativa l'effettiva diminuzione dei danni monetari e l'abbattimento del rischio sull'area urbana di Riva Trigoso.

Il fine ultimo della ricerca è dimostrare come questo flusso di lavoro integrato, che unisce l'accuratezza geometrica della modellazione idraulica, la flessibilità spaziale dei GIS e la solidità dell'Analisi Costi-Benefici, possa costituire uno strumento di supporto alle decisioni per le autorità locali e gli enti di pianificazione nella definizione delle priorità di intervento e nella gestione resiliente del territorio

1. Caratteristiche del bacino idrografico del torrente

Petronio

In questo primo capitolo si introducono gli aspetti descrittivi del bacino idrografico oggetto di studio, soffermandosi l'attenzione sugli elementi che permettono una sua caratterizzazione generale in termini di morfologia, vegetazione e di uso del suolo, litologia, idrologia e di pendenza del versante, clima e sfruttamento delle acque.

1.1. Inquadramento

Il bacino idrografico del torrente Petronio si estende su una superficie complessiva di circa 61 km², configurandosi come uno dei reticoli più significativi del settore costiero del Levante Ligure. La morfologia del bacino è determinata dalla stretta vicinanza dello spartiacque appenninico alla linea di costa; tale prossimità condiziona la risposta idrologica del territorio, caratterizzata da tempi di corrivazione ridotti.

Il torrente Petronio ha origine a una quota di circa 280 m s.l.m.m. dalla confluenza dei rii Traversa e Vasca, alle pendici della Cresta degli Stronzi. Da qui, l'asta principale si sviluppa per una lunghezza complessiva di circa 15,5 km, seguendo l'andamento in direzione est-ovest fino all'abitato di Casarza Ligure, dove il corso piega verso sud per sfociare nel Mar Ligure in corrispondenza di Riva Trigoso.

Il bacino presenta una quota media di 410 m s.l.m.m. ed è delimitato da un crinale che raggiunge la sua massima elevazione nei 1093 m s.l.m.m. del Monte Alpe. Altre vette significative che definiscono il perimetro idrografico sono il Monte Zenone, il Monte Tregin e il Monte San Nicolao, che segnano il confine con i bacini limitrofi dei torrenti Gromolo, Graveglia, Vara e Castagnola.

Il profilo longitudinale del Petronio evidenzia una marcata variazione di energia, distinguibile in tre segmenti morfologici principali:

- tratto montano: caratterizzato da pendenze elevate (circa il 17%), dove l'alveo risulta incassato in roccia e prevalgono processi di erosione e trasporto solido;
- tratto pedemontano: con una pendenza media del 6%, segna la transizione verso le aree di fondovalle;
- tratto terminale: situato in ambito di pianura alluvionale con pendenze che decrescono fino all'1%. In questo settore, a valle della confluenza con il rio Frascaiese, le aree adiacenti diminuiscono la loro acclività fino a formare la piana in corrispondenza di Casarza Ligure.

Il bacino presenta una spiccata asimmetria: osservando l'asta principale, la porzione di area sulla destra orografica risulta maggiormente estesa dal punto di vista areale ma, anche a livello di numerosità degli affluenti, i quali risultano idrograficamente più rilevanti; in particolare, il rio Frascaiese, il torrente Bargonasco e il rio Cacarello drenano insieme circa 25 km², ovvero oltre il 40% dell'intera superficie del bacino. Gli affluenti di sinistra (tra cui i rii di Rove, Baracchino

e Giannelli) presentano invece bacini contribuenti più limitati.

L'assetto idraulico del corpo idrico è strettamente legato al regime pluviometrico stagionale, definibile come "torrenziale". Il torrente è caratterizzato da ampie escursioni di portata tra i periodi di magra e di piena. Gli eventi di maggior rilievo sono associati a fenomeni piovosi intensi che, a causa della conformazione del bacino, si traducono in rapidi incrementi dei livelli idrometrici, con una forte disomogeneità temporale e spaziale nella distribuzione delle piogge.

Dal punto di vista dell'assetto insediativo, il bacino presenta una divisione netta:

- settori medio e montano: caratterizzati da una scarsa urbanizzazione e piccoli insediamenti storici (Velva, Castiglione Chiavarese, Bargone) situati in posizione dominante e distanti dall'alveo principale;
- settore vallivo: a valle della confluenza con il torrente Bargonasco, il grado di urbanizzazione aumenta drasticamente. In particolare, in corrispondenza di Casarza Ligure, la pressione antropica è particolarmente elevata, con aree edificate che occupano le zone prossime al corso d'acqua. In questo tratto l'alveo risulta inciso nelle alluvioni di fondo valle, con sezioni che presentano ristrette aree golenali. Proseguendo verso valle, il tratto terminale presso Riva Trigoso appare arginato con continuità e l'area fociva risulta densamente urbanizzata su entrambe le sponde, presentando diverse interferenze infrastrutturali, come i ponti carrabili e il ponte ferroviario, che ne condizionano l'assetto idraulico.

Nella Fig. 1.1 si evidenzia l'inquadramento geografico del bacino del torrente Petronio.

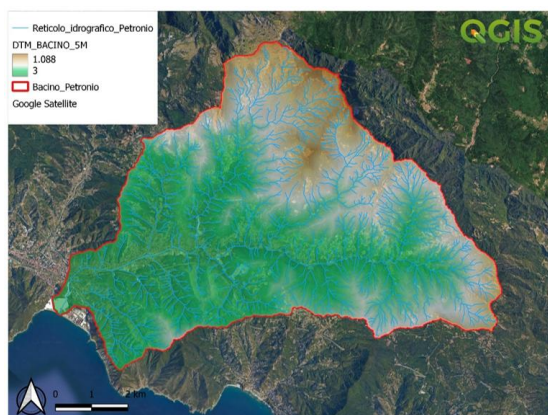


Fig. 1.1 Inquadramento geografico del bacino del torrente Petronio (QGIS).

1.2. Assetto fisico – caratteristiche morfologiche

Il bacino del torrente Petronio è caratterizzato da un sistema vallivo compatto ma estremamente eterogeneo, la cui morfologia è il risultato diretto dell'assetto tettonico e litologico tipico dell'Appennino Ligure di Levante.

Il bacino è racchiuso da linee di crinale ben definite che ne delimitano l'estensione e il comportamento idraulico:

- settore nord-orientale: il bacino è separato dalla Val Graveglia e dalla Val di Vara da uno spartiacque montuoso di rilievo, dove spiccano le vette dei monti Roccagrande, Bocco, Zenone e Alpe. Questi rilievi rappresentano i punti di massima elevazione e alimentazione del reticolo idrografico;
- settore occidentale: il confine è segnato dal crinale che, partendo dal Monte Roccagrande, degrada verso il Monte Tregin, proseguendo fino alla zona di confluenza tra il corso principale del Petronio e il suo principale tributario, il torrente Bargonasco;
- settore Meridionale: il limite è costituito dallo spartiacque che dal Passo del Bracco scende verso il mare in direzione di Punta Manara, chiudendo la valle a ridosso della piana alluvionale di Riva Trigoso.

All'interno del sistema vallivo, assume particolare rilevanza la sub-valle del torrente Bargonasco. Quest'area si distingue dal resto del bacino per una complessità morfologica e ambientale peculiare, caratterizzata da:

- piane in quota e zone umide: la presenza di pianalti sospesi e di aree endoreiche, tra cui spicca la zona umida di Pian di Lago, testimonia un'evoluzione geomorfologica complessa, con forme di accumulo e ristagno idrico in quota di alto valore ecologico;
- emergenze geologiche e archeologia industriale: la valle è segnata da affioramenti rocciosi di grande interesse (tipicamente legati al complesso delle ofioliti) e dalla presenza di siti minerari dismessi per l'estrazione del manganese. Queste preesistenze antropiche, integrate nel contesto naturale, rappresentano elementi morfologici distintivi che influenzano ancora oggi il drenaggio superficiale e la stabilità dei versanti.

La Val Petronio presenta un'asimmetria tra i versanti e una marcata acclività, che tende a smorzarsi bruscamente in prossimità della fascia costiera. La combinazione tra i rilievi ofiolitici del settore settentrionale e le piane alluvionali terminali conferisce al bacino un carattere torrentizio tipico, con tempi di corrivazione ridotti e una forte dinamica sedimentaria.

Nella Fig. 1.2 si evidenzia il modello 3D del bacino del torrente Petronio realizzato con QGIS.



Fig. 1.2 Modello 3D del bacino del torrente Petronio (QGIS).

1.3. Caratteristiche vegetazionali e di uso del suolo

L'analisi della copertura vegetale e dell'uso del suolo nel bacino del torrente Petronio non risponde solo a un'esigenza descrittiva del paesaggio, ma costituisce un parametro fondamentale per la comprensione del bilancio idrologico e per la determinazione del coefficiente di deflusso, essenziale nel calcolo delle portate di massima piena.

1.3.1. Distribuzione della vegetazione e assetto insediativo

Il paesaggio vegetale della Val Petronio segue un gradiente altimetrico e antropico ben definito:

- settore montano (oltre i 400 m s.l.m.): la copertura forestale è dominante, con formazioni di pini, pinastri e castagneti misti. Nelle zone sommitali del bacino del Bargonasco, il bosco cede il passo a praterie montane in fase di evoluzione verso l'arbusteto;
- fascia basale e fondovalle (fino a 400 m s.l.m.): prevalgono le aree antropizzate e agricole. Il versante destro è caratterizzato da ampi terrazzamenti coltivati a oliveto e vigneto, con insediamenti lineari di mezza costa. In prossimità di Bargone, il paesaggio si arricchisce di frutteti e colture specializzate;
- assetto insediativo e zona costiera: procedendo verso la foce, la piana alluvionale mostra un'edificazione diffusa e disorganizzata, che culmina negli abitati di Trigoso e nel nucleo costiero di Riva Trigoso.

Nella Fig. 1.3 è rappresentata la Carta dell'Uso del Suolo del bacino del torrente Petronio dal Piano di Bacino.

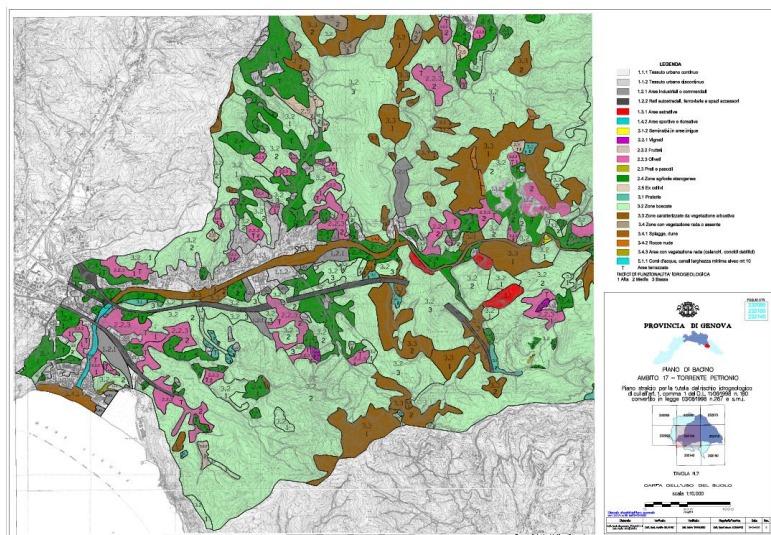


Fig. 1.3 Carta dell'Uso del Suolo (Piano di Bacino – Ambito 17).

Nella Fig. 1.4, in analogia con il Piano di Bacino è rappresentata la Carta dell'Uso del Suolo di Sestri Levante con riferimento alla zona di Riva Trigoso e l'area circostante oggetto di analisi.

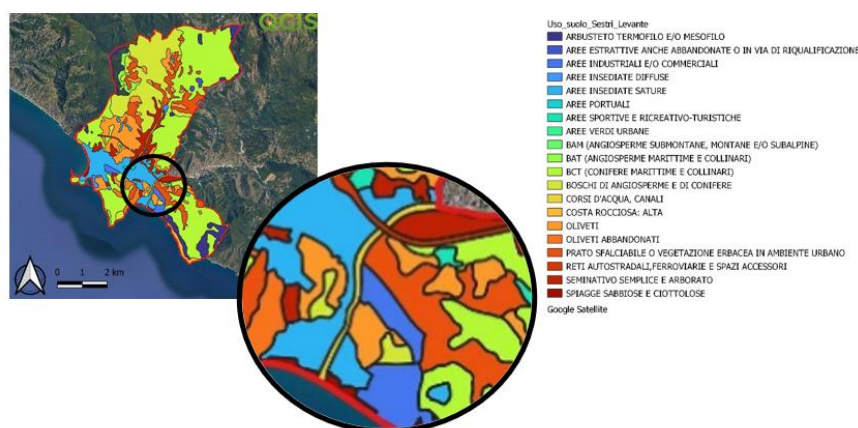


Fig. 1.4 Carta dell'Uso del Suolo dell'area oggetto di studio (QGIS).

1.3.2. Funzionalità idrogeologica del sistema suolo-soprasuolo

L'assetto idrogeologico del bacino è strettamente dipendente dall'interazione tra la parte aerea (copertura vegetale) e quella ipogea (apparati radicali e suolo). Il suolo agisce come un vero e proprio "magazzino" idrico, regolando i deflussi e proteggendo il versante dall'erosione.

Il sistema forestale del bacino svolge funzioni cruciali per la sicurezza idraulica:

- intercettazione delle precipitazioni: le chiome intercettano tra il 5% e il 15% della pioggia, favorendo l'evapotraspirazione e lo scorrimento lento lungo i fusti;
- riduzione dell'energia cinetica: la stratificazione verticale del bosco (piani arborei, arbustivi ed erbacei) mitiga l'impatto delle gocce d'acqua, prevenendo l'erosione;
- regolazione della velocità di scorrimento: la rugosità del terreno (lettiera e ostacoli vegetali) riduce la velocità di scorrimento superficiale fino a 1/4 rispetto a un suolo nudo, abbattendo l'energia erosiva a 1/16;
- infiltrazione e ritenzione: un suolo forestale integro favorisce la porosità e la formazione di complessi argillo-umici, aumentando la Capacità di Ritenzione Idrica Massima (CRIM).

Nella Fig. 1.5 è rappresentata la Carta Idrogeologica del bacino del torrente Petronio proveniente dal Piano di Bacino.

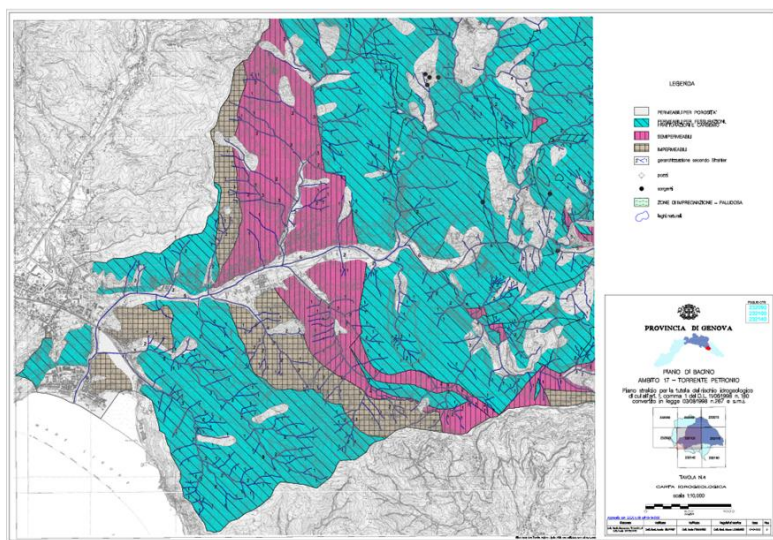


Fig. 1.5 Carta Idrogeologica (Piano di Bacino – Ambito17).

1.3.3. Parametrizzazione idrologica: Indici e Curve Number (CN)

Per una valutazione puntuale della risposta del bacino agli eventi meteorici, si adottano indici di efficienza biologica e di funzionalità idrogeologica, suddivisi in tre classi (alta, media, bassa). Questi indici sono utilizzati come base per la determinazione del Curve Number (CN), parametro del metodo SCS-CN utilizzato per stimare il deflusso superficiale.

Si riportano, nella Tab. 1.1 i valori indicativi di CN (dalla Relazione Generale dal Piano di Bacino Stralcio sul Rischio Idrogeologico) per le principali tipologie di uso del suolo nel bacino del Petronio.

Tipologia d'uso del suolo	classe 1 CN	classe 2 CN	classe 3 CN
Bosco	55-65	66-75	76-85
Arbusteti e incolti arbustati	60-70	71-80	81-88
Pascoli e incolti prativi	62-72	73-85	86-90
Coltivi, prati a sfalcio	55-65	66-78	79-90

Tab. 1.1 Valori indicativi del Curve Number
(Piano di Bacino del torrente Petronio – Ambito17).

La distinzione tra efficienza biologica (parametri vitali della cenosi) e funzionalità idrogeologica (capacità di regimazione acque) permette una pianificazione di bacino basata sullo stato di salute

reale del territorio, superando la genericità delle normali carte della vegetazione.

1.4. Caratteristiche geologiche

La geologia del bacino del torrente Petronio è caratterizzata da una notevole complessità, derivante dalla sovrapposizione di diverse unità tettoniche. Sebbene la letteratura offra diverse interpretazioni sui rapporti stratigrafici e sulle coperture quaternarie, l'assetto generale è riconducibile alla successione di un basamento ofiolitico e della sua copertura sedimentaria giurassico-cretacea.

Il bacino rappresenta una delle aree più significative dell'Appennino Settentrionale per lo studio della crosta oceanica. Le ofioliti affiorano in due masse principali: il Massiccio del Bracco e il complesso Bargonasco-Val Graveglia.

La serie comprende, procedendo dall'alto verso il basso:

- basalti: prodotti da attività vulcanica sottomarina, si presentano spesso con la tipica struttura a pillow (lave a cuscino), ben visibili sui monti Pù e Zenone;
- breccie ofiolitiche: distinte in superiori (prevalentemente gabbriiche come al M. Zenone) e inferiori (clasti serpentinitici come a Case Boeno), testimoniano l'erosione del fondale oceanico;
- gabbri: rocce magmatiche intrusive ben evidenti nell'area del Bargonasco e del M. San Nicolao;
- serpentiniti: rappresentano il mantello oceanico. Si presentano massicce o fratturate, talvolta associate a Oficalciti (come al M. Bianco), sfruttate storicamente come pietre ornamentali.

Nella Fig. 1.6 è rappresentata la Carta Litologica del bacino del comune di Sestri Levante realizzata con il software QGIS.

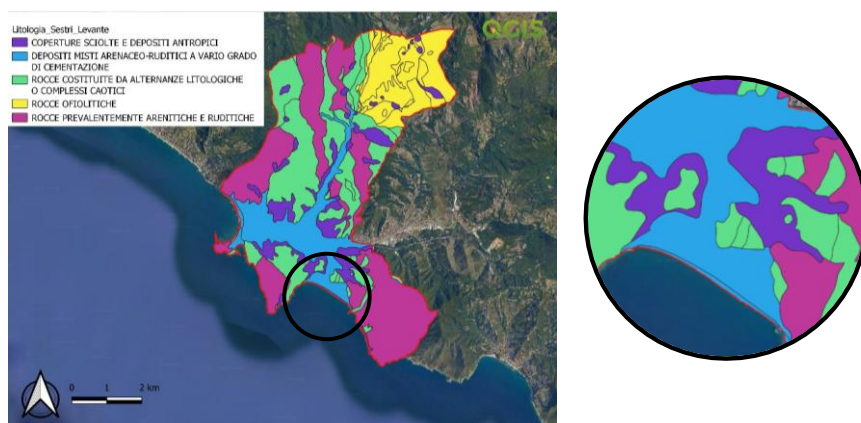


Fig. 1.6 Carta Litologica del comune di Sestri Levante (QGIS).

1.4.1. La copertura sedimentaria

Sopra il basamento ofiolitico si è depositata una serie di sedimenti pelagici che segnano l'evoluzione del bacino oceanico:

- diaspri (Giurassico superiore): selci fittamente stratificate (M. Tregin, M. Alpe), spesso ricche di manganese, depositate per precipitazione chimica e accumulo di radiolari;
- calcari a Calpionelle (Cretacico inferiore): calcari micritici biancastri, testimoni di un ambiente di mare aperto;
- argille a Palombini: formazione ampiamente diffusa nel bacino, costituita da alternanze di argilloscisti e calcari silicei compatti. Rappresentano la fase dell'inizio della chiusura del bacino oceanico;
- complesso dei Flysch (Cretacico superiore - Paleocene): comprende la Formazione della Val Lavagna e le Arenarie del Monte Gottero. Queste ultime sono depositi torbiditici che indicano l'accumulo di materiali terrigeni ai piedi della scarpata continentale;
- argilliti di Giaiette (Paleocene): affioranti nel tratto terminale del torrente (Riva Trigoso), chiudono la successione con facies emipelagiche.

Nella Fig. 1.7 è rappresentata la Carta Geolitologica del bacino del torrente Petronio dal Piano di Bacino.

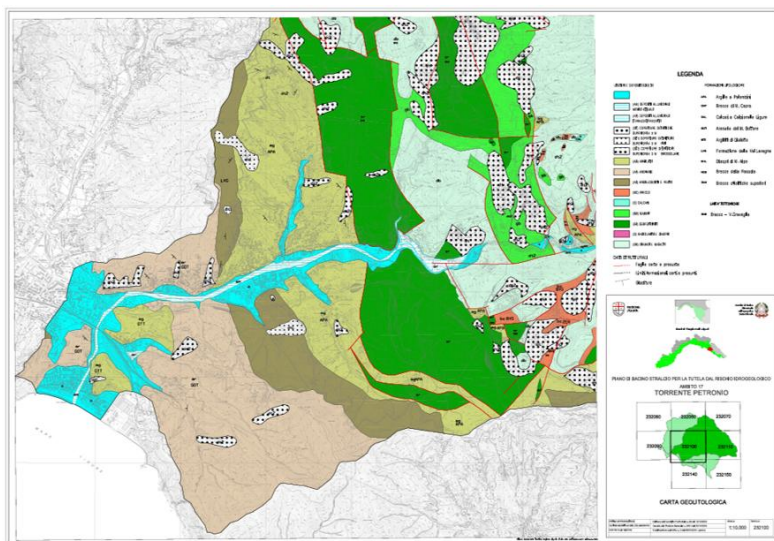


Fig. 1.7 Carta Geolitologica del bacino del torrente Petronio (Piano di Bacino - Ambito 17).

1.4.2. Assetto Tettonico e Strutturale

L'attuale configurazione del bacino è il risultato di tre fasi principali di evoluzione tettonica:

- fase Plicativa (Orogenesi Appenninica): ha generato pieghe di dimensioni chilometriche con assi N-S e NO-SE. Un esempio è la serie rovesciata del M. Pù e di S. Pietro Frascati, dove le ofioliti appaiono tettonicamente sovrapposte a termini stratigraficamente più giovani (argille a Palombini);
- fase Rigida (Tettonica Disgiuntiva): caratterizzata da sistemi di faglie che hanno sezionato il territorio. Il sistema con direttrice E-O è di particolare importanza poiché ha condizionato direttamente l'idrografia, determinando l'orientamento del tratto centrale dell'asta principale del Petronio.

1.5. Caratteristiche geomorfologiche

L'assetto geomorfologico del bacino del torrente Petronio è il risultato di una complessa interazione tra l'eredità litologica, la dinamica tettonica recente e i processi esogeni modellatori. La varietà delle forme del rilievo riflette fedelmente il contrasto tra le formazioni rocciose rigide e quelle a comportamento plastico.

Nella Fig. 1.8 è rappresentata la carta Geomorfologica del bacino del torrente Petronio derivante dal Piano di Bacino.

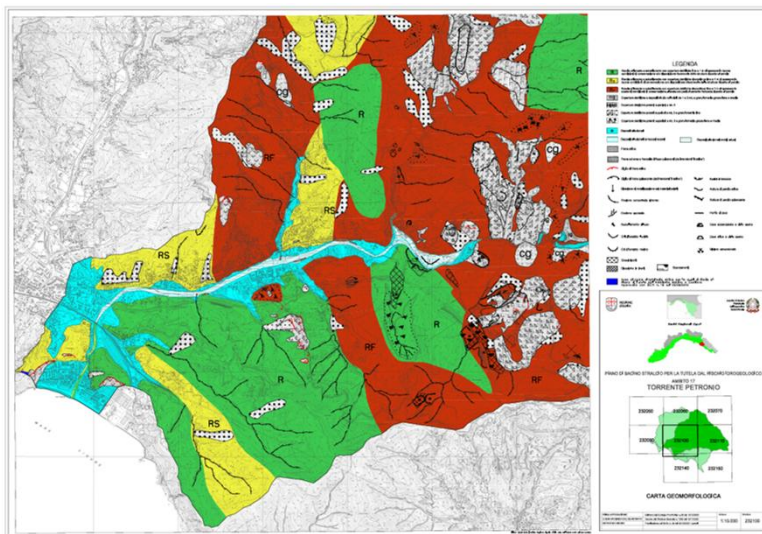


Fig. 1.8 Carta Geomorfologica del bacino del torrente Petronio
(Piano di Bacino - Ambito 17).

1.5.1. Influenza litostrutturale sul modellamento dei versanti

La morfologia del bacino mostra un netto controllo litologico:

- domini ofiolitici e arenacei: le serpentiniti, i gabbri, i basalti e le Arenarie del M. Gottero danno luogo a versanti acclivi, caratterizzati da forme aspre e processi di denudamento diffusi. La rigidità di tali materiali favorisce fenomeni di rottura netta e crolli;
- domini argillitici: le argille a Palombini, la Formazione di Val Lavagna e le Argilliti di Giaiette modellano versanti decisamente più dolci e ondulati, tipici di materiali a comportamento plastico soggetti a soliflusso e scorrimenti rotazionali.

La rete idrografica appare fortemente condizionata dalla tettonica recente; il reticolo si è infatti impostato sulle direttrici di faglia N-S ed E-O, che hanno frammentato il substrato in blocchi distinti.

1.5.2. Depositi superficiali e coperture detritiche

Seguendo la legenda ufficiale della Regione Liguria (Circ. 2077/88), il territorio è stato classificato in base allo spessore e alla natura delle coltri:

- roccia affiorante (R, Rs, Rf): domina gran parte del bacino con coperture discontinue inferiori a 1 metro. La distinzione tra substrato stabile (R), sfavorevole (Rs) o alterato/fratturato (Rf) è cruciale per la valutazione della pericolosità;
- depositi eluvio-colluviali: in zone depresse o ai piedi dei rilievi ofiolitici (ad esempio, M. Roccagrande) si rinvencono coltri con spessori superiori ai 3 metri. La matrice varia da grossolana (nei settori ofiolitici) a finemente argillosa (sulle argille a Palombini);
- depositi alluvionali: l'attività torrentizia attuale prevale sulla deposizione, limitando le alluvioni attive all'alveo. Residui di antichi terrazzi erosivi e deposizionali sono identificabili in località Casali e nel fondovalle tra Cotarsa di Fondo e di Mezzo.

1.5.3. Forme e processi gravitativi

Il bacino è segnato da un'intensa dinamica gravitativa, con una distinzione netta tra forme attive e quiescenti (secondo le definizioni UNESCO 1993 e Varnes 1978).

Tipologie di dissesto:

- soil slip: scorrimenti superficiali rapidissimi (spessore < 1 m) legati a eventi meteorici intensi che saturano le coltri;
- debris flow: colate di detrito rapide, localizzate soprattutto nel settore orientale (Rio dei Guacci) e sulle formazioni della Val Lavagna;
- scivolamenti: la tipologia più diffusa, che avviene generalmente lungo la superficie di contatto tra coltre detritica e substrato lapideo. Un caso emblematico è la frana di Masso, dove l'instabilità è aggravata dal drenaggio indotto dalle gallerie minerarie abbandonate;
- crolli e ribaltamenti: legati a pareti rocciose acclivi, come nel caso del Rio Frascarese a Campegli;
- frane complesse e paleofrane: fenomeni di grandi dimensioni (potenza > 6 m), spesso

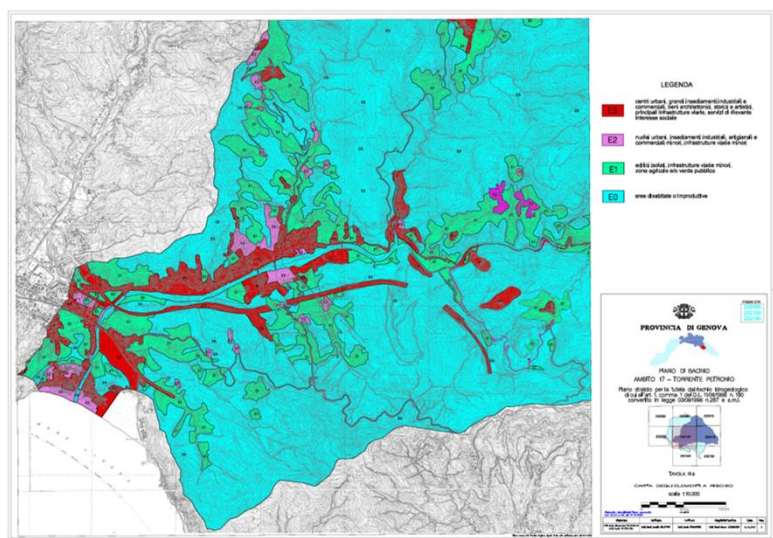


Fig. 1.10 Carta degli elementi a rischio del bacino del torrente Petronio
(Piano di Bacino- Ambito 17).

1.6. Aspetti idrologici e pendenza del versante

L'analisi dei processi attivi lungo il reticolo idrografico del torrente Petronio evidenzia un sistema in fase di ringiovanimento post-quaternario, dove l'azione dell'acqua modella il territorio attraverso forme di erosione concentrata e diffusa, condizionate dall'assetto litologico e dalla pressione antropica.

La dinamica fluviale del Petronio è caratterizzata da tre processi principali che riflettono l'energia del corso d'acqua:

- erosione concentrata di fondo: prevale nei settori a roccia affiorante, favorita dalle elevate velocità di corrente e dalla scarsa copertura vegetale sui versanti, che accelera il tempo di risposta del bacino;
- erosione spondale: fenomeno localizzato laddove il torrente lambisce materiali sciolti o contatti formazionali eterogenei. Tali criticità sono accentuate dall'abbandono dei coltivi e dalla presenza di aree industriali o estrattive non adeguatamente protette;
- ruscellamento diffuso: capillarmente presente su tutto il bacino, contribuisce all'apporto di sedimenti fini verso l'asta principale.

L'asta del torrente Petronio presenta una morfologia che varia sensibilmente procedendo verso la foce, con numerosi punti di criticità legati alle infrastrutture esistenti:

- tratto Casali – Battilana: il torrente appare inizialmente incassato tra versanti naturali e terrazzi alluvionali (Casali). In località Battilana, la presenza di un vecchio ponte a due campate in

disuso, parzialmente ostruito da depositi, rappresenta una strozzatura che ostacola il regolare deflusso;

- settore della confluenza col Bargonasco: area oggetto di recenti interventi di sistemazione idraulico-forestale (scogliere in massi e allargamento sezioni). Nonostante le difese, si rilevano edifici posti a quote inferiori rispetto alla sommità arginale (località Villa Ricci), indicando una vulnerabilità intrinseca del territorio urbanizzato;
- attraversamento di Casarza Ligure: in questo tratto il torrente riceve i contributi dei rii Vallegrande e Cacarello. La presenza di numerosi ponti che si susseguono nel tratto analizzato e il restringimento dell'alveo aumentano il rischio di rigurgito idraulico, specialmente per gli agglomerati posti a quota inferiore rispetto agli impalcati;
- tratto Vallescura – Sara: il tratto è caratterizzato da forti erosioni spondali e dalla presenza di salti di fondo parzialmente interrati. In località Sara, la stabilità strutturale del ponte carrabile è compromessa dal distacco della platea di fondazione, segno di un'attiva dinamica di erosione localizzata;
- tratto terminale e foce (Riva Trigoso): a valle del viadotto autostradale, il torrente Petronio entra in un ambito fortemente antropizzato. Il corso d'acqua è quasi interamente canalizzato tra muri d'argine che proteggono aree urbanizzate depresse. Le criticità maggiori si riscontrano in corrispondenza del doppio attraversamento (via Aurelia e ferrovia), dove le pile in alveo riducono la sezione utile.

Il restringimento più critico si verifica presso il ponte romano, poco prima che il torrente attraversi il centro abitato di Riva Trigoso per sfociare nel Mar Ligure.

Nella Fig. 1.11 è possibile osservare il modello 3D della pendenza del versante del bacino del torrente Petronio realizzato con il software QGIS.

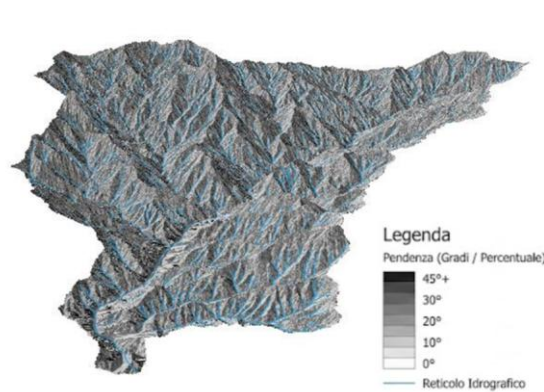


Fig. 1.11 Modello 3D della pendenza del versante del bacino del torrente Petronio (QGIS).

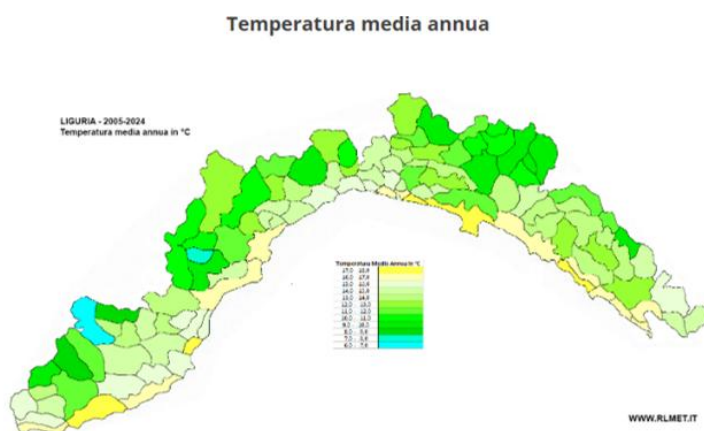
1.7. Caratteristiche climatiche

L'assetto climatico del bacino del torrente Petronio è determinato in modo decisivo dalla sua posizione geografica e dalla morfologia del territorio. La stretta vicinanza dello spartiacque appenninico alla linea di costa e l'orientamento della valle, pressoché parallelo al litorale, definiscono un contesto di spiccata marittimità, tipico del settore del Levante Ligure.

1.7.1. Lineamenti termometrici e influssi marini

Il bacino gode di un clima temperato caldo di tipo mediterraneo. L'influenza del Mar Ligure agisce come volano termico, garantendo temperature miti e riducendo le escursioni termiche stagionali e giornaliere. I rilievi che delimitano il bacino a settentrione svolgono un'importante funzione di barriera contro i venti freddi di origine continentale (tramontana), mentre l'apertura verso sud-ovest espone il territorio ai venti umidi e tiepidi di origine marina.

I dati termometrici riflettono questo equilibrio, con valori medi che oscillano tra i 2 °C dei mesi invernali e i 28 °C del periodo estivo. L'inverno è caratterizzato da una scarsa umidità relativa e da un clima generalmente soleggiato. Nella Fig. 1.12 si può osservare l'andamento delle temperature medie annue della Liguria.



che genera precipitazioni intense e concentrate.

Il bacino è particolarmente sensibile a eventi temporaleschi di breve durata ma di elevata violenza. Le precipitazioni risultano abbastanza ripartite tra le stagioni, con massimi autunnali e primaverili.

Sebbene rare sulla costa, le nevicate interessano con regolarità le testate del bacino e i rilievi oltre i 600-800 m s.l.m.m. (M. Zenone, M. Alpe, M. Roccagrande) nel periodo compreso tra dicembre e marzo.

La Fig. 1.13 mostra la distribuzione delle precipitazioni medie annue in Liguria.

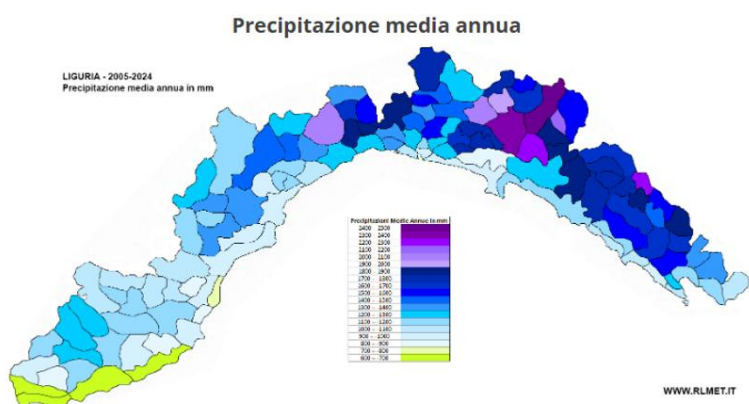


Fig. 1.13 Precipitazioni medie annue delle stazioni liguri 2005-2024 (RIMet).

1.7.3. Circolazione atmosferica e dinamiche locali

Il clima della Val Petronio è governato dall'alternanza tra due configurazioni principali:

- anticicloni continentali: portano tempo stabile, secco e venti settentrionali;
- depressioni del Golfo di Genova: il Mar Ligure attiva richiami di aria umida meridionale (Sirocco e Libeccio) che, incanalandosi nel “corridoio” della valle, innescano le fasi di maltempo più critiche per il bilancio idrologico del torrente.

1.8. Sfruttamento delle acque

L'analisi dello sfruttamento delle risorse idriche nel bacino del Torrente Petronio rivela un quadro complesso, dove le caratteristiche geologiche e idrogeologiche del territorio condizionano direttamente le modalità di captazione e utilizzo della risorsa.

Il potenziale di sfruttamento del bacino è strettamente legato alla permeabilità delle formazioni rocciose. Secondo i dati del Piano di Bacino, il territorio è così ripartito:

- formazioni permeabili per fessurazione (58%): rappresentano la principale riserva idrica

sotterranea. Includono le “rocce verdi” (serpentiniti, gabbri, basalti) e i complessi calcarei. In queste zone, l’acqua percola attraverso i sistemi di fratture, alimentando sorgenti e falde profonde.

- formazioni permeabili per porosità (6%): limitate alle coltri detritiche e ai depositi alluvionali di fondovalle. Nonostante la scarsa presenza percentuale, queste zone (come i depositi sabbioso-ghiaiosi lungo l’asta principale) sono cruciali per la captazione tramite pozzi;
- formazioni impermeabili o semipermeabili (35%): costituite principalmente da argille a Palombini e argilloscisti, che favoriscono il ruscellamento superficiale a scapito dell’infiltrazione.

Lo sfruttamento delle acque nel bacino avviene principalmente per scopi idropotabili attraverso una rete di acquedotti locali che servono i centri abitati (Sestri Levante, Casarza Ligure, Castiglione Chiavarese). Sono presenti sorgenti e pozzi, che permettono di sfruttare la circolazione idrica sotterranea sia tramite la captazione di sorgenti in quota, sia attraverso pozzi situati nelle piane alluvionali.

Un aspetto critico riguarda la vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto idrico. Ad esempio, nel sottobacino del Rio Frascares, le frane per crollo avvenute storicamente hanno danneggiato tratti dell’acquedotto locale, evidenziando il rischio a cui sono soggette le opere di sfruttamento in contesti geomorfologici instabili.

Un elemento peculiare dello sfruttamento idrico nel bacino del Petronio è legato all’eredità mineraria. Ad esempio, nella zona del Rio Acqua Fredda e di Masso, le antiche gallerie minerarie (utilizzate per l’estrazione di rame) fungono tuttora da sistemi di drenaggio non regimato. Queste cavità sotterranee concentrano e diffondono le acque meteoriche nel sottosuolo, influenzando non solo il bilancio idrico locale ma accelerando anche i fenomeni franosi (come nel caso della frana di Masso). Inoltre, la presenza di cave attive e dismesse incide sul reticolo di drenaggio superficiale, modificando i tempi di corrivazione e la qualità del ruscellamento.

Sebbene l’uso potabile sia prevalente, si segnala l’importanza dello sfruttamento delle acque anche per il settore agricolo, localizzato prevalentemente nelle zone terrazzate e di fondovalle, dove il prelievo avviene sia dal corso d’acqua principale che da falde superficiali, e per il settore industriale. In particolare, le aree di espansione industriale (come in sponda sinistra del Petronio e lungo il Bargonasco) rappresentano poli di domanda idrica che richiedono una gestione attenta, specialmente in relazione al rischio di inquinamento delle falde e alla regimazione degli scarichi.

2. Eventi alluvionali

In questo capitolo si analizzano sinteticamente le alluvioni che hanno interessato l'area del bacino del torrente Petronio provocando i maggiori danni, per delineare le zone storicamente maggiormente colpite.

2.1. Gli eventi storici alluvionali del torrente Petronio

La ricostruzione della memoria storica delle piene rappresenta il punto di partenza imprescindibile per la valutazione della pericolosità idraulica. Attraverso l'analisi bibliografica, il recupero di dati pluviometrici e le testimonianze locali, è possibile identificare le aree sistematicamente soggette a esondazione e comprendere le dinamiche evolutive del rischio in relazione all'antropizzazione del fondovalle. Nella Fig. 3.1 si può osservare la mappa delle aree storicamente inondate in corrispondenza della zona oggetto di studio del bacino del torrente Petronio.

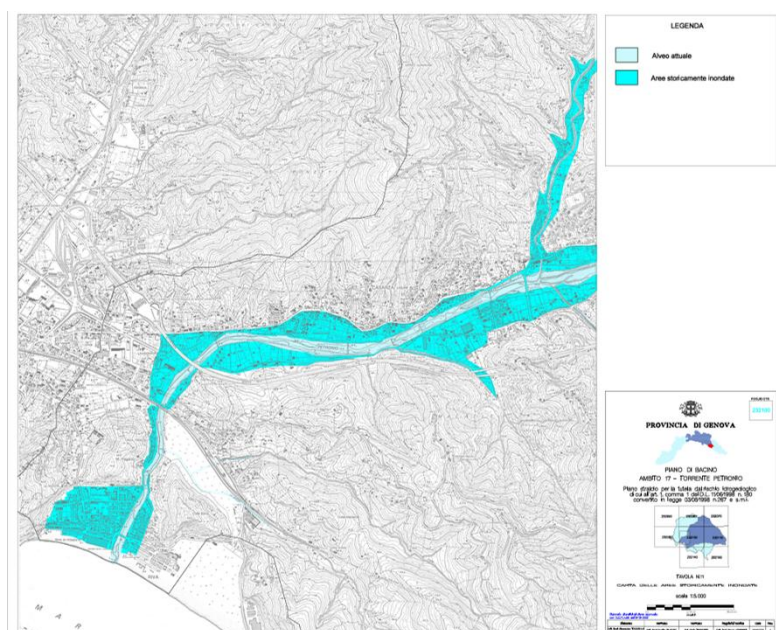


Fig. 2.1 Carta delle aree storicamente inondate (Piano di bacino – Ambito I7).

2.1.1. Cronologia degli eventi

Fase storica (1901 - 1957):

- 21 Ottobre 1901: primo evento documentato. Sebbene i dati siano frammentari, è accertato il coinvolgimento del settore di Casarza Ligure;
- 10 Settembre 1937: è l'evento di riferimento della prima metà del secolo, caratterizzato da una portata al colmo stimata di 490 m³/s. Le precipitazioni a Castiglione Chiavarese toccarono i 198 mm in 10 ore. Gli effetti furono catastrofici: asportazione del ponte di Riva Trigoso, distruzione di due ponti in calcestruzzo armato in valle e una vittima;
- 18-19 Febbraio 1955 e 13 Dicembre 1957: eventi di minore entità pluviometrica che causarono allagamenti a Riva Trigoso, probabilmente legati all'insufficienza del reticolo di drenaggio urbano più che a una tracimazione diretta dell'asta principale.

Eventi della seconda metà del XX secolo (1970 - 1982):

- 10 Gennaio 1970: precipitazioni di 173,8 mm in 24 ore causarono il crollo della pila di un ponte a Casarza Ligure, isolando la frazione Case Nuove;
- 20-21 Settembre 1979: rappresenta l'alluvione più grave per estensione dei danni. Nonostante il centro dello scroscio fosse sul bacino del torrente Gromolo, il torrente Petronio subì pesanti erosioni spondali. Si registrarono esondazioni alle confluenze del Rio Gavotino e del torrente Bargonasco (asportazione di 2 ettari di terreno agricolo). L'innalzamento del fondo alveo dovuto al trasporto solido, alimentato dai detriti dei cantieri autostradali, aggravò sensibilmente la dinamica;
- 24 Settembre 1981 e 8 Novembre 1982: due eventi ravvicinati che colpirono ripetutamente le località Battilana, e Sara. Si verificarono crolli arginali in località Pestella e allagamenti diffusi a Riva Trigoso.

2.1.2. Analisi delle criticità

L'analisi storica permette di gerarchizzare le criticità del bacino:

- nodi idraulici critici: le aree di confluenza e i tratti urbanizzati di Casarza e Riva Trigoso risultano le zone a maggior frequenza di inondazione;
- effetti del trasporto solido: l'innalzamento del fondo alveo, causato da frane e attività antropiche (cave e discariche), è un fattore aggravante che riduce la capacità di smaltimento delle portate di piena;
- vulnerabilità crescente: nonostante la realizzazione di nuove arginature, l'urbanizzazione intensa di aree storicamente inondabili ha portato a un netto incremento del rischio potenziale.

Nella Fig. 2.2 si può osservare la carta del rischio idraulico, nella quale si evidenziano 5 classi di rischio (R0, R1, R2, R3, R4) dal più lieve a quello più elevato.

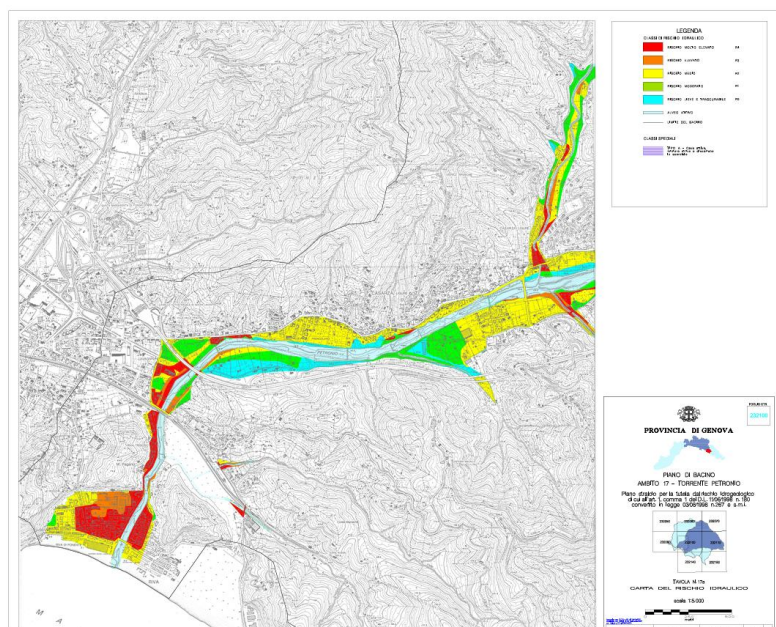


Fig. 2.2 Carta del rischio idraulico (Piano di bacino – Ambito 17).

3. Quadro normativo italiano

Il capitolo seguente vuole rappresentare un excursus sugli aspetti principali della Normativa Italiana in materia di alluvioni, con particolare attenzione rivolta alla Pianificazione di Bacino, che ha portato alla realizzazione delle mappe di rischio e pericolosità.

3.1. Pianificazione di Bacino

La pianificazione di bacino rappresenta lo strumento fondamentale per la gestione integrata del territorio, finalizzata alla difesa del suolo, alla tutela delle risorse idriche e alla mitigazione dei rischi naturali. Per il bacino del torrente Petronio, l'autorità competente e il quadro normativo di riferimento hanno subito un'importante evoluzione, passando dalla gestione regionale a quella distrettuale.

A seguito del D.Lgs. 152/2006 (Norme in materia ambientale) e dei successivi decreti attuativi (D.M. 25/10/2016), il torrente Petronio è ricompreso nel Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale. L'Autorità di Bacino Distrettuale ha ereditato le funzioni della precedente Autorità di Bacino Regionale della Liguria, coordinando la pianificazione per un territorio che si estende dalla Liguria alla Toscana e all'Umbria. Il Piano di Bacino vigente è dunque il Piano di Bacino del torrente Petronio, recepito e integrato negli strumenti distrettuali.

I Piani di Bacino sono stati introdotti dalla Legge n. 183 del 18 maggio 1989, che ha definito il bacino idrografico come l'unità fisica ottimale per la gestione del territorio. Tale norma definisce il Piano di Bacino come uno strumento conoscitivo, normativo e tecnico.

Attualmente, il quadro della pianificazione per il torrente Petronio si articola in due strumenti principali previsti dalle direttive europee:

- Piano di Assetto Idrogeologico (PAI): finalizzato al controllo dei fenomeni di dissesto dei versanti e alla stabilità geomorfologica;
- Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA): introdotto dal D.Lgs. 49/2010 (attuazione della Direttiva Europea 2007/60/CE "Alluvioni"), focalizzato specificamente sulla riduzione delle conseguenze negative delle alluvioni per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche.

La strategia di mitigazione del rischio nel bacino del Petronio si basa sulla combinazione di due tipologie di misure:

- misure strutturali: includono le opere fisiche realizzate lungo l'asta del torrente Petronio e dei suoi affluenti (Bargonasco, Vallegrande, ...), quali muri d'argine, scogliere in massi, briglie di trattenuta del trasporto solido e l'adeguamento delle sezioni idrauliche in corrispondenza dei ponti;
- misure non strutturali: riguardano la gestione del territorio e comprendono:
 - sistemi di allertamento (gestiti dal Centro Funzionale di ARPAL), che risultano fondamentali per la previsione meteo-idrologica in un bacino caratterizzato da tempi di corrivazione molto brevi;

- vincoli d’uso del suolo: consistono nella perimetrazione delle fasce di inondabilità che limita o vieta l’edificazione in aree a rischio;
- piani di Protezione Civile: procedure di emergenza comunali per l’evacuazione e il presidio dei punti critici (es. ponti nel centro di Casarza Ligure e Riva Trigoso).

Nonostante la pianificazione, permangono carenze specifiche che influenzano l’assetto idraulico:

- manutenzione del reticolo minore: i piccoli rii che drenano i versanti spesso presentano sezioni ostruite da vegetazione o depositi, aumentando il rischio di esondazioni locali;
- impermeabilizzazione dei suoli: l’urbanizzazione nelle aree di fondovalle ha ridotto la capacità di invaso naturale, aumentando i volumi di deflusso superficiale;
- inadeguatezza degli attraversamenti: molti manufatti storici (come il ponte romano a Riva Trigoso o vecchi ponti ferroviari) rappresentano strozzature idrauliche che ostacolano il deflusso delle portate di picco;
- Polizia Idraulica: la necessità di una vigilanza costante per prevenire l’occupazione impropria delle aree demaniali e l’accumulo di materiali in alveo che potrebbero essere trasportati a valle durante le piene.

All’interno della Fig. 3.1 si evidenzia la suddivisione delle Autorità di Bacino in Italia.



Fig. 3.1 Autorità di Bacino del territorio italiano.

3.2. Linee di intervento strutturali

Gli interventi strutturali costituiscono l’insieme delle opere civili e idraulico-forestali volte a modificare la geometria delle sezioni, le pendenze degli alvei o la scabrosità delle superfici, al fine di contenere le portate di piena o stabilizzare i versanti. Nel bacino del torrente Petronio, la strategia strutturale è legata alla morfologia della valle e alla densità abitativa.

3.2.1. Difese spondali e arginature

L'intervento strutturale prevalente nel tratto medio-basso del torrente Petronio (Casarza Ligure e Riva Trigoso) riguarda il consolidamento e l'adeguamento delle difese spondali.

- Muri di sponda e scogliere: il Piano di Bacino prevede l'impiego di scogliere in massi ciclopici, preferite per la loro capacità di dissipazione energetica e minor impatto paesaggistico rispetto al cemento armato, specialmente nei tratti di raccordo tra aree naturali e urbanizzate;
- sottomurazioni e ringrossi: in ambito urbano, dove lo spazio è limitato, gli interventi mirano al rinforzo delle arginature esistenti per garantirne la stabilità contro lo scalzamento al piede causato dall'erosione.

3.2.2. Sistemazioni idraulico-forestali (Settore montano)

Per ridurre il trasporto solido e rallentare i tempi di corrivazione, il Piano di Bacino individua interventi nel reticolo idrografico minore e nelle testate di bacino:

- briglie e soglie: opere trasversali destinate alla correzione della pendenza del fondo alveo e al trattenimento dei detriti. Questo è fondamentale per evitare che il materiale trasportato a valle durante le piene, vada a ostruire le sezioni in corrispondenza dei ponti;
- ingegneria naturalistica: nelle aree soggette a erosione diffusa, si prediligono tecniche che utilizzano materiale vegetale vivo per stabilizzare le coltri detritiche e ridurre l'apporto di sedimenti nel torrente principale.

3.2.3. Adeguamento dei manufatti di attraversamento

Una linea di intervento prioritaria riguarda la rimozione delle strozzature idrauliche rappresentate dai ponti.

- Rifacimento degli impalcati: molti ponti esistenti presentano pile in alveo o franchi liberi insufficienti. Gli interventi strutturali mirano alla sostituzione di tali manufatti con ponti a campata unica o con impalcati rialzati per garantire il deflusso della portata di progetto con tempo di ritorno di 200ennale.
- Pulizia e manutenzione dei ponti storici: dove non è possibile intervenire strutturalmente (per esempio presso il ponte romano di Riva Trigoso), la strategia si sposta sulla manutenzione costante della sezione sottostante.

3.2.4. Gestione delle aree di pertinenza fluviale

Il Piano di Bacino promuove, dove possibile, il ripristino delle aree di esondazione naturale, attraverso delocalizzazione e riprofilatura. In alcune aree agricole o meno urbanizzate, l'intervento strutturale può consistere nel "dare spazio al fiume", permettendo l'esondazione controllata in aree non critiche per abbassare il colmo di piena a valle.

3.3. Linee di intervento non strutturali

Le misure non strutturali comprendono tutte le attività che non comportano la realizzazione di opere fisiche in alveo, ma mirano a ridurre il rischio attraverso la regolamentazione dell'uso del suolo, la previsione meteorologica, l'allertamento della popolazione e la corretta manutenzione del territorio.

Lo strumento principale di intervento non strutturale è la zonizzazione del territorio in fasce di pericolosità. Il Piano di Bacino del torrente Petronio impone vincoli gerarchizzati:

- fasce di inondabilità (A, B, C): in queste aree, individuate sulla base dei tempi di ritorno della piena (TR 50, 200 e 500 anni), il Piano di Bacino vieta o limita nuove edificazioni, l'ampliamento di volumi esistenti e l'insediamento di funzioni sensibili (scuole, ospedali, impianti strategici);
- norme di salvaguardia: tali norme impediscono l'aggravamento del rischio nelle zone non ancora urbanizzate, preservando la capacità di laminazione naturale delle pianure alluvionali residue.

Nella Fig. 3.2 si può osservare la mappa delle fasce di inondabilità di una porzione del bacino del torrente Petronio che evidenzia l'area oggetto di studio in questa tesi.

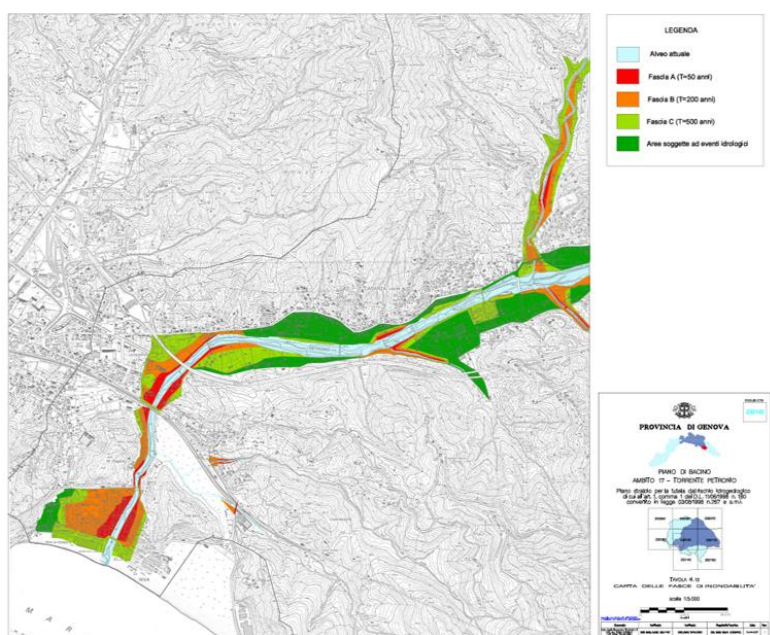


Fig. 3.2 Carta delle fasce di inondabilità del bacino del torrente Petronio (Piano di Bacino – Ambito 17).

3.3.1. Sistemi di previsione e monitoraggio (Allertamento)

Data la brevità dei tempi di corrivazione del torrente Petronio, la protezione della vita umana dipende dall'efficacia dei sistemi di allerta:

- monitoraggio in tempo reale: utilizzo della rete di idrometri e pluviometri collegati al Centro Funzionale di ARPAL;
- soglie di criticità: il Piano di Bacino stabilisce soglie idrometriche superate le quali scattano le fasi di preallerta e allerta, permettendo ai Comuni di attivare i Piani di Emergenza Comunali.

3.3.2. Gestione e manutenzione ordinaria

Il Piano di Bacino sottolinea come la mancanza di manutenzione sia stata spesso causa di aggravamento dei danni storici. Le linee di intervento non strutturali prevedono:

- polizia idraulica: attività di vigilanza per impedire lo scarico abusivo di materiali detritici o rifiuti in alveo e il controllo della vegetazione ripariale che, se eccessiva o instabile, può ostruire le luci dei ponti;
- manutenzione del reticolo minore: programmazione di interventi periodici di pulizia dei rii secondari per garantire il corretto drenaggio delle acque meteoriche dai versanti.

3.3.3. Cultura del rischio e protezione civile

Un pilastro fondamentale è l'aumento della resilienza della popolazione:

- informazione alla popolazione: campagne di sensibilizzazione per far conoscere ai cittadini le aree inondabili e i comportamenti corretti da adottare in caso di allerta;
- esercitazioni: test periodici della catena di comando e dei tempi di intervento dei volontari di Protezione Civile lungo i punti critici del Petronio.

Il quadro degli interventi strutturali va integrato, ai fini del conseguimento del livello di rischio compatibile, da interventi a carattere non strutturale collegati allo specifico sistema di difesa progettato lungo l'asta fluviale.

4. Mappe di rischio e pericolosità alluvione

Questo capitolo ha come scopo un'analisi delle mappe di rischio alluvione, definendone l'importanza, ma anche l'iter procedurale per la realizzazione delle stesse a partire da quanto contenuto nella Direttiva Alluvioni del 2007, nonché approfondire gli studi che permettono di intervenire in maniera tempestiva in casi di emergenze.

4.1. Dalla Direttiva Alluvioni alle mappe di rischio e pericolosità

La normativa europea in materia di alluvioni (Direttiva 2007/60/CE) è stata recepita in Italia con il D.Lgs. 49/2010. Tale decreto stabilisce il quadro metodologico per la redazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), lo strumento che oggi coordina tutte le azioni di mitigazione a scala di Distretto.

Per il bacino del torrente Petronio, l'Autorità competente è l'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale. Rispetto al precedente Piano di Bacino "Stralcio" (legato alla L. 183/89), il PGRA introduce un approccio dinamico basato su cicli di gestione sessennali e su una visione integrata che comprende prevenzione, protezione e preparazione.

La Direttiva mira a ridurre le conseguenze negative delle alluvioni per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche. Come ribadito dalla Direttiva, l'elaborazione di mappe specifiche è essenziale per definire le priorità d'intervento tecnico e politico.

Il processo di attuazione si articola in tre tappe fondamentali, attualmente nel loro III Ciclo di Gestione (2021-2027):

- valutazione preliminare (Art. 4): identificazione delle zone a rischio potenziale significativo;
- mappe di pericolosità e rischio (Art. 6): elaborazione di scenari basati su diversi tempi di ritorno:
 - P1, bassa probabilità: alluvioni rare o scenari di eventi estremi (T fino a 500 anni);
 - P2, media probabilità: alluvioni poco frequenti (T tra 100 e 200 anni);
 - P3, elevata probabilità: alluvioni frequenti (T tra 20 e 50 anni).
- Piano di Gestione del Rischio (Art. 7): definizione delle misure per raggiungere gli obiettivi di sicurezza.

L'attuazione del PGRA nel Distretto dell'Appennino Settentrionale avviene in modo coordinato tra i diversi livelli istituzionali:

- scala di Distretto: definisce le strategie omogenee e gli obiettivi di sicurezza per l'intero bacino ligure-toscano;
- scala Regionale (Regione Liguria): individua gli obiettivi operativi e i programmi di misure (strutturali e non strutturali) coerenti con le specificità del territorio del levante;
- scala Locale (Comuni di Sestri Levante e Casarza Ligure): attuazione delle azioni di emergenza e informazione alla popolazione attraverso i Piani di Protezione Civile.

La Fig. 4.1 mostra le fasi attuative della Direttiva Alluvioni in Italia.

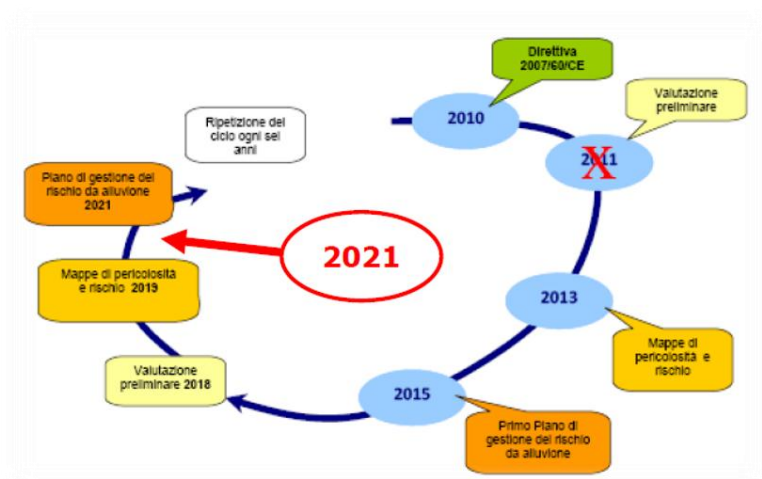


Fig. 4.1 – Fasi attuative della Direttiva Alluvioni
(Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po).

4.2. Mappe di Pericolosità e di Rischio nel bacino del Petronio

L'Autorità di Bacino ha prodotto una cartografia specifica per il Petronio che distingue tra:

- mappe di pericolosità (come da Fig. 4.2 e 4.3): riportano l'estensione delle aree allagabili, i tiranti idrici e la velocità della corrente per i tre scenari (P1, P2, P3);
- mappe del rischio (come da Fig. 4.4 e 4.5): incrociano la pericolosità con la presenza di "elementi esposti" (popolazione, edifici, infrastrutture). Il rischio è classificato in quattro livelli: R1 (moderato), R2 (medio), R3 (elevato), R4 (molto elevato).

Nel caso del torrente Petronio, le mappe evidenziano criticità elevate (R4) in particolare nei centri abitati di Casarza Ligure e Riva Trigoso, a causa della forte urbanizzazione in fregio all'alveo.

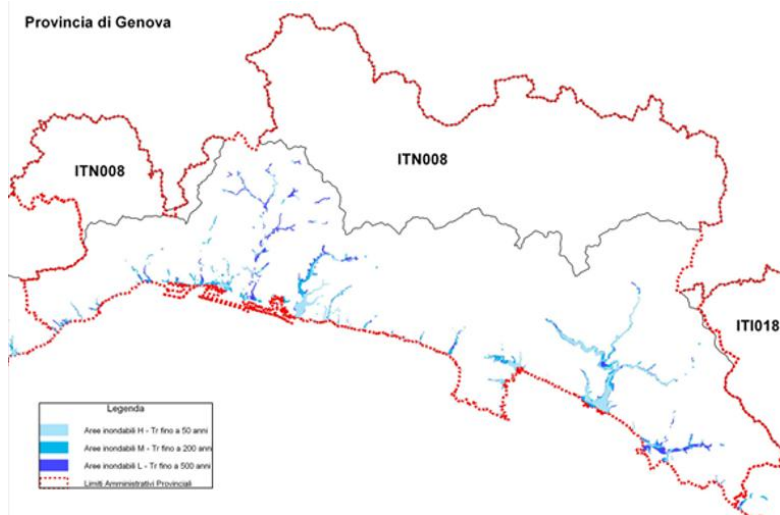


Fig. 4.2 Mappa di pericolosità alluvione
(PGRA del Distretto Appennino Settentrionale - UoM).

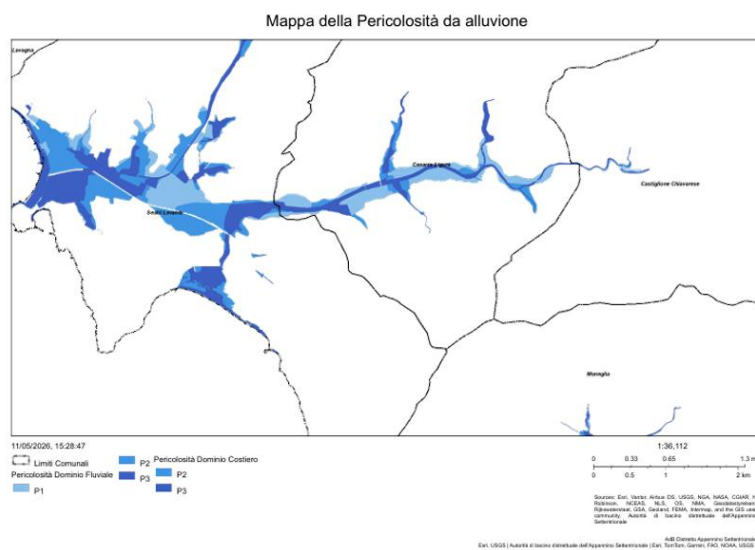
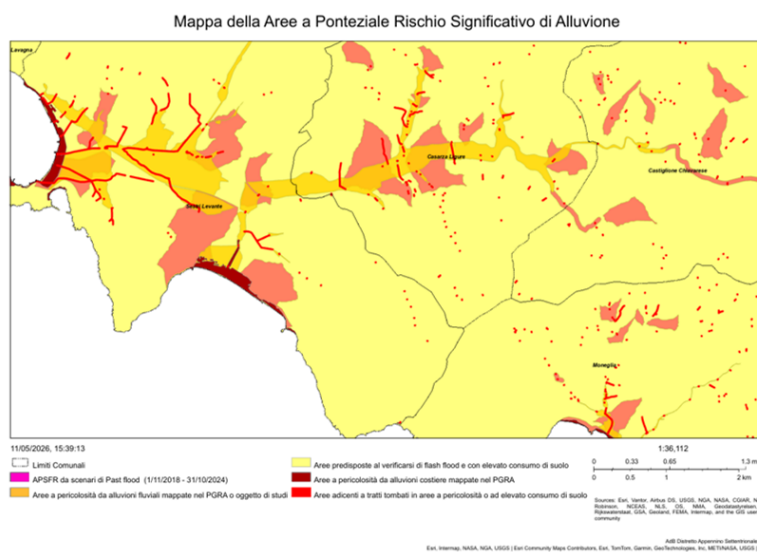
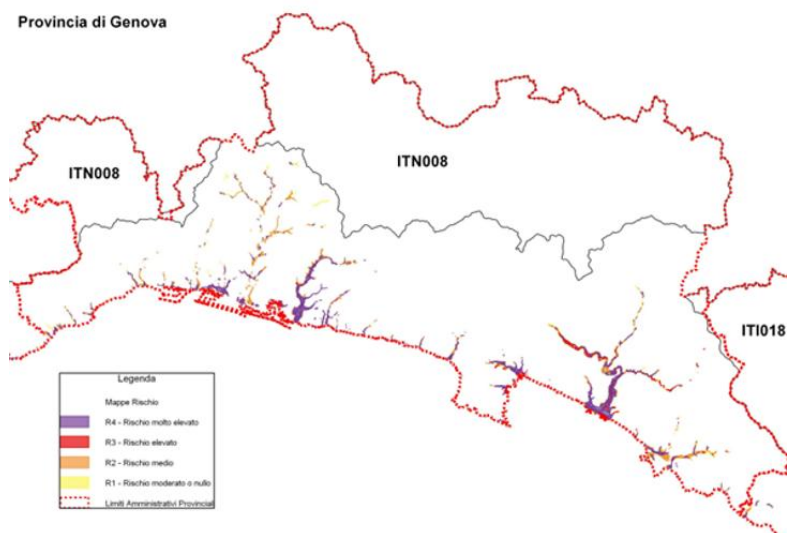


Fig. 4.3 Mappa di pericolosità alluvione del bacino del torrente Petronio
(PGRA del Distretto Appennino Settentrionale).



4.3. Misure di prevenzione, protezione e preparazione

Il PGRA del torrente Petronio non si limita a interventi strutturali, ma pone attenzione su:

- prevenzione: evitare l’insediamento di nuovi elementi esposti in aree pericolose (vincoli urbanistici);
- protezione: ridurre la probabilità di inondazione (manutenzione dei rii, scogliere);
- preparazione: migliorare l’efficacia dell’allerta meteo e la prontezza operativa (Piani di Emergenza).

Il Piano di Bacino tiene conto dei costi-benefici, della conservazione della natura e, data la foce a Riva Trigoso, delle condizioni meteomarine, che possono influenzare significativamente il deflusso del torrente durante le mareggiate, come esplicitato nella Fig. 4.6.



Fig. 4.6 Grafico delle misure di prevenzione, protezione e preparazione
(PGRA del Distretto Appennino Settentrionale - UoM).

4.4. Valutazione del rischio alluvione

La valutazione del rischio idraulico rappresenta il processo analitico fondamentale per la stima delle potenziali conseguenze negative che un evento alluvionale può produrre su un territorio. Secondo la definizione internazionalmente riconosciuta (UNISDR), il rischio è il prodotto dell’interazione tra un fenomeno fisico pericoloso e le condizioni di vulnerabilità di una determinata area in un dato periodo di tempo.

La stima del rischio idraulico si basa sulla combinazione di tre fattori fondamentali, definita “Equazione del Rischio” (Eq. 4.1):

$$R = H \cdot E \cdot V \quad (4.1)$$

dove:

- pericolo (Hazard, H): rappresenta la probabilità di accadimento di un evento alluvionale di una data intensità (espressa solitamente in termini di tirante idrico o velocità della corrente)

in un determinato intervallo temporale (tempo di ritorno);

- esposizione (E): identifica la presenza di elementi a rischio (popolazione, edifici, infrastrutture, attività economiche) nelle aree soggette a inondazione;

vulnerabilità (V): definisce il grado di perdita attesa di un elemento esposto a causa di un evento di intensità specifica. Essa è espressa tramite curve di vulnerabilità, relazioni matematiche che correlano il danno percentuale (o assoluto) alla profondità dell'acqua.

Nella Fig. 4.7 si illustra il framework concettuale e analitico per la scomposizione e il calcolo del rischio, evidenziando le complesse interazioni tra le sue componenti fondamentali.

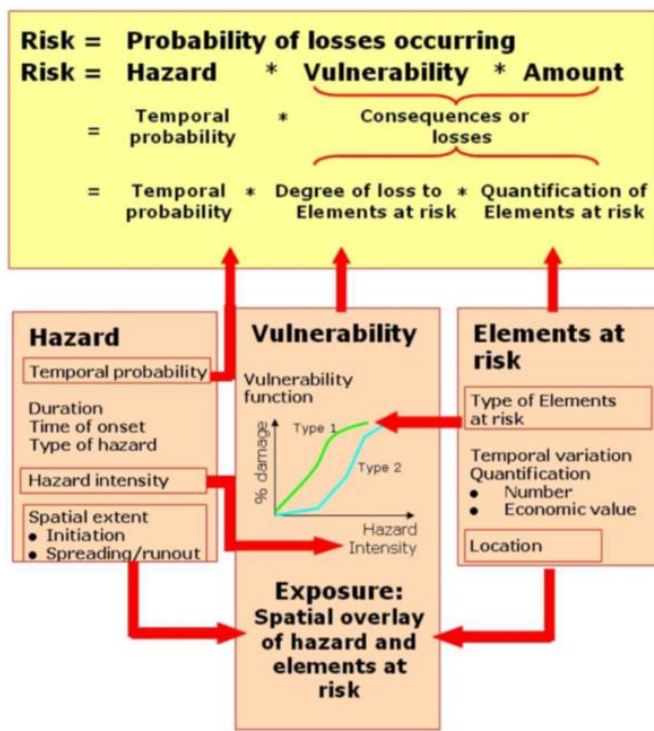


Fig. 4.7 Componenti del Rischio e le relazioni tra le componenti.

4.4.1. Tipologie di approccio alla valutazione del rischio

La complessità del sistema territoriale richiede diverse prospettive di analisi:

- multi-pericolo (Multi-hazard): valuta la coesistenza di diversi fenomeni (es. inondazione e frana) sulla medesima area, analizzandone le interazioni;
- multi-settoriale: distingue gli impatti tra diverse classi d'uso del suolo, ciascuna caratterizzata da specifiche tassonomie di danno;
- multi-livello e multi-stakeholder: integra le politiche di pianificazione (nazionale, regionale,

locale) coinvolgendo attori pubblici e privati;

- multi-fase: estende l'analisi oltre l'evento, includendo le fasi di preparazione, mitigazione e recupero.

Le perdite attese derivanti da un'alluvione si suddividono in categorie funzionali alla stima economica:

- perdite dirette e indirette: le prime derivano dal contatto fisico con l'acqua (ad esempio, danni strutturali); le seconde riguardano l'interruzione di servizi e catene produttive o i costi di bonifica;
- perdite tangibili e intangibili: si distinguono per la possibilità di essere espresse in termini monetari. Mentre i danni immobiliari sono tangibili, la perdita di vite umane o il danno psicologico sono considerati intangibili.

Per la stima del Rischio Sociale (vittime o feriti), si utilizzano frequentemente le curve F-N, che mettono in relazione la frequenza annuale cumulata di un evento e il numero di possibili decessi su scala logaritmica.

4.4.2. Metodologie di analisi: Qualitativa, Semi-quantitativa e Quantitativa

La scelta del metodo dipende dalla disponibilità dei dati e dagli obiettivi della ricerca:

- analisi qualitativa: si basa su matrici di rischio (Fig. 5.8) che incrociano classi di probabilità e classi di danno, utile per uno screening preliminare;
- analisi semi-quantitativa: utilizza indici numerici pesati e tecniche di analisi spaziale multicriterio in ambiente GIS;
- analisi quantitativa: consente una stima precisa della perdita media. Questo approccio si avvale della curva di eccedenza della perdita e della stima della massima perdita probabile per determinati tempi di ritorno.

La Fig. 4.8 illustra la struttura e i criteri di funzionamento di una matrice del rischio, uno strumento fondamentale per la classificazione, la prioritizzazione e la gestione dei rischi antropici, naturale o tecnologici. La figura si articola in quattro sezioni che definiscono le variabili di input (probabilità e perdita) e l'output risultante (livello di rischio). Il modello evidenzia come la matrice del rischio consenta di standardizzare la valutazione del livello di urgenza e di danno atteso, traducendo parametri probabilistici e stime di danno in classi di rischio immediatamente identificabili e utili per orientare le strategie di mitigazione e pianificazione.

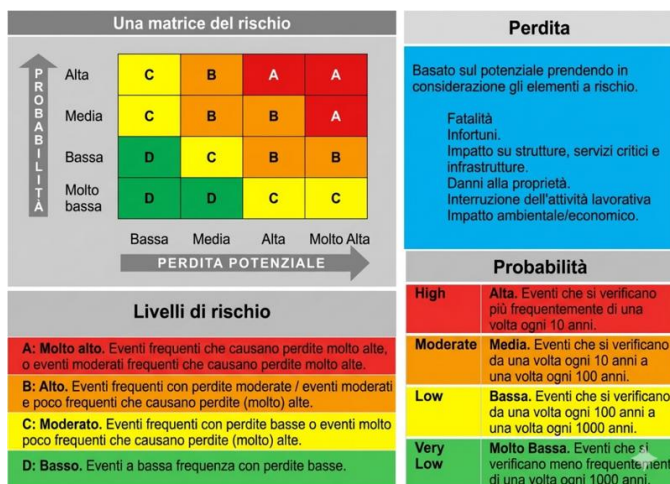


Fig. 4.8 Esempio di matrice del rischio.

4.4.3. Analisi probabilistica del rischio di alluvione

L'analisi probabilistica avanzata integra la modellazione idraulica con i dati socio-economici. Per ogni scenario modellato (ad esempio per tempi di ritorno T pari a 50, 200, 500 anni), vengono identificati gli elementi a rischio e applicate le specifiche curve di vulnerabilità per tipologia edilizia. Il rischio totale annuo è rappresentato dall'area sottesa alla curva di rischio.

4.5. Hazard

Nell'ambito del rischio idraulico, l'hazard (pericolosità) è definito come la probabilità che un evento fisico di origine naturale o antropica, potenzialmente dannoso, si verifichi in una determinata area e in un intervallo di tempo prestabilito, con una specifica intensità. In termini analitici, l'hazard idraulico descrive la probabilità annuale che una data porzione di territorio sia interessata da un fenomeno di inondazione caratterizzato da determinati parametri fisici, quali il tirante idrico o la velocità del flusso.

La determinazione della pericolosità non si basa sull'analisi di un singolo evento deterministico, ma sulla valutazione statistica di tutti i possibili scenari alluvionali. Poiché la magnitudo di un evento estremo è inversamente proporzionale alla sua probabilità di accadimento, l'obiettivo dell'idrologia statistica è correlare l'intensità degli eventi alla loro frequenza attraverso il concetto di "periodo di ritorno" (T_{50} , T_{200} , T_{500}).

Il periodo di ritorno rappresenta il tempo medio intercorrente tra il verificarsi di due eventi di intensità uguale o superiore a una soglia critica. Matematicamente, esso è l'inverso della probabilità di superamento annua (P_s), come spresso in Eq. 4.2:

$$T = \frac{1}{P_S} \quad (4.2)$$

Per valutare il rischio su un orizzonte temporale di N anni (ad esempio la vita nominale di un'opera), si calcola la probabilità che l'evento si verifichi almeno una volta nel periodo considerato (Eq. 4.3):

$$P_S = 1 - \left[1 - \frac{1}{T}\right]^N \quad (4.3)$$

L'accuratezza di tali stime dipende strettamente dalla serie storica dei dati disponibili (pluviometrici o idrometrici). In presenza di distribuzioni asimmetriche positive, tipiche degli eventi idrologici estremi, si ricorre a distribuzioni di probabilità specifiche come la distribuzione Gumbel o la Distribuzione Generalizzata dei Valori Estremi (GEV), come si può osservare nella Fig. 4.9.

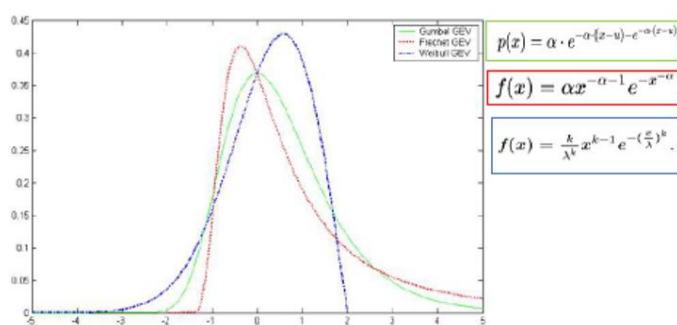


Fig. 4.9 Esempio di funzioni di distribuzione ai valori estremi.

La severità di un'inondazione è definita dalla Magnitudo Idraulica, una combinazione del battente d'acqua (h) e della velocità della corrente (v). Questa classificazione è fondamentale per comprendere la capacità distruttiva del flusso:

- magnitudo moderata: valori di altezza d'acqua inferiori o uguali a 0,5 m e velocità inferiore o uguale a 1 m/s. Nei casi in cui la velocità non sia determinata, altezza idraulica si assume con un valore pari o inferiore a 0,3 m;
- magnitudo severa: valori di altezza pari o inferiori a 0,5 m e velocità superiore a 1 m/s, oppure altezza superiore a 0,5 m e inferiore o uguale a 1 m con velocità inferiore o uguale a 1 m/s. Nei casi in cui la velocità non sia determinata si assume l'altezza idraulica superiore a 0,3 m e inferiore o uguale a 0,5 m;
- Magnitudo molto severa: altezza superiore a 0,5 m e inferiore o uguale a 1 m con velocità superiore a 1 m/s, oppure altezza superiore a 1 m. Nei casi in cui la velocità non sia determinata, altezza idraulica si assume con un valore superiore a 0,5 m.

In linea con la Direttiva Alluvioni (2007/60/CE), gli Stati membri sono tenuti a produrre mappe

di pericolosità che coprano tre scenari principali:

- scenario di bassa probabilità: eventi estremi o rari (T fino a 500 anni);
- scenario di media probabilità: eventi poco frequenti (T 200 anni);
- scenario di alta probabilità: eventi frequenti (T 50 anni).

Le mappe di pericolosità moderne superano i limiti delle rappresentazioni statiche grazie all'impiego di modelli di propagazione idraulica 1D e 2D, in grado di simulare l'evoluzione del flusso considerando l'orografia del terreno, la scabrosità e gli ostacoli antropici.

L'efficacia di tali modelli dipende dalla precisione dei dati topografici in ingresso, oggi ottenuti tramite tecnologie di telerilevamento avanzate:

- LiDAR (Light Detection and Ranging): scansione laser aerea per la creazione di Modelli Digitali del Terreno (Digital Terrain Model, DTM) ad altissima risoluzione;
- SAR (Synthetic Aperture Radar): sensori radar in grado di acquisire dati in qualsiasi condizione atmosferica e di illuminazione;
- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission): dati satellitari utilizzati per l'inquadramento morfologico a scala di bacino.

4.6. Esposizione e Vulnerabilità

Il passaggio dalla valutazione del pericolo alla stima del rischio richiede l'analisi di due componenti fondamentali che determinano l'entità delle conseguenze: l'esposizione e la vulnerabilità. Mentre il pericolo descrive la probabilità del fenomeno naturale, queste due variabili caratterizzano il sistema antropico soggetto all'evento.

4.6.1. L'esposizione degli elementi a rischio

L'esposizione rappresenta la misura quantitativa e qualitativa degli elementi a rischio (persone, edifici, attività economiche, infrastrutture e patrimonio ambientale) presenti all'interno delle aree suscettibili di inondazione. Un elemento si definisce esposto quando la sua localizzazione spaziale coincide con l'area di estensione del pericolo idraulico. Al fine di analizzare l'interazione spaziale tra il fenomeno e il territorio, si ricorre all'utilizzo di strumenti GIS. Attraverso la sovrapposizione cartografica (overlay) tra le mappe di pericolosità e le mappe degli elementi a rischio, è possibile identificare con precisione quali asset subiranno un impatto diretto, come mostra l'esempio riportato in Fig. 4.10.

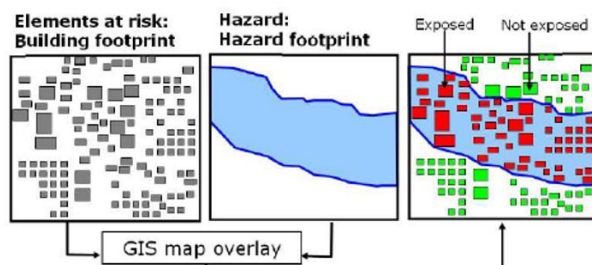


Fig. 4.10 Overlay degli elementi esposti a rischio.

4.6.2. La Vulnerabilità: definizioni e dimensioni

Secondo la definizione fornita dall'UN-ISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction), la vulnerabilità rappresenta l'insieme delle condizioni e dei fattori fisici, sociali, economici o ambientali che aumentano la suscettibilità di una comunità o di un sistema agli impatti di un pericolo. Essa non è una proprietà statica, ma possiede una natura complessa caratterizzata da:

- multidimensionalità: è definita da fattori eterogenei (istituzionali, umani, strutturali);
- dinamicità: evolve nel tempo in funzione del degrado degli edifici o dei cambiamenti socio-economici;
- sito-specificità: dipende dalle caratteristiche locali del costruito e del contesto geografico;
- dipendenza dalla scala: può essere valutata a livello individuale, di singolo edificio, di quartiere o nazionale.

In questo lavoro di tesi, si pone un accento particolare sulla vulnerabilità fisica, focalizzando l'analisi sul potenziale impatto dell'inondazione sull'ambiente costruito e sulla stima delle perdite monetarie dirette.

4.6.3. Indicatori della vulnerabilità fisica degli edifici

La vulnerabilità fisica degli edifici viene caratterizzata attraverso indicatori tangibili, legati al valore economico del bene, e indicatori strutturali, che ne definiscono la resistenza meccanica all'azione dell'acqua. I principali parametri considerati includono:

- tipologia edilizia e materiali: la risposta strutturale varia sensibilmente tra edifici in muratura, cemento armato o legno;
- età della struttura: rappresenta un indicatore indiretto dello stato di manutenzione e delle norme tecniche vigenti al momento della costruzione;
- altezza e numero di piani: costituiscono parametri critici che determinano la possibilità di spostare i beni ai piani superiori, riducendo l'esposizione del contenuto;
- indicatori di occupazione: definiscono il valore potenziale delle perdite in base alla destinazione d'uso (residenziale, commerciale, industriale).

4.6.4. Modelli di valutazione: dalle curve di danno agli indici sintetici

Per quantificare la vulnerabilità, la ricerca moderna si avvale principalmente di due approcci modellistici:

- modelli basati su indici: aggregano diversi parametri (qualità costruttiva, superficie, occupazione) in un punteggio numerico sintetico che esprime la fragilità relativa di un comparto urbano;
- funzioni danno-altezza: rappresentano lo strumento più avanzato per la stima quantitativa. Queste curve mettono in relazione l'altezza idrica raggiunta all'interno dell'edificio con la percentuale di danno economico atteso, permettendo di trasformare un dato idraulico (il battente) in un valore monetario.

5. Modello di calcolo pre-interventi

In questo capitolo sono presentati i passaggi necessari per arrivare all'obiettivo di questo studio, ovvero individuare i danni subiti a seguito di una esondazione del torrente Petronio pre e post interventi per la difesa del territorio, nonché la stima dei costi e dei benefici delle opere proposte. Sono inoltre descritti i diversi software utilizzati per l'analisi e i principali comandi necessari, nonché il plugin Flood2B. In particolare, questo capitolo si concentra sulla prima parte del workflow: "Analisi dello stato di fatto".

La costruzione del modello di calcolo e la successiva stima del danno hanno seguito un workflow multidisciplinare così articolato:

- analisi dello stato di fatto: per la determinazione della pericolosità nello stato attuale si è scelto di utilizzare i dati ufficiali forniti dal Geoportale della Regione Liguria. Nello specifico, è stato acquisito il layer relativo ai "Battenti e Velocità", che contiene i campi necessari per caratterizzare l'intensità idraulica degli eventi con tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni. L'elaborazione di questo layer è avvenuta in ambiente GIS mediante l'utilizzo del plugin Flood2B di QGIS. Questo strumento ha permesso di: integrare i dati idraulici con lo strato informativo dell'edificato, classificare gli edifici secondo la tassonomia JRC, definendo così l'esposizione, ed eseguire infine la stima dei danni economici diretti attraverso l'applicazione di curve di vulnerabilità (funzioni danno-altezza) specifiche per ogni categoria edilizia.
- analisi economica (costi e benefici) degli interventi strutturali: per valutare il beneficio che si trae dagli interventi di mitigazione sia in termini economici sia di diminuzione del danno;
- analisi dello stato post-interventi: per valutare l'impatto delle opere di messa in sicurezza, si è proceduto alla costruzione di un modello idraulico indipendente;
- costruzione della geometria: attraverso l'elaborazione dei dati topografici (DTM e sezioni che derivano dal Piano di Bacino di porzioni del bacino analizzato), è stata estratta la geometria dell'alveo;
- simulazione in HEC-RAS: la geometria è stata implementata nel software di calcolo HEC-RAS per eseguire simulazioni idrauliche in seguito all'inserimento di opere idrauliche per la difesa del territorio. L'output della modellazione ha permesso di generare un set di dati (layer di battenti e velocità) tecnicamente analogo e confrontabile con quello disponibile sul Portale Cartografico della Regione Liguria;
- confronto e stima del rischio residuo: il nuovo layer "post-interventi" è stato processato nuovamente con il plugin Flood2B, consentendo un confronto diretto tra i danni stimati nello stato di fatto e quelli nello scenario post-opera.

5.1. Software GIS: QGIS

QGIS è un software GIS (Geographic Information System) che permette di analizzare ed editare dati spaziali nonché di generare cartografia. Un software GIS è in grado di associare dei dati alla loro posizione geografica sulla superficie e di elaborarli per estrarne informazioni.

Si è optato per l'utilizzo di QGIS in quanto è un software user-friendly e Open Source, licenziato con GNU General Public License.

QGIS, come i vari software GIS disponibili, supporta due tipologie principali di formati di dati: vettoriali (punti, linee e poligoni) e raster (griglia di celle).

Tra i formati vettoriali, un formato molto utilizzato è lo *shapefile*. Si tratta di un formato di archiviazione di dati vettoriali capace di registrare localizzazione, forma ed attributi di entità spaziali. Uno *shapefile* è composto da più file relazionati e contiene una sola classe di oggetti, cioè punti, linee o poligoni.

Per quanto riguarda il modello raster, esso corrisponde ad un file contenente una matrice di m righe e n colonne. La realtà viene quindi descritta attraverso un codice, corrispondente ad un attributo (ad esempio, la quota del terreno), che definisce le caratteristiche dell'oggetto rappresentato tramite l'elemento a_{ij} della matrice. Quindi, la rappresentazione dei dati avviene attraverso la definizione di una griglia in cui l'elemento della matrice sulla griglia, corrisponde ad una cella o pixel. All'interno di ogni pixel il valore dell'attributo è costante. Quanto più piccola è la dimensione del pixel, tanto più dettagliata è la risoluzione spaziale e, quindi, migliore è la qualità del dato.

Nella Fig. 5.1 si mostra un confronto diretto tra i due dati con cui lavora il software QGIS.

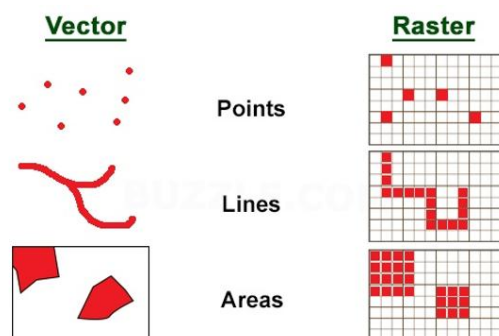


Fig. 5.1 Rappresentazione di un dato in formato vettoriale (a sinistra) e in formato raster (a destra).

L'intero progetto è stato sviluppato adottando il sistema di riferimento ETRF2000-2008.0 (sistema di riferimento ufficiale italiano dal 2011) con coordinate piane ottenute mediante proiezione conforme UTM nel fuso 32 N, corrispondente al codice EPSG 7791. Tale sistema, basato sulla Rete Dinamica Nazionale, rappresenta lo standard geodetico attuale per il territorio italiano e assicura il corretto inquadramento della cartografia tecnica, dei modelli digitali del terreno e dei dati tematici utilizzati.

5.2. DTM – Digital Terrain Model

Il punto di partenza per la caratterizzazione geomorfologica e la successiva modellazione idraulica è rappresentato dalla schematizzazione della superficie topografica del terreno. A tale

scopo, è stato utilizzato un Modello Digitale del Terreno (Digital Terrain Model, DTM) in formato raster, acquisito tramite il Geoportale della Regione Liguria.

Il dato utilizzato deriva da rilievi effettuati tramite sensore LiDAR, tecnologia che garantisce un'elevata precisione nella determinazione delle quote. Il territorio è stato discretizzato mediante una griglia regolare con una risoluzione spaziale (dimensione del pixel del DTM) di 1×1 metro. In questa struttura, ogni cella della matrice contiene un valore numerico corrispondente alla quota media del suolo calcolata per quell'area di un metro quadrato. Questa discretizzazione consente di operare su una superficie numerica continua, fondamentale per l'estrazione automatica dei parametri fisici del bacino, come pendenze, direzioni di drenaggio e profili d'alveo.

Nella Fig. 5.2 si possono osservare le caratteristiche descrittive del DTM disponibile sul Geoportale della Regione Liguria.



Fig. 5.2 Caratteristiche dati LiDAR con cui è realizzato il DTM (Geoportale della Regione Liguria).

Per l'integrazione del DTM nel progetto di tesi e la sua preparazione per la modellazione idraulica, sono state eseguite diverse operazioni di pre-processing all'interno del software QGIS:

- *merge*: i singoli fogli (Fig. 5.3) contenenti i dati LiDAR relativi all'area di Sestri Levante sono stati fusi in un unico file raster. In questa fase è stata posta particolare attenzione alla gestione dei valori "No Data!" (tipicamente codificati con il valore "9999"), verificando che la sovrapposizione dei fogli non generasse falsi topografici o lacune informative;

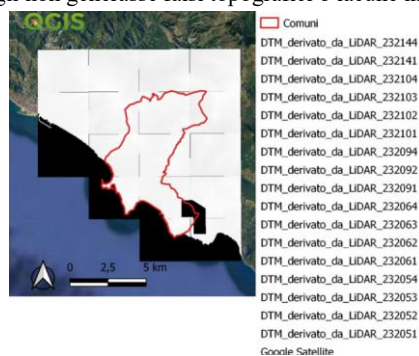


Fig. 5.3 Fogli contenenti i dati LiDAR importati e uniti su QGIS (QGIS).

- ritaglio su base vettoriale (*Clip*): al fine di ottimizzare il carico computazionale e focalizzare l'analisi sull'area di studio, il raster precedentemente ottenuto è stato ritagliato utilizzando come maschera il layer vettoriale dei confini comunali di Sestri Levante, precedentemente estratto dal database catastale regionale;
- visualizzazione altimetrica (Fig. 5.4): per una corretta interpretazione morfologica del territorio, è stata applicata una scala di colori opportuna, associando gradazioni cromatiche differenti alle diverse fasce altimetriche. Ciò ha permesso di evidenziare immediatamente l'andamento dei versanti e le zone di fondovalle pianeggianti maggiormente soggette al rischio idraulico.

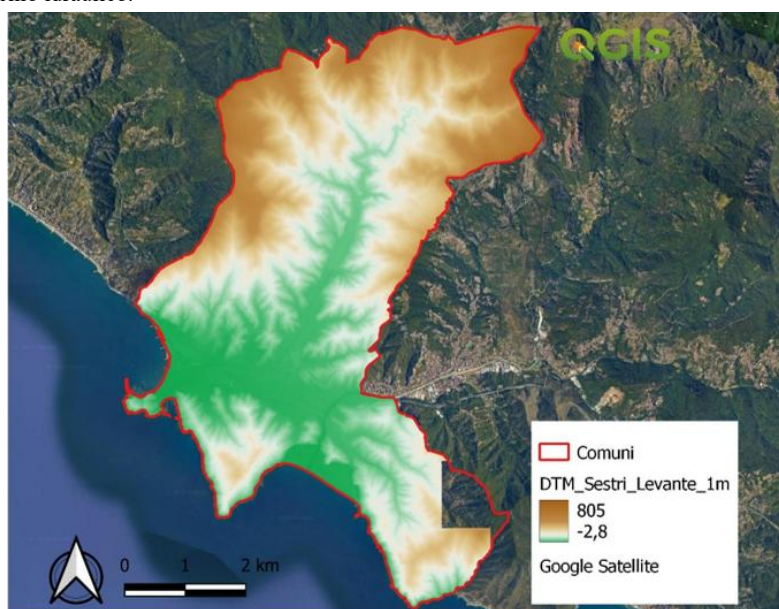


Fig. 5.4 DTM rappresentativo del comune di Sestri Levante (QGIS).
Le quote sono espresse in metri.

5.3. Reticolo idrografico e Bacini idrografici

Il reticolo idrografico è l'insieme dei canali di deflusso di diversa natura, dimensione, portata che solca il territorio del bacino idrografico e ne drena le acque superficiali. Le acque di precipitazione, dopo aver seguito il percorso di ruscellamento confluiscono fino ad organizzarsi in sistemi idrografici delimitati da spartiacque.

La rete di canali di un bacino si sviluppa secondo un'organizzazione topologica ad albero, dove la sezione di chiusura rappresenta la sezione del tronco mentre, procedendo verso monte si osserva una struttura di biforcazione verso canali via via più piccoli.

Il reticolo idrografico utilizzato è in formato vettoriale e deriva direttamente dal layer realizzato

dal Geoportale della Regione Liguria, esattamente come i bacini idrografici. Le caratteristiche del layer sono riportate in Fig. 5.5.



Fig. 5.5 Caratteristiche Reticolo Idrografico e Bacini Idrografici (Geoportale della Regione Liguria).

5.4. Caratteristiche del plugin Flood2B

Per la fase operativa di stima del danno, la presente tesi si avvale di uno specifico plugin di elaborazione sviluppato in ambiente QGIS da una precedente ricerca (Mazzaccaro, 2022). L'utilizzo di questo strumento permette di standardizzare la procedura di calcolo, garantendo l'interoperabilità tra i dati idraulici e le informazioni cartografiche degli elementi esposti. Nel contesto di questo lavoro, il plugin viene impiegato come motore di calcolo per testare la metodologia su nuovi dataset (layer "Battenti e velocità" realizzato dalla Regione Liguria) e per condurre analisi comparative volte a evidenziare questa stima in una fase pre e post interventi di mitigazione del rischio avvalendosi di un ulteriore software di analisi idraulica.

Commentato [IF1]: Riferimento bibliografico

5.4.1. Le curve di danno JRC (Joint Research Centre)

L'algoritmo del plugin si basa sulle funzioni di vulnerabilità fisica elaborate dal Joint Research Centre (JRC). Tali curve rappresentano lo standard europeo per la valutazione del rischio alluvione e mettono in relazione il tirante idrico (espresso in metri) con la percentuale di danno (da 0 a 1), come si può osservare dalla Tab. 5.1.

Depth [m]	Damage factor					
	Residential	Commercial	Industrial	Transport	Infrastructure roads	Agriculture
0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,25	0,15	0,15	0,32	0,25	0,30
1	0,40	0,3	0,27	0,54	0,42	0,55
1,5	0,50	0,45	0,40	0,70	0,55	0,65
2	0,60	0,55	0,52	0,83	0,65	0,75
3	0,75	0,75	0,70	1	0,80	0,85
4	0,85	0,9	0,85	1	0,90	0,95
5	0,95	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1

Tab. 5.1 Funzione media di danno continentale per l'Europa.

Edifici residenziali, commerciali e industriali.

Nell'ambito dell'implementazione software, queste curve non sono trattate come semplici tabelle di valori, ma sono state tradotte in funzioni polinomiali di grado elevato (fino al sesto grado), come da Tab. 5.2 e Fig. 5.6.

	JRC curve functions
Residential	$y = 0,0006x^5 - 0,0103x^4 + 0,0722x^3 - 0,2528x^2 + 0,5873x + 0,0031$
Commercial	$y = -0,0004x^5 + 0,0054x^4 - 0,0247x^3 + 0,0184x^2 + 0,3051x - 0,0013$
Industrial	$y = -0,0007x^5 + 0,0097x^4 - 0,0431x^3 + 0,0537x^2 + 0,255x + 0,0033$
Transport	$y = -0,0007x^5 + 0,0125x^4 - 0,0833x^3 + 0,265x^2 - 0,4939x + 0,8364x - 0,0012$
Infrastructure roads	$y = -0,00008x^5 - 0,0011x^4 + 0,0262x^3 - 0,1655x^2 + 0,5609x + 0,002$
Agriculture	$y = 0,0003x^5 - 0,0081x^4 + 0,0748x^3 - 0,3284x^2 + 0,7935x - 0,005$

Tab. 5.2 Funzioni delle Curve JRC.

Questo approccio consente al plugin di calcolare con precisione il danno anche per valori intermedi di altezza d'acqua, evitando le approssimazioni tipiche delle interpolazioni lineari. La scelta di utilizzare le curve JRC permette di ottenere una stima del danno che sia confrontabile a livello internazionale, pur mantenendo la flessibilità necessaria per l'analisi locale.

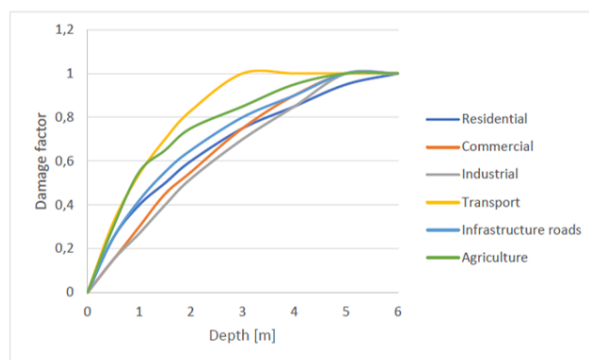


Fig. 5.6 Curva danno - profondità per categorie residenziali, commerciali e industriali.

5.4.2. Tassonomia degli elementi esposti e classificazione

Fondamentale per il corretto funzionamento del plugin è la fase di tassonomia. Poiché ogni tipologia edilizia reagisce in modo differente al contatto con l'acqua, il plugin richiede che a ogni poligono del layer "Edifici" sia associata una classe d'uso specifica. Il sistema di classificazione adottato mappa le categorie catastali o tecniche (residenziale, commerciale, industriale, agricolo e trasporti) sui parametri previsti dal modello JRC. Tale procedura di associazione è cruciale per preparare i dati di input, assicurando che la funzione di danno applicata sia coerente con la reale destinazione d'uso rilevata sul territorio.

5.4.3. Determinazione del danneggiamento fisico ed economico

Il processo di calcolo eseguito dal plugin si articola in due passaggi chiave che sono stati oggetto di test in questa tesi:

- danno fisico (Vulnerabilità): il plugin estrae il valore del tirante idrico dal raster dei battenti;
- danno economico: una volta ottenuta la percentuale di danneggiamento, il software procede alla monetizzazione del danno. Questo avviene moltiplicando il valore di vulnerabilità per un costo di rimpiazzo (€/m²) specifico per ogni categoria tassonomica. Tali valori, derivati da database socio-economici europei e nazionali, permettono di trasformare un dato fisico astratto in una stima economica tangibile, base necessaria per le successive indagini di rischio e per la valutazione della resilienza urbana.

È tuttavia doveroso precisare che i valori di danno massimo non sono uniformemente disponibili per ogni nazione e presentano variazioni significative legate alle specificità d'uso del suolo, alle dimensioni eterogenee degli oggetti esposti e alle diverse metodologie di stima adottate nei vari paesi.

Nel caso specifico del plugin utilizzato, le curve e i relativi costi di rimpiazzo riflettono un comportamento mediato su scala europea che, in alcuni settori, può scostarsi sensibilmente dalla realtà socio-economica italiana (per esempio, il settore commerciale, dove il valore medio nazionale stimato è di 1028 €/m² a fronte di una media europea di 621 €/m²). Tale discrepanza sottolinea come lo strumento, pur essendo estremamente efficace per una valutazione speditiva e comparativa, beneficerebbe di futuri lavori di ricerca volti a determinare costanti di danno calibrate specificamente per il territorio italiano.

La consapevolezza di tale approssimazione è stata fondamentale nell'interpretazione dei risultati ottenuti in questa tesi, permettendo di inquadrare le stime prodotte come ordini di grandezza significativi piuttosto che come valori monetari assoluti.

Nella Tab. 5.3 si possono osservare i valori economici in funzione dell'uso del suolo.

	Average maximum damage value (Europe) [€/m2]	Average maximum damage value (Italy) [€/m2]
Residential	750	739
Commercial	621	1028
Industrial	534	838
Transport	751	625
Infrastructure roads	24	21
Agriculture	0,77	0,22

Tab. 5.3 Valori massimi di danno per ciascuna categoria di impatto a livello continentale (valori monetari riferiti al potere d'acquisto del 2007) e nazionale (riferiti al 2010) e nazionale.

5.5. Analisi del processo di calcolo pre-interventi di opere per la difesa del territorio

5.5.1. Layer “Battenti e velocità”

Per la valutazione della vulnerabilità del tessuto urbano di Riva Trigoso, è stata condotta un'analisi spaziale dei dati idraulici relativi al torrente Petronio. Il flusso di lavoro si è articolato nella preparazione e trasformazione dei dati vettoriali regionali in formati raster compatibili con i requisiti di input del plugin FloodD2B.

Il dato di partenza è costituito dal layer vettoriale regionale denominato “Battenti e Velocità” (Fig. 5.7), che descrive il comportamento idrodinamico del torrente Petronio in caso di esondazione. L'area di studio si concentra sulla zona della foce, caratterizzata da un'elevata densità abitativa e, di conseguenza, da un alto rischio idraulico.



Fig. 5.7 Caratteristiche del layer “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” (Geoportale della Regione Liguria).

Il dataset originale integrava, all'interno di un unico file e della relativa tabella degli attributi, le informazioni riguardanti differenti scenari di probabilità: T50, T200 e T500.

Al fine di analizzare l'impatto differenziato della magnitudo dell'evento, è stata effettuata una selezione per attributi per isolare i dati relativi ai tre scenari normativi. Sono stati quindi generati tre layer vettoriali indipendenti:

- T50: evento con tempo di ritorno di 50 anni (frequente), Fig 5.8.

- T200: evento con tempo di ritorno di 200 anni (poco frequente), Fig 5.9.
- T500: evento con tempo di ritorno di 500 anni (raro/estremo), Fig 5.10.



Fig. 5.8 Caratteristiche del layer vettoriale “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” del torrente Petronio per T50 (QGIS).

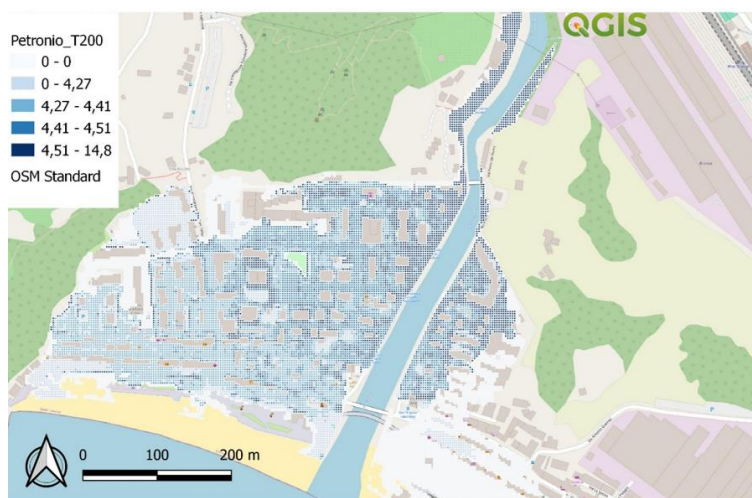


Fig. 5.9 Caratteristiche del layer vettoriale “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” del torrente Petronio per T200 (QGIS).

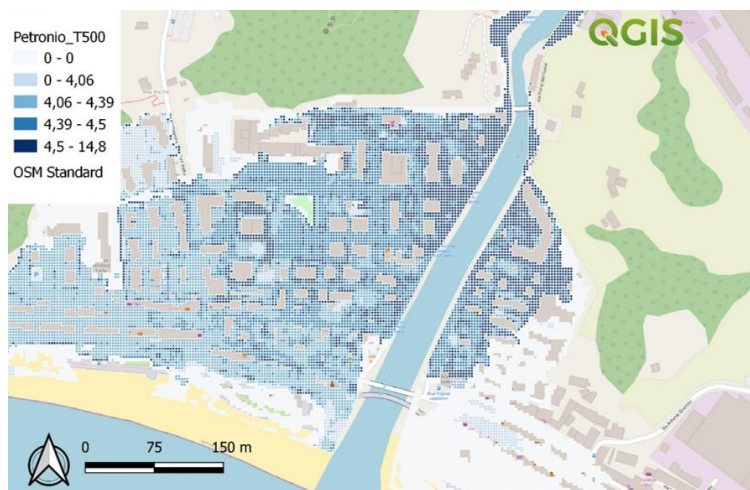


Fig. 5.10 Caratteristiche del layer vettoriale “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” del torrente Petronio per T500 (QGIS).

Il requisito fondamentale per l'utilizzo del plugin FloodD2B è la disponibilità di una mappa di inondazione (*floodMap*) in formato raster, in cui ogni cella esprima il valore del battente idrico (altezza d'acqua) a terra.

Il processo di realizzazione della *floodMap* è stato il seguente:

- conversione vettore-raster: utilizzando l'algoritmo di rasterizzazione, i layer vettoriali sono stati convertiti in formato grid, attraverso il comando *Rasterizzare (da vettore a raster)*. Come campo di input per il valore del pixel è stato scelto il battente idraulico;
- risoluzione e georeferenziazione: durante la rasterizzazione è stata mantenuta la coerenza spaziale con il sistema di riferimento locale, garantendo che la risoluzione della cella fosse adeguata alla scala dell'edificato analizzato;
- per una corretta interpretazione visiva dei gradienti di profondità, è stata applicata una scala cromatica pseudo-colore a banda singola, basata sulle tonalità del blu. Le tonalità più chiare sono state associate a battenti di modesta entità, mentre le tonalità progressivamente più scure indicano una profondità dell'acqua crescente.

Questo processo è stato applicato uniformemente ai tre scenari (T50, T200, T500), permettendo un confronto visivo immediato dell'estensione dell'area inondata e del tirante idrico raggiunto in corrispondenza dei singoli edifici monitorati.

I risultati ottenuti per i diversi periodi di ritorno sono mostrati nelle Fig. 5.11, 5.12 e 5.13, rispettivamente per T50, T200 e T500.

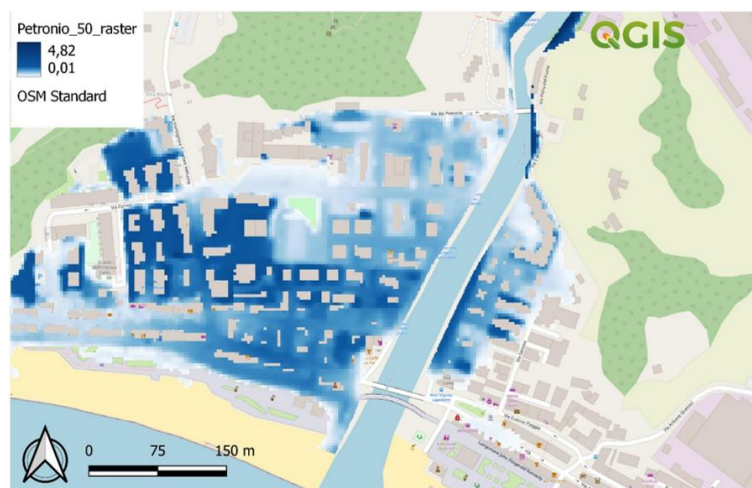


Fig. 5.11 Esito della rasterizzazione del layer “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” del torrente Petronio per T50 (QGIS).

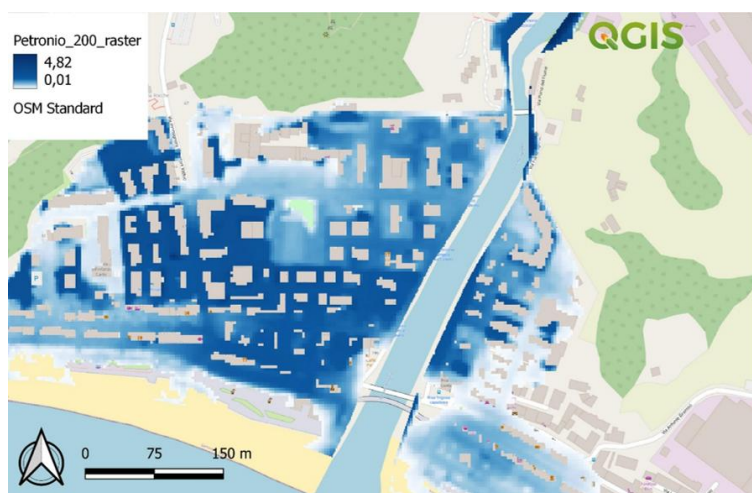


Fig. 5.12 Esito della rasterizzazione del layer “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” del torrente Petronio per T200 (QGIS).

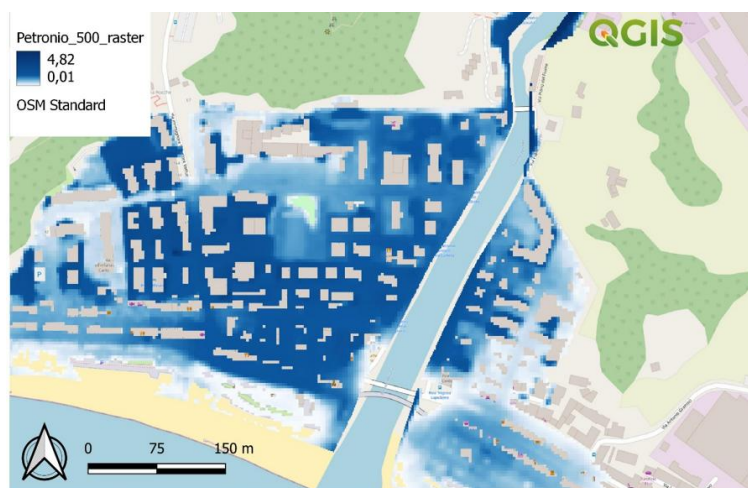


Fig. 5.13 Esito della rasterizzazione del layer “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” del torrente Petronio per T500 (QGIS).

5.5.2. Layer vettoriale “Edificato”

Il corretto funzionamento del plugin Flood2B richiede una rigorosa corrispondenza tra la struttura del database vettoriale in input e i parametri definiti nel codice sorgente dello strumento. Di seguito vengono descritte le fasi di elaborazione necessarie per rendere il layer degli edifici conforme agli standard richiesti dall’analisi. Il dato di partenza è stato acquisito dal Geoportale della Regione Liguria, selezionando il layer vettoriale relativo al costruito per il comune di Sestri Levante, come da Fig. 5.14.



Fig. 5.14 Caratteristiche del layer vettoriale “Edificato” (Geoportale della Regione Liguria).

Tuttavia, a causa degli aggiornamenti operati dall’ente cartografico rispetto al 2022, anno in cui è stato implementato il plugin, la struttura della tabella degli attributi (schema dei campi, nomi e tipi di dato) ha subito variazioni sostanziali rispetto alle versioni precedenti.

Per garantire la compatibilità con il plugin Flood2B, è stato necessario procedere a un’operazione di adattamento del database. La tabella degli attributi è stata quindi rimappata e formattata seguendo esattamente lo schema utilizzato nelle precedenti fasi di sviluppo del software,

assicurando che ogni campo richiamato dagli script del plugin fosse presente e correttamente nominato. Nella Fig. 5.15 si può osservare un esempio di formattazione la tabella degli attributi compatibile con il funzionamento del plugin. I campi con valori “null” sono coerenti con la formattazione richiesta.

ogr_fid	id	stato	def_cat_us	tipo_edil	def_tipo_e	cat_uso	sotterr	def_sotterr	def_stato	porz_ext	def_porz_e
1	333036_232063_360815	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
2	372810_232092_350211	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
3	372820_232091_350213	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
4	373153_232092_350214	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
5	373154_232091_350212	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
6	375503_232091_366440	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
7	375504_232091_366414	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
8	375749_232104_350219	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
9	375936_232104_350210	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
10	378347_232104_350216	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
11	378706_232104_350217	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
12	378051_232103_350215	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
13	381687_232103_366400	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	In costruzione	NULL	NULL
14	335409_232062_361070	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	Diruto, Rudere	NULL	NULL
15	332717_232063_361082	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	Diruto, Rudere	NULL	NULL
16	332718_232063_361096	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	Diruto, Rudere	NULL	NULL
17	332720_232063_361095	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	Diruto, Rudere	NULL	NULL
18	333032_232063_361083	NULL	Residenziale	01	Generica	01	NULL	NULL	Diruto, Rudere	NULL	NULL

Fig. 5.15 Rappresentazione esemplificativa della tabella degli attributi del layer “Edificato” (QGIS).

Il layer “Edificato” disponibile sul portale cartografico della Regione Liguria comprende l’intera area del comune di Sestri Levante; si è resa quindi necessaria un’operazione di filtraggio per isolare esclusivamente gli edifici interagenti con il dominio idraulico oggetto di studio (definito dai layer di battente e velocità).

Il processo di estrazione è stato eseguito attraverso i seguenti passaggi tecnici:

- calcolo delle “statistiche zonali”: è stata eseguita una sovrapposizione spaziale tra il layer degli edifici e il raster della batimetria per i diversi periodi di ritorno. Utilizzando lo strumento di *statistiche zonali*, è stata calcolata la media dei valori raster per ogni edificio;
- filtro sulla tabella degli attributi: questo passaggio è stato fondamentale per prevenire errori di esecuzione del plugin, che, in presenza di edifici situati in zone prive di dati, tende a creare colonne vuote o a interrompere il calcolo;
- query di estrazione: è stato applicato un filtro booleano basato sulla condizione: $Media > 0$. Tale operazione ha permesso di estrarre e salvare in un nuovo layer solo gli edifici effettivamente ricadenti nell’area coinvolta dall’inondazione, ovvero quelli per i quali è disponibile un valore di battente e velocità, garantendo così la consistenza del dataset per le analisi successive. Il risultato si può osservare nelle tre immagini successive: Fig. 5.16, Fig. 5.17, Fig. 5.18, relative ai tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

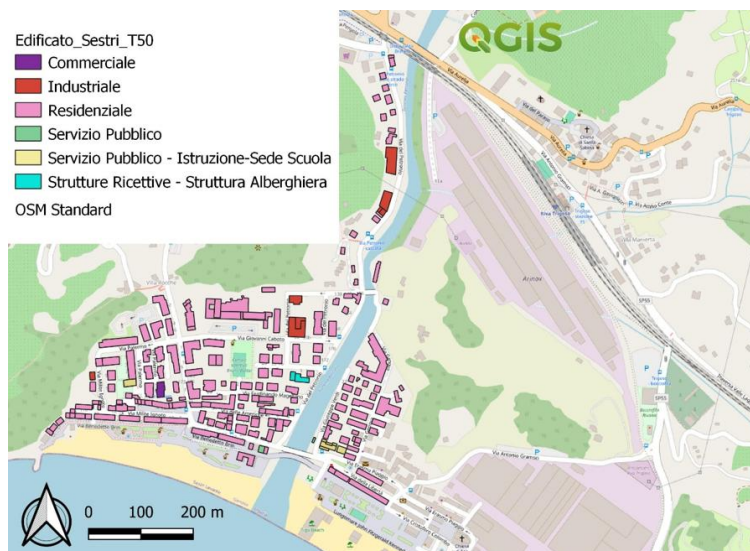


Fig. 5.16 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T50 (QGIS).

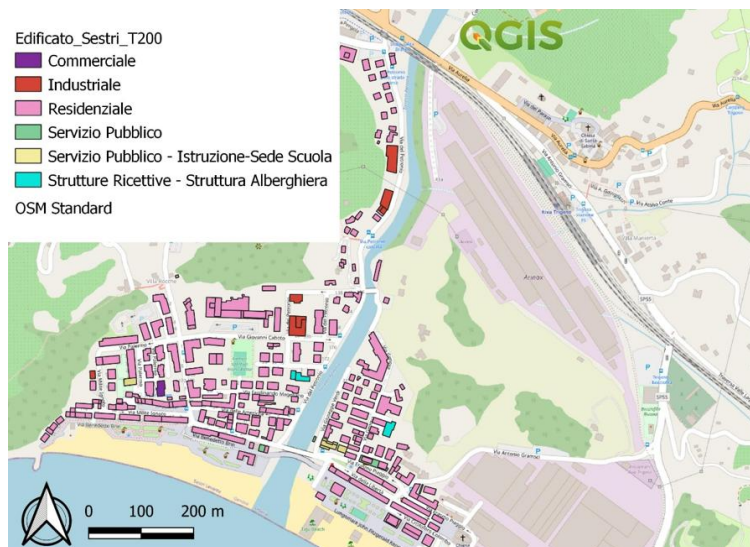


Fig. 5.17 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile per T200 (QGIS).



Fig. 5.18 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile per T500 (QGIS).

5.5.3. Metodologia di stima del danno tramite il plugin FloodD2B

Il plugin FloodD2B, implementato in ambiente QGIS, permette di automatizzare l'associazione tra i parametri idraulici dell'evento alluvionale (quali battente e velocità) e il danno potenziale subito da ogni singola unità edilizia.

La fase cruciale della procedura consiste nell'associare correttamente un valore di battente idrico a ciascun edificio, considerando che le mappe dei "battenti e velocità" spesso presentano dei NoData in corrispondenza del sedime degli edifici qualora questi siano stati modellati come ostacoli al flusso.

In questo studio è stato adottato il secondo metodo previsto dal plugin, che prevede il calcolo del battente attraverso una media spaziale. Il processo automatizzato nel plugin è articolato nelle seguenti fasi:

- operazione di *buffer*: sulla base del layer poligonale degli edifici, è stata generata un'area di rispetto di 2 metri verso l'esterno. Questa operazione assicura che il poligono si sovrapponga ai pixel del raster contenenti i valori di profondità dell'acqua immediatamente circostanti la struttura;
- calcolo *statistiche zonali*: utilizzando l'algoritmo di statistiche zonali, è stata calcolata la media dei valori dei pixel del battente idrico che ricadono all'interno del buffer generato attorno a ciascun edificio. Tale valore medio è stato quindi assunto come tirante idrico di riferimento per l'intero edificio;

Questo approccio ha il vantaggio di evitare le incertezze legate a una preventiva interpolazione della mappa battenti (che potrebbe sovrastimare il tirante) e consente di identificare

correttamente gli edifici che, pur trovandosi in area allagabile, non subiscono danni, o subiscono danni limitati, grazie a protezioni locali o quote del terreno elevate.

Nelle seguenti figure si possono osservare le impostazioni relative al plugin per i tre periodi di ritorno considerati, nelle Fig. 5.19, 5.20, 5.21.

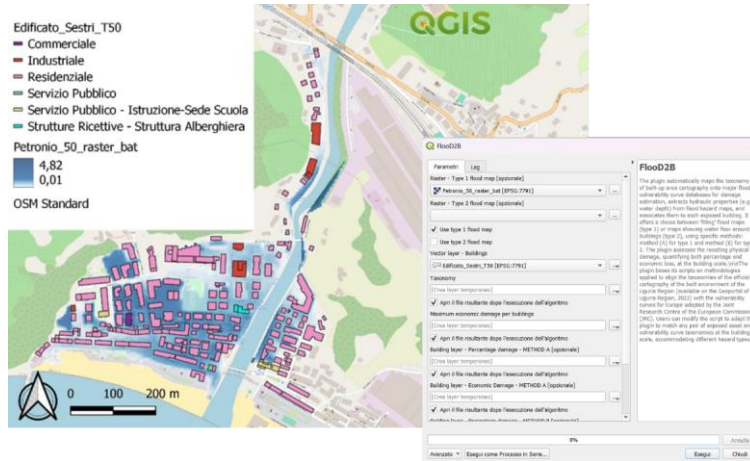


Fig. 5.19 FloodD2B per T50 (QGIS).

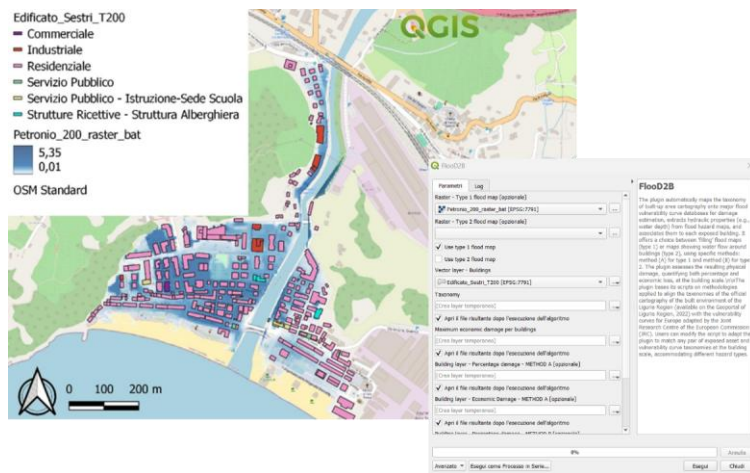


Fig. 5.20 FloodD2B per T200 (QGIS).

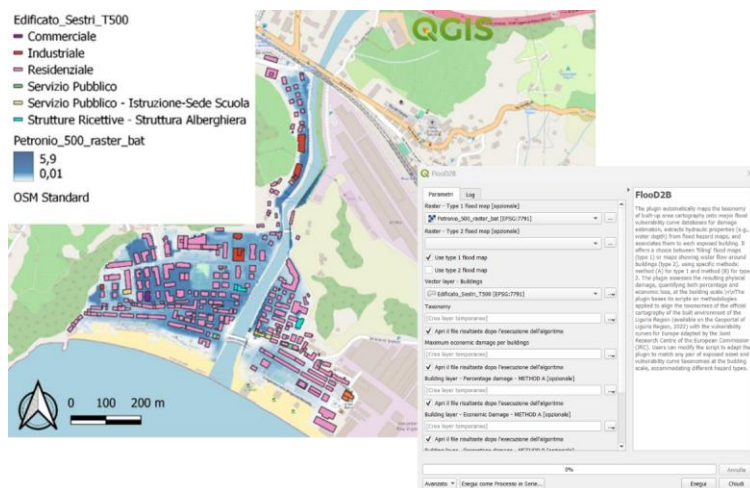


Fig. 5.21 FloodD2B per T500 (QGIS).

Al termine del processo di calcolo, il plugin restituisce quattro layer vettoriali che integrano i risultati della stima: profondità media, percentuale di danno e danno economico in €. Di seguito si riportano maggiori dettagli sui file di output:

- layer puntuali (due file): contengono le informazioni di danno associate ai centroidi degli edifici. Sono strumenti ideali per analisi puramente statistiche o per la gestione di database numerici, in quanto offrono una struttura dati semplificata;
- layer poligonali (due file): questi layer mantengono la geometria originale della sagoma dell'edificio.

Ai fini della restituzione cartografica nella presente tesi, sono stati privilegiati i layer poligonali. Questi permettono una visualizzazione spaziale immediata e intuitiva del rischio a scala urbana, consentendo di tematizzare l'intero edificio in base alle classi di danno definite (da “Nessun danno” a “Danno molto elevato”). Ciò garantisce una rappresentazione visivamente coerente con l'area effettivamente occupata dalle strutture nel tessuto urbanizzato, come si può osservare dalle seguenti immagini Fig. 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27.

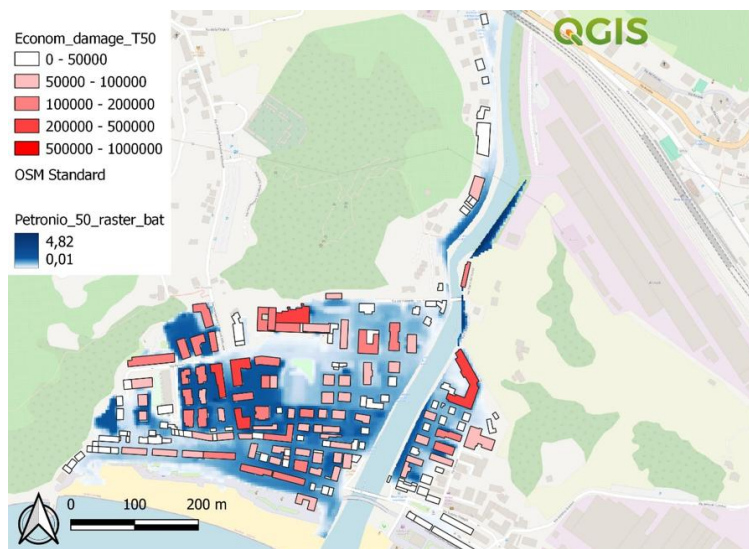


Fig. 5.22 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T50 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

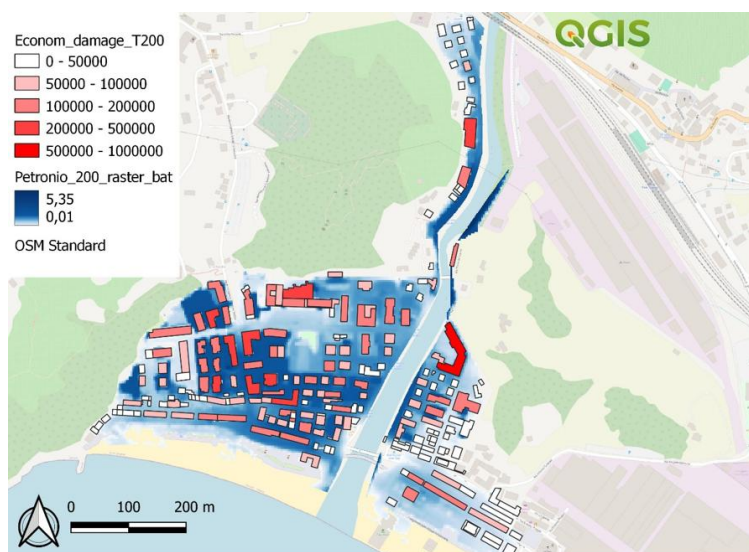


Fig. 5.23 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T200 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

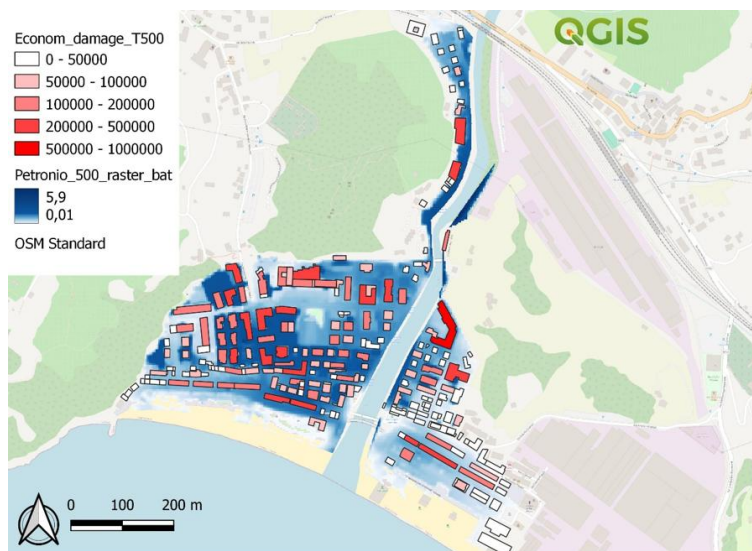


Fig. 5.24 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T500 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

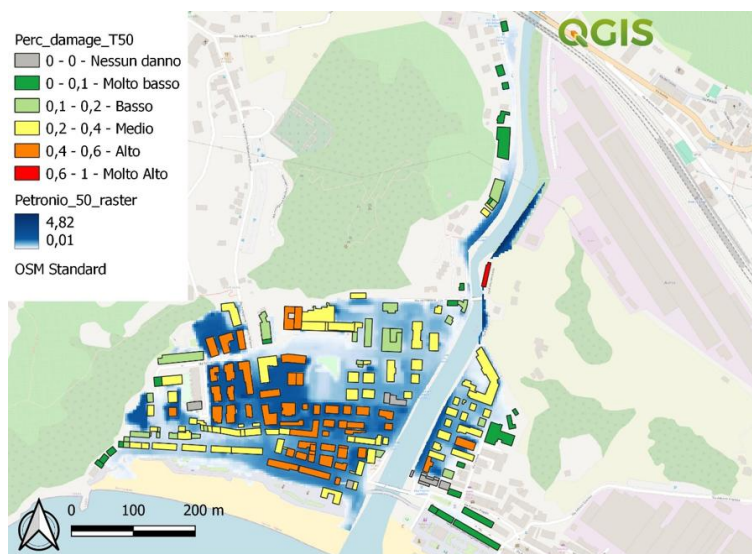


Fig. 5.25 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T50 (QGIS).

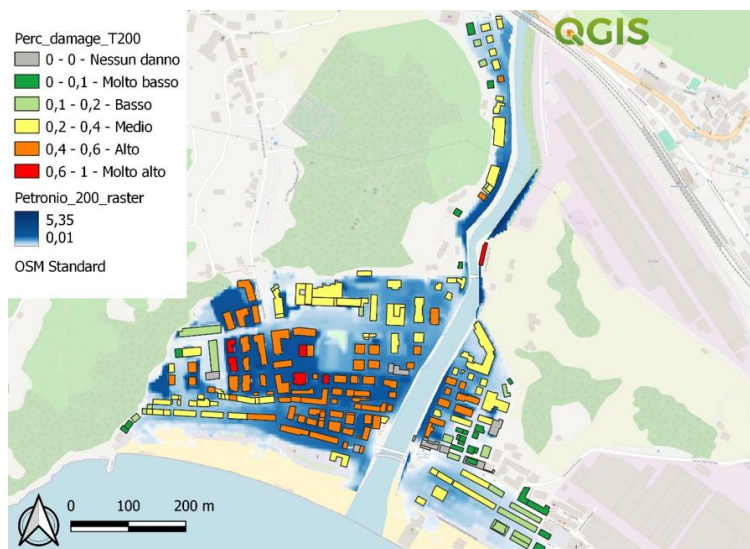


Fig. 5.26 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T200 (QGIS).

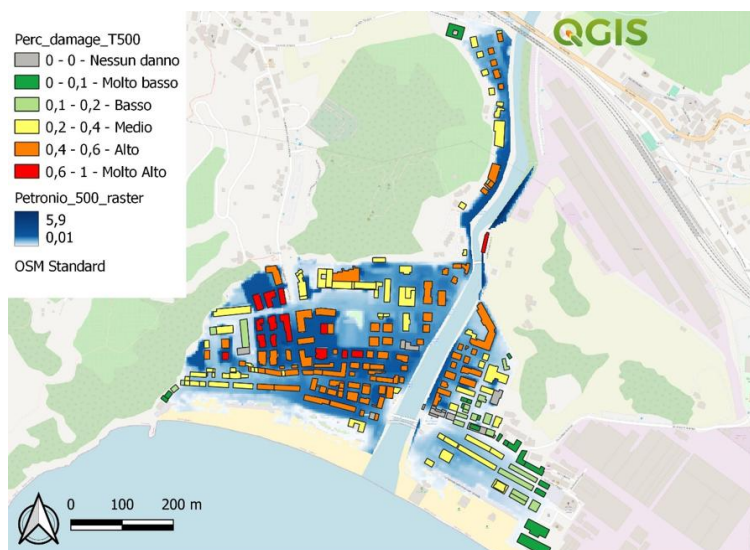


Fig. 5.27 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T500 (QGIS).

6. Analisi Costi e Benefici degli interventi di mitigazione idraulica

In questo capitolo sono presentati i passaggi necessari per individuare i danni subiti a seguito di un'inondazione del torrente Petronio pre e post-intervento di opere idrauliche per la difesa del territorio, in particolare concentrandosi sulla seconda parte del workflow: "Analisi economica". L'Analisi Costi-Benefici (ACB) rappresenta lo strumento metodologico principale per valutare l'efficacia economica degli interventi strutturali e morfologici di mitigazione del rischio inondazione nel bacino del torrente Petronio. L'obiettivo dell'analisi è determinare se l'investimento finanziario necessario alla realizzazione delle opere sia bilanciato e giustificato in termini di riduzione dei danni economici attesi sul territorio (benefici economici diretti).

La valutazione economica si sviluppa attraverso tre macro-fasi logiche ed operative:

- stima dei costi di realizzazione delle opere, convertiti in un Costo Annuo Equivalente;
- analisi dei benefici attesi, intesi come la riduzione del danno annuo atteso medio (EAD - Expected Annual Damage) indotta dalla messa in sicurezza;
- calcolo dell'indicatore di sintesi, ovvero il Rapporto Benefici/Costi (B/C) nello scenario attuale in cui si trova il torrente Petronio.

6.1. Analisi visiva multi-temporale dell'alveo del torrente Petronio tramite rilevamento storico

Al fine di completare il quadro conoscitivo derivante dai modelli idraulici e dalle perimetrazioni ufficiali del Piano di Bacino, si è resa necessaria l'esecuzione di un'analisi visiva del tratto terminale dell'asta fluviale del torrente Petronio. Tale indagine è stata condotta procedendo progressivamente da valle verso monte, ovvero dalla sezione di foce in corrispondenza del litorale di Riva Trigoso risalendo lungo il fondovalle, sempre per la porzione di asta oggetto di analisi in questo studio di tesi. Ciò ha permesso di comprendere la dinamica morfologica del torrente Petronio e identificare le tendenze di deposito, erosione e crescita vegetale. L'analisi visiva multi-temporale è stata eseguita sfruttando l'archivio storico di immagini satellitari e aeree di Google Earth.

L'evoluzione del tratto è stata esaminata selezionando una serie di anni chiave, scelti in base alla disponibilità di dati ad alta risoluzione e alla concomitanza con significativi eventi idrologici o interventi antropici che hanno segnato il bacino.

6.1.1. Zona di foce e tratto terminale arginato (Riva Trigoso)

Nella Fig. 6.1 si osserva la zona di interesse.

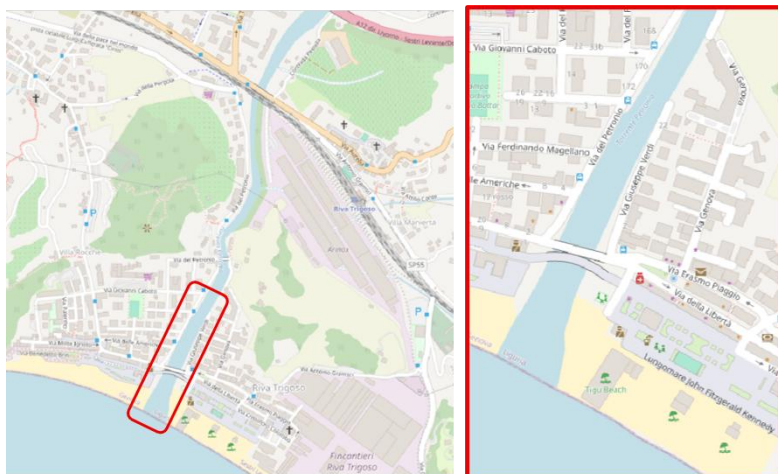


Fig. 6.1 Tratto del torrente Petronio relativo alla zona di foce (OSM).

Nella Fig. 6.2 si osserva l'analisi visiva multi-temporale condotta attraverso immagini satellitari relative alla zona di foce del torrente Petronio, coprendo un arco temporale di oltre vent'anni compreso tra il 2003 e il 2025 (nello specifico, gli anni campionati sono il 2003, 2009, 2012, 2014, 2018 e 2025). Questa sequenza cronologica permette di monitorare l'evoluzione morfologica dell'alveo terminale evidenziando le dinamiche di sedimentazione, il trasporto solido fluviale...



Fig. 6.2 Analisi multi-temporale del tratto del torrente Petronio relativo alla zona di foce (Google Earth).

Come mostrato nella sequenza cronologica riportata, l'area terminale del torrente Petronio a Riva Trigoso presenta una variabilità morfologica nel corso degli ultimi vent'anni. Questa instabilità geometrica influisce direttamente sulle condizioni idrauliche e sulla capacità di deflusso della corrente in corrispondenza dello sbocco a mare.

L'analisi comparativa dei diversi anni evidenzia le seguenti dinamiche idro-morfologiche:

- 2003: l'alveo si presenta parzialmente colonizzato da depositi sedimentari longitudinali diffusi. Il canale di deflusso principale mostra una larghezza ridotta ma rettilinea in prossimità del ponte stradale, con un modesto accumulo di materiale sabbioso-ghiaioso lungo i margini che tende a parzializzare la sezione d'alveo;
- 2009: si osserva una modifica morfologica causata probabilmente dall'incremento del trasporto solido e dalle dinamiche di spiaggia. In corrispondenza del ponte è visibile la formazione di un deposito sabbioso. Tale accumulo costringe il deflusso idrico a deviare verso la sponda idrografica destra;
- 2012: l'immagine mostra una configurazione differente, nella quale si può evidenziare una variazione del deflusso dalla sponda destra alla sinistra, probabilmente per un accumulo diverso del materiale trasportato e per modifiche di riprofilatura;
2014: si innesca nuovamente un processo di progressivo deposito. Sia a monte sia a valle del ponte si nota la riattivazione di barre sedimentarie emergenti. Il deflusso dell'acqua torna a parzializzarsi, incanalandosi in un alveo ramificato che aggira i depositi alluvionali, riducendo la sezione utile all'evacuazione delle portate di piena;
- 2018: la tendenza all'interramento e al deposito di materiale grossolano si accentua nel tratto vicino al ponte. L'alveo a monte dell'infrastruttura stradale appare quasi interamente occupato da barre di sedimento, riducendo il franco idraulico verticale e la capacità di contenimento delle portate ordinarie;
- 2025: si riscontra una situazione di mantenimento del flusso simile al 2018 con una variazione in prossimità della foce. Il canale di sbocco a mare risulta fortemente confinato sul lato destro.

Dal punto di vista dell'ingegneria idraulica, l'alternanza di fasi documentata tra il 2003 e il 2025 dimostra che la foce del torrente Petronio soffre di una variazione cronica del deflusso e dello sbocco in mare dovuto all'azione combinata del trasporto solido fluviale e del ripascimento naturale della spiaggia.

I dati storici visivi ricavati validano e giustificano quindi la scelta progettuale di prevedere opere strutturali e piani di manutenzione periodica volti alla riprofilatura geometrica del fondo alveo. Tali interventi sono indispensabili per ripristinare la sezione teorica di progetto, raddrizzare la direttrice di flusso e garantire il franco idraulico di sicurezza necessario a mitigare il rischio di alluvione nel settore terminale.

6.1.2. Zona sub-urbana a monte della zona di foce

Nella Fig. 6.3 si osserva la zona di interesse analizzata dal punto di vista visivo.

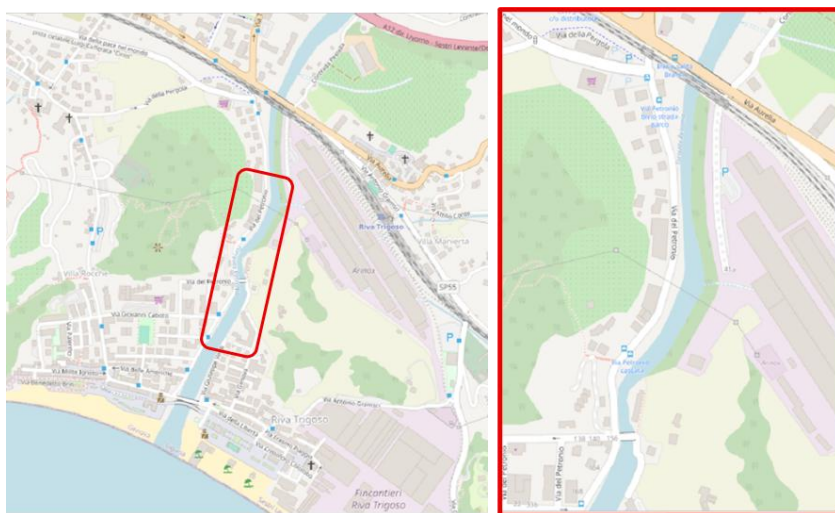


Fig. 6.3 Tratto del torrente Petronio relativo alla zona sub-urbana a monte della zona di foce (OSM).

Nella Fig. 6.4 si osserva l'analisi visiva multi-temporale condotta attraverso immagini satellitari relative alla zona sub-urbana a monte della zona di foce del torrente Petronio, coprendo un arco temporale di oltre dieci anni compreso tra il 2009 e il 2022 (nello specifico, gli anni campionati sono il 2009, 2011, 2015, 2017, 2020 e 2022). Questo specifico tratto fluviale permette di analizzare le dinamiche morfologiche dell'alveo e le variazioni non solo di sedimentazione e trasporto solido, ma anche della vegetazione in un contesto fortemente condizionato dal confinamento antropico.



2009



2011



2015



2017



2020



2022

Fig. 6.4 Analisi multi-temporale del tratto del torrente Petronio relativo alla zona sub-urbana a monte della zona di foce (Google Earth).

Risalendo l'asta fluviale verso monte, l'analisi multi-temporale si concentra sul tratto compreso tra la zona d'approccio sub-urbana e il ponte. Questo settore è caratterizzato da un forte confinamento antropico laterale (arginature rigide e muri di sponda a protezione del tessuto edificato) e dalla presenza di un'importante barriera infrastrutturale trasversale.

L'evoluzione della morfologia d'alveo e delle dinamiche di deflusso nel ventennio considerato evidenzia una tendenza di progressivo interrimento:

- 2009: l'alveo si presenta abbastanza pulito e regolare, si riscontra la presenza di materiale di deposito in una porzione dell'alveo, che però non sembra creare ostacolo al regolare deflusso dell'acqua;
- 2011: il decorso fluido principale inizia leggermente a deviare per via della crescita di una fitta vegetazione sulla sponda destra;
- 2015: l'accumulo di sedimento in corrispondenza della curva del reticolo idrografico si consolida, emergendo stabilmente sul lato della sponda idrografica sinistra. Questo deposito parzializza la sezione utile e costringe il flusso d'acqua a concentrarsi in un canale più stretto lungo la sponda destra;
- 2017: si assiste a una variazione del deflusso nella zona più a monte si osserva un aumento dell'accumulo di sedimento lungo la sponda destra che costringe il deflusso a limitarsi lungo la sponda sinistra.
- 2020: il processo di variazione del deflusso migra nuovamente, soprattutto nella parte più a valle dove il deflusso dell'acqua è completamente spostato lungo la sponda destra del torrente;
- 2022: dal deflusso del torrente si evidenziano le zone di accumulo del materiale trasportato per via dell'erosione che caratterizza il torrente Petronio.

L'analisi temporale di questo specifico settore evidenzia una criticità di fondamentale importanza: il forte accumulo di materiale di erosione.

Le evidenze storiche confermano che gli interventi puramente puntuali o passivi non sono sempre sufficienti. Diventa quindi tecnicamente prioritario prevedere un intervento di riprofilatura del fondo nel progetto di mitigazione per ripristinare l'alveo, nonché il taglio selettivo e lo sradicamento della vegetazione infestante in alveo, associato a un piano di manutenzione periodica.

6.1.3. Zona a monte del ponte ferroviario

Nella Fig. 6.5 si osserva la zona di interesse analizzata dal punto di vista visivo.

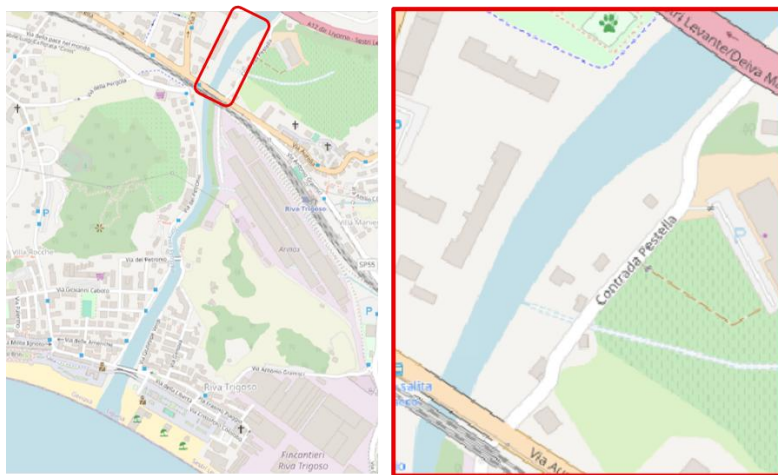


Fig. 6.5 Tratto del torrente Petronio relativo alla zona a monte del ponte ferroviario (OSM).

Nella Fig. 6.6 si osserva l'analisi visiva multi-temporale basata su immagini satellitari storiche, focalizzata sul tratto del torrente Petronio situato immediatamente a monte della linea ferroviaria. L'orizzonte temporale analizzato copre gli anni 2009, 2015, 2018, 2020, 2022 e 2025. Questa specifica porzione di alveo è di fondamentale importanza idraulica in quanto si trova ad interferire con infrastrutture fondamentali come il viadotto autostradale e dai ponti della ferrovia.



Fig. 6.6 Analisi multi-temporale del tratto del torrente Petronio relativo alla zona a monte della ferrovia (Google Earth).

Procedendo ulteriormente verso monte, l'analisi multi-temporale prende in esame il tratto compreso tra l'attraversamento della linea ferroviaria e il viadotto dell'Autostrada A12. Questo settore costituisce una delicata fascia di transizione in cui la pendenza del fondo inizia progressivamente ad aumentare rispetto alla foce, condizionando la dinamica del trasporto solido e favorendo la sedimentazione delle frazioni granulometriche più grossolane.

La cronistoria visiva evidenzia un'evoluzione morfologica marcata, dominata dall'espansione incontrollata della vegetazione riparia e dalla perdita di linearità del canale:

- 2009: il torrente presenta un flusso d'acqua che si distribuisce in modo equilibrato. Si osserva una fitta vegetazione lungo le sponde;
- 2015: si osserva un avanzamento dei depositi alluvionali sul lato della sponda idrografica destra, con conseguenza che il flusso idrico comincia a concentrarsi e a incidere maggiormente il fondo verso la sponda opposta;
- 2018: la sezione d'alveo subisce una deviazione continua in conformità con ciò che si evidenzia in prossimità della ferrovia nel 2015;
- 2020: il canale di deflusso risulta confinato sul lato sinistro dell'argine in prossimità della ferrovia e dal lato opposto nella parte più a monte;
- 2025: l'immagine più recente mostra una situazione molto simile all'anno precedente.

L'analisi multi-temporale del tratto compreso tra la ferrovia e l'autostrada evidenzia un trend di variazione del deflusso dovuto a eventi storici alluvionali e deposito materiale eroso.

Le evidenze storiche estratte confermano che il tratto più a monte agisce come una zona di accumulo critico che alimenta il rischio d'alluvione per i settori antropizzati posti immediatamente a valle. Di conseguenza, si giustifica pienamente l'inserimento in progetto di un intervento diffuso di riprofilatura e sghiaimento dell'alveo per rimuovere i depositi sedimentari consolidati, unito allo sradicamento delle alberature infestanti in alveo, al fine di ripristinare la simmetria del flusso, abbassare il profilo di pelo libero e mettere in sicurezza le infrastrutture strategiche limitrofe.

6.2. Analisi visiva dello “stato di fatto” dell'alveo del torrente Petronio tramite visualizzazione 3D

Al fine di completare il quadro conoscitivo nell'anno più recente disponibile (2025), è stata condotta anche un'indagine (come si può osservare dalla Fig. 6.7) procedendo progressivamente da monte verso valle, ovvero dalla sezione in corrispondenza della linea ferroviaria procedente lungo il torrente fino alla zona di foce in corrispondenza di Riva Trigoso.

La metodologia adottata si basa sull'utilizzo della piattaforma di visualizzazione Google Earth 3D. L'impiego di modelli digitali tridimensionali a risoluzione spaziale rappresenta uno strumento di fondamentale importanza nella pianificazione idraulica e nella gestione del rischio di alluvione. Permette infatti:

- la valutazione dello stato attuale e dinamico dell'alveo: le immagini 3D consentono di

osservare lo stato di fatto reale del corso d'acqua, catturando le modificazioni morfologiche e vegetazionali recenti;

- l'identificazione delle aree di accumulo dei sedimenti: la ricognizione visiva permette di localizzare i depositi alluvionali e gli accumuli di materiale solido macroscopicamente visibili nell'alveo esondabile. Questi depositi riducono localmente la sezione utile di deflusso e alterano l'idrodinamica della corrente in caso di piena;
- la mappatura della vegetazione infestante: uno dei fattori di maggiore criticità per il regolare deflusso è la presenza di vegetazione arbustiva e arborea fitta o instabile all'interno dell'alveo, la quale agisce aumentando drasticamente la scabrezza idraulica (coefficiente di Gauckler-Strickler) e generando un "effetto barriera";
- il rilevamento delle ostruzioni antropiche e strozzature: la visualizzazione prospettica facilita l'analisi geometrica dei manufatti di attraversamento (ponti stradali e ferroviari) e il confinamento d'alveo dovuto alla massiccia urbanizzazione circostante, evidenziando la presenza di pile in alveo o franchi di sicurezza ridotti.

In termini idraulici, l'interazione tra la presenza di fitta vegetazione, l'ostruzione dovuta ai manufatti e l'innalzamento del fondo alveo causato dai depositi sedimentari determina una significativa riduzione della capacità di convogliamento della portata di progetto. Ciò si traduce in un innalzamento locale del profilo di pelo libero e nel conseguente innesco di fenomeni di esondazione laterale anche per tempi di ritorno medio-bassi, incrementando la vulnerabilità intrinseca del tessuto urbano limitrofo.

Pertanto, i risultati di questa analisi visiva non rivestono unicamente un ruolo descrittivo, ma costituiscono la giustificazione tecnica e il criterio di indirizzo primario per la progettazione degli interventi di mitigazione morfologica, con particolare riferimento alle opere di riprofilatura del fondo e pulizia straordinaria dai sedimenti ostacolanti.

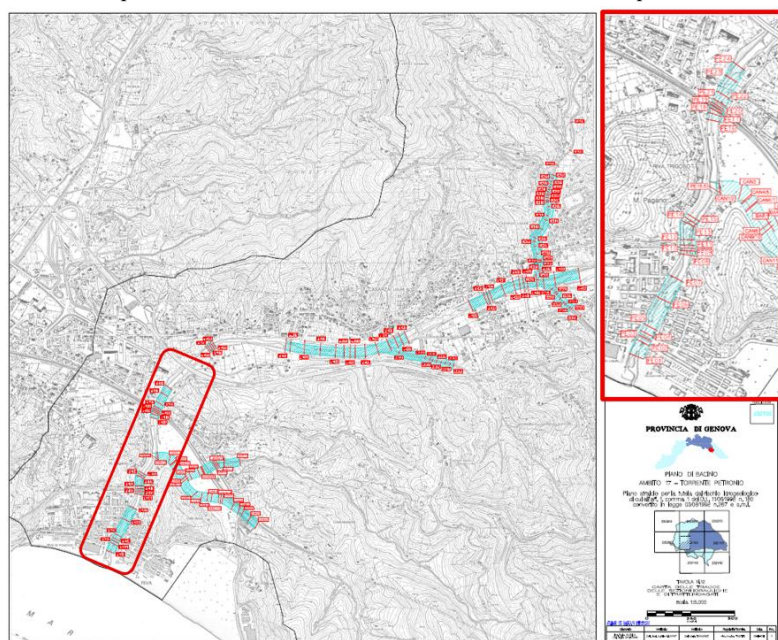


Fig. 6.7 Analisi multi-temporale del tratto oggetto di analisi del torrente Petronio (Google Earth 3D).

Nella Fig. 6.8 si osserva la cartografia dal Piano di Bacino del torrente Petronio, con la presenza delle sezioni analizzate idraulicamente.

In accordo con l'analisi visiva e con gli interventi evidenziati dal Piano di Bacino, nel tratto del torrente Petronio analizzato si osserva la necessità di:

- rifacimento del ponte: le pile tendono a ostruire il passaggio e si è evidenziato come durante i periodi di piena il livello dell'acqua arriva facilmente al livello del ponte stesso;
- per gli altri ponti (ad esempio il ponte Romano), per la loro valenza storica, non è possibile un rifacimento, ma si propone un controllo dell'alveo in termini di riprofilatura e pulizia;
- pulizia e riprofilatura dell'alveo;
- rifacimento/manutenzione degli argini, che hanno subito danni per via della forte erosione del torrente, con la possibilità di incrementare il franco di sicurezza e dunque l'altezza.



*Fig. 6.8 Carta delle tracce delle sezioni idrauliche e di tratti indagati
(Piano di Bacino – Ambito 17).*

Ai fini del raggiungimento degli obiettivi della tesi, per la modellazione idraulica si sono osservati gli interventi di pulizia/riprofilatura dell'alveo e l'incremento dell'altezza degli argini. Invece il rifacimento del ponte è stato analizzato solo nella parte di analisi economica costi e benefici.

6.3. Stima dei Costi di Realizzazione e calcolo del Costo Annuo Equivalente

Per gli interventi strutturali proposti per la mitigazione del rischio idraulico, in accordo con le criticità storiche del Piano di Bacino, si prevedono tre principali tipologie di opere:

- rifacimento del ponte: opera strutturale complessa volta a eliminare l'ostruzione creata dal ponte presente in precedenza per via della presenza delle pile nell'alveo al deflusso e a servire la viabilità pesante per gli stabilimenti industriali (Arinox e Fincantieri). Vita utile ipotizzata (N): 100 anni. Costo stimato: 5,3 milioni di euro;
- rifacimento e manutenzione degli argini: opere in muratura/calcestruzzo finalizzate a incrementare il franco di sicurezza. Vita utile ipotizzata (N): 50 anni. Costo stimato: 1,7 milioni di euro;
- riprofilatura e pulizia dell'alveo: intervento di tipo morfologico per rimuovere vegetazione e sedimenti accumulati. Vita utile ipotizzata (N): 10 anni. Costo stimato: 54,9 mila euro.

Nella Tab. 6.1 sono rappresentati i parametri economici e temporali stimati per ciascuna delle tre tipologie di intervento strutturale e morfologico. Per ogni opera viene specificato l'investimento iniziale complessivo richiesto e la relativa vita utile (N), espressa in numero di anni.

intervento	investimento [euro]	vita utile [anni]
rifacimento ponte	5300000	100
rifacimento argini	1700000	50
riprofilatura/pulizia alveo	54937	10

Tab. 6.1 Sinestesi degli investimenti iniziali e della vita utile ipotizzata per le opere oggetto dell'analisi costi e benefici.

Al fine di confrontare i flussi finanziari dei costi con i benefici annuali, i costi di investimento iniziale vengono attualizzati attraverso il calcolo del Costo Annuo Equivalente, normalizzando l'investimento iniziale lungo l'intera vita utile dell'opera, (Eq. 6.1):

$$\left(\frac{A}{P}, i\%, n\right) \quad P \quad A \quad \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6.1)$$

dove:

- i rappresenta il tasso [%] di interesse che varia in funzione al periodo e alla tipologia di contratto, nella tesi è stato ipotizzato al 3%;
- n rappresenta la vita utile espressa in anni;

La quota di ammortamento annua viene ricavata moltiplicando l'investimento iniziale all'anno zero per il rispettivo coefficiente CRF.

I risultati di questa operazione finanziaria sono sintetizzati nella Tab. 6.2. come si evince dalla tabella il valore del CRF risulta strettamente dipendente dalla longevità dell'opera.

Il costo totale annuo, che ammonta a 310.778 €, include l'attualizzazione finanziaria globale dei

intervento	investimento [euro]	vita utile [anni]	tasso [%]	CRF	quota ammortamento [euro]	manutenzione [euro]	costo annuo [euro]
rifacimento ponte	5300000	100	0.03	0.0316	167727.33	53000	220727.33
rifacimento argini	1700000	50	0.03	0.0389	66071.34	17000	83071.34
riprofilatura/pulizia alveo	54937	10	0.03	0.1172	6440.29	549.37	6989.66

flussi e dunque anche i costi di manutenzione calcolati come l'1%, che viene adottato come denominatore ufficiale per il calcolo del rapporto Benefici/Costi.

6.4. Analisi dei benefici (danni evitati)

I benefici economici dell'intervento sono quantificati come la differenza tra il danno economico atteso nello Stato di Fatto (attuale) e il danno atteso nello Stato di Progetto (post-intervento).

La determinazione del danno si basa sul calcolo dell'EAD (Expected Annual Damage), ovvero il danno medio ponderato che ci si attende si verifichi in un anno qualsiasi, associando i danni economici calcolati per i diversi tempi di ritorno (T) alle rispettive probabilità annuali di superamento ($P = 1/T$).

L'analisi dello Stato di Fatto condotta mediante l'integrazione di dati idraulici regionali, la tassonomia europea JRC e l'applicativo GIS (plugin Flood2B) ha quantificato i danni monetari diretti sul tessuto urbanizzato per eventi con tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni:

- danno per TR50: 10.756.990,16 €;
- danno per TR200: 15.078.365,78 €;
- danno per TR500: 17.054.126,28 €.

Nella Fig. 6.9 si osserva l'andamento del valore dei danni economici in funzione del periodo di ritorno.

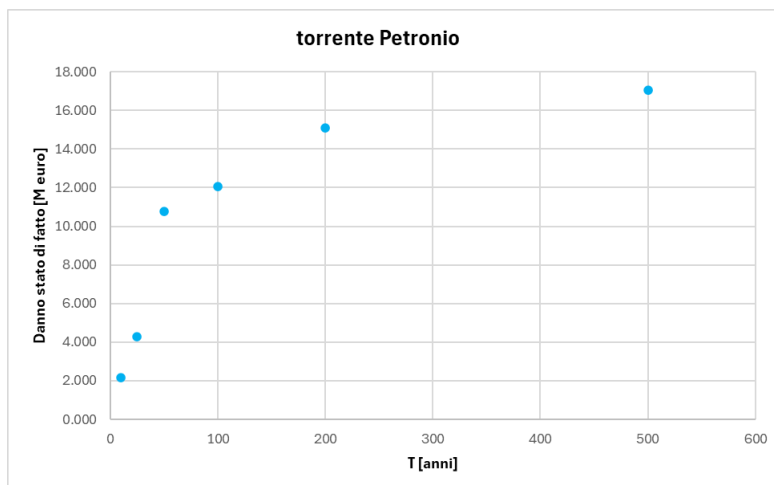


Fig. 6.9 Rappresentazione della variazione del danno allo "stato di fatto" in funzione del periodo di ritorno.

Per determinare lo scenario post-intervento, viene introdotto il coefficiente di Efficacia dell'Opera, espresso come percentuale di riduzione del danno rispetto allo stato attuale. Il Danno Atteso di Progetto è calcolato come (Eq. 6.2):

$$\text{Danno dello Stato di Fatto} \times (1 - \text{Efficacia Opera}) \quad (6.2)$$

Nella Tab. 6.3 si osserva l'applicazione delle formule precedentemente citate e dei coefficienti ai fini della determinazione del valore del "Danno Atteso di Progetto".

periodo di ritorno T[anni]	probabilità annuale (1/T)	danno stato di fatto [euro]	efficacia opera	danno atteso di progetto [euro]
10	0.1	2151398.03	0.95	107569.90
25	0.04	4302796.06	0.9	430279.61
50	0.02	10756990.16	0.8	2151398.03
100	0.01	12062692.62	0.75	3015673.16
200	0.005	15078365.78	0.7	4523509.73
500	0.002	17054126.28	0.25	12790594.71

Tab. 6.3 Individuazione del "danno atteso di progetto".

L'integrazione probabilistica dei danni ridotti determina il nuovo valore di EAD di progetto, come si può osservare dalla Tab. 6.4:

periodo di ritorno T[anni]	probabilità annuale (1/T)	danno evitato [euro]	EAD [euro]
5	0.2	0	
10	0.1	2043828.13	102191.41
25	0.04	3872516.46	177490.34
50	0.02	8605592.13	124781.09
100	0.01	9047019.47	88263.06
200	0.005	10554856.05	49004.69
500	0.002	4263531.57	22227.58

Tab. 6.4 Individuazione del "EAD- Expected Annual Damage".

I benefici annualizzati complessivi, equivalenti al denaro risparmiato mediamente ogni anno grazie alla riduzione del rischio, ammontano a 563.958,16 €.

Nella Fig. 6.10 si osserva l'andamento del valore dei danni economici sia allo stato attuale (rosso) sia quello atteso post-interventi (blu) in funzione del periodo di ritorno.

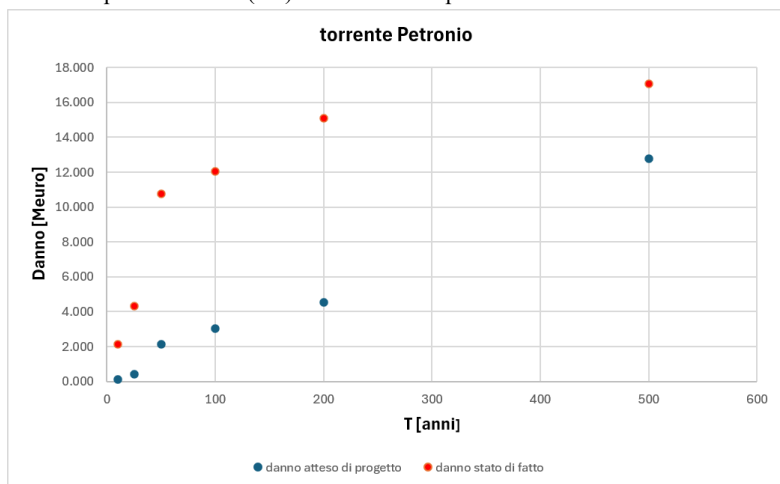


Fig. 6.10 Rappresentazione della variazione del danno allo stato attuale e quello atteso post-intervento in funzione del periodo di ritorno.

6.5. Calcolo del rapporto Benefici/Costi

L'indicatore sintetico dell'efficienza economica del progetto è rappresentato dal Rapporto Benefici/Costi (B/C). Un valore dell'indicatore superiore all'unità attesta la convenienza economica dell'investimento. In particolare, nel caso oggetto di studio tale valore risulta pari a 1.81.

I risultati evidenziano che il piano degli interventi strutturali pianificati mostra una netta sostenibilità finanziaria. Il coefficiente di restituzione economica pari a 1.81 indica l'efficacia degli interventi sia in termini di guadagno economico sia in termini di diminuzione del danno atteso. Pertanto, l'allocazione delle risorse economiche risulta ampiamente giustificata e validata sotto il profilo della pianificazione e gestione del rischio idrogeologico.

7. Analisi idraulica

Questo capitolo presenta la modellazione idraulica del tratto d'alveo in esame, finalizzata alla stima dei profili di pelo libero, delle sezioni e delle aree di esondazione per i diversi scenari di periodo di ritorno (T50, T200 e T500), al fine di valutarne la vulnerabilità idrodinamica e stimare i danni subiti dagli edifici in una condizione post-interventi per la difesa del territorio.

L'analisi è stata strutturata secondo due approcci complementari con il software HEC-RAS:

- modellazione monodimensionale (1D): implementata per una prima definizione dei battenti idrici e delle velocità di corrente;
- modellazione bidimensionale (2D): resa necessaria per garantire la coerenza metodologica nella definizione del layer "Battenti e velocità" della cartografia ufficiale del Geoportale Regionale utilizzato nell'analisi post-interventi, anch'esso realizzato con analisi bidimensionale.

Il confronto tra i due approcci permette di rendere evidenti le eventuali discrepanze derivanti non solo dai diversi modelli matematici, ma anche dalle differenti basi geometriche. La cartografia regionale si basa infatti su rilievi topografici di dettaglio, mentre il presente studio utilizza un DTM da scansione laser integrato, che presenta una risoluzione di 1 m.

Infine, le differenze riscontrate già nei primi output 1D hanno spinto a estendere l'indagine a un confronto anche della fase pre-interventi di opere per la difesa del territorio.

L'analisi post-interventi invece è fondamentale per distinguere gli scostamenti sistematici dagli effetti reali delle opere progettate, garantendo una valutazione oggettiva della loro efficacia per la difesa del territorio.

7.1. Preparazione dei dati necessari per l'analisi idraulica su QGIS

L'implementazione di una modellazione idraulica su HEC-RAS, finalizzata alla generazione di layer di esondazione post-intervento confrontabili con la cartografia ufficiale della Regione, richiede come requisito fondamentale: la definizione di una geometria dell'alveo accurata e coerente.

Con l'obiettivo di migliorare il grado di dettaglio del DTM derivante da laser scanner, si è inizialmente tentato di integrarlo con i dati geometrici idraulici ricavati da studi presenti all'interno del Piano di Bacino. Per fare ciò, la mappa della cartografia ufficiale del Piano di Bacino contenente le sezioni idrauliche di riferimento è stata georeferenziata in ambiente QGIS. Lungo tali sezioni sono stati estratti punti quotati, inserendo nella tabella degli attributi il valore della quota del fondo alveo derivante dallo studio regionale originario.

Tuttavia, la notevole distanza intercorrente tra le sezioni ha reso l'operazione di interpolazione spaziale estremamente complessa. Sono stati testati due differenti algoritmi di interpolazione:

- il metodo *TIN* (*Triangulated Irregular Network*);
- l'algoritmo *v.surf.rst* (*Regularized Spline with Tension* di GRASS).

In entrambi i casi, la geometria risultante è apparsa frammentata, geometricamente discontinua

e non coerente con l'andamento reale del corso d'acqua, introducendo artefatti morfologici inaccettabili per la successiva modellazione idrodinamica.

Alla luce di tali criticità, si è proceduto escludendo l'integrazione delle sezioni e utilizzando esclusivamente il DTM da scansione laser. Questa scelta è supportata da un'evidenza sui dati di acquisizione: i capitoli tecnici dei rilievi LIDAR aerei impongono rigorosamente che i voli vengano eseguiti solo in condizioni di assenza di nubi, assenza di neve al suolo e condizioni meteorologiche stabili nei giorni precedenti. Questo per evitare che l'acqua piovana o le piene alterino la morfologia degli alvei e creino riflessioni anomale. Di conseguenza, i voli avvengono quasi sempre in periodi di magra meteorologica.

Il confronto diretto tra i profili delle sezioni del Piano di Bacino e le corrispondenti sezioni estratte dal DTM da laser scanner ha confermato la validità dei concetti sopra espressi. Le geometrie basate sul solo DTM sono risultate significativamente più coerenti, fluide e caratterizzate da un margine di errore nettamente inferiore rispetto a quelle derivanti dalle interpolazioni *TIN* e *v.surf.rst*. Il DTM da laser scanner è stato quindi assunto come base geometrica ufficiale per la successiva analisi idraulica.

7.2. Software di analisi fluviale: HEC-RAS

Il software HEC-RAS sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers (USACE), rappresenta uno degli standard globali più diffusi e accreditati per la modellazione idraulica 1D e 2D dei corsi d'acqua. Il sistema è concepito per simulare il comportamento idrodinamico di canali naturali e artificiali, valutando i profili di pelo libero, le mappe di esondazione e i campi di velocità in diversi scenari di portata.

Il software si basa sulla risoluzione di equazioni differenziali della dinamica dei fluidi, differenziando l'approccio matematico a seconda della dimensionalità del modello implementato.

7.2.1. Modellazione monodimensionale (1D)

Nell'approccio monodimensionale, il flusso viene assunto come prevalentemente longitudinale lungo l'asse del corso d'acqua. Il software richiede la discretizzazione dell'alveo tramite una serie di sezioni trasversali (*cross-sections*) perpendicolari alla direzione della corrente.

Dal punto di vista matematico, per il moto permanente (*steady flow*), HEC-RAS risolve l'equazione dell'energia unidimensionale tra due sezioni successive (Eq. 7.1), calcolando le perdite di carico dovute all'attrito (tramite la formula di Manning) e alle transizioni geometriche (restringimenti ed espansioni):

$$H_2 + z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = H_1 + z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e \quad (7.1)$$

dove:

H è il carico totale;

z è la quota del fondo;

y è il tirante idrico;

V è la velocità media della corrente;

α è il coefficiente di ragguaglio dell'energia cinetica (coefficiente di Coriolis);

h_e rappresenta la perdita di carico energetica tra le due sezioni.

Nei casi di moto vario (*unsteady flow*), il modello risolve invece le equazioni di De Saint Venant nella forma monodimensionale, che combinano il principio di conservazione della massa e della quantità di moto.

7.2.2. Modellazione Bidimensionale (2D)

HEC-RAS permette l'implementazione di domini bidimensionali in moto vario, discretizzando lo spazio attraverso una griglia di calcolo (*computational mesh*) che può essere strutturata o non strutturata.

Per il calcolo idrodinamico 2D, il software offre la possibilità di scegliere tra due formulazioni matematiche fondamentali:

- equazioni di diffusione dell'onda: una forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes che trascura i termini di accelerazione locale e convettiva. Garantisce un'elevata stabilità numerica e tempi di calcolo ridotti, ideale per ampi domini di esondazione dove le variazioni di velocità nel tempo sono gradualità.
- equazioni di *shallow water* (Saint Venant 2D): risolvono l'insieme completo delle equazioni di conservazione della quantità di moto. Questo approccio è indispensabile nei contesti ad elevata dinamicità, come le aree di foce soggette a interazioni di marea, propagazioni di onde di piena repentine o in presenza di brusche variazioni geometriche e strutture idrauliche, dove gli effetti inerziali non sono trascurabili.

7.2.3. Il modulo *RAS Mapper* e l'interoperabilità con i sistemi GIS

Una delle caratteristiche cruciali di HEC-RAS, fondamentale per lo sviluppo del presente lavoro, è l'ambiente integrato *RAS Mapper*. Questo modulo consente la gestione diretta dei dati geospaziali all'interno del software di modellazione.

RAS Mapper permette di importare direttamente i DTM in formato raster per associare le quote geometriche alle celle della mesh 2D o alle sezioni 1D. Al termine delle simulazioni idrauliche, il modulo elabora e genera direttamente i layer spaziali dei risultati:

- mappe dei battenti idrici (profili di pelo libero);
- mappe delle velocità di corrente;
- perimetrazioni delle aree di esondazione.

Questi output, esportabili in formati cartografici standard (come i file .tif o shapefile), garantiscono una perfetta interoperabilità con i software GIS, consentendo il confronto spaziale diretto con le cartografie ufficiali degli enti di distretto e l'analisi dettagliata degli elementi esposti al rischio.

7.3. Analisi idraulica 1D dello stato di fatto su HEC-RAS

La fase iniziale della modellazione idraulica ha riguardato l'analisi della configurazione precedente alla realizzazione delle opere di difesa del territorio. La scelta di avviare lo studio da questa condizione risponde a una precisa necessità metodologica: prima di valutare l'efficacia delle nuove opere, è indispensabile validare il modello geometrico e idraulico costruito, verificandone la coerenza con il layer ufficiale messo a disposizione dal Geoportale Regionale, il quale è stato utilizzato nel capitolo precedente per l'analisi dei danni subiti dagli edifici nella fase pre-intervento.

Lo sviluppo della modellazione monodimensionale all'interno del software HEC-RAS ha richiesto la definizione del quadro di riferimento geo-spaziale, al fine di garantire l'assoluta congruenza geometrica con gli strati informativi precedentemente elaborati in ambiente GIS.

Attraverso il modulo integrato *RAS Mapper*, l'ambiente di calcolo è stato impostato accedendo alle opzioni di proiezione (*RAS Mapper Options* → *Projection*). Per assicurare che il modello idraulico fosse riferito alla medesima porzione geografica del progetto GIS, si è fatto riferimento al sistema di coordinate standardizzato tramite la piattaforma *Spatial Reference*. Nello specifico, è stato individuato e scaricato il file di proiezione con codice EPSG:7791. Il caricamento del file .prj così ottenuto all'interno di HEC-RAS ha permesso di georeferenziare univocamente lo spazio di lavoro.

Successivamente si è proceduto alla creazione del modello digitale del terreno idraulico (*Create New RAS Terrain*). In questa fase è stato importato il raster del DTM, precedentemente ritagliato in ambiente QGIS in corrispondenza della zona di interesse del tratto focivo del torrente Petronio a Riva Trigoso. L'elaborazione di questo file ha consentito la generazione del *Terrain* di calcolo, ovvero la base topografica continua su cui si fonda l'intera geometria del modello, come si può osservare nella Fig. 7.1.

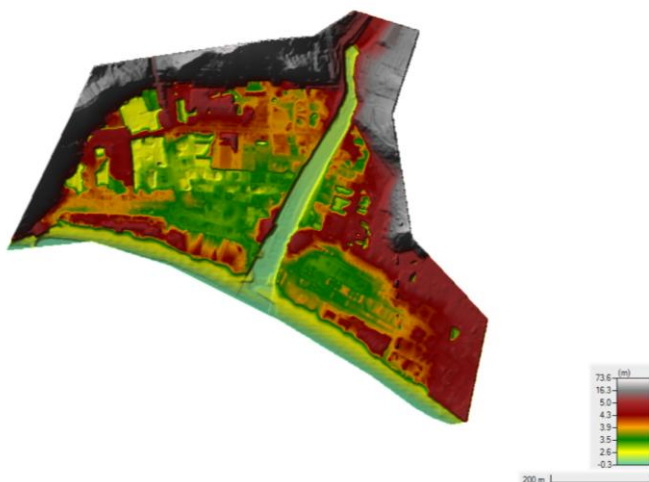


Fig. 7.1 Rappresentazione della geometria del terreno: "Terrain" (HEC-RAS).

Sulla base del *Terrain* così strutturato, è stata avviata la digitalizzazione degli elementi vettoriali fondamentali per la schematizzazione monodimensionale del corso d'acqua. Il processo ha previsto la tracciatura dei seguenti elementi geometrici:

- *River Reach* (linea centrale dell'alveo: Fig. 7.2a): è stata definita la *river line* lungo l'asse longitudinale del torrente Petronio, procedendo da monte verso valle per stabilire la corretta direzione del flusso idraulico;

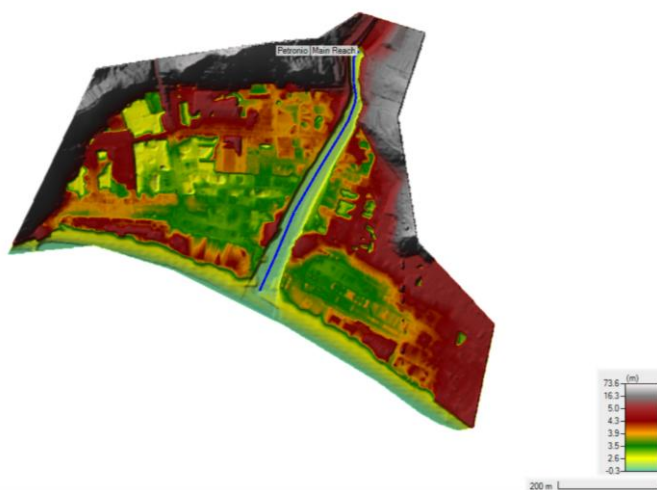


Fig. 8.2a Rappresentazione della linea centrale dell'alveo (HEC-RAS).

- *Bank Lines* (linee di sponda: Fig. 7.2b): sono state tracciate le linee di delimitazione dell'alveo a destra e sinistra idrografica. Questa operazione è cruciale per consentire al software di distinguere geometricamente il letto principale del torrente dalle aree golenali e di esondazione esterna;

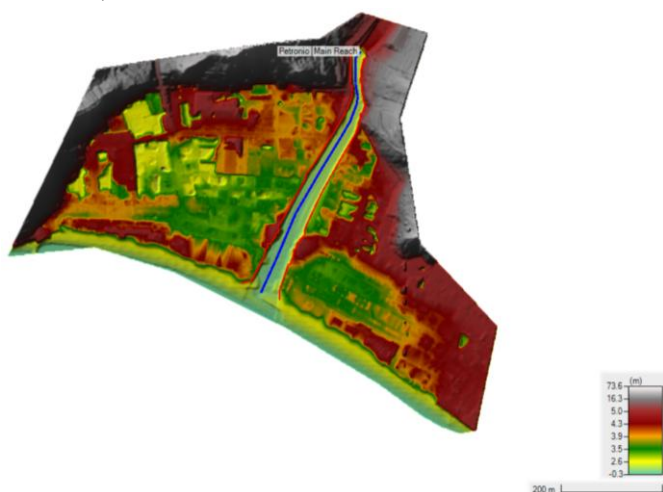


Fig. 7.2b Rappresentazione in rosso delle linee di sponda (HEC-RAS).

- *Flow Paths* (linee di flusso: Fig. 7.2c): sono state digitalizzate le linee d'andamento del flusso necessarie al software per calcolare correttamente le distanze relative tra le sezioni trasversali nei settori idraulici;

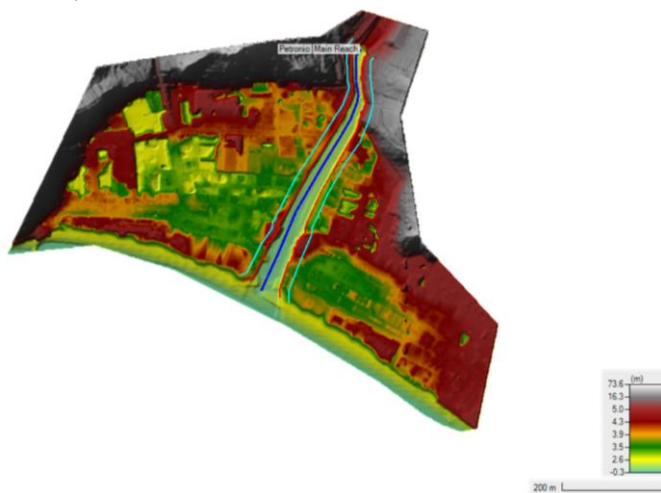


Fig. 7.2c Rappresentazione in ciano delle linee di flusso (HEC-RAS).

- *Cross sections* (sezioni trasversali: Fig. 7.3): sono state tracciate le sezioni di calcolo perpendicolarmente alla direzione della corrente. Ciascuna sezione interseca gli elementi precedentemente digitalizzati, estraendo automaticamente dal *Terrain* le quote altimetriche del fondo alveo e dei versanti, completando la schematizzazione geometrica propedeutica alla fase di calcolo.

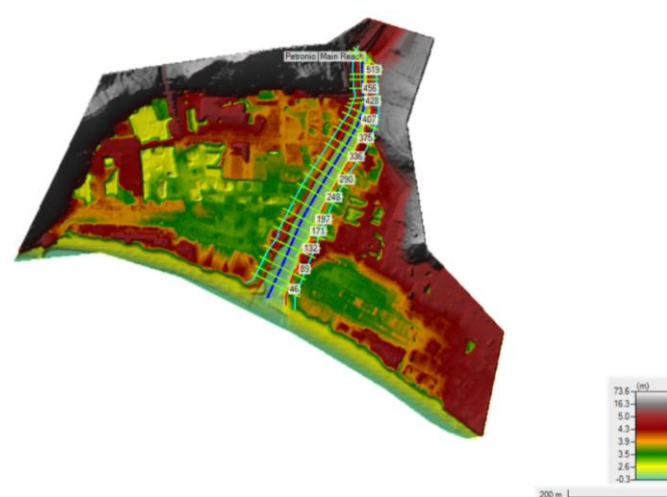


Fig. 7.3 Rappresentazione in verde delle linee di sezione (HEC-RAS).

Completata la digitalizzazione degli elementi vettoriali in ambiente *RAS Mapper*, la geometria è stata importata e editata all'interno del modulo principale di HEC-RAS (*Geometric Data*). In questa fase, l'operazione cruciale ha riguardato l'attribuzione della resistenza idraulica lungo le sezioni d'alveo, operata tramite la definizione del coefficiente di scabrezza di Manning (n).

Al fine di garantire la congruenza e la confrontabilità dei risultati con gli strumenti di pianificazione vigenti, il valore del coefficiente di Manning per l'alveo inciso è stato posto pari a $0.028 \text{ s/m}^{1/3}$. Tale parametrizzazione risulta in perfetto accordo con le scelte di modellazione e gli studi di dettaglio condotti dall'Autorità di Bacino nell'ambito del Piano di Bacino del torrente Petronio. Questo valore riflette le caratteristiche geomorfologiche del tratto terminale del corso d'acqua, tipicamente caratterizzato da pendenze moderate e fondo in materiale sciolto grossolano con vegetazione limitata.

Prima di procedere con la fase di calcolo, è stata verificata la qualità della geometria strutturata mediante gli strumenti di diagnostica grafica di HEC-RAS. Nello specifico, sono stati elaborati i profili longitudinali del fondo alveo (*Profile Plot*, Fig. 7.4) ed è stata generata una visualizzazione tridimensionale dell'asta fluviale (*3D Perspective Plot*, Fig. 7.5). Tali rappresentazioni grafiche hanno permesso di validare la continuità del fondo e l'assenza di anomalie geometriche macroscopiche derivanti dal DTM.

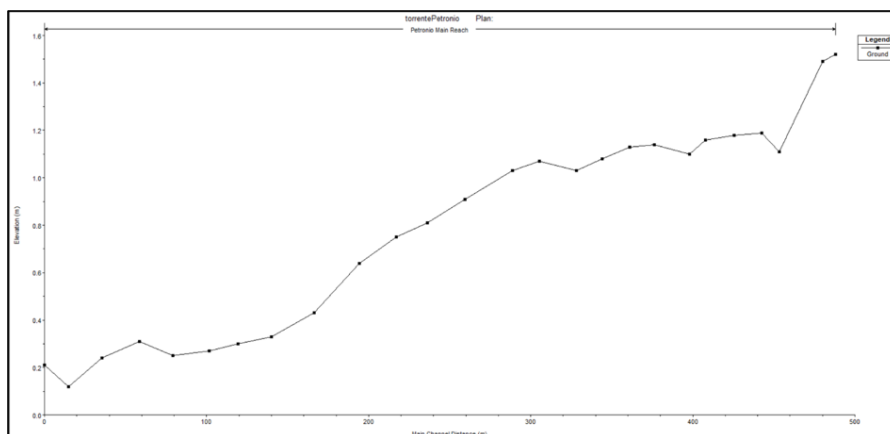


Fig. 7.4 Rappresentazione del profilo del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio (HEC-RAS).

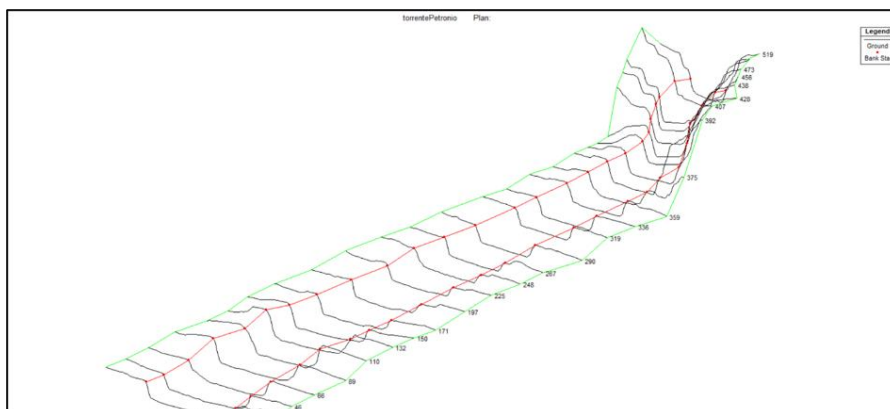
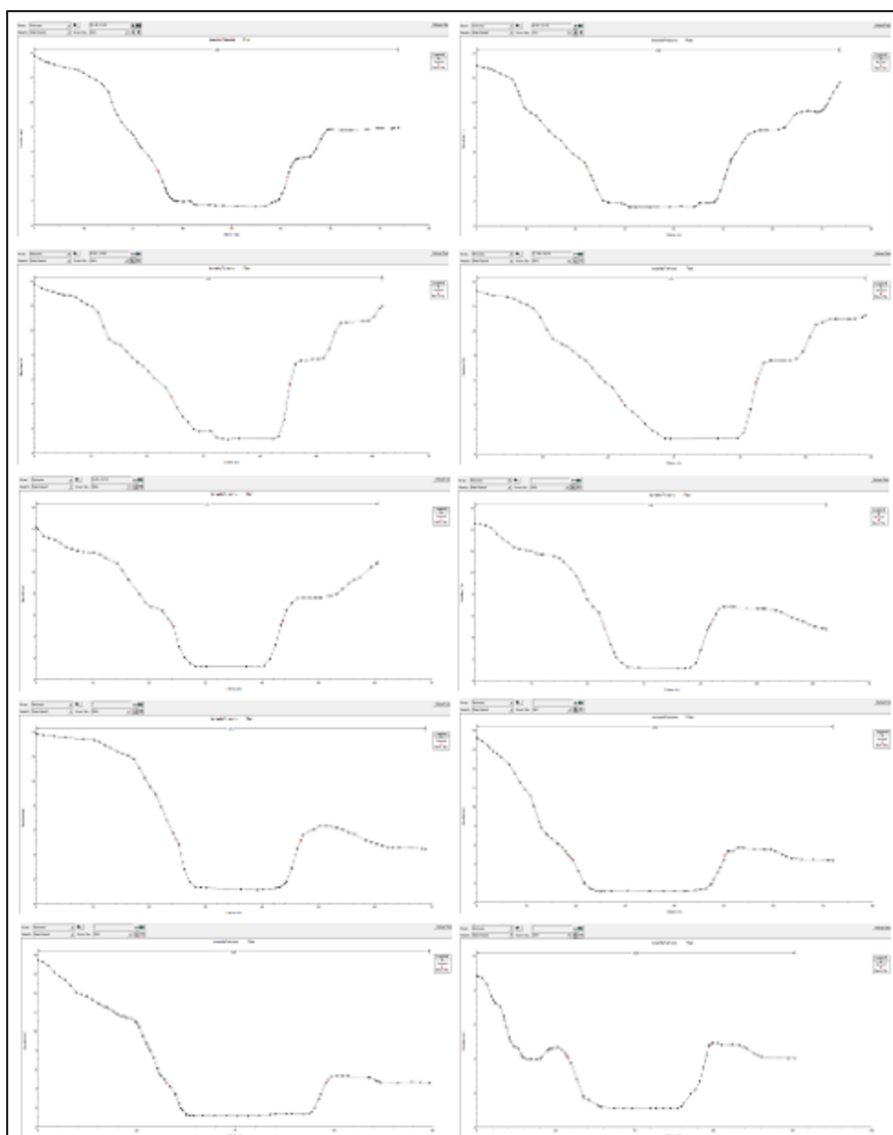
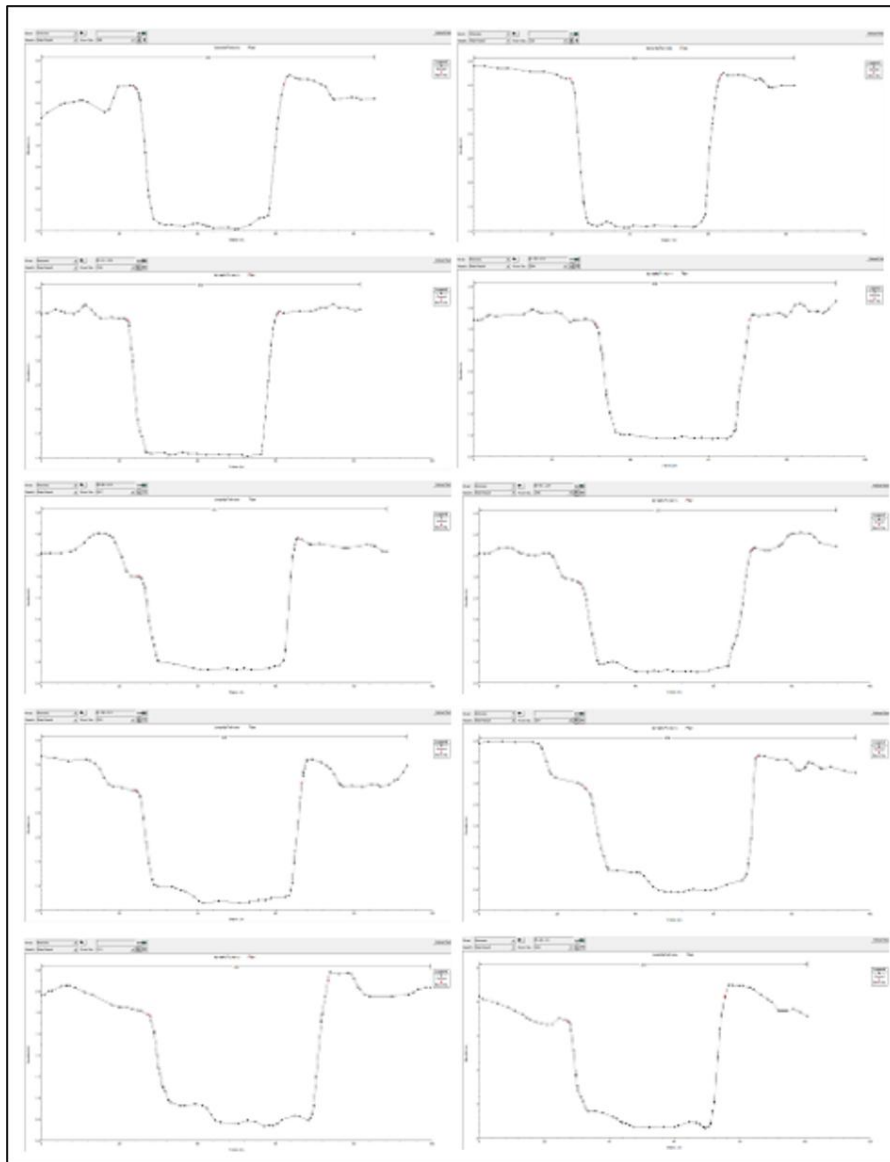


Fig. 7.5 Rappresentazione del profilo 3D del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio

Nella Fig. 7.6 si possono invece osservare le sezioni inserite lungo il tratto del torrente oggetto di analisi, da monte verso valle.





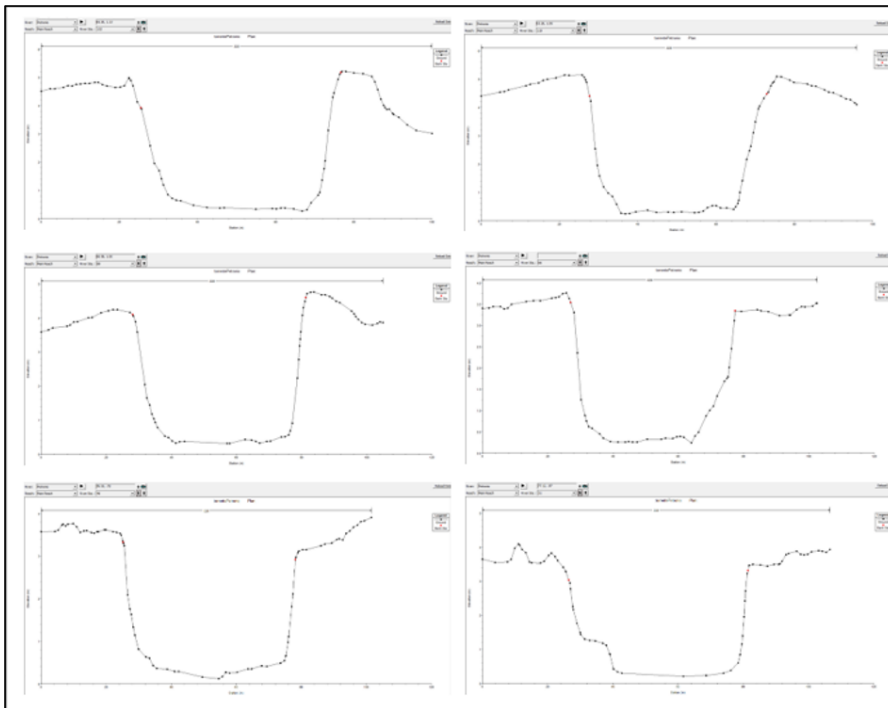


Fig. 7.6 Rappresentazione del fondo alveo lungo le sezioni del tratto focivo del torrente Petronio da monte verso valle (HEC-RAS).

7.3.1. Definizione del regime di moto permanente (*Steady Flow Data*) e condizioni al contorno

Il passo successivo ha riguardato l'implementazione del modello idraulico in regime di moto permanente (*Steady Flow Data*). Questo approccio consente di determinare i profili del pelo libero e le principali grandezze idrauliche in corrispondenza dei colmi di piena associati agli specifici eventi idrologici.

Sono stati simulati tre profili di flusso corrispondenti ai tre principali tempi di ritorno. I valori di portata al colmo inseriti nel modello, estratti dalle relazioni idrologiche ufficiali del Piano di Bacino per la medesima sezione d'analisi del tratto focivo, sono i seguenti:

- $Q_{50} = 601 \text{ m}^3/\text{s}$: scenario associato a una pericolosità idraulica frequente ($T = 50$ anni);
- $Q_{200} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$: scenario di riferimento per la delimitazione delle fasce di inondazione e la progettazione delle opere di difesa ($T = 200$ anni).
- $Q_{500} = 821 \text{ m}^3/\text{s}$: scenario estremo per la valutazione della resilienza territoriale ($T = 500$ anni).

Per consentire la risoluzione numerica delle equazioni del moto (equazione dell'energia

unidimensionale), è stato necessario impostare le opportune condizioni al contorno (*Boundary Conditions*) alle estremità della porzione del torrente di calcolo:

- condizione al contorno a monte (*Upstream*): è stata impostata la condizione di altezza uniforme (*Normal Depth*), inserendo la pendenza media del tratto iniziale pari a $S = 0.0036$. Questa scelta permette al software di calcolare l'altezza idrica di ingresso ipotizzando un regime di moto uniforme stabilizzato;
- condizione al contorno a valle (*Downstream*): in corrispondenza della sezione di foce, si è imposto la condizione di altezza critica (*Critical Depth*). Tale assunzione risulta cautelativa e idraulicamente coerente per simulare il passaggio della corrente attraverso uno stato critico o un rigurgito libero indotto dallo sbocco.

7.3.2. Risultati del calcolo in condizione di moto permanente monodimensionale

Definiti tutti i parametri di input, è stata configurata la simulazione numerica all'interno del modulo *Steady Flow Analysis*. Il regime di flusso è stato impostato come misto. Questa opzione consente all'algoritmo di calcolo di gestire contemporaneamente tratti in regime subcritico (corrente lenta) e tratti in regime supercritico (corrente veloce), risolvendo autonomamente le zone di transizione idraulica, come i risalti idraulici, che frequentemente si instaurano in prossimità di brusche variazioni geometriche o restringimenti d'alveo. Contestualmente, è stata attivata l'opzione di mappatura dinamica delle aree allagabili (*Floodplain Mapping*).

L'analisi dei primi output numerici ha permesso di visualizzare graficamente i profili del pelo libero lungo l'intero sviluppo longitudinale (Fig. 7.7) e di esaminare il comportamento della corrente all'interno delle singole sezioni trasversali (*Cross Sections*, Fig. 7.8). La visualizzazione immediata del livello idrico rispetto alle quote di sponda ha consentito di evidenziare le prime criticità idrauliche nello scenario pre-intervento, localizzando i tratti d'alveo geometricamente insufficienti a contenere le portate di progetto, con conseguente sormonto degli argini o delle sponde naturali.

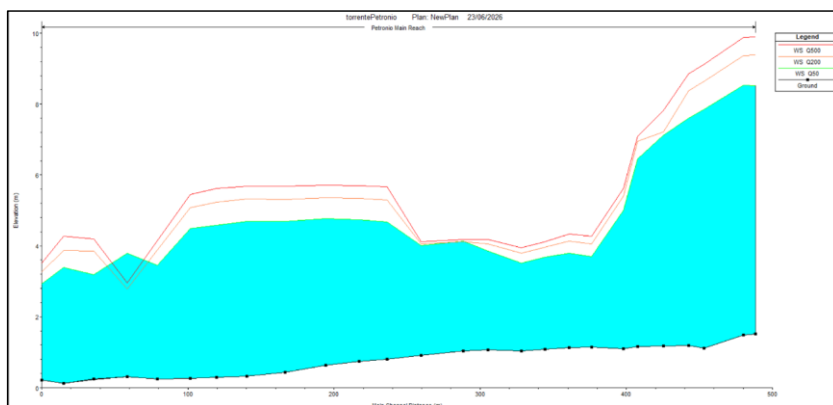
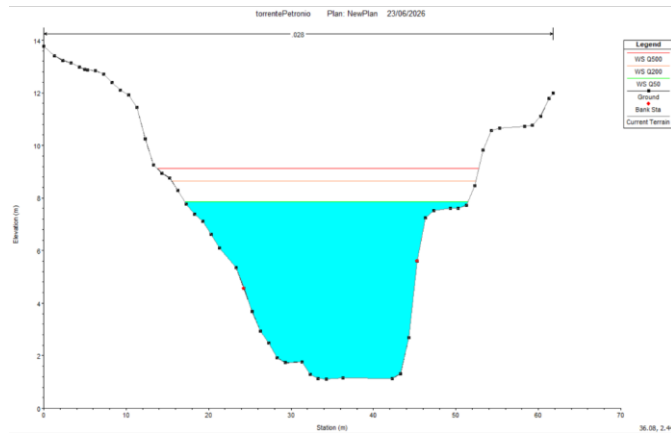
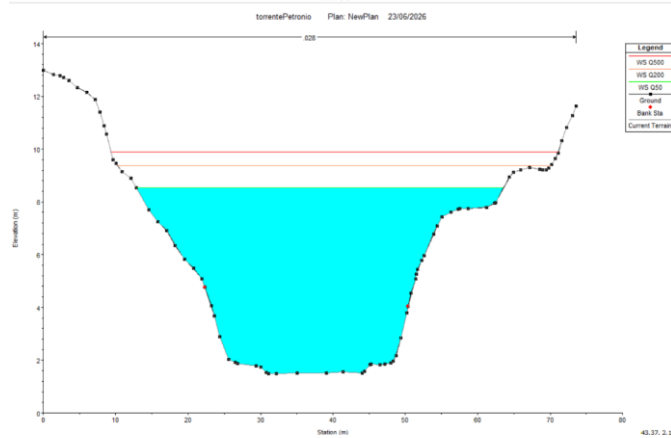
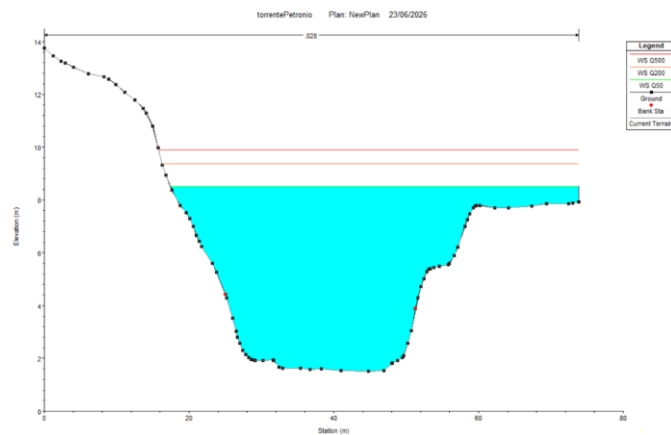
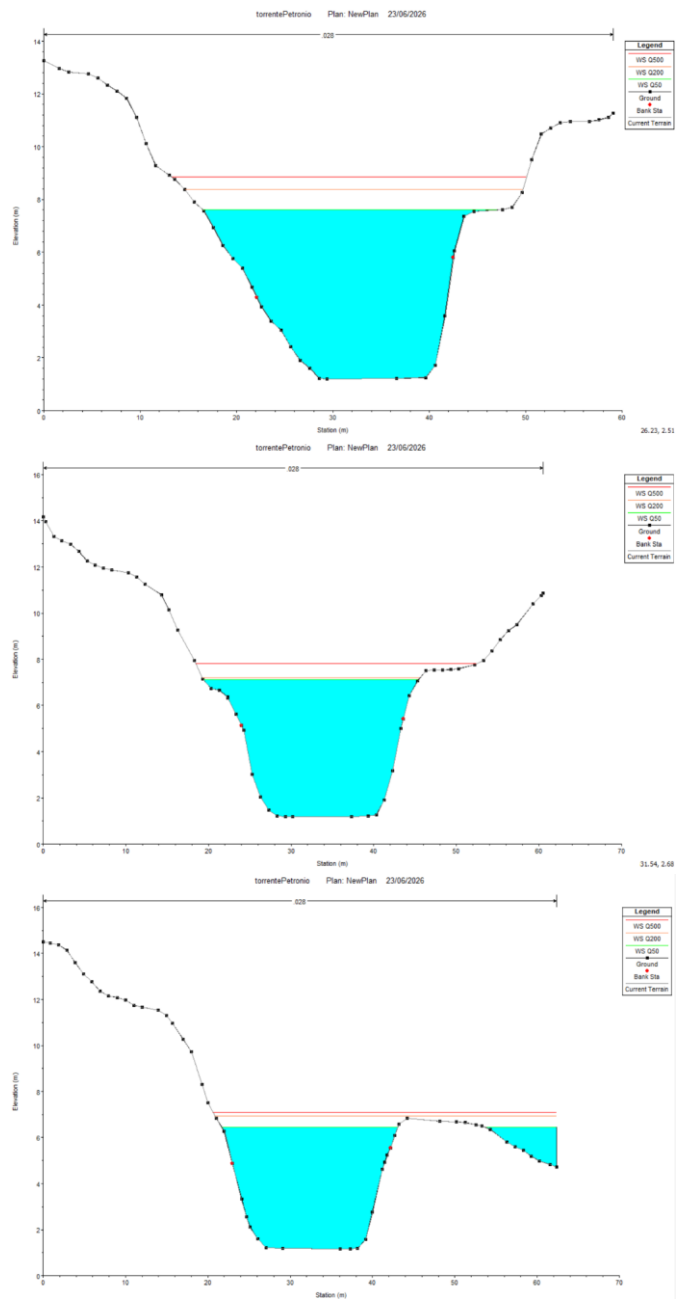
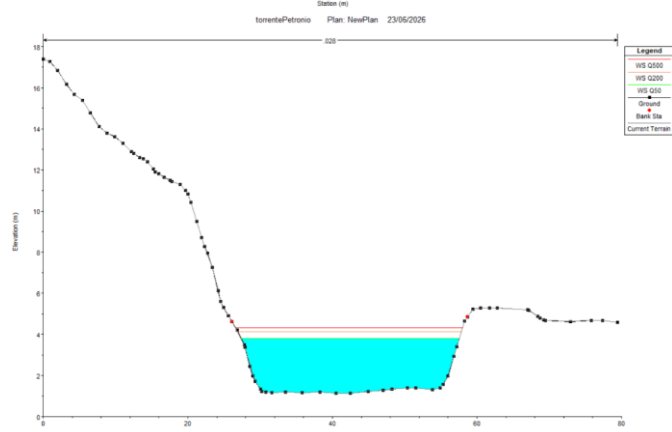
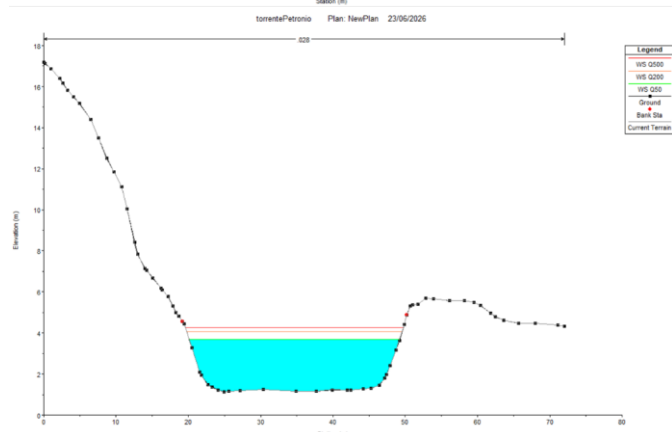
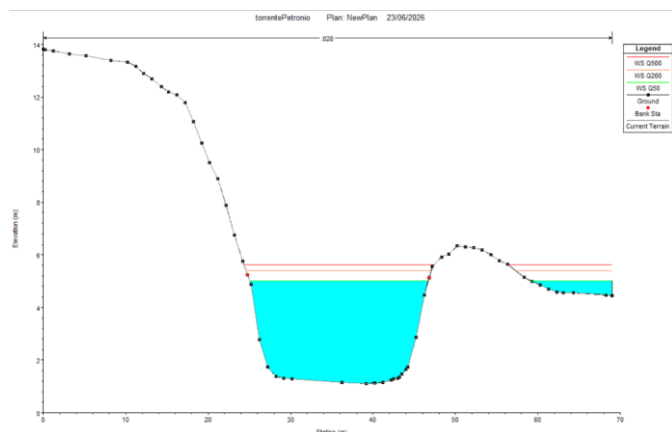


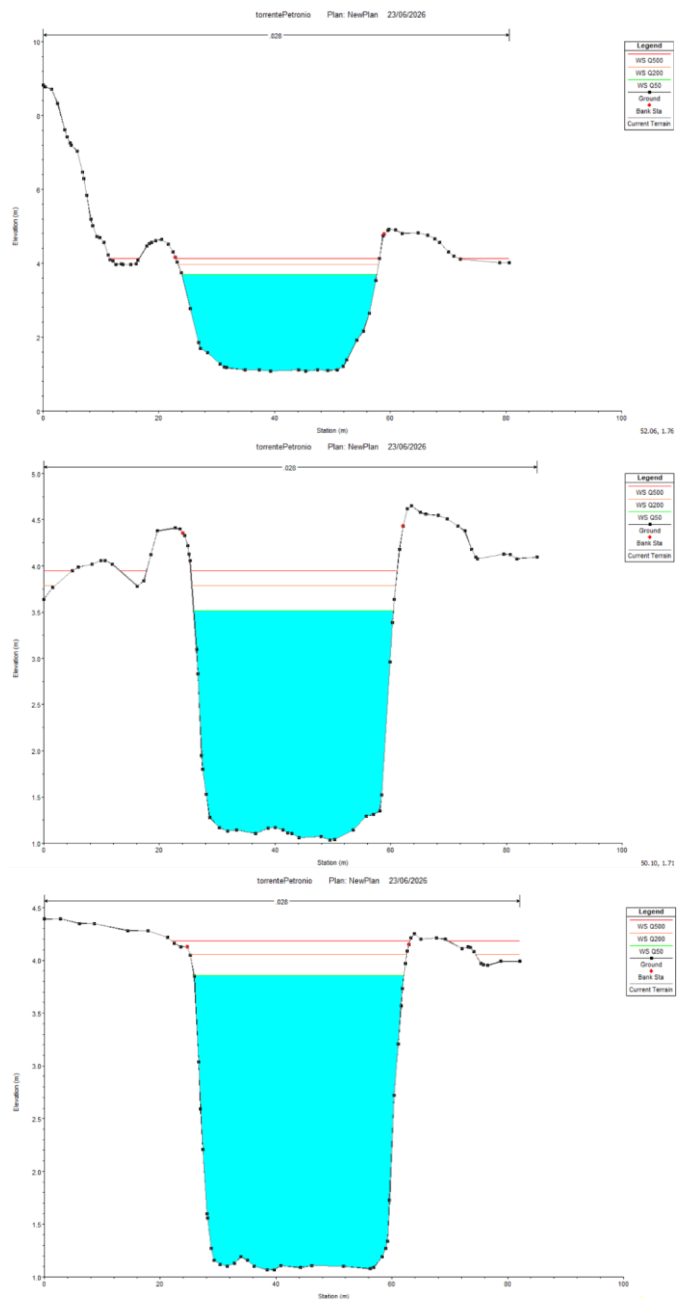
Fig. 7.7 Rappresentazione del profilo del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio per Q50 (verde), Q200 (arancione) e Q500 (rosso) (HEC-RAS).

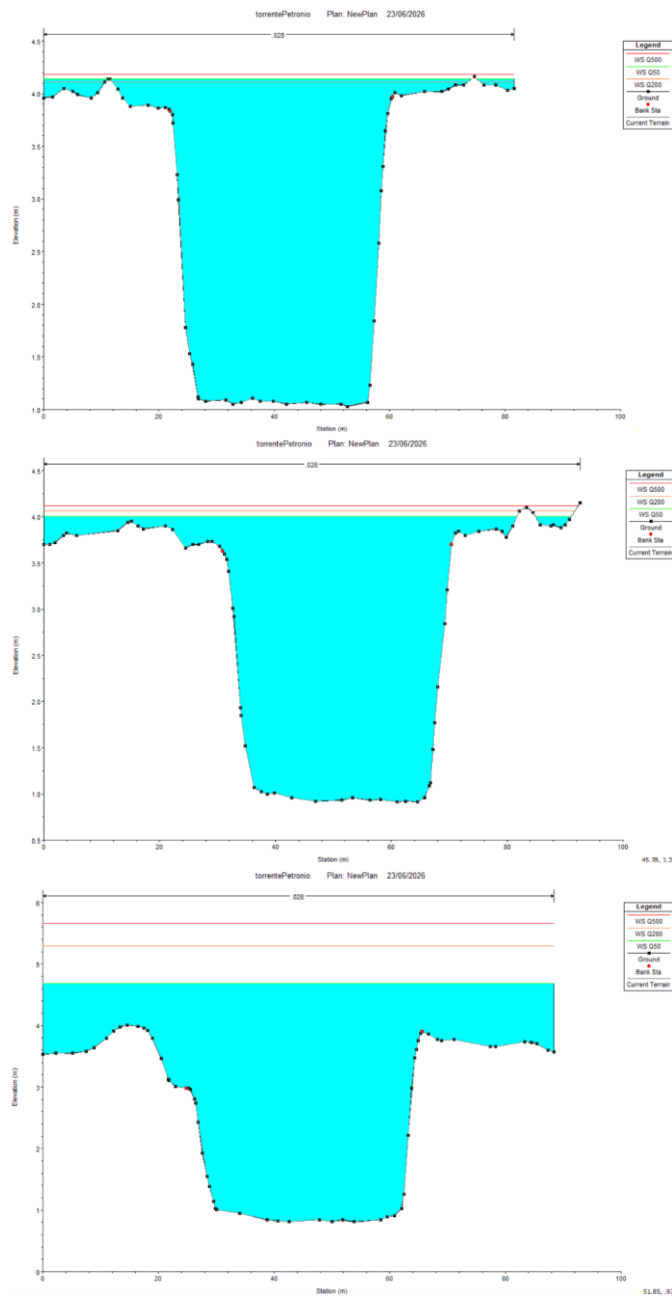


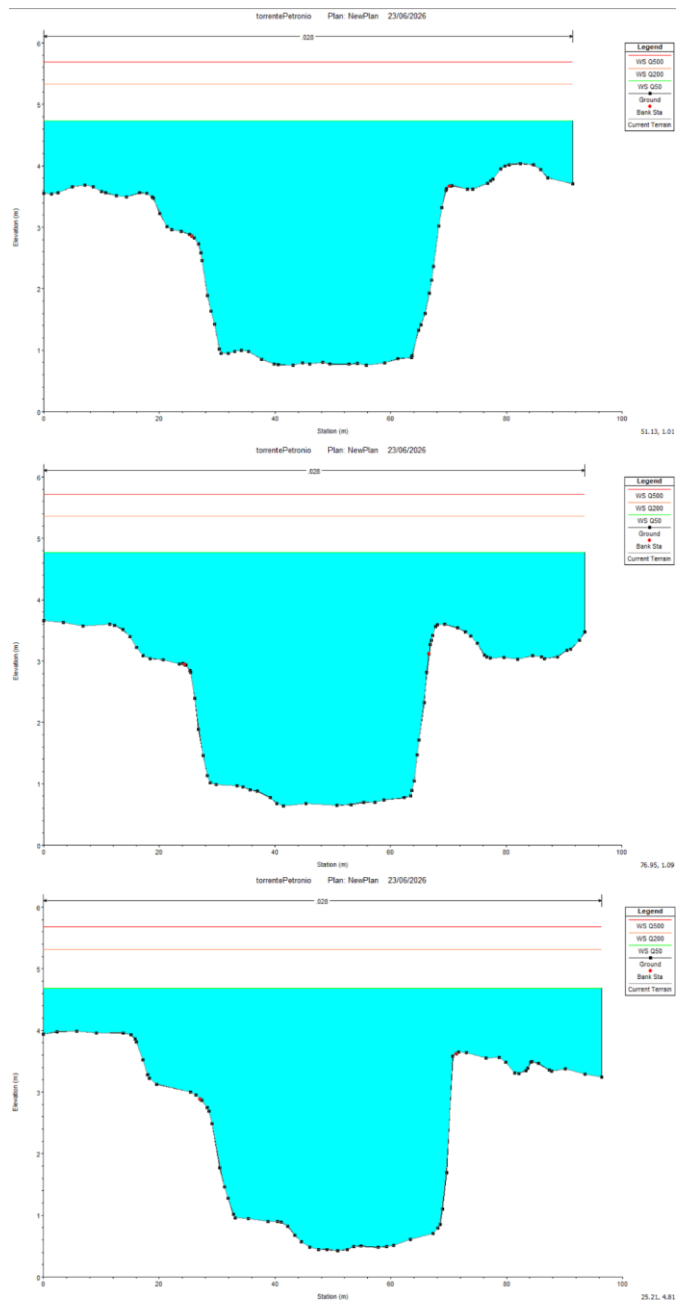


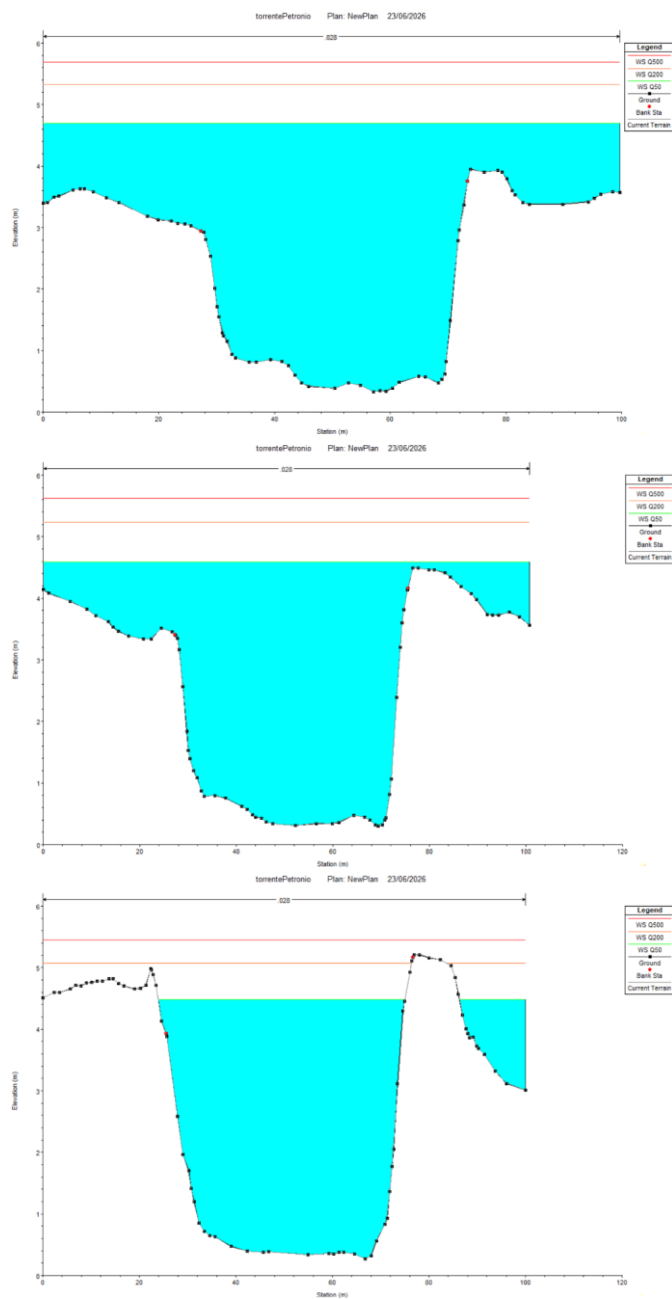


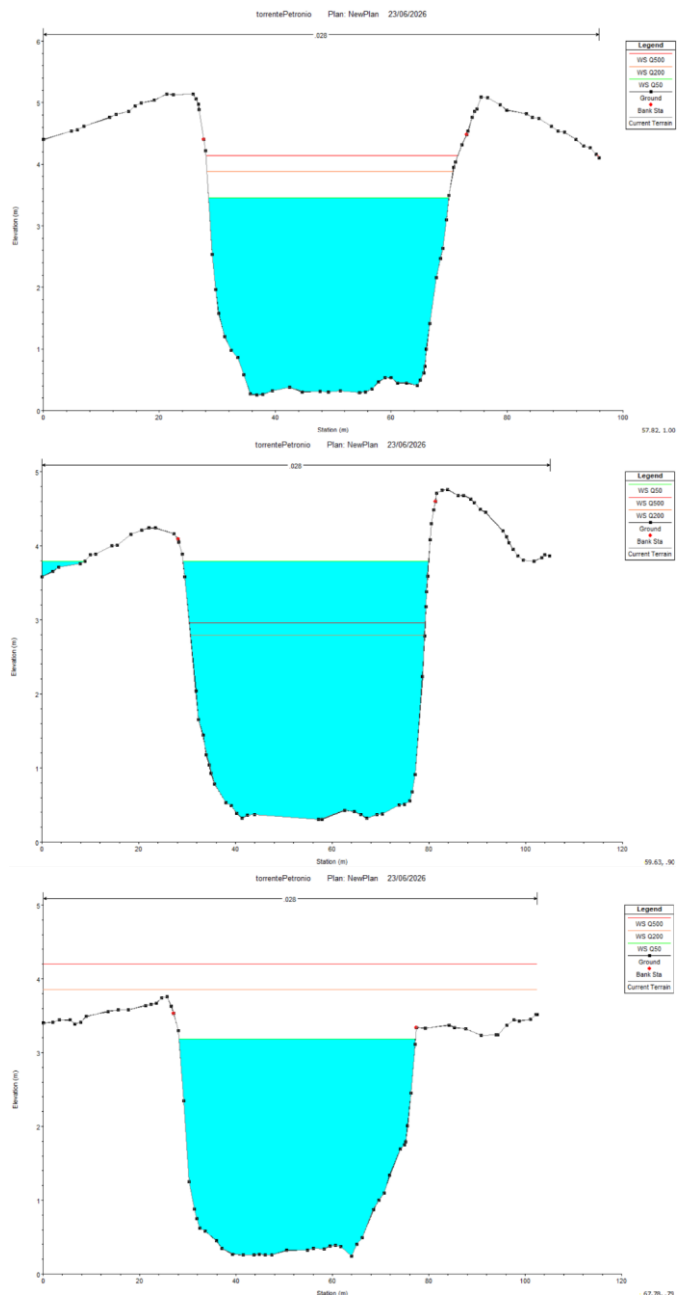
67.24, 4.39











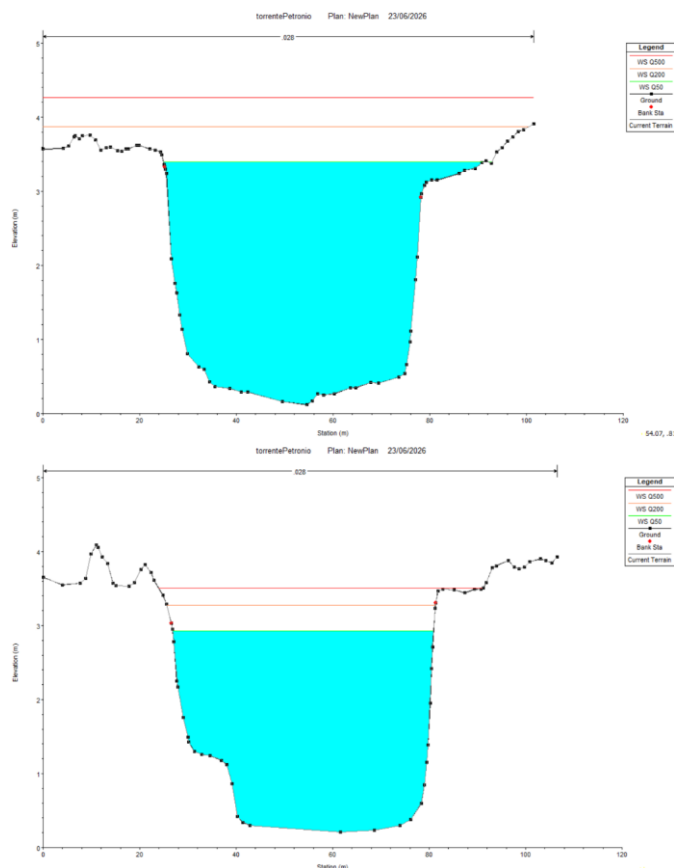


Fig. 7.8 Rappresentazione delle sezioni del profilo del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio per Q50 (verde), Q200 (arancione) e Q500 (rosso) (HEC-RAS).

Infine, i risultati geometrici delle quote idriche calcolate sono stati rielaborati mediante il modulo *RAS Mapper*. Sfruttando l'algoritmo di interpolazione spaziale del software e il *Terrain* di supporto, sono stati generati i layer raster delle mappe di inondazione 1D per ciascuna delle tre portate simulate (Q50, Q200, Q500). Questi file raster contengono le perimetrazioni geometriche dell'allagamento e i relativi tiranti idrici. I layer così prodotti costituiscono l'output fondamentale della modellazione monodimensionale e l'input per l'applicazione del plugin Flood2B su QGIS per la valutazione dei danni economici e strutturali degli edifici coinvolti.

Nelle Fig. 7.9, 7.10 e 7.11 è possibile osservare le mappe con i tiranti idrici per le tre portate considerate (Q50, Q200 e Q500).

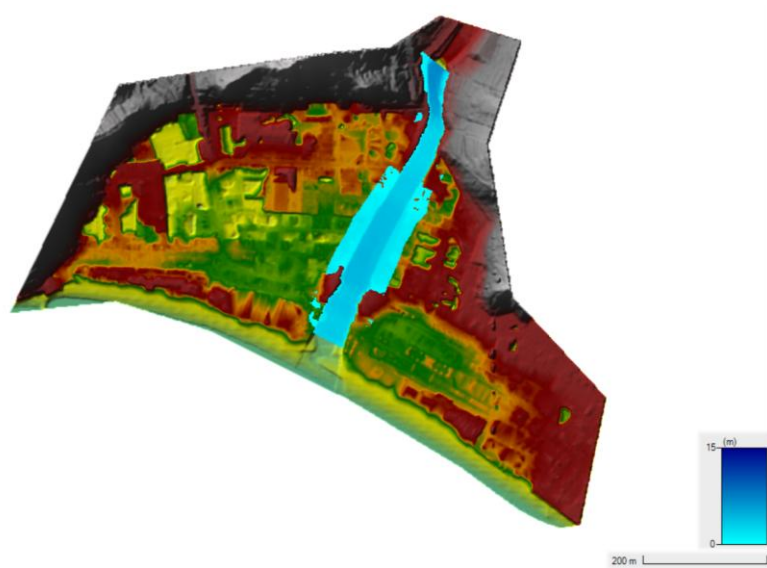


Fig. 7.9 Rappresentazione della mappa di inondazione relativa alla portata Q_{50} (HEC-RAS).

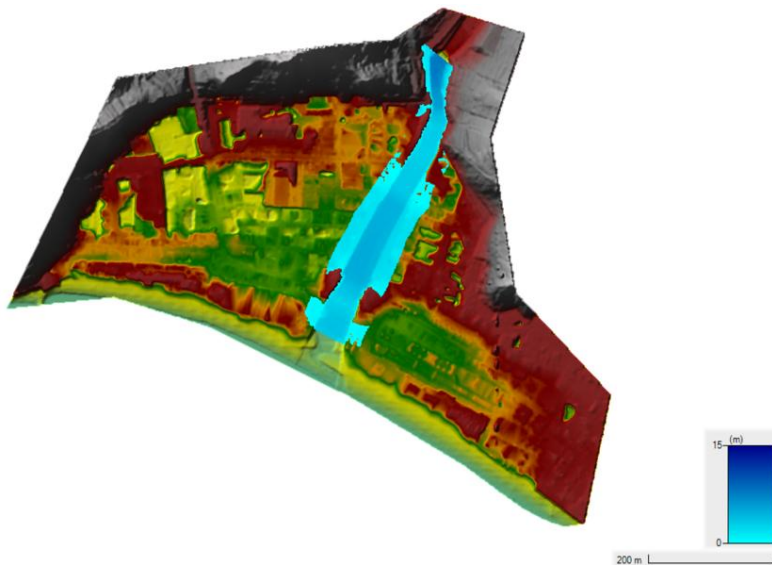


Fig. 7.10 Rappresentazione della mappa di inondazione relativa alla portata Q_{200} (HEC-RAS).

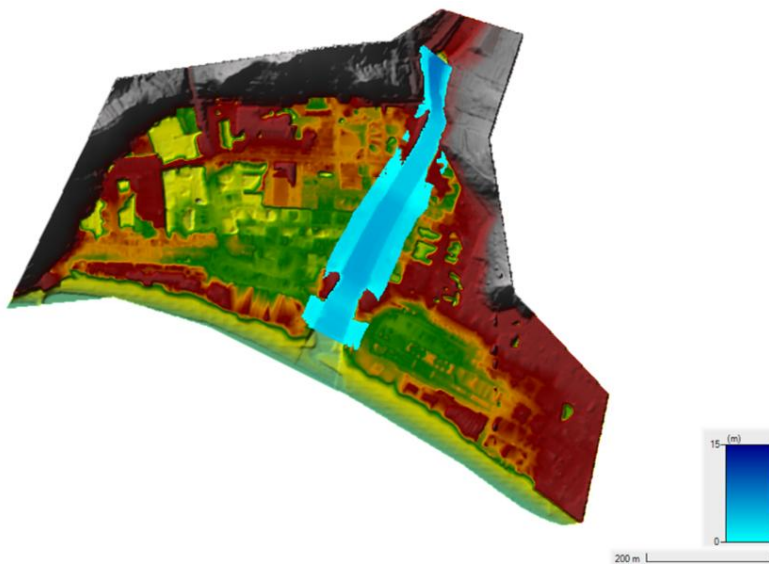


Fig. 7.11 Rappresentazione della mappa di inondazione relativa alla portata Q_{500} (HEC-RAS).

7.4. Risultati del processo 1D dello stato di fatto con il plugin FloodD2B

Le mappe ottenute dalla modellazione monodimensionale in HEC-RAS, relative ai battenti idrici per i tre tempi di ritorno simulati (Q_{50} , Q_{200} e Q_{500}), sono state successivamente importate all'interno del software QGIS. Questa transizione dall'ambiente di calcolo idraulico a quello geospaziale si è resa necessaria per poter elaborare i dati attraverso il plugin FloodD2B, per stimare la vulnerabilità e la quantificazione del danno economico subito dagli edifici soggetti a inondazione. È stato inoltre operato un confronto tra i risultati della modellazione 1D qui sviluppata e il layer ufficiale messo a disposizione dal Geoportale della Regione Liguria. Tale confronto è guidato da una chiara consapevolezza delle eterogeneità metodologiche intrinseche ai due approcci, le quali precludono una perfetta sovrapponibilità delle mappe.

Nello specifico, la non totale corrispondenza tra le mappe di inondazione risultanti è da attribuirsi a diversi fattori, quali:

- approccio modellistico (1D vs 2D): il più significativo elemento di discontinuità risiede nel fatto che il layer regionale deriva da studi condotti mediante analisi bidimensionali (2D), in grado di simulare l'espansione e il comportamento idrodinamico del flusso nello spazio del piano (particolarmente rilevante nel tratto terminale e costiero di Riva Trigoso). Al contrario, il primo scenario qui analizzato si basa su una schematizzazione monodimensionale (1D), che, per definizione, vincola il flusso lungo direzioni predeterminate e ortogonali alle sezioni trasversali;
- parametri regionali non noti: un ulteriore margine di incertezza deriva dall'irreperibilità di

informazioni circa le specifiche impostazioni del modello di calcolo da cui derivano le mappe presenti sul Geoportale Regionale. Informazioni cruciali quali il software idraulico utilizzato dall'Ente regionale, la precisa localizzazione e tipologia delle condizioni al contorno (sia a monte sia a valle), nonché i criteri di calibrazione adottati non sono rese note;

- risoluzione e origine della geometria: come precedentemente evidenziato, le mappe regionali beneficiano di geometrie d'alveo derivanti da rilievi topografici di dettaglio e sezioni mirate, mentre il presente studio adotta un DTM da scansione laser, il quale risente inevitabilmente di specifiche approssimazioni nella ricostruzione geometrica dell'alveo inciso, avendo una risoluzione spaziale (dimensione della cella) pari a 1 m. Nella Fig. 7.12 si evidenzia il confronto tra l'area di coincidenza tra i modelli (in viola) lungo l'alveo inciso e le sponde principali. In giallo è rappresentata l'area inondata esclusivamente dallo studio 2D della Regione Liguria. In blu sono evidenziate le limitate aree allagate solo dallo studio idraulico 1D basato su DTM da scansione laser. L'immagine di confronto è esplicativa per solo l'estensione riferita a T50.

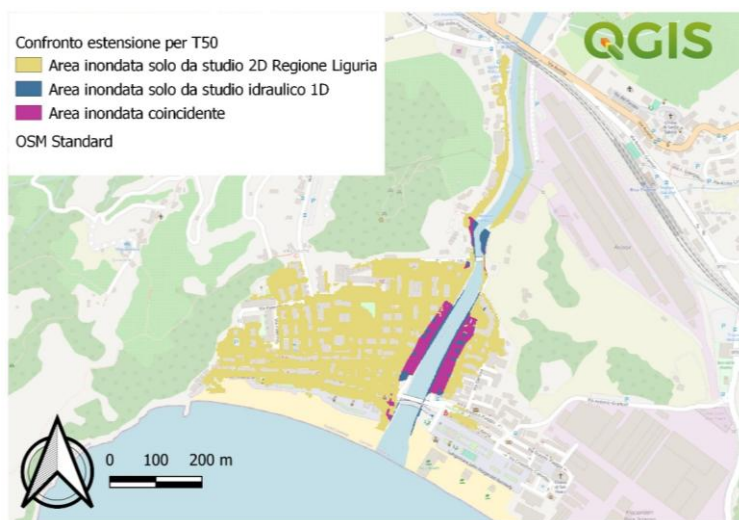


Fig. 7.12 Mapa comparativa delle estensioni di inondazione per lo scenario con periodo di ritorno 50 anni (QGIS).

A integrazione del confronto grafico per lo scenario con periodo di ritorno a 50 anni riportato in Fig. 7.12, si forniscono di seguito i dati quantitativi relativi alle estensioni delle superfici di inondazione calcolate in ambiente QGIS:

- area comune di inondazione (area coincidente tra lo studio 1D e la cartografia regionale): 0,008738 km² (pari a 8.738,43 m²);
- area inondata presente solo sulla cartografia regionale: 0,104349 km² (pari a 104.349,00 m²);
- area inondata presente solo nella mappa dello studio idraulico 1D: 0,004576 km² (pari a 4.575,71 m²).

Nella Fig. 7.13 si può osservare a titolo di esempio la mappa delle differenze di battente idrico per lo scenario a 50 anni di tempo di ritorno, ottenuta sottraendo il battente dello studio 2D regionale da quello del modello 1D. Le tonalità violacee evidenziano le aree in cui il presente studio sottostima l'altezza dell'acqua o non rileva l'allagamento. Al contrario, le tonalità verdi indicano i punti, localizzati prevalentemente a ridosso delle sponde e delle sezioni d'alveo a monte, in cui il modello basato su DTM sovrastima il livello idrico rispetto ai rilievi topografici di dettaglio regionali.

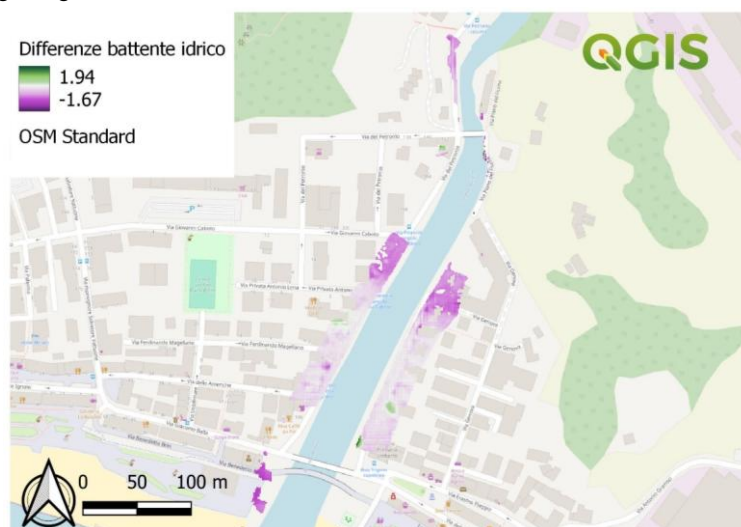


Fig. 7.13 Mappa delle differenze di battente idrico per lo scenario a 50 anni di ritorno localizzate nell'area di inondazione comune (QGIS).

In questo contesto, l'applicazione del plugin FloodD2B sulle mappe 1D generate ha assunto un ruolo metodologico fondamentale, permettendo di quantificare l'impatto economico e la vulnerabilità del tessuto edificato nello scenario pre-intervento, e fornendo una base quantitativa per stimare il "margine di scostamento" tra approccio 1D e 2D. Tale evidenza formale funge da presupposto tecnico e giustificazione scientifica per il passaggio successivo della tesi, incentrato sullo sviluppo di un'analisi idraulica 2D atta a superare i limiti intrinseci del modello 1D.

Nei paragrafi che seguono vengono presentati e discussi i risultati cartografici e numerici ottenuti tramite FloodD2B, analizzando la distribuzione spaziale dei battenti e la conseguente stima dei danni agli elementi esposti per i tre scenari di piena esaminati.

7.4.1. Layer "Battenti" derivante da analisi 1D con il software HEC-RAS

Per la valutazione della vulnerabilità del tessuto urbano di Riva Trigoso, è stata condotta un'analisi spaziale dei dati idraulici relativi al torrente Petronio.

L'area di studio si concentra sulla zona della foce, caratterizzata da un'elevata densità abitativa e, di conseguenza, da un potenziale alto rischio idraulico.

Il requisito fondamentale per l'utilizzo del plugin FloodD2B è la disponibilità di una mappa di inondazione in formato raster, in cui ogni cella esprima il valore del battente idrico.

Il processo di realizzazione della *floodMap* è stato il seguente:

- importazione delle mappe derivanti dai risultati del processo di calcolo idraulico per le tre portate considerate: è stata mantenuta la coerenza di sistema di riferimento, garantendo che la risoluzione della cella (1 m);
- applicazione di una scala cromatica pseudo-colore a banda singola, basata sulle tonalità del blu per una agevole interpretazione visiva dei gradienti di profondità. Le tonalità più chiare sono state associate a battenti di modesta entità, mentre le tonalità progressivamente più scure indicano una profondità dell'acqua crescente.

Questo processo è stato applicato uniformemente ai tre scenari (T50, T200, T500), permettendo un confronto visivo immediato dell'estensione dell'area inondata e del tirante idrico raggiunto in corrispondenza dei singoli edifici monitorati.

I risultati ottenuti per i diversi periodi di ritorno sono mostrati nelle Fig. 7.14, 7.15, 7.16, rispettivamente per T50, T200 e T500.



Fig. 7.14 Layer “Battenti da studio idraulico 1D pre-interventi su HEC-RAS” del torrente Petronio per T50 (QGIS).



Fig. 7.15 Layer “Battenti da studio idraulico 1D pre-interventi su HEC-RAS” del torrente Petronio per T200 (QGIS).



Fig. 7.16 Layer “Battenti da studio idraulico 1D pre-interventi su HEC-RAS” del torrente Petronio per T500 (QGIS).

7.4.2. Layer vettoriale “Edificato”

Si è utilizzato il layer “Edificato” presente sul Portale Cartografico della Regione Liguria, per il quale si è resa necessaria un’operazione di filtraggio per isolare gli edifici interagenti con il dominio idraulico oggetto di studio.

Il processo di estrazione è stato eseguito attraverso i seguenti passaggi tecnici:

- calcolo delle “statistiche zonali”: è stata eseguita una sovrapposizione spaziale tra il layer degli edifici e il raster della batimetria per i diversi periodi di ritorno. Utilizzando lo strumento di *statistiche zonali*, è stata calcolata la media dei valori di battente idrico per ogni edificio;
- filtro sulla tabella degli attributi: questo passaggio è stato fondamentale per prevenire errori di esecuzione del plugin, che, in presenza di edifici situati in zone prive di dati, tende a creare colonne vuote o a interrompere il calcolo;
- query di estrazione: è stato applicato un filtro booleano basato sulla condizione: $\text{Media} > 0$. Tale operazione ha permesso di estrarre e salvare in un nuovo layer solo gli edifici effettivamente ricadenti nell’area coinvolta dall’inondazione, ovvero quelli per i quali è disponibile un valore di battente e velocità maggiore di zero, garantendo così la consistenza del dataset per le analisi successive.

Il risultato di questa operazione è presente nelle Fig. 7.17, 7.18, 7.19, relative ai tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

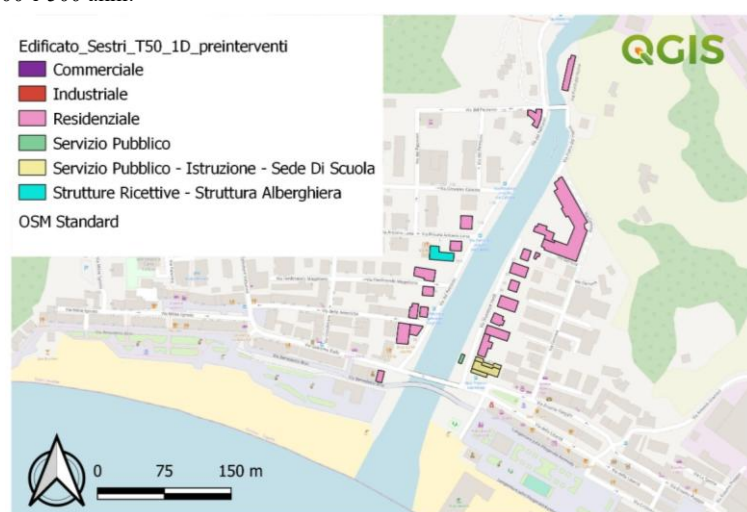


Fig. 7.17 Classi d'uso del layer raster “Edificato” in area inondabile T50 riferito alla situazione pre-interventi (QGIS).



Fig. 7.18 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile riferito alla situazione pre-interventi per T200 (QGIS).

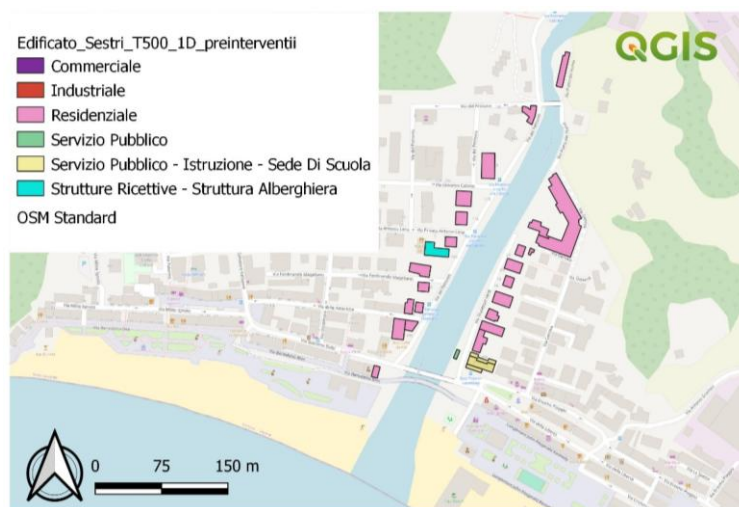


Fig. 7.19 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile riferito alla situazione pre-interventi per T500 (QGIS).

7.4.3. Metodologia di stima del danno tramite il plugin FloodD2B

Il plugin FloodD2B, implementato in ambiente QGIS, permette di automatizzare l'associazione tra i parametri idraulici dell'evento alluvionale e il danno potenziale subito da ogni singola unità edilizia.

La fase cruciale della procedura consiste nell'associare correttamente un valore di battente idrico a ciascun edificio, considerando che le mappe dei battenti idrici spesso presentano valori "No data" in corrispondenza del sedime degli edifici qualora questi siano stati modellati come ostacoli al flusso.

In questo studio è stato adottato il primo metodo previsto dal plugin, che prevede il campionamento del battente idrico direttamente in corrispondenza del centroide geometrico di ciascun edificio.

Il processo automatizzato nel plugin è articolato nelle seguenti fasi:

- correzione geometrica e generazione dei centroidi: lo shapefile poligonale degli edifici viene elaborato tramite l'algoritmo "*Fix geometries*" per correggere eventuali anomalie topologiche del file vettoriale. Successivamente, viene applicato l'algoritmo "*Centroids*" per generare un layer di punti in cui ogni punto corrisponde al centro geometrico del rispettivo fabbricato, ereditandone tutti gli attributi;
- campionamento dei valori raster: utilizzando l'algoritmo di campionamento dei valori raster ("*Sample raster values*"), il plugin estrae il valore numerico del pixel della mappa di allagamento che si trova in corrispondenza del centroide di ciascun edificio. Tale valore puntuale viene quindi assunto come tirante idrico di riferimento per l'intera struttura.

Questo approccio risulta ideale quando si dispone di mappe di allagamento "complete", ovvero raster continui che coprono interamente l'area di studio, senza lacune o zone d'ombra in corrispondenza del sedime dei fabbricati. Esso consente un'associazione dell'altezza d'acqua all'edificio diretta e rapida dal punto di vista computazionale, evitando di ricorrere a operazioni preventive di interpolazione spaziale (come TIN o IDW), che potrebbero introdurre incertezze o alterazioni nella stima del tirante idrico reale.

Di seguito si possono osservare le impostazioni relative al plugin per i tre periodi di ritorno considerati, nelle Fig. 7.20, 7.21 e 7.22.

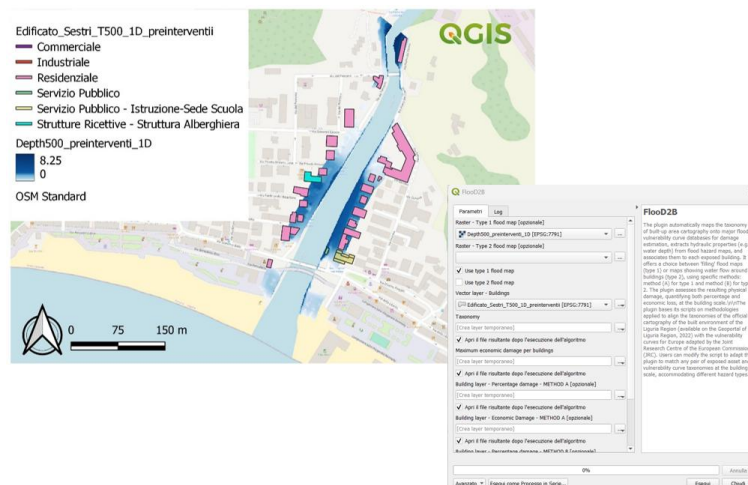


Fig. 7.22 FloodD2B per T500 pre-interventi (QGIS).

Al termine del processo di calcolo, il plugin restituisce quattro layer vettoriali che integrano i risultati della stima: profondità media, percentuale di danno e danno economico in €. Di seguito si riportano maggiori dettagli sui file di output:

- layer puntuali (due file): contengono le informazioni di danno associate ai centroidi degli edifici. Sono strumenti ideali per analisi puramente statistiche o per la gestione di database numerici, in quanto offrono una struttura dati semplificata;
- layer poligonali (due file): questi layer mantengono la geometria originale della sagoma dell'edificio.

Ai fini della restituzione cartografica nella presente tesi, sono stati privilegiati i layer poligonali. Questi permettono una visualizzazione spaziale immediata e intuitiva del rischio a scala urbana, consentendo di tematizzare l'intero edificio in base alle classi di danno definite (da “Nessun danno” a “Danno molto elevato”). Ciò garantisce una rappresentazione visivamente coerente con l'area effettivamente occupata dalle strutture nel tessuto urbanizzato, come si può osservare dalle seguenti immagini Fig. 7.23, 7.24, 7.25, 7.26, 7.27 e 7.28.

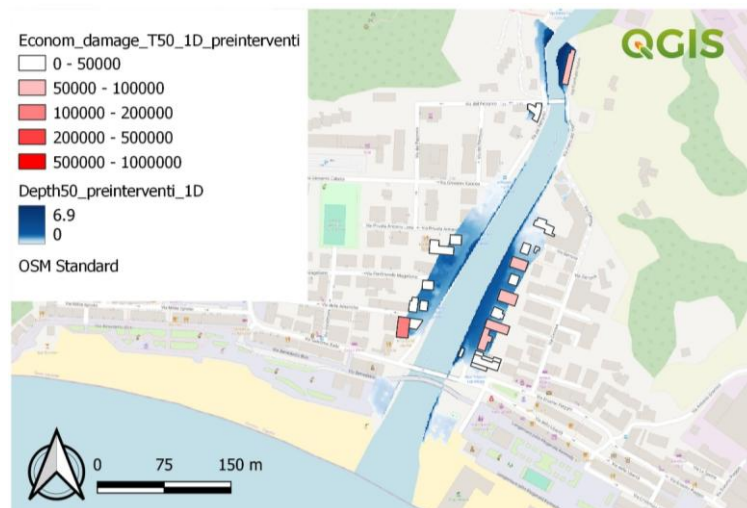


Fig. 7.23 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T50 (pre-interventi) in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

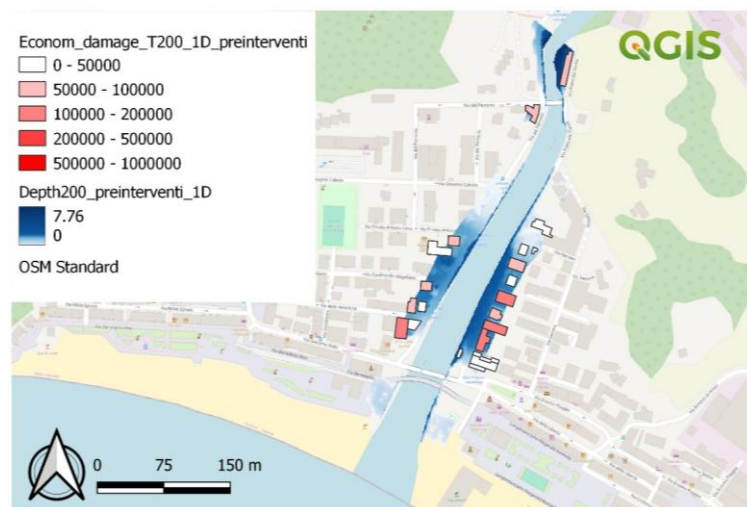


Fig. 7.24 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T200 (pre-interventi) in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

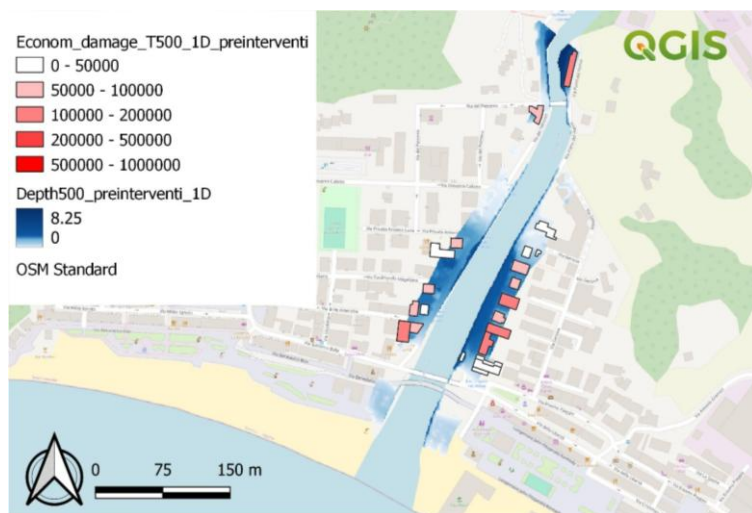


Fig. 7.25 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T500 (pre-interventi) in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

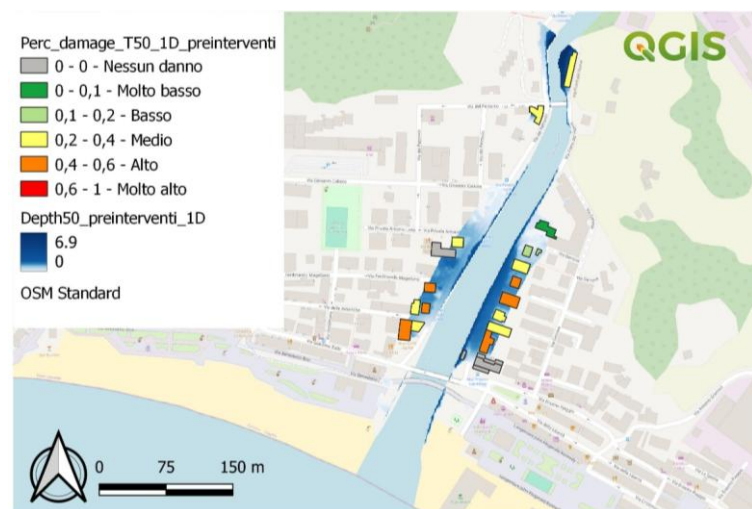


Fig. 7.26 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T50 pre-interventi (QGIS).

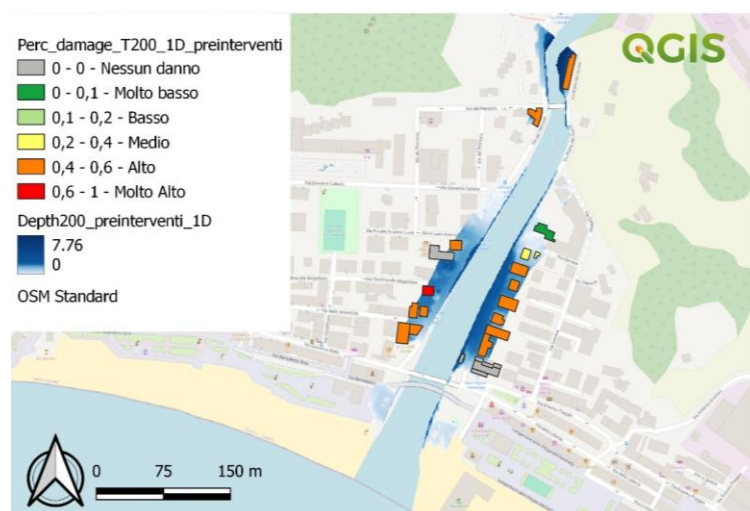


Fig. 7.27 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T200 pre-interventi (QGIS).

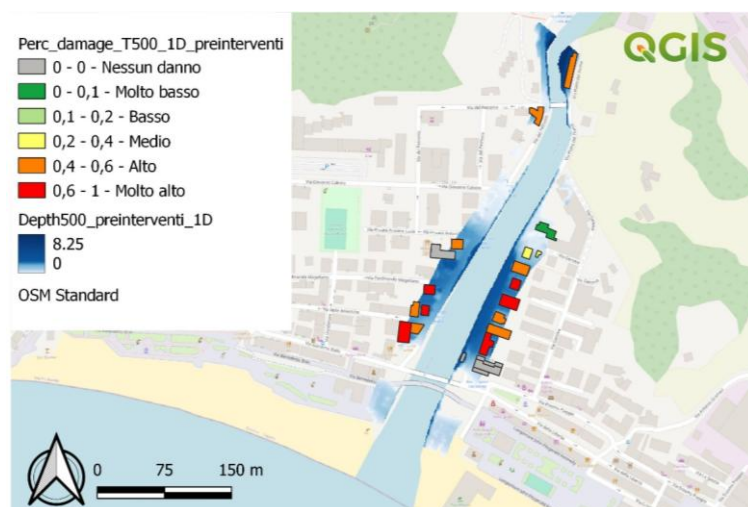


Fig. 7.28 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T500 pre-interventi (QGIS).

7.5. Analisi idraulica 1D dello stato di progetto su HEC-RAS

Validata la configurazione geometrica e idraulica dello stato di fatto (pre-intervento), la fase successiva della ricerca ha riguardato l'implementazione delle modifiche geometriche d'alveo derivanti dalle scelte progettuali di mitigazione del rischio idraulico precedentemente delineate all'interno del software HEC-RAS. L'obiettivo è simulare la risposta idrodinamica del tratto focivo del torrente Petronio a seguito della realizzazione di opere strutturali combinate, atte a incrementare la capacità di deflusso e a contenere le portate di piena all'interno delle sezioni d'alveo.

Il punto di partenza della modellazione post-intervento è rappresentato dal file geometrico precedentemente costruito e validato per l'analisi pre-intervento. Su questa base geometrica, si è proceduto all'applicazione di due principali tipologie di intervento strutturale: la riprofilatura morfologica del fondo dell'alveo e l'inserimento di arginature longitudinali di progetto (*levees*).

7.5.1. Riprofilatura del fondo alveo

Tale operazione ha riguardato l'ottimizzazione della pendenza longitudinale del torrente nel tratto d'analisi. Al fine di rimuovere le irregolarità geometriche locali e i depositi sedimentari macroscopici che ostacolavano il regolare deflusso della corrente, si è proceduto alla riprofilatura dell'alveo.

L'operazione è stata condotta in maniera sequenziale, sezione per sezione (*Cross Section*), agendo tramite l'editor geometrico di HEC-RAS. Come primo passo, per ciascuna sezione trasversale, tutti i punti costituenti il letto del torrente sono stati abbassati fino a raggiungere la quota minima della sezione stessa, eliminando così le barre di sedimenti e i punti di accumulo locali. Successivamente, è stato eseguito un controllo rigoroso lungo l'asse longitudinale dell'asta fluviale, procedendo da monte verso valle, per verificare che la successione delle quote minime del fondo seguisse un andamento decrescente. Nei tratti in cui la topografia originaria mostrava contropendenze o anomalie geometriche, si è intervenuti con un'ulteriore riprofilatura e scavo del fondo, in modo da garantire un profilo longitudinale a pendenza decrescente (seppur in modo non lineare) verso la sezione di foce, ottimizzando così la capacità di convogliamento dell'acqua nel canale, esattamente come si può osservare nella Fig. 7.29.

Nella Fig. 7.30 è invece possibile osservare i due profili del fondo alveo messi a confronto, dove di colore blu è rappresentato il profilo pre-interventi, mentre in magenta quello post-interventi.

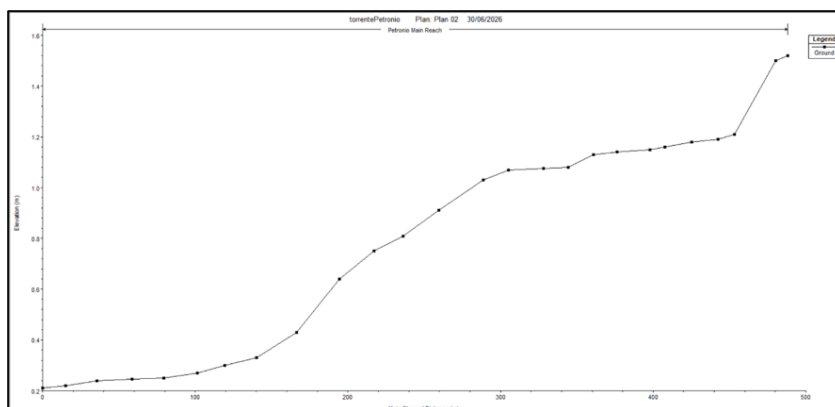


Fig. 7.29 Rappresentazione del profilo del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio post operazione di riprofilatura (HEC-RAS).

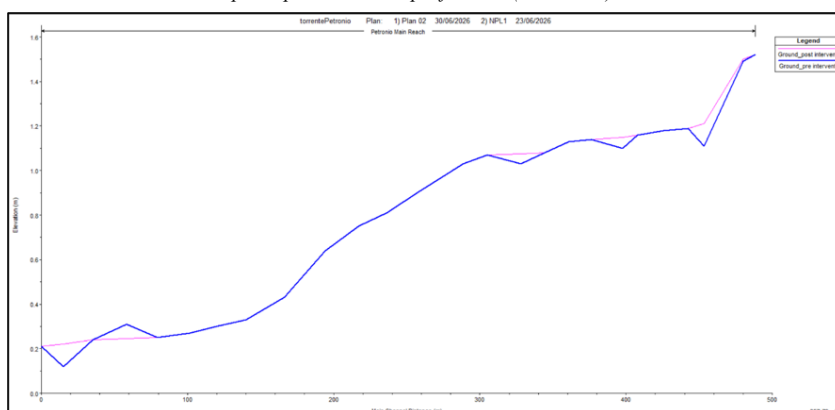


Fig. 7.30 Rappresentazione dei profili del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio a confronto: pre-interventi (blu) e post-interventi (magenta) (HEC-RAS).

Dall'analisi statistica del confronto tra i profili del fondo alveo pre e post-intervento (come si può osservare dai valori in Tab. 7.1), emerge che le modifiche geometriche apportate sono estremamente contenute e regolari. La differenza media delle quote è di circa 1 cm, a dimostrazione del fatto che l'intervento non altera l'equilibrio complessivo delle quote del tratto. Il picco massimo di scavo/riporto si attesta a 10 cm localizzato. Infine, il basso valore della deviazione standard, pari a soli 3.2 cm, conferma l'elevata omogeneità e gradualità della riprofilatura, che evita la formazione di discontinuità o dislivelli localizzati nel fondo alveo. I risultati di tale confronto si possono osservare nella Tab. 7.2.

River Sta	Min Ch El (preinterventi)	Min Ch El (postinterventi)
519	1.52	1.52
511	1.49	1.5
484	1.11	1.21
473	1.19	1.19
456	1.18	1.18
438	1.16	1.16
428	1.1	1.15
407	1.14	1.14
392	1.13	1.13
375	1.08	1.08
359	1.03	1.08
336	1.07	1.07
319	1.03	1.03
290	0.91	0.91
267	0.81	0.81
248	0.75	0.75
225	0.64	0.64
197	0.43	0.43
171	0.33	0.33
150	0.3	0.3
132	0.27	0.27
110	0.25	0.25
89	0.31	0.25
66	0.24	0.24
46	0.12	0.22
31	0.21	0.21

Tab. 7.1 Analisi comparativa delle quote minime del fondo alveo dello stato pre-intervento e post-intervento estratte dal modello idraulico (EXCEL).

massimo scavo/riporto	0.1
differenza media	0.009615385
deviazione standard	0.032432178

Tab. 7.2 Indicatori sintetici (valore massimo, media e deviazione standard) relativi alle variazioni altimetriche del fondo alveo (EXCEL).

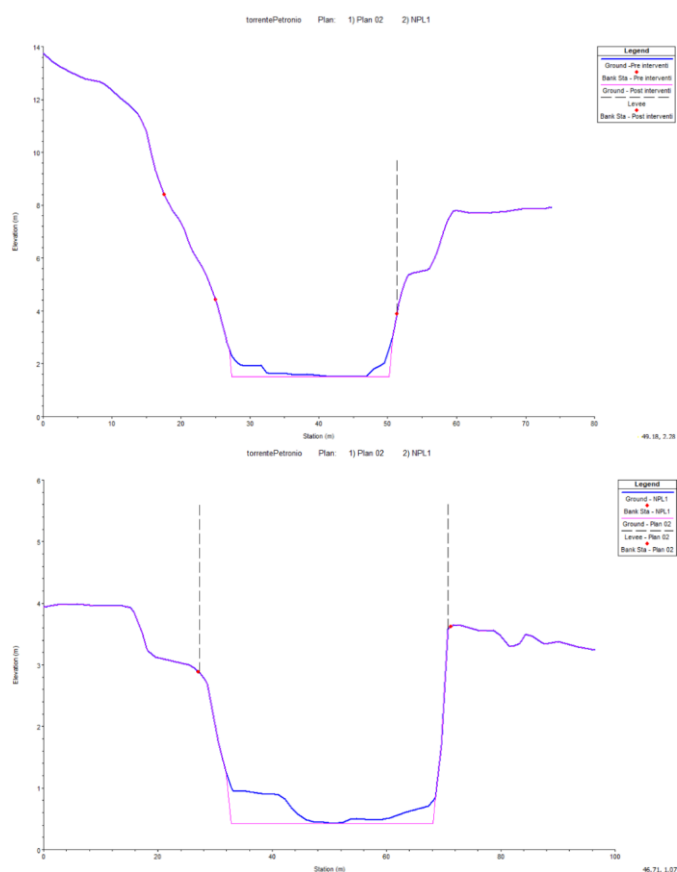
7.5.2. Inserimento delle arginature (levees)

Completata la sistemazione del fondo alveo, l'analisi dei profili di pelo libero ha evidenziato la necessità di contenere i franchi di esondazione nelle aree a maggiore pressione antropica. Si è proceduto pertanto all'inserimento dell'elemento geometrico *levees* all'interno delle *cross section* idrauliche.

La disposizione e l'altezza di tali arginature di progetto sono state stabilite sulla base dello scenario idrologico di riferimento per la progettazione delle opere di difesa, ovvero la portata con tempo di ritorno pari a 200 anni ($Q_{200} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$). Le *levees* sono state inserite in tutte le

sezioni trasversali in cui il profilo del pelo libero calcolato per la Q200 nello stato di fatto superava la quota delle arginature o delle sponde esistenti, provocando l'esondazione del flusso verso il sedime urbano circostante.

In piena conformità con il quadro normativo italiano in materia di opere idrauliche e pianificazione di bacino (D.Lgs. 152/2006 e relative direttive tecniche dell'Autorità di Bacino Distrettuale), la quota di sommità arginale di progetto è stata determinata applicando un franco di sicurezza geometrico pari a 50 cm. Tale franco è stato sommato direttamente alla quota massima raggiunta dal pelo libero della corrente in corrispondenza del colmo di piena per lo scenario Q200. Questa impostazione assicura il confinamento idraulico della portata di progetto all'interno dell'alveo, minimizzando il rischio di sormonto e tenendo conto delle incertezze intrinseche alla modellazione numerica (es. onde d'oscillazione, trasporto solido localizzato, ...). Nella Fig. 7.31 è possibile osservare qualcuna delle sezioni trasversali a titolo di esempio messe a confronto tra pre e post interventi di mitigazione del rischio inondazione da monte verso valle.



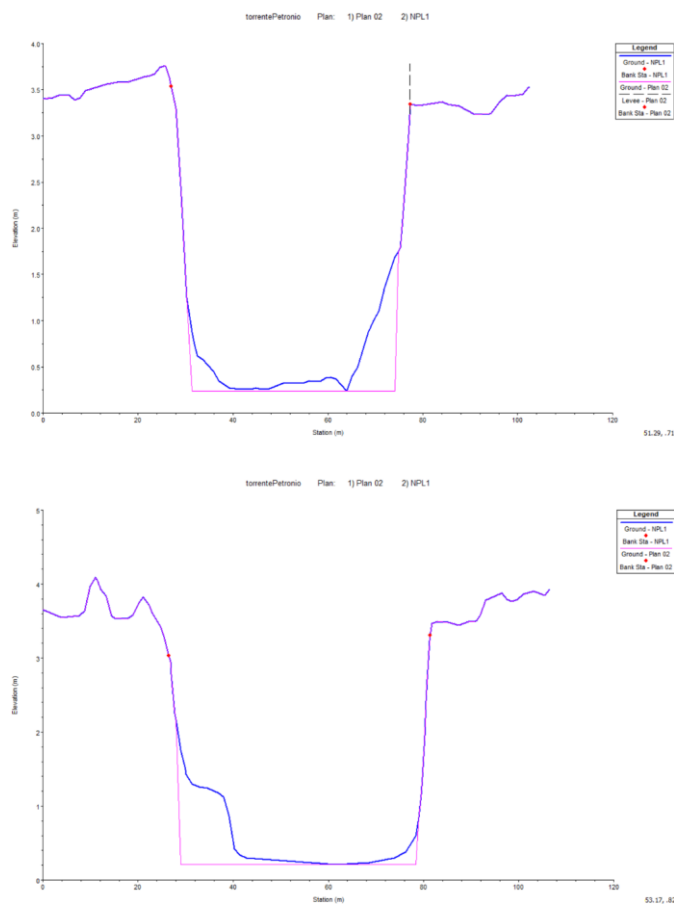


Fig. 7.31 Rappresentazione delle sezioni del profilo del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio a confronto: pre-interventi (blu) e post-interventi (magenta) (HEC-RAS).

L'analisi statistica estesa a tutte le sezioni modellate (Tab. 7.3) evidenzia in modo oggettivo il comportamento idraulico indotto dagli interventi per i tre scenari di portata (Q50, Q200, Q500). In merito ai livelli idrici ($\Delta W.S. Elevazione$), si riscontra un beneficio diffuso per l'evento con tempo di ritorno più basso (Q50), con un abbassamento medio del pelo libero di 15.9 cm. Per gli eventi più gravosi (Q200 e Q500), l'incremento localizzato dei livelli massimi (fino a +1.73 m) indica un efficace confinamento delle portate di picco entro la nuova geometria d'alveo.

Il comportamento geometrico dei flussi è chiarito dai parametri di $\Delta Flow Area$ e $\Delta Top Width$: le medie complessive leggermente negative, contrapposte a picchi massimi di incremento estremamente rilevanti, fino a +162.09 cm² di area bagnata e +37.08 m di larghezza dello

specchio d'acqua per la Q200, dimostrano numericamente che l'opera consiste in una ricalibratura puntuale e mirata del corso d'acqua. L'adeguamento della sezione ha creato ampie zone di espansione localizzate in grado di laminare e accogliere i colmi di piena, ottimizzando al contempo l'efficienza idraulica del resto del tratto.

	Δ W.S ELEVAZIONE	Δ FLOW AREA	Δ TOP WIDTH
MEDIA Q50	-0.159	-16.813	-16.413
MASSIMO Q50	1.020	95.820	4.750
DEVIAZIONE STANDARD Q50	0.488	40.614	21.695
MEDIA Q200	0.061	-11.181	-15.205
MASSIMO Q200	1.670	157.090	37.080
DEVIAZIONE STANDARD Q200	0.747	74.437	27.627
MEDIA Q500	0.115	-4.748	-10.920
MASSIMO Q500	1.730	162.090	28.650
DEVIAZIONE STANDARD Q500	0.768	78.192	25.440

Tab. 7.3 Indicatori sintetici delle variazioni dei principali parametri idraulici indotte dagli interventi di mitigazione, calcolate su tutte le sezioni dell'alveo per gli eventi con periodo di ritorno Q50, Q200 e Q500 (EXCEL).

7.6. Simulazione idraulica e restituzione grafica post-intervento

Una volta completata la modifica della geometria d'alveo, è stata eseguita la simulazione idraulica in regime di moto permanente (*Steady Flow Analysis*), mantenendo invariate le portate al colmo (Q50, Q200 e Q500) e le condizioni al contorno (altezza uniforme a monte e altezza critica a valle) utilizzate nella validazione dello stato di fatto.

I risultati numerici così ottenuti sono stati elaborati graficamente per verificare l'assenza di anomalie del pelo libero e validare la stabilità idraulica del modello. Tale analisi ha permesso di constatare la validità fisica delle simulazioni, propedeutica alla successiva estrazione dei dati. È stato generato il nuovo profilo longitudinale del pelo libero per l'intera asta fluviale analizzata, permettendo di visualizzare l'efficacia della riprofilatura e il contenimento della massa fluida all'interno dei nuovi argini di progetto.

Nella Fig. 7.32 è possibile osservare il profilo di rigurgito a seguito della modifica del fondo dell'alveo per le tre portate considerate.

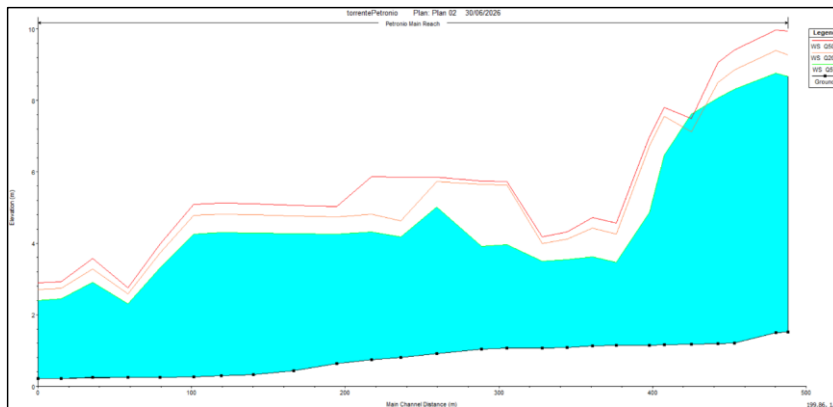


Fig. 7.32 Rappresentazione del profilo del pelo libero del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio post-interventi per Q50 (verde), Q200 (arancione) e Q500 (rosso) (HEC-RAS).

Nelle immagini successive (Fig. 7.33, 7.34 e 7.35) si riportano in ciascuna il profilo pre (arancione) e post-interventi (verde) riferiti alla stessa portata.

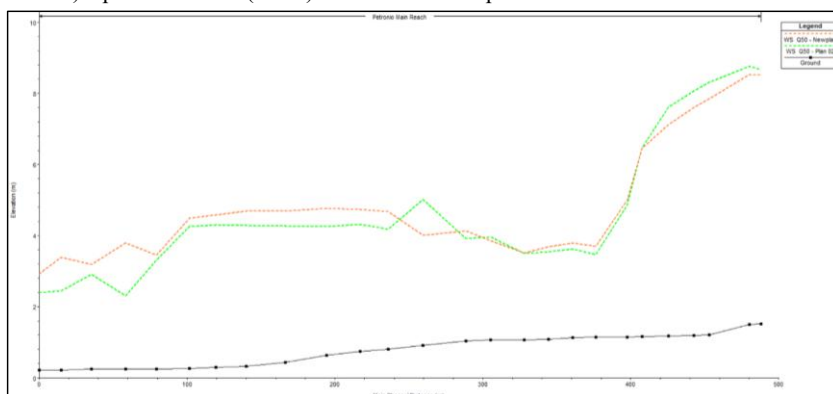


Fig. 7.33 Confronto del profilo del pelo libero del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio post-interventi (verde) e pre-interventi (arancione) per Q50 (HEC-RAS).

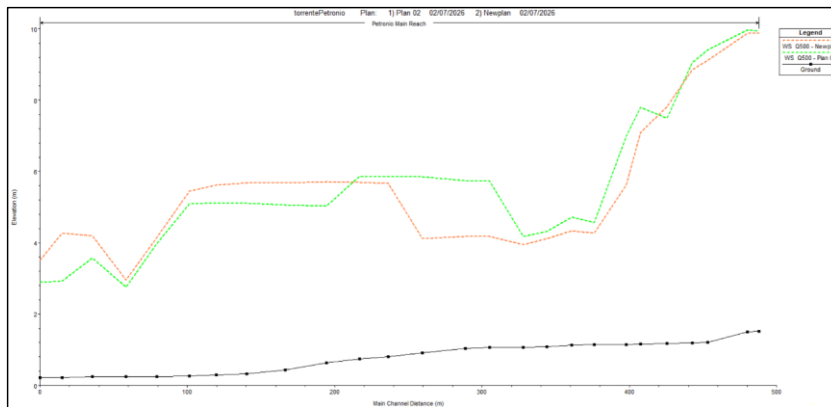


Fig. 7.34 Confronto del profilo del pelo libero del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio post-interventi (verde) e pre-interventi (arancione) per Q200 (HEC-RAS).

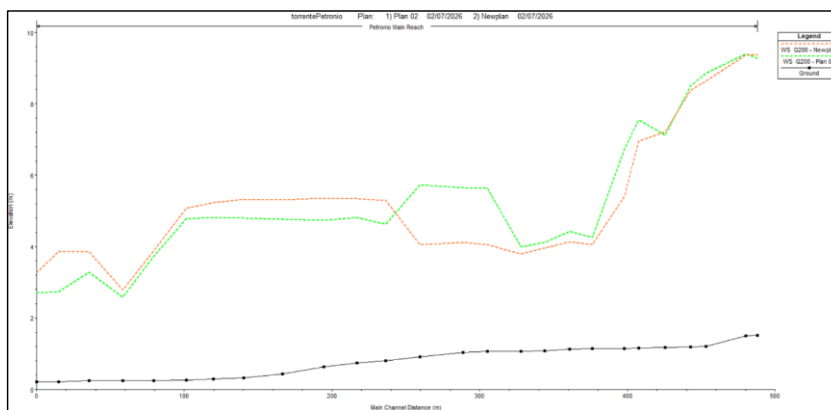


Fig. 7.35 Confronto del profilo del pelo libero del fondo d'alveo del tratto focivo del torrente Petronio post-interventi (verde) e pre-interventi (arancione) per Q500 (HEC-RAS).

Infine, sfruttando l'interoperabilità geospaziale offerta dal modulo *RAS Mapper*, i risultati e le estensioni dei battenti idrici sono stati mappati nello spazio. L'elaborazione all'interno di *RAS Mapper* ha consentito di generare i layer raster dei battenti e delle velocità relativi alle tre portate di progetto per la configurazione post-intervento. Tali mappe di inondabilità documentano la riduzione delle aree esondate all'interno del nucleo urbano di Riva Trigoso, fornendo le informazioni necessarie per la successiva stima del danno economico residuo tramite il plugin Flood2B in ambiente GIS.

Nelle Fig. 7.36, 7.37 e 7.38 è possibile osservare le mappe dei tiranti idrici per le tre portate considerate (Q50, Q200 e Q500).

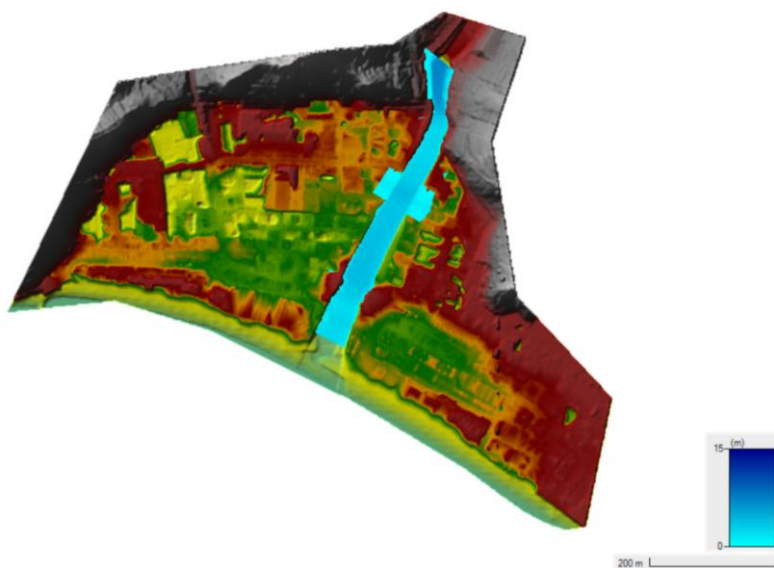


Fig. 7.36 Mappa di inondazione relativa alla portata Q_{50} post-interventi (HEC-RAS).

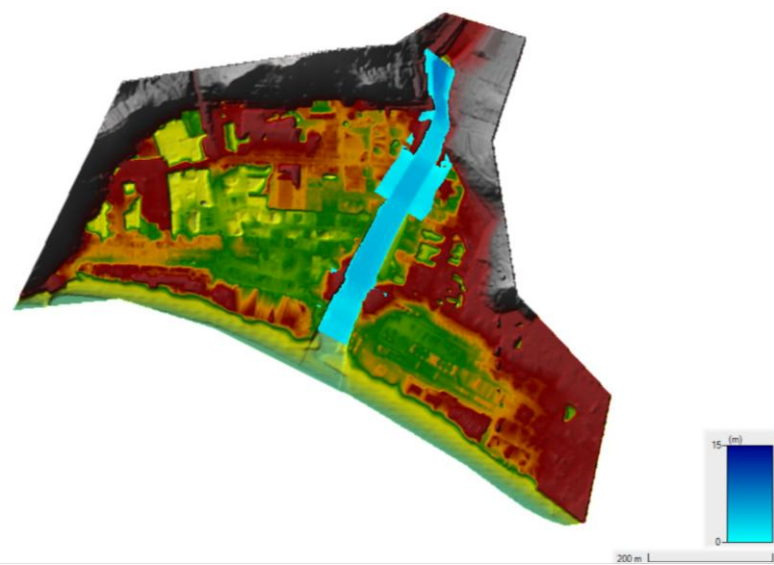


Fig. 7.37 Mappa di inondazione relativa alla portata Q_{200} post-interventi (HEC-RAS).

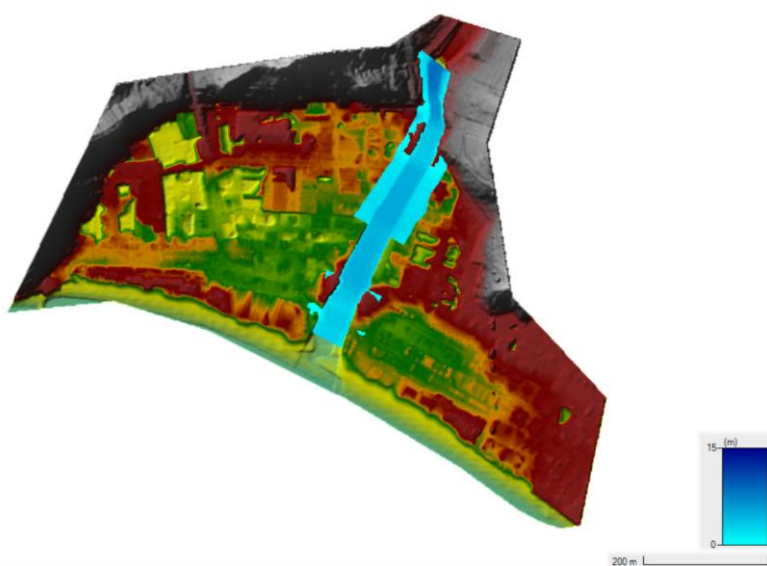


Fig. 7.38 Mappa di inondazione relativa alla portata Q500 post-interventi (HEC-RAS).

7.7. Risultati del processo 1D dello stato di progetto con il plugin Flood2B

Le mappe ottenute dalla modellazione monodimensionale in HEC-RAS post-intervento relativamente ai battenti idrici per i tre tempi di ritorno simulati (Q50, Q200 e Q500) sono state importate all'interno del software QGIS per l'utilizzo del plugin Flood2B, per stimare la vulnerabilità e la quantificazione del danno economico subito dagli edifici soggetti a inondazione.

Nei paragrafi che seguono vengono presentati e discussi i risultati ottenuti tramite Flood2B, analizzando la distribuzione spaziale dei battenti e la conseguente stima dei danni agli elementi esposti per i tre scenari di piena esaminati.

7.7.1. Layer "Battenti" derivante da analisi 1D con il software HEC-RAS

Per valutare l'efficacia delle opere di mitigazione del rischio idraulico nella zona di Riva Trigoso, l'analisi spaziale tramite il plugin Flood2B è stata applicata in questo caso alla configurazione post-interventi dei dati idraulici relativi al torrente Petronio.

Il plugin richiede come input fondamentale una mappa raster di inondazione (*floodMap*) con risoluzione a 1 metro, in cui ogni cella esprime l'altezza del battente idrico a terra. Il dataset è stato strutturato mantenendo la medesima metodologia per entrambi gli stati analizzati (pre e post-intervento):

- generazione dei raster: i risultati idraulici modellati in HEC-RAS per i tre periodi di ritorno (T50, T200 e T500) sono stati importati e verificando la coerenza con il sistema di riferimento;

- visualizzazione e confronto: ai layer raster è stata applicata la medesima scala cromatica in tonalità di blu (dal chiaro per battenti modesti allo scuro per profondità maggiori) del caso pre-intervento precedentemente analizzato. Ciò ha permesso un immediato confronto visivo dell'estensione degli allagamenti e dei tiranti idrici residui in corrispondenza degli edifici nei due scenari temporali.

Questo processo è stato applicato ai tre scenari permettendo un confronto visivo immediato dell'estensione dell'area inondata e del tirante idrico raggiunto in corrispondenza dei singoli edifici monitorati.

I risultati ottenuti per i diversi periodi di ritorno sono mostrati nelle Fig. 7.39, 7.40 e 7.41, rispettivamente per T50, T200 e T500.



Fig. 7.39 Layer "Battenti da studio idraulico post-interventi 1D su HEC-RAS" del torrente Petronio per T50 (QGIS).



Fig. 7.40 Layer “Battenti da studio idraulico post-interventi 1D su HEC-RAS” del torrente Petronio per T200 (QGIS).



Fig. 7.41 Layer “Battenti da studio idraulico post-interventi 1D su HEC-RAS” del torrente Petronio per T500 (QGIS).

7.7.2. Layer vettoriale “Edificato”

La medesima procedura di filtraggio e selezione dell’edificato, già descritta per lo stato di fatto, è stata applicata ai raster geometrici derivanti dagli scenari post-intervento. Partendo dal database “Edificato” del Geoportale della Liguria, l’isolamento dei soli corpi di fabbrica interagenti con i nuovi domini idraulici ha previsto:

- l’aggiornamento delle statistiche zonali: i vettoriali degli edifici sono stati sovrapposti ai nuovi raster di batimetria (T50, T200 e T500) post-intervento per calcolare il valore medio di battente associato a ogni struttura;
- filtro e query di estrazione ($Media > 0$): per garantire la consistenza del dataset ed evitare errori di calcolo nel plugin FloodD2B (dovuti a record privi di dati), è stata applicata la query booleana per selezionare esclusivamente gli edifici che presentano un tirante idrico maggiore di zero.

Questa operazione ha permesso di generare i nuovi layer di calcolo contenenti solo gli edifici effettivamente interessati dall’inondazione a seguito delle opere di mitigazione. I risultati per i tre periodi di ritorno sono mostrati nelle figure Fig. 7.42, 7.43 e 7.44.



Fig. 7.42 Classi d’uso del layer raster “Edificato” in area inondabile T50 post-interventi (QGIS).

Commentato [IF2]: Sarebbe interessante inserire una tabella o una cartografica con numero di edifici interessati pre e post interventi



Fig. 7.43 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T200 post-interventi (QGIS).



Fig. 7.44 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T500 post-interventi (QGIS).

Al fine di valutare in modo immediato e quantificabile l'efficacia delle opere di mitigazione progettate, si è proceduto a un'analisi cartografica comparativa dell'edificato esposto al rischio idraulico. La metodologia adottata prevede la sovrapposizione spaziale, all'interno dell'ambiente GIS, dei vettoriali relativi agli edifici originariamente interessati dall'inondazione (scenario pre-intervento) con quelli ancora vulnerabili a seguito della realizzazione delle opere (scenario post-intervento).

Per massimizzare l'efficacia della cartografia e facilitare l'individuazione degli edifici messi in sicurezza, si è optato per una rappresentazione grafica a contrasto:

- riempimento pieno (colore verde): identifica la massima estensione degli edifici allagati nello scenario originario (pre-intervento);
- bordo vuoto (colore rosso): individua la sagoma degli edifici che continuano a subire un battente d'acqua anche nella configurazione mitigata (post-intervento).

Quindi i poligoni interamente verdi identificano gli edifici che si escludono dal computo del rischio, evidenziando il beneficio diretto dell'opera, mentre la persistenza del bordo rosso segnala le aree in cui la mitigazione non azzerava completamente la pericolosità.

Tale elaborazione cartografica è stata replicata con i medesimi criteri metodologici e grafici anche per tutti gli scenari oggetto di analisi. Questo ha permesso di confrontare la resilienza del tessuto urbano di Sestri Levante al variare della severità dell'evento alluvionale.

Nelle Fig. 7.45, 7.46 e 7.47 si possono osservare le immagini relative a tali risultati.

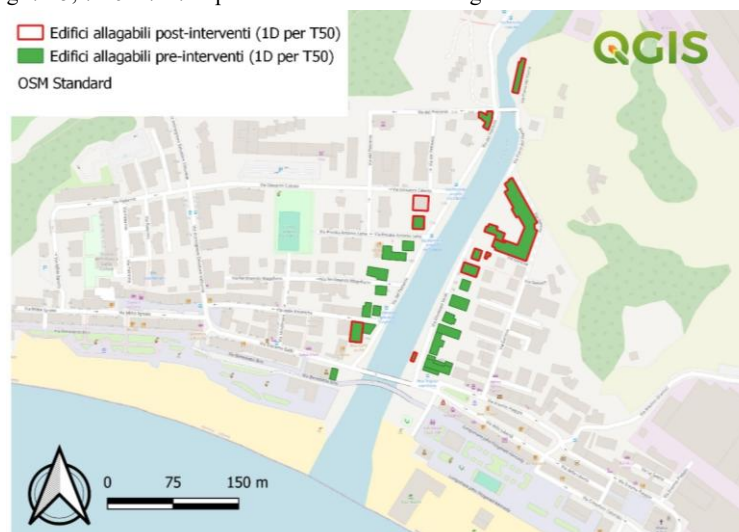


Fig. 7.45 Analisi spaziale comparativa della vulnerabilità dell'edificato (scenario T50) pre e post-interventi di mitigazione. I poligoni verdi indicano gli edifici messi in sicurezza, quelli con il bordo rosso individuano le strutture che permangono a rischio (QGIS).

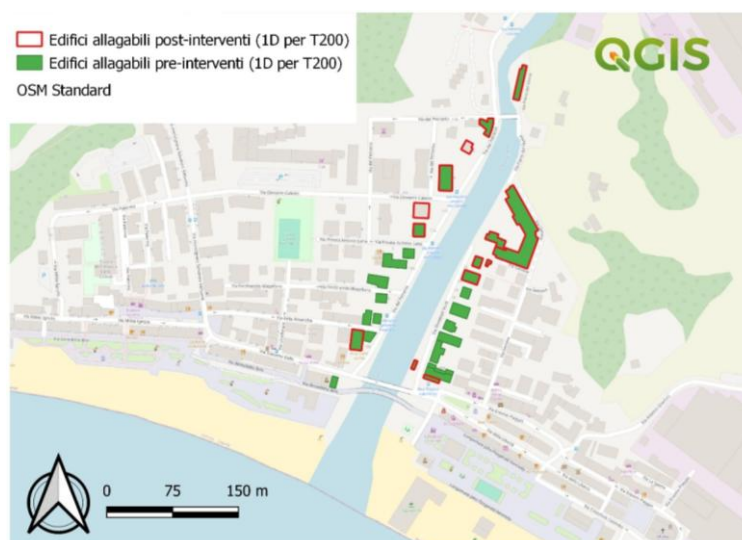


Fig. 7.46 Analisi spaziale comparativa della vulnerabilità dell'edificato (scenario T200) pre e post-interventi di mitigazione. I poligoni verdi indicano gli edifici messi in sicurezza, quelli con il bordo rosso individuano le strutture che permangono a rischio (QGIS).

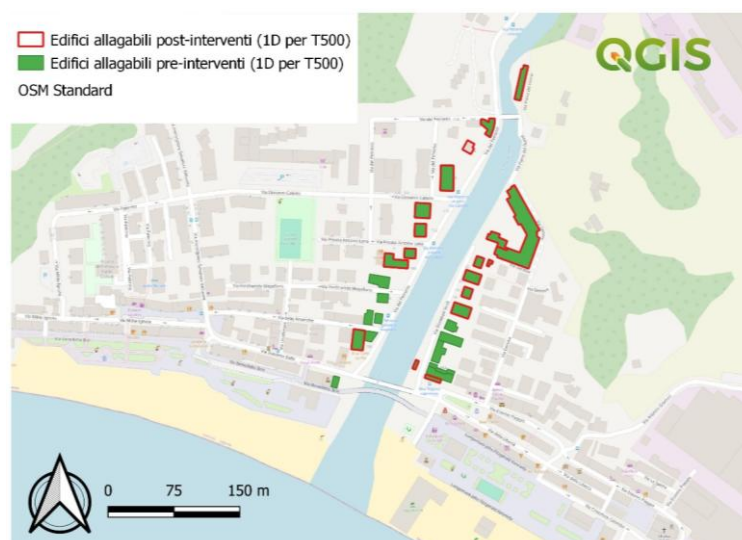


Fig. 7.47 Analisi spaziale comparativa della vulnerabilità dell'edificato (scenario T500) pre e post-interventi di mitigazione. I poligoni verdi indicano gli edifici messi in sicurezza, quelli con il bordo rosso individuano le strutture che permangono a rischio (QGIS).

7.7.3. Metodologia di stima del danno tramite il plugin FloodD2B

Per la quantificazione dei danni potenziali nello scenario post-intervento, è stata applicata la medesima procedura automatizzata tramite il plugin FloodD2B in ambiente QGIS, basata sul metodo del campionamento diretto al centroide.

Il flusso di lavoro, analogo a quello impiegato per lo stato di fatto, ha previsto l'utilizzo dei nuovi raster di inondazione post-opere di mitigazione del rischio idraulico per l'estrazione dei tiranti idrici di riferimento:

- pre-processing geometrico: il layer vettoriale degli edifici precedentemente filtrato è stato sottoposto a correzione topologica (*Fix geometries*) e successiva realizzazione dei centroidi geometrici (*Centroids*), garantendo il trasferimento univoco degli attributi di ciascun fabbricato;
- campionamento dei nuovi vettori: l'algoritmo *Sample raster values* ha permesso di associare a ogni centroide il valore di battente idrico derivante dalle nuove mappe di allagamento, assumendolo come altezza d'acqua di riferimento per il calcolo del danno residuo.

L'adozione di questo approccio ha consentito di mantenere la rapidità computazionale e l'accuratezza del dato d'origine anche per la fase post-intervento, escludendo alterazioni dovute a interpolazioni spaziali. Le impostazioni del plugin configurate per i tre nuovi scenari di ritorno (T50, T200 e T500) sono illustrate nelle figure Fig. 7.48, 7.49 e 7.50.



Fig. 7.48 FloodD2B per T50 post-interventi (QGIS).

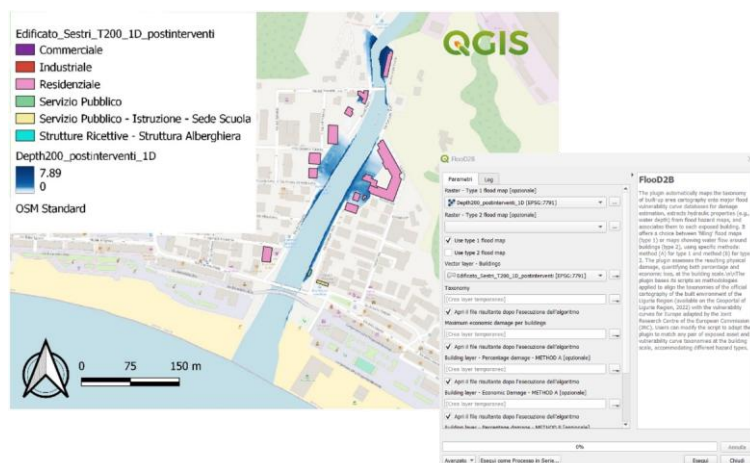


Fig. 7.49 FloodD2B per T200 post-interventi (QGIS).

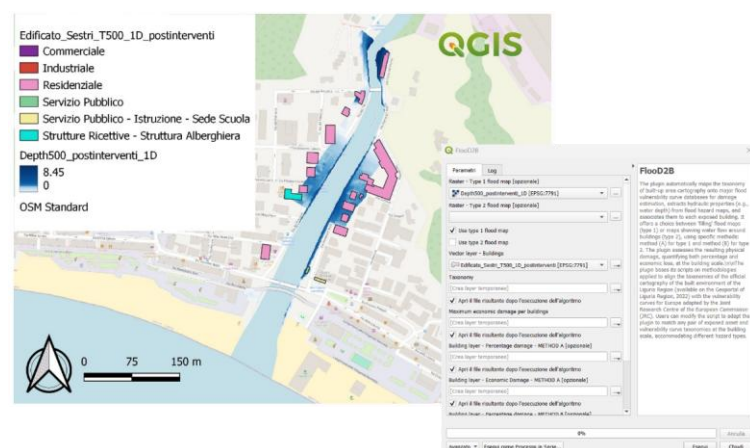


Fig. 7.50 FloodD2B per T500 post-interventi (QGIS).

Al termine del processo di calcolo, il plugin restituisce quattro layer vettoriali che integrano i risultati della stima: profondità media, percentuale di danno e danno economico in €. Ai fini della restituzione cartografica nella presente tesi, sono stati privilegiati i layer poligonali. Questi permettono una visualizzazione spaziale immediata e intuitiva del rischio a scala urbana, consentendo di tematizzare l'intero edificio in base alle classi di danno definite (da “Nessun danno” a “Danno molto elevato”). Ciò garantisce una rappresentazione visivamente coerente con l'area effettivamente occupata dalle strutture nel tessuto urbanizzato, come si può osservare dalle seguenti immagini Fig. 7.51, 7.52, 7.53, 7.54, 7.55 e 7.56.



Fig. 7.51 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi per T50 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

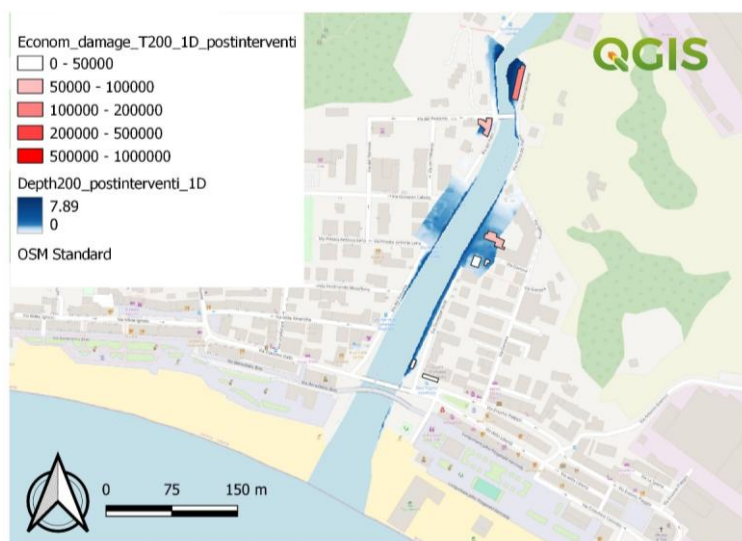


Fig. 7.52 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi per T200 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

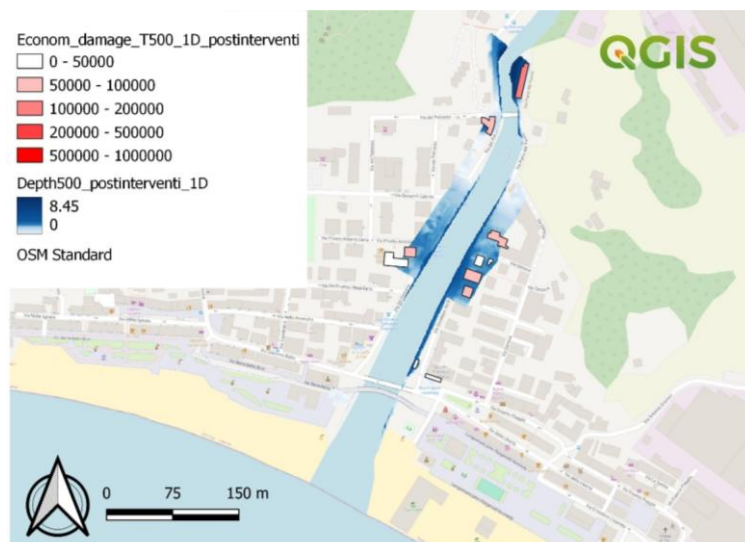


Fig. 7.53 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi per T500 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

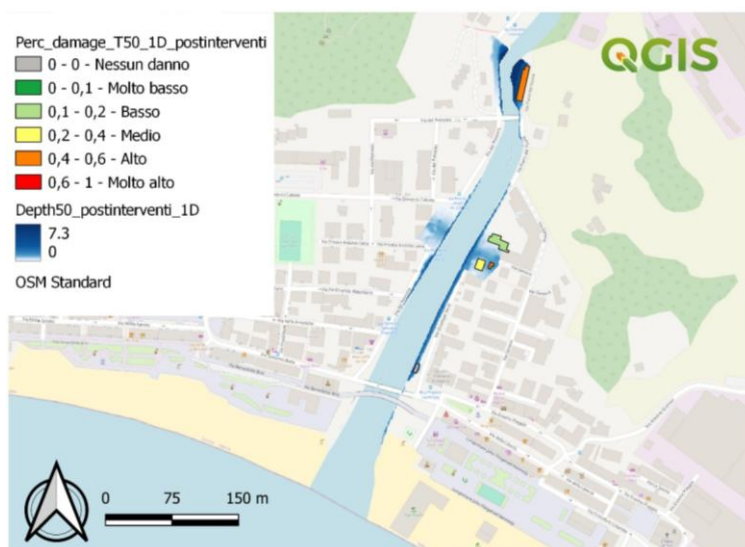


Fig. 7.54 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi per T50 (QGIS).

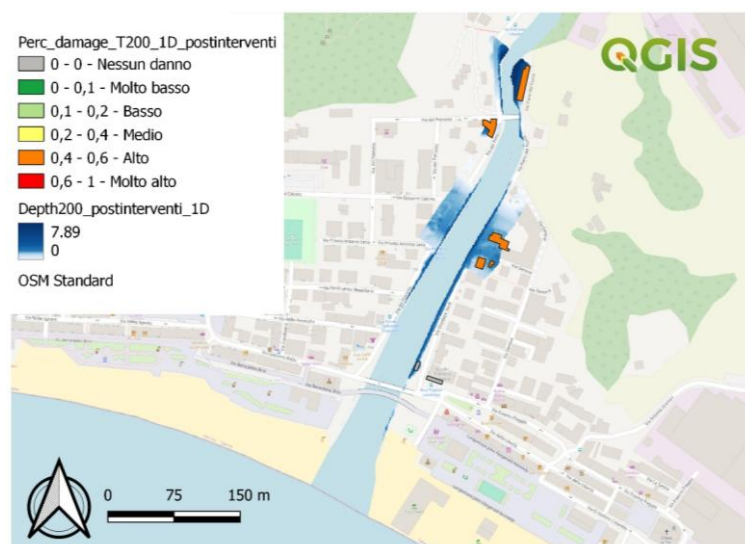


Fig. 7.55 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi per T200 (QGIS).

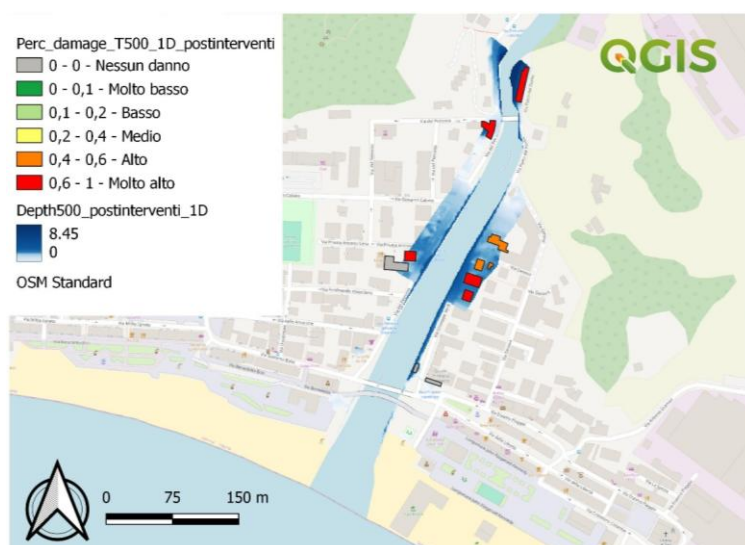


Fig. 7.56 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi per T500 (QGIS).

7.8. Analisi idraulica 2D dello stato di fatto su HEC-RAS

Al fine di caratterizzare in modo dettagliato la propagazione bidimensionale del flusso nel tratto terminale del torrente Petronio, si è proceduto alla costruzione di un modello idraulico 2D indipendente, in grado di riprodurre i campi di tirante e velocità nelle aree del tessuto urbano di Riva Trigoso.

Il flusso di lavoro ha avuto inizio con la creazione di un nuovo progetto all'interno del software HEC-RAS, prestando particolare attenzione alla configurazione preventiva del sistema di misura, impostato rigorosamente sul sistema metrico decimale (*Metric System*), in coerenza con gli standard europei e nazionali.

Successivamente, tramite il modulo geometrico-spaziale *GISTools*, è stato attivato l'ambiente *RAS Mapper*, l'interfaccia GIS integrata nel software. All'interno di *RAS Mapper*, accedendo al menu *Set Projection*, è stato definito il file di proiezione associato al progetto. In perfetta analogia geometrica con quanto eseguito sia nella fase di pre-processing in ambiente QGIS sia nella modellazione monodimensionale (1D), è stato impostato il codice EPSG 7791, corrispondente al sistema di riferimento geodetico ufficiale italiano ETRF2000-2008.0 con proiezione conforme UTM Fuso 32N. Questa operazione garantisce l'assoluta congruenza spaziale e l'assenza di distorsioni geometriche nel momento in cui i vettori e i raster vengono scambiati tra la piattaforma GIS e il solutore idraulico.

Definito il quadro di riferimento geodetico, si è proceduto alla generazione della superficie topografica digitale interna al modello, fondamentale per la successiva risoluzione delle equazioni del moto vario bidimensionale. Attraverso il comando *Create New RAS Terrain*, è stata importata la matrice raster del Modello Digitale del Terreno.

Il file utilizzato è il medesimo DTM derivato dai rilievi LiDAR ad alta precisione della Regione Liguria, avente una risoluzione spaziale di 1×1 metro, già impiegato per la modellazione 1D. Il software ha così generato un file, che costituisce la base altimetrica continua su cui la corrente idrica andrà a propagarsi.

Nella Fig. 7.57 è possibile osservare la rappresentazione del *Terrain* 2D pre-interventi.

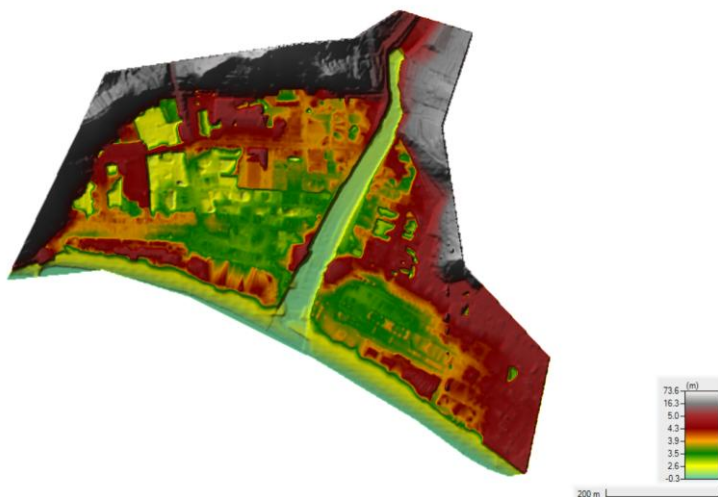


Fig. 7.57 Rappresentazione della geometria del terreno: "Terrain" (HEC-RAS).

La fase successiva ha riguardato la modellazione geometrica del dominio idraulico. Accedendo al menu *New Geometry*, è stata inizializzata una nuova sessione di digitalizzazione vettoriale. Per collegare spazialmente la nuova geometria al piano topografico corretto, è stata aperta la finestra di dialogo *Manage Geometry Associations* dal menu delle geometrie di *RAS Mapper*, accoppiando la geometria corrente al *RAS Terrain* precedentemente creato.

All'interno dell'editor geometrico (*Geometry Data*), è stato plottato il terreno in modo da avere i riferimenti visivi dell'alveo e delle aree urbanizzate circostanti. Si è quindi proceduto alla perimetrazione della 2D Flow Area, ovvero il dominio di calcolo poligonale che racchiude l'intera porzione di territorio soggetta a potenziale esondazione nel tratto terminale del torrente. Nella Fig. 7.58 è possibile osservare la 2D Flow Area.

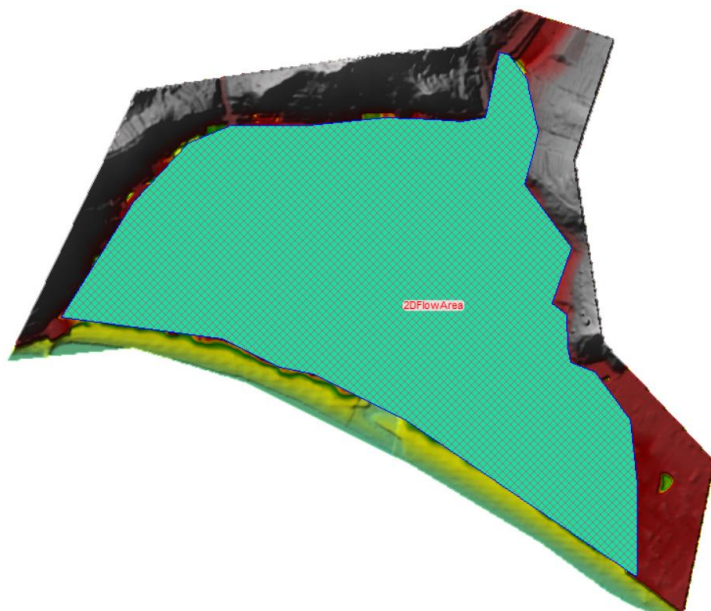


Fig. 7.58 Rappresentazione della 2D Flow Area (HEC-RAS).

Una volta tracciato il perimetro esterno della *2D Flow Area*, si è passati alla discretizzazione spaziale tramite la generazione dei punti di calcolo (*2D Flow Area Generate Points*). In questa fase, le scelte computazionali sono state guidate da criteri di stabilità numerica ed efficienza di calcolo:

- inizialmente è stata eseguita una prova impostando una risoluzione della griglia pari a 1 metro, con l'obiettivo di accoppiare perfettamente la mesh al pixel del DTM. Tuttavia, tale discretizzazione ha comportato un numero eccessivo di celle, rendendo il modello eccessivamente pesante dal punto di vista computazionale e determinando fenomeni di instabilità numerica;
- per ovviare a tale problematica e ottimizzare il compromesso tra accuratezza geometrica e sostenibilità computazionale, la mesh è stata rigenerata adottando una risoluzione regolare pari a 5 metri. Questa dimensione ha garantito un calcolo fluido, stabile e privo di crash, preservando al contempo una definizione geometrica idonea alla scala dell'edificio di Riva Trigoso.

La chiusura matematica del modello di moto vario richiede la definizione delle condizioni al contorno lungo i margini perimetrali del dominio bidimensionale. A tale scopo, all'interno di *RAS Mapper*, sono state digitalizzate due apposite linee di confine denominate BC Lines:

- upBC (Upstream Boundary Condition): posizionata nella sezione di monte della *2D Flow Area*, in corrispondenza del tratto terminale golenale prima dell'ingresso nella piana urbanizzata,

- downBC (Downstream Boundary Condition): tracciata lungo la linea costiera dello sbocco a mare a Riva Trigoso.

Nella Fig. 7.59 è possibile osservare in azzurro le condizioni al contorno.

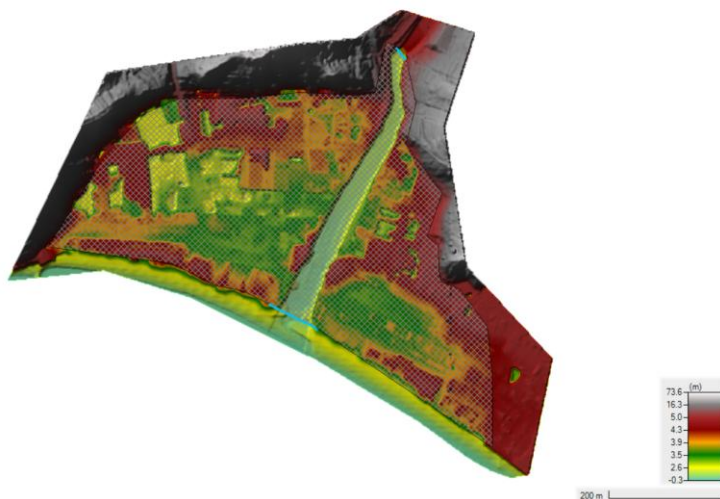


Fig. 7.59 Rappresentazione delle Boundary Condition (in colore azzurro) (HEC-RAS).

7.8.1. Definizione del regime di moto non permanente (*Unsteady Flow Data*) e condizioni al contorno

La simulazione della propagazione dell'onda di piena all'interno del dominio bidimensionale richiede la risoluzione numerica delle equazioni del moto vario (equazioni di Saint-Venant estese alle due dimensioni spaziali). Per consentire la convergenza dell'algoritmo risolutivo e rispecchiare la dinamica dell'evento alluvionale nel tempo, si è proceduto alla configurazione del regime di moto non permanente attraverso l'interfaccia *Unsteady Flow Data*.

La modellazione ha previsto l'inserimento degli idrogrammi di piena calcolati nella sezione idrologica di monte del tratto terminale del torrente Petronio. I dati di portata in funzione del tempo $Q(t)$ sono stati discretizzati con un passo temporale coerente con il tempo di picco dell'onda, garantendo una descrizione ascendente e discendente dell'idrogramma.

Nello specifico, le simulazioni idrauliche in regime non permanente sono state condotte prendendo in esame tre differenti scenari idrologici di riferimento, esattamente gli stessi dell'analisi 1D, caratterizzati dalle seguenti portate al colmo:

- $Q_{50} = 601 \text{ m}^3/\text{s}$ scenario associato a una pericolosità idraulica frequente, corrispondente a un tempo di ritorno T50 anni, utile per valutare la risposta del sistema idraulico ad eventi ordinari ma significativi;
- $Q_{200} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$: scenario di riferimento per la delimitazione delle fasce di inondazione e

per la progettazione delle opere di difesa strutturali, corrispondente a un tempo di ritorno T200 anni, in linea con le direttive e le prescrizioni della pianificazione di bacino vigente;

- Q200 = 821 m³/s: scenario estremo finalizzato alla valutazione della resilienza territoriale, corrispondente a un tempo di ritorno T500 anni, impiegato per l'analisi dei margini di sicurezza e degli effetti di un eventuale superamento delle capacità di contenimento delle opere.

Dal punto di vista della chiusura matematica del sistema differenziale, sono state implementate le seguenti condizioni al contorno esterne ed interne al dominio per ciascuno dei tre scenari sopra descritti:

- condizione al contorno di monte (Upstream Boundary Condition - upBC): in corrispondenza della sezione d'ingresso della *2D Flow Area*, è stata assegnata una condizione di tipo *Flow Hydrograph*. Oltre all'inserimento delle serie temporali delle portate relative alle piene a 50, 200 e 500 anni, si è reso necessario specificare l'*Energy Slope* (pendenza energetica) per la distribuzione iniziale del flusso sulle celle di monte, stimata sulla base della pendenza geometrica dell'alveo in quel tratto;
- condizione al contorno di valle (Downstream Boundary Condition - downBC): coerentemente con lo sbocco naturale del torrente nel Mar Ligure presso la baia di Riva Trigoso, lungo la linea costiera è stata impostata una condizione di Normal Depth (Altezza normale). Al fine di calibrare correttamente la capacità di deflusso e minimizzare gli effetti di bordo artificiali, la pendenza motrice (*Friction Slope*) è stata posta pari a 0.006, valore mutuato dalla pendenza media del fondo marino e dai preesistenti studi idraulici regionali validati per l'area in esame.

Un aspetto cruciale per la stabilità del calcolo bidimensionale ha riguardato la definizione delle opzioni computazionali avanzate (*2D Flow Options and Tolerances*). Il software HEC-RAS consente di selezionare l'equazione governante il flusso tra due differenti formulazioni:

- Diffusion Wave Equations (DWE): formulazione semplificata che omette i termini di accelerazione locale e convettiva dall'equazione del momento. Questa opzione è stata inizialmente testata, offrendo tempi di calcolo ridotti e una spiccata stabilità numerica;
- Full Saint-Venant / Shallow Water Equations (SWE): formulazione completa che include tutti i termini inerziali, indispensabile laddove si verificano brusche variazioni geometriche, transizioni di regime (flussi supercritici), onde d'urto o impatti significativi contro le strutture antropiche (edifici e infrastrutture del tessuto urbano).

Per l'analisi definitiva, si è optato per la risoluzione delle Shallow Water Equations (SWE-ELAM), in quanto lo scenario d'inondazione all'interno dell'abitato di Riva Trigoso presenta forti accelerazioni locali causate dalla deviazione del flusso tra le strade e dall'interazione con gli edifici, fenomeni che l'approssimazione diffusiva (DWE) non sarebbe stata in grado di cogliere accuratamente, specialmente sotto l'azione delle portate più gravose (Q200 e Q500).

Infine, per garantire il rispetto del criterio di Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) e prevenire la divergenza numerica del solutore dovuta alla mesh da 5 metri e alle velocità locali provocate dalla portata, si è attivato il passo di calcolo variabile nel tempo, consentendo al software di

ridurre automaticamente il Δt di calcolo (fino a frazioni di secondo) in corrispondenza del culmine della piena.

7.8.2. Risultati del calcolo in condizione di moto non permanente bidimensionale

Il completamento delle simulazioni idrauliche in regime di moto vario ha permesso di ottenere la mappatura spaziale e temporale completa dell'evento di esondazione del torrente Petronio per i tempi di ritorno indagati. Attraverso il modulo *RAS Mapper*, i risultati sono mostrati come mappe raster e vettoriali continue.

L'analisi dei risultati si è concentrata sulle tre principali variabili idrodinamiche significative per la valutazione della pericolosità idraulica in ambito urbano: i tiranti idrici (h), le velocità della corrente (v) e il battente idrico massimo esondato.

Nelle immagini successive (Fig. 7.60, 7.61, 7.62) è possibile osservare la mappa dei battenti idraulici 2D riferite alle tre portate.

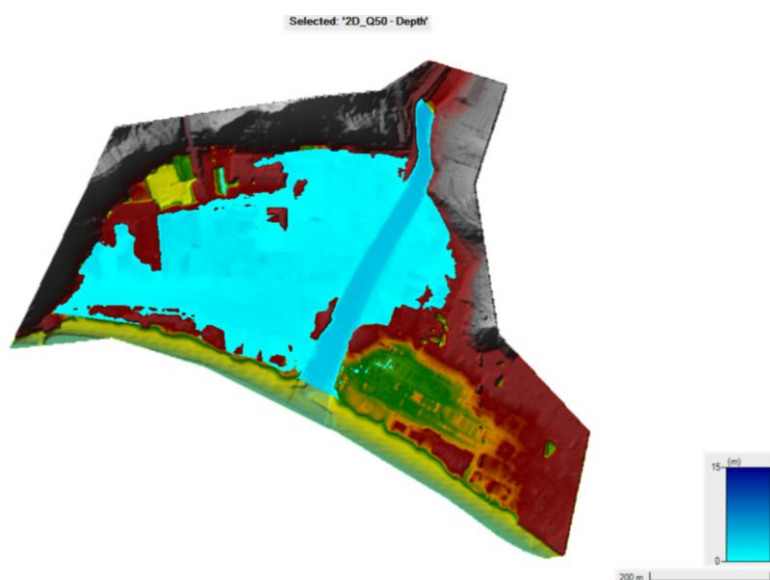


Fig. 7.60 Rappresentazione della mappa di inondazione 2D relativa alla portata Q_{50} (HEC-RAS).

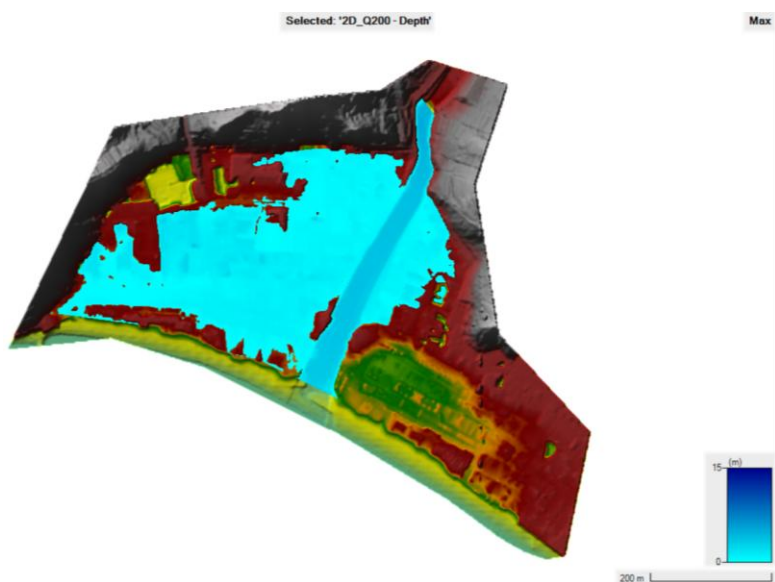


Fig. 7.61 Rappresentazione della mappa di inondazione 2D relativa alla portata Q200 (HEC-RAS).

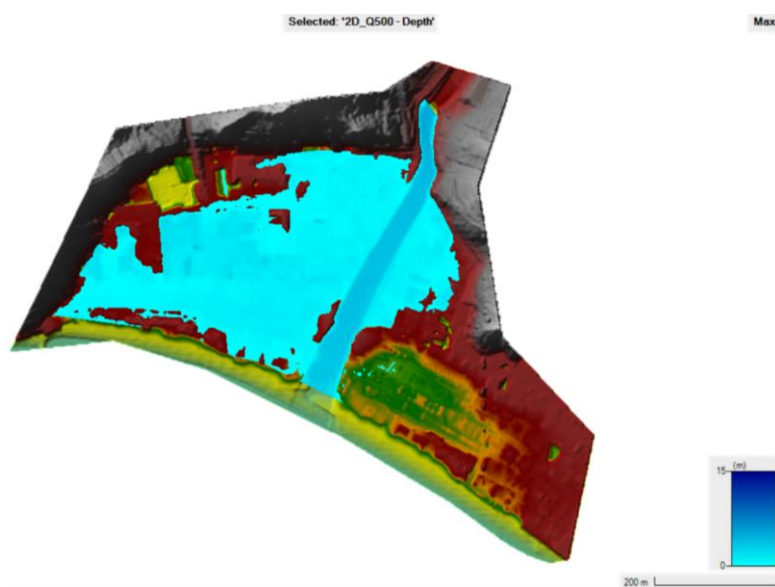


Fig. 7.62 Rappresentazione della mappa di inondazione 2D relativa alla portata Q500 (HEC-RAS).

Dall'estrazione delle mappe di allagamento emergono le seguenti evidenze idrauliche:

- dinamica dell'esondazione in alveo: nel tratto terminale, l'alveo del Petronio subisce una parziale penalizzazione della capacità di deflusso a causa delle geometrie dei ponti stradali e ferroviari. Il rigurgito idraulico generato da tali strozzature strutturali provoca il sormonto degli argini in sponda destra e sinistra, innescando la propagazione del flusso verso le aree pianeggianti limitrofe;
- propagazione nel tessuto urbano di Riva Trigoso: le strade principali, orientate parallelamente o obliquamente rispetto all'asse fluviale, si trasformano in veri e propri canali di scolo superficiali;
- battenti massimi e aree di ristagno: nelle porzioni più depresse della piana alluvionale e in prossimità della linea di costa, la corrente rallenta a causa della riduzione della pendenza topografica, dando luogo a fenomeni di accumulo e ristagno idrico. In queste zone si registrano i tiranti massimi esondati, configurando uno scenario di elevata pericolosità per l'incolumità pubblica e per le strutture esposte.

La quantificazione di tali parametri ha fornito la base numerica necessaria per la successiva perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica ai sensi dei piani di bacino vigenti, dimostrando l'assoluta superiorità dell'approccio bidimensionale rispetto a quello monodimensionale nella descrizione dei fenomeni di esondazione in contesti complessi e fortemente antropizzati.

7.9. Risultati del processo 2D dello stato di fatto con il plugin Flood2B

Le mappe dei battenti idrici ottenute dalla modellazione bidimensionale per i tre tempi di ritorno simulati (Q50, Q200 e Q500) sono state esportate in ambiente GIS. Questa transizione dall'ambiente di calcolo a quello geospaziale si è resa necessaria per poter stimare la vulnerabilità e quantificare il danno economico subito dagli edifici soggetti a inondazione attraverso il plugin Flood2B.

Al fine di validare i risultati, è stato operato un confronto spaziale tra i vettori di inondazione generati dal presente modello 2D e i layer ufficiali messi a disposizione dal Geoportale della Regione Liguria. Tale confronto è guidato dalla consapevolezza che, sebbene entrambi gli approcci condividano la medesima impostazione modellistica bidimensionale, sussistono inevitabili eterogeneità metodologiche intrinseche che precludono una perfetta sovrapponibilità delle perimetrazioni.

Nello specifico, la non totale corrispondenza tra le mappe di inondazione risultanti è da attribuirsi principalmente ai seguenti fattori:

- origine e risoluzione della geometria d'alveo: le due mappature poggiano su input geometrici differenti. Il presente studio adotta un DTM da scansione laser con risoluzione spaziale pari a 1 m, il quale risente di specifiche approssimazioni nella ricostruzione dell'alveo inciso rispetto ai rilievi topografici di dettaglio e alle sezioni mirate che supportano la cartografia regionale;
- parametri di modellazione non noti: un ulteriore margine di incertezza deriva dall'irreperibilità delle specifiche impostazioni idrauliche del modello dell'Ente regionale.

L'impossibilità di conoscere i criteri di calibrazione adottati o la caratterizzazione numerica delle condizioni al contorno (sia a monte che a valle) limita la fattibilità di un confronto perfettamente standardizzato.

Per analizzare la distribuzione spaziale di tali differenze, la Fig. 7.63 mostra il confronto geometrico tra le due mappature 2D per lo scenario con tempo di ritorno a 50 anni.

- area di coincidenza (in viola): rappresenta la zona di convergenza tra i due modelli;
- area esclusivamente regionale (in giallo): Evidenzia le zone inondate unicamente dallo studio della Regione Liguria;
- area esclusivamente interna (in blu): mostra le porzioni allagate solo dal presente studio.

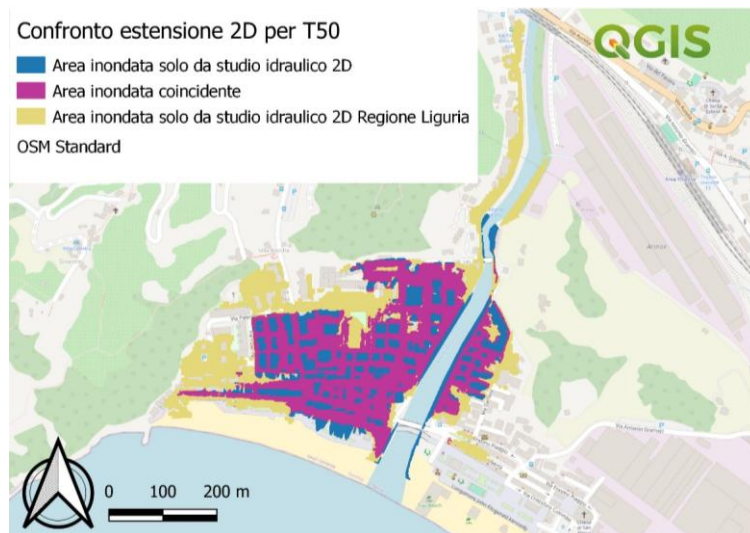


Fig. 7.63 Mappa comparativa delle estensioni di inondazione per lo scenario con periodo di ritorno 50 anni (QGIS).

A integrazione del confronto grafico per lo scenario con periodo di ritorno a 50 anni riportato in Fig. 7.63, si forniscono di seguito i dati quantitativi relativi alle estensioni delle superfici di inondazione calcolate in ambiente QGIS:

- area comune di inondazione (in viola): rappresenta la zona di convergenza tra i due modelli, dove si riscontra una coerente risposta idraulica principale di entrambe le simulazioni 2D. Tale superficie si estende per $0,0655 \text{ km}^2$ (pari a $65.526,60 \text{ m}^2$);
- area inondata presente solo sulla cartografia regionale (in giallo): evidenzia le zone allagate unicamente dallo studio della Regione Liguria. Questa estensione copre una superficie di $0,0476 \text{ km}^2$ (pari a $47.560,70 \text{ m}^2$);
- area inondata presente solo nella mappa dello studio idraulico 2D interno (in blu): mostra le

porzioni allagate solo dal presente studio, riconducibili alle differenti risposte locali del flusso indotte dalla rugosità superficiale e dalla topografia del DTM da scansione laser qui utilizzato.

Questa estensione quantifica una superficie di 0,0210 km² (pari a 21.048,30 m²).

Nella Fig. 7.64 si può osservare a titolo di esempio la mappa delle differenze di battente idrico per lo scenario a 50 anni di tempo di ritorno, ottenuta sottraendo il battente dello studio 2D regionale da quello del modello 2D. Le tonalità violacee evidenziano le aree in cui il presente studio sottostima l'altezza dell'acqua o non rileva l'allagamento. Al contrario, le tonalità verdi indicano i punti, localizzati prevalentemente a ridosso delle sponde e delle sezioni d'alveo a monte, in cui il modello basato su DTM sovrastima il livello idrico rispetto ai rilievi topografici di dettaglio regionali.

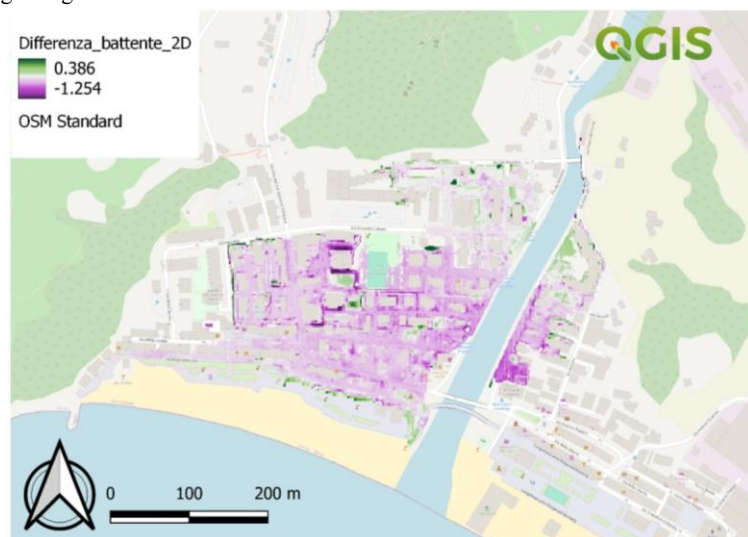


Fig. 7.64 Mappa delle differenze di battente idrico 2D per lo scenario a 50 anni di ritorno localizzate nell'area di inondazione comune (QGIS).

In questo contesto, l'applicazione del plugin FloodD2B sulle mappe 2D generate ha assunto un ruolo metodologico fondamentale, permettendo di quantificare l'impatto economico e la vulnerabilità del tessuto edificato nello scenario pre-intervento.

Nei paragrafi che seguono vengono presentati e discussi i risultati cartografici e numerici ottenuti tramite FloodD2B, analizzando la distribuzione spaziale dei battenti e la conseguente stima dei danni agli elementi esposti per i tre scenari di piena esaminati.

7.9.1. Layer "Battenti" derivante da analisi 2D con il software HEC-RAS

La stima della vulnerabilità del tessuto urbano di Riva Trigoso ha previsto l'elaborazione dei dati idraulici derivanti dalla modellazione 2D del torrente Petronio, con particolare focus sulla zona

di foce ad alta densità abitativa.

Per soddisfare i requisiti del plugin Flood2B, i risultati idraulici sono stati ricavati dalle mappe di inondazione raster create con HEC-RAS con risoluzione di 1 metro, dove il valore di ogni cella descrive l'altezza del battente idrico. Il processo ha previsto l'allineamento geometrico dei tre scenari di portata e l'applicazione di una rampa di colore a banda singola (tonalità del blu) per mappare i gradienti di profondità dell'acqua in modo intuitivo.

Questa standardizzazione ha interessato i tre tempi di ritorno analizzati (T50, T200, T500), agevolando la comparazione spaziale dei tiranti idrici e le strutture presenti (Fig. 7.65, 7.66, 7.67).

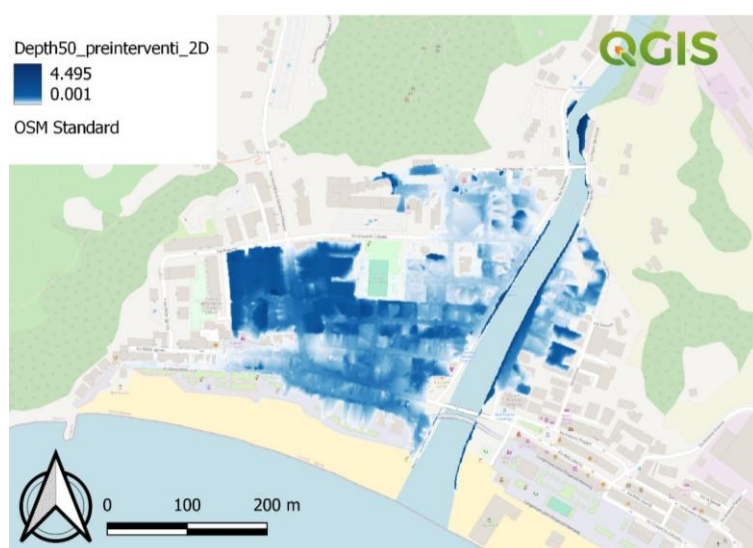


Fig. 7.65 Layer “Battenti da studio idraulico 2D pre-interventi su HEC-RAS” del torrente Petronio per T50 (QGIS).

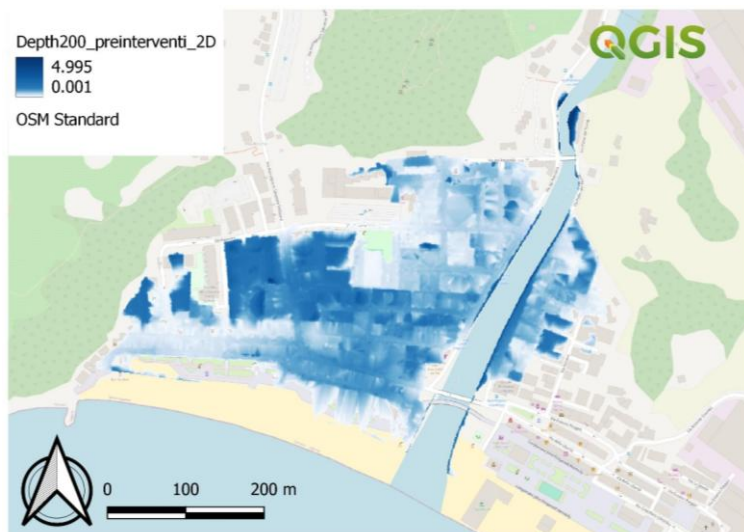


Fig. 7.66 Layer "Battenti da studio idraulico 2D pre-interventi su HEC-RAS" del torrente Petronio per T200 (QGIS).

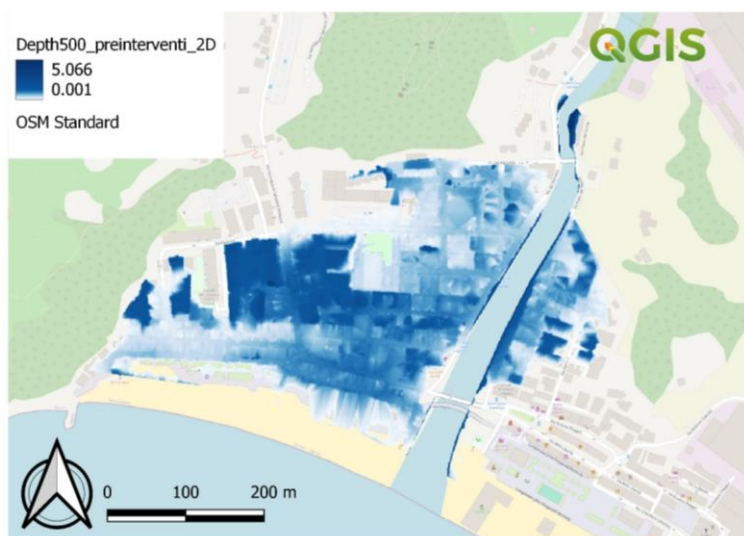


Fig. 7.67 Layer "Battenti da studio idraulico 2D pre-interventi su HEC-RAS" del torrente Petronio per T500 (QGIS).

7.9.2. Layer vettoriale “Edificato”

Per individuare le strutture esposte all’evento alluvionale, il layer “Edificato” del Portale Cartografico della Regione Liguria è stato sottoposto a un processo di filtraggio e selezione spaziale strutturato come segue:

- *statistiche zonali*: l’incrocio geometrico tra il vettore degli edifici e i raster idraulici 2D (battenti e velocità) ha permesso di associare a ogni manufatto il rispettivo valore medio d’inondazione per ciascun tempo di ritorno;
- *query di estrazione*: tramite un filtro booleano basato sulla condizione $Media > 0$, sono stati isolati ed esportati in un nuovo layer solo gli edifici effettivamente interagenti con il flusso (caratterizzati da valori di tirante e velocità maggiori di zero).

Questa procedura di pulizia ha garantito la consistenza del dataset per i calcoli successivi, escludendo a priori le geometrie esterne al font d’onda ed evitando potenziali errori di elaborazione (colonne vuote o blocchi del codice) durante l’esecuzione del plugin Flood2B.

I layer risultanti per gli scenari a 50, 200 e 500 anni sono rappresentati nelle figure Fig 7.68, 7.69 e 7.70.

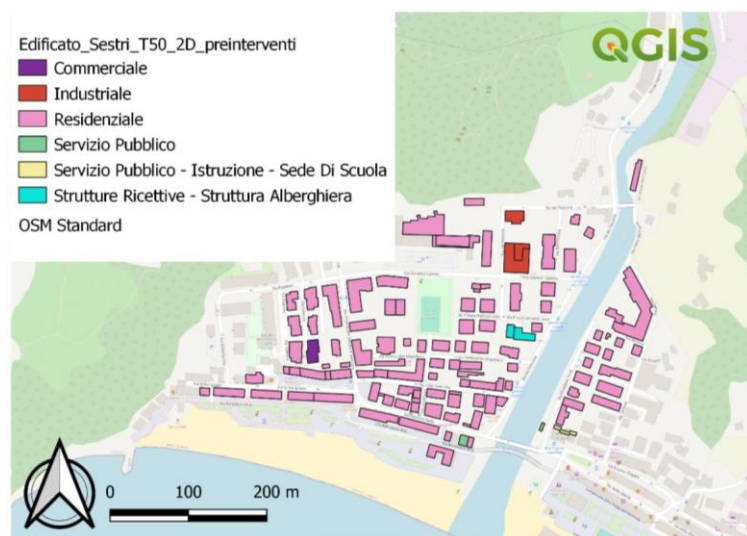


Fig. 7.68 Classi d’uso del layer raster “Edificato” in area inondabile T50 riferito alla situazione pre-interventi 2D (QGIS).

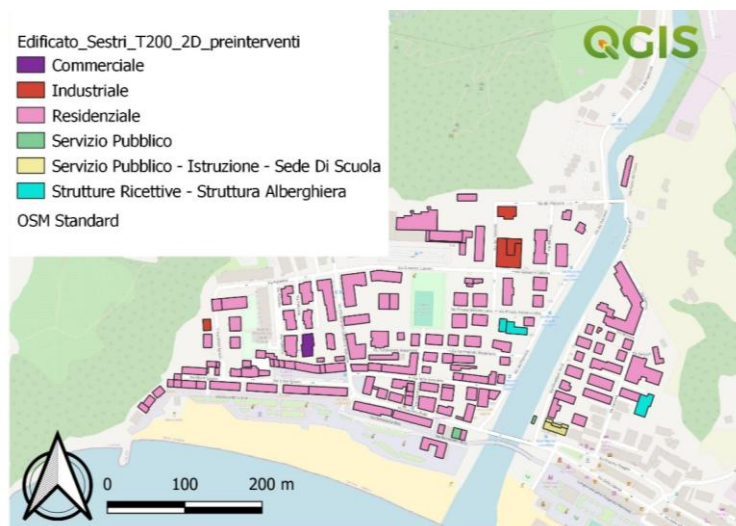


Fig. 7.69 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T200 riferito alla situazione pre-interventi 2D (QGIS).

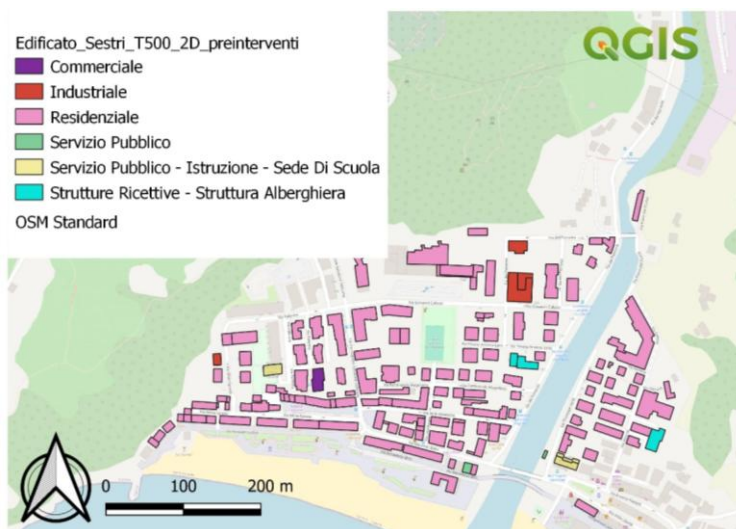


Fig. 7.70 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T500 riferito alla situazione pre-interventi 2D (QGIS).

7.9.3. Metodologia di stima del danno tramite il plugin Flood2B

L'automazione delle procedure di associazione tra i parametri idraulici dell'evento alluvionale e il danno potenziale stimato per ogni singola unità edilizia è stata implementata in ambiente QGIS mediante l'applicativo Flood2B.

Una delle principali criticità metodologiche in ambito urbano risiede nella gestione dei valori "No Data" in corrispondenza del sedime dei fabbricati; tale circostanza si verifica frequentemente nei modelli idraulici 2D in cui gli edifici vengono discretizzati come ostacoli geometrici al flusso. Per superare tale discontinuità informativa, in questo studio è stato adottato l'approccio basato sul campionamento al centroide geometrico, il cui workflow automatizzato si articola nelle seguenti fasi:

- validazione topologica e discretizzazione puntuale: il layer vettoriale poligonale dell'edificio viene trattato con l'algoritmo "*Fix geometries*" al fine di risolvere eventuali anomalie topologiche della mesh vettoriale. Successivamente, l'applicazione dello strumento "*Centroids*" consente di generare un piano informativo puntuale in cui ogni elemento, geometricamente baricentrico rispetto al fabbricato d'origine, ne eredita l'intero set di attributi;
- estrazione locale dei parametri idraulici: mediante l'algoritmo "*Sample raster values*", il plugin esegue un'intersezione spaziale tra il layer dei centroidi e i campi di moto bidimensionali. I valori numerici delle celle sottostanti i centroidi vengono estratti e assunti come parametri idraulici di riferimento per l'intero corpo di fabbrica.

Tale metodologia garantisce un'elevata efficienza computazionale e preserva la congruenza fisica dei dati estratti dal modello 2D. Essa evita, infatti, il ricorso a tecniche di interpolazione spaziale preventiva (quali *Triangulated Irregular Network* - TIN o *Inverse Distance Weighting* - IDW) che potrebbero introdurre artefatti numerici o alterazioni locali nei valori dei tiranti idrici e delle velocità reali.

Le configurazioni del plugin relative agli scenari idraulici analizzati (T50, T200 e T500) sono riportate nelle figure Fig. 7.71, 7.72 e 7.73.

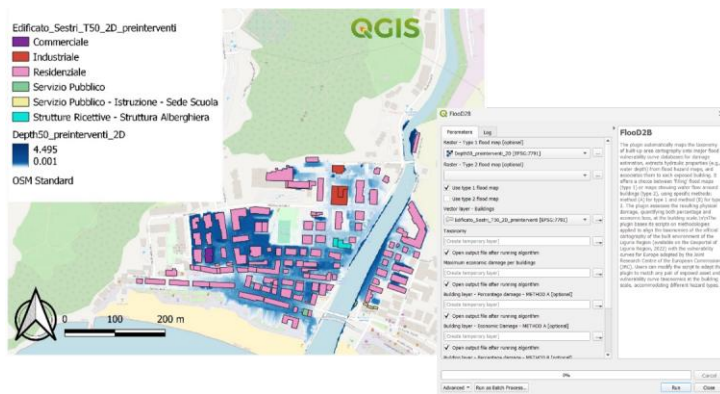


Fig. 7.71 FloodD2B per T50 pre-interventi 2D (QGIS).

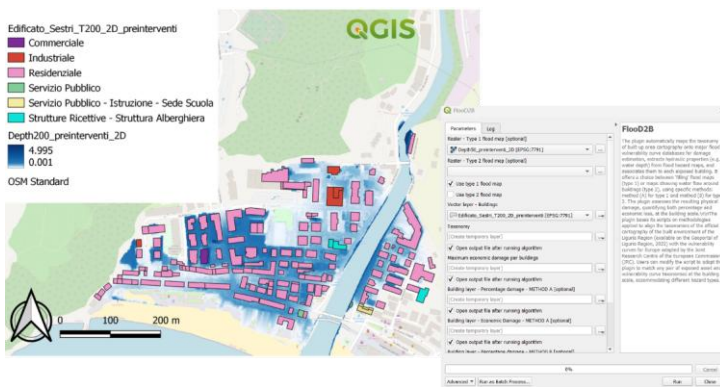


Fig. 7.72 FloodD2B per T200 pre-interventi 2D (QGIS).

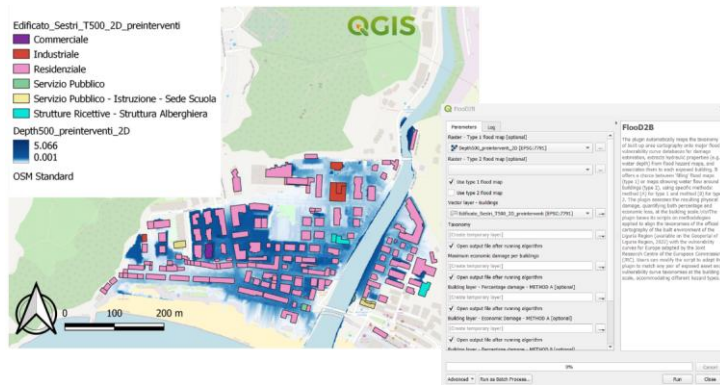


Fig. 7.73 FloodD2B per T500 pre-interventi 2D (QGIS).

Al termine del processo di calcolo, il plugin restituisce quattro layer vettoriali che integrano i risultati della stima: profondità media, percentuale di danno e danno economico in €. Di seguito si riportano maggiori dettagli sui file di output:

- layer puntuali (due file): contengono le informazioni di danno associate ai centroidi degli edifici;
- layer poligonali (due file): mantengono la geometria originale della sagoma dell'edificio.

Ai fini della restituzione cartografica nella presente tesi, sono stati privilegiati i layer poligonali. Questi permettono una visualizzazione spaziale immediata e intuitiva del rischio a scala urbana, consentendo di tematizzare l'intero edificio in base alle classi di danno definite (da “Nessun danno” a “Danno molto elevato”). Ciò garantisce una rappresentazione visivamente coerente con l'area effettivamente occupata dalle strutture nel tessuto urbanizzato, come si può osservare dalle seguenti Fig. 7.74, 7.75, 7.76, 7.77, 7.78 e 7.79.

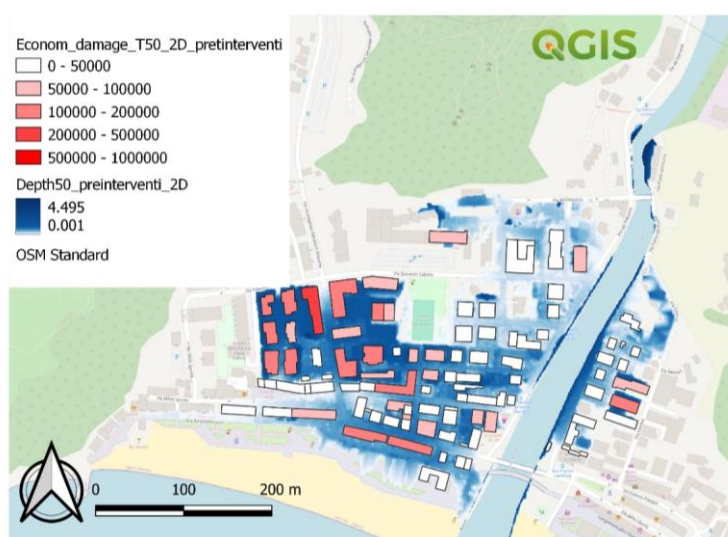


Fig. 7.74 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T200 (pre-interventi) 2D in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

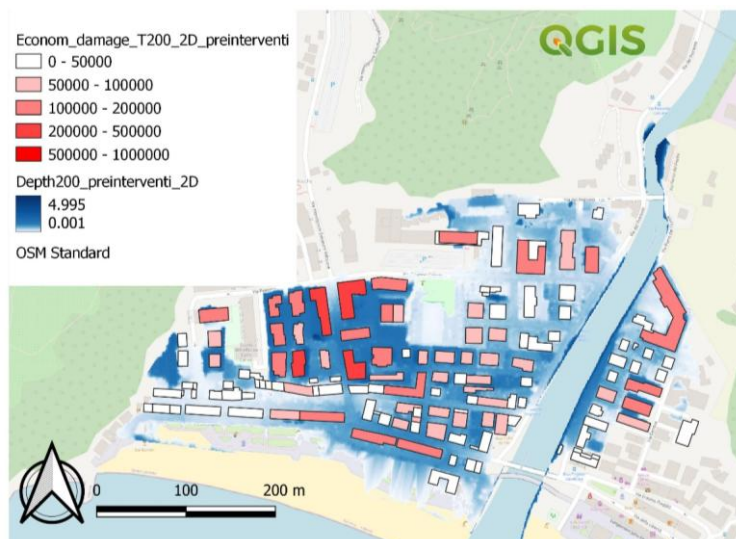


Fig. 7.75 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T200 (pre-interventi) 2D in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

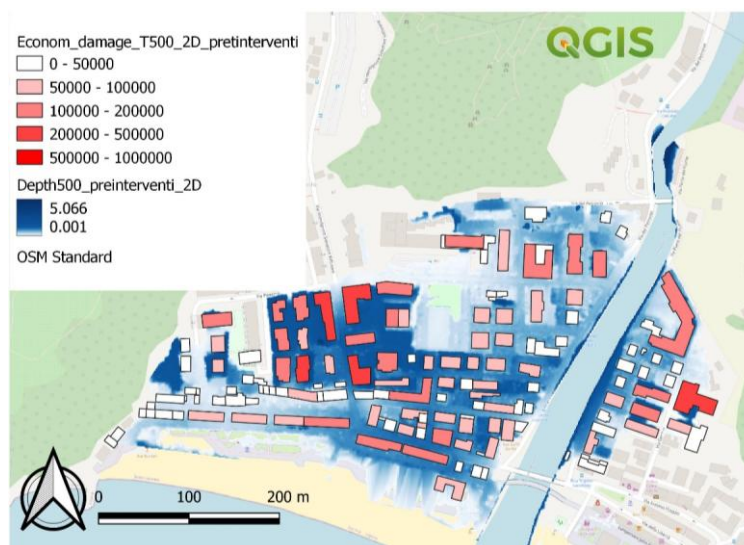


Fig. 7.76 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio per T500 (pre-interventi) 2D in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

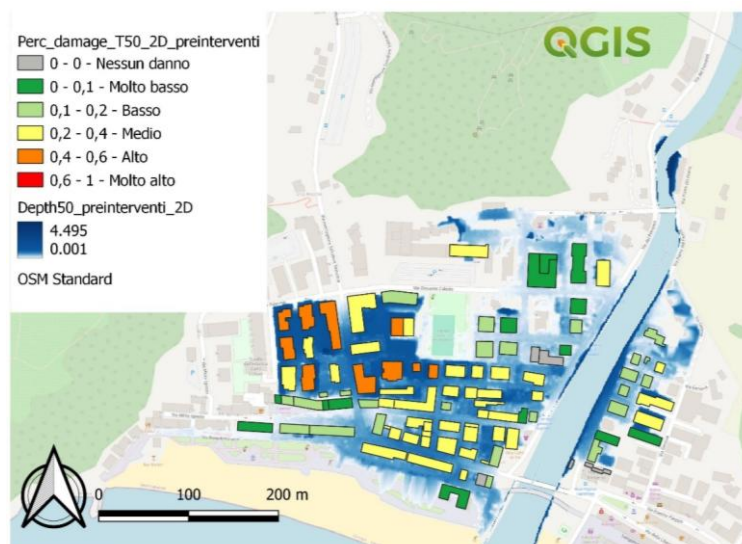


Fig. 7.77 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T50 pre-interventi 2D (QGIS).

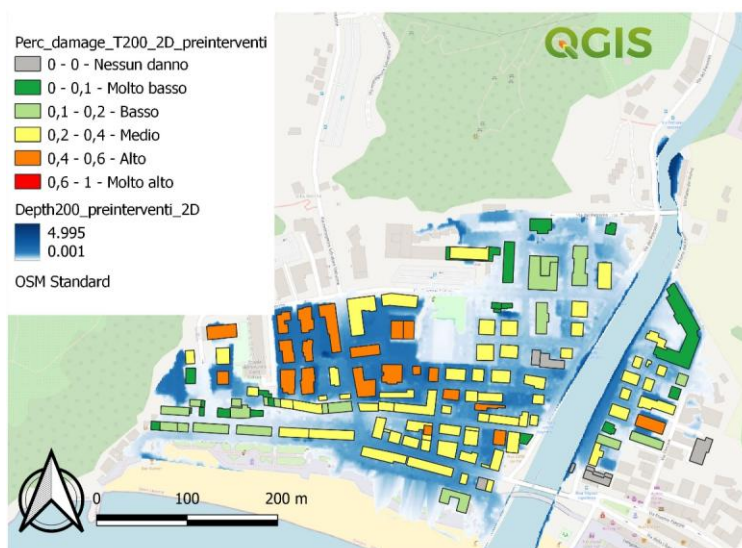


Fig. 7.78 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T200 pre-interventi 2D (QGIS).

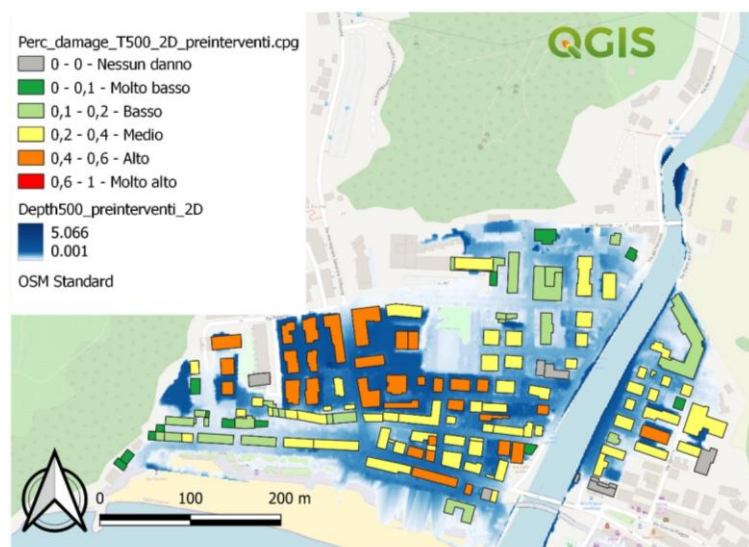


Fig. 7.79 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio per T500 pre-interventi 2D (QGIS).

7.10. Analisi idraulica 2D dello stato di progetto con HEC-RAS

Definito il quadro idraulico dello stato attuale, la fase successiva dello studio si è concentrata sulla trasposizione bidimensionale delle varianti geometriche d'alveo, coerentemente con le strategie di mitigazione del rischio pianificate. L'intento è quello di valutare l'effettiva risposta idrodinamica del tratto focivo del torrente Petronio nei confronti di un sistema combinato di opere strutturali, progettate per ottimizzare la capacità di deflusso e garantire i franchi idraulici necessari.

In questo contesto, l'elemento di continuità e al contempo la base di partenza per l'analisi 2D è rappresentato dalla superficie topografica già modificata e validata durante la precedente modellazione monodimensionale. Questo piano geometrico "post-intervento", importato direttamente all'interno del software HEC-RAS, ha permesso di impostare le simulazioni bidimensionali sulle medesime condizioni di forzante idraulica utilizzate per lo stato di fatto, garantendo così una perfetta confrontabilità e coerenza tra gli scenari pre e post-opera.

7.10.1. Riprofilatura del fondo alveo

L'ottimizzazione della pendenza longitudinale del torrente nel tratto d'analisi, finalizzata alla rimozione delle irregolarità geometriche locali e dei depositi sedimentari che ostacolavano il deflusso, ha trovato la sua attuazione diretta attraverso l'importazione della geometria già modificata in fase 1D. Per garantire l'assoluta coerenza e confrontabilità tra i due approcci di

calcolo, la modellazione bidimensionale ha infatti ereditato la riprofilatura d'alveo precedentemente condotta sezione per sezione.

In questo modo, la superficie di calcolo del modello 2D recepisce l'abbassamento del letto del torrente in corrispondenza delle barre di sedimento e dei punti di accumulo locali, così come la sistematica eliminazione delle contropendenze originarie lungo l'asse fluviale da monte verso valle. Il profilo longitudinale così integrato presenta un andamento strettamente decrescente verso la sezione di foce; tale andamento assicura la corretta continuità del gradiente idraulico e ottimizza la capacità di convogliamento della corrente all'interno della griglia bidimensionale.

7.10.2. Inserimento delle arginature

Definito il profilo del fondo alveo, l'analisi idrodinamica ha evidenziato la necessità di contenere i franchi di esondazione, specialmente nei tratti limitrofi alle aree a maggiore pressione antropica. Nella modellazione bidimensionale, il sistema di arginature di progetto – già geometricamente definito e integrato nel terreno modificato derivante dall'analisi 1D.

La configurazione e l'altezza di tali opere longitudinali rispondono allo scenario idrologico di riferimento per le opere di difesa, corrispondente alla portata con tempo di ritorno pari a 200 anni ($Q_{200} = 734 \text{ m}^3/\text{s}$). In piena conformità con il quadro normativo italiano (D.Lgs. 152/2006 e direttive tecniche dell'Autorità di Bacino Distrettuale), la quota di sommità delle arginature include un franco di sicurezza geometrico di 50 cm, sommato direttamente al picco del pelo libero calcolato per la Q_{200} nello stato di fatto. Tale franco garantisce il confinamento idraulico della piena di progetto, assorbendo le incertezze intrinseche della modellazione (quali oscillazioni locali del pelo libero o fenomeni di trasporto solido).

Per evidenziare l'efficacia delle opere, nella Fig. 7.80 viene presentata la mappa contenente la geometria già modificata. L'introduzione delle arginature determina un netto confinamento dei tiranti idraulici in alveo; l'efficacia dell'intervento è dimostrata quantitativamente dalla drastica riduzione dell'estensione della superficie allagata nel sedime urbano circostante e dall'azzeramento dei battenti d'acqua nelle aree precedentemente colpite dall'esondazione.

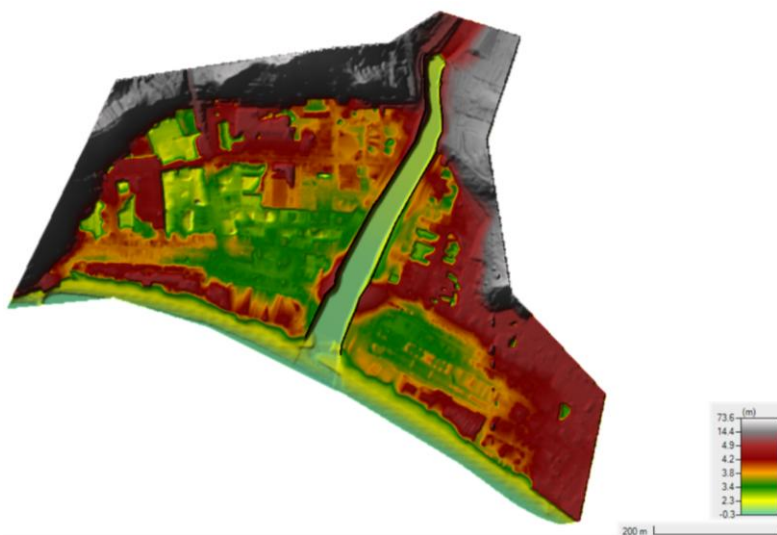


Fig. 7.80 Rappresentazione della mappa contenente la geometria modificata con riprofilatura e arginatura (HEC-RAS).

7.11. Simulazione idraulica e restituzione grafica post-intervento

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati della modellazione idraulica condotta sullo scenario “post-intervento”, finalizzata a quantificare l’efficacia delle opere di mitigazione progettate per il tratto focivo del torrente Petronio. La metodologia adottata replica fedelmente l’iter procedurale utilizzato per l’analisi dello stato di fatto, garantendo così la comparabilità dei risultati.

A seguito della modifica della geometria dell’alveo, comprendente la riprofilatura del fondo e l’adeguamento delle quote arginali è stata eseguita la simulazione numerica in HEC-RAS. I risultati ottenuti permettono di visualizzare i nuovi profili di tiranti e, tramite il modulo *RAS Mapper*, di generare i layer raster di inondabilità per i tre scenari di periodo di ritorno (T50, T200 e T500).

Nella Fig. 7.81, 7.82 e 7.83 è possibile osservare le mappe di inondazione post-intervento.

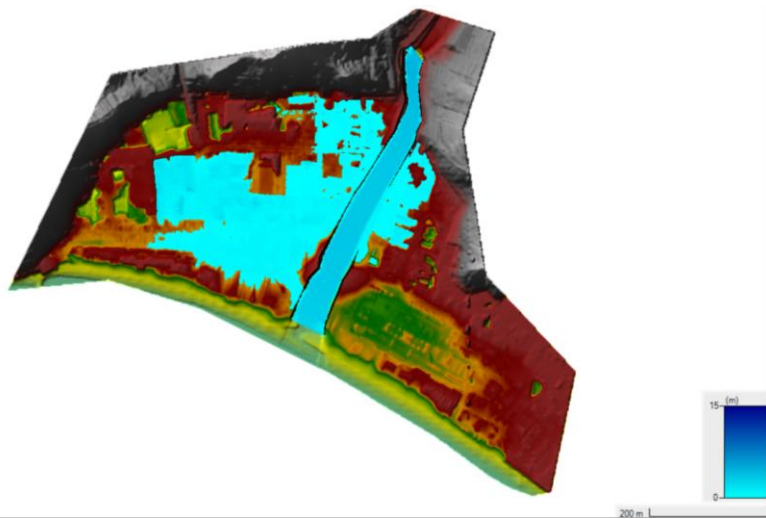


Fig. 7.81 Mappa di inondazione relativa alla portata Q_{50} post-interventi 2D (HEC-RAS).

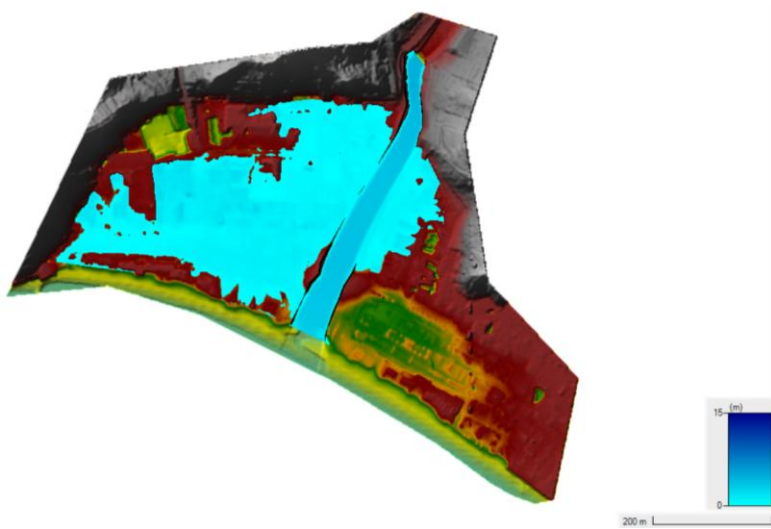


Fig. 7.82 Mappa di inondazione relativa alla portata Q_{200} post-interventi 2D (HEC-RAS).

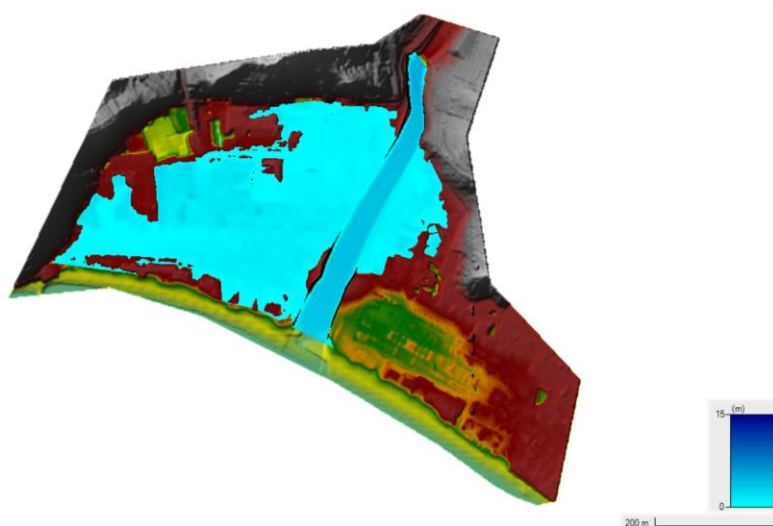


Fig. 7.83 Mappa di inondazione relativa alla portata Q_{500} post-interventi 2D (HEC-RAS).

7.12. Risultati del processo 2D dello stato di progetto con il plugin Flood2B

Le mappe dei battenti idrici, derivanti dalla modellazione 2D in HEC-RAS per lo stato di progetto (Q_{50} , Q_{200} e Q_{500}), sono state elaborate in QGIS tramite il plugin Flood2B per valutare la vulnerabilità e stimare il potenziale danno economico agli edifici esposti.

Nelle sezioni successive vengono discussi i risultati del plugin, analizzando la distribuzione spaziale dei battenti e la conseguente stima economica per i tre tempi di ritorno simulati.

7.12.1. Layer “Battenti” derivante da analisi 2D con il software HEC-RAS

La valutazione degli interventi di mitigazione del rischio idraulico per il torrente Petronio (area di Riva Trigoso) è stata eseguita in ambiente GIS tramite il plugin Flood2B. Il processo ha previsto l’elaborazione di mappe raster di inondazione (*floodMap*, risoluzione 1m) secondo una metodologia speculare a quella dello scenario pre-intervento:

- generazione dei raster: importazione dei dati modellati in HEC-RAS per i tre scenari di ritorno (T_{50} , T_{200} e T_{500});
- confronto visivo: applicazione della stessa scala cromatica in tonalità di blu per evidenziare immediatamente l’estensione degli allagamenti e i tiranti idrici residui sugli edifici (mostrati nelle Fig. 7.84, 7.85 e 7.86).

Mentre l’esame visivo permette una prima valutazione d’insieme, l’analisi quantitativa dei benefici (idraulici ed economici) e il confronto dettagliato con le cartografie ufficiali sono trattati nel capitolo 8.

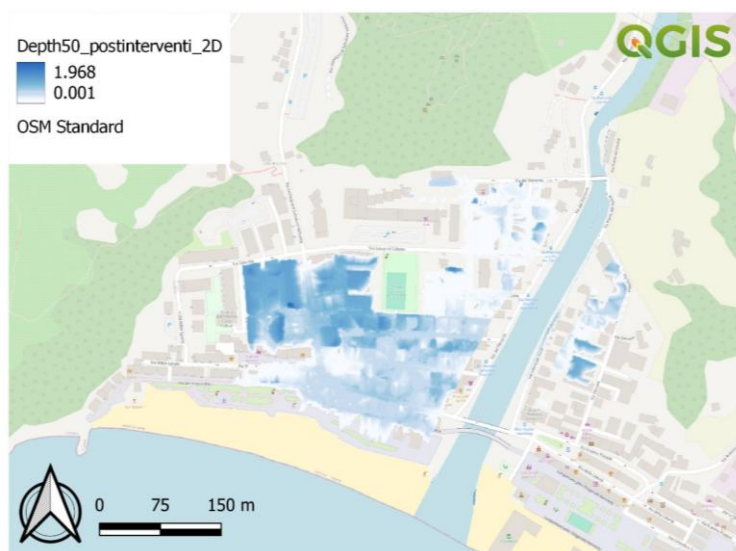


Fig. 7.84 Layer “Battenti da studio idraulico post-interventi 2D su HEC-RAS” del torrente Petronio per T50 (QGIS).

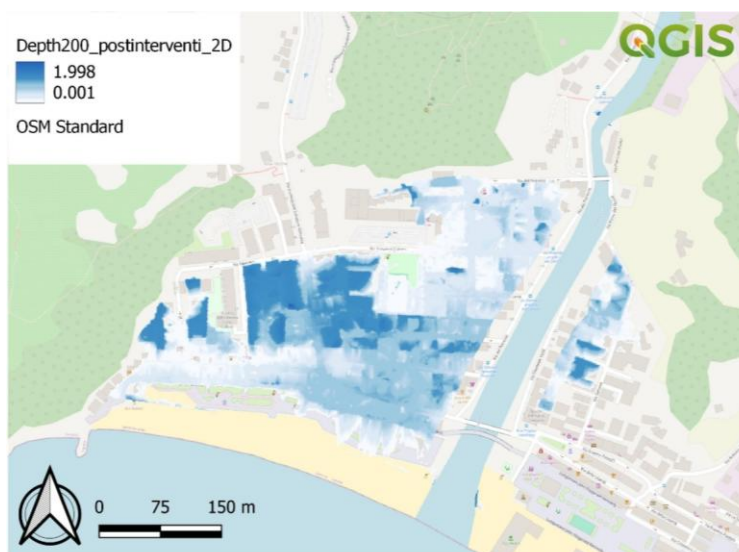


Fig. 7.85 Layer “Battenti da studio idraulico post-interventi 2D su HEC-RAS” del torrente Petronio per T200 (QGIS).

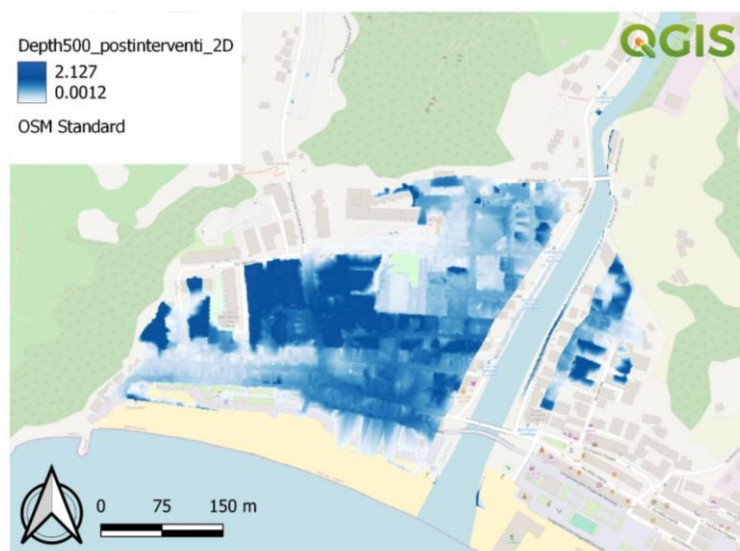


Fig. 7.86 Layer “Battenti da studio idraulico post-interventi 2D su HEC-RAS” del torrente Petronio per T500 (QGIS).

7.12.2. Layer vettoriale “Edificato”

La procedura di filtraggio e selezione dell’edificato adottata per lo stato di fatto è stata applicata in modo analogo agli scenari post-intervento. Partendo dal database del Geoportale della Liguria, l’isolamento dei corpi di fabbrica interagenti con i nuovi domini idraulici ha previsto l’aggiornamento delle statistiche zonali, tramite sovrapposizione dei vettoriali ai raster di batimetria (T50, T200 e T500), e l’applicazione di un filtro booleano ($Media > 0$). Questa query ha permesso di estrarre esclusivamente le strutture con tirante idrico maggiore di zero, garantendo la consistenza del dataset ed evitando errori di calcolo in Flood2B causati da record privi di dati. I layer risultanti contengono quindi i soli edifici effettivamente interessati dall’inondazione a seguito delle opere di mitigazione (Fig. 7.87, 7.88 e 7.89).



Fig. 7.87 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T50 post-interventi 2D (QGIS).



Fig. 7.88 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T200 post-interventi 2D (QGIS).

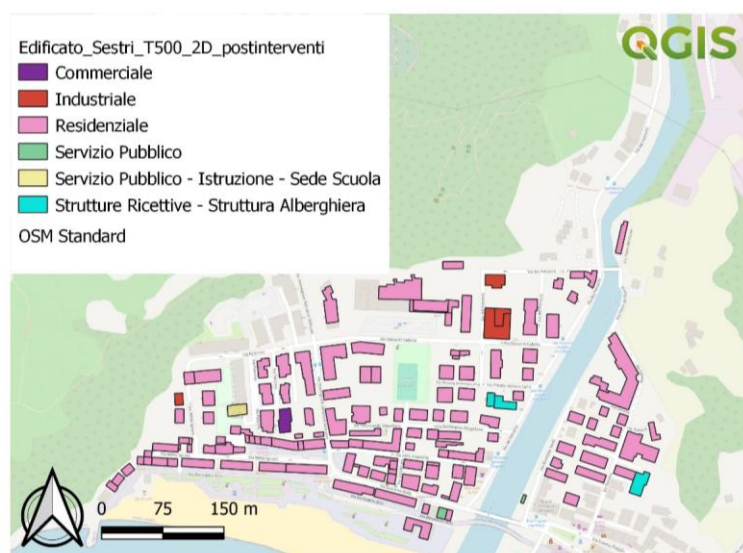


Fig. 7.89 Classi d'uso del layer raster "Edificato" in area inondabile T500 post-interventi 2D (QGIS).

Per valutare l'efficacia delle opere progettate, è stata eseguita un'analisi cartografica comparativa in ambiente GIS sovrapponendo gli edifici esposti nello scenario pre-intervento con quelli ancora vulnerabili nella configurazione post-interventi. Al fine di rendere immediato il riscontro visivo, è stata adottata una simbologia a contrasto: un riempimento pieno verde identifica gli edifici allagati nello stato di fatto, mentre un bordo vuoto rosso perimetra le strutture che continuano a subire un battente d'acqua anche dopo la mitigazione. Di conseguenza, i poligoni interamente verdi evidenziano gli edifici messi in sicurezza dall'opera, mentre la persistenza del bordo rosso segnala le vulnerabilità residue. Questa metodologia grafica è stata applicata a tutti gli scenari analizzati, permettendo di confrontare la risposta del tessuto urbano di Sestri Levante al variare del tempo di ritorno (i cui risultati sono riportati nelle Fig. 7.90, 7.91 e 7.92).

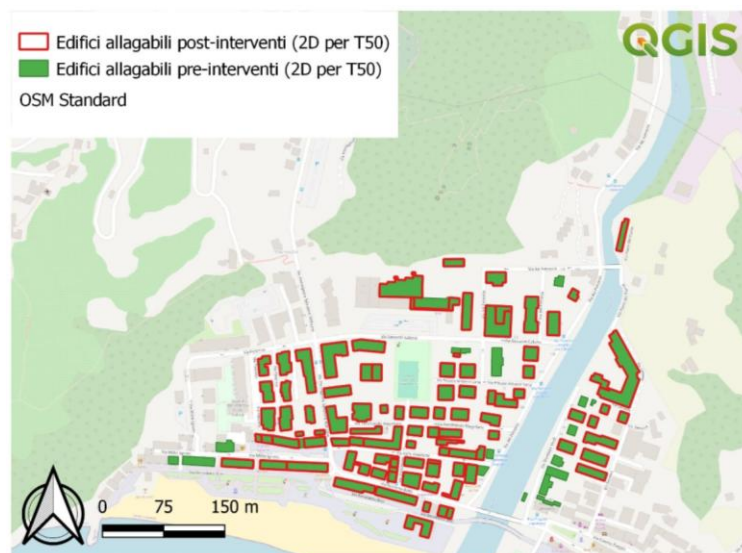


Fig. 7.90 Analisi spaziale comparativa della vulnerabilità dell'edificato (scenario T50) pre e post-interventi di mitigazione 2D. I poligoni verdi indicano gli edifici messi in sicurezza, quelli con il bordo rosso individuano le strutture che permangono a rischio (QGIS).

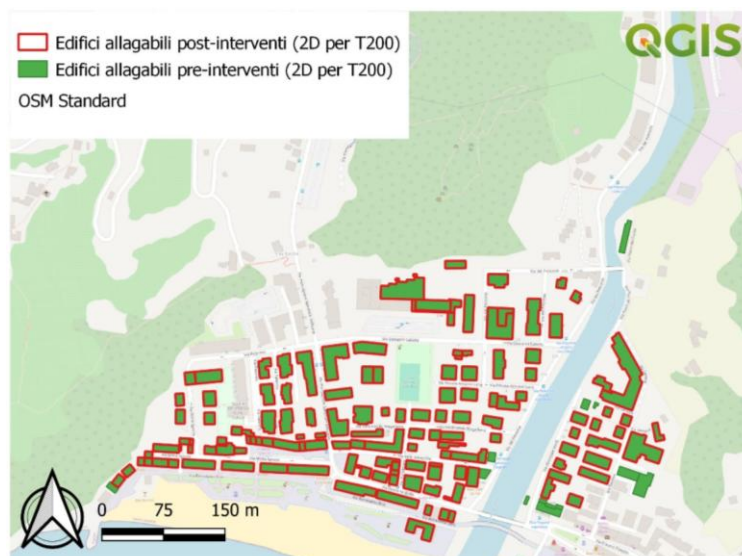


Fig. 7.91 Analisi spaziale comparativa della vulnerabilità dell'edificato (scenario T200) pre e post-interventi di mitigazione 2D. I poligoni verdi indicano gli edifici messi in sicurezza, quelli con il bordo rosso individuano le strutture che permangono a rischio (QGIS).

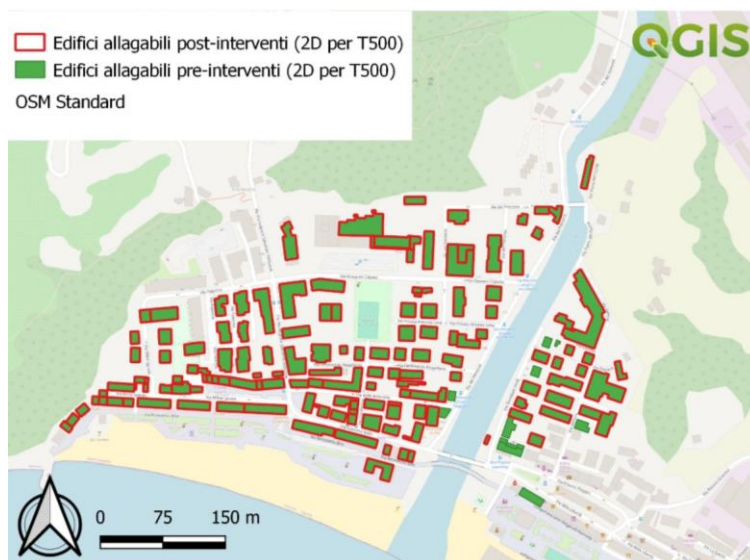


Fig. 7.92 Analisi spaziale comparativa della vulnerabilità dell'edificato (scenario T500) pre e post-interventi di mitigazione 2D. I poligoni verdi indicano gli edifici messi in sicurezza, quelli con il bordo rosso individuano le strutture che permangono a rischio (QGIS).

7.12.3. Metodologia di stima del danno tramite il plugin FloodD2B

La stima dei danni potenziali nella configurazione post-intervento è stata condotta applicando la medesima procedura automatizzata tramite il plugin FloodD2B in ambiente QGIS, basata sul campionamento diretto al centroide. Il flusso di lavoro, speculare a quello dello stato di fatto, ha sfruttato i nuovi raster di inondazione post-interventi per estrarre i tiranti idrici di riferimento. Come fase preliminare è stata effettuata la correzione topografica dei vettoriali (*Fix geometries*), sono stati generati i centroidi geometrici degli edifici per garantire un trasferimento univoco degli attributi. Successivamente, tramite l'algoritmo *Sample raster values*, a ogni centroide è stato associato il rispettivo valore di battente idrico, assunto come altezza d'acqua utile al calcolo del danno residuo. Questo approccio ha assicurato rapidità computazionale e accuratezza, azzerando le alterazioni da interpolazione spaziale. Le impostazioni del plugin per i tre scenari (T50, T200 e T500) sono riportate nelle Fig. 7.92, 7.93 e 7.94.

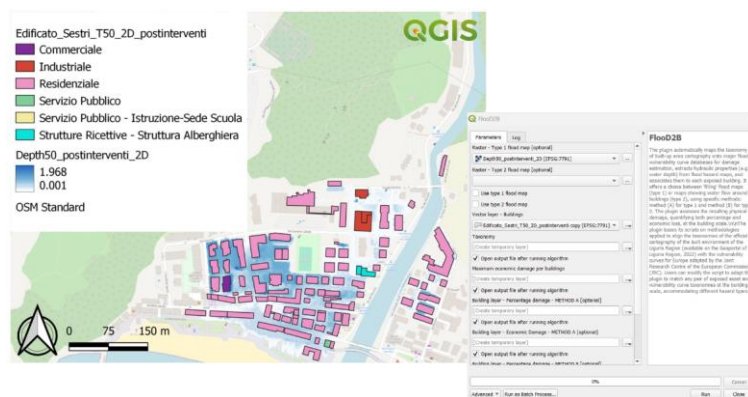


Fig. 7.92 Flood2B per T50 post-interventi 2D (QGIS).

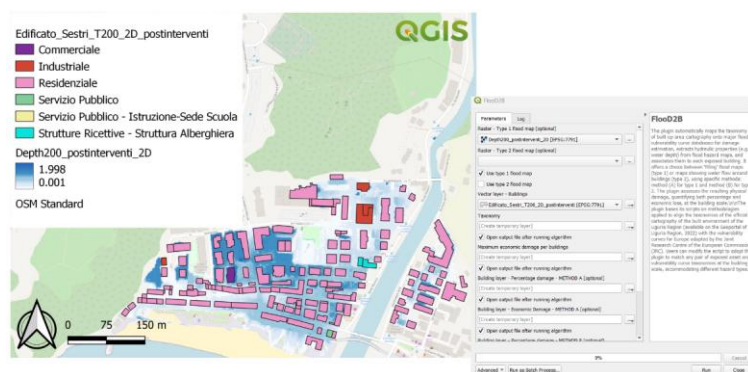


Fig. 7.93 Flood2B per T200 post-interventi 2D (QGIS).

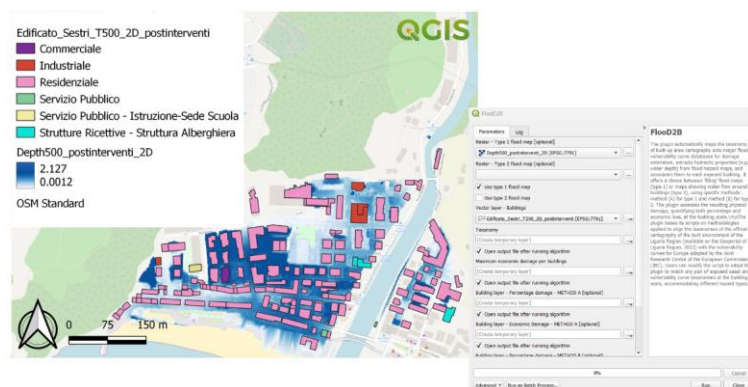


Fig. 7.94 Flood2B per T500 post-interventi 2D (QGIS).

Ai fini della restituzione cartografica, sono stati privilegiati i layer poligonali, in grado di offrire una visualizzazione spaziale immediata e intuitiva del rischio a scala urbana. Questo approccio consente di tematizzare l'intero edificio in base alle classi di danno definite (da "Nessun danno" a "Danno molto elevato"), garantendo una rappresentazione visivamente coerente con la reale impronta a terra delle strutture nel tessuto urbanizzato. L'efficacia di tale tematizzazione e la distribuzione spaziale del danno economico stimato per i diversi scenari sono osservabili nelle Fig. 7.95, 7.96, 7.97, 7.98, 7.99 e 7.100.

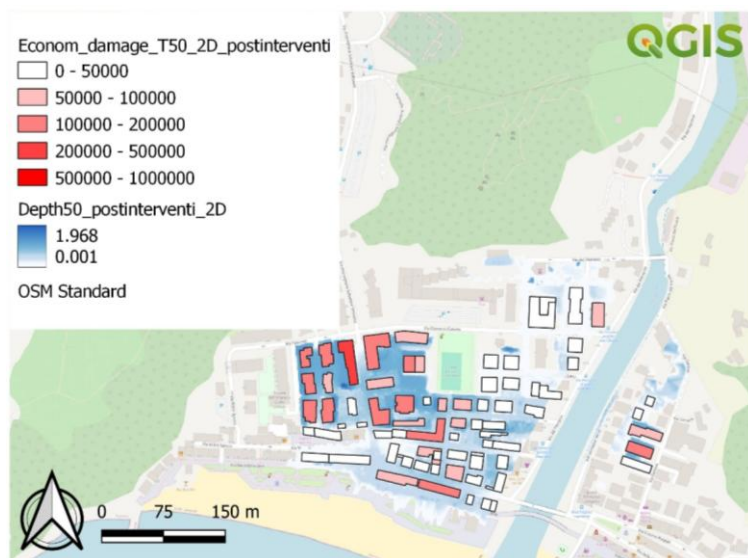


Fig. 7.95 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi 2D per T50 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

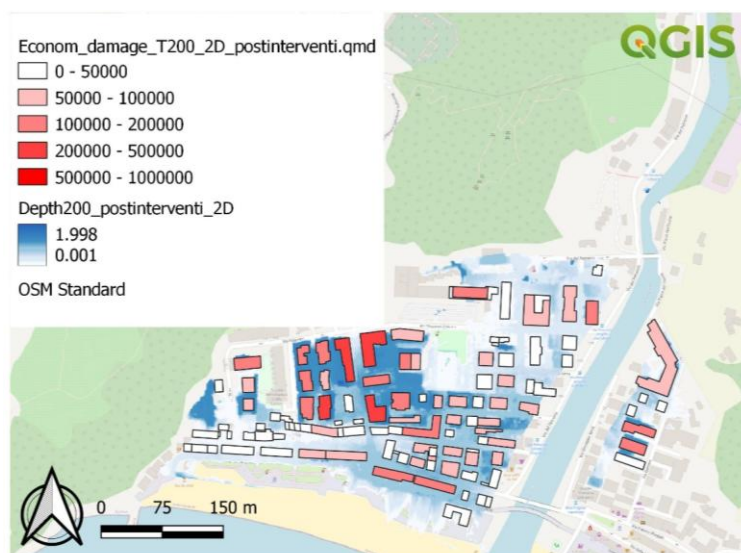


Fig. 7.96 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi 2D per T200 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

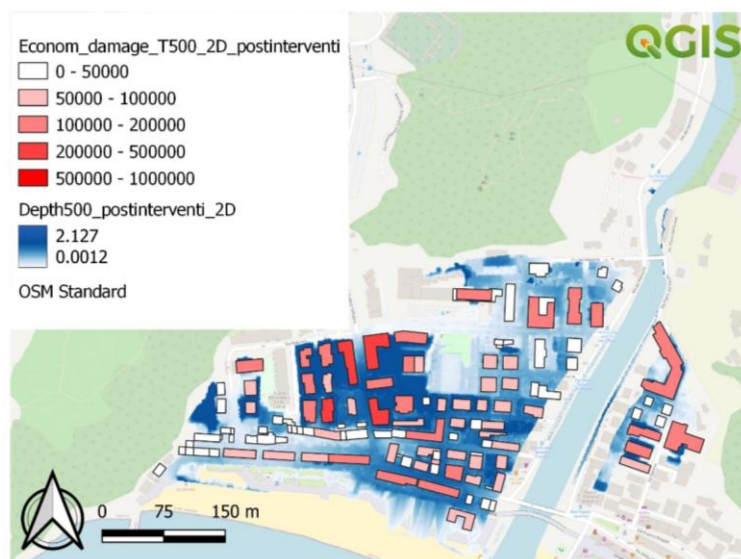


Fig. 7.97 Danno economico degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi 2D per T500 in accordo con le linee guida JRC (QGIS).

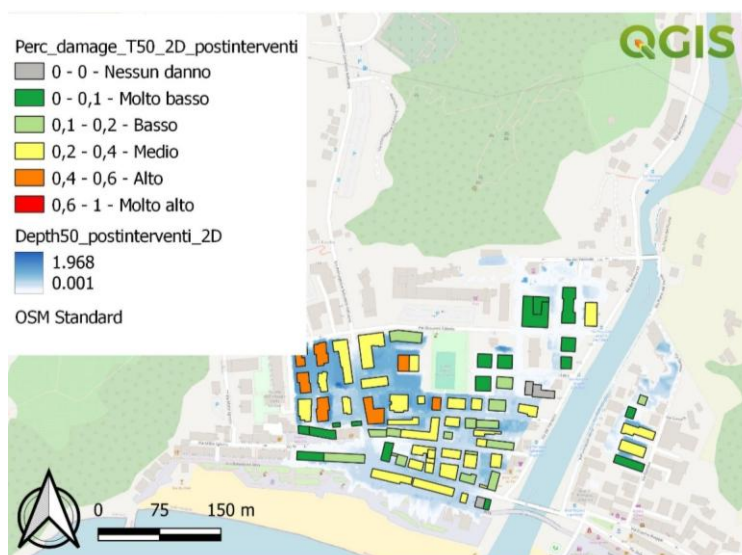


Fig. 7.98 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi 2D per T50 (QGIS).

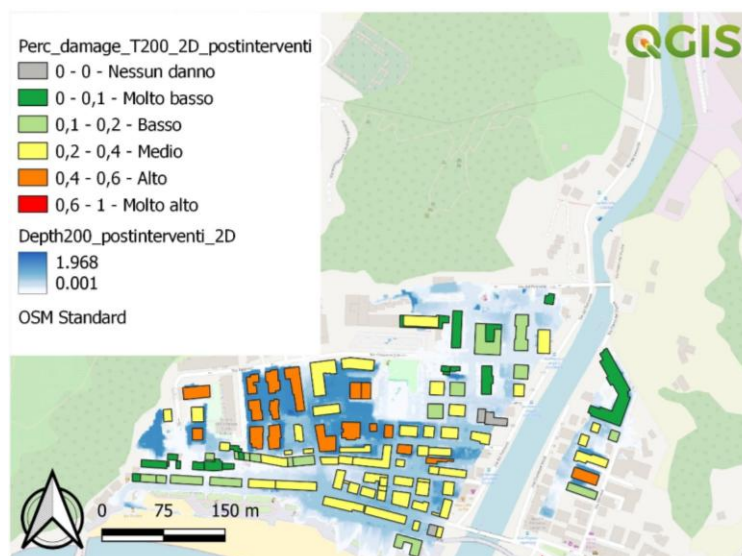


Fig. 7.99 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi 2D per T200 (QGIS).

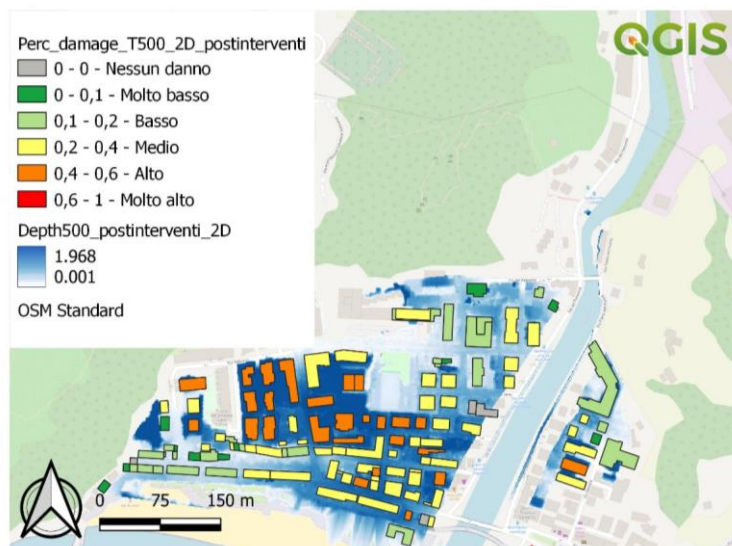


Fig. 7.100 Percentuale di danno degli edifici circostanti il torrente Petronio post-interventi 2D per T500 (QGIS).

8. Analisi dei dati

Il presente capitolo è dedicato all'analisi e al confronto dei risultati ottenuti attraverso la modellazione idraulica dello stato di fatto e degli scenari di progetto. L'obiettivo è quantificare l'efficacia degli interventi di mitigazione proposti, quali la riprofilatura dell'alveo e il consolidamento delle arginature, nel ridurre il rischio idraulico sull'abitato di Riva Trigoso. Attraverso l'integrazione dei risultati prodotti con le simulazioni 1D/2D in ambiente HEC-RAS e l'elaborazione GIS tramite il plugin Flood2B, si è proceduto alla stima dei danni economici e strutturali per i diversi tempi di ritorno (T50, T200, T500). L'analisi qui presentata, articolata sia in termini qualitativi sia quantitativi, permette di valutare il miglioramento delle condizioni di sicurezza del territorio e di validare, su base tecnica, la sostenibilità degli interventi progettati.

8.1. Analisi e confronto dei dati ottenuti da simulazione 1D

Il presente capitolo segna il passaggio fondamentale dalla fase in cui sono state delineate le criticità idrauliche e le vulnerabilità del tessuto urbano di Riva Trigoso, alla fase di progettazione e valutazione economica delle soluzioni. Se i capitoli precedenti hanno fornito il quadro conoscitivo, basato sulla modellazione dello stato di fatto, il presente capitolo introduce la metodologia operativa utilizzata per testare l'efficacia delle strategie di mitigazione proposte riferite alla simulazione monodimensionale.

Lo sviluppo di questa sezione si articola su due pilastri logici che guidano l'intera analisi:

- identificazione delle criticità strutturali: l'analisi funge da ponte, giustificando la necessità tecnica degli interventi (pulizia alveo, manutenzione argini) in risposta ai limiti funzionali osservati nel tratto terminale del torrente Petronio;
- la catena modellistica integrata: questo processo consente di quantificare numericamente il miglioramento delle condizioni di sicurezza, passando da un approccio puramente descrittivo a un approccio previsionale;

In definitiva, questo capitolo non si limita a descrivere “cosa” verrà fatto, ma definisce il rigore metodologico con cui verranno misurati i benefici in termini reali di protezione del territorio, ponendo le premesse per dimostrare come l'integrazione di modellazione idraulica, analisi GIS e valutazione economica costituisca uno strumento essenziale per la gestione resiliente e consapevole del bacino del torrente Petronio.

8.1.1. Confronto del pelo libero pre e post-interventi

L'efficacia degli interventi di mitigazione proposti è stata valutata attraverso il confronto diretto tra i profili del pelo libero ottenuti dalla modellazione 1D in HEC-RAS nello stato di fatto e nello stato di progetto. L'obiettivo principale è verificare l'abbattimento del livello idrico in corrispondenza delle aree urbanizzate critiche lungo il torrente Petronio.

Di seguito si analizza il comportamento del sistema idraulico per i tre scenari di piena considerati.

- Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.1 e Tab. 8.1):

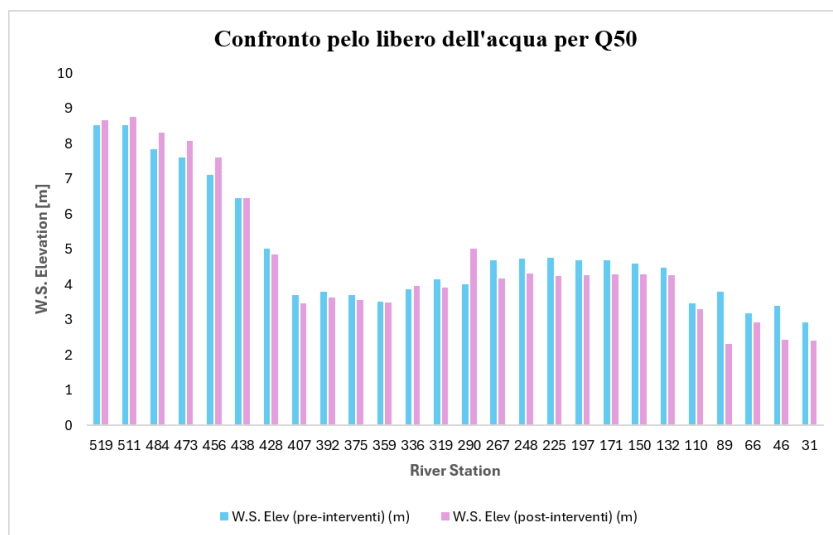


Fig. 8.1 Confronto del pelo libero del flusso dell'acqua del torrente Petronio per T50 (Excel).

River Sta	Profile	W.S. Elev (pre-interventi)	W.S. Elev (post-interventi)
		(m)	(m)
519	Q50	8.52	8.67
511	Q50	8.53	8.76
484	Q50	7.85	8.31
473	Q50	7.6	8.07
456	Q50	7.12	7.61
438	Q50	6.45	6.46
428	Q50	5.01	4.86
407	Q50	3.7	3.47
392	Q50	3.79	3.62
375	Q50	3.69	3.55
359	Q50	3.52	3.5
336	Q50	3.86	3.97
319	Q50	4.14	3.92
290	Q50	4	5.02
267	Q50	4.68	4.17
248	Q50	4.73	4.32
225	Q50	4.77	4.25
197	Q50	4.68	4.27
171	Q50	4.69	4.29
150	Q50	4.59	4.3
132	Q50	4.48	4.26
110	Q50	3.46	3.31
89	Q50	3.79	2.31
66	Q50	3.19	2.92
46	Q50	3.39	2.44
31	Q50	2.93	2.4

Per la portata con tempo di ritorno di 50 anni, il grafico evidenzia una tendenza positiva di

Tab. 8.1 Calori di W.S. Elevation pre e post-interventi del torrente Petronio per T50 (Excel).

abbassamento del pelo libero lungo quasi tutto il tratto analizzato. L'incremento della sezione di deflusso e la regolarizzazione dell'alveo hanno permesso una laminazione più efficiente della piena. Si osserva un abbattimento medio del tirante idrico compreso tra 15 cm. Tuttavia, si nota una persistenza dei livelli in prossimità della sezione a monte e la sezione 290 che si trova circa a metà del tratto analizzato in corrispondenza di Riva Trigoso, dove la geometria esistente limita ancora la piena espansione della corrente, configurandosi come un "collo di bottiglia" strutturale che gli interventi di sola riprofilatura e innalzamento degli argini non riescono a mitigare integralmente.

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.2 e Tab 8.2):

Commentato [IF3]: Rivedere.

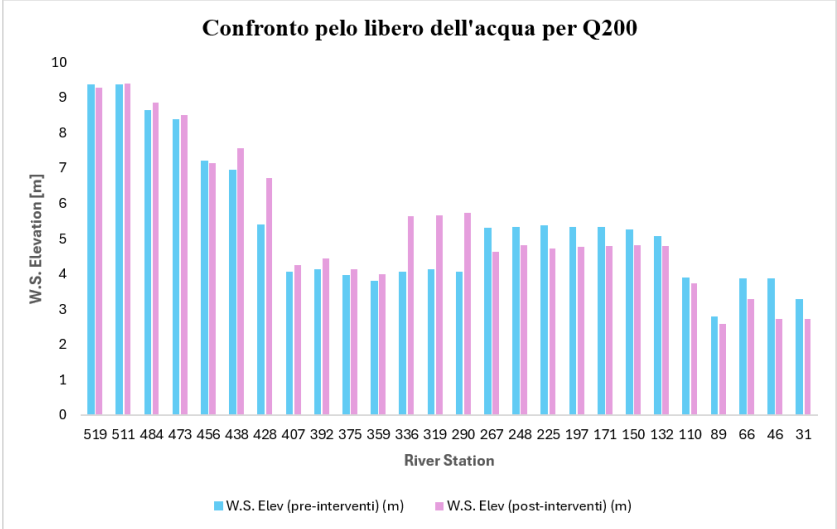


Fig. 8.2 Confronto del pelo libero del flusso dell'acqua del torrente Petronio per T200 (Excel).

River Sta	Profile	W.S. Elev (pre-interventi)	W.S. Elev (post-interventi)
		(m)	(m)
519	Q200	9.37	9.27
511	Q200	9.36	9.4
484	Q200	8.64	8.86
473	Q200	8.37	8.5
456	Q200	7.21	7.13
438	Q200	6.95	7.56
428	Q200	5.4	6.72
407	Q200	4.06	4.26
392	Q200	4.13	4.43
375	Q200	3.96	4.12
359	Q200	3.79	4
336	Q200	4.05	5.64
319	Q200	4.11	5.66
290	Q200	4.06	5.73
267	Q200	5.3	4.63
248	Q200	5.33	4.82
225	Q200	5.36	4.73
197	Q200	5.31	4.76
171	Q200	5.32	4.79
150	Q200	5.24	4.81
132	Q200	5.07	4.78
110	Q200	3.88	3.72
89	Q200	2.79	2.58
66	Q200	3.85	3.29
46	Q200	3.87	2.73
31	Q200	3.27	2.72

Tab. 8.2 Valori di W.S. Elevation pre e post-interventi del torrente Petronio per T200 (Excel).

Analizzando il grafico relativo al tempo di ritorno T200, si osserva che la linea rosa (post-intervento) si posiziona costantemente al di sotto della linea blu (pre-intervento), confermando l'efficacia globale dell'opera. Tuttavia, si nota una progressiva convergenza delle due linee in corrispondenza di alcune sezioni, dove l'abbattimento del tirante idrico risulta sensibilmente ridotto rispetto al resto dell'asta fluviale. Tale comportamento indica che, pur in presenza di una maggiore capacità di deflusso, in quei tratti la dinamica idraulica è governata da fattori di resistenza al moto (rugosità) o da costrizioni geometriche fisse (come pile di ponti o restringimenti naturali) che limitano l'abbassamento del livello idrico, indipendentemente dall'allargamento della sezione d'alveo effettuato.

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.3 e Tab. 8.3):

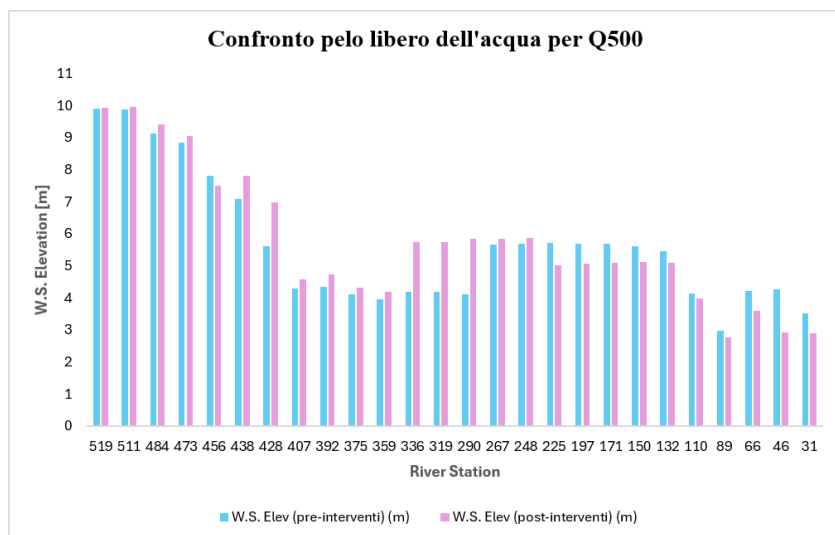


Fig. 8.3 Confronto del pelo libero del flusso dell'acqua del torrente Petronio per T500 (Excel).

River Sta	Profile	W.S. Elev (pre-interventi) (m)	W.S. Elev (post-interventi) (m)
519	Q500	9.89	9.94
511	Q500	9.88	9.96
484	Q500	9.12	9.42
473	Q500	8.85	9.05
456	Q500	7.81	7.49
438	Q500	7.09	7.81
428	Q500	5.62	6.98
407	Q500	4.28	4.57
392	Q500	4.33	4.72
375	Q500	4.12	4.32
359	Q500	3.95	4.18
336	Q500	4.18	5.73
319	Q500	4.18	5.75
290	Q500	4.12	5.85
267	Q500	5.66	5.85
248	Q500	5.69	5.86
225	Q500	5.72	5.02
197	Q500	5.68	5.06
171	Q500	5.69	5.1
150	Q500	5.62	5.12
132	Q500	5.45	5.09
110	Q500	4.14	3.98
89	Q500	2.96	2.76
66	Q500	4.2	3.58
46	Q500	4.27	2.92
31	Q500	3.51	2.9

Tab. 8.3 W.S. Elevation pre e post-interventi del torrente Petronio per T500 (Excel).

Per lo scenario estremo (T500), il sistema raggiunge una saturazione che riduce l'impatto

positivo degli interventi. Nonostante l'abbassamento sia presente, in alcune sezioni si osservano sezioni in cui il pelo libero post-intervento risulta quasi identico allo stato di fatto. Ciò conferma che, per portate così elevate, la capacità di trasporto è vincolata più dalle opere d'arte (ponti) e dal rigurgito a valle che dalla sola capacità volumetrica dell'alveo. La stabilità del profilo post-intervento rispetto al pre-intervento suggerisce che, per eventi di tale portata, siano necessarie ulteriori misure strutturali di tipo puntuale o interventi di gestione attiva delle portate a monte.

8.1.2. Confronto della velocità del flusso dell'acqua pre e post-interventi

Dopo aver analizzato le variazioni del profilo del pelo libero, risulta determinante esaminare come gli interventi di progetto abbiano modificato il campo di moto all'interno dell'alveo. Il confronto delle velocità di flusso rappresenta un indicatore critico per valutare non solo l'efficienza idraulica del sistema, ma anche la stabilità morfologica del torrente Petronio.

Ai fini della presente analisi, il parametro di riferimento selezionato è la velocità media nella sezione trasversale del canale principale (*Vel Channel*). Tale grandezza esprime la velocità del deflusso mediata sull'intera area occupata dalla corrente all'interno dell'alveo inciso. La velocità nel canale principale costituisce il dato più rappresentativo delle dinamiche di trasporto solido e delle sollecitazioni idrodinamiche esercitate sulle sponde e sulle strutture presenti.

Un incremento della velocità nel post-intervento, laddove accompagnato da una riduzione del pelo libero, testimonia l'efficacia dell'opera nel favorire un deflusso più rapido, riducendo il tempo di corrivazione e il rischio di rigurgito. Al contrario, una diminuzione della velocità in determinati tratti può indicare un aumento della capacità di invaso locale o una variazione della sezione che, pur riducendo la pressione idrodinamica, richiede un monitoraggio attento in merito alla capacità dell'alveo di movimentare i sedimenti.

Il comportamento dinamico del flusso viene ulteriormente caratterizzato dal Numero di Froude (Fr), parametro adimensionale che mette in relazione la velocità del flusso con la celerità dell'onda di gravità (legata alla profondità idrica). Poiché il numero di Froude è direttamente proporzionale alla velocità, le variazioni registrate in questo capitolo troveranno un riscontro diretto nella transizione del regime di moto, da subcritico a supercritico, che verrà approfondita nel sottocapitolo 8.1.3, al fine di verificare la stabilità strutturale delle difese spondali e prevenire fenomeni erosivi localizzati.

Infine, è necessario sottolineare come l'analisi della velocità è un parametro cardine per la quantificazione del rischio. La letteratura tecnica e i modelli di danno (come quelli implementati in FLOOD2B) riconoscono che il danno subito da un manufatto edilizio non dipende esclusivamente dal battente idrico, ma è una funzione combinata di altezza e velocità.

Correnti a elevata velocità, infatti, esercitano sollecitazioni dinamiche significative, in termini di pressione idrodinamica e forze di trascinamento, che possono causare il cedimento di pareti, infissi o elementi strutturali, anche in presenza di battenti idrici contenuti. Un incremento della velocità, specialmente in prossimità di zone abitate, comporta un aumento del potenziale distruttivo dell'inondazione. Pertanto, il confronto tra lo stato di fatto e lo stato di progetto

permetterà di verificare se la riduzione dei livelli idrici, ottenuta con gli interventi, sia stata accompagnata da una gestione delle velocità tale da mitigare effettivamente la vulnerabilità strutturale degli edifici, riducendo al contempo la componente dinamica del danno economico atteso.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.4 e Tab 8.4):

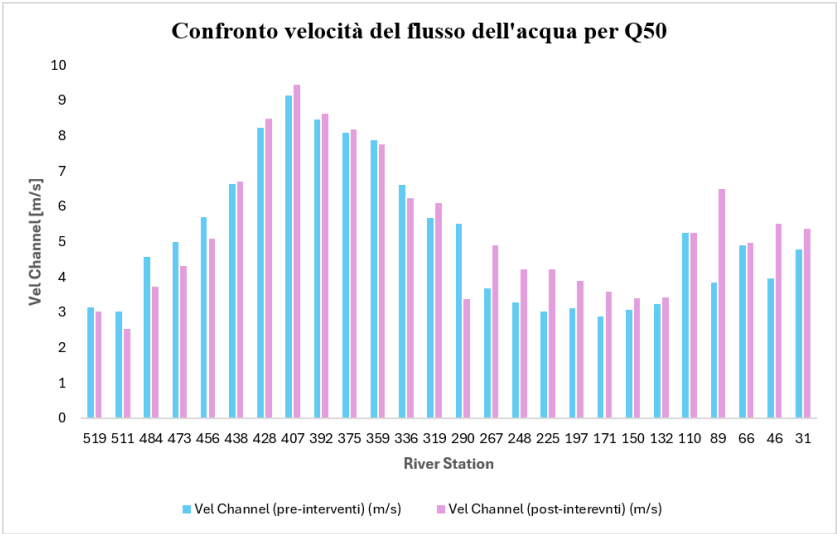


Fig. 8.4 Confronto della velocità del flusso dell'acqua del torrente Petronio per T50 (Excel).

River Sta	Profile	Vel Channel (pre-interventi)	Vel Channel (post-interventi)
		(m/s)	(m/s)
519	Q50	3.14	3.03
511	Q50	3.02	2.52
484	Q50	4.56	3.73
473	Q50	4.98	4.31
456	Q50	5.69	5.09
438	Q50	6.63	6.69
428	Q50	8.22	8.47
407	Q50	9.14	9.44
392	Q50	8.46	8.62
375	Q50	8.09	8.18
359	Q50	7.87	7.75
336	Q50	6.61	6.24
319	Q50	5.66	6.09
290	Q50	5.51	3.37
267	Q50	3.67	4.89
248	Q50	3.28	4.22
225	Q50	3.01	4.21
197	Q50	3.11	3.88
171	Q50	2.89	3.58
150	Q50	3.07	3.4
132	Q50	3.24	3.42
110	Q50	5.24	5.24
89	Q50	3.83	6.48
66	Q50	4.89	4.96
46	Q50	3.96	5.51
31	Q50	4.78	5.36

Tab. 8.4 Valori di Vel Channel pre e post-interventi del torrente Petronio per T50 (Excel).

Il grafico mostra l'andamento della velocità media nel canale principale (*Vel Channel*) lungo il tratto di studio per la portata con tempo di ritorno di 50 anni. La linea blu rappresenta lo stato di fatto, mentre la linea rosa illustra la configurazione post-intervento.

Dall'osservazione dei profili, emergono alcune evidenze chiave:

- in gran parte dell'asta fluviale si osserva un incremento della velocità nel profilo post-intervento. Questo fenomeno è una diretta conseguenza della riprofilatura dell'alveo che, eliminando ostacoli e regolarizzando la sezione, riduce le perdite di carico distribuite, consentendo alla corrente di defluire con una velocità maggiore. Tale condizione è favorevole per lo svuotamento del sistema;
- in corrispondenza delle sezioni nelle quali le velocità pre e post sono circa uguali, si nota una stabilizzazione delle velocità. Questo comportamento è indice del fatto che, in tali punti, il progetto ha bilanciato l'aumento della portata con una variazione geometrica che limita l'accelerazione del flusso, prevenendo potenziali fenomeni erosivi al piede delle sponde;
- per lo scenario T50, l'incremento di velocità registrato rimane all'interno di un range di sicurezza che non aumenta significativamente le sollecitazioni dinamiche sui manufatti esposti. Il confronto conferma che il progetto non solo è riuscito a contenere il battente idrico, ma ha anche configurato un regime di moto che, seppur più veloce, non pregiudica la stabilità strutturale degli edifici prospicienti, ottimizzando il bilancio complessivo del

rischio dinamico.

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.5 e Tab. 8.5):

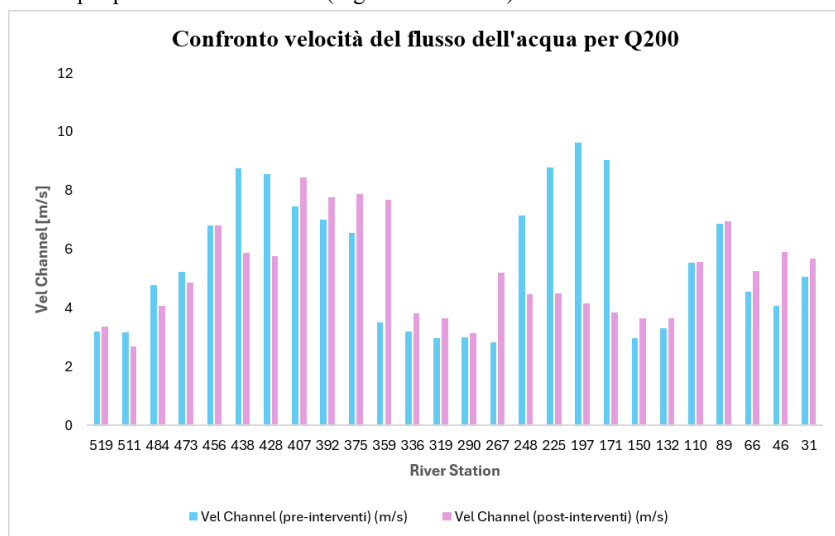


Fig. 8.5 Confronto della velocità del flusso dell'acqua del torrente Petronio per T200 (Excel).

River Sta	Profile	Vel Channel (pre-interventi) (m/s)	Vel Channel (post-interventi) (m/s)
519	Q200	3.21	3.36
511	Q200	3.17	2.7
484	Q200	4.78	4.06
473	Q200	5.24	4.86
456	Q200	6.82	6.82
438	Q200	8.77	5.89
428	Q200	8.56	5.76
407	Q200	7.47	8.44
392	Q200	7	7.77
375	Q200	6.55	7.87
359	Q200	3.52	7.69
336	Q200	3.2	3.83
319	Q200	2.97	3.65
290	Q200	3.01	3.14
267	Q200	2.82	5.2
248	Q200	7.16	4.46
225	Q200	8.79	4.5
197	Q200	9.62	4.16
171	Q200	9.03	3.85
150	Q200	2.97	3.65
132	Q200	3.31	3.65
110	Q200	5.55	5.56
89	Q200	6.86	6.94
66	Q200	4.54	5.27
46	Q200	4.06	5.91
31	Q200	5.07	5.69

Tab. 8.5 Valori di Vel Channel pre e post-interventi del torrente Petronio per T200 (Excel).

Per la portata corrispondente a un tempo di ritorno di 200 anni, l'analisi del profilo di velocità evidenzia una dinamica del deflusso più complessa rispetto allo scenario T50. Il confronto tra il profilo dello stato di fatto (linea blu) e quello di progetto (linea rosa) rivela come l'incremento di portata solleciti maggiormente il sistema, portando a una differenza più marcata nei campi di moto.

Dall'esame del grafico si evincono i seguenti punti:

- incremento diffuso della velocità del flusso nel post-intervento. L'allargamento della sezione d'alveo, pur comportando una variazione della portata specifica, non annulla la capacità del sistema di mantenere velocità di deflusso sostenute. Questo risultato è fondamentale per la riduzione dei tempi di corrivazione, impedendo che volumi d'acqua eccessivi possano ristagnare in corrispondenza delle aree urbanizzate;
- in corrispondenza di alcuni tratti di sezioni si nota una convergenza dei profili di velocità. In questi tratti, l'efficacia dell'intervento di riprofilatura appare limitata dai vincoli plano-altimetrici esistenti;
- l'aumento delle velocità, pur essendo un segnale di un alveo più efficiente, richiede una valutazione cautelativa in ottica di danno. La velocità del flusso rappresenta la componente dinamica delle forze agenti sulle strutture. Sebbene il progetto garantisca una migliore gestione complessiva del rischio, l'incremento di velocità registrato impone, per le sezioni dove il battente rimane significativo, una verifica della stabilità delle tamponature e dei basamenti degli edifici, poiché la componente idrodinamica del danno diventa non trascurabile rispetto alla semplice pressione idrostatica.

Bisogna infine considerare che le zone che risultano alluvionabili per questa portata post-interventi sono limitate a una piccola zona centrale del tratto analizzato.

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.6 e Tab. 8.6):

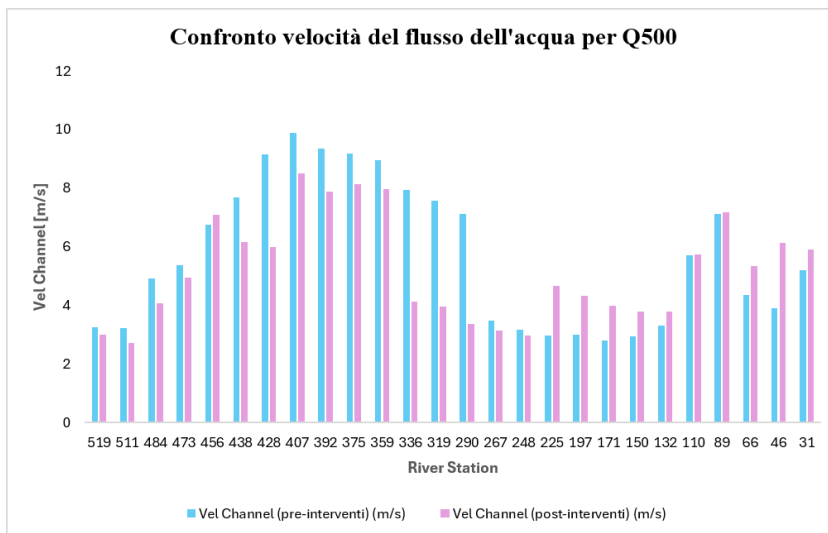


Fig. 8.6 Confronto della velocità del flusso dell'acqua del torrente Petronio per T500 (Excel).

River Sta	Profile	Vel Channel (pre-interventi) (m/s)	Vel Channel (post-interventi) (m/s)
519	Q500	3.25	2.99
511	Q500	3.22	2.72
484	Q500	4.91	4.07
473	Q500	5.36	4.94
456	Q500	6.76	7.1
438	Q500	7.69	6.16
428	Q500	9.15	5.98
407	Q500	9.9	8.51
392	Q500	9.36	7.89
375	Q500	9.18	8.13
359	Q500	8.96	7.98
336	Q500	7.95	4.14
319	Q500	7.58	3.96
290	Q500	7.12	3.38
267	Q500	3.48	3.15
248	Q500	3.18	2.97
225	Q500	2.97	4.68
197	Q500	3	4.34
171	Q500	2.81	4
150	Q500	2.94	3.8
132	Q500	3.31	3.79
110	Q500	5.71	5.74
89	Q500	7.12	7.19
66	Q500	4.37	5.34
46	Q500	3.91	6.13
31	Q500	5.21	5.92

Tab. 8.6 Valori di Vel Channel pre e post-interventi del torrente Petronio per T500 (Excel).

Per lo scenario di piena con tempo di ritorno di 500 anni, il confronto tra il profilo dello stato di fatto (linea blu) e quello di progetto (linea rosa) evidenzia una saturazione della capacità del sistema idraulico. A differenza dei tempi di ritorno inferiori, in questo caso l'efficacia degli interventi di riprofilatura dell'alveo appare limitata dalla portata eccezionale, che porta il sistema a operare in condizioni vicine al limite di progetto.

L'analisi del grafico mette in luce i seguenti aspetti:

- le linee tendono a sovrapporsi in gran parte del tratto analizzato. Questo indica che, per portate di tale importanza, la capacità di deflusso è governata più dall'intero sistema circostante che dalla sola geometria dell'alveo. L'aumento di portata rispetto allo scenario T200 non si traduce più in un incremento proporzionale di velocità, poiché il livello idrico ha raggiunto quote tali da attivare fenomeni di resistenza distribuita molto elevati;
- la velocità del flusso non è più solo un parametro di efficienza idraulica, ma un indicatore di pericolo estremo. La combinazione di battenti idrici elevati (derivati dall'analisi del pelo libero) e correnti ad alta velocità aumenta drasticamente l'energia cinetica del flusso. Per gli edifici situati nelle zone adiacenti all'alveo, questo implica una condizione di vulnerabilità critica, dove il rischio di collasso strutturale per azione idrodinamica diventa l'evento predominante rispetto al semplice danneggiamento per allagamento interno.

In sintesi, il confronto delle velocità ha dimostrato che, mentre per portate ordinarie (T50) gli interventi garantiscono una gestione ottimale e un incremento controllato delle velocità di deflusso, in condizioni di evento estremo (T500) la criticità si sposta sulla capacità di smaltimento delle opere, come i ponti. Il progetto risulta quindi efficace nel ridurre il rischio per gli eventi di piena ricorrenti, pur richiedendo una riflessione ulteriore sulla tenuta strutturale delle infrastrutture in caso di scenario catastrofico.

8.1.3. Confronto del Numero di Froude pre e post-interventi

Il Numero di Froude (Fr) rappresenta un parametro adimensionale fondamentale nell'idraulica a pelo libero, definito come il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze di gravità. Esso è calcolato come mostrato in Eq. 8.1:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (8.1)$$

dove v è la velocità media della corrente, g l'accelerazione di gravità e h il tirante idrico. La conoscenza di questo parametro è essenziale per la presente analisi, in quanto permette di classificare il regime di moto del torrente Petronio in:

- moto subcritico ($Fr < 1$): la corrente è lenta e profonda; le perturbazioni a valle possono propagarsi verso monte. È la condizione tipica degli alvei naturali in equilibrio;
- moto critico ($Fr = 1$): condizione di transizione instabile;
- moto supercritico ($Fr > 1$): la corrente è veloce e poco profonda (regime torrentizio); le perturbazioni non possono propagarsi verso monte.

L'interesse per questo parametro in sede di progettazione degli interventi di mitigazione è duplice. Da un lato, una variazione del Numero di Froude causata dalla riprofilatura dell'alveo indica una modifica sostanziale nell'energia cinetica del flusso. Un passaggio a regimi supercritici, pur aumentando la capacità di deflusso (e quindi riducendo i livelli idrici), espone le sponde e le infrastrutture a sollecitazioni erosive significativamente più intense.

Dall'altro lato, il Numero di Froude funge da indicatore di stabilità per le difese spondali: conoscere in quali tratti il flusso supera la soglia critica ($Fr > 1$) è indispensabile per verificare se le opere di protezione (arginature, rivestimenti in pietra o calcestruzzo) siano adeguatamente dimensionate per resistere all'impatto di correnti veloci. In questo capitolo, si confronteranno i profili di Froude tra lo stato di fatto e quello di progetto, ponendo particolare attenzione ai punti di transizione di regime, che rappresentano le zone a maggior rischio di instabilità morfologica e, di conseguenza, di vulnerabilità per il tessuto urbano adiacente.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.7 e Tab 8.7):

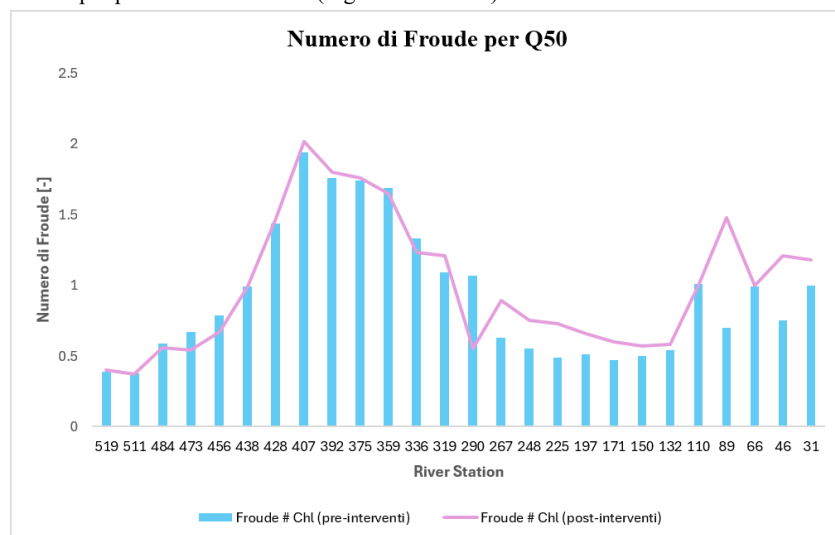


Fig. 8.7 Confronto del Numero di Froude del torrente Petronio per T50 (Excel).

River Sta	Profile	Froude # Chl (pre-interventi)	Froude # Chl (post-interventi)
519	Q50	0.39	0.4
511	Q50	0.38	0.37
484	Q50	0.59	0.56
473	Q50	0.67	0.54
456	Q50	0.79	0.67
438	Q50	0.99	0.99
428	Q50	1.44	1.47
407	Q50	1.94	2.02
392	Q50	1.76	1.8
375	Q50	1.74	1.76
359	Q50	1.69	1.65
336	Q50	1.33	1.23
319	Q50	1.09	1.21
290	Q50	1.07	0.55
267	Q50	0.63	0.89
248	Q50	0.55	0.75
225	Q50	0.49	0.73
197	Q50	0.51	0.66
171	Q50	0.47	0.6
150	Q50	0.5	0.57
132	Q50	0.54	0.58
110	Q50	1.01	1
89	Q50	0.7	1.48
66	Q50	0.99	1
46	Q50	0.75	1.21
31	Q50	1	1.18

Tab. 8.7 Valori del Numero di Froude pre e post-interventi del torrente Petronio per T50 (Excel).

Dall'osservazione dei valori in Tab. 8.7, si nota una predominanza di condizioni di moto subcritico ($Fr < 1$) nella maggior parte delle sezioni. Tuttavia, il confronto tra lo stato di fatto e quello di progetto evidenzia alcune dinamiche cruciali:

- in molte sezioni (es. da sezione 519 a 319), i valori di Fr si mantengono in un range di stabilità, confermando che l'intervento di riprofilatura non ha stravolto il regime di moto, mantenendo la corrente in condizioni di sicurezza idraulica;
 - si nota che, in corrispondenza delle stazioni dove il grafico della velocità mostrava un incremento, anche il Numero di Froude registra un aumento proporzionale. Poiché Fr è direttamente proporzionale alla velocità, questo incremento conferma che l'alveo progettato è più efficiente nello smaltimento delle acque, ma spinge il regime di moto verso valori più alti (avvicinandosi alla soglia critica);
 - nelle sezioni dove il valore di Fr si avvicina all'unità (es. sezione 290 e 267), il sistema è prossimo alla condizione critica. Se in queste sezioni il grafico delle velocità mostrava un picco, è qui che la tesi deve porre l'attenzione: il passaggio verso un regime supercritico potrebbe comportare sollecitazioni erosive superiori.
- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.8 e Tab. 8.8):

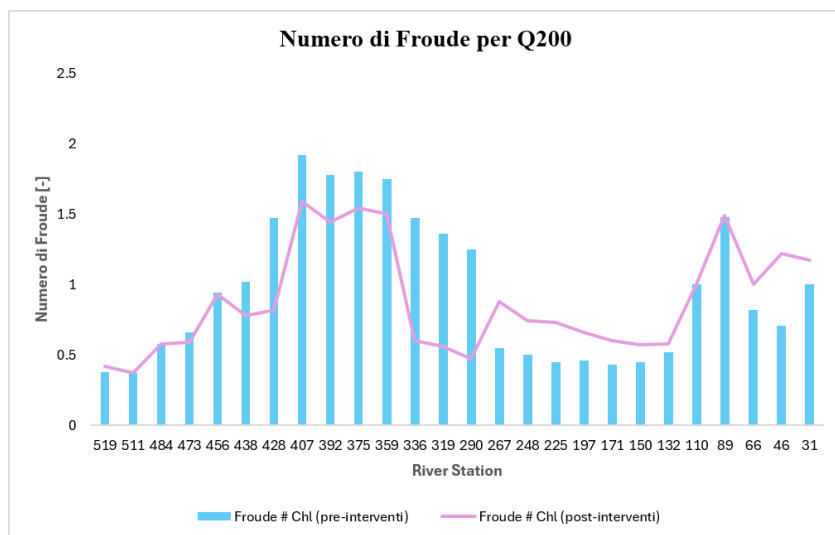


Fig. 8.8 Confronto del Numero di Froude del torrente Petronio per T200 (Excel).

River Sta	Profile	Froude # Chl (pre-interventi)	Froude # Chl (post-interventi)
519	Q200	0.38	0.42
511	Q200	0.37	0.37
484	Q200	0.58	0.58
473	Q200	0.66	0.59
456	Q200	0.94	0.93
438	Q200	1.02	0.78
428	Q200	1.47	0.82
407	Q200	1.92	1.59
392	Q200	1.78	1.44
375	Q200	1.8	1.54
359	Q200	1.75	1.5
336	Q200	1.47	0.6
319	Q200	1.36	0.56
290	Q200	1.25	0.47
267	Q200	0.55	0.88
248	Q200	0.5	0.74
225	Q200	0.45	0.73
197	Q200	0.46	0.66
171	Q200	0.43	0.6
150	Q200	0.45	0.57
132	Q200	0.52	0.58
110	Q200	1	1
89	Q200	1.48	1.49
66	Q200	0.82	1
46	Q200	0.71	1.22
31	Q200	1	1.17

Tab. 8.8 Valori del Numero di Froude pre e post-interventi del torrente Petronio per T200 (Excel).

Nello scenario T200, il sistema idraulico è sottoposto a sollecitazioni superiori rispetto al T50,

e la tabella del Numero di Froude evidenzia come l'equilibrio del moto sia più precario:

- si osserva una maggiore frequenza di valori del Numero di Froude che si attestano in un range di transizione (tra 0.8 e 0.95). Sebbene il moto rimanga prevalentemente subcritico ($Fr < 1$), il sistema lavora molto più vicino alla condizione critica rispetto allo scenario precedente. Questo indica che l'efficacia del progetto nell'aumentare la velocità ha ridotto il “margine di sicurezza” rispetto alla transizione verso il regime supercritico;
- relazionando questi dati con il grafico delle velocità di T200 precedentemente analizzato, si conferma che l'incremento di v nel tratto di progetto si traduce in un aumento del Numero di Froude. Nelle sezioni dove il grafico di velocità indicava una convergenza tra stato di fatto e di progetto, Fr appare più stabile; al contrario, nelle sezioni dove la riprofilatura ha generato un aumento significativo della velocità, il parametro Fr subisce un incremento sensibile;
- la vicinanza al valore critico ($Fr = 1$) in diverse stazioni suggerisce che il sistema, pur essendo efficiente, non tollera ampi margini di errore. Per la tesi, questo è un dato fondamentale: dimostra che per eventi di piena mediamente frequenti (T200), il progetto utilizza al massimo la geometria dell'alveo per mantenere il controllo dei livelli, operando in condizioni di moto quasi critico.
- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.9 e Tab. 8.9):

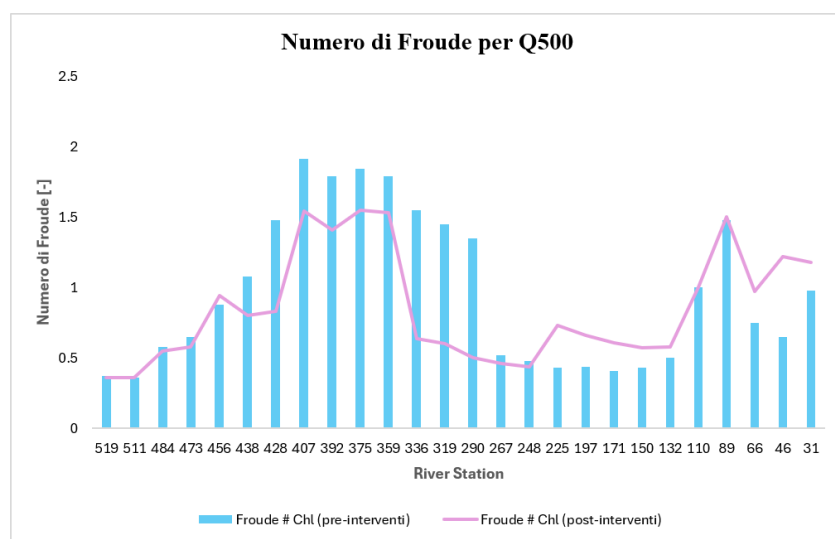


Fig. 8.9 Confronto del Numero di Froude del torrente Petronio per T500 (Excel).

River Sta	Profile	Froude # Chl (pre-interventi)	Froude # Chl (post-interventi)
519	Q500	0.37	0.36
511	Q500	0.36	0.36
484	Q500	0.58	0.55
473	Q500	0.65	0.58
456	Q500	0.88	0.94
438	Q500	1.08	0.8
428	Q500	1.48	0.83
407	Q500	1.91	1.54
392	Q500	1.79	1.41
375	Q500	1.84	1.55
359	Q500	1.79	1.53
336	Q500	1.55	0.64
319	Q500	1.45	0.6
290	Q500	1.35	0.5
267	Q500	0.52	0.46
248	Q500	0.48	0.44
225	Q500	0.43	0.73
197	Q500	0.44	0.66
171	Q500	0.41	0.61
150	Q500	0.43	0.57
132	Q500	0.5	0.58
110	Q500	1	1
89	Q500	1.48	1.5
66	Q500	0.75	0.97
46	Q500	0.65	1.22
31	Q500	0.98	1.18

Tab. 8.9 Valori del Numero di Froude pre e post-interventi del torrente Petronio per T500 (Excel).

Nello scenario T500, il sistema idraulico opera in condizioni di massima criticità. La tabella del Numero di Froude per questa portata evidenzia dinamiche che confermano lo stato di saturazione già osservato nell'analisi delle velocità:

- si osserva una diffusione di valori del Numero di Froude prossimi o superiori all'unità ($Fr \geq 1$). Mentre negli scenari T50 e T200 il sistema manteneva una prevalenza di moto subcritico, nel T500 il flusso tende a “torrenzializzarsi” in diversi tratti dell'alveo;
- incrociando questi dati con il grafico delle velocità T500, si nota una perfetta coerenza: le sezioni in cui il Numero di Froude supera l'unità coincidono con i tratti dove la velocità del flusso raggiunge il suo massimo;
- la presenza di regimi supercritici ($Fr > 1$) in un contesto urbano è un indicatore di rischio elevato per l'edificato circostante.

8.1.4. Analisi dell'estensione dell'area inondata e dei livelli di battenti pre e post-interventi

Il presente sottocapitolo integra i risultati ottenuti dalla modellazione idraulica monodimensionale con un'analisi spaziale condotta mediante l'ausilio di sistemi GIS (QGIS). Se l'analisi precedente si è focalizzata sulle grandezze puntuali lungo l'asta fluviale, in questa analisi l'attenzione si sposta sulla valutazione della risposta territoriale del bacino del torrente Petronio per le portate riferite ai tre periodi di ritorno analizzati.

L'obiettivo di questa fase è duplice: da un lato, fornire una stima quantitativa della riduzione delle aree suscettibili di allagamento a seguito degli interventi di riprofilatura e innalzamento degli argini; dall'altro, restituire una lettura qualitativa della distribuzione dei battenti idrici sul tessuto urbano circostante.

Attraverso questa metodologia, è possibile visualizzare non solo l'estensione areale dell'inondazione, ma anche la distribuzione spaziale dei battenti idrici. Tale approccio permette di identificare le zone in cui l'intervento di progetto ha prodotto una reale mitigazione del battente, e quindi del danno potenziale agli edifici, rispetto allo stato di fatto, distinguendo tra aree in cui il rischio è stato totalmente annullato e zone in cui permane, seppur ridotta, vulnerabilità.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.10):



Fig. 8.10 Mappa comparativa dell'analisi ID pre e post-interventi per T50 (QGIS).

Le mappe mostrano la distribuzione spaziale dei battenti idrici in occasione dell'evento di piena con tempo di ritorno di 50 anni, confrontando la configurazione prima e dopo gli interventi.

L'analisi qualitativa condotta in ambiente GIS evidenzia chiaramente l'efficacia delle opere di progetto nel contenimento del deflusso. Nello stato di fatto (mappa a sinistra), si osserva un'esondazione diffusa lungo le sponde, con battenti idrici che raggiungono valori significativi nelle aree limitrofe all'alveo, dove le criticità geometriche limitano la capacità di smaltimento del torrente.

Al contrario, nello stato di progetto (mappa a destra), il confronto cromatico della scala dei battenti rivela una contrazione dell'area inondata. L'intervento di riprofilatura ha permesso di confinare il deflusso all'interno dell'alveo inciso, riducendo il coinvolgimento delle zone urbanizzate prospicienti.

La mappa post-intervento evidenzia un deflusso più regolare in prossimità del tratto terminale, che, nello stato di fatto, causava l'espansione laterale della piena verso il centro abitato.

In sintesi, il confronto spaziale conferma che gli interventi hanno trasformato l'alveo da un sistema "saturato", capace di innescare esondazioni diffuse già per eventi di media intensità (T50), a una sezione in grado di convogliare i volumi di piena con maggiore efficienza.

L'estensione dell'area inondata per lo scenario T50 (stato di fatto) è pari a 13,314 m², mentre per

Commentato [IF4]: Sono una rompicatole: per un confronto visivo migliore, sarebbe meglio che le scale dei valori fossero le stesse per le due figure.

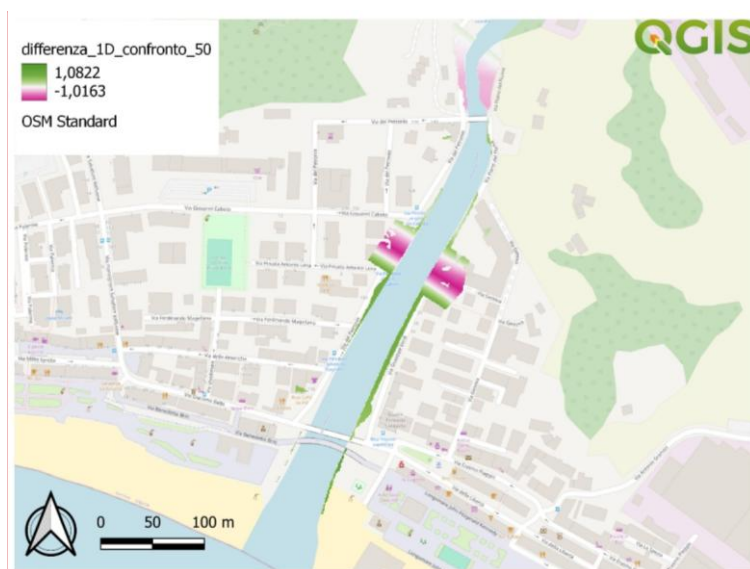
lo stato di progetto è pari a 6,070 m², come si può osservare dalla Fig. 8.11.

Questo risultato quantitativo conferma che l'intervento di riprofilatura non ha una valenza puramente teorica, ma produce un beneficio tangibile sul territorio, dimezzando di fatto l'estensione delle superfici suscettibili di allagamento. Tale contrazione dell'area inondata attesta l'elevata efficacia progettuale nel proteggere il tessuto urbano e le infrastrutture esistenti dagli eventi di piena con tempo di ritorno cinquantennale.



Fig. 8.11 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T50 (QGIS).

La mappa di differenza dei battenti idrici (Fig. 8.12) illustra l'impatto degli interventi sull'idraulica del torrente Petronio. Attraverso l'operazione algebrica di sottrazione tra i raster dei battenti massimi, è stato possibile mappare le aree di beneficio idraulico, evidenziate in gradazioni di rosa. Tali aree corrispondono ai settori in cui l'intervento ha determinato una riduzione del battente idrico, contribuendo direttamente alla diminuzione del rischio di esondazione per le aree limitrofe. Le porzioni rappresentate in tonalità di verde individuano invece i limitati tratti in cui si è verificato un incremento del livello idrico, riconducibile a variazioni locali della dinamica del moto indotte dalla nuova conformazione geometrica dell'alveo. La prevalenza cromatica delle zone rosa conferma l'efficacia nel perseguire l'obiettivo di mitigazione del rischio idraulico complessivo nel tratto urbano analizzato.



Commentato [IF5]: Limita i decimali nella legenda (fermati pure al decimetro)

Fig. 8.12 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi dei battenti per T50 (QGIS).

– Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.13):



Commentato [IF6]: Commento analogo a Fig. 8.10

Fig. 8.13 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi per T200 (QGIS).

Le mappe in figura mostrano la distribuzione spaziale dei battenti idrici in occasione dell'evento di piena con tempo di ritorno di 200 anni, confrontando la configurazione prima e dopo gli interventi.

L'analisi qualitativa anche in questo caso evidenzia l'efficacia delle opere di progetto nel contenimento del deflusso. Nello stato di fatto (mappa a sinistra), si osserva un'esondazione diffusa.

Al contrario, nello stato di progetto (mappa a destra), il confronto mostra una contrazione dell'area inondata. L'intervento di riprofilatura e innalzamento degli argini ha permesso di confinare il deflusso all'interno dell'alveo inciso, riducendo il coinvolgimento delle zone

circostanti.

Il confronto spaziale conferma che gli interventi hanno trasformato l'alveo in un sistema capace di innescare esondazioni diffuse già per eventi di media intensità, a una sezione in grado di convogliare i volumi di piena con maggiore efficienza.

L'estensione dell'area inondata per lo scenario T200 (stato di fatto) è pari a 15,677 m², mentre per lo stato di progetto è pari a 8,754 m², come si può osservare dalla Fig. 8.14.

Questo risultato quantitativo conferma che l'intervento di riprofilatura non ha una valenza puramente teorica, ma produce un beneficio tangibile sul territorio, dimezzando di fatto l'estensione delle superfici suscettibili di allagamento. Tale contrazione dell'area inondata attesta l'elevata efficacia progettuale nel proteggere il tessuto urbano e le infrastrutture esistenti dagli eventi di piena con tempo di ritorno duecentennale.

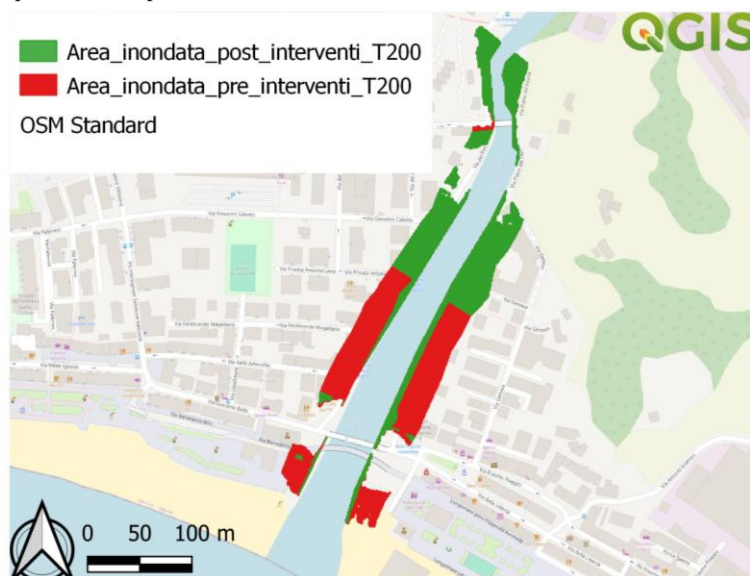


Fig. 8.14 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T200 (QGIS).

La mappa di differenza dei battenti idrici (Fig. 8.15) illustra l'impatto degli interventi sull'idraulica del torrente Petronio. Attraverso l'operazione algebrica di sottrazione tra i raster dei battenti massimi, è stato possibile mappare le aree di beneficio idraulico, evidenziate in gradazioni di rosa. Tali aree corrispondono ai settori in cui l'intervento ha determinato una riduzione del battente idrico, contribuendo direttamente alla diminuzione del rischio di esondazione per le aree limitrofe. Le porzioni rappresentate in tonalità di verde individuano invece i limitati tratti in cui si è verificato un lieve incremento del livello idrico, riconducibile a variazioni locali della dinamica del moto indotte dalla nuova conformazione geometrica dell'alveo. La prevalenza cromatica delle zone rosa conferma l'efficacia nel perseguire

l'obiettivo di mitigazione del rischio idraulico complessivo nel tratto urbano analizzato.

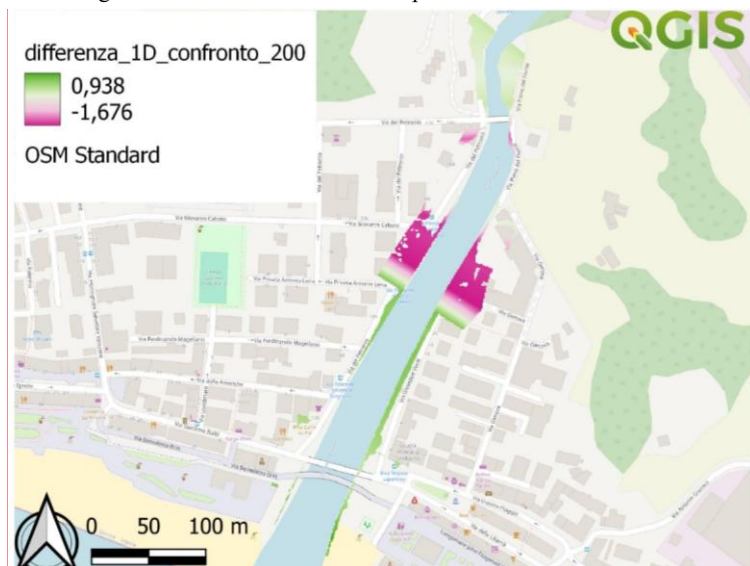


Fig. 8.15 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi dei battenti del torrente Petronio per T200 (QGIS).

– Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.16):



Fig. 8.16 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi per T500 (QGIS).

Le mappe mostrano la distribuzione spaziale dei battenti idrici in occasione dell'evento di piena con tempo di ritorno di 500 anni, confrontando la configurazione prima e dopo gli interventi. L'analisi delle prestazioni idrauliche viene estesa all'evento di piena con tempo di ritorno di 500 anni, rappresentativo di uno scenario di evento estremo. Il confronto tra la configurazione allo stato di fatto e quella di progetto permette di valutare la resilienza del sistema in condizioni di massime.

L'estensione dell'area inondata dello stato di fatto risulta pari a 17,407 m², mentre per lo stato di progetto, seguito degli interventi, l'estensione dell'area inondata si riduce a 12,239 m²

Commentato [IF7]: Stesso commento di Fig. 8.12

(rappresentato in Figura 8.17).

L'osservazione delle mappe di battente idrico (Fig. 8.16) conferma come, anche per sollecitazioni di tale entità, l'adeguamento della sezione d'alveo produca una significativa variazione dell'impronta di inondazione. Sebbene l'evento estremo comporti un coinvolgimento territoriale superiore rispetto ai casi T50 e T200, l'assetto progettuale riesce a limitare l'espansione del deflusso, salvaguardando aree che, nello scenario pre-interventi, risultavano integralmente interessate dall'esondazione. Tale contrazione dell'area inondata attesta l'efficacia progettuale nel contenere i volumi di piena e nel mitigare il rischio idraulico associato ad eventi con tempo di ritorno cinquecentennale.

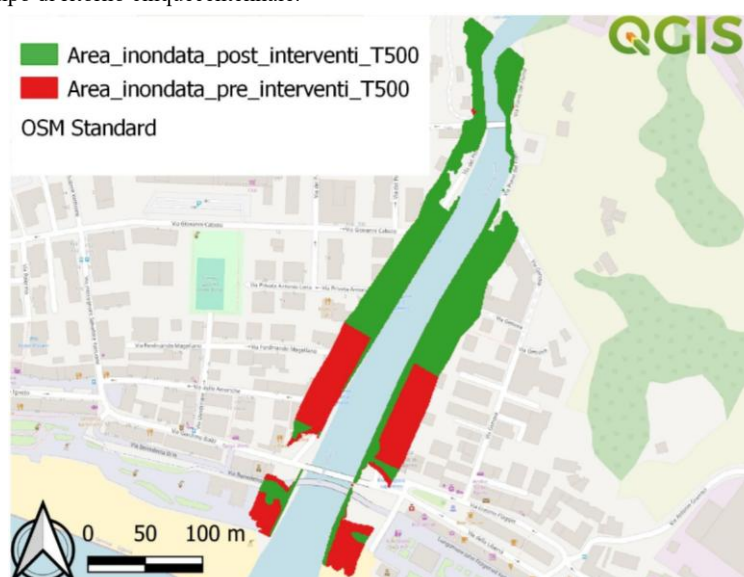


Fig. 8.17 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T500 (QGIS).

L'analisi differenziale tra gli scenari pre e post-interventi (Fig. 8.18) fornisce una rappresentazione dinamica dell'impatto idraulico indotto dalle opere lungo l'asta del torrente Petronio. Attraverso la sottrazione algebrica tra i raster dei battenti idrici massimi, è stato possibile isolare le porzioni di territorio in cui la modifica geometrica dell'alveo ha prodotto una variazione del livello idrico.

Le aree caratterizzate da tonalità cromatiche orientate verso il rosa identificano i settori in cui l'intervento ha determinato una marcata contrazione del tirante idrico, traducendosi in un beneficio diretto in termini di riduzione del rischio di esondazione per il contesto urbano adiacente. Le porzioni evidenziate in verde circoscrivono zone in cui si registra un lieve incremento locale della quota del pelo libero; tale fenomenologia è riconducibile a variazioni puntuali del moto indotte dalla nuova conformazione morfologica, che non screditano le

prestazioni globali del sistema. La marcata predominanza delle aree soggette a riduzione del battente idrico, anche in questo scenario, evidenzia la validità della strategia progettuale adottata per la mitigazione del rischio idraulico nell'intero ambito urbano considerato.

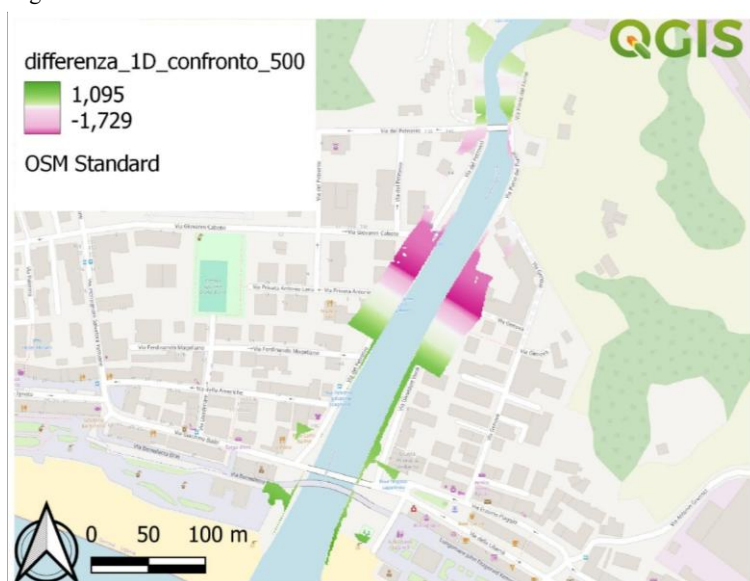


Fig. 8.18 Mappa comparativa dell'analisi 1D pre e post-interventi dei battenti del torrente Petronio per T500 (QGIS).

8.1.5. Analisi dei volumi d'acqua esondati pre e post-interventi

Il presente sottocapitolo è dedicato alla quantificazione volumetrica dei fenomeni di esondazione che interessano il tratto focivo del torrente Petronio, ponendo a confronto lo scenario di stato di fatto con lo scenario di progetto. Tale analisi assume una valenza cruciale nell'economia del lavoro di tesi, in quanto permette di tradurre i risultati della modellazione idraulica, espressa in termini di battenti e tiranti idrici, in una metrica volumetrica concreta, necessaria per valutare l'efficacia reale delle opere di mitigazione strutturale proposte.

L'obiettivo è duplice: da un lato, determinare la riduzione dei volumi d'acqua che, in assenza di interventi, invaderebbero il tessuto urbano di Riva Trigoso durante gli eventi di piena caratterizzati dai tempi di ritorno T50, T200 e T500; dall'altro, dimostrare come la riprofilatura dell'alveo e l'adeguamento delle quote arginali siano in grado di confinare i flussi di piena, minimizzando l'estensione e il volume delle acque esondate. Attraverso l'elaborazione dei dati raster in ambiente QGIS, si è proceduto alla stima quantitativa dei volumi di piena effettivamente "evitati" grazie agli interventi di progetto, fornendo un indicatore fondamentale per la successiva valutazione dei danni economici e strutturali subiti dagli edifici.

Nella Tab. 8.10 vengono mostrati risultati dei volumi d'acqua espressi in m^3 per i tre periodi di ritorno, ricavati da analisi statistiche direttamente su QGIS.

Commentato [IF8]: Stesso commento di Fig. 8.12

Periodo di ritorno (T) [anni]	Volume acqua esondata (pre- interventi) [m ³]	Volume acqua esondata (post-interventi) [m ³]	Δ Volume [m ³]
50	16106	9339	-6767
200	23311	16061	-7250
500	28591	23669	-4922

Tab. 8.10 Rappresentazione dei volumi d'acqua esondati pre e post-interventi (Excel).

Come si evince dai dati riportati, gli interventi di riprofilatura dell'alveo e l'adeguamento delle quote arginali consentono una contrazione significativa dei volumi di piena esondati. In particolare, a conferma di come le soluzioni progettuali adottate garantiscano una maggiore capacità di contenimento dei flussi idrici, aumentando il franco di sicurezza per l'intero ambito urbano analizzato.

Tale riduzione volumetrica costituisce un parametro fondamentale non solo per la valutazione del rischio idraulico, ma anche per la successiva analisi del danno economico, dimostrando come la riduzione dell'invasione delle acque nel centro abitato si traduca direttamente in una mitigazione del rischio per il patrimonio edilizio e infrastrutturale.

8.1.6. Analisi del danno economico pre e post-interventi

In questo sottocapitolo si esegue la quantificazione economica dei danni attesi a seguito degli interventi di mitigazione idraulica ipotizzati nella modellazione monodimensionale (1D). L'obiettivo è valutare l'efficacia del progetto in termini di riduzione dell'impatto economico per il tessuto edificato di Riva Trigoso. La metodologia applicata, integrando i profili di pelo libero derivanti dal modello idraulico HEC-RAS con le funzioni di danno empiriche (JRC) in ambiente GIS, permette di confrontare lo scenario pre-interventi e post-interventi. Attraverso tale comparazione si definisce il reale beneficio economico derivante dalle opere di riprofilatura e adeguamento arginale, fornendo un parametro quantitativo essenziale per supportare la sostenibilità degli investimenti nel bacino del torrente Petronio.

- Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.19):



Fig. 8.19 Confronto dei danni economici pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T50 (QGIS).

La valutazione economica del danno, calcolata come sommatoria dei valori economici stimati per ogni unità edilizia coinvolta, fornisce una misura diretta dell'efficacia degli interventi di mitigazione ipotizzati nello scenario 1D. Dall'analisi dei risultati, si evince una riduzione significativa dell'esposizione economica in tutti i tempi di ritorno considerati (T50, T200 e T500).

Il confronto tra le sommatorie totali del danno consente di quantificare il beneficio apportato dalle opere che si traducono in una riduzione dell'impatto economico (Fig. 8.20): per l'evento con tempo di ritorno T50, la sommatoria del danno passa da circa 802,381 € (pre-intervento) a 138,426 € (post-intervento), con un risparmio del 82%;

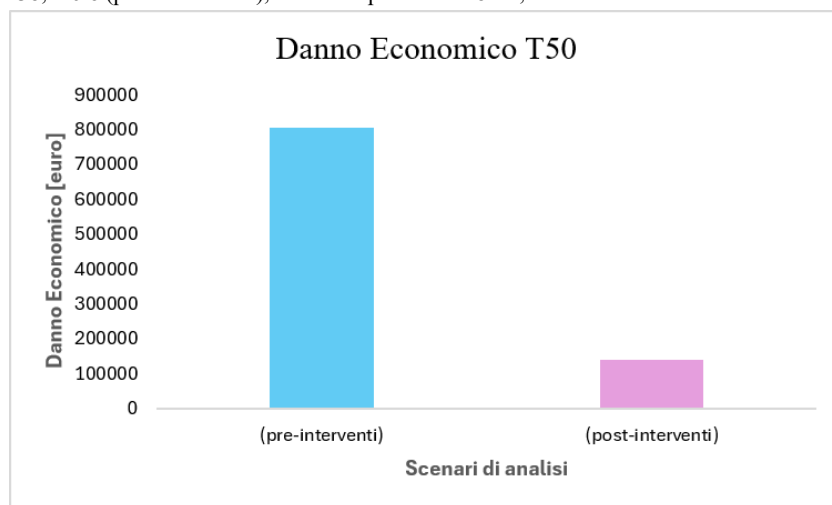


Fig. 8.20 Confronto dei danni economici pre e post-interventi per T50 (Excel).

Dall'analisi puntuale degli edifici che permangono all'interno del perimetro di inondazione anche dopo l'intervento, si osserva un incremento locale del danno economico stimato (Fig. 8.21). Apparentemente in contrasto con l'efficacia globale dell'opera, questo fenomeno trova

Commentato [IF9]: Rendere omogenee le scale di colori per le profondità

una giustificazione rigorosa nell'analisi dei profili di pelo libero e dei campi di velocità ottenuti dalla modellazione monodimensionale (1D) del torrente Petronio.

L'intervento di riprofilatura e adeguamento arginale ha lo scopo di confinare la portata di piena all'interno della sezione di deflusso. Tuttavia, dove l'arginatura risulta limitata o dove la geometria locale induce restringimenti, la riduzione della larghezza efficace dell'alveo, pur riducendo drasticamente il numero di edifici coinvolti, può comportare un aumento del battente idrico e della velocità della corrente in corrispondenza delle aree che rimangono esposte, esattamente come si è potuto osservare nei capitoli precedenti.

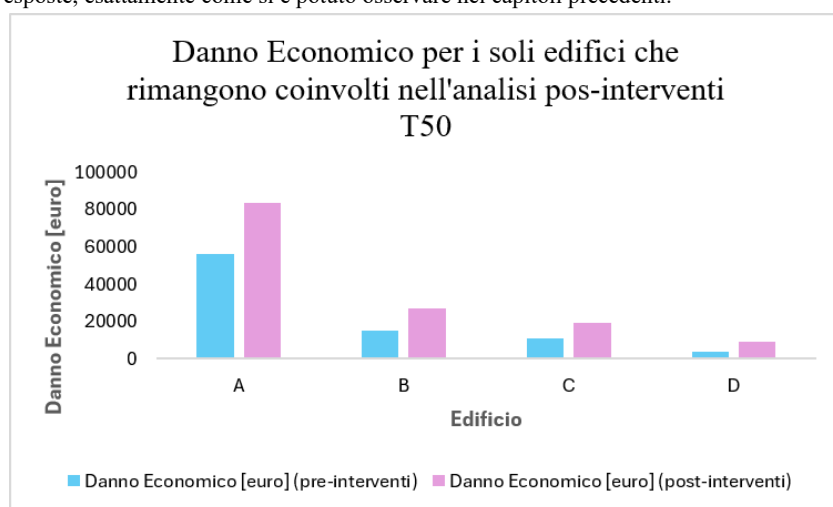


Fig. 8.21 Confronto dei danni economici pre e post-interventi sui singoli edifici che rimangono coinvolti nell'analisi post-interventi per T50 (Excel).

Nonostante l'incremento del danno sui singoli edifici, la sommatoria globale del danno economico risulta in netta diminuzione. Questo accade per le seguenti cause:

- riduzione del numero di edifici coinvolti: il beneficio derivante dalla messa in sicurezza di un gran numero di edifici, che passano da una condizione di inondabilità a una di esenzione dal rischio, prevale nettamente sull'incremento del danno economico calcolato sui pochi edifici che rimangono parzialmente coinvolti;
- variazione del battente idrico: come evidenziato nel modello 1D, la nuova configurazione morfologica determina una variazione delle linee di corrente. Le aree in cui si registra un incremento del danno sono zone in cui, pur essendosi ridotto il perimetro inondabile, il battente idrico locale subisce una variazione positiva a causa di fenomeni di rigurgito o variazione della scabrezza.

La riduzione della sommatoria totale indica che il sistema complessivo di Riva Trigoso ha acquisito resilienza. L'incremento del danno su specifici edifici è un segnale critico che deve essere interpretato non come un fallimento dell'opera, ma come un limite intrinseco della

difesa strutturale 1D, che suggerisce la necessità di affiancare interventi di protezione locale per le unità edilizie che subiscono tale inasprimento del carico idraulico.

– Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.22)



Fig. 8.22 Confronto dei danni economici pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T200 (QGIS).

La quantificazione economica del danno, ottenuta tramite la sommatoria dei costi stimati sul singolo edificio coinvolto, costituisce il parametro di riferimento per validare l'efficacia delle opere di mitigazione progettate nello scenario 1D. Dall'analisi comparativa dei dati emerge una contrazione dell'esposizione economica coerente per tutti gli scenari di piena indagati, inclusi quelli a maggiore tempo di ritorno.

Nello specifico, analizzando l'evento con tempo di ritorno T200 (Fig. 8.23), si registra una flessione del danno totale da 1,087,438 € a 332,457 €. Tale delta economico si traduce in un indice di efficienza pari a 69%, confermando come l'intervento strutturale riesca a ridurre sensibilmente il carico di rischio anche in condizioni di portata idraulica superiore rispetto allo scenario di riferimento ordinario.

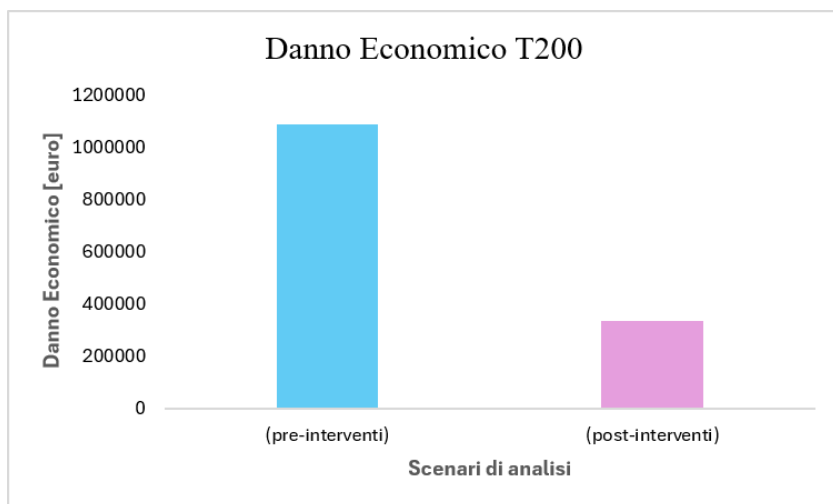


Fig. 8.23 Confronto dei danni economici pre e post-interventi per T200 (Excel).

Una parte degli edifici, pur in presenza delle nuove opere di mitigazione, risultano ancora soggetti a inondazione nello scenario T200 (Fig. 8.24), evidenziando dei danni economici addirittura superiori allo scenario pre-intervento, esattamente come si è osservato per T50. Sebbene tale dinamica possa apparire in contraddizione con il beneficio netto a livello di bacino, essa trova una spiegazione tecnica nel confronto dei profili di pelo libero e nei campi di velocità calcolati mediante la modellazione idraulica monodimensionale (1D).

La strategia di riprofilatura e l'adeguamento delle arginature del torrente Petronio sono finalizzati al contenimento delle portate di piena; tuttavia, in corrispondenza di singole geometrie d'alveo caratterizzate da restringimenti o limitazioni plano-altimetriche, la riconfigurazione dello spazio di deflusso può determinare un incremento locale dei battenti idrici e della velocità di corrente. Di conseguenza, per le poche unità edilizie che persistono in aree di criticità residua, si verifica un aumento dell'entità del danno economico puntuale. È fondamentale sottolineare, tuttavia, che tale aumento è un fenomeno localizzato: la significativa riduzione dell'estensione complessiva dell'area inondata e del numero totale di edifici esposti, ampiamente documentata dalle analisi 1D precedentemente discusse, prevale sull'incremento del danno dei singoli manufatti, confermando la piena validità della strategia progettuale adottata per la sicurezza dell'intero comparto urbano.

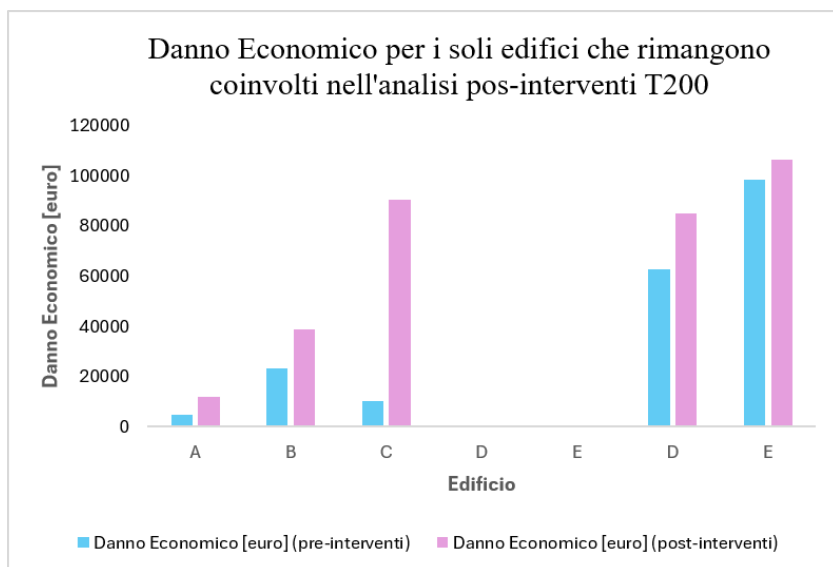


Fig. 8.24 Confronto dei danni economici pre e post-interventi sui singoli edifici che rimangono coinvolti nell'analisi post-interventi per T200 (Excel).

Nonostante l'incremento del danno sui singoli edifici che permangono dopo gli interventi, la sommatoria globale del danno economico risulta in netta diminuzione. Questo accade per motivi analoghi a quelli illustrati nell'analisi del danno economico per T50.

– Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.25):

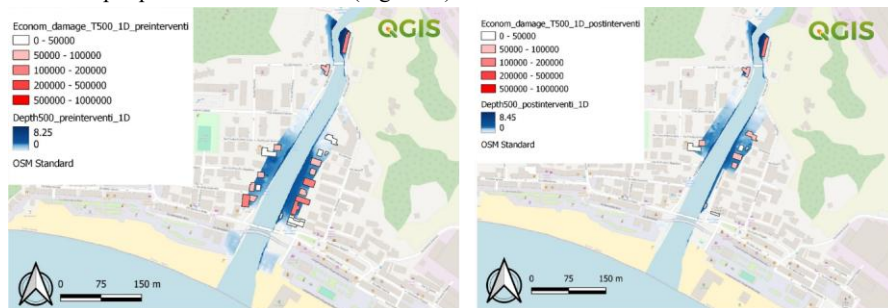


Fig. 8.25 Confronto dei danni economici pre e post-interventi con il plugin Flood2B per T500 (QGIS).

La validità della strategia di mitigazione adottata nello scenario 1D trova ulteriore conferma nell'analisi dell'evento di piena estrema con tempo di ritorno T500 (Fig. 8.26). Anche in condizioni di sollecitazione idraulica eccezionale, l'intervento strutturale dimostra una capacità protettiva significativa, riducendo l'esposizione economica complessiva del comparto urbano.

Nello specifico, il danno economico aggregato si attesta su un valore pre-interventi di 1,223,667 €, a fronte di un danno post-interventi stimato in 585,084 €. Tale contrazione si traduce in una riduzione del 52%, un dato che testimonia come l'adeguamento dell'alveo riesca a contenere efficacemente gli impatti economici anche in scenari di crisi di elevata magnitudo, garantendo una maggiore resilienza del tessuto insediativo di Riva Trigoso rispetto alle condizioni di fatto.

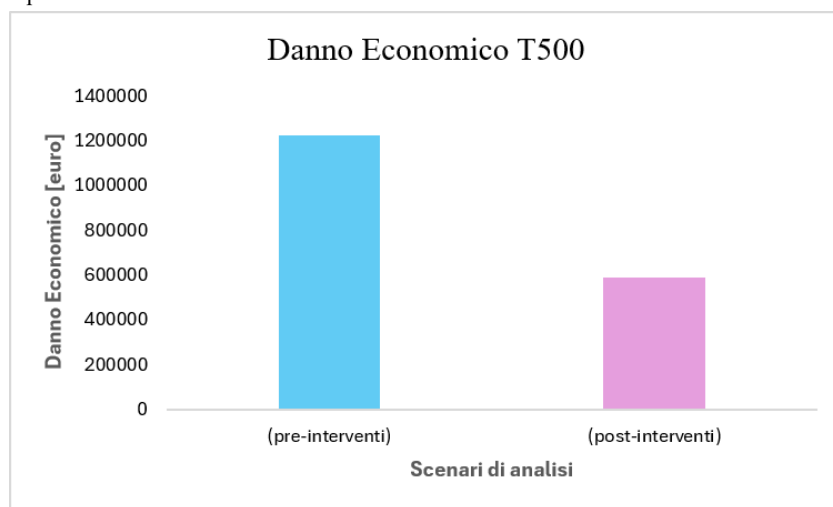


Fig. 8.26 Confronto dei danni economici pre e post-interventi per T500 (Excel).

Anche analizzando lo scenario di piena estrema con tempo di ritorno T500 (Fig. 8.27), si riscontra seppur per un numero limitato di unità edilizie un incremento del danno economico rispetto alla condizione pre-interventi, in linea con quanto rilevato per le frequenze di piena minori. Sebbene a una prima analisi tale dinamica possa apparire in contrasto con l'efficacia globale dell'intervento, la giustificazione risiede nelle alterazioni locali della dinamica idraulica indotte dalla nuova morfologia dell'alveo.

È tuttavia doveroso evidenziare che tale innalzamento dei valori di danno è circoscritto a porzioni marginali del tessuto urbano. Il beneficio complessivo, misurato attraverso la diminuzione della superficie complessiva inondata e del numero totale di edifici esposti al rischio, conferma la robustezza della soluzione progettuale, la quale garantisce, anche in condizioni di evento idraulico estremo, una significativa mitigazione del rischio.

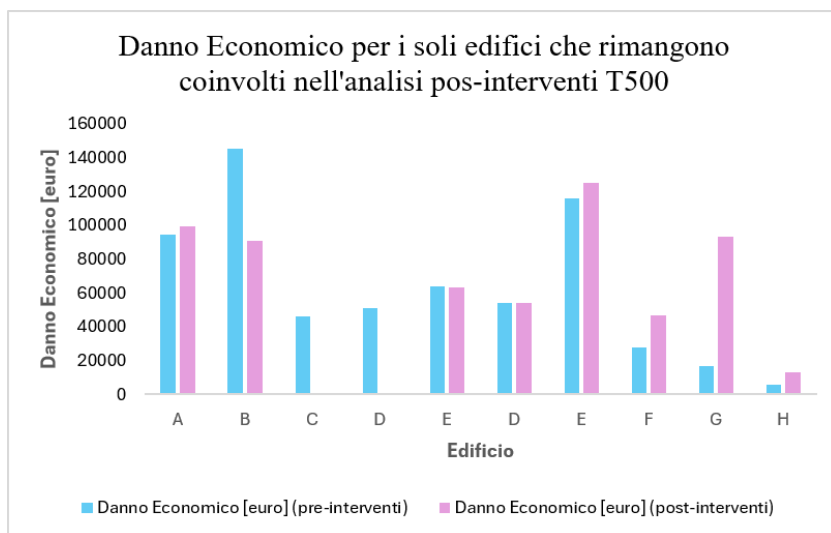


Fig. 8.27 Confronto dei danni economici pre e post-interventi sui singoli edifici che rimangono coinvolti nell'analisi post-interventi per T500 (Excel).

Il grafico illustra la distribuzione dei danni economici calcolati sugli edifici coinvolti nell'evento di piena con tempo di ritorno T500, confrontando lo scenario ante-operam (in blu) con quello post-operam (in rosso).

Dall'analisi emerge una chiara divergenza nel comportamento del sistema:

- riduzione del numero di edifici coinvolti: si nota una marcata diminuzione delle barre rosa (post-interventi) rispetto a quelle blu (pre-interventi). Questo dato conferma numericamente come l'intervento di riprofilatura dell'alveo del torrente Petronio abbia eliminato il rischio di inondazione per una porzione significativa del tessuto urbano, precedentemente esposto a pericolosità idraulica;
- per gli edifici che permangono in condizione di inondazione anche dopo l'intervento, si osserva in alcuni casi un incremento del danno economico. Come discusso precedentemente, tale inasprimento puntuale è da correlarsi alla variazione locale del battente idrico e delle velocità di deflusso causata dalla riconfigurazione geometrica dell'alveo;
- il grafico sintetizza efficacemente il trend tra la protezione su scala urbana e l'effetto locale delle opere: la riduzione del danno totale, ottenuta grazie alla messa in sicurezza della maggioranza degli edifici, prevale sull'incremento puntuale riscontrato su un numero esiguo di strutture. Il grafico conferma dunque che l'intervento agisce correttamente come protezione di comparto, nonostante la permanenza di criticità puntuali che rappresentano il limite fisico dell'opera in condizioni di evento estremo.

Il confronto complessivo tra i tre scenari di piena indagati (T50, T200 e T500) evidenzia una

tendenza consolidata: l'intervento di riprofilatura e adeguamento arginale del torrente Petronio produce benefici tangibili in ogni condizione di evento idraulico. Come sintetizzato nel grafico comparativo (Fig. 8.28), l'efficacia dell'opera, espressa in termini di riduzione del danno economico totale, si mantiene su livelli significativi nonostante il progressivo incremento della magnitudo delle piene.

Sebbene si osservi una naturale flessione dell'indice di efficienza percentuale, passando dall'82% del T50 al 52% del T500, tale andamento conferma la robustezza della soluzione progettuale. L'intervento non si limita a una riduzione marginale, ma opera una vera e propria "de-classificazione" del rischio, abbattendo drasticamente il numero di edifici esposti e mitigando l'entità dei danni strutturali.

In definitiva, la persistenza di un danno residuo in scenari di piena estrema, seppur associata a inasprimenti locali della dinamica idraulica per alcune specifiche unità edilizie, risulta ampiamente compensata dal guadagno netto in termini di resilienza urbana. I risultati ottenuti validano le scelte tecniche adottate, dimostrando che l'opera si configura come una soluzione strutturale efficace e sostenibile, capace di garantire una protezione mirata del nucleo abitato di Riva Trigoso rispetto alle condizioni di fatto, ponendo al contempo le basi per una pianificazione territoriale orientata alla riduzione del rischio idrogeologico.

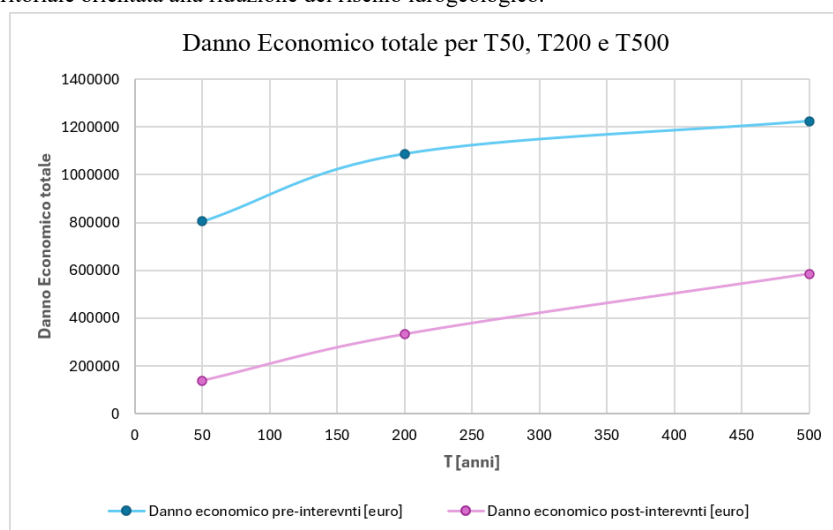


Fig. 8.28 Confronto dei danni economici totali pre e post-interventi per T50, T200 e T500 (Excel).

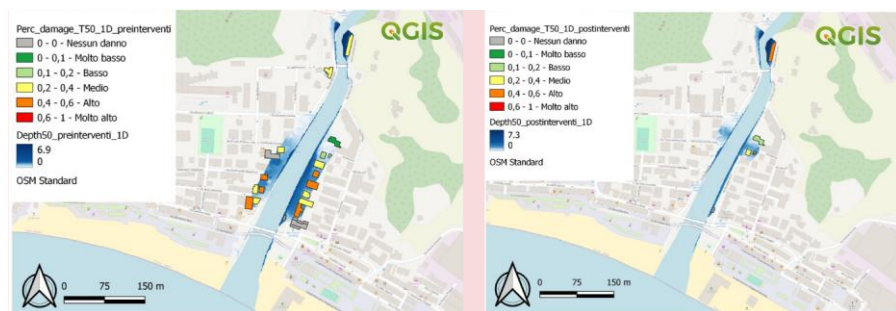
8.1.7. Analisi della percentuale di danno degli edifici pre e post-interventi

Il presente sottocapitolo è dedicato alla valutazione quantitativa e qualitativa della vulnerabilità del tessuto edificato situato nel tratto focivo del torrente Petronio, a Riva Trigoso, in seguito agli interventi di mitigazione del rischio idraulico definiti in precedenza.

Dopo aver validato il modello idraulico 1D in HEC-RAS per lo “stato di fatto”, l’analisi si concentra sulla simulazione degli scenari “post-intervento”, caratterizzati dalla riprofilatura del fondo alveo e dall’adeguamento delle quote arginali. Utilizzando l’integrazione tra i risultati idraulici ottenuti, in termini di nuovi battenti idrici per i tempi di ritorno T50, T200 e T500, e il software QGIS, è stato applicato il plugin FloodD2B per stimare la variazione della vulnerabilità fisica degli edifici.

L’obiettivo fondamentale di questa fase è duplice: da un lato, fornire una stima precisa della riduzione del danno strutturale in percentuale per ogni singolo edificio esposto; dall’altro, confrontare le prestazioni del sistema prima e dopo le opere di progetto. Tale analisi permette di oggettivare l’efficacia dei benefici apportati dagli interventi, distinguendo tra aree in cui il rischio è stato mitigato e zone in cui, seppur in misura ridotta, permane una vulnerabilità residua.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.29):



Commentato [IF10]: Solito commento, se possibile usare stessa scala per le profondità

Fig. 8.29 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T50 (QGIS).

Per il tempo di ritorno T50, l’analisi comparativa evidenzia in modo marcato la capacità dell’intervento di modificare l’estensione e l’intensità del rischio idraulico nell’area del torrente Petronio.

Dalla cartografia emerge una contrazione significativa del perimetro dell’area inondata. Nello stato di fatto, si osserva una propagazione dell’onda di piena che coinvolge un numero consistente di unità edilizie, le quali presentano, in diversi settori, una vulnerabilità elevata a causa di battenti idrici critici. Nello scenario di progetto, l’adeguamento delle arginature e la riprofilatura dell’alveo permettono di contenere il deflusso all’interno della sezione trasversale, riducendo drasticamente il numero di edifici coinvolti.

Per gli edifici che permangono all’interno della fascia di inondazione post-intervento, si osserva una variazione della classe di danno, che in alcuni casi diminuisce post-interventi in altre c’è una tendenza ad aumentare.

Il confronto diretto tra le due mappe conferma che, per l’evento T50, il sistema di protezione progettato risulta efficiente.

Il grafico riportato nella Fig. 8.30 illustra la variazione del danno percentuale calcolata per

ogni singola unità edilizia esposta, confrontando lo scenario di stato di fatto con quello di progetto. L'analisi evidenzia come, a seguito degli interventi di riprofilatura, la maggior parte delle unità edilizie sia stata interessata da una significativa riduzione del danno. Si nota, in particolare, come per numerosi edifici (corrispondenti alle sole barre blu) l'intervento abbia comportato la totale eliminazione del rischio di inondazione, mentre per le unità che permangono nell'area di esondazione, si registra un aumento del valore percentuale di danno, in coerenza con quanto già precedentemente analizzato.

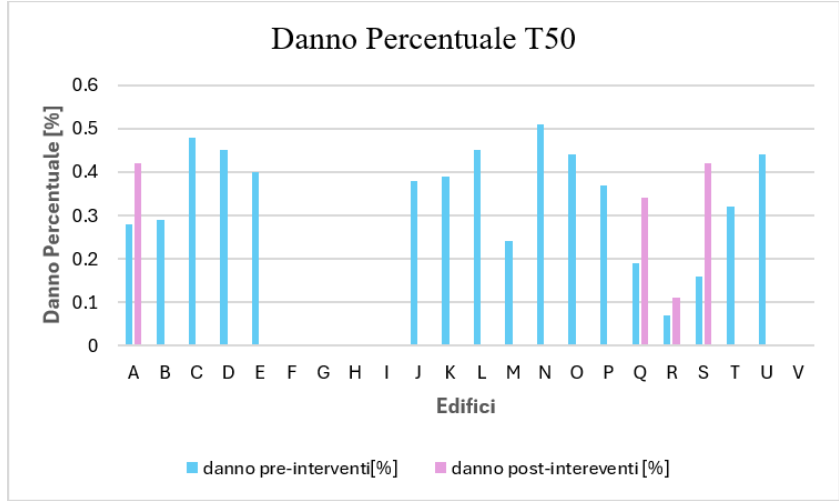


Fig. 8.30 Confronto dei danni percentuali pre e post-interventi per T50 (Excel).

– Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.31):

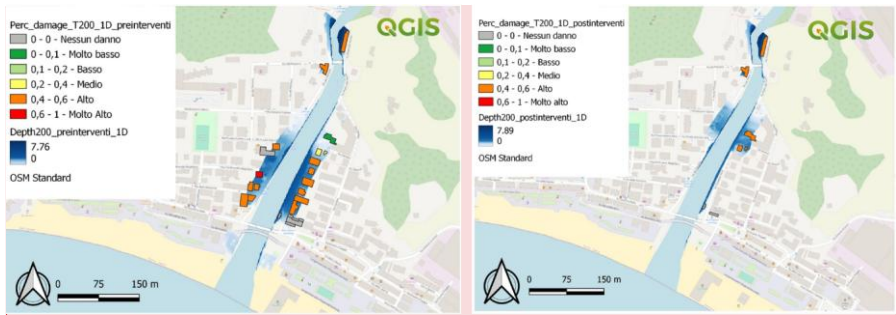


Fig. 8.31 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre e post-interventi con il plugin Flood2B per T200 (QGIS).

Con l'incremento del tempo di ritorno a T200, l'analisi evidenzia una sollecitazione idraulica superiore, che nello "stato di fatto" determina una significativa compromissione di numerosi edifici lungo le sponde del torrente Petronio, con una predominanza di classi di danno "alto".

Commentato [IF11]: Solito commento

Nello scenario pre-intervento, si osserva come l'onda di piena interessi un numero maggiore di unità rispetto al T50, con una distribuzione spaziale che evidenzia criticità strutturali più estese. L'applicazione del plugin Flood2B permette di identificare chiaramente alcuni edifici, precedentemente meno esposti, che in questo scenario raggiungono soglie di danno preoccupanti.

Analizzando la configurazione post-intervento, si nota come le opere di mitigazione mantengano una significativa efficacia protettiva anche di fronte a un evento di maggiore magnitudo. L'estensione dell'area inondata risulta contenuta in modo coerente rispetto allo scenario di riferimento, con una permanenza però in classi di danno "alto".

Il confronto tra le due mappe dimostra che, l'intervento ha una capacità di tenuta, mitigando le conseguenze attese in caso di un evento di piena a T200 anni.

Il grafico di Fig. 8.32 illustra il confronto tra la percentuale di danno strutturale calcolata per ogni edificio nello stato di fatto e nello stato di progetto, riferito a un evento con tempo di ritorno T200.

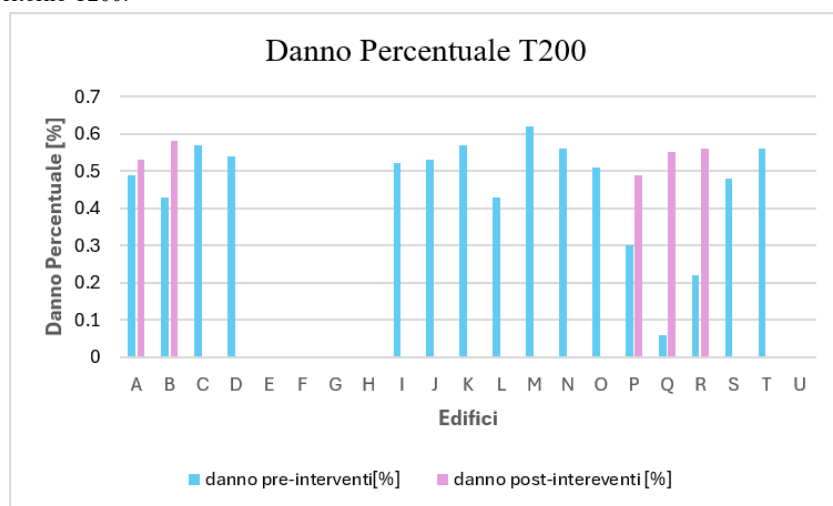


Fig. 8.32 Confronto dei danni percentuali pre e post-interventi per T200 (Excel).

L'analisi visiva conferma l'efficacia sostanziale degli interventi di riprofilatura dell'alveo e adeguamento delle arginature, evidenziata dalla scomparsa della colonna "pre-interventi" per un numero significativo di unità edilizie. Per tali edifici, le opere di mitigazione hanno garantito il completo superamento della condizione di rischio, traducendosi in una riduzione del danno percentuale a zero.

Tuttavia, il grafico permette di isolare le dinamiche per gli edifici che rimangono all'interno del dominio di inondazione post-intervento.

Per la maggior parte delle unità edilizie coinvolte, le barre del "post-interventi" risultano superiori rispetto alle corrispondenti barre del "pre-interventi".

Tale incremento del danno percentuale, seppur circoscritto a un numero limitato di unità, è indicativo di una modifica nelle dinamiche di scorrimento del fluido indotta dal nuovo assetto morfologico. L'arginatura, pur proteggendo le aree limitrofe, può innescare effetti di restringimento o deviazione delle correnti che, localmente, aumentano la sollecitazione idraulica su specifiche strutture.

In conclusione, il grafico evidenzia che l'intervento di mitigazione opera una selezione spaziale del rischio estremamente positiva su scala urbana, pur richiedendo, per le unità dove si riscontra un aumento del danno, una riflessione progettuale orientata a interventi di protezione locale, finalizzati a contrastare le nuove dinamiche di flusso generate dall'opera stessa.

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.33):

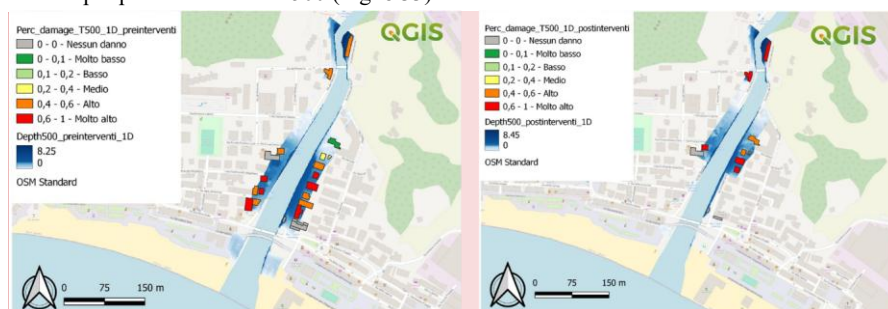


Fig. 8.33 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T500 (QGIS).

Nello scenario a tempo di ritorno T500, l'entità della sollecitazione idraulica raggiunge livelli tali da evidenziare la saturazione parziale degli effetti benefici prodotti dalle opere di mitigazione.

A differenza degli scenari con tempi di ritorno inferiori, per il T500 si osserva che le classi di danno rimangono costanti o aumentano per gli edifici che permangono in area coinvolta dall'inondazione anche post-intervento. Questo fenomeno indica che, pur in presenza di interventi strutturali, l'evento estremo genera battenti idrici tali da superare le soglie di sicurezza progettuali, rendendo l'intervento di riprofilatura e arginatura insufficiente per una mitigazione totale del rischio in tutti i settori del bacino.

La riconfigurazione delle quote arginali e dell'alveo può determinare, in eventi estremi, una variazione dei vettori di corrente o un mutamento dei percorsi preferenziali di espansione della piena, che, pur riducendo il danno globale dell'area, possono indurre inasprimenti locali in corrispondenza di specifici manufatti.

Sebbene l'intervento non elimini completamente la vulnerabilità per il T500, esso svolge comunque una funzione di contenimento del danno totale. L'analisi suggerisce che, per eventi di questa magnitudo, la sola protezione strutturale debba essere affiancata da strategie di gestione del rischio non strutturali, quali piani di emergenza e protocolli di protezione civile,

Commentato [IF12]: Solito commento

poiché la vulnerabilità residua rimane un elemento intrinseco del sistema fluviale e territoriale in condizioni di piena estrema.

Il grafico in Fig. 8.34 sintetizza la variazione della vulnerabilità degli edifici per lo scenario di evento estremo T500. A differenza degli scenari con tempi di ritorno inferiori, il quadro che emerge per la piena bicentenaria evidenzia una maggiore complessità nella risposta del sistema antropizzato.

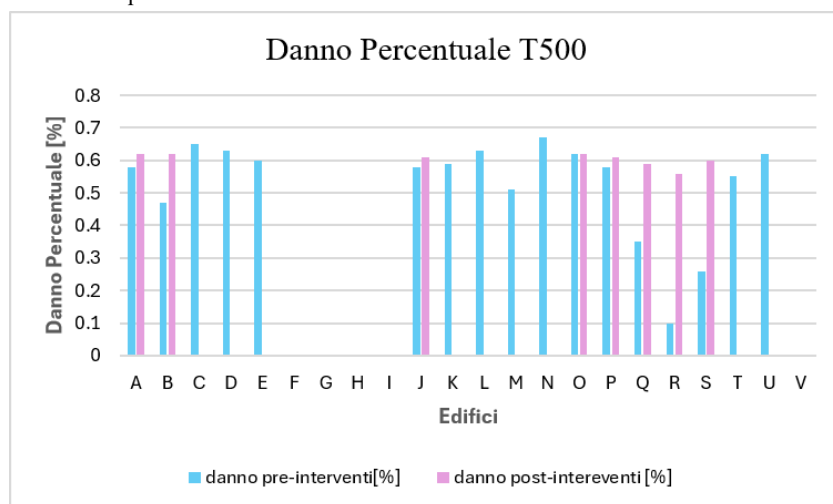


Fig. 8.34 Confronto dei danni percentuali pre e post-interventi per T500 (Excel).

Sebbene l'opera di protezione mantenga un ruolo fondamentale nel ridurre il danno globale, il grafico mostra una presenza più marcata di edifici che permangono in condizioni di rischio elevato. L'intensità della sollecitazione idraulica in questo scenario è tale da saturare in parte la capacità di invaso e contenimento delle nuove opere, portando una quota di edifici a mantenere una percentuale di danno significativa anche post-intervento. L'aumento del danno in specifiche posizioni non deve essere interpretato come un fallimento dell'opera, bensì come una manifestazione propria dei sistemi fluviali. Laddove l'intervento strutturale protegge la gran parte del tessuto urbano, l'effetto di confinamento può indurre inasprimenti locali. Questa evidenza sottolinea con forza l'importanza di superare la sola protezione strutturale, integrando il progetto con misure di protezione civile e piani di gestione del rischio che tengano conto di tali scenari limite.

Il grafico illustrato in Fig. 8.35 sintetizza il comportamento del sistema urbano di fronte ai diversi scenari di piena analizzati, tracciando la curva del danno percentuale totale in funzione del tempo di ritorno (T50, T200, T500).

Il confronto tra la curva dello "stato di fatto" (blu) e quella dello "stato di progetto" (rosa) fornisce una prova inconfutabile del beneficio apportato dalle opere di riprofilatura e adeguamento arginale. Si osserva come, per ogni tempo di ritorno considerato, l'intervento

determini una drastica riduzione del danno complessivo sul tessuto edificato.

La distanza verticale tra le due curve rappresenta, a ogni livello di probabilità, il beneficio netto dell'investimento in termini di mitigazione del rischio. È significativo notare come la pendenza della curva post-intervento sia sensibilmente inferiore rispetto a quella pre-intervento; ciò indica che le opere non solo abbassano il livello di danno assoluto, ma conferiscono al sistema urbano una maggiore resilienza, rendendo il tessuto edificato meno sensibile all'incremento di magnitudo dell'evento estremo.

In definitiva, l'analisi conferma che gli interventi progettati raggiungono l'obiettivo prefissato, garantendo una protezione strutturale efficace e costante.

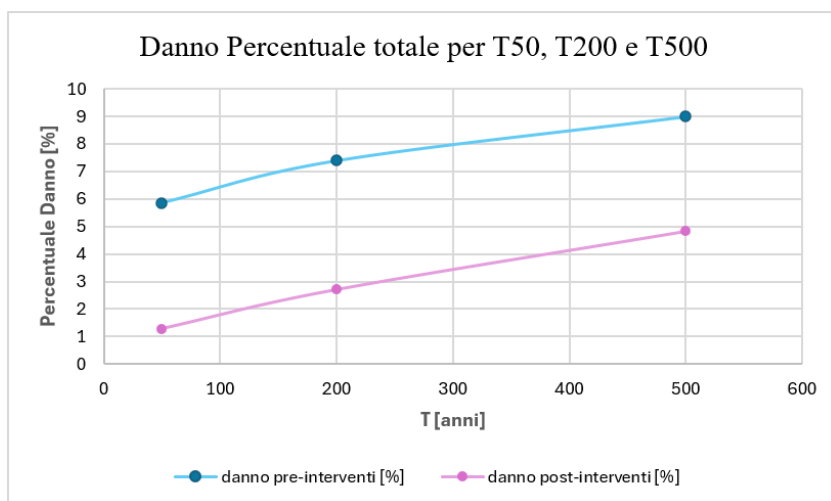


Fig. 8.35 Confronto dei danni percentuali pre e post-interventi per T50, T200 e T500 (Excel).

8.1.8. Confronto tra danno economico e percentuale di danno sugli edifici

Nel presente sottocapitolo si esegue l'analisi comparativa tra il danno economico, espresso in termini monetari (€), e la percentuale di danno fisico subito dalle unità edilizie, intesa come indice della vulnerabilità strutturale. Mentre la quantificazione economica fornisce una misura immediata dell'impatto economico complessivo, parametro essenziale per le analisi di sostenibilità degli investimenti pubblici, la valutazione del danno percentuale permette di isolare la risposta intrinseca del manufatto all'azione del battente idrico.

L'integrazione di questi due approcci consente di delineare un quadro esaustivo della resilienza del tessuto urbano di Riva Trigoso. La relazione tra il valore assoluto del danno e la percentuale di vulnerabilità permette, infatti, di distinguere tra edifici che subiscono danni lievi su valori immobiliari elevati e strutture soggette a danni strutturali severi su beni di valore inferiore, fornendo così un criterio decisionale fondamentale per la pianificazione di eventuali interventi di protezione locale o di manutenzione straordinaria. Attraverso il confronto tra gli scenari "stato

di fatto” e “stato di progetto” si valuta non solo l’efficacia globale delle opere di mitigazione idraulica, in termini di riduzione del rischio, ma anche la variazione della distribuzione spaziale e qualitativa della vulnerabilità fisica nel comparto urbano.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.36):

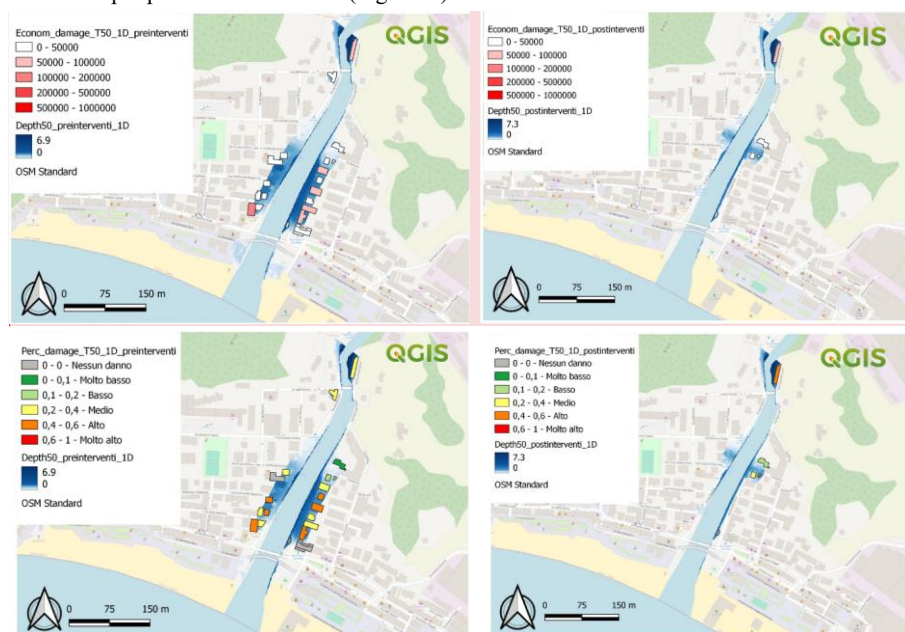


Fig. 8.36 Confronto dei danni economici e strutturali in percentuale pre e post-interventi dal plugin FloodD2B per T50 (QGIS).

L’analisi dell’impatto degli eventi di piena sul comparto edificato di Riva Trigoso viene qui approfondita attraverso un confronto diretto tra le variabili di danno economico (€) e il grado di danneggiamento strutturale (%). Tale approccio consente di valutare non solo l’estensione spaziale dell’inondazione, ma anche la severità degli effetti sulle diverse tipologie edilizie presenti nel territorio.

Il confronto cartografico tra lo stato di fatto e lo stato post-intervento evidenzia chiaramente l’efficacia delle opere di mitigazione progettate. Dall’osservazione delle mappe si evince una marcata diminuzione del numero di edifici coinvolti, con una redistribuzione delle classi di danno che riflette il nuovo andamento del battente idrico.

In particolare, l’analisi evidenzia due dinamiche fondamentali:

- riduzione dell’esposizione: molte unità edilizie, precedentemente soggette a tassi di danno percentuale medio-alti, risultano ora escluse dal perimetro di inondazione o interessate in modo trascurabile, comportando un abbattimento diretto del danno economico stimato;
- analisi dei punti critici: nonostante la riduzione complessiva del rischio, la sovrapposizione

Commentato [IF13]: Solito commento

cartografica permette di individuare le aree in cui il danno residuo rimane più elevato. Questo dato assume un valore strategico: sebbene l'intervento idraulico sia risolutivo per gran parte del tessuto urbano, l'analisi bivariata tra danno economico e vulnerabilità fisica suggerisce la necessità di eventuali misure di protezione locale ("a livello di edificio") per le strutture che, pur beneficiando dell'opera, presentano ancora una vulnerabilità strutturale non trascurabile.

In sintesi, il confronto dimostra che la progettazione degli interventi non ha agito esclusivamente sulla riduzione della magnitudo dell'evento, ma ha influenzato positivamente la resilienza del sistema urbano, rendendo il tessuto edificato meno suscettibile a danni catastrofici e riducendo il potenziale impatto finanziario a valle della piena.

– Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.37):

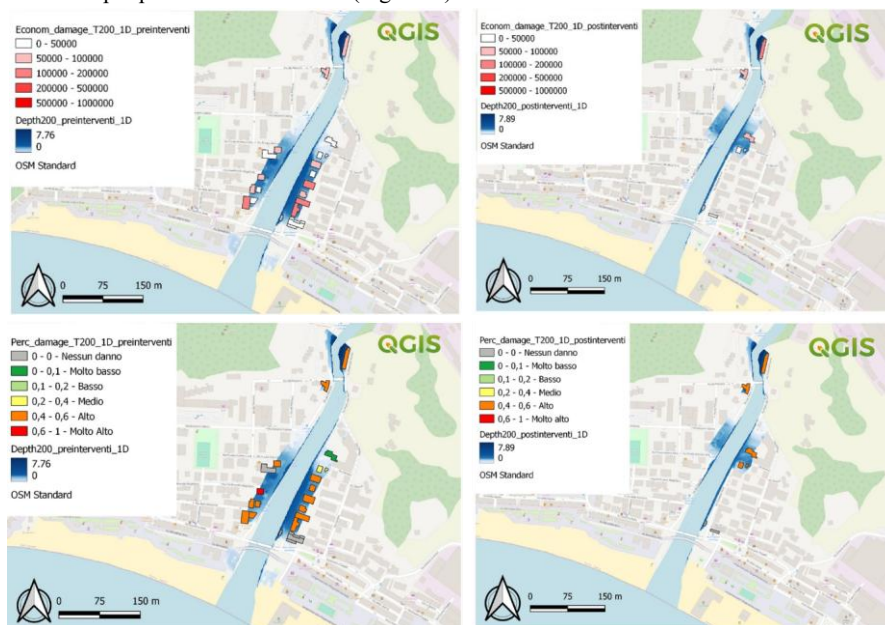


Fig. 8.37 Confronto dei danni economici e strutturali in percentuale pre e post-interventi dal il plugin FloodD2B per T200 (QGIS).

L'estensione dell'analisi allo scenario di piena con tempo di ritorno T200 permette di osservare la risposta del tessuto urbano di Riva Trigoso in condizioni di sollecitazione idraulica più gravosa. Il confronto tra la configurazione pre-intervento e post-intervento evidenzia come, nonostante l'incremento della portata di piena, le opere di mitigazione mantengano un'efficacia significativa nella riduzione del danno.

Dall'osservazione delle mappe tematiche si evincono le seguenti dinamiche specifiche per il T200:

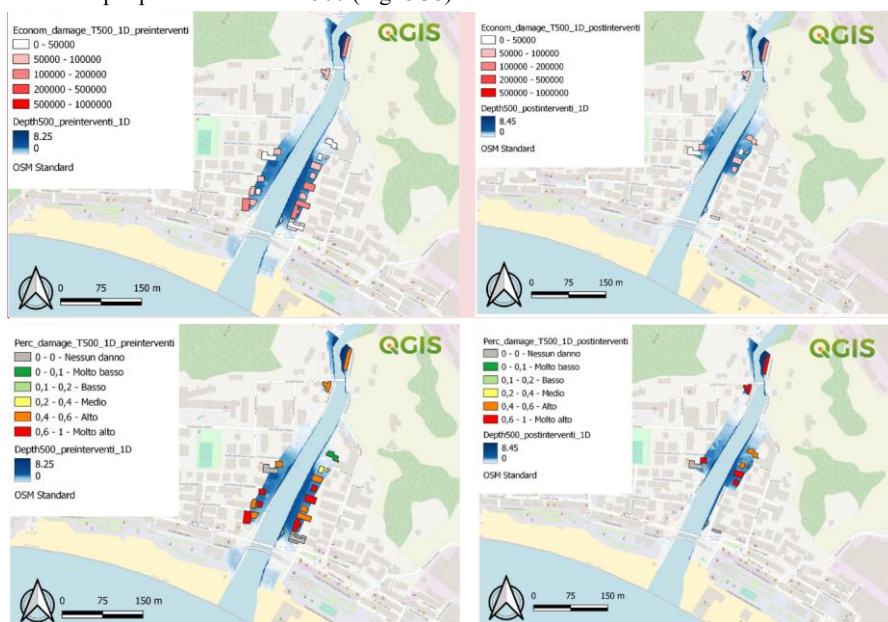
– contenimento della propagazione del danno: si osserva una maggiore estensione delle aree

esposte rispetto al T50. Tuttavia, il confronto cartografico mostra come gli interventi progettati riescano a limitare efficacemente l'ingresso delle acque in settori densamente edificati;

- l'analisi del T200 mette in luce alcune aree dove il danno residuo rimane significativo. Queste zone, identificabili attraverso la sovrapposizione delle mappe, rappresentano i punti di vulnerabilità strutturale in cui il battente idrico, pur essendo mitigato, supera comunque le soglie di tolleranza degli edifici. Tale evidenza risulta fondamentale per definire priorità di manutenzione o per la pianificazione di ulteriori azioni di difesa locale.

In conclusione, l'analisi del T200 conferma che le opere di mitigazione agiscono come un sistema di protezione, sebbene per eventi estremi il rischio non venga annullato, la trasformazione del danno da "catastrofico" a "gestibile" attesta il valore dell'investimento infrastrutturale nella riduzione della vulnerabilità globale.

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.38):



Commentato [IF14]: Solito commento

Fig. 8.38 Confronto dei danni economici e strutturali in percentuale pre e post-interventi dal il plugin Flood2B per T500 (QGIS).

L'analisi dell'evento di piena con tempo di ritorno T500 rappresenta la verifica di resilienza del sistema in condizioni di evento estremo. In questo scenario, le portate in gioco raggiungono valori che testano i limiti di saturazione del reticolo idrografico e l'efficacia delle opere di difesa spondale e di laminazione.

Il confronto cartografico e quantitativo tra i pre-interventi e i post-interventi per il T500 evidenzia i seguenti aspetti:

- contenimento dell’esonazione: nonostante la magnitudo dell’evento, le opere di mitigazione mostrano un’azione di contenimento ancora apprezzabile. Sebbene l’area inondata sia estesa, si nota un rallentamento della dinamica di propagazione delle acque, che permette di evitare scenari di collasso strutturale in settori del nucleo urbano di Riva Trigoso che, in assenza di interventi, risulterebbero danneggiati;
- l’analisi bivariata per il T500 permette di identificare i cosiddetti punti in cui per alcuni edifici la vulnerabilità fisica è talmente elevata da rendere il danno economico, comunque, ingente nonostante gli interventi. Questa evidenza è cruciale per la pianificazione di lungo periodo: indica che, per eventi di portata T500, la difesa idraulica deve necessariamente essere integrata da strategie di protezione del costruito per ridurre ulteriormente il rischio residuo.

In conclusione, l’analisi del T500 dimostra che le opere realizzate conferiscono al sistema un “margine di sicurezza” che impedisce l’effetto domino dei danni. Anche in condizioni estreme, il beneficio netto dell’investimento è tangibile, riducendo significativamente l’area di impatto massimo e proteggendo il cuore del centro abitato da danni strutturali irreversibili.

8.2. Analisi e confronto dei dati ottenuti da simulazione 2D

Il presente paragrafo è dedicato all’analisi e al confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni idrauliche bidimensionali (2D), sviluppate per valutare l’efficacia degli interventi di mitigazione del rischio idraulico previsti lungo il tratto terminale del torrente Petronio a Riva Trigoso. In analogia con l’approccio metodologico adottato nel sottocapitolo 8.1, la modellazione 2D, eseguita in ambiente HEC-RAS, permette di superare i limiti dell’analisi monodimensionale, offrendo una rappresentazione spazialmente dettagliata dell’estensione dell’inondazione, dei campi di velocità e della propagazione del fronte di piena sul tessuto urbano.

L’obiettivo principale è quantificare il beneficio apportato dalle opere di riprofilatura dell’alveo e dal consolidamento arginale, confrontando lo scenario di “stato di fatto” con quello di “progetto”. Tale valutazione integra indagini qualitative, basate sulla visualizzazione cartografica della propagazione dei battenti, e analisi quantitative, focalizzate sulla stima della riduzione del danno economico e strutturale tramite il plugin FloodD2B. Viene inoltre introdotto un confronto critico con il layer ufficiale dei battenti della Regione Liguria, al fine di validare l’attendibilità dei modelli prodotti e la loro rispondenza agli strumenti di Pianificazione di Bacino vigenti.

8.2.1. Confronto tra il layer “battenti” del modello pre-interventi e la cartografia regionale

Il presente sottocapitolo si propone di analizzare e confrontare i risultati idraulici ottenuti attraverso la modellazione bidimensionale dello stato di fatto con gli elaborati cartografici ufficiali forniti dalla Regione Liguria. Tale confronto risulta fondamentale per validare l’attendibilità del modello numerico implementato in ambiente HEC-RAS, verificando la

capacità del medesimo di riprodurre correttamente i fenomeni di inondazione, tenendo presente come già detto in precedenza che non si ha piena conoscenza dei parametri di impostazione del software usato dalla Regione per la realizzazione di tale layer.

L'analisi si articola mediante una comparazione delle mappe. Questo passaggio metodologico non ha il solo scopo di verificare la coerenza tra le due diverse sorgenti di dati, ma mira a identificare eventuali differenze.

Tale operazione preliminare costituisce il prerequisito indispensabile per la successiva valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione, garantendo che il confronto tra scenario di progetto e scenario di fatto avvenga su una base modellistica solida e scientificamente validata.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.39):



Fig. 8.39 Confronto tra i layer “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” (a destra) e il layer pre-interventi da simulazione HEC-RAS (a sinistra) del torrente Petronio per T50 (QGIS).

Il confronto proposto analizza la distribuzione dei tiranti idrici simulati dal modello 2D rispetto al layer ufficiale della Regione Liguria. Tale descrizione mira a contestualizzare la risposta idraulica del torrente Petronio nel tratto focivo in condizioni di stato di fatto, evidenziando le aree di convergenza e le divergenze interpretative tra la modellazione della corrente e la mappatura di piano.

Dall'osservazione dei risultati si nota come il modello 2D restituisca un'estensione dell'area inondata che, seppur sostanzialmente compatibile con la cartografia regionale, mostra una propagazione del livello dell'acqua con valori differenti, manifestando battenti idrici mediamente più contenuti rispetto alla stima dell'Autorità di Bacino.

In termini qualitativi, le zone individuate come maggiormente critiche dal layer regionale trovano conferma nel modello 2D, sebbene si riscontri una diversa distribuzione dei battenti nelle aree limitrofe all'alveo. Questa divergenza descrittiva trova spiegazione nel DTM utilizzato nel modello attuale e i parametri usati nel software.

In conclusione, la configurazione dei battenti per il T50 così ottenuta appare un punto di partenza coerente per le successive analisi quantitative: la validazione visiva dimostra che il modello 2D è in grado di replicare i macro-fenomeni di inondazione, fornendo una base di calcolo per valutare, nei paragrafi a seguire, l'impatto reale delle opere di mitigazione progettate.

Commentato [IF15]: Sarebbe utile usare la stessa scala di colori e anche la stessa scala (zoom sulla mappa)

– Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.40):



Fig. 8.40 Confronto tra i layer “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” (a destra) e il layer pre-interventi da simulazione HEC-RAS (a sinistra) del torrente Petronio per T200 (QGIS).

L’analisi dell’evento con tempo di ritorno T200 permette di osservare la risposta del sistema fluviale e del tessuto urbano di Riva Trigoso in uno scenario di piena più severo. Il confronto tra la cartografia regionale e i risultati della simulazione 2D evidenzia una maggiore estensione delle aree interessate dall’inondazione in entrambe le mappe, coerentemente con l’aumento delle portate di progetto.

Il confronto con il layer regionale mette in luce una divergenza, in termini sia di estensione del battente sia del valore massimo raggiunto.

In definitiva, l’analisi per il T200 esattamente come per T50, permette di osservare delle discrepanze dovute come già detto in precedenza al DTM, ai parametri di impostazione del software...

– Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.41):



Fig. 8.41 Confronto tra i layer “Battenti e Velocità da studi idraulici di dettaglio” (a destra) e il layer pre-interventi da simulazione HEC-RAS (a sinistra) del torrente Petronio per T500 (QGIS).

Per l’evento estremo con tempo di ritorno T500, il confronto tra la cartografia regionale e i risultati del modello 2D evidenzia una dinamica interessante. Si osserva come il modello 2D produca un’area di inondazione complessivamente più circoscritta rispetto al perimetro di riferimento regionale, concentrando tuttavia i volumi d’acqua in battenti idrici di intensità

Commentato [IF16]: Vedi commento precedente

Commentato [IF17]: Vedi commento precedente

localmente superiore.

Questa configurazione, caratterizzata da un'estensione spaziale inferiore ma da una maggiore severità dei livelli idrici, trova giustificazione nel DTM utilizzato per la simulazione HEC-RAS.

In sostanza, dove il modello regionale distribuisce l'acqua su una superficie maggiore, il modello 2D evidenzia un comportamento dove l'acqua tende ad accumularsi.

8.2.2. Analisi dell'estensione dell'area inondata e la differenza tra i livelli idrici pre-interventi e cartografia regionale

In continuità con quanto esposto nel precedente sottocapitolo, l'attenzione si sposta ora verso una valutazione più rigorosa dei parametri idraulici fondamentali: l'estensione areale delle zone interessate dall'inondazione e la distribuzione dei tiranti idrici. Questa sezione ha l'obiettivo di quantificare puntualmente le divergenze tra lo scenario di stato di fatto, modellato tramite HEC-RAS, e la cartografia ufficiale della Regione Liguria.

L'analisi viene declinata per ciascuno degli scenari di evento analizzati (T50, T200, T500), permettendo di valutare come la risposta del bacino del torrente Petronio vari al crescere del tempo di ritorno. Attraverso l'elaborazione dei dati in ambiente GIS e la successiva comparazione tabellare e cartografica, si intende determinare la variazione delle superfici inondate e lo scostamento medio dei livelli idrici nelle aree urbanizzate di Riva Trigoso.

Tale confronto risulta cruciale non solo per la validazione quantitativa del modello 2D rispetto ai dati di Piano di Bacino, ma costituisce anche la base conoscitiva necessaria per comprendere l'impatto spaziale delle criticità idrauliche pre-intervento. La comprensione di queste differenze, in termini di estensione e profondità, fornisce infatti il quadro di riferimento indispensabile per misurare, negli sviluppi successivi del presente lavoro, l'efficacia degli interventi di riprofilatura e arginatura proposti, validandone la capacità di mitigazione rispetto al quadro di rischio originariamente definito.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.42):

L'estensione dell'area inondata dello stato di fatto risulta pari a 86,575 m², mentre per la cartografia regionale l'estensione dell'area inondata risulta pari a 113,087 m².

Tale differenza, pari a circa il 30% in termini di estensione, sottolinea come per la cartografia di Piano si abbiano delle perimetrazioni più estese. Il valore inferiore ottenuto dal modello 2D è riconducibile al DTM utilizzato e anche ai parametri usati per la simulazione.

Per visualizzare in modo immediato tale divergenza, la figura seguente (Fig. 8.42) mette a confronto i due perimetri: in rosso è evidenziata l'estensione dell'area definita dalla cartografia regionale, mentre in verde è rappresentata l'area effettivamente interessata dall'inondazione secondo la simulazione HEC-RAS.

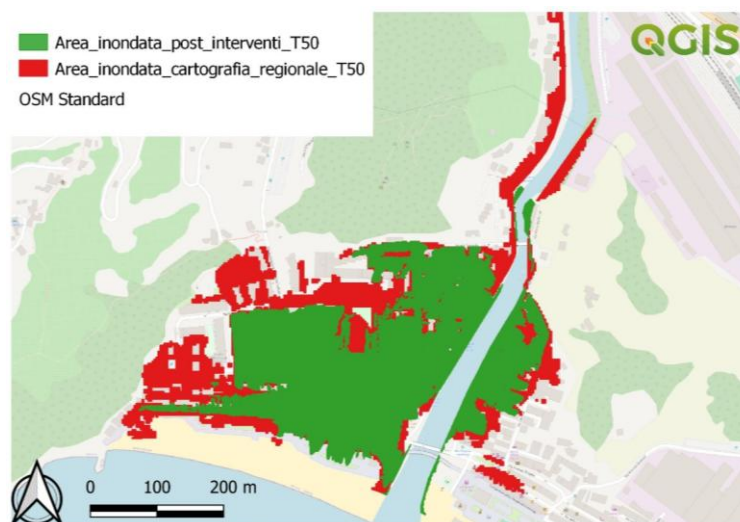


Fig. 8.42 Mappa comparativa dell'analisi 2D pre-interventi e cartografia regionale dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T50 (QGIS).

Al fine di analizzare puntualmente le variazioni nei tiranti idrici, è stata condotta una sottrazione tra il raster dei battenti derivante dal modello 2D e quello della cartografia regionale. La Fig. 8.43 illustra tale differenza spaziale, mappata secondo una scala cromatica in cui i valori positivi (in verde) rappresentano le aree in cui la simulazione 2D evidenzia battenti idrici superiori rispetto ai dati ufficiali, mentre i valori negativi (in rosa) indicano le zone dove il modello regionale presenta stime più elevate.

Tale elaborazione permette di isolare le discrepanze locali, fornendo una chiave di lettura immediata sull'attendibilità del modello in diverse porzioni del tessuto urbano. Le aree in verde, in particolare, rappresentano i punti di maggiore attenzione dove la modellazione 2D suggerisce una criticità idraulica più severa, offrendo un contributo informativo fondamentale per la successiva calibrazione degli interventi di mitigazione.

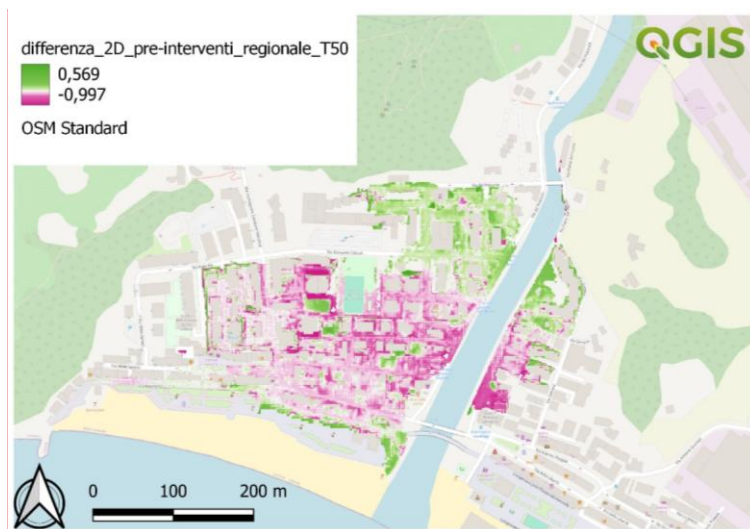


Fig. 8.43 Mappa comparativa dei battenti 2D pre-interventi e cartografia regionale del torrente Petronio per T50 (QGIS).

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.44):

L'estensione dell'area inondata dello stato di fatto risulta pari a 114,360 m², mentre per la cartografia regionale l'estensione dell'area inondata risulta pari a 160,879 m².

Anche in questo scenario, la discrepanza rilevata, che vede il modello regionale estendersi su una superficie maggiore di circa il 40% rispetto al modello 2D, conferma ciò che effettivamente era già stato evidenziato per T50.

La Figura 8.44 illustra visivamente tale divergenza: in rosso è riportato il perimetro dell'area inondata derivante dalla cartografia regionale, mentre in verde è evidenziata l'area di inondazione calcolata dal modello 2D. La sovrapposizione consente di apprezzare come il modello della regione tenda ad estendersi ad aree periferiche, mentre la simulazione 2D operi una selezione più puntuale.

Commentato [IF18]: Fermati al primo decimale nella legenda

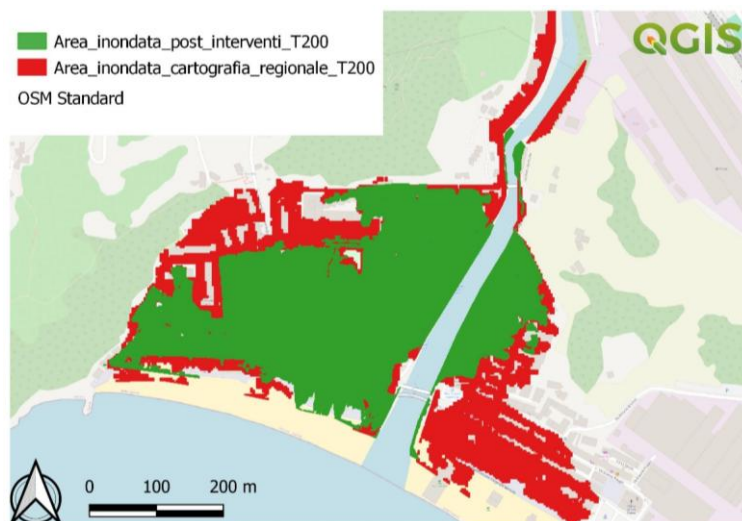


Fig. 8.44 Mappa comparativa dell'analisi 2D pre-interventi e cartografia regionale dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T200 (QGIS).

Allo scopo di quantificare puntualmente il differenziale tra i tiranti idrici simulati e quelli desunti dalla cartografia regionale, è stata eseguita una differenza tra layer raster. La Fig. 8.45 visualizza l'esito di tale operazione, dove le aree in verde (valori positivi) delineano le zone in cui il modello 2D produce una risposta idraulica più conservativa rispetto alle mappe dei battenti vigenti, mentre le zone in rosa (valori negativi) indicano le aree in cui la Regione stima tiranti più elevati. Tale analisi risulta strategica per identificare le peculiarità locali del deflusso, confermando come la modellazione 2D permetta di dettagliare meglio le criticità strutturali, orientando così la calibrazione degli interventi di protezione in modo più mirato ed efficace.

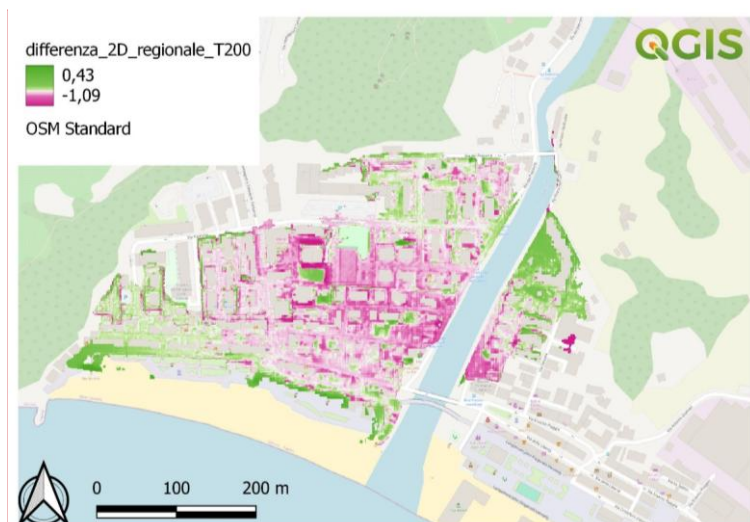


Fig. 8.45 Mappa comparativa dei battenti 2D pre-interventi e cartografia regionale del torrente Petronio per T200 (QGIS).

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.46):

L'estensione dell'area inondata dello stato di fatto risulta pari a 123,056 m², mentre per la cartografia regionale l'estensione dell'area inondata risulta pari a 174,249 m².

Si riscontra una differenza areale significativa, con la cartografia regionale che stima una superficie interessata dal fenomeno superiore di circa il 40% rispetto ai risultati del modello 2D. Anche in questo scenario estremo, tale scostamento conferma la natura prudentiale degli strumenti di pianificazione sovraordinati, i quali tendono a includere nel perimetro di pericolosità anche aree che, secondo una modellazione dinamica, non risultano effettivamente raggiunte dal deflusso o che presentano battenti idrici trascurabili.

La Figura 8.45 propone il confronto spaziale tra i due perimetri: in rosso è delineata l'area di inondazione derivante dalla cartografia regionale, mentre in verde è rappresentata la zona effettivamente soggetta a inondazione secondo la simulazione 2D.

Commentato [IF19]: Vedi commento precedente

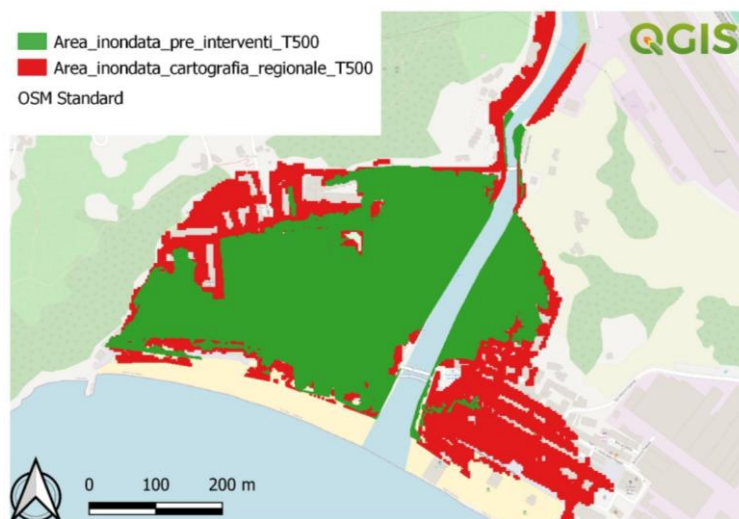


Fig. 8.45 Mappa comparativa dell'analisi 2D pre-interventi e cartografia regionale dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T500 (QGIS).

La valutazione degli scostamenti tra i livelli idrici modellati e quelli stabiliti dalla cartografia ufficiale è stata formalizzata mediante una sottrazione spaziale dei rispettivi raster. Attraverso la mappatura proposta nella Fig. 8.46, è possibile leggere le variazioni di battente: il verde indica le aree in cui la simulazione HEC-RAS 2D individua battenti più profondi rispetto al quadro regionale, mentre il rosa segnala le zone in cui il dato di piano risulta predominante. La lettura critica di queste discrepanze locali, specialmente nelle aree dove la simulazione 2D evidenzia criticità in verde, fornisce elementi di conoscenza per validare la robustezza del modello e per perfezionare le strategie di difesa idraulica previste nel progetto.

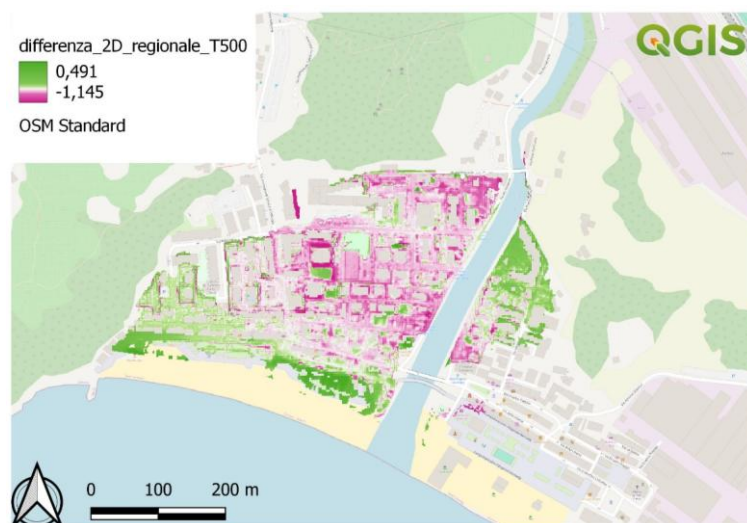


Fig. 8.46 Mappa comparativa dei battenti 2D pre-interventi e cartografia regionale del torrente Petronio per T500 (QGIS).

8.2.3. Analisi dei volumi di esondazione dal confronto tra il layer pre-interventi e la cartografia regionale

Il presente sottocapitolo è dedicato alla quantificazione volumetrica dei fenomeni di esondazione che interessano il tratto focivo del torrente Petronio, ponendo a confronto lo scenario di stato di fatto con lo scenario della cartografia regionale. Tale analisi assume una valenza cruciale nell'economia del lavoro di tesi, in quanto permette di tradurre i risultati, espressa in termini di battenti e tiranti idrici, in una metrica volumetrica concreta, necessaria per valutare le differenze dei layer.

Nella Tab. 8.11 vengono mostrati risultati dei volumi d'acqua espressi in m^3 per i tre periodi di ritorno, ricavati da analisi statistiche direttamente su QGIS.

Periodo di ritorno (T) [anni]	Volume acqua esondata (pre- interventi) [m^3]	Volume acqua esondata (cartografia regionale)	Δ Volume [m^3]
50	47809	89728	41919
200	78541	149660	71119
500	92765	181121	88356

Tab. 8.11 Rappresentazione dei volumi d'acqua esondati pre-interventi e cartografia regionale (Excel).

L'analisi dei dati mette in luce come il modello pre-interventi restituisca volumi di esondazione più contenuti rispetto alle mappe regionali. Tale differenza non deve essere letta come una lacuna della simulazione 2D, bensì come una differenza nel trattare i dati.

La cartografia regionale tende a una perimetrazione che include ampie porzioni di territorio in ottica prudentiale.

8.2.4. Analisi degli edifici coinvolti dall'inondazione per i layer pre-interventi e cartografia regionale

Dopo aver analizzato l'estensione areale delle aree inondate e i volumi d'acqua esondati, l'indagine si sposta sulla valutazione dell'impatto antropico dell'inondazione. Il presente sottocapitolo è dedicato alla quantificazione degli edifici interessati dall'evento di piena, confrontando le stime derivanti dalla simulazione idraulica 2D (pre-interventi) con quelle definite dall'analisi spaziale sulla cartografia regionale.

L'analisi si basa su una procedura di *overlay* spaziale tra i layer delle aree inondate e il database catastale dell'edificato. Come emerso dalle precedenti elaborazioni, la natura della cartografia di piano regionale, caratterizzata da perimetrazioni di inondazione più estese, comporta inevitabilmente il coinvolgimento di un numero superiore di unità edilizie rispetto a quanto evidenziato dal modello 2D.

Per ciascuno degli scenari di tempo di ritorno considerati (T50, T200, T500), è stata elaborata una specifica mappa di confronto (Fig. 8.47, 8.48, 8.49) che visualizza in modo immediato l'edificato interessato dai due diversi perimetri. Queste elaborazioni cartografiche permettono di identificare non solo la differenza nel numero di edifici coinvolti, ma anche la loro distribuzione spaziale all'interno del tessuto urbano di Riva Trigoso, distinguendo tra le aree di sovrapposizione e quelle soggette a inondazione solo secondo il quadro regionale. Tale approfondimento costituisce un passaggio preliminare indispensabile per la successiva analisi di vulnerabilità strutturale e per la stima del danno economico, permettendo di comprendere come la variazione dell'estensione dell'inondazione si traduca direttamente in un differente grado di esposizione del patrimonio edilizio.

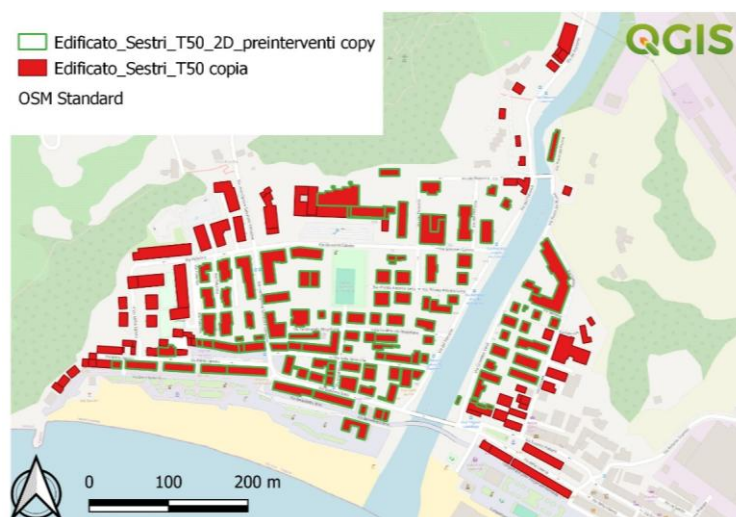


Fig. 8.47 Analisi comparativa della vulnerabilità dell'edificio (scenario T50) pre-interventi 2D e cartografia regionale. (QGIS).

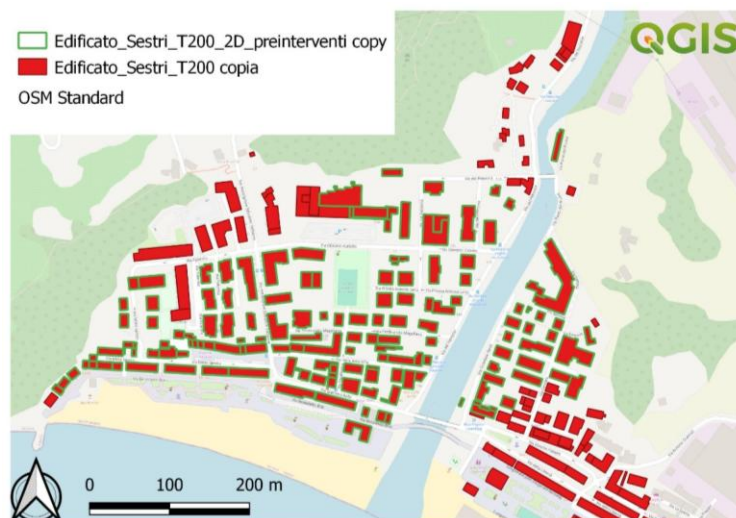


Fig. 8.48 Analisi comparativa della vulnerabilità dell'edificio (scenario T200) pre-interventi 2D e cartografia regionale. (QGIS).

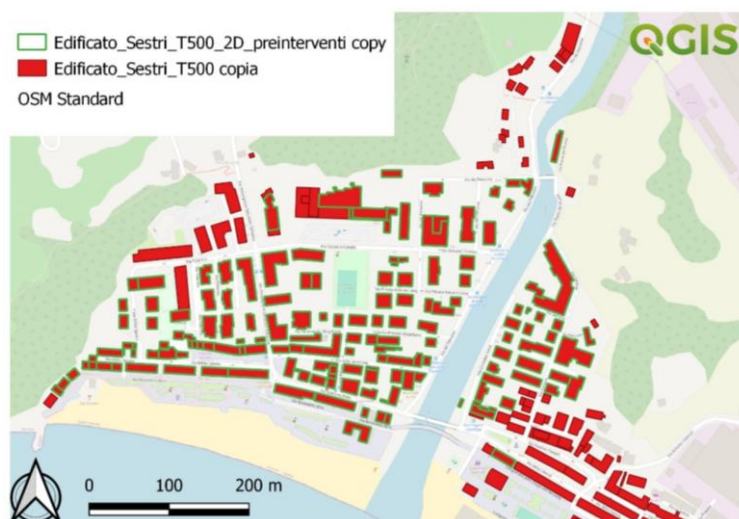


Fig. 8.49 Analisi comparativa della vulnerabilità dell'edificato (scenario T500) pre-interventi 2D e cartografia regionale. (QGIS).

8.2.5. Valutazione del danno economico: confronto tra modello pre-interventi e cartografia regionale

Dopo aver quantificato l'impatto in termini di estensione areale ed edifici coinvolti, la presente sezione si focalizza sulla stima del danno economico potenziale derivante dagli eventi di piena analizzati. L'obiettivo è tradurre i risultati idraulici in termini monetari, confrontando i danni calcolati per lo scenario di stato di fatto (tramite il modello 2D) con quelli ipotizzati sulla base della cartografia ufficiale.

Il processo di valutazione si avvale delle funzioni di danno (depth-damage functions), le quali mettono in relazione il battente idrico simulato con il valore intrinseco del patrimonio edilizio. Tale procedura permette di introdurre una dimensione quantitativa legata alla severità del danno in funzione della profondità dell'inondazione e della tipologia costruttiva.

Analogamente alle analisi precedenti, la valutazione viene declinata per i diversi tempi di ritorno (T50, T200, T500), con l'obiettivo di confrontare l'esposizione economica teorica definita dagli strumenti di pianificazione regionale con quella stimata dal modello 2D. Nei paragrafi successivi si analizzerà nel dettaglio, per ogni scenario di piena, come la variazione dei livelli idrici e dell'estensione inondata si rifletta sulla quantificazione economica complessiva e sulla distribuzione spaziale dei costi del danno.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.50):

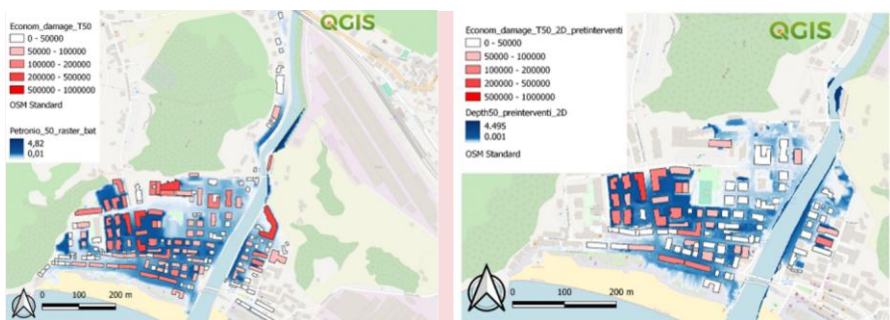


Fig. 8.50 Confronto dei danni economici pre-interventi e cartografia regionale con il plugin FlooD2B per T50 (QGIS).

La valutazione economica del danno, calcolata come sommatoria dei valori economici stimati per ogni unità edilizia coinvolta, fornisce una misura diretta delle differenze che si possono osservare tra i due layer.

Il confronto tra le sommatorie totali del danno consente di quantificare il danno (Fig. 8.51) in: 10,756,990 € (pre-intervento) e 4,510,531 € (cartografia regionale).

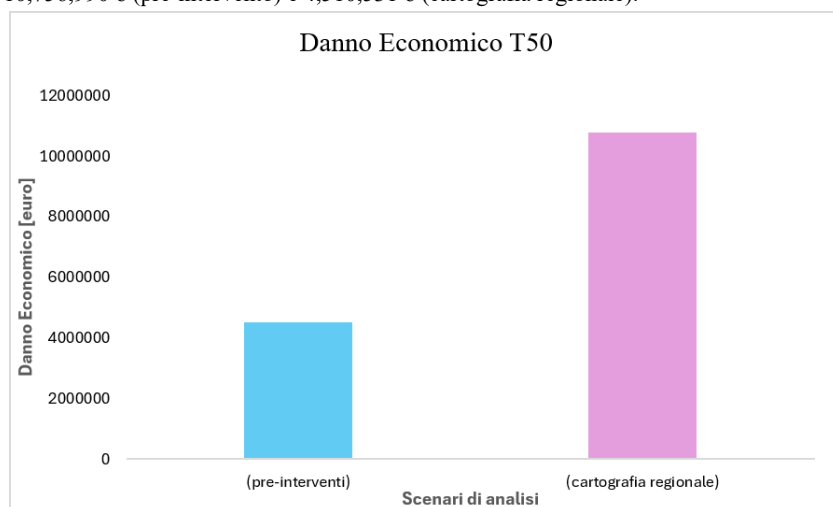


Fig. 8.51 Confronto dei danni economici pre-interventi e cartografia regionale per T50 (Excel).

Il grafico illustra la stima del danno economico potenziale associato all'evento di piena con tempo di ritorno T50, confrontando il valore ottenuto tramite la simulazione idraulica 2D di quello definito dalla cartografia ufficiale della Regione Liguria.

Dall'osservazione dei risultati emerge una marcata divergenza quantitativa: a fronte di un danno stimato dal modello 2D pari a circa 4,5 milioni di euro, la cartografia regionale proietta un impatto economico superiore ai 10 milioni di euro. Tale scostamento trova spiegazione

Commentato [IF20]: Solito commento

nella differente estensione areale dell'inondazione precedentemente analizzata.

L'analisi evidenzia come la perimetrazione regionale, tendendo a includere una porzione di territorio più vasta, e dunque un numero maggiore di edifici e asset economici, conduca a una stima del danno fortemente influenzata da criteri di prudenza precauzionale. Questa differenza sottolinea l'importanza di un approccio modellistico di dettaglio per una programmazione economica degli interventi di mitigazione che sia basata su una quantificazione del rischio più aderente alle reali dinamiche del torrente Petronio, evitando una potenziale sovrastima del danno che potrebbe influenzare l'allocazione delle risorse negli interventi di protezione.

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.52):

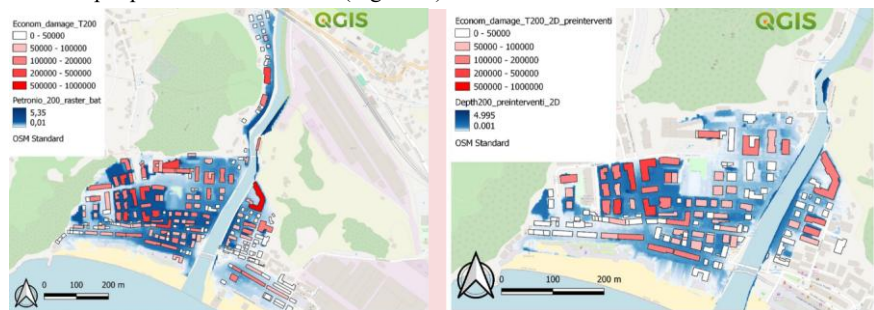


Fig. 8.52 Confronto dei danni economici pre-interventi e cartografia regionale con il plugin FloodD2B per T200 (QGIS).

La valutazione economica del danno, calcolata come sommatoria dei valori monetari stimati per ogni unità edilizia coinvolta, fornisce una misura diretta delle differenze che si possono osservare tra i due layer.

Il confronto tra le sommatorie totali del danno consente di quantificare il danno (Fig. 8.53) in: 6,966,614 € (pre-intervento) e 15,078,365 € (cartografia regionale).

Commentato [IF21]: Solito commento

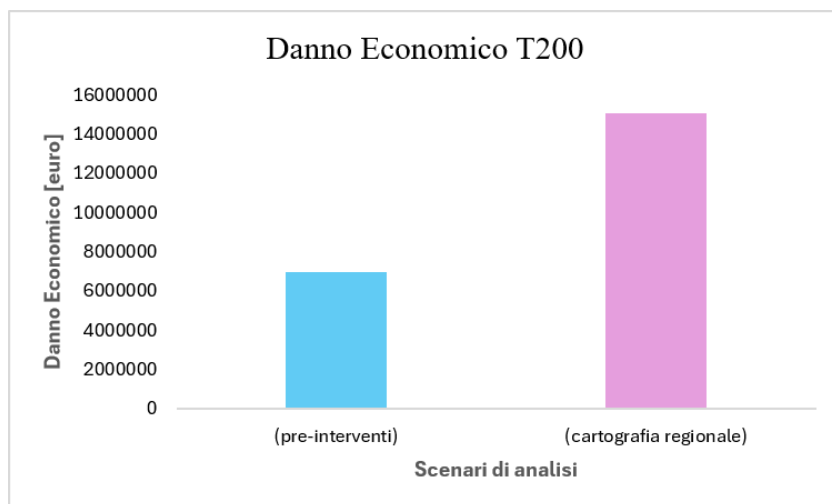


Fig. 8.53 Confronto dei danni economici pre-interventi e cartografia regionale per T200 (Excel).

Il grafico in figura presenta il confronto tra le stime del danno economico potenziale per lo scenario di piena T200, ponendo in relazione i risultati ottenuti dalla simulazione idraulica 2D con le indicazioni della cartografia regionale.

Dall'analisi si evince un differenziale significativo: il modello dello stato di fatto stima un danno economico di circa 7 milioni di euro, mentre il dato della cartografia ufficiale regionale raggiunge un valore di 15 milioni di euro. Anche per questo tempo di ritorno, il divario economico appare marcato, riflettendo la medesima differenza riscontrata nelle analisi precedenti in merito all'estensione delle aree inondate. La sovrastima economica associata alla cartografia regionale è da imputare all'approccio che perimetra aree di rischio più ampie, includendo un numero superiore di unità edilizie e di asset economici nei calcoli di danno.

– Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.54):

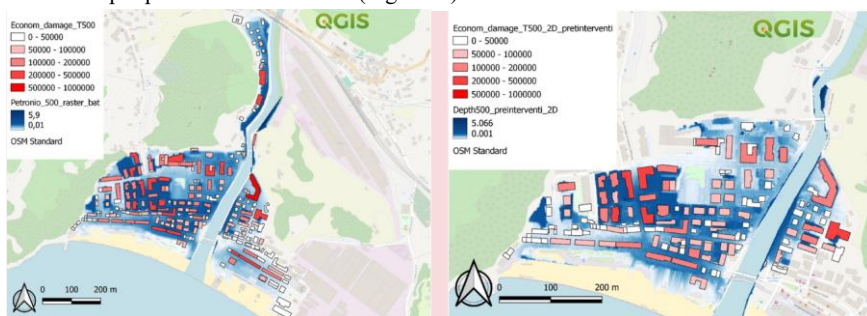


Fig. 8.54 Confronto dei danni economici pre-interventi e cartografia regionale con il plugin FloodD2B per T500 (QGIS).

Commentato [IF22]: Solito commento

La valutazione economica del danno, calcolata come sommatoria dei valori monetari stimati per ogni unità edilizia coinvolta, fornisce una misura diretta delle differenze che si possono osservare tra i due layer.

Il confronto tra le sommatorie totali del danno consente di quantificare il danno (Fig. 8.55) in: 17,054,126 € (pre-intervento) e 82,278,549 € (cartografia regionale).

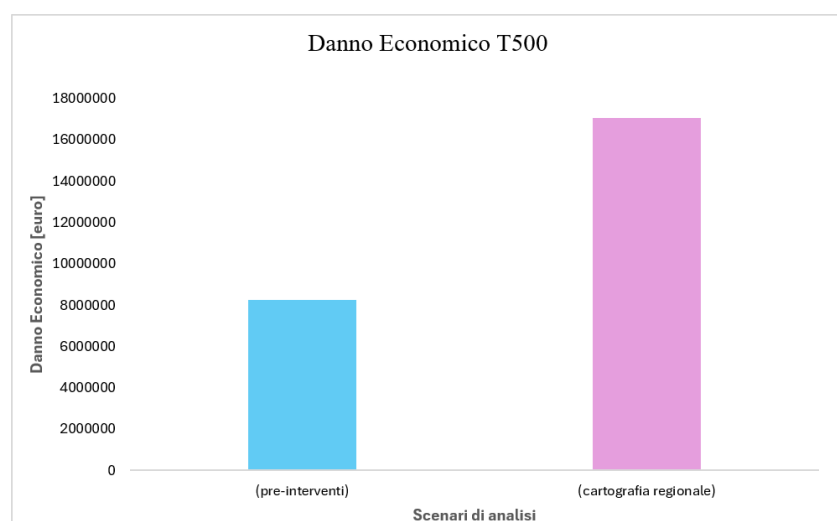


Fig. 8.55 Confronto dei danni economici pre-interventi e cartografia regionale per T500 (Excel).

Il grafico illustra il confronto tra la stima del danno economico per l'evento T500 ottenuta tramite la simulazione 2D (pre-interventi) e il valore definito dalla cartografia regionale.

I risultati mostrano come, anche in questo scenario estremo, la cartografia regionale attesti un impatto economico superiore, pari a circa 17 milioni di euro, a fronte degli oltre 8 milioni di euro calcolati dal modello 2D. Questo divario conferma la tendenza osservata per i tempi di ritorno T50 e T200.

8.2.6. Valutazione del danno percentuale strutturale: confronto tra modello pre-interventi e cartografia regionale

Il presente sottocapitolo si focalizza sulla validazione del modello idraulico di stato di fatto sviluppato per il bacino del torrente Petronio, attraverso un'analisi comparativa con la cartografia ufficiale fornita dalla Regione Liguria. Il confronto tra le due sorgenti di dati, condotto mediante l'estrazione dei battenti idrici e l'applicazione delle curve di danno JRC tramite il plugin FloodD2B, mira a valutare il grado di convergenza tra la simulazione 2D e quella ufficiale. Tale analisi verifica anche la coerenza del workflow modellistico.

- Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.56):

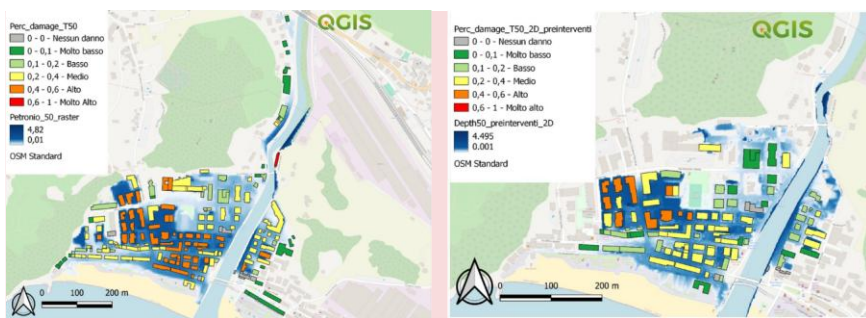


Fig. 8.56 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre-interventi e cartografia regionale con il plugin FloodD2B per T50 (QGIS).

La Figura 8.56 illustra il confronto spaziale tra la stima del danno strutturale derivante dal modello 2D (a destra) e quello ricavato dalla cartografia ufficiale regionale (a sinistra), entrambi riferiti allo scenario di piena con tempo di ritorno T50.

L'analisi visiva evidenzia una marcata differenza nella distribuzione degli impatti: la cartografia regionale, caratterizzata da un'estensione del battente idrico più ampia, denota un numero di edifici coinvolti significativamente superiore rispetto al layer pre-interventi. Mentre il modello 2D tende a circoscrivere il danno alle aree di immediata prossimità all'alveo, il dato regionale riflette una modellazione idraulica più estesa, che comporta una maggiore sollecitazione del patrimonio edilizio circostante.

Per quantificare tale divergenza, la Fig. 8.57 riporta la ripartizione numerica degli edifici in base alle classi di danno percentuale definito dalle funzioni del JRC. Il confronto permette di osservare, per ciascun layer, quanti edifici ricadono in ogni specifico range di vulnerabilità, fornendo una metrica oggettiva per valutare l'entità dello scostamento tra la modellazione prodotta nel presente studio e lo scenario ufficiale di riferimento.

Commentato [IF23]: Solito commento

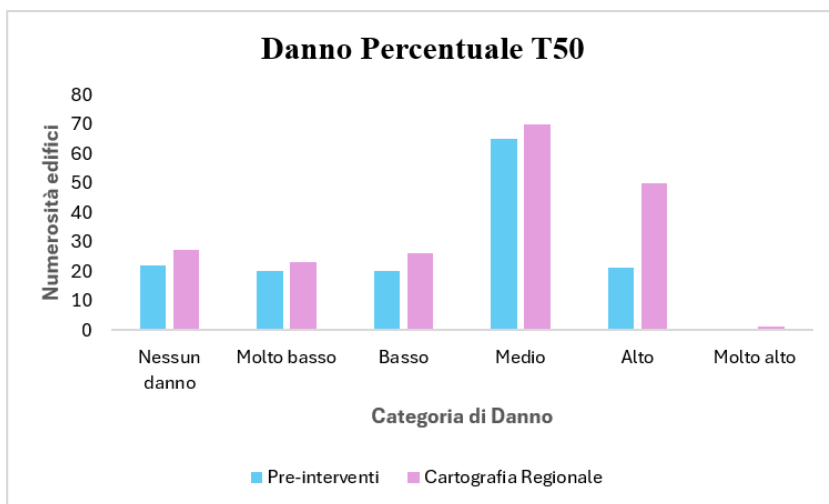


Fig. 8.57 Confronto dei danni percentuale pre-interventi e cartografia regionale per T50 (Excel).

Il grafico in figura illustra la distribuzione della numerosità degli edifici per ciascuna classe di danno percentuale (dal “Nessun danno” al “Molto alto”), confrontando i risultati ottenuti dal modello di stato di fatto con quelli derivanti dalla cartografia regionale per l’evento di piena con tempo di ritorno T50.

L’analisi comparativa evidenzia una divergenza significativa nella distribuzione degli impatti attesi:

- settore di minor danno: nel modello 2D si osserva una minoranza di edifici ricadenti nella categoria “Nessun danno” rispetto alla cartografia regionale (circa 25 unità);
- settore di maggior danno: si rileva un’inversione di tendenza nelle classi di danno più elevate. In particolare, nella categoria “Alto”, la cartografia regionale stima circa 50 edifici coinvolti, un valore sensibilmente superiore rispetto alle circa 20 unità del modello 2D.

Il confronto conferma il carattere più cautelativo e la maggiore estensione spaziale della cartografia regionale. Tale differenza sottolinea come la risoluzione e le metodologie di modellazione adottate dalla Regione portino a una stima più precisa dell’esposizione al rischio idraulico nell’area di studio.

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.58):



Fig. 8.58 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre-interventi e cartografia regionale con il plugin FLOOD2B per T200 (QGIS).

La figura ripropone l'analisi comparativa tra il modello idraulico 2D e la cartografia regionale, estendendo la valutazione allo scenario di piena con tempo di ritorno T200.

Analogamente a quanto osservato per l'evento di minor magnitudo, anche in questo scenario emerge una marcata disparità nelle estensioni delle aree inondate e, conseguentemente, nella distribuzione del danno strutturale calcolato tramite il plugin FLOOD2B. La cartografia regionale conferma un'impronta di danno più vasta, interessando un maggior numero di edifici con classi di vulnerabilità medio-alta rispetto alla simulazione locale, la quale mantiene una stima dell'impatto più localizzata e coerente con il modello dello stato di fatto ricavato.

Per quantificare tale divergenza, la Fig. 8.59 analizza la numerosità degli edifici ricadenti in ciascuna classe di danno JRC per lo scenario T200. Il confronto numerico permette di valutare come, all'aumentare della magnitudo dell'evento, si modifichi la distribuzione del rischio e come la divergenza tra i due layer di riferimento incida sulla stima complessiva della vulnerabilità del comparto edilizio studiato.

Commentato [IF24]: Solito commento

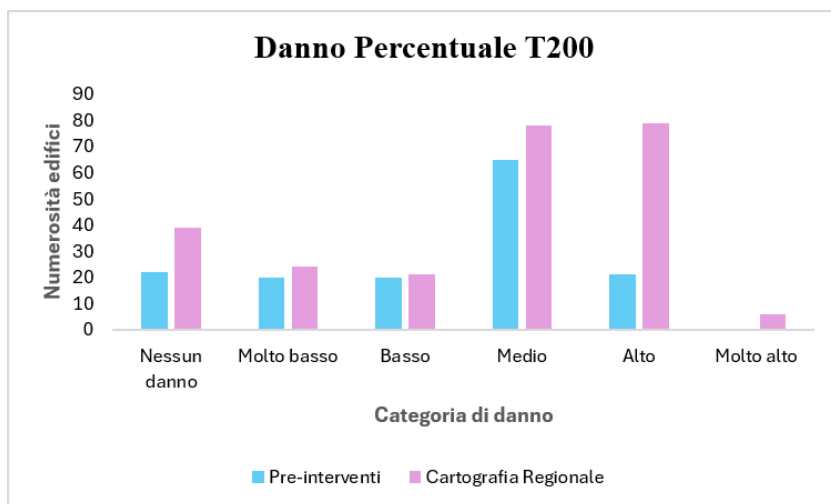


Fig. 8.59 Confronto dei danni percentuale pre-interventi e cartografia regionale per T200 (Excel).

Il grafico presenta la distribuzione della numerosità degli edifici suddivisi per classi di danno percentuale in occasione di un evento di piena con tempo di ritorno T200, ponendo a confronto diretto la modellazione pre-interventi con i dati della cartografia regionale.

L'osservazione dei dati rivela dinamiche di impatto differenti tra i due dataset:

- distribuzione del danno: a differenza dello scenario T50, nel T200 si registra una maggiore presenza degli edifici a tutte le classi di danno, con un incremento visibile della frequenza nelle categorie centrali e superiori;
- differenze metodologiche: si conferma la tendenza della cartografia regionale a stimare un numero di edifici coinvolti superiore, in particolare nelle categorie “Medio” e “Alto”, dove il numero di unità interessate è nettamente più elevato rispetto al modello 2D;
- il modello pre-interventi mostra una distribuzione più bilanciata ma con una soglia di danno “Alto” decisamente più contenuta rispetto al dato regionale, confermando come la modellazione tenda a isolare le criticità in aree più circoscritte.

La differenza tra le due serie storiche nel T200 evidenzia come l'aumentare della severità dell'evento idraulico accentui lo scostamento tra le due sorgenti informative, consolidando il ruolo della cartografia regionale quale riferimento prudenziale di ampia scala e del modello locale quale strumento di analisi puntuale della vulnerabilità del costruito.

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.60):

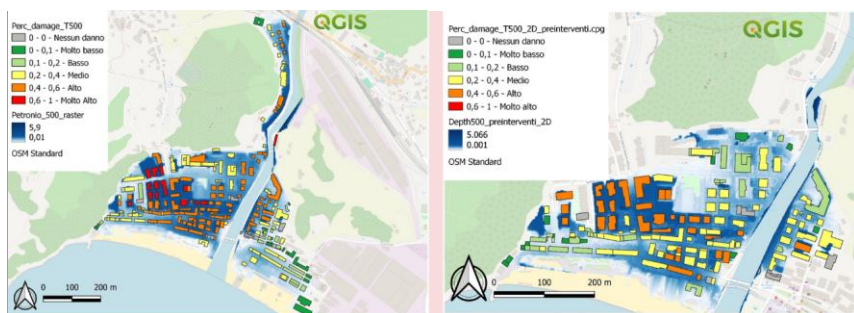


Fig. 8.60 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre-interventi e cartografia regionale con il plugin FloodD2B per T500 (QGIS).

La Figura 8.60 propone un confronto spaziale diretto tra la simulazione di stato di fatto (a destra), modellata nel dettaglio in questo studio, e la cartografia di pericolosità regionale (a sinistra), in riferimento allo scenario di evento estremo con tempo di ritorno T500.

La cartografia regionale mostra un'estensione dell'area inondata superiore, interessando in modo più diffuso il comparto edilizio.

Il modello pre-interventi prodotto in questa tesi, pur evidenziando anch'esso una vasta area di impatto, presenta una distribuzione del danno più circoscritta e definita, derivante da una schematizzazione idraulica che incorpora un maggiore dettaglio della morfologia urbana e delle opere di difesa attuali.

Per fornire una sintesi numerica di quanto osservato spazialmente nelle mappe, la Fig 8.61 riporta l'istogramma di confronto relativo alla numerosità degli edifici per ciascuna classe di danno JRC. Tale rappresentazione permette di quantificare la divergenza tra i due dataset nello scenario T500, evidenziando numericamente come si distribuisca il complesso edilizio tra il modello locale e la stima ufficiale regionale, facilitando la comprensione della diversa severità dell'impatto atteso.

Commentato [IF25]: Solito commento

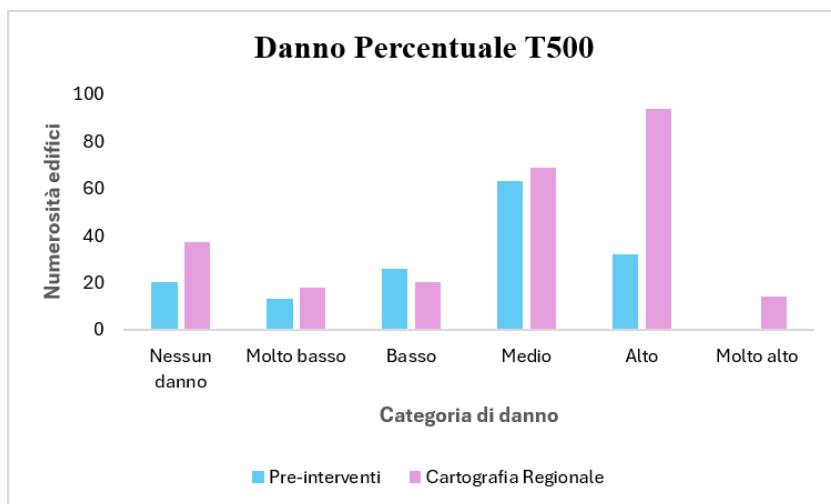


Fig. 8.61 Confronto dei danni percentuale pre-interventi e cartografia regionale per T500 (Excel).

Sebbene il confronto tra il modello 2D elaborato e la cartografia ufficiale di Regione Liguria fornisca una base conoscitiva indispensabile per inquadrare le criticità attuali, si è ritenuto scientificamente più rigoroso e coerente focalizzare le valutazioni successive sul confronto diretto tra il modello pre-intervento e il medesimo opportunamente modificato per lo scenario post-intervento. Questa scelta scaturisce dalla necessità di operare su una base dati omogenea: integrare o confrontare i risultati ottenuti con modelli regionali, i quali sono stati generati, simulati e tarati sulla base di parametri, ipotesi idrologiche e informazioni di dettaglio di cui non si ha piena conoscenza comporterebbe il rischio di introdurre distorsioni interpretative legate a una disomogeneità metodologica di fondo.

Pertanto, per garantire la massima solidità ai risultati ottenuti e validare con precisione l'efficacia delle opere di mitigazione proposte, l'analisi che segue si concentrerà esclusivamente sull'impatto differenziale indotto dai risultati ottenuti dalla simulazione HEC-RAS, garantendo così un confronto internamente coerente e privo di variabili incontrollate.

8.2.7. Confronto tra il layer “battenti” del modello pre e post-interventi

Il presente sottocapitolo è dedicato all'analisi comparativa visiva delle mappe dei battenti idrici, ottenute sovrapponendo i risultati del modello di simulazione allo stato attuale con quelli derivanti dall'assetto di progetto.

L'obiettivo di questa sezione è fornire una prima valutazione qualitativa dell'efficacia delle opere di mitigazione ipotizzate. Per ciascun tempo di ritorno considerato, vengono messe a confronto le mappe di inondazione, evidenziando le variazioni spaziali nella distribuzione delle altezze idriche e l'estensione delle aree interessate dal fenomeno. Tale analisi, condotta attraverso un'ispezione visiva diretta delle configurazioni idrauliche, permette di identificare

immediatamente le zone in cui l'intervento ha prodotto una riduzione significativa del battente o una diversa propagazione della corrente.

- Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.62):



Fig. 8.62 Confronto tra il layer dei battenti pre-interventi (a destra) e il layer post-interventi (a sinistra) del torrente Petronio per T50 (QGIS).

L'analisi visiva della Fig. 8.62 permette di apprezzare l'efficacia delle opere di mitigazione proposte in corrispondenza del tempo di ritorno T50 anni.

Il confronto tra le due mappe evidenzia una marcata variazione nella distribuzione dei battenti idrici:

- configurazione pre-intervento (mappa a sinistra): si osserva un'estesa area di inondazione che interessa il tessuto urbano in sponda destra del torrente Petronio, con battenti che raggiungono valori massimi significativi, prossimi a 4.5 m. L'estensione della macchia di esondazione appare capillare e profonda, coinvolgendo ampie zone residenziali e infrastrutturali;
- configurazione post-intervento (mappa a destra): a seguito dell'introduzione delle opere di progetto, si nota una contrazione netta sia dell'estensione dell'area inondata che dell'intensità dei battenti. La scala cromatica riflette una riduzione del tirante idrico massimo, che scende al di sotto dei 2 m, indicando un miglioramento sostanziale delle condizioni di sicurezza idraulica dell'area.

In sintesi, il confronto qualitativo evidenzia come l'intervento non solo limiti la propagazione della corrente al di fuori dell'alveo, ma agisca efficacemente nel ridurre le altezze idriche nelle porzioni di territorio precedentemente più soggette ad allagamento.

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.63):

Commentato [IF26]: Solito commento

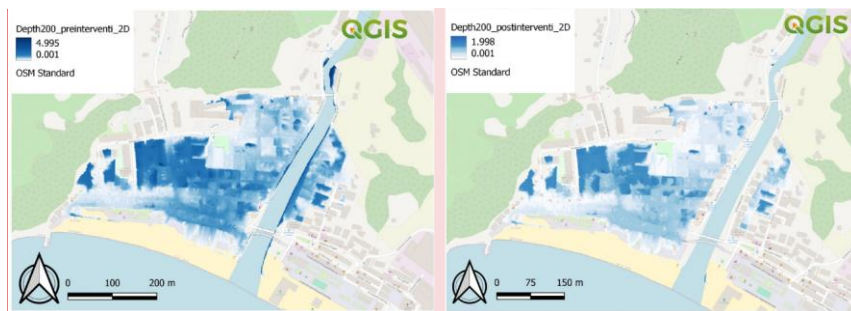


Fig. 8.63 Confronto tra il layer dei battenti pre-interventi (a destra) e il layer post-interventi (a sinistra) del torrente Petronio per T200 (QGIS).

Analogamente a quanto osservato per il tempo di ritorno inferiore, la Fig. 8.62 illustra il confronto qualitativo dei battenti idrici per lo scenario di evento estremo T200 anni.

- Configurazione pre-intervento (mappa a sinistra): in questa condizione, l'area di inondazione appare particolarmente vasta e critica, coprendo gran parte dell'abitato nella zona ovest con battenti idrici che raggiungono valori massimi inferiori a 5 m. L'intensità del colore blu scuro denota una profondità del tirante idrico elevata su una porzione significativa del territorio, riflettendo una vulnerabilità strutturale marcata del settore urbano analizzato;
- configurazione post-intervento (mappa a destra): a seguito dell'implementazione delle opere di mitigazione, si riscontra una riduzione sensibile sia dell'estensione dell'area allagata che dell'entità dei battenti, con un valore massimo che si attesta al di sotto dei 2 m. Sebbene l'evento estremo comporti ancora una presenza d'acqua significativa, l'intervento progettuale risulta efficace nel contenere drasticamente la profondità del battente, determinando una configurazione idraulica complessivamente più mitigata rispetto allo scenario di riferimento.

In conclusione, il confronto visivo conferma che le opere di progetto mantengono la loro efficacia anche in presenza di portate di piena più onerose, riuscendo a contenere i tiranti idrici e a ridurre la portata del danno potenziale nell'area urbana interessata

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.64):

Commentato [IF27]: Solito commento

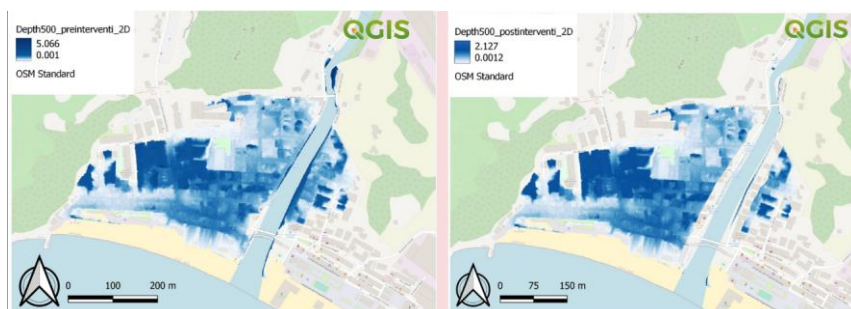


Fig. 8.64 Confronto tra il layer dei battenti pre-interventi (a destra) e il layer post-interventi (a sinistra) del torrente Petronio per T500 (QGIS).

Infine, la Fig. 8.64 propone il confronto visivo tra lo stato pre-intervento e quello post-intervento per l'evento di massima portata analizzato, pari a un tempo di ritorno T500 anni.

- Configurazione pre-intervento (mappa a sinistra): nello scenario di estrema criticità, l'area urbana nella zona ovest risulta quasi totalmente interessata dal fenomeno di esondazione. I battenti idrici raggiungono valori di picco di poco superiori ai 5 m, configurando una situazione di grave pericolo;
- configurazione post-intervento (mappa a destra): l'introduzione delle opere di mitigazione determina, anche in questa condizione limite, una significativa variazione degli scenari di inondazione. Si osserva una riduzione del battente idrico massimo, che si attesta su un valore di 2.2 m, unitamente a un contenimento visibile della macchia di esondazione, che risulta meno intensa e diffusa rispetto alla configurazione di riferimento.

In conclusione, l'analisi conferma la capacità delle opere di progetto di mitigare gli effetti di eventi idrologici estremi, riducendo le profondità idriche massime pur in presenza di portate di piena molto elevate.

8.2.8. Confronto tra il layer della velocità del flusso del modello pre e post-interventi

Dopo aver analizzato la distribuzione dei battenti idrici, il presente sottocapitolo focalizza l'attenzione sull'analisi comparativa dei campi di velocità del flusso. La comprensione del comportamento cinematico della corrente risulta di fondamentale importanza per valutare non solo l'estensione dell'allagamento, ma anche l'entità delle sollecitazioni idrodinamiche e della pericolosità associata al fenomeno di esondazione.

L'obiettivo di questa sezione è esaminare le variazioni del modulo della velocità indotte dalle opere di mitigazione progettate. Per ciascun tempo di ritorno preso in esame, verrà condotto un confronto qualitativo tra le mappe di velocità ottenute nello scenario pre-intervento e in quello post-intervento. L'analisi visiva permetterà di osservare come le opere modifichino la dinamica del deflusso, in particolare in prossimità delle zone di restringimento o di espansione dell'alveo e nelle aree urbane interessate dall'allagamento.

Anche in questo caso, la trattazione si manterrà su un piano di osservazione descrittiva del dato

Commentato [IF28]: Solito commento

cartografico, propedeutica alla successiva quantificazione numerica dei benefici apportati dagli interventi in termini di riduzione dei rischi legati alle elevate velocità di scorrimento.

– Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.65):

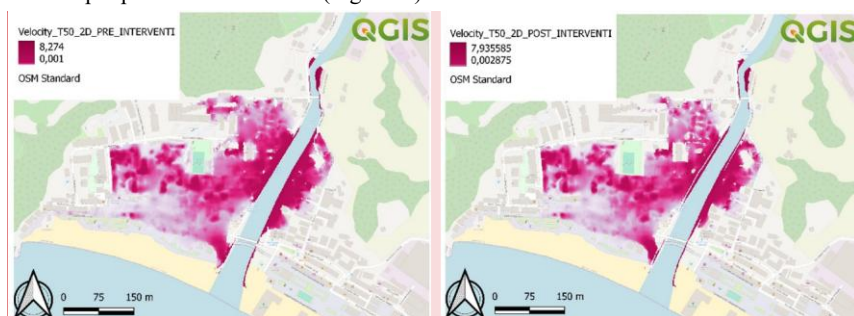


Fig. 8.65 Confronto tra il layer della velocità pre-interventi (a destra) e il layer post-interventi (a sinistra) del torrente Petronio per T50 (QGIS).

L'analisi cinematica per il tempo di ritorno T50 anni, illustrata nella Fig. 8.65, consente di valutare le variazioni nel campo di velocità del flusso indotte dalle opere di progetto.

- Configurazione pre-intervento (mappa a sinistra): la distribuzione delle velocità evidenzia aree caratterizzate da flussi significativi, con punte massime di velocità che raggiungono gli 8.3 m/s. Si nota una propagazione su gran parte della porzione urbana a ovest, indicativa di una condizione di elevato rischio idraulico associato alla dinamica della corrente;
- configurazione post-intervento (mappa a destra): a valle dell'intervento, si osserva una rimodulazione del campo di velocità, con una riduzione del valore massimo che scende a poco sotto gli 8 m/s. Sebbene la diffusione del flusso rimanga presente, l'analisi visiva mostra una contrazione delle zone interessate dalle velocità più elevate, a testimonianza di una parziale dissipazione dell'energia della corrente e di una conseguente mitigazione della pericolosità idraulica locale.

Il confronto evidenzia dunque come l'intervento non operi solo sui livelli idrici, ma contribuisca a ridurre l'energia cinetica del deflusso, limitando l'impatto delle correnti sulle infrastrutture urbane esposte.

– Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.66):

Commentato [IF29]: Solito commento e toglie i troppi decimali

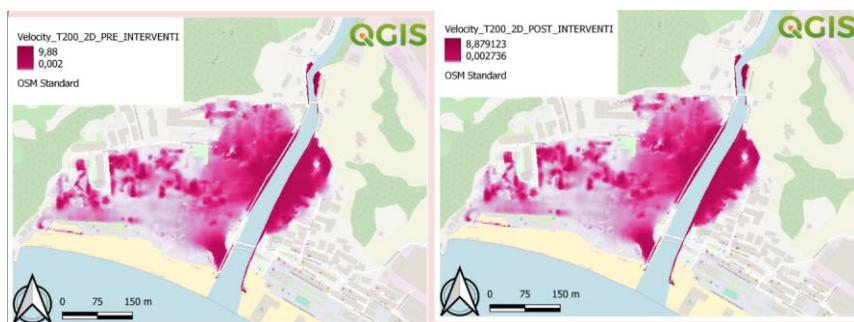


Fig. 8.66 Confronto tra il layer della velocità pre-interventi (a destra) e il layer post-interventi (a sinistra) del torrente Petronio per T200 (QGIS).

L'analisi della distribuzione delle velocità per il tempo di ritorno T200 anni è riportata nella Fig. 8.66 e permette di osservare la risposta del sistema a un evento di maggiore entità.

- Configurazione pre-intervento (mappa a sinistra): nello scenario di riferimento, il campo di velocità presenta valori di picco elevati, che raggiungono i 9.9 m/s. La distribuzione cromatica evidenzia una diffusione significativa di correnti su gran parte dell'area urbanizzata, riflettendo una condizione di elevato potenziale erosivo e di pericolosità per le strutture presenti;
- configurazione post-intervento (mappa a destra): l'implementazione delle opere di mitigazione determina una riduzione apprezzabile della velocità massima del flusso, che scende a 8.9 m/s. L'ispezione visiva conferma una contrazione delle zone soggette alle velocità più elevate, indicando un'efficace dissipazione energetica che contribuisce a ridurre il rischio idraulico complessivo rispetto alla configurazione non mitigata.

Anche in questo scenario, il confronto cinematico evidenzia come le opere progettate siano in grado di attenuare le componenti dinamiche del deflusso, migliorando la resilienza del settore urbano analizzato in caso di eventi estremi.

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.67):

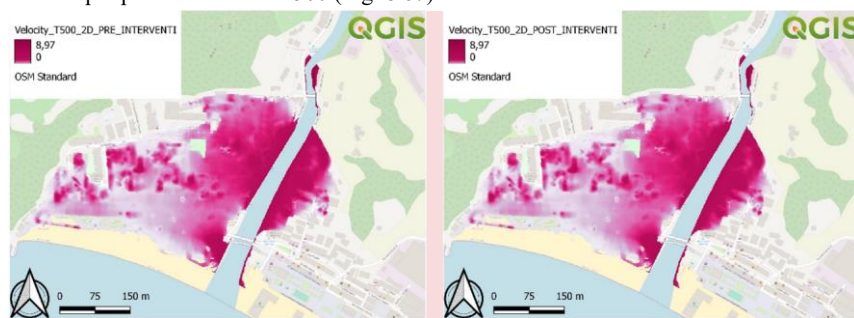


Fig. 8.67 Confronto tra il layer della velocità pre-interventi (a destra) e il layer post-interventi (a sinistra) del torrente Petronio per T500 (QGIS).

Commentato [IF30]: Vedi commento precedente

Commentato [IF31]: Vedi commento precedente

Infine, la Fig. 8.67 presenta il confronto dei campi di velocità per l'evento di massima portata esaminato, corrispondente a un tempo di ritorno T500 anni.

- Configurazione pre-intervento (mappa a sinistra): in questa condizione limite, il sistema registra una dinamica del flusso estremamente intensa, con valori massimi di velocità pari a 9.8 m/s. La mappa evidenzia un'ampia porzione del territorio urbano investita da correnti ad alta energia, delineando uno scenario di elevato rischio idrodinamico;
- configurazione post-intervento (mappa a destra): l'introduzione delle opere di progetto modifica la distribuzione del campo di velocità, portando il valore di picco al di sotto dei 9 m/s. Si osserva una contrazione visibile delle aree soggette alle velocità più elevate e una rimodulazione dell'energia cinetica del deflusso.

In conclusione, anche per l'evento di portata estrema, il confronto qualitativo dimostra che l'assetto di progetto contribuisce a ridurre le sollecitazioni dinamiche indotte dal deflusso, confermando l'efficacia mitigativa dell'intervento nel limitare la pericolosità associata alla velocità della corrente.

8.2.9. Analisi dell'estensione dell'area inondata e la differenza tra i livelli idrici pre e post-interventi

Dopo aver delineato precedentemente il quadro qualitativo dell'efficacia delle opere di mitigazione attraverso il confronto visuale delle mappe di battente e velocità, il presente sottocapitolo si propone di approfondire una misura oggettiva delle performance idrauliche dell'assetto di progetto, superando l'osservazione descrittiva a favore di una valutazione quantitativa.

Per ciascuno dei tempi di ritorno considerati (T50, T200 e T500), l'analisi si articola lungo due direttrici principali:

- la quantificazione delle superfici: viene calcolata l'estensione delle aree interessate dall'inondazione nelle configurazioni pre e post-intervento;
- l'analisi differenziale dei tiranti idrici: viene esaminata la variazione dei battenti idrici medi e massimi, al fine di quantificare l'abbassamento del livello dell'acqua indotto dalle opere di mitigazione.

Attraverso il confronto numerico tra i dati estratti dai modelli 2D, si procederà a sintetizzare il beneficio idraulico complessivo, fornendo i parametri necessari a validare l'efficienza delle soluzioni progettuali adottate nel ridurre sia l'estensione dell'invaso che l'intensità dei battenti nelle porzioni di tessuto urbano maggiormente esposte.

- Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.68):

La Fig. 8.68 mette a confronto i perimetri di inondazione ottenuti dalle simulazioni: in rosso è evidenziata l'estensione dell'area interessata dall'inondazione nello scenario pre-intervento, mentre in verde è rappresentata l'area risultante dall'assetto post-intervento.

Il confronto evidenzia la significativa variazione della superficie inondata indotta dalle opere di mitigazione progettate. Dall'elaborazione quantitativa dei dati emerge che:

- l'area inondata nella configurazione pre-intervento presenta un'estensione di 86,575 m²;
- nella configurazione post-intervento, tale estensione si riduce a 64,748 m², determinando una contrazione netta della superficie allagata pari a 21,827 m².

Tale decremento, quantificabile in una riduzione percentuale del 25% circa, conferma l'efficacia delle opere di progetto nel limitare la propagazione del deflusso all'interno del tessuto urbano, riducendo significativamente il perimetro della zona soggetta a rischio idraulico per l'evento con tempo di ritorno T50.

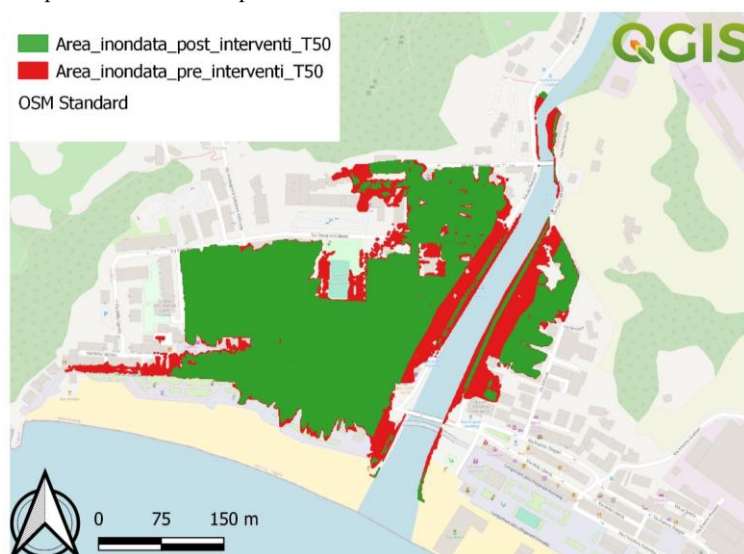


Fig. 8.68 Mapa comparativa dell'analisi 2D pre-interventi e post-interventi dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T50 (QGIS).

Al fine di analizzare puntualmente le variazioni nei tiranti idrici indotte dalle opere di progetto, è stata condotta una sottrazione raster tra i livelli idrici del modello 2D nello scenario pre-intervento e quelli del modello post-intervento. La Fig. 8.69 illustra tale differenza spaziale, mappata secondo una scala cromatica in cui i valori positivi (in verde) rappresentano le aree in cui lo scenario pre-intervento evidenzia battenti idrici superiori, e quindi dove l'intervento ha prodotto una maggiore riduzione del tirante, mentre i valori negativi (in rosa) indicano le zone in cui il modello post-intervento presenta stime localmente più elevate. Tale elaborazione permette di isolare le variazioni locali del tirante idrico, fornendo una chiave di lettura immediata sull'efficacia dell'intervento in diverse porzioni del tessuto urbano. Le aree in verde, in particolare, rappresentano i punti di maggiore efficacia progettuale, dove la rimodulazione dell'assetto idraulico ha permesso un abbattimento più marcato dei battenti, offrendo un contributo informativo fondamentale per validare la capacità di mitigazione dell'intervento proposto.

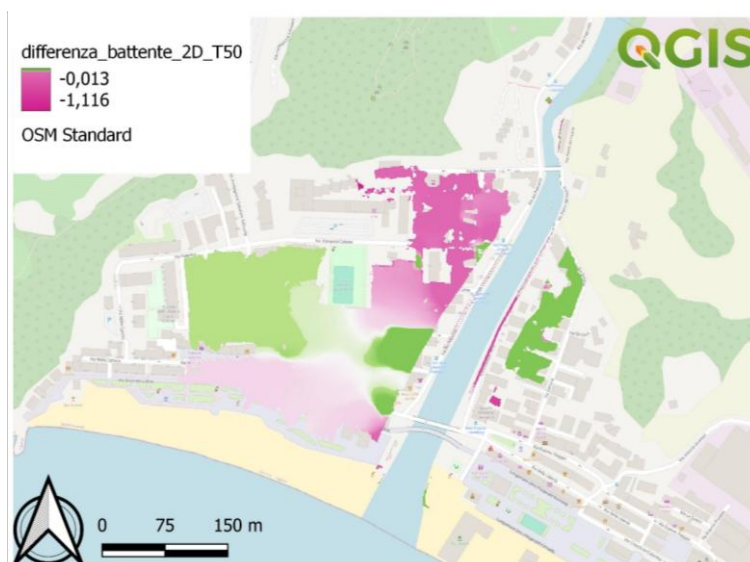


Fig. 8.69 Mappa comparativa dei battenti 2D pre-interventi e post-interventi del torrente Petronio per T50 (QGIS).

La mappa illustra chiaramente l'efficacia degli interventi proposti per un tempo di ritorno pari a 50 anni.

Il range dei valori ottenuti, compreso tra 0 m e -1.1 m, conferma una riduzione generalizzata dei battenti in tutta l'area di esondazione modellata. In particolare, le tonalità cromatiche più intense indicano le zone in cui il beneficio idraulico risulta maggiore, con una diminuzione del tirante idrico superiore al metro in prossimità dei settori centrali dell'area allagabile. Tale risultato convalida la bontà delle soluzioni strutturali adottate, che consentono un significativo abbassamento dei livelli idrici rispetto alla configurazione attuale, riducendo conseguentemente l'entità dei danni attesi.

– Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.70):

La Fig. 8.70 mette a confronto i perimetri di inondazione ottenuti dalle simulazioni: in rosso è evidenziata l'estensione dell'area interessata dall'inondazione nello scenario pre-intervento, mentre in verde è rappresentata l'area risultante dall'assetto post-intervento.

Il confronto evidenzia la significativa variazione della superficie inondata indotta dalle opere di mitigazione progettate. Dall'elaborazione quantitativa dei dati emerge che:

- l'area inondata nella configurazione pre-intervento presenta un'estensione di 114,360 m²;
- nella configurazione post-intervento, tale estensione si riduce a 95,867 m², determinando una contrazione netta della superficie allagata pari a 18,493 m².

Tale decremento, quantificabile in una riduzione percentuale del 16% circa, conferma l'efficacia delle opere di progetto nel limitare la propagazione del deflusso all'interno del tessuto urbano.

Commentato [IF32]: Fermati al primo decimale



Fig. 8.70 Mappa comparativa dell'analisi 2D pre-interventi e post-interventi dell'estensione dell'area inondata del torrente Petronio per T200 (QGIS).

Per valutare l'impatto idraulico degli interventi di mitigazione, si è proceduto al calcolo dello scarto raster tra i battenti idrici simulati nello stato di fatto e quelli ottenuti nello scenario di progetto. La mappa riportata in Fig. 8.71 visualizza tale differenziale: le zone caratterizzate da una riduzione del tirante idrico sono evidenziate in tonalità rosa, a testimonianza di una diminuzione dei livelli di inondazione grazie alle opere realizzate.

Questo output cartografico consente di circoscrivere spazialmente le variazioni del livello idrico, offrendo un riscontro visivo diretto circa le performance dell'assetto progettuale in corrispondenza del tessuto urbano.

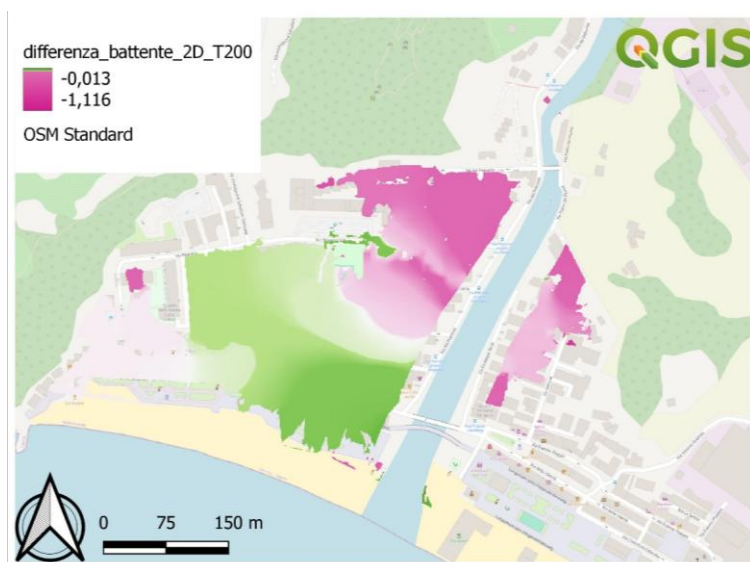


Fig. 8.71 Mappa comparativa dei battenti 2D pre-interventi e post-interventi del torrente Petronio per T200 (QGIS).

L'elaborazione spaziale relativa allo scenario di piena con tempo di ritorno T200 conferma la validità dell'assetto progettuale proposto. La mappa in Fig. 8.71 illustra la variazione dei battenti idrici indotta dalle opere di mitigazione: come evidenziato dalla legenda, l'intero spettro cromatico, pur presentando sfumature dal rosa al verde, ricade interamente in un campo di valori negativi, compresi tra 0 m e -1.1 m.

Tale evidenza dimostra che, anche in condizioni di evento estremo (T200), il livello idrico nello scenario post-intervento risulta ovunque inferiore rispetto allo stato di fatto. La variazione tonale serve in questo caso a distinguere l'intensità dell'abbattimento del tirante idrico all'interno del dominio modellato, dove le aree di colore più intenso rappresentano i settori di massima riduzione. Pertanto, le opere strutturali confermano la loro efficacia nel contenimento dei livelli idrici, garantendo una protezione diffusa su tutto il tessuto urbano interessato dall'analisi.

– Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.72):

La Fig. 8.72 mette a confronto i perimetri di inondazione ottenuti dalle simulazioni: in rosso è evidenziata l'estensione dell'area interessata dall'inondazione nello scenario pre-intervento, mentre in verde è rappresentata l'area risultante dall'assetto post-intervento.

Il confronto evidenzia la significativa variazione della superficie inondata indotta dalle opere di mitigazione progettate. Dall'elaborazione quantitativa dei dati emerge che:

- l'area inondata nella configurazione pre-intervento presenta un'estensione di 123,056 m²;
- nella configurazione post-intervento, tale estensione si riduce a 105,710 m², determinando

Commentato [IF33]: Vedi commento precedente

una contrazione netta della superficie allagata pari a 17,346 m².
Tale decremento, quantificabile in una riduzione percentuale del 14% circa, conferma l'efficacia delle opere di progetto nel limitare la propagazione del deflusso all'interno del tessuto urbano.



Fig. 8.72 Mappa comparativa dei battenti 2D pre-interventi e post-interventi del torrente Petronio per T500 (QGIS).

Al fine di quantificare il beneficio idraulico apportato dagli interventi di mitigazione, è stata eseguita una differenza raster tra i battenti idrici dello stato di fatto e quelli relativi alla configurazione di progetto. La rappresentazione cartografica in Fig. 8.73 illustra tale scostamento: le aree in cui si è ottenuta una flessione del tirante idrico sono marcate da tonalità rosa, che attestano graficamente l'abbassamento dei livelli di esondazione conseguente alla realizzazione delle opere.

L'analisi visiva di questo elaborato permette di localizzare con precisione le variazioni del battente, offrendo una sintesi immediata dell'efficacia delle soluzioni adottate all'interno del contesto urbano. Tale output non solo evidenzia il miglioramento delle condizioni idrauliche, ma permette di mappare l'estensione spaziale dell'azione di mitigazione, validando concretamente le performance della strategia progettuale implementata.

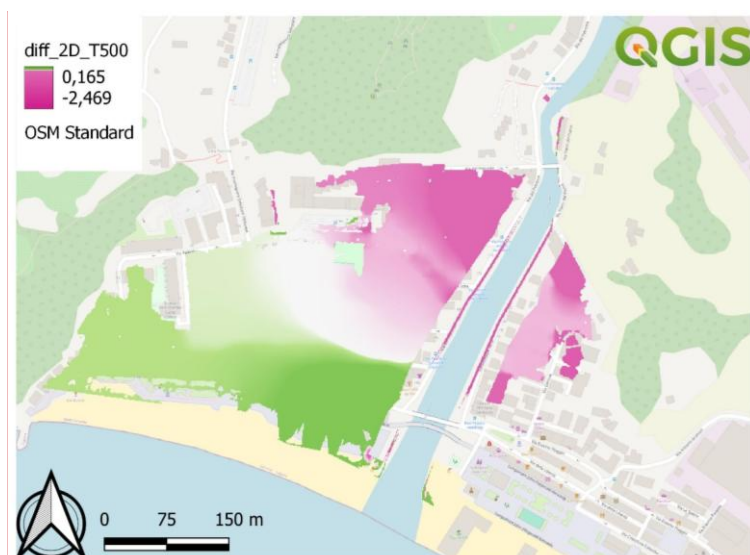


Fig. 8.73 Mappa comparativa dei battenti 2D pre-interventi e post-interventi del torrente Petronio per T500 (QGIS).

L'analisi dell'evento estremo con tempo di ritorno T500 evidenzia una dinamica idraulica peculiare rispetto agli scenari di piena ordinaria. La mappa in Fig. 8.73 mostra le differenze di battenti idrici, dove la prevalenza di tonalità rosa conferma una riduzione significativa dei livelli in gran parte dell'area inondata, con picchi di abbassamento che raggiungono i 2.5 m. Parallelamente, la presenza di porzioni in verde indica aree in cui il modello post-intervento registra battenti idrici localmente superiori (fino a 0.2 m) rispetto allo stato di fatto. Tale fenomeno è riconducibile alla complessità dei processi di propagazione delle piene in configurazioni progettuali modificate, in cui la messa in sicurezza di determinati settori urbani può indurre una redistribuzione spaziale dei deflussi. Questo output fornisce una chiave di lettura cautelativa fondamentale, dimostrando come l'assetto progettuale, pur garantendo un abbattimento marcato dei livelli su larga scala, determini variazioni locali nella distribuzione dei battenti che vanno analizzate nell'ottica di una gestione integrata del rischio idraulico.

8.2.10. Analisi dei volumi di esondazione dal confronto tra il layer pre e post-interventi

Il presente sottocapitolo è dedicato alla quantificazione volumetrica dei fenomeni di esondazione che interessano il tratto focivo del torrente Petronio, ponendo a confronto lo scenario di stato di fatto con lo scenario dello stato di progetto. Tale analisi assume una valenza cruciale nell'economia del lavoro di tesi, in quanto permette di tradurre i risultati, espressi in termini di battenti e tiranti idrici, in una metrica volumetrica.

Nella Tab. 8.12 vengono mostrati risultati dei volumi d'acqua espressi in m³ per i tre periodi di

Commentato [IF34]: Vedi commento precedente

ritorno, ricavati da analisi statistiche direttamente su QGIS.

Periodo di ritorno (T) [anni]	Volume acqua esondata (pre- interventi) [m ³]	Volume acqua esondata (post- interventi) [m ³]	Δ Volume [m ³]
50	47809	33127	-14682
200	78541	60957	-17584
500	92765	74536	-18229

Tab. 8.12 Rappresentazione dei volumi d'acqua esondati pre e post-interventi (Excel).

La Tab. 8.12 sintetizza l'efficacia delle opere di mitigazione attraverso il confronto dei volumi d'acqua esondati tra lo stato di fatto e la configurazione di progetto, per i diversi tempi di ritorno analizzati (T50, T200, T500). Il calcolo del differenziale (Δ Volume), eseguito come differenza tra lo scenario post-intervento e quello pre-intervento, evidenzia un segno negativo in tutti gli scenari considerati, attestando una contrazione netta dei volumi d'acqua esondati grazie alle opere realizzate.

In particolare, il decremento del volume esondato risulta pari a 14,682 m³ per l'evento T50, a 17,584 m³ per l'evento T200 e a 18,229 m³ per l'evento T500. Tali evidenze numeriche confermano che gli interventi strutturali programmati sono in grado di sottrarre significativi volumi d'acqua dal territorio urbano, mitigando l'impatto idraulico delle piene e riducendo il rischio di danno associato agli eventi meteorologici estremi.

8.2.11. Valutazione del danno economico: confronto tra modello pre e post-interventi

In questo sottocapitolo si esegue la quantificazione economica dei danni attesi a seguito degli interventi di mitigazione idraulica ipotizzati nella modellazione bidimensionale (2D). L'obiettivo è valutare l'efficacia del progetto in termini di riduzione del rischio monetario per il tessuto edificato di Riva Trigoso. La metodologia applicata, integrando i layer dei battenti idrici derivanti dal modello idraulico HEC-RAS con le funzioni di danno empiriche (JRC) in ambiente GIS, permette di confrontare lo scenario pre-interventi e post-interventi. Attraverso tale comparazione si definisce il reale beneficio economico derivante dalle opere di riprofilatura e adeguamento arginale, fornendo un parametro quantitativo essenziale per supportare la sostenibilità degli investimenti nel bacino del torrente Petronio.

- Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.74):

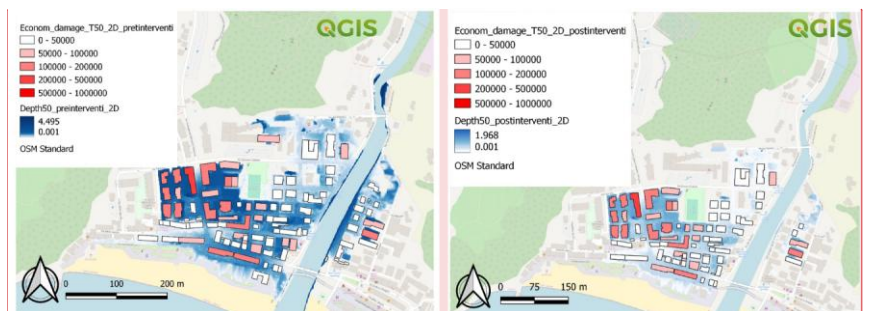


Fig. 8.74 Confronto dei danni economici pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T50 (QGIS).

La valutazione economica del danno, calcolata come sommatoria dei valori monetari stimati per ogni unità edilizia coinvolta, fornisce una misura diretta dell'efficacia degli interventi di mitigazione ipotizzati nello scenario 2D.

Il confronto tra le sommatorie totali del danno consente di quantificare il beneficio apportato dalle opere, che si concretizza in una riduzione dell'impatto economico (Fig. 8.75) da circa 4,510,531 € (pre-intervento) a 3,632,551 € (post-intervento), con un risparmio del 20%.

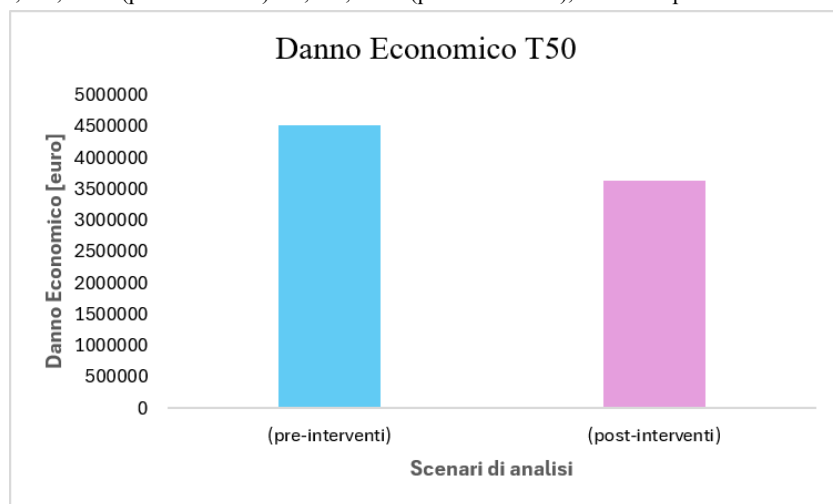


Fig. 8.75 Confronto dei danni economici pre e post-interventi per T50 (Excel).

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.76):

Commentato [IF35]: Solito commento

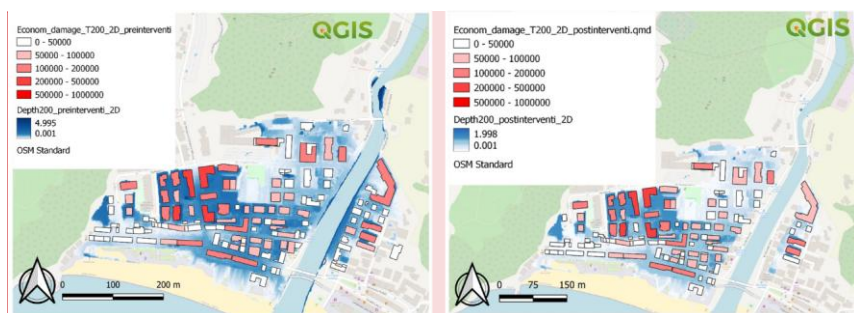


Fig. 8.76 Confronto dei danni economici pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T200 (QGIS).

La valutazione economica del danno, calcolata come sommatoria dei valori monetari stimati per ogni unità edilizia coinvolta, fornisce una misura diretta dell'efficacia degli interventi di mitigazione ipotizzati nello scenario 2D.

Il confronto tra le sommatorie totali del danno consente di quantificare il beneficio apportato dalle opere con riduzione dell'impatto economico (Fig. 8.77) da circa 6,966,614 € (pre-intervento) a 6,049,237 € (post-intervento), con un risparmio del 14%.

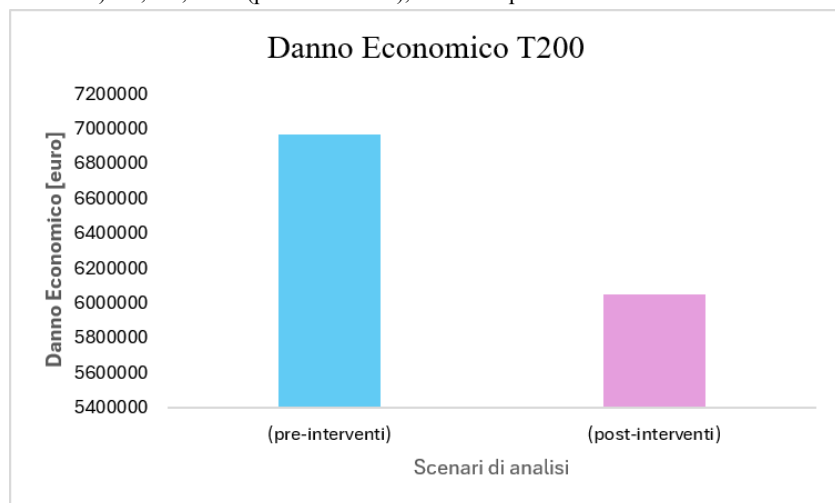


Fig. 8.77 Confronto dei danni economici pre e post-interventi per T200 (Excel).

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.78):

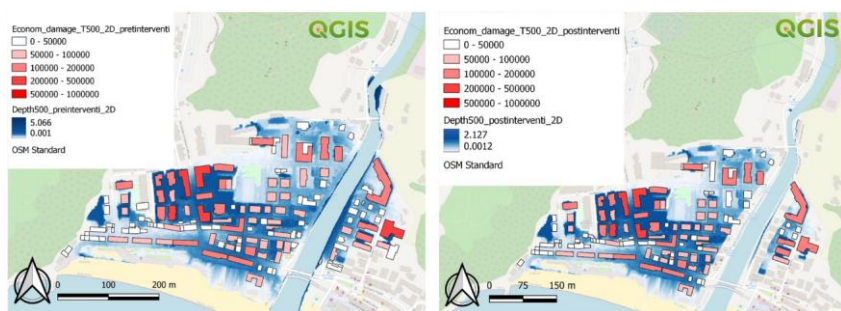
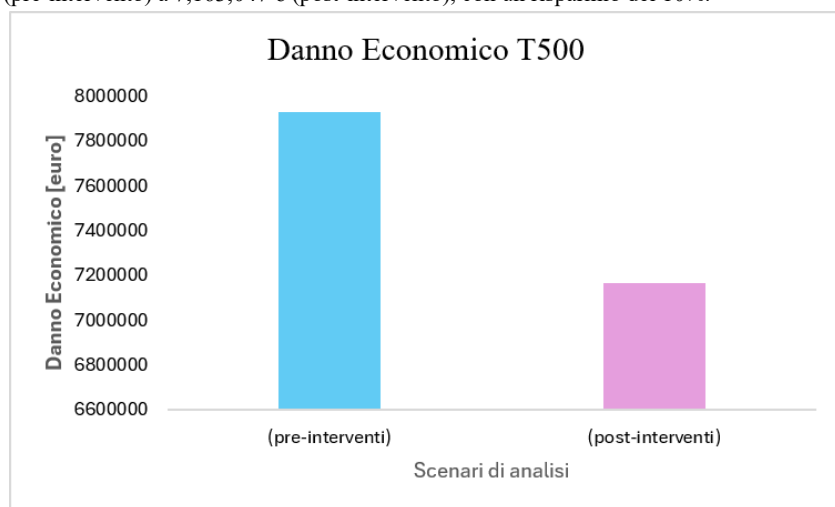


Fig. 8.78 Confronto dei danni economici pre e post-interventi con il plugin FLOOD2B per T500 (QGIS).

La valutazione economica del danno, calcolata come sommatoria dei valori economici stimati per ogni unità edilizia coinvolta, fornisce una misura diretta dell'efficacia degli interventi di mitigazione ipotizzati nello scenario 2D.

Il confronto tra le sommatorie totali del danno consente di quantificare il beneficio apportato dalle opere, ovvero nella riduzione dell'impatto economico (Fig. 8.79) da circa 7,928,972 € (pre-intervento) a 7,163,047 € (post-intervento), con un risparmio del 10%.



Tab. 8.79 Confronto dei danni economici pre e post-interventi per T500 (Excel).

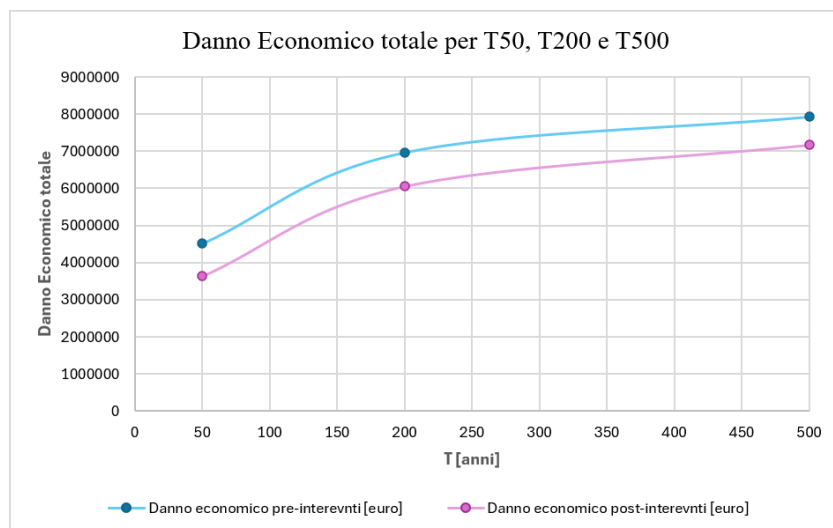
Il grafico in Fig. 8.80) illustra l'andamento del danno economico totale espresso in euro, in relazione a tre diversi tempi di ritorno: 50, 200 e 500 anni. La rappresentazione mette a confronto due scenari distinti:

- linea blu (danno economico pre-interventi): rappresenta la stima del danno in assenza di misure di mitigazione. Si osserva un incremento del danno economico all'aumentare del

tempo di ritorno, con un valore iniziale di circa 4,5 milioni di euro per T50, che cresce fino a sfiorare gli 8 milioni di euro per T500;

- linea rosa (danno economico post-interventi): rappresenta la stima del danno conseguente alla realizzazione degli interventi progettuali. Il confronto con la linea blu evidenzia un'efficace riduzione del danno economico totale per ciascun tempo di ritorno considerato, confermando l'impatto positivo delle misure adottate.

In entrambi i casi, la curva mostra una crescita non lineare, con una pendenza che tende a ridursi al crescere del tempo di ritorno, indicando un progressivo rallentamento nell'incremento del danno economico atteso.



Tab. 8.80 Confronto dei danni totali economici pre e post-interventi per T50, T200 e T500 (Excel).

8.2.12. Valutazione del danno percentuale strutturale: confronto tra modello pre e post-interventi

Il presente sottocapitolo è dedicato alla valutazione dell'efficacia delle opere di mitigazione progettate per il bacino del torrente Petronio, attraverso un'analisi comparativa tra lo stato di fatto e lo scenario di progetto. Mediante l'estrazione dei battenti idrici derivanti dalle simulazioni 2D e l'applicazione delle funzioni di vulnerabilità JRC tramite il plugin FloodD2B, lo studio mira a quantificare la riduzione del danno atteso conseguente alla realizzazione degli interventi strutturali. Tale analisi permette non solo di validare le performance idrauliche dell'assetto di progetto, ma anche di confermare la coerenza e l'affidabilità del workflow modellistico adottato per la stima dei benefici socio-economici.

- Analisi per portata riferita a T50 (Fig. 8.81):

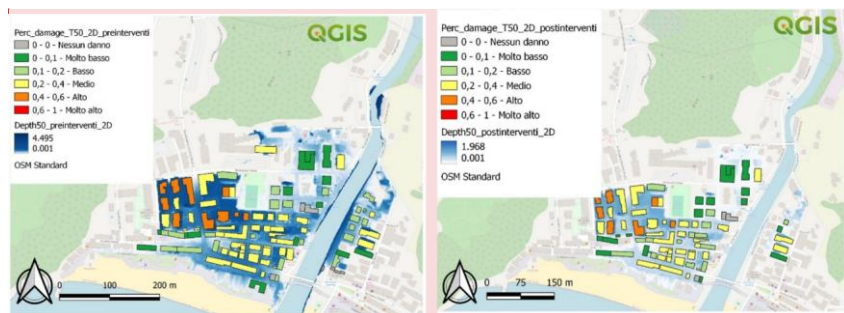


Fig. 8.81 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T50 (QGIS).

La Fig. 8.81 illustra il confronto spaziale tra la stima del danno strutturale derivante dal modello 2D pre-interventi (a sinistra) e post-interventi (a destra), entrambi riferiti allo scenario di piena con tempo di ritorno T50.

L'analisi visiva evidenzia una marcata differenza nella distribuzione degli impatti: la configurazione pre-intervento, caratterizzata da un'estensione del battente idrico più ampia e da profondità maggiori, denota un numero di edifici coinvolti in classi di danno più elevate. Mentre il modello post-intervento tende a circoscrivere e mitigare significativamente il danno nelle aree di prossimità all'alveo, il dato pre-intervento riflette una condizione di maggiore sollecitazione del patrimonio edilizio circostante.

Per quantificare tale differenza, la Fig. 8.82 riporta la ripartizione numerica degli edifici in base alle classi di danno percentuale definito dalle funzioni del JRC. Il confronto permette di osservare, per ciascun layer, quanti edifici ricadono in ogni specifico range di vulnerabilità, fornendo una metrica oggettiva per valutare l'entità del miglioramento ottenuto tra lo scenario pre-intervento e quello post-intervento.

Commentato [IF37]: Solito commento

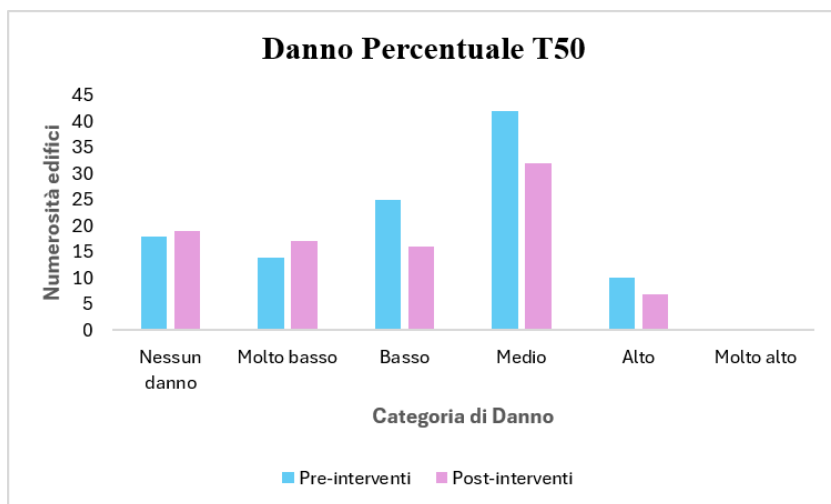


Fig. 8.82 Confronto dei danni percentuale pre e post-interventi per T50 (Excel).

Il grafico in figura illustra la distribuzione della numerosità degli edifici per ciascuna classe di danno percentuale (dal “Nessun danno” al “Molto alto”), confrontando i risultati ottenuti dal modello di stato di fatto (pre-interventi) con quelli derivanti dalla configurazione post-interventi per l’evento di piena con tempo di ritorno T50.

L’analisi comparativa evidenzia una divergenza significativa nella distribuzione degli impatti attesi:

- settore di minor danno: nel modello pre-interventi si osserva una minore quantità di edifici ricadenti in queste categorie rispetto alla configurazione post-interventi, che registra un incremento verso le classi di sicurezza;
- settore di maggior danno: nella categoria “Medio”, la configurazione pre-interventi stima circa 42 edifici coinvolti, un valore sensibilmente superiore rispetto alle circa 32 unità del modello post-intervento.

Il confronto conferma l’efficacia delle opere di mitigazione realizzate e la riduzione complessiva dell’esposizione del patrimonio edilizio. Tale differenza sottolinea come gli interventi di protezione portino a una significativa riduzione del rischio idraulico nell’area di studio, spostando una porzione consistente di edifici verso classi di vulnerabilità inferiore.

- Analisi per portata riferita a T200 (Fig. 8.83):

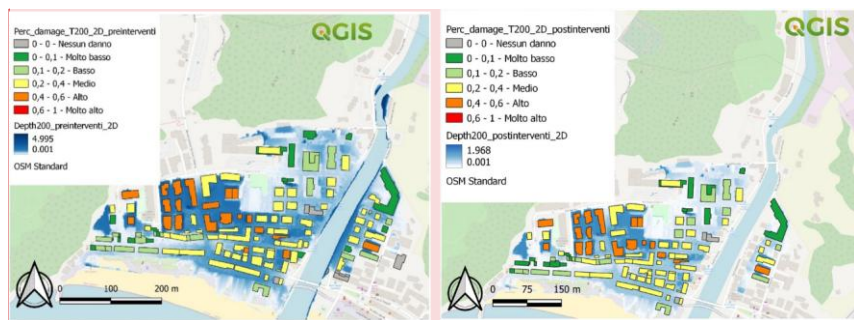


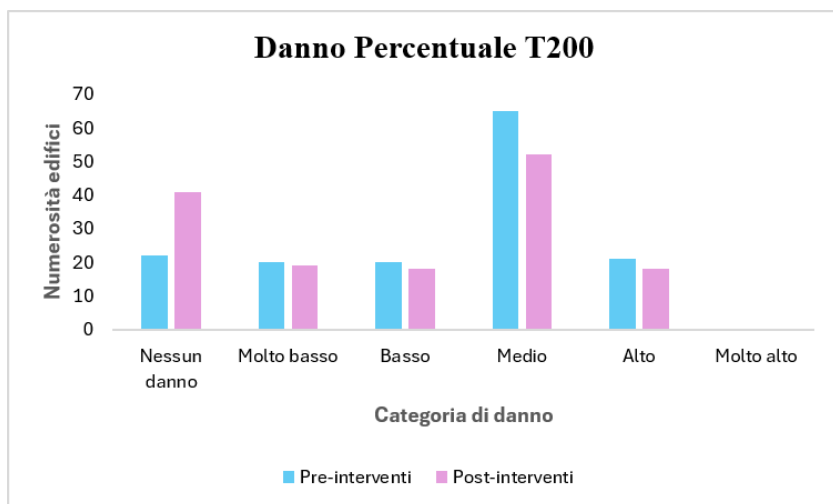
Fig. 8.83 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T200 (QGIS).

La figura illustra il confronto spaziale tra la stima del danno strutturale derivante dal modello 2D pre-interventi (a sinistra) e post-interventi (a destra), entrambi riferiti allo scenario di piena con tempo di ritorno T200.

L'analisi visiva evidenzia una marcata differenza nella distribuzione degli impatti: la configurazione pre-intervento, caratterizzata da un'estensione del battente idrico più ampia e da profondità maggiori, denota un numero di edifici coinvolti in classi di danno più elevate. Mentre il modello post-intervento tende a circoscrivere e mitigare significativamente il danno nelle aree di prossimità all'alveo, il dato pre-intervento riflette una condizione di maggiore sollecitazione del patrimonio edilizio circostante.

Per quantificare tale divergenza, la Fig. 8.84 riporta la ripartizione numerica degli edifici in base alle classi di danno percentuale definito dalle funzioni del JRC. Il confronto permette di osservare, per ciascun layer, quanti edifici ricadono in ogni specifico range di vulnerabilità, fornendo una metrica oggettiva per valutare l'entità del miglioramento ottenuto tra lo scenario pre-intervento e quello post-intervento.

Commentato [IF38]: Solito



Tab. 8.84 Confronto dei danni percentuale pre e post-interventi per T200 (Excel).

Il grafico illustra la distribuzione della numerosità degli edifici per ciascuna classe di danno percentuale (dal “Nessun danno” al “Molto alto”), confrontando i risultati ottenuti dal modello di stato di fatto (pre-interventi) con quelli derivanti dalla configurazione post-interventi per l’evento di piena con tempo di ritorno T200.

L’analisi comparativa evidenzia una divergenza significativa nella distribuzione degli impatti attesi:

- settore di minor danno: nel modello pre-interventi si osserva una minore quantità di edifici ricadenti nella categoria “Nessun danno” rispetto alla configurazione post-interventi, che registra un deciso incremento verso le classi di sicurezza;
- settore di maggior danno: nella categoria “Medio”, la configurazione pre-interventi stima circa 65 edifici coinvolti, un valore sensibilmente superiore rispetto alle circa 52 unità del modello post-intervento.

Il confronto conferma l’efficacia delle opere di mitigazione realizzate e la riduzione complessiva dell’esposizione del patrimonio edilizio. Tale differenza sottolinea come gli interventi di protezione portino a una significativa riduzione del rischio idraulico nell’area di studio, spostando una porzione consistente di edifici verso classi di vulnerabilità inferiore.

- Analisi per portata riferita a T500 (Fig. 8.85):

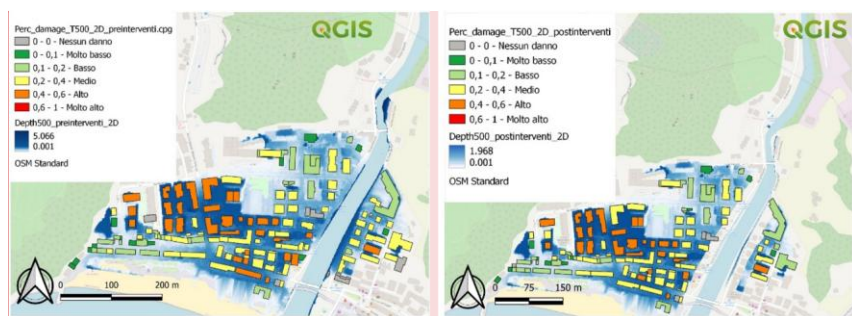


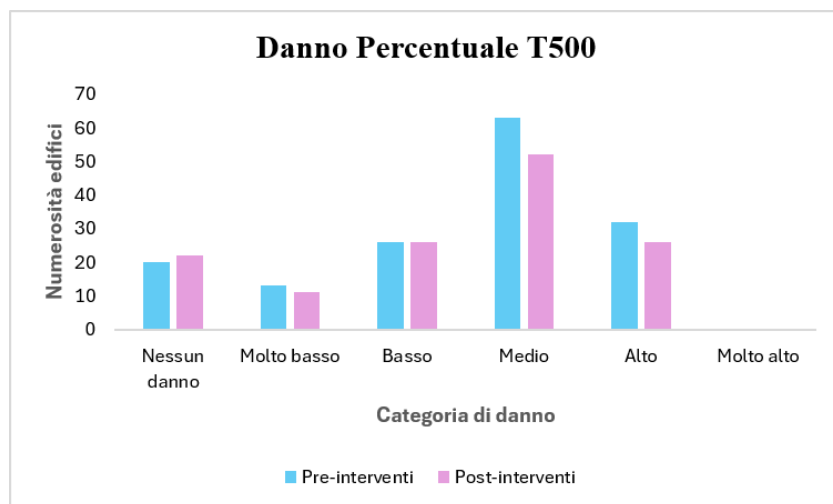
Fig. 8.85 Confronto dei danni strutturali in percentuale pre e post-interventi con il plugin FloodD2B per T500 (QGIS).

La Fig. 8.85 illustra il confronto spaziale tra la stima del danno strutturale derivante dal modello 2D pre-interventi (a sinistra) e post-interventi (a destra), entrambi riferiti allo scenario di piena con tempo di ritorno T500.

L'analisi visiva evidenzia una differenza nella distribuzione degli impatti: la configurazione pre-intervento, caratterizzata da un'estensione del battente idrico più ampia e da profondità maggiori, denota un numero di edifici coinvolti in classi di danno più elevate. Mentre il modello post-intervento tende a mitigare il danno nelle aree di prossimità all'alveo, il dato pre-intervento riflette una condizione di maggiore sollecitazione del patrimonio edilizio circostante.

Per quantificare tale divergenza, la Fig. 8.86 riporta la ripartizione numerica degli edifici in base alle classi di danno percentuale definito dalle funzioni del JRC. Il confronto permette di osservare, per ciascun layer, quanti edifici ricadono in ogni specifico range di vulnerabilità, fornendo una metrica oggettiva per valutare l'entità del miglioramento ottenuto tra lo scenario pre-intervento e quello post-intervento.

Commentato [IF39]: Solito



Tab. 8.86 Confronto dei danni percentuale pre e post-interventi per T500 (Excel).

Il grafico in figura illustra la distribuzione della numerosità degli edifici per ciascuna classe di danno percentuale (dal “Nessun danno” al “Molto alto”), confrontando i risultati ottenuti dal modello di stato di fatto (pre-interventi) con quelli derivanti dalla configurazione post-interventi per l’evento di piena con tempo di ritorno T500.

L’analisi comparativa evidenzia una divergenza significativa nella distribuzione degli impatti attesi:

- settore di minor danno: nel modello pre-interventi si osserva una minore quantità di edifici ricadenti nella categoria “Nessun danno” rispetto alla configurazione post-interventi;
- settore di maggior danno: nella categoria “Medio”, la configurazione pre-interventi stima circa 63 edifici coinvolti, un valore superiore rispetto alle circa 52 unità del modello post-intervento.

Il confronto conferma l’efficacia delle opere di mitigazione realizzate e la riduzione complessiva dell’esposizione del patrimonio edilizio. Tale differenza sottolinea come gli interventi di protezione portino a una significativa riduzione del rischio idraulico nell’area di studio, spostando una porzione consistente di edifici verso classi di vulnerabilità inferiore.

Il grafico successivo (Fig. 8.87) illustra l’andamento del danno percentuale totale in funzione dei tempi di ritorno considerati (T50, T200 e T500), mettendo a confronto lo scenario pre-interventi (linea azzurra) con quello post-interventi (linea rosa).

L’analisi dei dati evidenzia una chiara tendenza crescente del danno all’aumentare del tempo di ritorno, coerentemente con l’intensità degli eventi di piena. Parallelamente, si osserva costantemente una riduzione del danno percentuale totale nello scenario post-intervento rispetto a quello pre-intervento per tutti i tempi di ritorno analizzati.

Il confronto permette di osservare, per ciascuno scenario, l’entità del danno complessivo

associato alle diverse probabilità di accadimento, fornendo una metrica oggettiva per valutare l'efficacia dei benefici apportati dalle opere di mitigazione realizzate nel corso dei vari scenari di progetto.

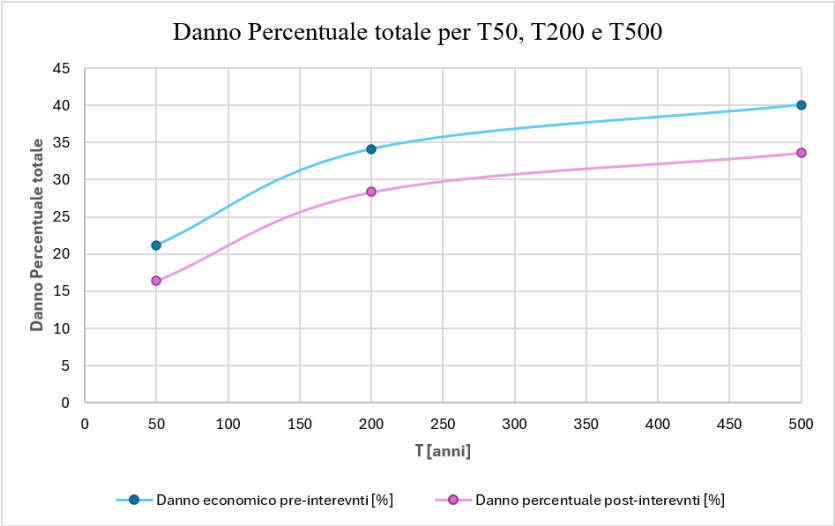


Fig. 8.87 Confronto dei danni totali percentuali pre e post-interventi per T50, T200 e T500 (Excel).

9. Considerazioni sui risultati ottenuti

Questo capitolo vuole sintetizzare le evidenze emerse dall'applicazione del metodo di stima dei danni basato sulla catena modellistica integrata. L'obiettivo è analizzare come la variazione dei parametri idraulici (tiranti e velocità) tra lo stato di fatto e lo stato di progetto influenzi la riduzione del danno atteso annuo e l'efficacia economica degli interventi ipotizzati.

9.1. Metodo alternativo 1: modellazione idraulica 1D

L'applicazione del modello idraulico 1D ha permesso di quantificare la risposta del sistema fluviale agli interventi di mitigazione proposti per l'area di Riva Trigoso. Confrontando lo stato di fatto con lo stato di progetto, si osserva una variazione significativa dei tiranti idrici, in particolare nelle sezioni critiche in prossimità del ponte di attraversamento.

Gli interventi di riprofilatura e di innalzamento degli argini hanno determinato un abbassamento del battente idrico di circa 19 cm per l'evento con tempo di ritorno T50 anni, di circa 9 cm per l'evento T200 anni e di circa 18 cm per T500 anni.

Tale riduzione del tirante, riportata sulle curve di danno di tipo JRC, si traduce in una contrazione del danno atteso. In termini monetari, il danno per l'evento di piena T50 passa da 802,381 € a 138,426 €. Per l'evento T200, il danno si riduce da 1,087,438 € a 332,457 €, mentre per l'evento T500 si osserva una variazione da 1,223,667 € a 585,084 €.

La validità del metodo 1D, pur essendo uno standard consolidato, presenta alcune limitazioni che devono essere considerate nel contesto di Riva Trigoso:

- confronto con i dati storici: rispetto agli eventi storici registrati, il modello tende a sottostimare l'estensione dell'area inondata. La discrepanza è attribuibile principalmente alla rappresentazione semplificata (in particolare del trasporto solido e delle condizioni al contorno), fattore che negli eventi reali ha giocato un ruolo determinante nei tiranti finali;
- sensibilità alla risoluzione spaziale: l'analisi ha evidenziato una spiccata sensibilità del danno calcolato alla risoluzione del DTM. Poiché Riva Trigoso presenta una morfologia urbana densa, una risoluzione spaziale non sufficientemente elevata rischia di "appiattire" le micro-depressioni del terreno, portando a una sottostima del danno puntuale nei piani terra degli edifici, dove anche soli 10 cm di differenza nel tirante possono determinare il superamento di una soglia di danno critico.

9.2. Metodo alternativo 2: modellazione idraulica 2D

Il presente metodo si discosta dall'analisi 1D per adottare un approccio 2D. Mentre l'analisi 1D si basa su una schematizzazione a sezioni trasversali, l'approccio 2D permette di risolvere le equazioni di Saint-Venant sull'intera superficie del dominio, considerando le variazioni spaziali del campo di moto sia in direzione longitudinale che trasversale.

Le differenze metodologiche rispetto al primo approccio sono sostanziali:

- rappresentazione del fenomeno: l'analisi 1D ipotizzava un flusso mediato sulla sezione,

perdendo le informazioni sulle componenti trasversali della velocità. L'analisi 2D, al contrario, cattura l'effettiva distribuzione dei flussi, evidenziando zone di ricircolo, punti di ristagno e le linee di corrente che il modello 1D non è in grado di descrivere;

- risultati: questo metodo ha prodotto risultati più cautelativi e precisi in prossimità di discontinuità geometriche. Ha infatti evidenziato criticità in aree che il primo metodo considerava "sicure", specialmente in corrispondenza di espansioni o contrazioni dove le componenti trasversali della velocità risultano significative ai fini della determinazione dei tiranti idrici e degli sforzi tangenziali al fondo;

La robustezza del metodo 2D risiede nella capacità di modellare la complessità reale della superficie libera.

Tale approccio risulta fondamentale laddove la geometria del sito è complessa o le interazioni tra correnti trasversali sono determinanti. Sebbene richieda un maggiore sforzo computazionale e una discretizzazione del dominio più raffinata, è molto più adatto rispetto all'1D per una progettazione esecutiva che necessita di una validazione accurata del comportamento idraulico. Resta inteso che, per quanto superiore nella rappresentazione spaziale, la validità del metodo 2D dipende strettamente dalla qualità del DTM e dalla corretta calibrazione dei coefficienti distribuiti su tutta la maglia di calcolo.

L'integrazione dell'analisi 2D ha permesso di affinare la valutazione degli effetti degli interventi di riprofilatura e innalzamento degli argini. Il modello ha evidenziato una distribuzione degli abbassamenti dei battenti idrici più eterogenea rispetto all'approccio 1D.

Tale affinamento, riportato sulle curve di danno JRC, ha consentito una stima più puntuale della contrazione del danno atteso su scala urbana. In termini monetari, il danno per l'evento T50 passa da 4,510,531 € a 3,632,551 €; per l'evento T200 si riduce da 6,966,614 € a 6,049,237 €, mentre per l'evento T500 si osserva una variazione da 7,928,972 € a 7,163,047 €.

L'analisi 2D ha evidenziato come le criticità non siano distribuite uniformemente, ma localizzate in punti di particolare complessità geometrica. Questo metodo si rivela dunque più robusto per una progettazione esecutiva, poiché permette di individuare non solo l'entità del danno, ma anche le traiettorie preferenziali del flusso, consentendo di progettare misure di mitigazione locale più efficaci.

Conclusioni e prospettive future

Il presente lavoro di tesi ha permesso di delineare un quadro conoscitivo avanzato del rischio idraulico nell'area di Riva Trigoso, integrando metodologie di modellazione idraulica con analisi di vulnerabilità economica.

L'approccio metodologico adottato, basato sull'integrazione di strumenti GIS e HEC-RAS, ha dimostrato di essere una procedura solida e replicabile. Tale flusso di lavoro rappresenta uno strumento di supporto decisionale efficace per le amministrazioni locali e i pianificatori territoriali, trasferibile ad altri contesti caratterizzati da simili complessità morfologiche e idrografiche, dove la disponibilità di dati può essere limitata ma la necessità di intervento è elevata.

L'analisi costi-benefici condotta ha validato l'efficacia degli interventi di mitigazione proposti. In particolare, è emerso come la riduzione del danno atteso annuo (EAD) giustifichi l'investimento strutturale previsto, portando a un tempo di ritorno dell'investimento sostenibile nel medio periodo. In linea con la teoria decisionale, tale valutazione permette di bilanciare le incertezze legate alle previsioni idrauliche con la necessità concreta di proteggere il tessuto urbano e produttivo.

Tuttavia, è necessario riconoscere alcune limitazioni intrinseche allo studio. La precisione dei risultati è vincolata dalla risoluzione del DTM e dalle incertezze nelle curve di danno JRC, che, sebbene standardizzate a livello europeo, non sempre riflettono appieno la specificità della tipologia costruttiva locale e del valore economico dei beni esposti.

Alla luce dei risultati ottenuti e delle criticità emerse, si delineano diverse direzioni per implementare e affinare ulteriormente la metodologia proposta:

- implementazione di sistemi di Early Warning: in ottica di gestione del rischio in tempo reale, si suggerisce l'integrazione del modello con sensori realizzati da idrometri connessi. Questo permetterebbe di passare da una valutazione statica del rischio a una dinamica, supportando le autorità nelle procedure di allerta e gestione dell'emergenza durante gli eventi meteo-estremi;
- calibrazione delle curve di danno: data la peculiarità del contesto, si auspica uno studio locale finalizzato a calibrare le curve di danno JRC. Una stima più accurata dei costi di rimpiazzo e una classificazione specifica per l'edilizia ligure permetterebbero di ridurre significativamente il margine di incertezza nelle analisi economiche future;
- proiezioni di rischio climatico: al fine di testare la robustezza delle opere progettate nel tempo, è opportuno estendere l'analisi agli scenari climatici futuri. Valutare come una variazione positiva dell'intensità delle precipitazioni influenzi il danno atteso e permetterebbe di orientare la progettazione verso criteri di maggiore resilienza;
- integrazione di Nature-Based Solutions: per un approccio più sostenibile, si propone di integrare le opere strutturali con soluzioni di ingegneria naturalistica o aree di laminazione controllata. Tali interventi non solo potrebbero abbattere ulteriormente il rischio idraulico, ma

contribuirebbero al miglioramento ambientale e paesaggistico dell'area di Riva Trigoso, favorendo una gestione del bacino più armonica con l'ecosistema esistente.

Bibliografia e sitografia

Bibliografia

- Appelbaum, S. J. (1985). Determination of flood magnitude and frequency. Water Resources Bulletin.
- ARPAL (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure) – Rapporti meteo-climatici annuali.
- ARPAL – Centro Funzionale Meteo-Idrologico di Protezione Civile: Annali Idrologici della Regione Liguria.
- ARPAL Liguria (2020): Manuale delle procedure del Centro Funzionale per la gestione delle allerte meteo-idrologiche.
- ARPAL Liguria: Descrizione delle formazioni vegetali e serie di vegetazione della Liguria (Rete Natura 2000).
- Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (2021): Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) - II Ciclo di gestione.
- Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (2021): Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) - Revisione storica degli eventi nel Levante Ligure.
- Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - Norme di Attuazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA).
- B. Hellin, et al.: Soil Erosion and Conservation.
- Bortolotti, V. & Gianelli, G. (1976): Le brecce poligeniche della successione ofiolitica nell'Appennino settentrionale. Bollettino della Società Geologica Italiana.
- Brunner, G. W. (2020). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. W. (2020). HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. W. (2023). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 6.4. Hydrologic Engineering Center (HEC), U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Brunner, G. W. (2024) - HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA.
- C.N.R. - G.N.D.C.I. (1994): Progetto AVI - Inventario delle aree colpite da frane e inondazioni in Italia. Rapporto per la Regione Liguria.
- Castellarin, A., et al. (2012). Review of low-flow in the UK and Europe: methods and software.
- Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill Education.

- Circolare Reg. Liguria n. 2077 (1988): Legenda uniforme per la cartografia geomorfologica e la pianificazione territoriale.
- Città Metropolitana di Genova (già Provincia di Genova) – Piano di Bacino del Torrente Petronio. Relazione Generale e Norme di Attuazione.
- Città Metropolitana di Genova: Linee guida per la redazione dei Piani di Emergenza Comunali nei bacini del Levante Ligure.
- Città Metropolitana di Genova: Piano di Bacino del T. Petronio - Relazione Idrologica.
- Città Metropolitana di Genova: Piano Territoriale di Coordinamento - Ambito Idrografico 16 (T. Petronio).
- Cortesogno, L. & Palenzona, A. (1986): Le zone mineralizzate a manganese nei diaspri delle Ofioliti Liguri: caratteristiche mineralogiche e contesti geologici.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., & Verwey, A. (1975). Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman Publishing.
- D.L. 180/1998 (Decreto Sarno) e Legge 267/1998: Normativa tecnica per la realizzazione degli interventi di messa in sicurezza del territorio.
- Decandia, F.A. & Elter, P. (1972): La zona con ofioliti tra Bracco e Val Graveglia (Appennino Ligure). Memorie della Società Geologica Italiana, Vol. 11.
- Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49: Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152: Norme in materia ambientale (e successive modifiche ed integrazioni).
- Dipartimento della Protezione Civile (2018): Codice della Protezione Civile (D.Lgs. 1/2018).
- Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2007, relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.
- Formigoni et al. (1986) & Olcese et al. (1991): Studi inclinometrici sulla frana di Campegli, Rapporti tecnici SNAM.
- Galbiati, B., et al. (1976): Nuove interpretazioni dei rapporti tra le ofioliti e le formazioni sedimentarie in Val Petronio.
- Gennaro, G. (2001): Climatologia della Liguria, in “Rapporto sullo stato dell’ambiente in Liguria”.
- Guzzetti F. (2005): Landslide Hazard and Risk Assessment.
- Huizinga, J., et al. (2017): Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines. Joint Research Centre (JRC), European Commission.
- ISPRA – Servizio Geologico d’Italia – Note illustrative della Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000 (Foglio 231 "Chiavari" e Foglio 248 "La Spezia").
- ISPRA (2021): Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia: indicatori di rischio.
- ISPRA (2021): Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia: tipologie di opere e gestione del rischio residuo.

- Jonkman, S. N., et al. (2003): Loss of life estimation in flood risk assessment; theory and applications. Catena.
- Kron, W. (2005): Flood Risk = Hazard • Values • Vulnerability. Water International.
- Mazzacaro: “Automatic procedure in GIS environment for vulnerability estimation and assessment of expected damage to buildings flood-prone areas”
- Messner, F., & Meyer, V. (2006): Flood damage, vulnerability and risk perception – challenges for flood damage research. In "Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures".
- Ministero della Cultura - ICCU – Censimento dei siti minerari della Liguria.
- Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE): Linee Guida per la mitigazione del rischio idrogeologico - Interventi strutturali e criteri di efficacia.
- Piano Territoriale di Coordinamento Paesaggistico (PTCP) – Descrizione dei sistemi ambientali e delle unità di paesaggio della Val Petronio.
- Piccoli A. (1939): La piena del torrente Petronio del 10 settembre 1937. Pubblicazione dell’Ufficio Idrografico della Sezione Autonoma di Genova.
- Pinna, M. (1977): Climatologia, UTET.
- Provincia di Genova (2013): Piano di Bacino Stralcio sul Rischio Idrogeologico - Ambito 17 (T. Petronio), Relazione Generale.
- Provincia di Genova – Servizio Difesa del Suolo: Linee guida per la redazione degli studi idrologici e determinazione dei parametri di deflusso (Metodo SCS).
- Regione Liguria – Anagrafe dei Corsi d’Acqua della Liguria.
- Regione Liguria – Settore Ecosistema Costiero – Piani di Bacino per la difesa dal suolo.
- Regione Liguria (1997): Linee guida per la classificazione e il monitoraggio dei fenomeni franosi.
- Regione Liguria (1998): D.G.R. n. 2615: Criteri e metodi per la perimetrazione delle aree inondabili e delle fasce di rispetto.
- Regione Liguria (2016): D.G.R. n. 1024 del 04/11/2016 – Aggiornamento del Piano di Bacino del Torrente Petronio.
- Regione Liguria (2018): Manuale per le opere di ingegneria naturalistica e sistemazioni idraulico-forestali.
- Regione Liguria - Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Settentrionale. Piano di Bacino per la tutela dal rischio idrogeologico del Torrente Petronio. Relazione Idrologica e Idraulica.
- Regione Liguria: Piano di Tutela dell’Ambiente Marino e Costiero.
- Relazioni Tecniche del P.U.C. (Piano Urbanistico Comunale) di Sestri Levante e Castiglione Chiavarese.
- Servizio Geologico d’Italia: Carta Geologica d’Italia alla scala 1:100.000, Foglio 95 “La Spezia”.

- Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes and hazards. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- UNDRR (2019): Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- UNESCO (1993): Multilingual Landslide Glossary.
- USDA - Soil Conservation Service (SCS): National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology.
- Varnes, D.J. (1978) Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33.

Sitografia

- Geoportale della Regione Liguria: <https://geoportale.regione.liguria.it/>
- Google Earth: <https://www.google.it/intl/it/earth/index.html>
- IUGS (International Union of Geological Sciences): <http://www.iugs.org/>
- QGIS Documentation: <https://docs.qgis.org/>
- Spatial Reference: <https://spatialreference.org/>
- U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center (HEC): <https://www.hec.usace.army.mil/> (Sito ufficiale per il download del software HEC-RAS e della relativa documentazione tecnica).