

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E
IL TERRITORIO**

TESI DI LAUREA

in

Modellistica idrologica M

**ANALISI NUMERICA DELLE CONDIZIONI DI RISCHIO IDRAULICO
PER LA PORZIONE SUDOCCIDENTALE DELLA CITTA DI
RAVENNA**

CANDIDATO

Flavio Marchitelli

RELATORE

Chiar.mo Prof. Ing. Attilio Castellarin

CORRELATORI

Dott. Ing. Alessio Domeneghetti

Dott. Maurizio Mainetti

Anno Accademico 2012/2013

Sessione III

Sommario

Introduzione	6
1. Gestione del rischio idraulico in Italia e in Europa	9
1.1 Finalità dello studio	13
2. Strumenti di calcolo e dati utilizzati	15
2.1 Reperimento dati	15
2.2 Software utilizzati	18
2.2.1 ArcGis.....	18
2.2.2 HEC-GeoRAS.....	21
2.2.3 HEC-RAS	21
3. Caso di studio	25
3.1 Criticità del caso di studio.....	26
4. Valutazione delle potenzialità di laminazione all'esterno delle arginature	30
4.1 Identificazione topografica delle celle	30
4.2 Definizione delle curve di invaso per ogni cella	32
4.3 Scenari di piena e potenziale laminazione all'esterno delle arginature	33
5. Modellazione idraulica.....	39
5.1 Determinazione degli sfioratori laterali	40
5.2 Digitalizzazione in Hec-Ras delle storage areas e delle storage area connections.....	43
5.4 Simulazioni.....	45
6. Risultati	46
6.1 Simulazioni con sfioratori con andamento altimetrico attuale	46
6.1.1 Simulazione con chiusa attuale	46
6.1.2 Simulazione senza chiusa e storage areas.....	47
6.1.3 Simulazione con chiusa modificata e storage areas	50
6.1.4 Simulazione con chiusa attuale e storage areas	54

6.2	Ipotesi di gestione degli allagamenti all'esterno delle arginature maestre	57
6.2.1	Simulazione senza chiusa e con storage areas	58
6.2.2	Simulazione con chiusa modificata e storage areas	61
6.2.3	Simulazione con chiusa attuale e storage areas	63
7.	Possibili interventi	66
8.	Considerazioni conclusive	72
9.	Riferimenti Bibliografici.....	76
10.	ALLEGATO A	79

Introduzione

In ambito scientifico, si sta assistendo in questi ultimi tempi ad un cambiamento radicale di approccio nei confronti del problema della mitigazione del rischio idrogeologico e, nella fattispecie, di quello alluvionale, in Italia sempre più attuale ed urgente.

Tale cambiamento è dettato dalle profonde ferite che il tessuto socio-economico subisce ogni volta che ricorre un disastro idrogeologico e quindi, dalla presa di coscienza da parte delle istituzioni di dover promuovere la ricerca nell'ambito della mitigazione del rischio idraulico in una direzione diversa rispetto a quella seguita fino ad ora. Gli eventi alluvionali stanno aumentando in frequenza e magnitudo a causa di cambiamenti climatici in atto (*Bouwer et al.*, 2010; *Ciscar*, 2009), e nello stesso tempo stanno arrecando danni maggiori a causa dell'aumento di valore dei beni danneggiati dalle inondazioni (v. ad es. *Barredo*, 2009; *Mitchell*, 2003).

Le tradizionali strategie di difesa rientrano nel concetto delle cosiddette “strategie di resistenza”, intendendo con resistenza la capacità di un sistema di mantenere inalterate le proprie caratteristiche se sottoposto a diverse sollecitazioni. Rientrano in questa categoria le difese strutturali (ad es. arginature nel caso di fiumi in pianura), che hanno lo scopo di contenere le piene e farle defluire verso valle, assicurando quindi assoluta protezione al territorio circostante. Tuttavia, la probabilità che queste misure falliscano (come ad es. il possibile cedimento di una arginatura) espone i territori limitrofi ad un rischio residuale connesso ad eventi ad elevatissimo impatto (i.e. scenari con assegnato tempo di ritorno maggiore rispetto a quello adottato in fase progettuale) o al possibile cedimento delle strutture difensive (i.e. rotte arginali). Un esempio di grande attualità è il recente disastro che ha colpito la Provincia di Modena, causato da una rottura arginale senza sormonto del fiume Secchia, colpendo Comuni che erano stati interessati fra l'altro dal sisma del 2012.

Tale evidenza ha suggerito l'opportunità di promuovere politiche di difesa alternative rispetto a quelle adottate fino ad oggi, dove le difese strutturali vengono considerate non più come limiti invalicabili ma come elementi facenti parti di un sistema di difesa potenzialmente valicabile (valutazione del rischio

residuale permanente nelle aree esterne al sistema difensivo). La tipologia alternativa di difesa si basa sul concetto di “resilienza”, cioè sulla capacità del sistema di ritornare ad uno stato quanto più possibile simile a quello iniziale, in seguito a una perturbazione subita (*Hashimoto et al., 1982*).

Il lavoro che viene di seguito presentato, in linea con le direttive normative nazionali e comunitarie, nasce proprio sulla base di questo cambiamento.

Con riferimento ad esempio ai rilevati arginali posti a difesa dagli allagamenti è ormai evidenti lungo molti corsi d'acqua che tali misure difensive hanno raggiunto i propri limiti strutturali: le difese arginali che nel corso dei secoli sono state modificate e ampliate, oggi appaiono difficilmente adeguabili per contenere eventi di piena associati a tempi di ritorno più elevati. Il cambio di strategia richiesto consiste quindi nell'ammettere che in caso di eventi di piena di particolare magnitudo si possano verificare delle esondazioni controllate in aree preventivamente identificate, cercando di limitare l'esposizione e la vulnerabilità delle aree esposte a tale rischio.

Con riferimento a tale ambito d'indagine la presente dissertazione nasce da una collaborazione tra il DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali) della Scuola di Ingegneria dell'Università di Bologna, e la Protezione Civile della Regione Emilia Romagna e della Provincia di Ravenna. Tale attività si colloca proprio all'interno delle nuove linee strategiche identificate dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (Relazione idraulica integrativa), orientate, in linea con le direttive Comunitarie, non più solo a limitare la probabilità dei fenomeni di allagamento ma anche, per quanto possibile alla gestione e alla mitigazione degli eventi di piena la cui intensità superi gli scenari di riferimento per il sistema arginale.

Con riferimento ad uno specifico caso studio, l'obiettivo della presente analisi è la tutela del territorio comunale della città di Ravenna da eventuali esondazioni del fiume Montone, in una zona resa ancora più critica dalla confluenza del fiume Ronco e dalla presenza della chiusa San Marco. Tale chiusa ha ricoperto in passato un ruolo fondamentale nella gestione idrica e nella salvaguardia da esondazioni della stessa Ravenna, mentre oggi costituisce un limite alle condizioni di officiosità del fiume Montone.

Il lavoro si divide in due fasi principali. Nella prima parte lo studio si concentra principalmente su un'indagine topografica del territorio preso in analisi, pervenendo alla valutazione di potenziali scenari di laminazione controllata all'esterno delle arginature nel caso di diversi eventi di piena ad associato tempo di ritorno e nel caso di diverse configurazioni di allagamento.

Nella seconda parte dello studio si è proceduto all'implementazione di un modello idraulico quasi-bidimensionale (quasi-2D) in grado di riprodurre scenari ipotetici di allagamento per diversi eventi di piena.

La presente analisi, partendo da lavori di tesi precedenti (vedi ad es. "Modellazione numerica per l'analisi delle criticità del fiume Montone in provincia di Ravenna", Adipietro, 2013) ha permesso un sostanziale approfondimento delle conoscenze relative alle condizioni di criticità idraulica dell'area di studio, rendendo disponibile un modello numerico-idraulico quasi-2D in grado di valutare e confrontare diversi scenari di mitigazione del rischio idraulico.

Facendo riferimento alle indagini condotte mediante tale modellistica numerica, vengono riportati i risultati ottenuti confrontando fra loro i diversi scenari analizzati e definendo le criticità che necessitano di intervento con maggiore urgenza.

1. Gestione del rischio idraulico in Italia e in Europa

Ad un approccio tradizionale di riduzione del rischio idraulico, Flood Protection Strategy, che prevede esclusivamente la riduzione della probabilità di accadimento degli allagamenti, si è diffuso negli ultimi anni in Europa un nuovo approccio che punta alla riduzione del rischio idraulico intervenendo sui molteplici fattori che lo caratterizzano. Il rischio, R , non è infatti solo funzione della probabilità con cui un evento può verificarsi, P , ma anche del danno, D , in genere economico, che tale evento reca (Risk-based approach):

$$R = P * D$$

La riduzione del rischio quindi passa dalla diminuzione di uno dei due fattori. Gli interventi strutturali rappresentano le principali misure di intervento adottate secondo un approccio di tipo tradizionale, mirando alla riduzione della pericolosità, P , ovvero della probabilità che si verifichino eventi alluvionali. Gli interventi definiti invece non strutturali rappresentano misure di prevenzione e riduzione del rischio che mirano alla riduzione della vulnerabilità del territorio potenzialmente allagabile (vedi ad es. sistema di allerta, interventi di pianificazione territoriale, piani di emergenza, etc.). Nell'ambito degli interventi non strutturali ricoprono un ruolo fondamentale le mappe di danno, perché rappresentano una nuova e fondamentale linea guida per la pianificazione urbanistica a vari livelli di attuazione, rientrando quindi nella nuova ottica integrata di difesa idrogeologica.

L'Europa si è espressa a riguardo tramite la Direttiva Europea 2007/60/CE, anche nota come Flood Directive del 23 ottobre 2007, recepita in Italia con il D.Lgs. 49 del 23 febbraio 2010, che impone agli Stati membri la redazione di mappe di pericolosità e di piani di gestione del rischio alluvionale per la riduzione del rischio idraulico a livello Comunitario.

Al momento dell'emanazione della direttiva europea la mappatura della pericolosità idraulica in Italia era già stata avviata dalle Autorità di Bacino (AdB), le quali, istituite dalla legge 183/1989, avevano iniziato una valutazione delle

aree potenzialmente allagabili lungo i principali corsi d'acqua italiani. Una grande accelerazione in tal senso si è avuta senza dubbio in seguito al disastro di Sarno del 1998, e dell'alluvione di Soverato del 2000, due eventi che hanno scosso dal profondo l'opinione pubblica.

Le istituzioni si sono mosse molto rapidamente: il D.Lgs. 180/1998 (“Decreto Sarno”) e la Legge 365/2000 (conversione in legge del “Decreto Soverato” D.Lgs. 279/2000) hanno istituito di fatto i Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, accelerando la ricerca nel campo della difesa idrogeologica.

Seppur la Direttiva 2007/60/CE abbia dato grande impulso in tutta Europa alla stesura delle mappe di pericolosità, di fatto, la situazione si presenta oggi molto variegata a causa della mancanza di indicazioni sulla metodologia da adottare e di iniziative prese da alcuni Paesi europei, con approcci molto diversi, precedenti alla Direttiva.

Fra le iniziative più interessanti prese sia a livello privato che pubblico e accademico si possono citare il programma di ricerca FLOODsite (www.floodsite.net), mirato alla valutazione e gestione del rischio idraulico, il gruppo di lavoro EXCIMAP (European Exchange Circle on Flood Mapping) che sotto mandato CE, ha emanato una guida sui criteri per soddisfare la Direttiva (EXCIMAP, 2007), e il KULTURISK (www.kulturisk.eu/home), un programma che mira alla prevenzione e mitigazione dei disastri idrogeologici.

La Direttiva Europea 2007/60 definisce il Rischio di alluvioni come “la combinazione delle probabilità di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica eventualmente derivanti da tale evento”.

Come anticipato in precedenza il Rischio può essere definito dalla combinazione di due fattori:

1. P = (Pericolosità) indica la probabilità che si verifichi in un determinato luogo e in uno specifico arco temporale, un evento alluvionale avente intensità non inferiore ad un valore assegnato.

2. $V =$ (Vulnerabilità) usata come indicatore del danno atteso (D), è solitamente indicata come combinazione dell'Esposizione (E), indicante l'entità dei beni esposti al rischio di allagamento, e della Suscettibilità, (S), che rappresenta il grado di danno che subiscono tali elementi una volta colpiti (*Merz et al.*, 2007).

$$V = E * S$$

R è quindi il danno atteso in un arco temporale assegnato in relazione al verificarsi di un evento di assegnata intensità. La 2007/60/CE pone l'obiettivo della redazione di Piani di Gestione del Rischio di alluvioni attraverso degli obiettivi intermedi: la valutazione preliminare del rischio da alluvioni e l'individuazione delle aree a rischio entro dicembre 2011; la redazione delle mappe di pericolosità rispetto a valori di portata, tirante idrico e, se possibile, di velocità di avanzamento del fronte liquido entro dicembre 2013, ed infine la predisposizione e pubblicazione dei Piani di Gestione del Rischio, entro dicembre 2015.

In Italia la Direttiva è stata recepita con il D.Lgs. 49/2010 che individua come soggetti competenti agli adempimenti della 2007/60/CE le Autorità di Bacino Distrettuali, addirittura anticipando le scadenze comunitarie per il raggiungimento degli obiettivi intermedi, e precisando gli scenari da prendere come riferimento e le scale a cui redigere le mappe.

In funzione della tipologia di danno da valutare possono essere parecchi gli indicatori che stimano la pericolosità idraulica. Fra questi il tirante idrico e la velocità di avanzamento del fronte liquido sono sicuramente i più significativi, mentre altri fattori (ad es. estensione del fronte liquido, durata) possono venire utilizzati in funzione dei dati a disposizione (*Büchle et al.*, 2006). Altri esempi di parametri interessanti possono essere il tempo di permanenza dell'acqua, molto indicativo dei danni economici indiretti soprattutto agricoli, o la velocità di crescita dei tiranti idrici, quest'ultimo importantissimo per la Protezione Civile perché implicitamente detta i tempi massimi di intervento per i soccorsi.

La stima della pericolosità ha un senso strettamente statistico. Passa attraverso la valutazione delle portate in funzione di una probabilità di accadimento (o del tempo di ritorno), la conversione di tali portate in tiranti idrici indicando infine, in

base alla morfologia del territorio interessato, le aree potenzialmente allagabili. La valutazione della vulnerabilità è invece ancora affetta da un grande margine di incertezza in quanto i danni causati da un determinato evento variano in funzione delle tipologie di costruzioni investite, del numero di persone coinvolte, quindi dall'orario dell'evento, e, nel caso di terreni agricoli, anche in base alla stagionalità dell'evento.

La combinazione della pericolosità e della vulnerabilità vede la redazione finale della mappatura del rischio idraulico, ovvero una distribuzione spaziale dei danni associabili ad un evento con assegnato tempo di ritorno.

In realtà le richieste della Comunità Europea mirano alla redazione di mappe di esposizione degli elementi a rischio, non proprio di pericolosità, più facili da disegnare perché prescindono dalla valutazione economica dei danni attesi. Alcune scadenze sono ormai superate e bisogna verificare lo stato dei lavori delle varie Autorità competenti rispetto alle richieste avanzate dalla Comunità Europea. In confronto agli altri Stati Membri, L'Italia si trova oggi, in una situazione di eccellenza, giustificata dalla necessità di rimediare alla grave situazione idrogeologica nazionale, nonostante, sia a livello accademico che privato si è dovuto far fronte a una carenza di risorse economiche per lo sviluppo di attività di ricerca in questa direzione. Tuttavia, sebbene in linea generale lo stato attuale della ricerca sia comparabile a quello europeo, a scala regionale ci sono evidenti disomogeneità, più o meno profonde, per quanto riguarda i livelli di approfondimento del problema ed i prodotti disponibili. Le cause sono diverse, e sono da ricercarsi nella storia territoriale che caratterizza l'entità del dissesto idrogeologico di ogni Regione, nonché nei diversi finanziamenti che le Regioni hanno destinato alla difesa da questi eventi.

Il MATTM (Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare) intervenendo su questo problema, ha emanato delle linee guida per omogeneizzare e valorizzare il lavoro svolto entro le scadenze della Direttiva Europea, dicembre 2013 per la mappatura di rischio.

1.1 Finalità dello studio

Le recenti attività di indagine sulla gestione e riduzione del rischio idraulico evidenziano la necessità di abbandonare la strategia di difesa tradizionale, focalizzata sugli interventi strutturali mirati alla riduzione delle probabilità di accadimento degli allagamenti, promuovendo invece politiche di accettazione e gestione di parte del rischio idraulico. In tale ottica, la comunità e le autorità competenti devono essere consapevoli, nel caso di eventi particolarmente intensi e rari, dell'esistenza di un rischio residuale connesso ai presidi idraulici attuali, adoperandosi per minimizzare l'impatto delle eventuali inondazioni sul territorio.

Tale rischio, definito residuale in quanto facente riferimento alla possibilità di fallimento di un'opera di difesa, è solitamente connesso ad aree urbanizzate o di elevato prestigio, rappresentando una componente del rischio tutt'altro che trascurabile.

Il rischio residuale è determinato da due possibilità: una è il verificarsi di un evento più intenso di quello usato in fase progettuale, l'altra è che l'opera di difesa possa andare incontro a fenomeni di rottura. L'entità del rischio residuale è nota proprio perché rappresenta quella parte di rischio calcolata già in fase progettuale ed è connesso a una zona assai più ampia e antropizzata.

Nel nostro caso di studio si è investigata l'efficacia delle misure di protezione da eventi alluvionali associabili a piene con tempi di ritorno elevati o al limite della prevedibilità (i.e. tempo di ritorno 500-ennale). Lo studio nasce dall'esigenza di definire strategie per la mitigazione del rischio residuale e dalla consapevolezza di aver raggiunto condizioni di limiti strutturali dei rilevati arginali, sia per motivi prettamente ingegneristici che economici.

Le considerazioni sul rischio residuo sono particolarmente importanti in relazione alle misure non strutturali di mitigazione (quali ad es: normative, accorgimenti tecnico-costruttivi, azioni di protezione civile, etc.), la cui attuazione deve essere in grado nel breve periodo di minimizzare l'impatto delle esondazioni sulle persone e sui beni soggetti al rischio alluvionale, ma deve anche consentire, nel

medio e lungo periodo, di garantire il controllo del rischio residuale attraverso la diminuzione della vulnerabilità idraulica del sito.

La costrizione del fiume entro la cintura arginale se da un lato garantisce la sicurezza per eventi con tempo di ritorno minore di quello progettuale, dall'altro riduce la possibilità di espansione laterale del corso d'acqua in caso di piene anche modeste, fenomeno importantissimo perché riconducibile alla capacità del corso d'acqua di laminare i colmi di portata in occasione di fenomeni di piena.

Lo studio propone quindi la possibilità di allagare in modo controllato comparti di territorio definiti "meno sensibili" in virtù del loro minor valore o dell'inferiore vulnerabilità dei beni in essi presenti, garantendo la sicurezza di zone a più alta vulnerabilità e riducendo di fatto il rischio complessivamente atteso.

2. Strumenti di calcolo e dati utilizzati

2.1 Reperimento dati

Di seguito vengono riportate e descritte tutte le informazioni utilizzate per l'analisi di dettaglio delle aree esposte al rischio alluvionale:

1. Modello digitale ad elevata risoluzione (LIDAR 1 metro, Regione Emilia Romagna, vedi Figura 2.1) per l'asta fluviale dei fiumi Montone, Ronco e Fiumi Uniti per la provincia di Ravenna. Le informazioni altimetriche sono state rilevate con un sistema che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser. È una tecnica dai costi elevati ma che permette di visualizzare gli elementi ripresi con un elevato grado di dettaglio (ad es. 1 metro).

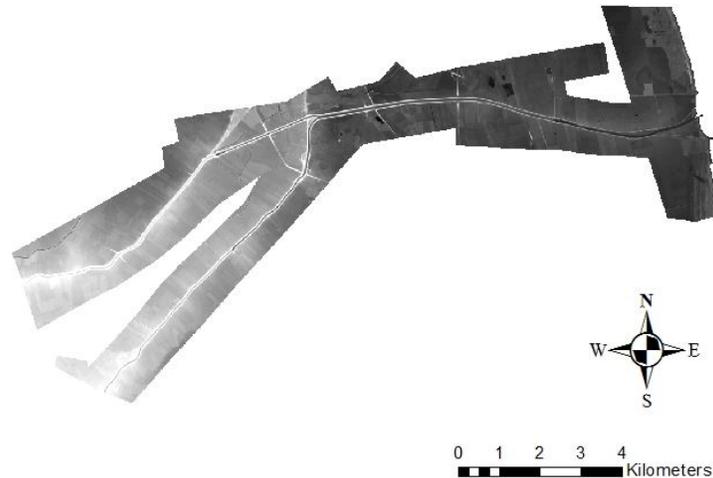


Figura 2.1: Lidar a 1 metro

2. Modello digitale a risoluzione 5 m a copertura regionale della Regione Emilia Romagna (vedi Figura 2.2). Questo elemento si è rivelato di particolare importanza per conoscere la morfologia delle zone non coperte dal rilievo a risoluzione 1 m.

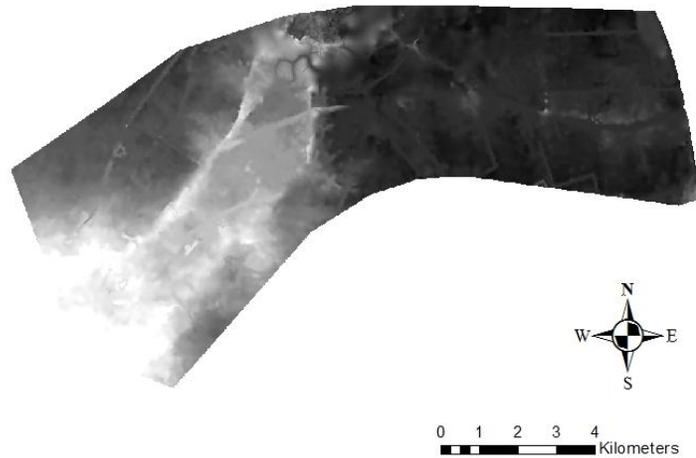


Figura 2.2: Modello digitale a risoluzione 5 metri

3. Carta Tecnica Regionale (CTR) a scala 1:25000 e 1:5000;
4. Database Topografico Regionale consultabile con strumenti GIS e accessibile dal Geoportale della Regione Emilia Romagna (<http://geoportale.regione.emiliaromagna.it/it>);
5. Idrografia (strato informativo territoriale contenente la planimetria dei corsi d'acqua Montone, Ronco e Fiumi Uniti);
6. Planimetria delle sezioni (strato informativo territoriale contenente le tracce in pianta delle sezioni);

7. Strati informativi vettoriali identificanti le singolarità topografiche quali: arginature, rilievi stradali, dossi, ostacoli (vedi figura 2.3) ;

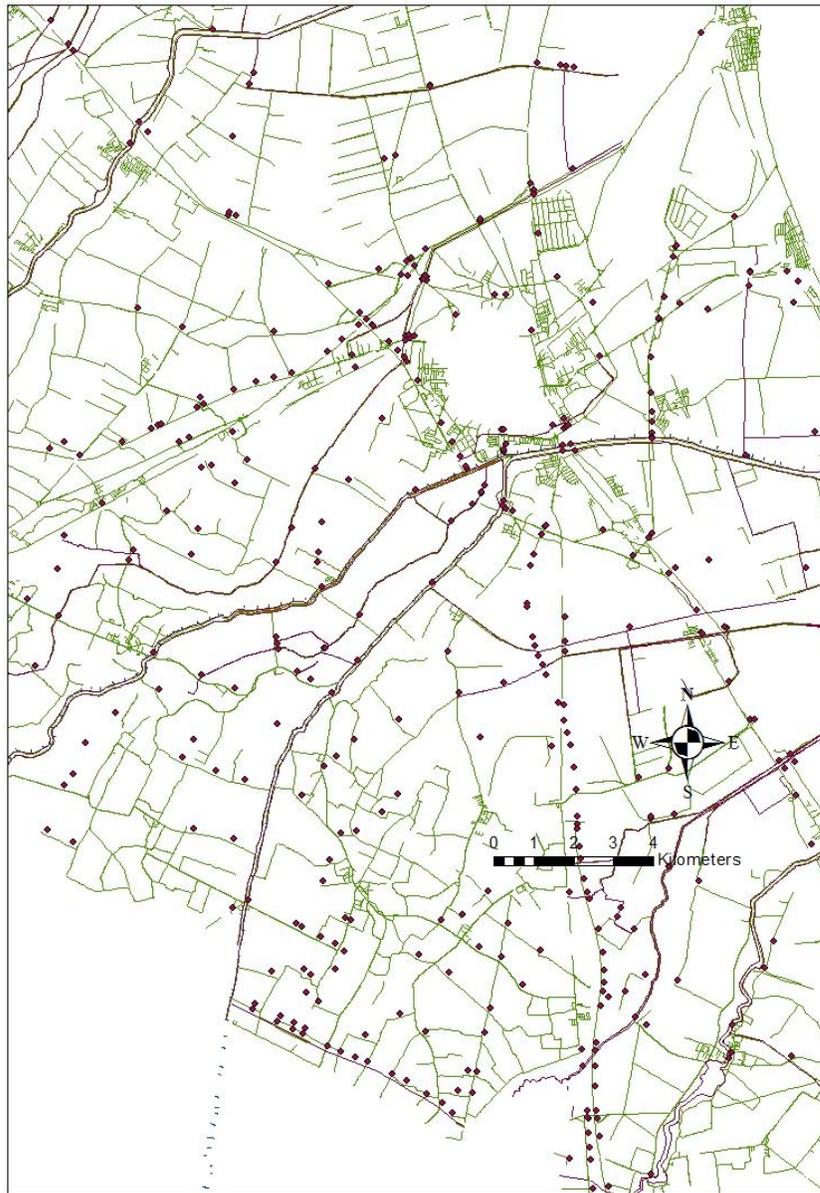


Figura 2.3: Strati informativi vettoriali

8. Cinque idrogrammi sintetici, riportati in figura 2.4 con regimi di portata di $650 \text{ m}^3/\text{s}$ e $750 \text{ m}^3/\text{s}$, relativi rispettivamente a officiosità massima in caso di alveo sporco e alveo pulito, $915 \text{ m}^3/\text{s}$, $1037 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1198 \text{ m}^3/\text{s}$ per portate con tempi di ritorno 100, 200 e 500 anni rispettivamente, presi in esame a partire dalla sezione più a monte del tronco di asta fluviale considerato (*“Modellazione numerica per l’analisi delle criticità del fiume Montone in Provincia di Ravenna”*, Adipietro F., 2012) .

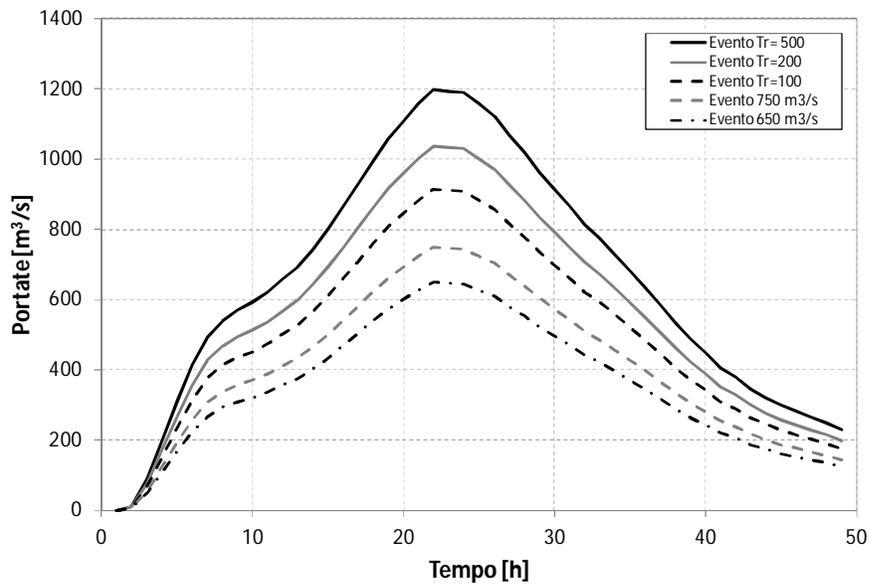


Figura 2.4: Idrogrammi di piena

2.2 Software utilizzati

Il lavoro si divide sostanzialmente in due fasi in base alle modalità di calcolo. La prima fase si è concentrata sull'elaborazione dei dati topografici inquadrando le criticità dell'area di studio, mentre nella seconda parte si è proceduto alla valutazione dei possibili scenari di mitigazione del rischio mediante il ricorso a simulazioni numerico-idrauliche.

2.2.1 ArcGis

Nella prima parte è stato utilizzato il software GIS (Geographic Information System). Viene solitamente adottato per indicare un sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione di informazioni derivanti da dati geografici georeferenziati, associando ad ogni elemento una o più informazioni alfanumeriche.

Il software utilizzato nel presente lavoro di tesi è ARCGIS, una suite integrata di applicazioni GIS avanzate, disponibili in tre livelli funzionali: ArcView, ArcEditor e ArcInfo.

Per la rappresentazione di dati georeferenziati occorre formalizzare un modello rappresentativo flessibile che si adatti ai fenomeni reali. Nel GIS questo viene realizzato attraverso tre tipologie di informazioni:

1. Geometriche, ossia relative alla rappresentazione cartografica degli oggetti, quali la forma (punto, linea, poligono), la dimensione e la posizione geografica;
2. Topologiche, ovvero riferite alle relazioni reciproche tra gli oggetti (ad esempio connessione, adiacenza, inclusione);
3. Informative, ovvero riguardanti i dati (numerici, testuali) riferiti a ciascun oggetto;

La gestione di tali informazioni avviene tramite un database relazionale, mentre la loro elaborazione è supportata da una vasta gamma di funzionalità. La loro codifica avviene attraverso due tipologie principali di dati: i dati vettoriali e i dati raster.

I dati vettoriali sono costituiti da elementi semplici quali punti, linee e poligoni, codificati e memorizzati sulla base delle loro coordinate e a ciascuno dei quali è associato un record del database informativo che contiene tutti gli attributi dell'oggetto rappresentato. Nel nostro caso sono dati vettoriali i layer contenenti le celle idrauliche, le sezioni e l'asta fluviale dei fiumi Montone, Ronco e Fiumi Uniti come mostrato in Figura 2.5.

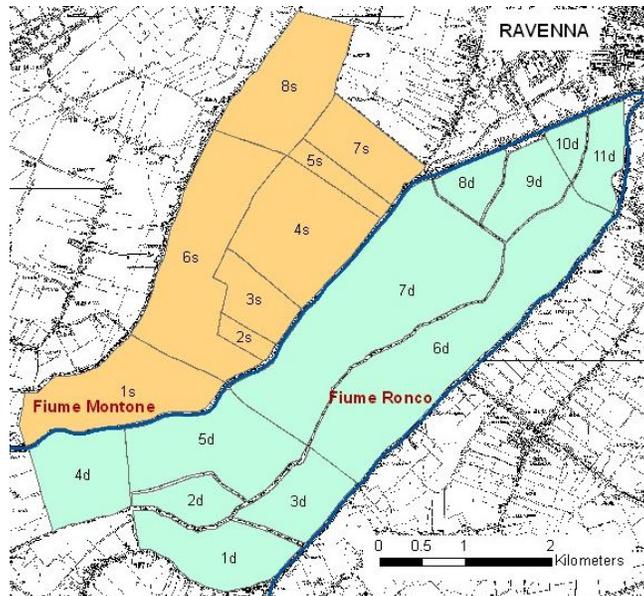


Figura 2.5. Esempio di tematismi vettoriali di tipo poligono e linee utilizzati per la valutazione dell'area di studio.

I dati raster schematizzano il mondo reale attraverso una matrice di celle dette PIXEL, a ciascuna delle quali sono associate le informazioni relative all'elemento rappresentato. La dimensione del pixel, generalmente espressa nell'unità di misura della carta è strettamente connessa con la precisione del dato. Nel nostro caso i modelli digitali a risoluzione 1 m e 5 m, sono particolari file raster chiamati DEM, che hanno come informazione intrinseca in ogni pixel la quota media della cella che ogni pixel delimita.

Tali informazioni sono utilizzabili dall'utente con diversi approcci: geodatabase, geovisualizzazione e geoprocessing. In ArcGis questi approcci sono rappresentati rispettivamente da ArcCatalog, ArcMap e ArcToolbox.

Attraverso questi strumenti è stato possibile in prima analisi visualizzare i modelli digitali georeferenziati, così da poter essere sovrapposti fra di loro; in secondo luogo grazie a delle particolari Toolbox, è stato possibile integrare il LIDAR 1 m con il modello digitale a risoluzione 5 m, in modo da avere informazioni su tutto il territorio analizzato.

Sono state infine disegnate le celle idrauliche e memorizzate come file SHAPE, editate sovrapponendo al DEM ottenuto prima, la Carta Tecnica Regionale, che si è rivelata fondamentale nel seguire l'andamento dei rilevati e dei manufatti

antropici che la risoluzione a 5 m non evidenziava, e che sono fondamentali nello studio dell'andamento del flusso.

2.2.2 HEC-GeoRAS

Un ruolo fondamentale è stato svolto senza dubbio da HEC-GeoRAS, un'estensione del GIS che ha consentito la modellazione geografica in ArcMap, e l'esportazione di tali dati in ambiente Hec-Ras per le analisi idrauliche, col vantaggio del tutto non indifferente, di avere dati georeferenziati.

HEC-GeoRAS fornisce agli utenti un'interfaccia grafica per l'utente (GUI) che consente di creare un file di importazione HEC-RAS contenente i dati degli attributi geometrici da un modello digitale del terreno (DTM).

I file utilizzati sono di tipo ASCII e possono essere editati o letti da qualunque tipo di GIS. In genere contengono informazioni riguardanti la geometria del canale, la struttura della rete di flusso e le relative interconnessioni, la posizione e la descrizione delle sezioni trasversali. Nel nostro caso avendo già file riguardanti la struttura dei fiumi Montone e Ronco, abbiamo importato su questi stessi file le geometrie delle celle idrauliche modellate in GIS. (*U.S. Army Corps of Engineers. (1998). HEC-RAS: River Analysis System User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.*)

2.2.3 HEC-RAS

Il software HEC-RAS (River Analysis System) è un codice di calcolo sviluppato e pubblicato dal 1995 dall'Hydrological Engineering Centre (HEC) dello United States Army Corps of Engineering (USACE) al fine di gestire interventi in fiumi, porti e altre opere pubbliche.

La scelta è caduta su questo particolare software perché senza dubbio gode di larghissimo utilizzo in ambito accademico e professionale, dovuto alla sua estrema efficienza e duttilità, pur mantenendo un'interfaccia semplice e intuitiva.

HEC-RAS è un codice di calcolo free-ware, che permette la simulazione del moto dell'acqua all'interno di canali naturali o artificiali tramite modelli monodimensionali e quasi-bidimensionali. Le equazioni che descrivono il moto sono principalmente monodimensionali perché richiedono una sola grandezza geometrica dell'alveo: la linea di fondo dell'alveo, in particolare caratterizzata dalla distanza fra una sezione e l'altra. Il software consente inoltre di collegare all'alveo fluviale principale anche delle golene laterali, rendendo così schematizzabile una realtà bidimensionale.

Il programma consente il calcolo di un profilo idrico in moto permanente e vario. La funzione di moto permanente modella i profili di livello a regime supercritico, subcritico e misto. La procedura computazionale di base si fonda sulla soluzione di un'equazione energetica monodimensionale.

Per quanto riguarda il moto vario si avvale di uno schema implicito alle differenze finite per la risoluzione delle equazioni due di De Saint Venant,

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = i - j \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

Dove:

- h = tirante idrico;
- u = velocità della corrente;
- i = pendenza del corso d'acqua;
- j = cadente idraulica;
- Q = portata idrica in transito;
- A = area bagnata della generica sezione fluviale.

che si basano su quattro ipotesi fondamentali:

1. Corrente gradualmente variata o lineare: implica una distribuzione idrostatica delle pressioni lungo una generica sezione verticale.

2. Ipotesi di sezioni trasversali piane e verticali: la linea del carico piezometrico della corrente coincide con il pelo libero.
3. Fluido incomprimibile, cioè la densità è assunta come costante.
4. Assenza di afflussi e deflussi laterali: il flusso avviene solo perpendicolarmente alle sezioni trasversali.

Per poter avviare una simulazione il software ha bisogno di informazioni di tipo geometrico e idraulico. Le prime vengono inserite in GEOMETRIC DATA (vedi Figura 2.6), una sezione in cui è possibile disegnare e settare, fra l'altro, l'andamento del corso d'acqua, le storage area e le loro connessioni; informazioni che vengono memorizzate in un file tipo "geometry". Le condizioni idrauliche vanno inserite come condizioni al contorno in file di tipo "steady flow " o "unsteady flow". I dati utilizzati sono immagazzinati tramite file flat (ASCII e binari), nonché per mezzo di file HEC-DSS. Le caratteristiche geometriche possono essere salvate in file flat secondo categorie separate (project, plan, geometry, steady flow, unsteady flow, quasi-steady flow, sediment data e water quality information). I dati in uscita vengono salvati principalmente in file binari separati e possono essere trasferiti ad altri programmi utilizzando i file HEC-DSS.

Il software consente di visualizzare graficamente i risultati, ciò offre una notevole comodità, poiché i grafici includono mappe bidimensionali di schemi di sistemi fluviali, sezioni, profili, curve di deflusso, idrogrammi e mappe di esondazione, come mostrato in Figura 2.6.

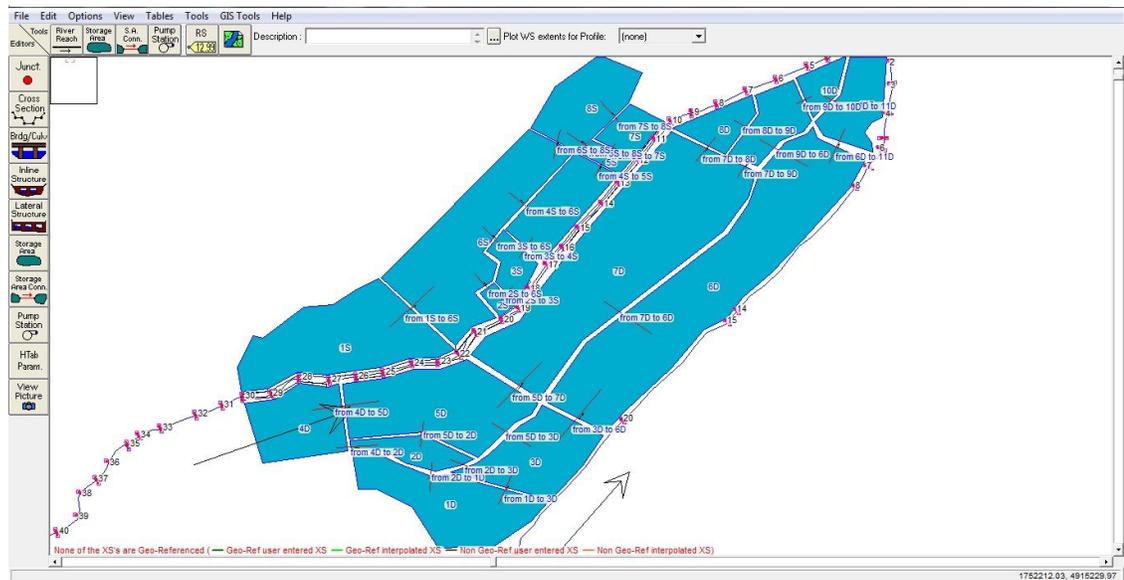


Figura 2.6: Particolare della sezione GEOMETRIC DATA

3. Caso di studio

Il fiume Montone nasce dalla costa sinistra degli Appennini nei pressi del monte Falterona, e scorre lungo il suo versante orientale, si estende all'interno delle province di Forlì-Cesena e Ravenna lambendone le città, per poi confluire a sud di Ravenna con il fiume Ronco, dando vita ai Fiumi Uniti che sfocia nel mar Adriatico.

Riceve numerosi affluenti sia in destra che in sinistra idraulica, ma i più importanti sono sicuramente per le loro caratteristiche molto simili al Montone stesso, il Rabbi nei pressi della città di Forlì, e il Ronco poco a sud della città di Ravenna in ordine di confluenza.

È un corso d'acqua dal regime spiccatamente torrentizio con magre estreme in estate e piene improvvise in autunno. La sua portata media è di circa $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Originariamente il Montone sfociava direttamente nel mar Adriatico poco a nord della città di Ravenna, il cui centro abitato era così confinato tra le foci del Ronco a sud e del Montone stesso. Una posizione sicuramente sfavorevole e ad altissimo rischio idraulico, tant'è che nei secoli la città ha subito diverse inondazioni fra le quali va ricordata quella del 1636 causata dall'esondazione contemporanea di entrambi i corsi d'acqua.

Fu così che nel XVIII secolo fu realizzata la Chiusa San Marco, un'imponente opera che cambiò il corso dei due fiumi e che ha dato vita all'assetto che ancora oggi osserviamo. Il Montone venne deviato a sud di Ravenna, facendolo confluire con il fiume Ronco e dando vita ai Fiumi Uniti che scorre su un letto rettilineo in direzione del mare.

La chiusa fino ad oggi ha giocato un ruolo fondamentale nella gestione delle risorse idriche in quanto il Montone ha carattere spiccatamente torrentizio, caratterizzato da portate molto elevate nei periodi piovosi, in cui la chiusa viene mantenuta completamente aperta, a magre con portate quasi nulle nella stagione secca. Ma è proprio in questo periodo che la richiesta idrica è maggiore, e la chiusa assicura un livello idrico a monte sufficiente ad alimentare i canali.

D'altra parte, nonostante sia fondamentale nella gestione idrica del territorio oggi la chiusa rappresenta la maggiore criticità idraulica di tutto il corso d'acqua, dovuta alla sua minore officiosità rispetto all'alveo a monte.

Partendo quindi da studi precedenti riguardanti i possibili interventi, strutturali e non, che interesserebbero la chiusa in relazione a diversi scenari di piena, viene indagata in questa sede la porzione di territorio limitrofa al corso d'acqua ed è indicata geograficamente in Figura 3.1.



Figura 3.1: Area di indagine: Fiume Montone nei pressi di Ravenna (orientamento: N geografico, fonte Google Earth®)

È stata scelta la porzione di campagna compresa tra il letto del Fiume Montone e il Fiume Ronco fino alla loro confluenza nei Fiumi Uniti. Si tratta di una vasta area dedita soprattutto all'agricoltura, quasi completamente priva di abitazioni e caratterizzata da una fitta rete di canali di bonifica.

3.1 Criticità del caso di studio

Con l'acquisizione di nuovi rilievi negli anni 2003-2004 è stato possibile sviluppare un modello idraulico completo del sistemi dei Bacini Romagnoli dal

quale sono emerse estese insufficienze per portate con tempo di ritorno di 200 anni, mentre sono quasi ovunque strutturalmente adeguati per tempi di ritorno di 30 anni.

Come indicato nella Relazione Idraulica Integrativa, variante al Titolo II “Assetto della rete idrografica” del Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico, il Fiume Montone ha una portata trentennale a fino bacino di 700 mc/sec e una duecentennale di 1037 mc/sec. L’officiosità massima nel tratto vallivo è attualmente di 650-750 mc/sec in condizioni di alveo sporco-pulito.

La maggiore criticità si riscontra nel tratto vallivo compreso tra San Pancrazio in Comune di Russi e la Chiusa di San Marco, in Comune di Ravenna. In tale tratto la presenza della Chiusa storica, di non buono stato strutturale e con un officiosità massima di 550 mc/sec e di sezioni al limite, configurano fenomeni di rigurgito a monte del tratto stesso e uno scenario di inondazione già per eventi trentennali. È da aggiungere il rischio dovuto alla possibilità di collasso arginale dovuto a sifonamenti. Da non sottovalutare anche l’inadeguatezza del reticolo di canali di bonifica che non sono dimensionati in modo da garantire gli afflussi generati dalla massiccia urbanizzazione e quindi impermeabilizzazione del suolo che ha caratterizzato gli ultimi decenni (Figura 3.2).

Sono tuttavia previste nella stessa Relazione interventi di sgolenamento a monte del tratto in questione, in particolare in prossimità di ponti inofficiosi, e di individuazione di aree di laminazione delle portate di piena in schema “in linea” (esondazione naturale).



Figura 3.2: Tracciato del fiume Montone (orientamento: N geografico, fonte Google Earth®)

Tali criticità sono state riconosciute ed analizzate dall’Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli che ha individuato la loro soluzione come una priorità tra gli adeguamenti previsti dal Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico (AdB-RR, 2011).

Le prime analisi idrauliche quasi-2D e 2D, condotte ipotizzando scenari di rottura arginale nel tratto a valle della Chiusa San Marco (Figura 3.3), hanno messo chiaramente in evidenza l’elevato grado di pericolosità del centro abitato di Ravenna, che risulta interessabile dalle esondazioni nel caso si inneschi, anche per scenari di intensità non particolarmente elevata (ad es. scenari con frequenza trentennale), una breccia arginale lungo il tratto fluviale immediatamente a monte della confluenza con il fiume Ronco.

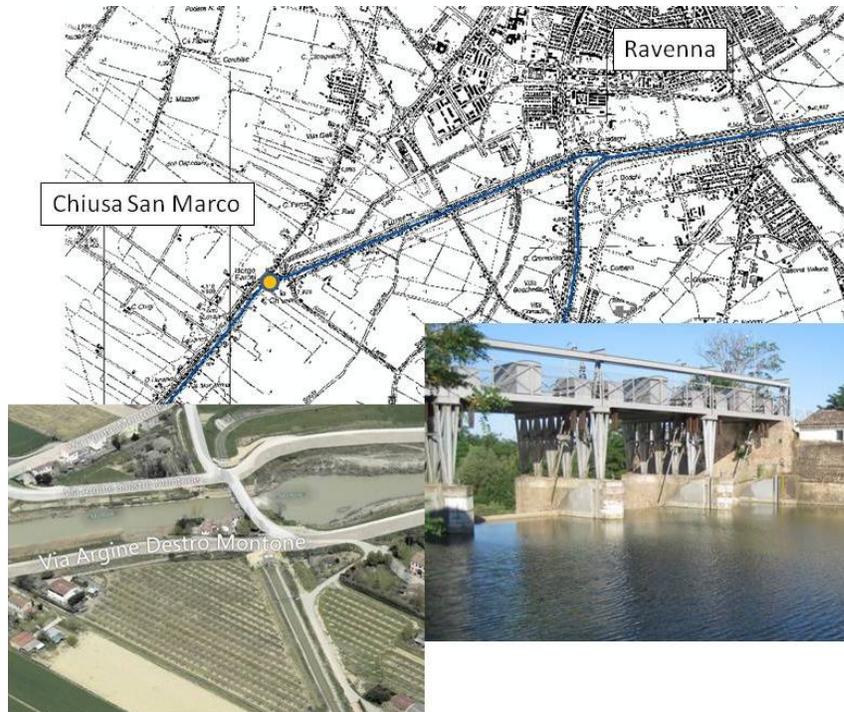


Figura 3.3: fiume Montone nei pressi della chiusa di San Marco, in prossimità della città di Ravenna (RA); nelle foto due particolari della chiusa (fonte Google Earth[®]).

Data la particolare sensibilità dell'area interessata, dovuta soprattutto all'alta urbanizzazione, appare subito chiara l'importanza di ridurre il rischio idraulico in questa zona. In quest'ottica sono stati valutati scenari di gestione delle piene attese lungo il tratto vallivo del Montone, che permettono di scongiurare, ove possibile, fenomeni catastrofici di rottura arginale nei pressi della città di Ravenna, fra le quali l'implementazione di misure di laminazione controllata di eventi di piena all'esterno delle arginature.

4. Valutazione delle potenzialità di laminazione all'esterno delle arginature

4.1 Identificazione topografica delle celle

Come visto nel capitolo precedente, le criticità maggiori della zona presa in esame riguardano il tratto vallivo del Fiume Montone, in relazione alla presenza poco più a valle del centro abitato della città di Ravenna. Tale condizione di rischio rende necessaria la messa a punto di misure di mitigazione volte alla riduzione della pericolosità idraulica del tratto vallivo del fiume Montone, in modo da scongiurare scenari di rotte arginali che possano portare all'allagamento del centro urbano.

In quest'ottica lo studio provvede a investigare le potenzialità offerte dalle aree agricole prospicienti la città di Ravenna nell'ottica di un loro possibile sfruttamento per un invaso temporaneo e controllato delle portate di piena.

La prima fase del lavoro consiste quindi in un'analisi delle quote della zone investigata utilizzando i modelli digitali disponibili, il LIDAR ad alta risoluzione (1 metro) e il modello digitale a risoluzione 5 metri a copertura regionale. A causa della ristretta fascia di territorio coperta dal DEM ad alta risoluzione, che copre in pratica solo l'alveo del corso d'acqua e una zona limitrofa, i due modelli digitali sono stato integrati in un unico DEM, che mantiene la risoluzione di 1 metro dove presente, e digitalizza il territorio con una risoluzione a 5 metri nella restante parte.

ArcMap permette di sovrapporre a un qualsiasi Raster un file Shape, semplicemente selezionando i diversi layers nell'ordine in cui vogliamo che questi vengano visualizzati. In questo modo è stata sovrapposta la Carta Tecnica Regionale (CTR), consultabile e accessibile dal Geoportale della Regione Emilia Romagna, al DEM appena costruito. La CTR ha giocato un ruolo fondamentale in questa fase, in quanto ha permesso di integrare le informazioni altimetriche con i tematismi vettoriali che descrivono gli andamenti dei manufatti e delle

infrastrutture presenti, offrendo una visione d'insieme in cui è facile individuare quelle zone destinabili alla laminazione dei volumi di piena.

Facendo riferimento al tratto vallivo del Fiume Montone, sono state individuate quindi otto celle in sinistra idraulica e undici in destra. L'identificazione è stata condotta facendo riferimento al tracciato delle quote naturali e delle infrastrutture presenti capaci, nel loro insieme, di delimitare celle che possano essere considerate idraulicamente indipendenti. In questo modo, come si evince dalla Figura 2.5, l'individuazione delle celle ha riguardato zone adiacenti al corso d'acqua e quindi direttamente interessabili da fenomeni di esondazione (ad es. celle 1S, 6D etc.), nonché porzioni di territorio lontane dall'asse fluviale ma comunque sfruttabili per l'invaso di volumi in caso di eventi di particolare gravosità, perché delimitate da rilevati lungo l'intero perimetro.

In particolare il territorio in destra idraulica appare subito votato allo scopo della laminazione per le sue caratteristiche topografiche come la pendenza media di deflusso in direzione nord-est e la presenza dei rilevati arginali del Ronco, anche per aree non direttamente prospicienti al Montone ma che comunque garantiscono una certa continuità idraulica con le celle confinanti.

In Tabella 4.1 vengono riassunte le estensioni delle celle sulla base della topografia scelta.

Tabella 4.1: Estensione delle celle idrauliche identificate in destra ed in sinistra idraulica del tratto vallivo del fiume Montone.

<i>Celle in sinistra idraulica</i>		<i>Celle in destra idraulica</i>	
<i>Nome cella</i>	<i>Estensione [ha]</i>	<i>Nome cella</i>	<i>Estensione [ha]</i>
1s	154.5	1d	105.6
2s	16.6	2d	45.0
3s	56.4	3d	74.5
4s	169.4	4d	105.8
5s	30.4	5d	156.5
6s	229.9	6d	304.5
7s	80.7	7d	355.6
8s	145.9	8d	38.8
		9d	65.5
		10d	21.6
		11d	50.0
<i>Estensione Totale Sx</i>	<i>883.8</i>	<i>Estensione Totale Dx</i>	<i>1323.7</i>

Ai fini della modellazione idraulica che servirà in seguito, in questa fase sono stati aggiunti in ambiente GIS i file shape contenenti la digitalizzazione dei fiumi Montone, Ronco, e Fiumi Uniti e le relative sezioni.

4.2 Definizione delle curve di invaso per ogni cella

Una volta individuate le celle, sulla base dell' andamento altimetrico, apprezzabile dal DEM, sono state costruite le curve di invaso per tutte le celle. Curve che esprimono la relazione biunivoca tra uno specifico tirante idrico e il volume complessivamente invasato all'interno della cella stessa.

In ArcMap è stato possibile trasformare uno shape contenente i contorni delle celle in un altro contenente figure poligonali sulle quali è proceduto il lavoro utilizzando HEC-Geo-RAS.

L'utilizzo di questo comodo strumento di GIS ha permesso, per ogni cella, il calcolo dell'estensione territoriale e l'estrazione delle curve d'invaso. In particolare queste ultime vengono salvate in file .SDF facilmente leggibili da qualunque database. Vengono di seguito riportati due esempi in Figura 4.1 e Figura 4.2 di curve di invaso per due delle diciannove celle complessivamente individuate situate una in destra e l'altra in sinistra idraulica, rimandando in appendice la visione delle restanti diciassette.

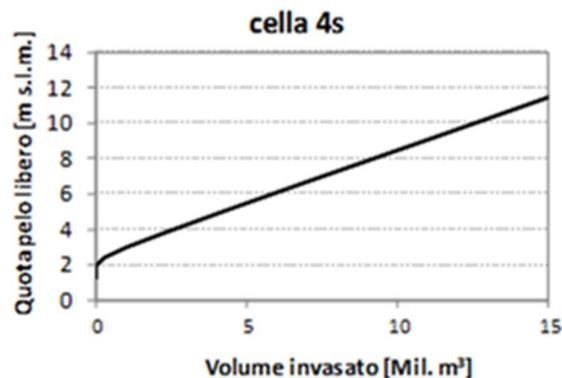


Figura 4.1: Esempio di curva altezza-volume per un'area allagabile identificata in sinistra idraulica

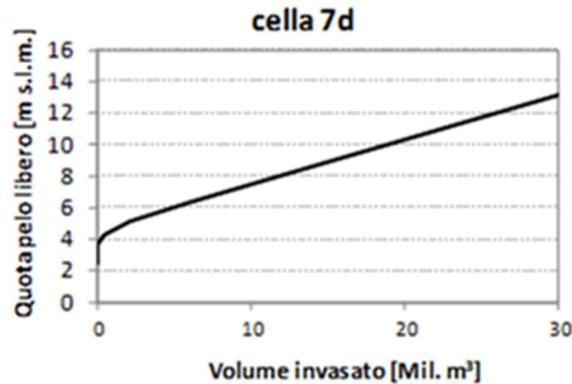


Figura 4.2: Esempio di curva altezza-volume per un'area allagabile identificata in destra idraulica

4.3 Scenari di piena e potenziale laminazione all'esterno delle arginature

Finita la fase di individuazione topografica delle aree ritenute utilizzabili ai fini della laminazione dei picchi di piena, sono state studiate le potenzialità di invaso delle celle idrauliche considerando le quote dei contorni. In un primo momento lo studio ha riguardato le possibilità di invaso considerando i contorni delle celle così come sono allo stato attuale.

Lo scopo in questa fase è quello di ricercare la quota più bassa per il contorno di ogni cella in modo da interrogare la rispettiva curva di invaso e desumere il volume invasabile con un tirante idrico pari alla quota cercata. In caso di esondazione, infatti, il flusso idrico che si andrebbe ad instaurare dipende fortemente dalle quote minime dei manufatti e delle infrastrutture che delimitano le celle stesse.

Sovrapponendo lo shape contenente le linee di contorno di una cella al DEM con risoluzione 10 metri sono stati creati 19 raster dai quali è stata desunta la quota minima dell'intero contorno Figura 4.3. Tuttavia i dati estratti con HEC-GeoRAS si riferiscono a tredici quote e ai relativi livelli di invaso, a partire dalla più bassa desunta dal DEM come mostrato in Tabella 4.2. Un numero comunque sufficiente a descriverne l'andamento, ma che quasi mai contiene la quota relativa al punto

più basso del contorno. È stato necessario interpolare i dati delle tabelle per avere il volume invasato alla quota cercata.

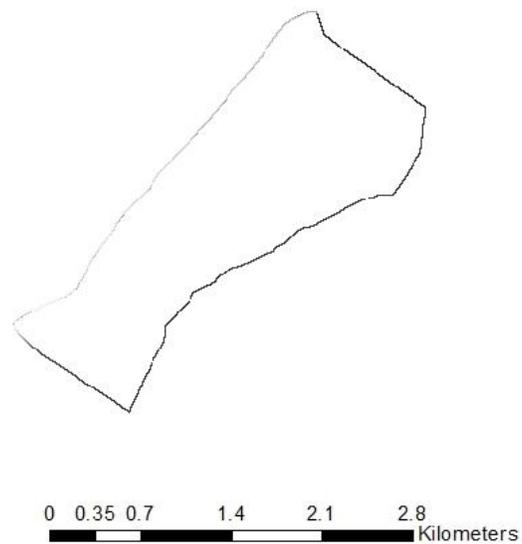


Figura 4.3: Raster di contorno cella

Tabella 4.2: Dati relativi a quota ed invasato per una cella idraulica

<i>Quota pelo libero [m s.l.m]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
2.77	0
2.88	16
3.04	894
3.26	13 699
3.56	86 429
3.99	257 504
4.59	631 332
5.43	1 175 307
6.6	1 937 526
8.24	3 008 133
10.54	4 513 630

Le figure 4.4 e 4.5 indicano, a titolo esemplificativo, la capacità di invasato delle celle 2D e 5S riportando la quota limite di invasato allo stato attuale con una linea rossa.

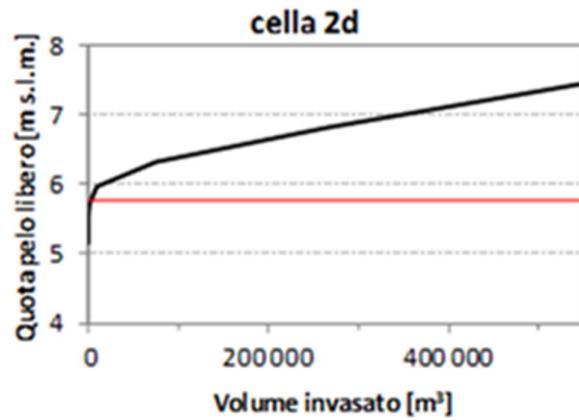


Figura 4.4: Capacità di invaso della cella 2D

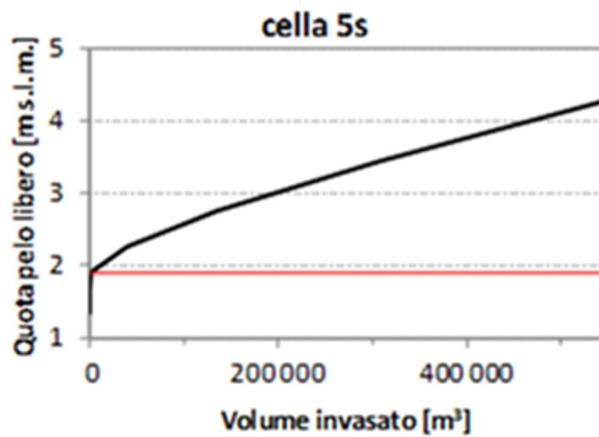


Figura 4.5: Capacità di invaso della cella 5S

Nelle tabelle 4.3 e 4.4 vengono riportati invece i volumi invasabili alle quote minime per tutte le celle in sinistra e in destra idraulica rispettivamente, nella configurazione topografica attuale.

Tabella 4.3: Volumi minimi invasabili in sinistra idraulica allo stato attuale

<i>Nome cella</i>	<i>Quota max d'invaso [m s.l.m.]</i>	<i>Volume [10³ m³]</i>
1s	4.63	1.76
2s	3.03	-
3s	2.23	0.49
4s	1.87	21
5s	1.89	2.2
6s	1.45	0.10
7s	1.9	1.81
8s	1.12	-

Tabella 4.4: Volumi minimi invasabili in destra idraulica allo stato attuale

<i>Nome cella</i>	<i>Quota max d'invaso [m s.l.m.]</i>	<i>Volume [10³ m³]</i>
1d	5.81	18.8
2d	5.76	3.58
3d	4.96	7.8
4d	5.95	7
5d	4.71	0.37
6d	3.45	3.76
7d	2.52	-
8d	2.94	0.005
9d	2.8	-
10d	3.18	5.38
11d	3.8	28.94

Allo stato attuale, i volumi sfruttabili all'esterno delle arginature nel tratto vallivo del fiume Montone risultano essere complessivamente 75663 m³ in destra idraulica e 27365 m³ in sinistra idraulica.

Considerando l'entità modesta dei volumi sfruttabili allo stato attuale delle altezze dei contorni delle singole celle, è sembrato opportuno indagare ulteriori scenari di gestione delle aree poste in esame, ipotizzando diverse configurazioni topografiche basandosi sull'adeguamento dei contorni delle celle. In particolare sono stati presi in esami tre diversi scenari di sovrizzo delle attuali altezze:

- Innalzamento in quota delle altezze dei contorni di delimitazione delle singole celle di 0,5 m;
- Innalzamento in quota di 1 m;
- Innalzamento in quota di 1,5 m.

In seguito, a titolo esemplificativo, in Figura 4.6 sono apprezzabili i benefici apportati da ognuno dei tre scenari di sovrizzo ognuno dei quali, in tabella, interseca la curva di invaso della cella con una linea orizzontale, rimandando in Allegato A l'elenco completo delle curve per tutte le celle idrauliche.

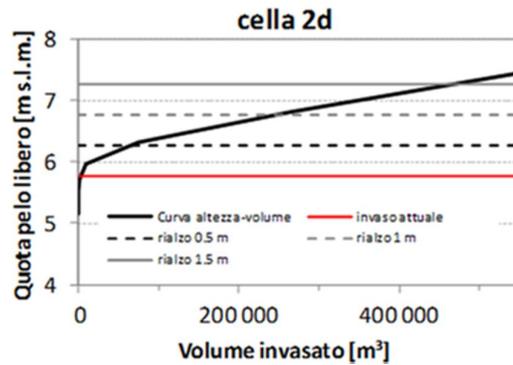


Figura 4.6: Capacità di invaso ipotizzate nei tre scenari di sovrizzo del contorno di una cella

Nelle tabelle 4.7 e 4.8 vengono riportati i volumi invasati per ogni singola cella al variare degli interventi di innalzamento in quota dei rilevati di contorno celle precedentemente ipotizzati, e infine in tabella 4.9 è apprezzabile il quadro d'insieme dei benefici apportati in termine di volume complessivo invasabile sia in destra che in sinistra idraulica.

Tabella 4.7: Volumi invasati per le celle in sinistra idraulica al variare dell'innalzamento

<i>Nome cella</i>	<i>Scenario 0.5 m</i>	<i>Scenario 1 m</i>	<i>Scenario 1.5 m</i>
	<i>Volume invasabile [10³ m³]</i>	<i>Volume invasabile [10³ m³]</i>	<i>Volume invasabile [10³ m³]</i>
1s	55.56	322.94	775.57
2s	2.09	24.52	77.88
3s	34.86	153.59	323
4s	294.22	869.56	1 579.14
5s	66.02	171.18	295.79
6s	73.51	392.54	919.12
7s	94.07	284	558.94
8s	74.22	538	1 279.72

Tabella 4.8: Volumi invasati per le celle in destra idraulica al variare dell'innalzamento

<i>Nome cella</i>	<i>Scenario 0.5 m</i>	<i>Scenario 1 m</i>	<i>Scenario 1.5 m</i>
	<i>Volume invasabile [10³ m³]</i>	<i>Volume invasabile [10³ m³]</i>	<i>Volume invasabile [10³ m³]</i>
1d	159.31	572.87	1 064.64
2d	64.41	243.65	463.21
3d	81.53	286	594.37
4d	172.23	521.04	926.82
5d	23.20	153.85	468.42
6d	173.19	555.47	1 171.72
7d	0.66	18.02	278.24
8d	14.33	128.84	297.6
9d	25.82	177.93	450.65
10d	49.33	129.21	226.33
11d	167.30	369.18	597.91

Tabella 4.9: Volume complessivamente invasabile nelle aree limitrofe al fiume Montone nelle diverse ipotesi di adeguamento delle quote di delimitazione.

<i>Area</i>	<i>Scenario 0.5 m</i>	<i>Scenario 1 m</i>	<i>Scenario 1.5 m</i>
	<i>Volume Tot [Mm³]</i>	<i>Volume Tot [Mm³]</i>	<i>Volume Tot [Mm³]</i>
Celle sinistra	0.69	2.76	5.81
Celle destra	0.93	3.16	6.54
<i>Volume Tot [Mm³]</i>	1.63	5.91	12.35

Corre l'obbligo di specificare che tali risultati prescindono da una modellazione idraulica, che verrà trattata nel prossimo capitolo, e si riferiscono a condizioni in cui le celle siano tra loro idraulicamente indipendenti, senza indagare sulle modalità di invaso delle celle stesse e non prevedono quindi fenomeni di rigurgito e di tracimazione tra celle adiacenti.

5. Modellazione idraulica

Con riferimento a indagini precedentemente condotte da parte dell’Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico - Variante al Titolo II “Assetto della rete idrografica”, adottata dal Comitato Istituzionale con delibera n. 2/2 del 16 novembre 2011 ed approvata con Delibera Giunta Regionale n. 1877 del 19 dicembre 2011, AdB-RR, 2011), il fiume Montone presenta, specialmente nel suo tratto vallivo, numerose criticità, la più importante delle quali è sicuramente dovuta alla presenza della Chiusa San Marco, indicata in Figura 5.1, che presenta un’officiosità di $550 \text{ m}^3/\text{s}$ a fronte di un’officiosità di $700 \text{ m}^3/\text{s}$ lungo il tratto a monte dell’opera stessa.

La tabella 5.1 riporta i colmi di portata associati a diversi tempi di ritorno stimati dall’AdBRR. Da un primo confronto con l’officiosità della Chiusa San Marco si evince che già per tempi di ritorno trentennali, il tratto non riesce a contenere in alveo tutta la portata transitante, e necessita quindi di urgenti interventi per garantire la protezione idraulica del territorio limitrofo.



Figura 5.1: Inquadramento generale dell’area di studio con identificazione della rete fluviale e di quella viaria nei pressi di Ravenna; in evidenza (punto rosso) la chiusa di S. Marco (dati: <http://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it>).

Tabella 5.1: Portate al colmo per associato tempo di ritorno alla sezione di chiusura del bacino del Fiume Montone.

<i>Tempo di ritorno [anni]</i>	<i>Portata al colmo [m³/s]</i>
30	700
100	915
200	1030
500	1198

Il modello idraulico già implementato e calibrato in precedenza (“*Modellazione numerica per l’analisi delle criticità del fiume Montone in provincia di Ravenna*”, Adipietro F., 2012) fa riferimento al tratto vallivo di circa 18,7 km del fiume Montone, che si estende dalla intersezione con il Canale Emiliano Romagnolo fino alla confluenza con il fiume Ronco.

Questa fase di modellazione si è svolta in ambiente HEC-RAS facendo riferimento a tre diverse configurazioni del corso d’acqua: stato attuale, simulazione effettuata con la schematizzazione della geometria reale del fiume e della chiusa; senza chiusa: simulazione effettuata con la schematizzazione geometrica reale del fiume, eliminando la chiusa; con chiusa modificata: simulazione effettuata con la schematizzazione reale della geometria del fiume, aumentando le aperture della chiusa.

5.1 Determinazione degli sfioratori laterali

Tutte le analisi condotte in questa fase modellano la geometria del corso d’acqua dalla sez.30, fino alla confluenza con il fiume Ronco, come mostrato in Figura 5.2, ipotizzando quindi che il tronco fluviale che si spinge a monte fino all’intersezione con il Canale Emiliano-Romagnolo (CER) riesca a contenere sempre le portate transistanti. Tale ipotesi, seppur non del tutto realistica in quanto il tratto fluviale in questione presenti criticità già per eventi con tempo di ritorno trentennale, appare comunque cautelativa ai fini di questo studio.

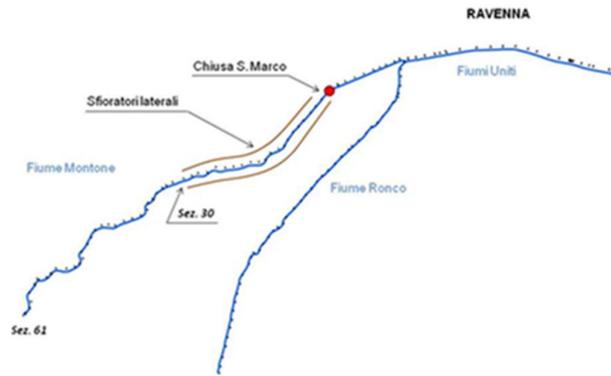


Figura 5.2: Tronco d'alveo interessato dagli sfioratori

Al fine di pervenire ad una descrizione più dettagliata delle reali condizioni di officiosità del Montone sono state apportate modifiche sostanziali alla geometria del corso d'acqua, trasformando di fatto, il modello monodimensionale in uno quasi-2D (*quasi-2D*; v. ad es. *Brath et al., 2011; Castellarin et al., 2011 e 2012*).

In primo luogo, con lo scopo di localizzare e quantificare i volumi esondati in occasione dei diversi scenari di piena sono stati modellati una serie di sfioratori laterali sulla base degli attuali andamenti in quota dei rilevati arginali. In questo modo ad ogni cella adiacente al corso d'acqua, sia in destra che in sinistra idraulica, è associato uno sfioratore laterale. In Figura 5.3 sono schematizzati gli sfioratori in destra idraulica, in Figura 5.4 quelli in sinistra idraulica.

In accordo con le premesse fatte sulle forme di difesa cosiddette passive, i rilevati arginali vengono visti come strutture sormontabili in caso di livelli in alveo superiori alla sommità dei rilevati stessi, e non più come limiti invalicabile dalle acque.

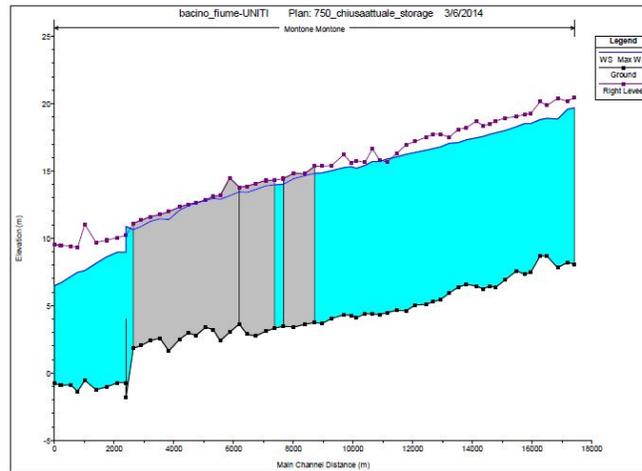


Figura 5.3: Profilo longitudinale degli sfioratori posti in destra idraulica

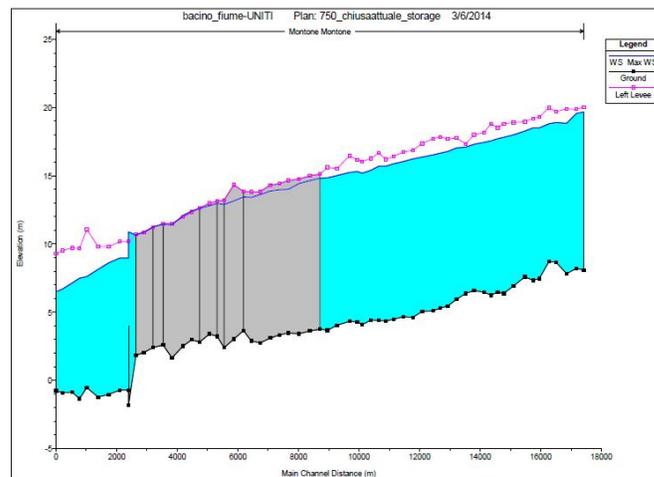


Figura 5.4: Profilo longitudinale degli sfioratori posti in sinistra idraulica

Questa particolare modellazione degli sfioratori ha lo scopo di giungere ad una quantificazione dei volumi potenzialmente esondabili da ogni sfiorate in modo da renderli confrontabili con le capacità di invaso delle relative celle ad essi connesse, al variare degli eventi associati ad un particolare valore del tempo di ritorno.

Facendo riferimento agli eventi considerati nella simulazione numerica (vedi tabella 5.1) i volumi esondabili in destra e in sinistra idraulica sono riassunti nella tabella 5.2.

Tabella 5.2: Volumi esondabili in destra e in sinistra idraulica

<i>Evento di piena</i>	<i>Volume in sinistra</i>	<i>Volume in destra</i>
Evento 650 m ³ /s	0.049	0.0125
Evento 750 m ³ /s	1.339	0.138
Evento Tr=100 anni	4.890	2.122
Evento Tr=200 anni	7.392	5.507
Evento Tr=500 anni	11.124	11.135

5.2 Digitalizzazione in Hec-Ras delle storage areas e delle storage area connections

La fase più importante della modellazione geometrica riguarda senza dubbio l'aggiunta delle celle di invaso. È possibile importare nella geometria di HEC-RAS file shape creati in ArcMap impostando nei due software uno stesso sistema di georeferenziazione, nel nostro caso il WGS_1984_UTM_Zone_32N.

Una volta importate, le celle sono state modellate idraulicamente assegnando ad ognuna di esse la relativa curva altezza idrica – volume. C'è da dire che a differenza di GIS, HEC-RAS non basa la memorizzazione di elementi geometrici sulle medesime rappresentazioni grafiche: è possibile cioè associare a una porzione di territorio, una capacità di invaso che potrebbe sembrare incoerente con l'estensione della stessa, nel caso in cui, per esempio, non fosse di interesse le modalità di invaso o semplicemente non si disponesse delle curve, e permette di ipotizzare un andamento lineare degli invasi, impostando solo l'estensione alle celle. La figura 5.5 mostra la disposizione delle celle nella sezione GEOMETRIC DATA.

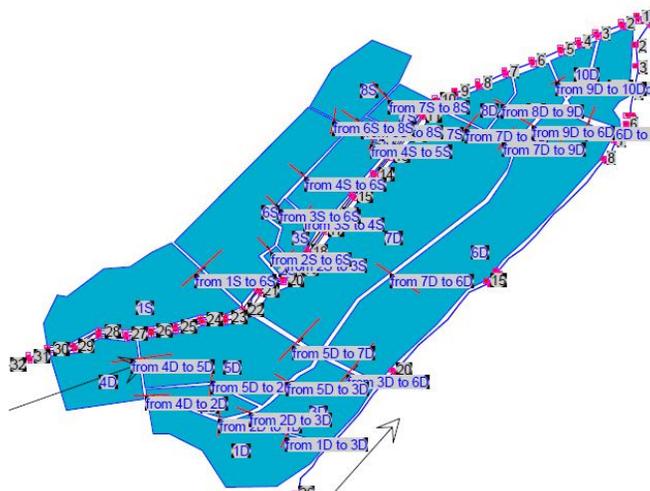


Figura 5.5: Disposizione delle celle idrauliche nell'area di studio

Infine, il modello è stato raffinato, collegando le celle fra di loro attraverso le storage area connections. Tali connessioni rappresentano di fatto degli sfioratori che permettono di quantificare i volumi che passano da una cella a un'altra nel caso una delle due, durante l'invaso, abbia raggiunto la quota minima dello sfioratore stesso.

Le quote del profilo che caratterizzano ogni connessione idraulica sono state estratte in GIS, utilizzando una particolare toolbox che dà in output l'andamento altimetrico di un qualsiasi file shape (linea o poligono), interrogando il DEM sottostante. La caratterizzazione idraulica in HEC-RAS comporta in primo luogo l'indicazione delle due celle che lo sfioratore divide, specificando il verso che si ritiene possa avere il flusso idrico in caso di sormonto. Flussi negativi nei risultati di qualche simulazione indicano un verso contrario a quello impostato.

In secondo luogo viene richiesto l'andamento altimetrico del rilevato, desunto da GIS in forma tabellare e settato in HEC-RAS nella sezione WEIR DATA, ottenendo un plot simile a quello di Figura 5.6.

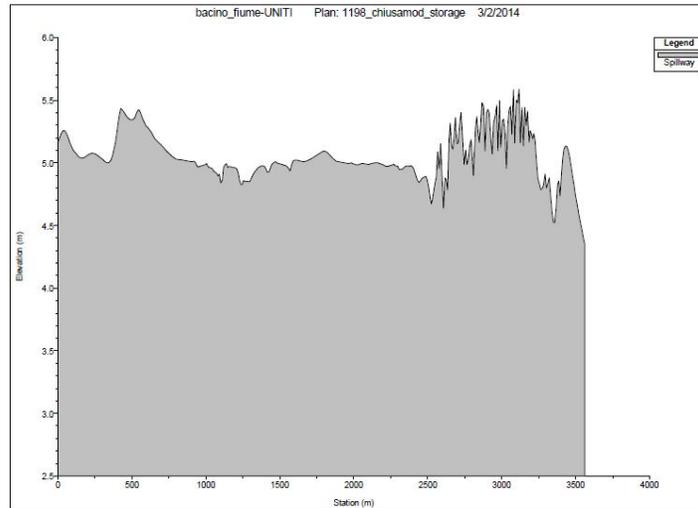


Figura 5.6: Andamento altimetrico di una storage area connections.

5.4 Simulazioni

Di seguito vengono elencate le diverse configurazioni ipotizzate per il fiume Monte ed investigate durante l'analisi. Gli elementi di distinzione tra le varie configurazioni sono da ricondursi alla conformazione della chiusa S. Marco, alla presenza di sfioratori laterali che riproducono l'andamento altimetrico degli argini, oppure alle ipotesi di abbassamento di porzioni di argine.

Le sette configurazioni investigate sono:

- Scenario con chiusa attuale e sfioratori suddivisi;
- Scenario con chiusa attuale, sfioratori suddivisi e storage areas;
- Scenario senza chiusa, sfioratori suddivisi e storage areas;
- Scenario con chiusa modificata, sfioratori suddivisi e storage areas;
- Scenario con chiusa attuale, sfioratore modificati e storage areas;
- Scenario senza chiusa, sfioratore modificato e storage areas;
- Scenario con chiusa modificata, sfioratore modificato e storage areas.

6. Risultati

Con riferimento alle diverse configurazioni geometriche precedentemente descritte si sono eseguite le simulazioni idrauliche lungo il tratto fluviale in analisi nel caso di eventi di piena di diversa intensità (v. ad es. Figura 2.4). Tali simulazioni consentono di valutare le condizioni di criticità della rete nel caso di eventi di piena associabili a diversi tempi di ritorno e nel caso di diverse ipotesi di intervento sulle principali infrastrutture idrauliche che ne regolano il funzionamento (es. chiusa S. Marco, rilevati arginali, etc.). Per ogni simulazione condotta è possibile infatti visualizzare, sia in forma tabellare che grafica, il livello massimo assunto dall'onda nelle varie sezioni, le portate, i volumi esondati da ogni sfioratore ed il livello massimo di invaso raggiunto in ogni cella idraulica. In tutte le tabelle che seguono i valori indicati in rosso indicano un volume potenzialmente sversato nella cella maggiore di quello massimo invasabile nelle condizioni geometriche attuali, ovvero facendo riferimento, per ogni cella, al volume contenibile al suo interno in base alle quote attuali del perimetro che la identifica.

6.1 Simulazioni con sfioratori con andamento altimetrico attuale

In un primo momento sono state effettuate le simulazione al variare della configurazione della chiusa San Marco, con una geometria degli sfioratori che segue l'andamento altimetrico arginale attuale.

6.1.1 Simulazione con chiusa attuale

In questa simulazione la geometria è priva delle celle idrauliche ed è servita solo a quantificare i volumi esondabili dai rilevati arginali in destra e sinistra in relazione

agli eventi associati a diversi tempi di ritorno, in modo da poterli confrontare con le capacità di invaso delle celle. Come già evidenziato gli sfioratori sono stati costruiti in modo che ognuno di essi coprisse tutta la struttura arginale di una sola cella adiacente al corso d'acqua. I risultati vengono mostrati nelle Tabelle 6.1 e 6.2. Le celle indicate servono solo come riferimento allo sfioratore corrispondente.

Tabella 6.1: Volumi esondati in destra idraulica

<i>Sfioratori riferiti alle celle</i>	<i>Portata di progetto 650 m³/s</i>	<i>Portata di progetto 750 m³/s</i>	<i>Tr=100</i>	<i>Tr=200</i>	<i>Tr=500</i>
4d	0	0	1498280	4282710	8619260
5d	0	0	0	81720	632600
7d	11500	137550	623440	1142150	1882650
Tot	11500	137550	2121720	5506580	11134510

Tabella 6.2: Volumi esondati in sinistra idraulica

<i>Sfioratori riferiti alle celle</i>	<i>Portata di progetto 650 m³/s</i>	<i>Portata di progetto 750 m³/s</i>	<i>Tr=100</i>	<i>Tr=200</i>	<i>Tr=500</i>
1s	0	0	0	87970	806150
6s	0	0	0	0	620
2s	0	0	0	2450	14580
3s	0	0	10810	95130	260970
4s	0	718750	2983760	4484270	6321510
5s	370	130390	503020	749890	1050860
7s	48890	489720	1393090	1972510	2668810
Tot	49260	1338860	4890680	7392220	11123500

6.1.2 Simulazione senza chiusa e storage areas

In questo caso è stata tolta la struttura trasversale per vedere gli effetti reali che la Chiusa San Marco ha sui profili di moto. In effetti sono stati riscontrati per tutti gli eventi di piena livelli idrici inferiori per un tratto che dalla Chiusa si estende verso monte per circa 2 km come mostrato in Figura 6.1

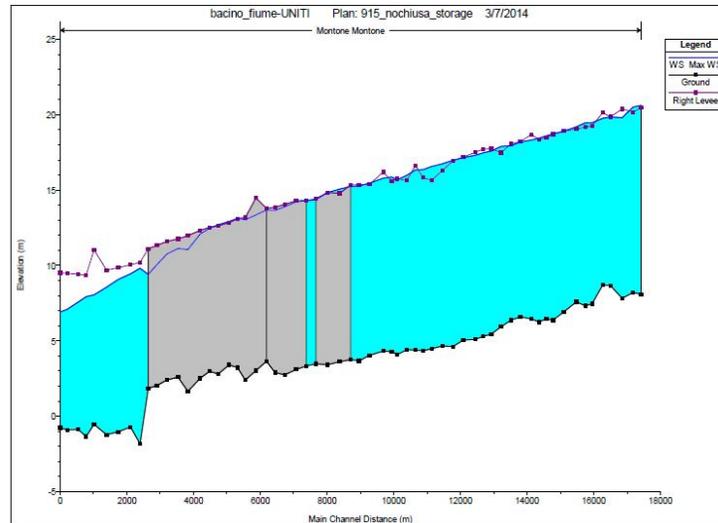


Figura 6.1: Profilo idrico con geometria senza chiusa

Nelle tabelle 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, sono riportati i risultati delle simulazioni.

Tabella 6.3: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle allo stato attuale

	VOLUME INVASABILE ALLO STATO ATTUALE (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	1.76	-	-	146.54	212.17	260.02
2S	0.00	-	-	-	0.65	0.76
3S	0.49	0	0	13.13	29.53	191.46
4S	21.00	0	0	128.24	598.6	1582.11
5S	2.20	-	-	19.12	114.07	294.12
6S	0.10	-	0	111.68	586.27	1523.45
7S	1.81	0	0	31.7	181.92	537.42
8S	0.00	0	0	535.31	1310.47	2383.94
1D	18.85	-	-	-	-	-
2D	3.58	-	-	3.64	5.7	9.53
3D	7.80	-	-	33	50.9	69.53
4D	7.00	-	-	308.46	378.13	437.44
5D	0.37	-	-	29.25	43.78	55.44
6D	3.76	0	0	214.51	747.39	1909.48
7D	0.00	-	-	417.64	1131.67	2579.47
8D	0.00	-	-	170.12	375.01	598.79
9D	0.00	0	0	330.02	670.11	1059.21
10D	5.38	0	0	0	0	257.55
11D	28.94	0	0	0	0	388.71

Tabella 6.4: Volumi invasati dalle celle con quote arginali delle celle innalzate di 0,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 0.5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	55.56	-	-	146.54	212.17	260.02
2S	2.09	-	-	-	0.65	0.76
3S	34.86	0	0	13.13	29.53	191.46
4S	294.22	0	0	128.24	598.6	1582.11
5S	66.02	-	-	19.12	114.07	294.12
6S	73.51	-	0	111.68	586.27	1523.45
7S	94.07	0	0	31.7	181.92	537.42
8S	74.22	0	0	535.31	1310.47	2383.94
1D	159.31	-	-	-	-	-
2D	64.41	-	-	3.64	5.7	9.53
3D	81.53	-	-	33	50.9	69.53
4D	172.23	-	-	308.46	378.13	437.44
5D	23.20	-	-	29.25	43.78	55.44
6D	173.19	0	0	214.51	747.39	1909.48
7D	0.66	-	-	417.64	1131.67	2579.47
8D	14.33	-	-	170.12	375.01	598.79
9D	25.82	0	0	330.02	670.11	1059.21
10D	49.33	0	0	0	0	257.55
11D	167.30	0	0	0	0	388.71

Tabella 6.5: Volumi invasati dalle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1 metro

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	322.94	-	-	146.54	212.17	260.02
2S	24.52	-	-	-	0.65	0.76
3S	153.59	0	0	13.13	29.53	191.46
4S	869.56	0	0	128.24	598.6	1582.11
5S	171.18	-	-	19.12	114.07	294.12
6S	392.54	-	0	111.68	586.27	1523.45
7S	284.00	0	0	31.7	181.92	537.42
8S	538.00	0	0	535.31	1310.47	2383.94
1D	572.87	-	-	-	-	-
2D	243.65	-	-	3.64	5.7	9.53
3D	286.00	-	-	33	50.9	69.53
4D	521.04	-	-	308.46	378.13	437.44
5D	153.85	-	-	29.25	43.78	55.44
6D	555.47	0	0	214.51	747.39	1909.48
7D	18.02	-	-	417.64	1131.67	2579.47
8D	128.84	-	-	170.12	375.01	598.79
9D	177.93	0	0	330.02	670.11	1059.21
10D	129.21	0	0	0	0	257.55
11D	369.18	0	0	0	0	388.71

Tabella 6.6: Volumi invasati dalle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1,5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	775.57	-	-	146.54	212.17	260.02
2S	77.88	-	-	-	0.65	0.76
3S	323.01	0	0	13.13	29.53	191.46
4S	1579.14	0	0	128.24	598.6	1582.11
5S	295.79	-	-	19.12	114.07	294.12
6S	919.12	-	0	111.68	586.27	1523.45
7S	558.94	0	0	31.7	181.92	537.42
8S	1279.72	0	0	535.31	1310.47	2383.94
1D	1064.64	-	-	-	-	-
2D	463.21	-	-	3.64	5.7	9.53
3D	594.37	-	-	33	50.9	69.53
4D	926.82	-	-	308.46	378.13	437.44
5D	468.42	-	-	29.25	43.78	55.44
6D	1171.72	0	0	214.51	747.39	1909.48
7D	278.24	-	-	417.64	1131.67	2579.47
8D	297.59	-	-	170.12	375.01	598.79
9D	450.65	0	0	330.02	670.11	1059.21
10D	226.33	0	0	0	0	257.55
11D	597.91	0	0	0	0	388.71

6.1.3 Simulazione con chiusa modificata e storage areas

Al fine di ridurre l'impatto sulle condizioni di sicurezza del fiume è stata ipotizzata un ampliamento delle aperture della Chiusa San Marco in modo da aumentarne l'efficienza (vedi Figura 6.2 e Figura 6.3). La modifica consiste nell'abbassamento della soglia di fondo di 1,5 metri, che, per come è strutturata la Chiusa dovrebbe risultare un intervento agevole che non dovrebbe intaccare le fondamenta.

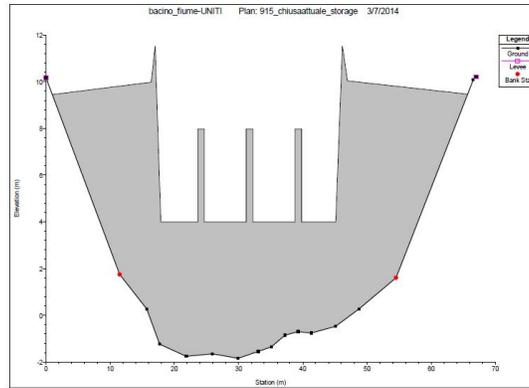


Figura 6.2: Sezione della chiusa San Marco nella configurazione attuale

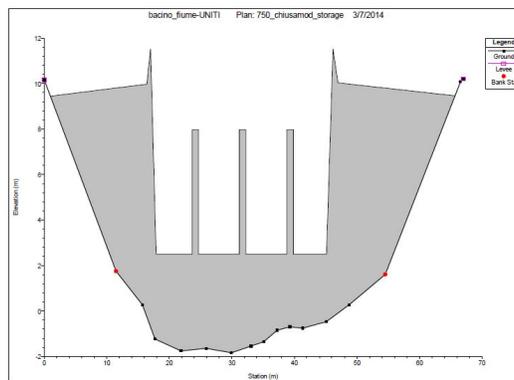


Figura 6.3: Sezione della chiusa San Marco in ipotesi di modifica

Anche in questo caso per gli stessi eventi di piena sono stati riscontrati livelli idrici inferiori ma solo per un tratto d'alveo che dalla Chiusa si estende verso monte di qualche centinaia di metri come mostrato in Figura 6.4. In particolare, per portate al colmo maggiori di $750 \text{ m}^3/\text{s}$, la riduzione dei tiranti idrici può considerarsi trascurabile.

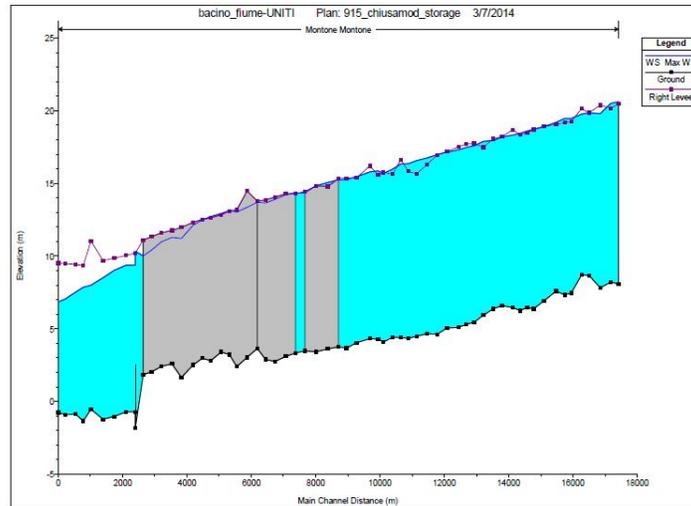


Figura 6.4: Profilo idrico in ipotesi di modifica della chiusa

I risultati sono riportati nelle tabelle 6.7, 6.8, 6.9, 6.10.

Tabella 6.7: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle allo stato attuale

	VOLUME INVASABILE ALLO STATO ATTUALE (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	1.76	-	-	147.27	212.39	260.11
2S	0.00	-	-	-	0.69	0.91
3S	0.49	0	0	14.22	44.24	228.78
4S	21.00	0	0	175.84	728.44	1772.92
5S	2.20	-	-	39.55	144.23	330.42
6S	0.10	-	-	203.41	703.83	1710.82
7S	1.81	0	0	51.79	229.69	614.17
8S	0.00	0	0	702.93	1497.24	2577.38
1D	18.85	-	-	-	-	-
2D	3.58	-	-	3.65	5.7	9.53
3D	7.80	-	-	33.31	50.93	69.56
4D	7.00	-	-	309.01	378.22	437.45
5D	0.37	-	-	29.51	43.8	55.45
6D	3.76	0	0	235.17	778.61	1943.95
7D	0.00	-	-	436.72	1183.42	2625.62
8D	0.00	-	-	177.97	387.14	604.97
9D	0.00	0	0	342.28	691.15	1069.94
10D	5.38	0	0	0	0	297.15
11D	28.94	0	0	0	0	477.52

Tabella 6.8: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 0,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 0.5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	55.56	-	-	147.27	212.39	260.11
2S	2.09	-	-	-	0.69	0.91
3S	34.86	0	0	14.22	44.24	228.78
4S	294.22	0	0	175.84	728.44	1772.92
5S	66.02	-	-	39.55	144.23	330.42
6S	73.51	-	-	203.41	703.83	1710.82
7S	94.07	0	0	51.79	229.69	614.17
8S	74.22	0	0	702.93	1497.24	2577.38
1D	159.31	-	-	-	-	-
2D	64.41	-	-	3.65	5.7	9.53
3D	81.53	-	-	33.31	50.93	69.56
4D	172.23	-	-	309.01	378.22	437.45
5D	23.20	-	-	29.51	43.8	55.45
6D	173.19	0	0	235.17	778.61	1943.95
7D	0.66	-	-	436.72	1183.42	2625.62
8D	14.33	-	-	177.97	387.14	604.97
9D	25.82	0	0	342.28	691.15	1069.94
10D	49.33	0	0	0	0	297.15
11D	167.30	0	0	0	0	477.52

Tabella 6.9: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1 metro

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	322.94	-	-	147.27	212.39	260.11
2S	24.52	-	-	-	0.69	0.91
3S	153.59	0	0	14.22	44.24	228.78
4S	869.56	0	0	175.84	728.44	1772.92
5S	171.18	-	-	39.55	144.23	330.42
6S	392.54	-	-	203.41	703.83	1710.82
7S	284.00	0	0	51.79	229.69	614.17
8S	538.00	0	0	702.93	1497.24	2577.38
1D	572.87	-	-	-	-	-
2D	243.65	-	-	3.65	5.7	9.53
3D	286.00	-	-	33.31	50.93	69.56
4D	521.04	-	-	309.01	378.22	437.45
5D	153.85	-	-	29.51	43.8	55.45
6D	555.47	0	0	235.17	778.61	1943.95
7D	18.02	-	-	436.72	1183.42	2625.62
8D	128.84	-	-	177.97	387.14	604.97
9D	177.93	0	0	342.28	691.15	1069.94
10D	129.21	0	0	0	0	297.15
11D	369.18	0	0	0	0	477.52

Tabella 6.10: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1,5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	775.57	-	-	147.27	212.39	260.11
2S	77.88	-	-	-	0.69	0.91
3S	323.01	0	0	14.22	44.24	228.78
4S	1579.14	0	0	175.84	728.44	1772.92
5S	295.79	-	-	39.55	144.23	330.42
6S	919.12	-	-	203.41	703.83	1710.82
7S	558.94	0	0	51.79	229.69	614.17
8S	1279.72	0	0	702.93	1497.24	2577.38
1D	1064.64	-	-	-	-	-
2D	463.21	-	-	3.65	5.7	9.53
3D	594.37	-	-	33.31	50.93	69.56
4D	926.82	-	-	309.01	378.22	437.45
5D	468.42	-	-	29.51	43.8	55.45
6D	1171.72	0	0	235.17	778.61	1943.95
7D	278.24	-	-	436.72	1183.42	2625.62
8D	297.59	-	-	177.97	387.14	604.97
9D	450.65	0	0	342.28	691.15	1069.94
10D	226.33	0	0	0	0	297.15
11D	597.91	0	0	0	0	477.52

6.1.4 Simulazione con chiusa attuale e storage areas

Gli scenari con la configurazione geometrica attuale, in cui la Chiusa San Marco rappresenta una criticità rilevante, meritano sicuramente un approfondimento maggiore. Come fatto nei paragrafi precedenti, sono state effettuate cinque simulazioni al variare degli eventi di piena. In Figura 6.5 è riportato il profilo idrico simulato per un evento di piena centennale.

Un confronto dei profili idrici con le simulazioni precedenti, per uno stesso evento, mostrano situazioni con più alto rischio idraulico.

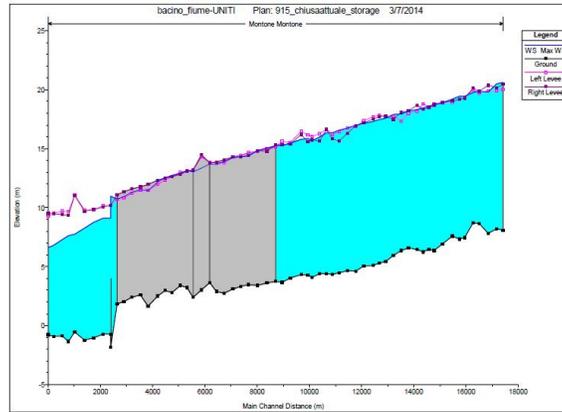


Figura 6.5: Profilo idrico con configurazione attuale della chiusa per un evento con $Tr=100$

I risultati delle simulazioni sono riportate nelle tabelle 6.11, 6.12, 6.13, 6.14.

Tabella 6.11: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle allo stato attuale

	VOLUME INVASIBILE ALLO STATO ATTUALE (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	1.76	-	-	148	212.22	260.27
2S	0.00	-	-	-	0.71	25
3S	0.49	0	0	30.68	156.06	485.75
4S	21.00	0	95.62	608.75	1400.27	2642.8
5S	2.20	-	13.34	116.43	259.53	484.57
6S	0.10	-	65.45	595.45	1344.88	2639.57
7S	1.81	0	15.89	185.65	470.54	994.1
8S	0.00	0	48.78	1325.06	2199.58	-
1D	18.85	-	-	-	-	-
2D	3.58	-	-	3.66	5.7	9.48
3D	7.80	-	-	33.53	50.95	69.18
4D	7.00	-	-	309.25	378.23	436.61
5D	0.37	-	-	29.69	43.82	55.33
6D	3.76	0	0	252.57	814.35	1969.06
7D	0.00	-	-	449.08	1242.69	2659.24
8D	0.00	-	-	185.98	401.03	609.47
9D	0.00	0	0	354.99	715.24	1077.75
10D	5.38	0	0	0	0	328.77
11D	28.94	0	0	0	0	548.84

Tabella 6.12: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 0,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 0.5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	55.56	-	-	148	212.22	260.27
2S	2.09	-	-	-	0.71	25
3S	34.86	0	0	30.68	156.06	485.75
4S	294.22	0	95.62	608.75	1400.27	2642.8
5S	66.02	-	13.34	116.43	259.53	484.57
6S	73.51	-	65.45	595.45	1344.88	2639.57
7S	94.07	0	15.89	185.65	470.54	994.1
8S	74.22	0	48.78	1325.06	2199.58	-
1D	159.31	-	-	-	-	-
2D	64.41	-	-	3.66	5.7	9.48
3D	81.53	-	-	33.53	50.95	69.18
4D	172.23	-	-	309.25	378.23	436.61
5D	23.20	-	-	29.69	43.82	55.33
6D	173.19	0	0	252.57	814.35	1969.06
7D	0.66	-	-	449.08	1242.69	2659.24
8D	14.33	-	-	185.98	401.03	609.47
9D	25.82	0	0	354.99	715.24	1077.75
10D	49.33	0	0	0	0	328.77
11D	167.30	0	0	0	0	548.84

Tabella 6.13: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1 metro

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	322.94	-	-	148	212.22	260.27
2S	24.52	-	-	-	0.71	25
3S	153.59	0	0	30.68	156.06	485.75
4S	869.56	0	95.62	608.75	1400.27	2642.8
5S	171.18	-	13.34	116.43	259.53	484.57
6S	392.54	-	65.45	595.45	1344.88	2639.57
7S	284.00	0	15.89	185.65	470.54	994.1
8S	538.00	0	48.78	1325.06	2199.58	-
1D	572.87	-	-	-	-	-
2D	243.65	-	-	3.66	5.7	9.48
3D	286.00	-	-	33.53	50.95	69.18
4D	521.04	-	-	309.25	378.23	436.61
5D	153.85	-	-	29.69	43.82	55.33
6D	555.47	0	0	252.57	814.35	1969.06
7D	18.02	-	-	449.08	1242.69	2659.24
8D	128.84	-	-	185.98	401.03	609.47
9D	177.93	0	0	354.99	715.24	1077.75
10D	129.21	0	0	0	0	328.77
11D	369.18	0	0	0	0	548.84

Tabella 6.14: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1,5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	775.57	-	-	148	212.22	260.27
2S	77.88	-	-	-	0.71	25
3S	323.01	0	0	30.68	156.06	485.75
4S	1579.14	0	95.62	608.75	1400.27	2642.8
5S	295.79	-	13.34	116.43	259.53	484.57
6S	919.12	-	65.45	595.45	1344.88	2639.57
7S	558.94	0	15.89	185.65	470.54	994.1
8S	1279.72	0	48.78	1325.06	2199.58	-
1D	1064.64	-	-	-	-	-
2D	463.21	-	-	3.66	5.7	9.48
3D	594.37	-	-	33.53	50.95	69.18
4D	926.82	-	-	309.25	378.23	436.61
5D	468.42	-	-	29.69	43.82	55.33
6D	1171.72	0	0	252.57	814.35	1969.06
7D	278.24	-	-	449.08	1242.69	2659.24
8D	297.59	-	-	185.98	401.03	609.47
9D	450.65	0	0	354.99	715.24	1077.75
10D	226.33	0	0	0	0	328.77
11D	597.91	0	0	0	0	548.84

6.2 Ipotesi di gestione degli allagamenti all'esterno delle arginature maestre

Gli ultimi tre scenari si riferiscono ad una modifica dello sfioratore posto in destra idraulica relativo alla cella 7D (vedi Figura 2.5). Osservando i profili idraulici dai risultati delle simulazioni è stato individuato un tratto di circa 200 metri che presentava tiranti idrici sensibilmente più elevati. In particolare, in corrispondenza delle sezioni idriche 18 e 19 si è ipotizzato un abbassamento di 1,5 metri al fine di aumentare il volume esondato e abbassare quindi i tiranti idrici più a valle, salvaguardando le zone poste in sinistra idraulica, come mostrato in Figura 6.6, in pieno accordo con l'obiettivo di questo lavoro.

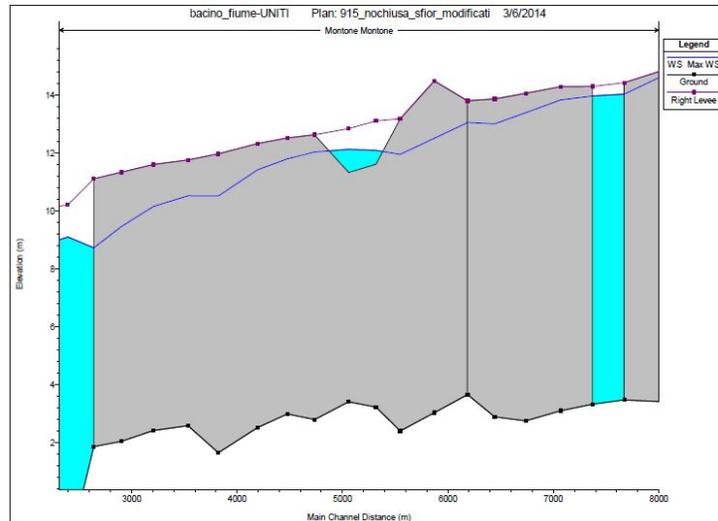


Figura 6.6: Geometria dello sfioratore modificato in destra idraulica

Nelle tabelle successive i valori in verde si riferiscono al confronto fra la stessa simulazione con la rispettiva, fatta in precedenza, in cui l'andamento altimetrico dello sfioratore era quello attuale, evidenziando come, grazie a una diminuzione dei volumi esondati in sinistra idraulica, gli stessi volumi diventano compatibili con le capacità di invaso delle celle.

6.2.1 Simulazione senza chiusa e con storage areas

Nelle successive cinque simulazione è stata mantenuta una geometria senza Chiusa, ma è stato modificato uno degli sfioratori in destra idraulica come spiegato nel paragrafo precedente (vedi figura 6.6). I risultati sono riportati nelle tabelle 6.15, 6.16, 6.17, 6.18.

Tabella 6.15: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle allo stato attuale

	VOLUME INVASABILE ALLO STATO ATTUALE (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	1.76	-	-	7.21	169.1	232.16
2S	0.00	-	-	-	-	-
3S	0.49	0	0	0	0	16.8
4S	21.00	0	0	0	83.83	486.19
5S	2.20	-	-	-	-	92.3
6S	0.10	-	-	-	85.02	484.46
7S	1.81	0	0	0	0	140.55
8S	0.00	0	0	0	349.69	1148.75
1D	18.85	-	-	-	27.08	432.12
2D	3.58	-	-	-	17.1	208.84
3D	7.80	-	-	81.67	319.69	741.53
4D	7.00	-	-	87.32	333.57	415.82
5D	0.37	-	-	60.59	327.91	1029.6
6D	3.76	223.61	823.65	2380.13	4034.13	5928.72
7D	0.00	434.43	1258.08	3183.46	4969.78	7174.37
8D	0.00	180.1	404.64	679.73	895.13	1138.38
9D	0.00	345.6	721.51	1199.83	1574.29	1995.45
10D	5.38	0	0	384.25	502.54	636.68
11D	28.94	0	0	676.19	945.7	1252.84

Tabella 6.16: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 0,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 0.5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	55.56	-	-	7.21	169.1	232.16
2S	2.09	-	-	-	-	-
3S	34.86	0	0	0	0	16.8
4S	294.22	0	0	0	83.83	486.19
5S	66.02	-	-	-	-	92.3
6S	73.51	-	-	-	85.02	484.46
7S	94.07	0	0	0	0	140.55
8S	74.22	0	0	0	349.69	1148.75
1D	159.31	-	-	-	27.08	432.12
2D	64.41	-	-	-	17.1	208.84
3D	81.53	-	-	81.67	319.69	741.53
4D	172.23	-	-	87.32	333.57	415.82
5D	23.20	-	-	60.59	327.91	1029.6
6D	173.19	223.61	823.65	2380.13	4034.13	5928.72
7D	0.66	434.43	1258.08	3183.46	4969.78	7174.37
8D	14.33	180.1	404.64	679.73	895.13	1138.38
9D	25.82	345.6	721.51	1199.83	1574.29	1995.45
10D	49.33	0	0	384.25	502.54	636.68
11D	167.30	0	0	676.19	945.7	1252.84

Tabella 6.17: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1 metro

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	322.94	-	-	7.21	169.1	232.16
2S	24.52	-	-	-	-	-
3S	153.59	0	0	0	0	16.8
4S	869.56	0	0	0	83.83	486.19
5S	171.18	-	-	-	-	92.3
6S	392.54	-	-	-	85.02	484.46
7S	284.00	0	0	0	0	140.55
8S	538.00	0	0	0	349.69	1148.75
1D	572.87	-	-	-	27.08	432.12
2D	243.65	-	-	-	17.1	208.84
3D	286.00	-	-	81.67	319.69	741.53
4D	521.04	-	-	87.32	333.57	415.82
5D	153.85	-	-	60.59	327.91	1029.6
6D	555.47	223.61	823.65	2380.13	4034.13	5928.72
7D	18.02	434.43	1258.08	3183.46	4969.78	7174.37
8D	128.84	180.1	404.64	679.73	895.13	1138.38
9D	177.93	345.6	721.51	1199.83	1574.29	1995.45
10D	129.21	0	0	384.25	502.54	636.68
11D	369.18	0	0	676.19	945.7	1252.84

Tabella 6.18: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1,5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	775.57	-	-	7.21	169.1	232.16
2S	77.88	-	-	-	-	-
3S	323.01	0	0	0	0	16.8
4S	1579.14	0	0	0	83.83	486.19
5S	295.79	-	-	-	-	92.3
6S	919.12	-	-	-	85.02	484.46
7S	558.94	0	0	0	0	140.55
8S	1279.72	0	0	0	349.69	1148.75
1D	1064.64	-	-	-	27.08	432.12
2D	463.21	-	-	-	17.1	208.84
3D	594.37	-	-	81.67	319.69	741.53
4D	926.82	-	-	87.32	333.57	415.82
5D	468.42	-	-	60.59	327.91	1029.6
6D	1171.72	223.61	823.65	2380.13	4034.13	5928.72
7D	278.24	434.43	1258.08	3183.46	4969.78	7174.37
8D	297.59	180.1	404.64	679.73	895.13	1138.38
9D	450.65	345.6	721.51	1199.83	1574.29	1995.45
10D	226.33	0	0	384.25	502.54	636.68
11D	597.91	0	0	676.19	945.7	1252.84

6.2.2 Simulazione con chiusa modificata e storage areas

Nelle tabelle 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, vengono riportati i risultati ottenuti dalle cinque simulazioni in ipotesi di chiusa modificata (vedi Figura 6.2 e Figura 6.3) e modificando uno sfioratore laterale in destra idraulica come fatto in precedenza.

Tabella 6.19: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle allo stato attuale

	<i>VOLUME INVASABILE ALLO STATO ATTUALE (1000 m³)</i>	<i>evento 650 m³/s [1000 m³]</i>	<i>evento 750 m³/s [1000 m³]</i>	<i>Tr=100 [1000 m³]</i>	<i>Tr=200 [1000 m³]</i>	<i>Tr=500 [1000 m³]</i>
1S	1.76	-	-	7.77	169.21	232.23
2S	0.00	-	-	-	-	-
3S	0.49	0	0	0	0	17.31
4S	21.00	0	0	0	83.26	490.71
5S	2.20	-	-	-	-	93.07
6S	0.10	-	-	-	85.04	488.55
7S	1.81	0	0	0	0	142.22
8S	0.00	0	0	0	347.33	1155.26
1D	18.85	-	-	-	63.56	502.13
2D	3.58	-	-	-	28.63	239.16
3D	7.80	-	-	105.51	361.57	791.51
4D	7.00	-	-	89.67	333.72	415.95
5D	0.37	-	-	88.32	398.38	1133.47
6D	3.76	252.57	957.77	2575	4226.16	6135.69
7D	0.00	456.39	1362.49	3372.9	5197.62	7412.3
8D	0.00	191.03	429.12	705.11	920.27	1164.63
9D	0.00	362.65	763.95	1243.9	1617.81	2040.96
10D	5.38	0	0	398.19	516.28	651.25
11D	28.94	0	0	707.86	977.44	1285.99

Tabella 6.20: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 0,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 0.5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	55.56	-	-	7.77	169.21	232.23
2S	2.09	-	-	-	-	-
3S	34.86	0	0	0	0	17.31
4S	294.22	0	0	0	83.26	490.71
5S	66.02	-	-	-	-	93.07
6S	73.51	-	-	-	85.04	488.55
7S	94.07	0	0	0	0	142.22
8S	74.22	0	0	0	347.33	1155.26
1D	159.31	-	-	-	63.56	502.13
2D	64.41	-	-	-	28.63	239.16
3D	81.53	-	-	105.51	361.57	791.51
4D	172.23	-	-	89.67	333.72	415.95
5D	23.20	-	-	88.32	398.38	1133.47
6D	173.19	252.57	957.77	2575	4226.16	6135.69
7D	0.66	456.39	1362.49	3372.9	5197.62	7412.3
8D	14.33	191.03	429.12	705.11	920.27	1164.63
9D	25.82	362.65	763.95	1243.9	1617.81	2040.96
10D	49.33	0	0	398.19	516.28	651.25
11D	167.30	0	0	707.86	977.44	1285.99

Tabella 6.21: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1 metro

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	322.94	-	-	7.77	169.21	232.23
2S	24.52	-	-	-	-	-
3S	153.59	0	0	0	0	17.31
4S	869.56	0	0	0	83.26	490.71
5S	171.18	-	-	-	-	93.07
6S	392.54	-	-	-	85.04	488.55
7S	284.00	0	0	0	0	142.22
8S	538.00	0	0	0	347.33	1155.26
1D	572.87	-	-	-	63.56	502.13
2D	243.65	-	-	-	28.63	239.16
3D	286.00	-	-	105.51	361.57	791.51
4D	521.04	-	-	89.67	333.72	415.95
5D	153.85	-	-	88.32	398.38	1133.47
6D	555.47	252.57	957.77	2575	4226.16	6135.69
7D	18.02	456.39	1362.49	3372.9	5197.62	7412.3
8D	128.84	191.03	429.12	705.11	920.27	1164.63
9D	177.93	362.65	763.95	1243.9	1617.81	2040.96
10D	129.21	0	0	398.19	516.28	651.25
11D	369.18	0	0	707.86	977.44	1285.99

Tabella 6.22: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1,5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	775.57	-	-	7.77	169.21	232.23
2S	77.88	-	-	-	-	-
3S	323.01	0	0	0	0	17.31
4S	1579.14	0	0	0	83.26	490.71
5S	295.79	-	-	-	-	93.07
6S	919.12	-	-	-	85.04	488.55
7S	558.94	0	0	0	0	142.22
8S	1279.72	0	0	0	347.33	1155.26
1D	1064.64	-	-	-	63.56	502.13
2D	463.21	-	-	-	28.63	239.16
3D	594.37	-	-	105.51	361.57	791.51
4D	926.82	-	-	89.67	333.72	415.95
5D	468.42	-	-	88.32	398.38	1133.47
6D	1171.72	252.57	957.77	2575	4226.16	6135.69
7D	278.24	456.39	1362.49	3372.9	5197.62	7412.3
8D	297.59	191.03	429.12	705.11	920.27	1164.63
9D	450.65	362.65	763.95	1243.9	1617.81	2040.96
10D	226.33	0	0	398.19	516.28	651.25
11D	597.91	0	0	707.86	977.44	1285.99

6.2.3 Simulazione con chiusa attuale e storage areas

Nelle tabelle 6.23, 6.24, 6.25, 6.26, vengono riportati i risultati ottenuti modificando uno sfioratore laterale in destra idraulica come fatto in precedenza.

Tabella 6.23: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle allo stato attuale

	VOLUME INVASABILE ALLO STATO ATTUALE (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	1.76	-	-	9.19	170.23	231.85
2S	0.00	-	-	-	-	-
3S	0.49	0	0	0	0	16.97
4S	21.00	0	0	0	86.25	487.71
5S	2.20	-	-	-	-	92.56
6S	0.10	-	-	-	85.7	485.84
7S	1.81	0	0	0	0	141.11
8S	0.00	0	0	0	359.83	1150.94
1D	18.85	-	-	-	204.73	758.95
2D	3.58	-	-	4.02	91	350.42
3D	7.80	-	15.06	202.07	524.11	974.87
4D	7.00	-	-	97.61	334.92	545.43
5D	0.37	-	14.69	200.61	671.91	1514.5
6D	3.76	542.85	1525.48	3364.24	4978.24	6895.1
7D	0.00	792.5	2065.38	4174.97	6081.68	8298.55
8D	0.00	296.58	530.32	807.88	1017.82	1261.08
9D	0.00	532.25	939.73	1422.47	1786.69	2207.94
10D	5.38	0	0	454.63	569.81	704.68
11D	28.94	0	0	836.12	1100.61	1408.7

Tabella 6.24: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 0,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 0.5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	55.56	-	-	9.19	170.23	231.85
2S	2.09	-	-	-	-	-
3S	34.86	0	0	0	0	16.97
4S	294.22	0	0	0	86.25	487.71
5S	66.02	-	-	-	-	92.56
6S	73.51	-	-	-	85.7	485.84
7S	94.07	0	0	0	0	141.11
8S	74.22	0	0	0	359.83	1150.94
1D	159.31	-	-	-	204.73	758.95
2D	64.41	-	-	4.02	91	350.42
3D	81.53	-	15.06	202.07	524.11	974.87
4D	172.23	-	-	97.61	334.92	545.43
5D	23.20	-	14.69	200.61	671.91	1514.5
6D	173.19	542.85	1525.48	3364.24	4978.24	6895.1
7D	0.66	792.5	2065.38	4174.97	6081.68	8298.55
8D	14.33	296.58	530.32	807.88	1017.82	1261.08
9D	25.82	532.25	939.73	1422.47	1786.69	2207.94
10D	49.33	0	0	454.63	569.81	704.68
11D	167.30	0	0	836.12	1100.61	1408.7

Tabella 6.25: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1 metro

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	322.94	-	-	9.19	170.23	231.85
2S	24.52	-	-	-	-	-
3S	153.59	0	0	0	0	16.97
4S	869.56	0	0	0	86.25	487.71
5S	171.18	-	-	-	-	92.56
6S	392.54	-	-	-	85.7	485.84
7S	284.00	0	0	0	0	141.11
8S	538.00	0	0	0	359.83	1150.94
1D	572.87	-	-	-	204.73	758.95
2D	243.65	-	-	4.02	91	350.42
3D	286.00	-	15.06	202.07	524.11	974.87
4D	521.04	-	-	97.61	334.92	545.43
5D	153.85	-	14.69	200.61	671.91	1514.5
6D	555.47	542.85	1525.48	3364.24	4978.24	6895.1
7D	18.02	792.5	2065.38	4174.97	6081.68	8298.55
8D	128.84	296.58	530.32	807.88	1017.82	1261.08
9D	177.93	532.25	939.73	1422.47	1786.69	2207.94
10D	129.21	0	0	454.63	569.81	704.68
11D	369.18	0	0	836.12	1100.61	1408.7

Tabella 6.26: Volumi invasati nelle celle con quote arginali delle celle innalzate di 1,5 metri

	VOLUME INVASABILE CON RIALZO DI 1,5 m (1000 m³)	evento 650 m³/s [1000 m³]	evento 750 m³/s [1000 m³]	Tr=100 [1000 m³]	Tr=200 [1000 m³]	Tr=500 [1000 m³]
1S	775.57	-	-	9.19	170.23	231.85
2S	77.88	-	-	-	-	-
3S	323.01	0	0	0	0	16.97
4S	1579.14	0	0	0	86.25	487.71
5S	295.79	-	-	-	-	92.56
6S	919.12	-	-	-	85.7	485.84
7S	558.94	0	0	0	0	141.11
8S	1279.72	0	0	0	359.83	1150.94
1D	1064.64	-	-	-	204.73	758.95
2D	463.21	-	-	4.02	91	350.42
3D	594.37	-	15.06	202.07	524.11	974.87
4D	926.82	-	-	97.61	334.92	545.43
5D	468.42	-	14.69	200.61	671.91	1514.5
6D	1171.72	542.85	1525.48	3364.24	4978.24	6895.1
7D	278.24	792.5	2065.38	4174.97	6081.68	8298.55
8D	297.59	296.58	530.32	807.88	1017.82	1261.08
9D	450.65	532.25	939.73	1422.47	1786.69	2207.94
10D	226.33	0	0	454.63	569.81	704.68
11D	597.91	0	0	836.12	1100.61	1408.7

7. Possibili interventi

Sulla scorta delle risultanze emerse dalle diverse configurazioni geometriche investigate è stato possibile valutare le attuali criticità della rete per le diverse sollecitazioni idrologiche, investigando le potenzialità offerte dalle diverse ipotesi di intervento per la mitigazione del rischio alluvionale.

Come visto già nel capitolo 6 si è apportata una modifica in corrispondenza delle sezioni 18 e 19 dello sfioratore adiacente alla cella 7D. L'intervento consiste nell'abbassare il livello arginale di 1,5 metri per circa 200 metri, con l'obiettivo di mettere in sicurezza le celle poste in sinistra idraulica, ad alto rischio perché vicine al centro abitato di Ravenna.

Da un confronto fra i risultati delle simulazioni condotte per le tre configurazioni possibili della chiusa, in tutti i casi è emerso un netto miglioramento della situazione in sinistra idraulica, a cui corrisponde sempre un netto peggioramento in destra, dovuto essenzialmente a problemi di contenimento dei volumi esondati nelle celle.

L'ipotesi di un nuovo intervento riguarda quindi un adeguamento in quota dei rilevati che delimitano le celle idrauliche in destra. Come già anticipato nel capitolo 4, eventuali innalzamenti delle quote minime delle celle apportano notevoli benefici in termini di capacità di invaso, e appaiono quindi come interventi ideali per far fronte al problema (v. Tabelle 4.7 e 4.8).

L'adeguamento in quota non riguarda ovviamente tutto il perimetro di contorno della cella ma solo quei tratti che non assicurano un'altezza minima da garantire benefici di invaso come quelli ipotizzati nel capitolo 4.

Disponendo di un DEM ad elevata risoluzione per l'intera area di studio e per le singole celle idrauliche è stato possibile risalire alla lunghezza del tratto di perimetro non adeguato in quota, stimando in maniera approssimata l'entità dell'intervento richiesto per aumentare la capacità di invaso di una specifica cella

Tale analisi è stata condotta facendo riferimento ai soli eventi di piena con frequenza centennale e duecentennale, considerati più significativi rispetto all'evento cinquecentennale in un'ottica di fattibilità degli interventi.

Le tabelle di seguito riportano le modifiche da apportare ai contorni delle celle idrauliche in modo da adeguarle a eventi di piena centennale (tabelle 7.1 e 7.2) e duecentennale (tabelle 7.3 e 7.4), in relazione a una eventuale modifica dello sfioratore posto in destra idraulica del fiume Montone come ipotizzato nel capitolo 6.

Tabella 7.1: Adeguamenti al contorno celle per un evento di piena centennale e con struttura arginale attuale

<i>Tr = 100 Sfioratore attuale</i>			
<i>Celle</i>	<i>Rialzo necessario [m]</i>	<i>Intervento in m</i>	<i>Contorno totale in metri</i>
1D	0	0	6120
2D	0.5	1790	3880
3D	0.5	670	5120
4D	1	1830	4840
5D	1	1860	7380
6D	1	830	13980
7D	-	-	12540
8D	1.5	2120	3430
9D	1.5	2800	4510
10D	0	0	2550
11D	0	0	3960
1S	1	2240	7390
2S	0	0	2490
3S	1	2170	4420
4S	1	3950	7160
5S	1	3020	4300
6S	1.5	4920	10880
7S	1	3230	5450
8S	-	-	6620

Tabella 7.2: Adeguamenti al contorno celle per un evento di piena centennale e con struttura arginale modificata

<i>Tr = 100 Sfiatore modificato</i>			
<i>Celle</i>	<i>Rialzo necessario [m]</i>	<i>Intervento in m</i>	<i>Contorno totale in metri</i>
1D	0	0	6120
2D	0.5	1790	3880
3D	1	1420	5120
4D	0.5	1050	4840
5D	1.5	3640	7380
6D	-	-	13980
7D	-	-	12540
8D	-	-	3430
9D	-	-	4510
10D	-	-	2550
11D	-	-	3960
1S	0.5	310	7390
2S	0	0	2490
3S	0	0	4420
4S	0	0	7160
5S	0	0	4300
6S	0	0	10880
7S	0	0	5450
8S	0	0	6620

Tabella 7.3: Adeguamenti al contorno celle per un evento di piena duecentennale e con struttura arginale attuale

<i>Tr = 200 Sfiatore attuale</i>			
<i>Celle</i>	<i>Rialzo necessario [m]</i>	<i>Intervento in m</i>	<i>Contorno totale in metri</i>
1D	0	0	6120
2D	0.5	1790	3880
3D	0.5	670	5120
4D	1	1830	4840
5D	1	1860	7380
6D	1.5	1820	13980
7D	-	-	12540
8D	-	-	3430
9D	-	-	4510
10D	0	0	2550
11D	0	0	3960
1S	1	2240	7390
2S	1	810	2490
3S	1.5	2960	4420
4S	1.5	4740	7160
5S	1.5	3450	4300
6S	-	-	10880
7S	1.5	3700	5450
8S	-	-	6620

Tabella 7.4: Adeguamenti al contorno celle per un evento di piena centennale e con struttura arginale modificata

<i>Tr = 200 Sfiatore modificato</i>			
<i>Celle</i>	<i>Rialzo necessario [m]</i>	<i>Intervento in m</i>	<i>Contorno totale in metri</i>
1D	1	4280	6120
2D	1	3540	3880
3D	1.5	2710	5120
4D	1	1830	4840
5D	-	-	7380
6D	-	-	13980
7D	-	-	12540
8D	-	-	3430
9D	-	-	4510
10D	-	-	2550
11D	-	-	3960
1S	1	2240	7390
2S	0	0	2490
3S	0	0	4420
4S	0.5	2250	7160
5S	0	0	4300
6S	1	3500	10880
7S	0	0	5450
8S	1	6110	6620

Nelle figure 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 vengono rappresentati i possibili scenari di allagamento in funzione delle loro condizioni di invaso: in bianco vengono indicate le celle non interessate da esondazione, in blu quelle invase parzialmente e in rosso le celle per cui i volumi da invasare sono maggiori della proprio capacità di invaso.

È opportuno fare alcune considerazioni.

In primo luogo, la modifica ipotizzata agli sfioratori posti in destra idraulica rimane fondamentale al fine di assicurare la sicurezza idraulica alla città di Ravenna: i risultati ottenuti con la configurazione arginale attuale del fiume Montone indicano la necessità di adeguamento di un numero di celle, sia in destra che in sinistra idraulica, maggiore rispetto alla configurazione in ipotesi di modifica arginale.

Nell'ipotesi di mantenere la struttura arginale allo stato attuale, la messa in sicurezza della zona indagata resta garantita a fronte però di ingenti interventi di adeguamento. In particolare la salvaguardia della sinistra idraulica da un evento

centennale, richiederebbe un rialzo arginale di 1 metro per quasi tutti i comparti idraulici (vedi Figura 7.1), mentre la duecentennale addirittura di 1,5 metri (vedi Figura 7.2). In entrambi i casi tuttavia, la cella 8S, prospiciente alla città di Ravenna, che richiederebbe maggiore salvaguardia, non riesce a contenere i volumi esondati nonostante gli interventi.

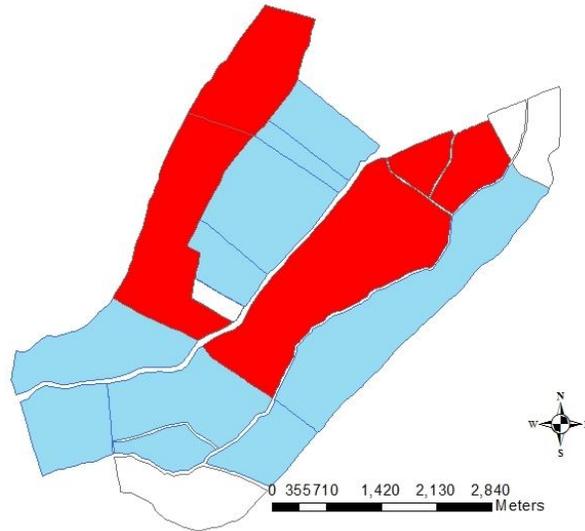


Figura 7.1: scenario di allagamento per un evento con $Tr=100$ e con struttura arginale attuale

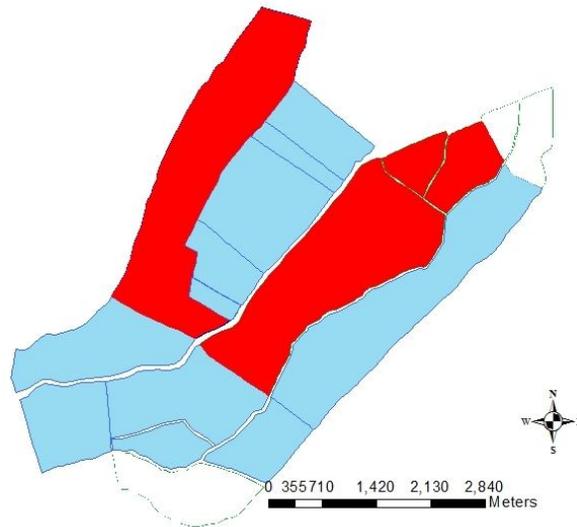


Figura 7.2: Scenario di allagamento per un evento con $Tr=200$ e con struttura arginale attuale

Come si desume dalle tabelle 7.2 e 7.4 modificare lo sfioratore laterale posto in destra idraulica del fiume Montone, come ipotizzato nel capitolo 6, riduce

drasticamente i volumi esondati in sinistra idraulica. La messa in sicurezza questa zona necessita di interventi localizzati e di modeste entità. In relazione a un evento di piena centennale basterebbe un rialzo della quota minima di 0,5 metri per la sola cella 1S (vedi Figura 7.3). Un adeguamento relativo ai volumi esondabili in occasione di una piena duecentennale richiederebbe adeguamenti arginali di 1 metro per le celle 1S, 6S e 8S e di 0,5 metri per la cella 4S (vedi Figura 7.4).

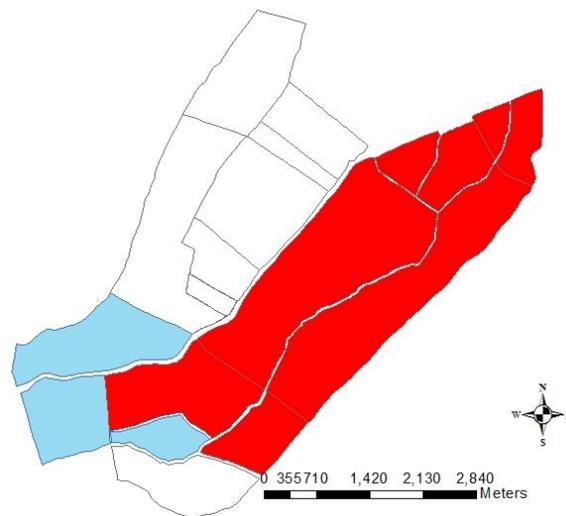


Figura 7.3: scenario di allagamento per un evento con $Tr=100$, con argine in destra idraulica modificato e con intervento di adeguamento

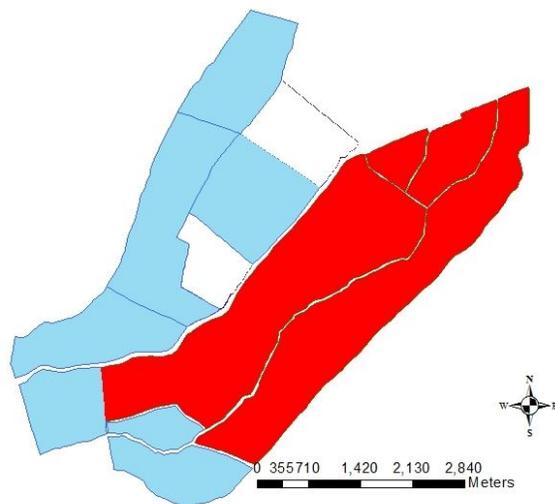


Figura 7.4: scenario di allagamento per un evento con $Tr=200$, con argine in destra idraulica modificato e con intervento di adeguamento

8. Considerazioni conclusive

Il caso di studio prende in esame il tratto vallivo del fiume Montone, nei pressi della chiusa di S. Marco, le cui criticità, particolarmente significative data la vicinanza al centro urbano della città di Ravenna, sono evidenziate negli studi dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli presi a riferimento nel presente lavoro (v. ad es. AdB-RR, 2011). Tali criticità sono da attribuirsi principalmente alle condizioni di limitata officiosità idraulica della chiusa di S. Marco, nonché alle problematiche legate al rischio di esondazione lungo tutto il tratto vallivo del fiume Montone, a monte della chiusa stessa. Nell'ambito della presente attività di ricerca si sono approfondite le condizioni di pericolosità del fiume Montone mediante l'implementazione di una modellistica idraulica quasi-bidimensionale, predisposta per la valutazione delle reali condizioni di criticità del tratto in esame e per l'identificazione di politiche di mitigazione del rischio idraulico. Le valutazioni numeriche condotte hanno reso possibile una prima quantificazione dei volumi esondabili dall'attuale sistema arginale per diversi scenari di piena, evidenziando le attuali criticità, nonché i volumi di invaso necessari per la messa in atto di politiche di mitigazione della pericolosità idraulica mediante la laminazione temporanea dei deflussi di piena in aree esterne alle arginature. Studi precedenti (Adipietro, 2012) hanno mostrato come la Chiusa San Marco rappresenti una criticità importante per il Fiume Montone fino a eventi con tempo di ritorno minore di 100 anni, poiché per eventi più intensi, le strutture arginali a monte della stessa non riescono comunque a contenere le portate transistanti. Anche una modifica della Chiusa San Marco, per come è stata proposta (vedi par. 6.1.3), risulta essere influente sui profili di moto solo per un breve tratto a monte della Chiusa stessa, e totalmente trascurabile per eventi particolarmente intensi (e.s. per Tr pari a 200 e 500 anni). Di contro però va detto che effettuare le modifiche proposte alla Chiusa, riduce i volumi esondati a monte, per cui anche se tale modifica non è sufficiente a garantire la sicurezza per eventi straordinari è utile a renderli meno dannosi.

Le analisi idrauliche sono state quindi affiancate da un'approfondita valutazione dell'andamento topografico del territorio, che ha permesso di identificare, sulla base delle attualità caratteristiche altimetriche dell'area prospiciente il corso

d'acqua, le odierne potenzialità di invaso, e le disponibilità volumetriche sfruttabili nel caso di contenuti interventi di adeguamento dei contorni delle celle idrauliche individuate.

Le indagini condotte hanno senz'ombra di dubbio messo in risalto che, a fronte di una diffusa condizione di criticità nell'attuale sistema arginale, vi è la disponibilità di aree agricole le cui caratteristiche topografiche ben si prestano allo stoccaggio temporaneo dei deflussi di piena, e le cui potenzialità in termini di laminazione possono consentire una notevole riduzione del rischio di esondazioni nel tratto fluviale prospiciente il centro di Ravenna.

La modellazione delle aree allagabili come storage areas ha permesso di valutare i volumi di esondazione per ogni comparto. Le criticità maggiori sono risultate senz'altro relative agli scenari in cui la chiusa e gli sfioratori sono modellati secondo la geometria attuale.

Con riferimento ai volumi esondabili in destra e in sinistra idraulica al variare degli eventi di piena (vedi Tabella 5.2) in relazione ai volumi invasabili allo stato attuale (vedi tabelle 4.3, 4.4) e nelle diverse ipotesi progettuali (tabelle 4.7, 4.8 e 4.9) è possibile fare delle prime considerazioni.

Facendo riferimento all'evento di piena con portata di picco pari a $650 \text{ m}^3/\text{s}$ il volume complessivamente esondato nel tratto a monte della chiusa di S. Marco è stimabile in circa $60,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, ampiamente contenibile, già nella loro configurazione attuale, dall'insieme delle celle posizionate alla destra idraulica del Montone.

Tale condizione non si verifica invece per lo scenario con portata massima di $750 \text{ m}^3/\text{s}$, per il quale occorrerebbe almeno un rialzo dei contorni delle celle di 0.5 m . Tale condizione assicurerebbe infatti la possibilità di gestire il volume di circa 1.5 Mm^3 esondabile dalle attuali arginature (v. Tabella 5.2 e Tabella 4.9).

Le condizioni diventano via via più gravose passando ad eventi di piena associati a tempi di ritorno più elevati, che risultano caratterizzati da volumi esondabili particolarmente importanti. Nel caso di evento centennale il volume non contenuto in alveo supera i 7 Mm^3 ; il suo contenimento richiederebbe un intervento di rialzo considerevole (rialzo pari ad almeno 1 m ; vedi Tabella 4.9) su

tutto il sistema di celle individuate. Con questo nuovo assetto, il volume disponibile all'esterno del sistema arginale sarebbe anche pressoché sufficiente per la gestione di un evento di piena duecentennale.

Appare tuttavia importante sottolineare che tali considerazioni sono condotte sulla base dell'assunzione di una completa officiosità idraulica del tratto più a monte del fiume Montone, ritenuto pertanto in grado di contenere entro l'alveo anche eventi di piena duecentennali. Tale condizione, per quanto cautelativa per i propositi del presente studio, non appare realistica alla luce delle valutazioni emerse dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (AdB-RR, 2011) secondo il quale le condizioni di officiosità appaiono critiche già per eventi di piena aventi tempi di ritorno circa trentennali.

È emerso inoltre, con un assetto geometrico della chiusa allo stato attuale, un abbassamento localizzato del rilevato argine in destra idraulica apporti sicuramente dei benefici per quanto riguarda la messa in sicurezza della città di Ravenna, posta poco a valle della Chiusa, o comunque salvaguardi maggiormente i territori in sinistra idraulica in generale per tutti e cinque gli eventi di piena considerati, sebbene allo stesso tempo comporti un problema di contenimento dei volumi esondati, come visto nel capitolo 6. In particolare, seppur modesti (v. Tabella 6.26), le celle 6D, 7D, 8D e 9D necessiterebbero di adeguamenti in quota dei rispettivi contorni di delimitazione.

La piena centennale necessita di un modesto adeguamento solo per la cella 1S. In destra idraulica, le celle poste più a monte, precisamente le celle 1D, 2D, 3D, 4D e 5D, riescono a contenere i volumi esondati ma necessitano di adeguamenti, anche di discrete entità. Le restanti celle, poste più a valle dello sfioratore modificato, mostrano un'incapacità di contenimento dei volumi esondati, di gran lunga maggiori delle capacità di invaso offerte dalle celle stesse.

In ultimo, in caso di eventi con $Tr=200$ e $Tr=500$, sebbene ci sia bisogno di adeguamenti arginali, in sinistra idraulica è garantita la capacità di invaso per tutte le celle. In destra idraulica invece permangono i problemi di invaso dei volumi esondati.

In accordo con l'obiettivo del presente lavoro nella parte di territorio posta a valle della chiusa San Marco, in sinistra idraulica del fiume Montone, è garantita la

sicurezza idraulica fino a eventi di piena associabili a un tempo di ritorno di cinquecento anni. Gli strumenti modellistici e le informazioni altimetriche acquisite durante la presente attività di Tesi costituiranno strumenti di sicuro interesse per le future indagini di approfondimento sulle più idonee misure di mitigazione del rischio idraulico lungo il tratto vallivo del Montone.

9. Riferimenti Bibliografici

- AdB-RR, (2011), Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico - Variante al Titolo II “Assetto della rete idrografica”, adottata dal Comitato Istituzionale con delibera n. 2/2 del 16 novembre 2011 ed approvata con Delibera Giunta Regionale n. 1877 del 19 dicembre 2011.
- ADIPIETRO F., *Modellazione numerica per l'analisi delle criticità del fiume Montone in Provincia di Ravenna*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università di Bologna, AA 2011/2012.
- APC-RER, DICAM (2012), *Terza annualità: valutazione delle condizioni di rischio idraulico associate al territorio regionale e predisposizione di scenari idrologico-idraulici di riferimento*, Convenzione quadro-quinquennale di ricerca, pp. 79-87.
- APC-RER, DICAM (2013), *Quarta annualità: individuazione di misure di mitigazione del rischio idraulico e predisposizione di metodologie speditive per la previsione quantitativa dei danni da inondazione fluviale*, Convenzione quadro-quinquennale di ricerca, pp. 53-68.
- BARREDO J. I., Normalised flood losses in Europe: 1970-2006, *Natural Hazard and Earth System Science*, 9(1), 97-104, doi:10.5194/nhess-9-97-2009, 2009.
- BATTISTINI G., *Valutazione delle aree a rischio inondazione mediante modellistica idraulica bidimensionale: caso studio del fiume Montone a Chiusa San Marco (RA)*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Università di Bologna, AA 2011/2012
- BRATH A., CASTELLARIN. A., DI BALDASSARRE G., DOMENEGHETTI A. (2010), *Linee strategiche di intervento per la mitigazione del rischio alluvionale lungo il corso medio-inferiore del fiume Po*. L'acqua, 2/2010, pp. 9-24.

- BRATH A., DOMENEGHETTI A. (2013), *Metodi di valutazione delle mappe di pericolosità e di rischio di alluvioni*. L'Acqua, 5/6, pp. 85- 102.
- BOUWER L.M., BUBECK P., AERTS J. C. J. H., Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area, *Global Environmental Change*, 20(3), 463-471, doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.04.002, 2010.
- BUCHELE B., KREIBICH H., KRON A., THIEKEN A.H, IHRINGER J., OBERLE P., MERZ B., NESTMANN F., Flood-risk mapping: contributions toward an enhanced assessment of extreme events and associated risks, *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(4), 485-503, doi:10.5194/nhess-6-485-2006, 2006.
- CARRISI F., *Modello quasi-bidimensionale per la valutazione del rischio idraulico da esondazione fluviale nella pianura padana*, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Università di Bologna, AA 2010/2011.
- CISCAR J., *Climate change impacts in Europe, Final report of the PESETA research project.*, 2009.
- EXCIMAP: Handbook on good practices for flood mapping in Europe, European E. [online] Available from: http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas/index.htm, 2007.
- HASHIMOTO R., STEDINGER J.R., LOUCKS D.P., *Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for water resource System Performance Evaluation*, Water Resources Research, 18, 14-20, 1982.
- MERZ B., THIEKEN A.H., GOCHT M., Flood risk mapping at local scale: concepts and challenges, *Flood Risk Management in Europe: Innovation in Policy and Practice*, edited by J. W. Begum, S., Stive, M.J.F., and Hall, pp. 231-251, Springer, Dordrecht., 2007.
- MITCHELL J. K., *European river floods in a changing world*, *Risk Analysis*, 23(3), 567-74 [online] Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12836849>, 2003.

Siti web consultati:

- www.esridipendente.it/Manuale%20ESRIDipendente.pdf
- [http://it.wikipedia.org/wiki/Montone_\(fiume\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Montone_(fiume))
- www.floodsite.net
- www.kulturisk.eu/home
- <http://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it>

10. ALLEGATO A

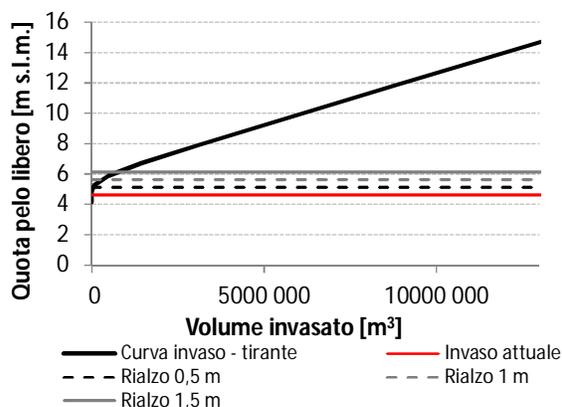
Con riferimento alle celle idrauliche individuate in sinistra e in destra idraulica del tratto vallivo del Fiume Montone (v. Figura 5.2.2) si riportano di seguito, sia in formato grafico che in formato tabellare, le curve altezza-volume estratte per ogni cella facendo riferimento al DEM altimetrico a risoluzione 5 m (v. Figura 5.2.1).

Le linee orizzontali riportate nei grafici contraddistinguono distinte condizioni di utilizzo della generica cella, specificando la quota minima adottata nelle diverse configurazioni topografiche per il contorno di delimitazione della cassa stessa. Le attuali capacità d'invaso sono rappresentate mediante la linea rossa, mentre le possibili configurazioni progettuali sono indicate come di seguito:

- ipotesi di rialzo di 0,5 m, linea nera tratteggiata;
- ipotesi di rialzo di 1 m, linea grigia tratteggiata;
- ipotesi di rialzo di 1,5 m, linea grigia continua;

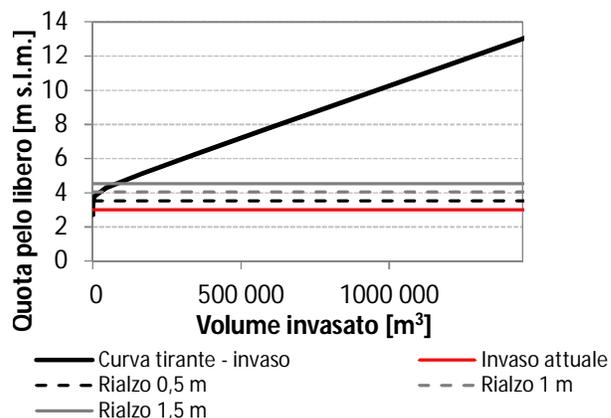
Celle in sinistra idraulica

Cella 1	
Quota pelo libero [m s.l.m]	Volume invasato [m ³]
4.17	0
4.33	9
4.54	271
4.85	6 629
5.28	84 559
5.88	493 215
6.72	1 493 215
7.90	3 169 113
9.54	5 592 292
11.85	9 039 052
15.08	13 989 760



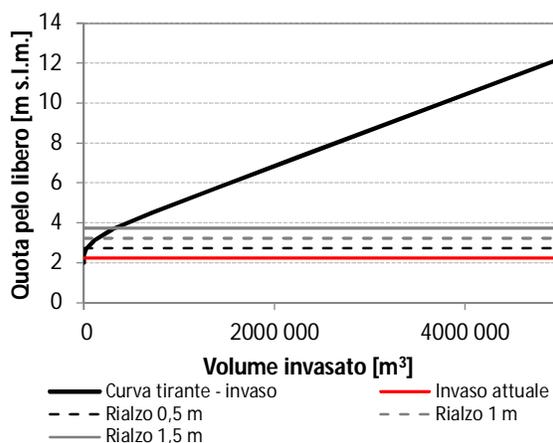
Cella 2

<i>Quota pelo libero [m s.l.m]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
2.7	0
2.85	0
3.06	0
3.35	34
3.76	4 469
4.33	48 425
5.14	167 706
6.26	345 006
7.83	599 006
10.03	960 374
13.12	1471218



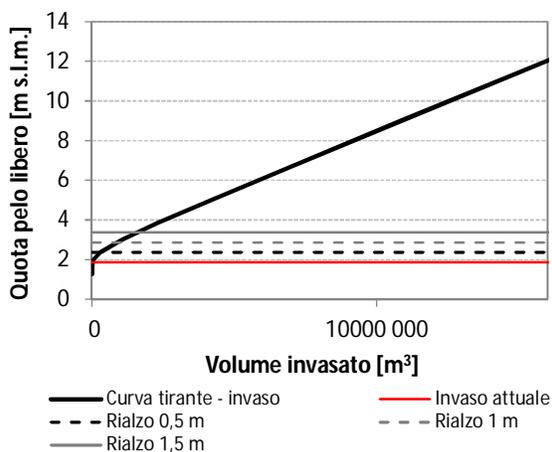
Cella 3

<i>Quota pelo libero [m s.l.m]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
1.99	0
2.14	42
2.36	1 028
2.66	19 086
3.09	103 862
3.69	302 777
4.52	722 679
5.69	1 366 380
7.33	2 274 759
9.62	3 547 559
12.83	5 344 558



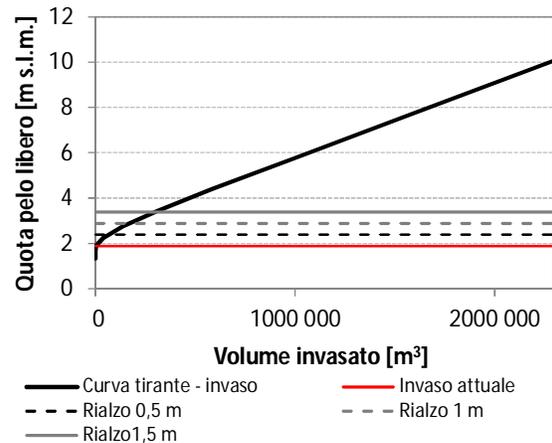
Cella 4

<i>Quota pelo libero [m s.l.m]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
1.27	0
1.43	30
1.65	556
1.96	29 368
2.39	300 527
3	1 023 673
3.85	2 299 748
5.04	4 244 700
6.7	7 018 592
9.03	10 927 710
12.3	16 446 160



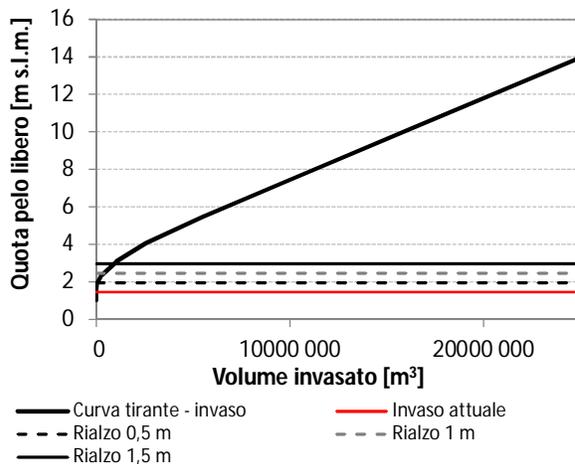
Cella 5

<i>Quota pelo libero [m s.l.m]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
1.34	0
1.47	5
1.65	129
1.9	2 198
2.26	40 646
2.75	136 287
3.44	308 252
4.41	587 332
5.77	996 889
7.67	1 571 509
10.33	2 379 543



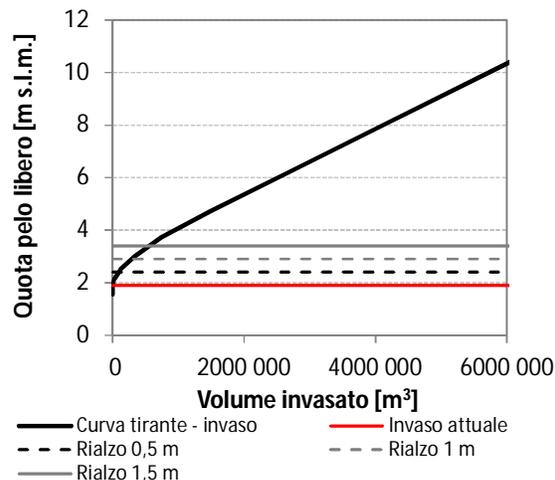
Cella 6

<i>Quota pelo libero [m s.l.m]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
1.02	0
1.21	12
1.47	100
1.84	18 284
2.35	274 325
3.06	1 037 335
4.06	2 572 328
5.46	5 494 591
7.42	9 984 207
10.16	16 277 330
14.01	25 126 620



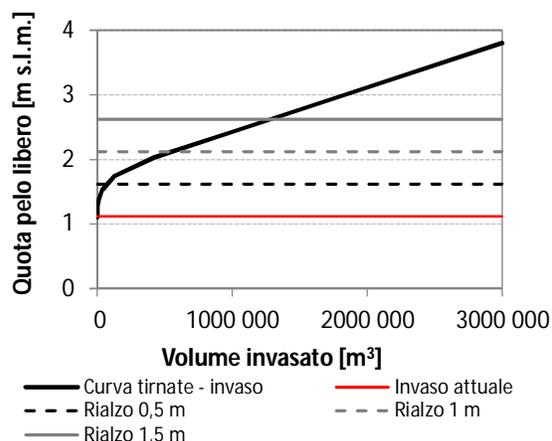
Cella 7

<i>Quota pelo libero [m s.l.m]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
1.57	0
1.7	4
1.88	74
2.14	22 681
2.5	117 867
3.01	335 119
3.72	742 582
4.71	1 487 734
6.1	2 593 716
8.04	4 145 771
10.76	6 336 251



Cella 8

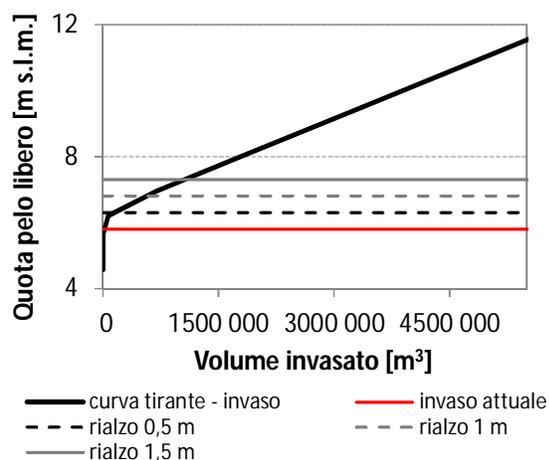
Quota pelo libero [m s.l.m.]	Volume invasato [m ³]
1.11	0
1.15	88
1.2	603
1.28	3 871
1.38	13 239
1.53	37 311
1.74	123 436
2.03	421 827
2.43	1 002 702
3	1 833 744
3.8	3 000 813



Celle in destra idraulica

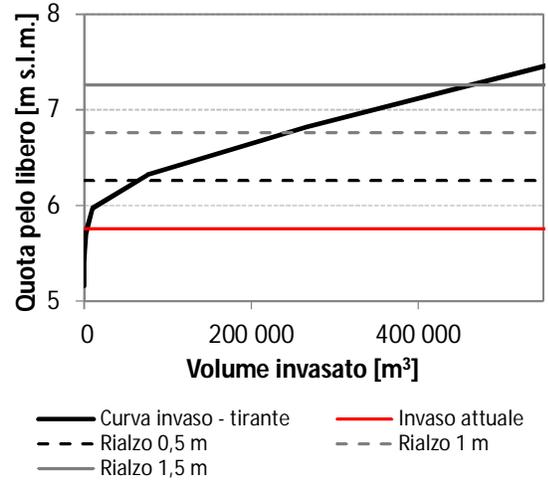
Cella 1

Quota pelo libero [m s.l.m.]	Volume invasato [m ³]
4.57	0
4.67	2
4.81	6
5.01	16
5.28	71
5.67	531
6.21	66 465
6.96	699 476
8.02	1 805 404
9.49	3 350 216
11.56	5 531 364



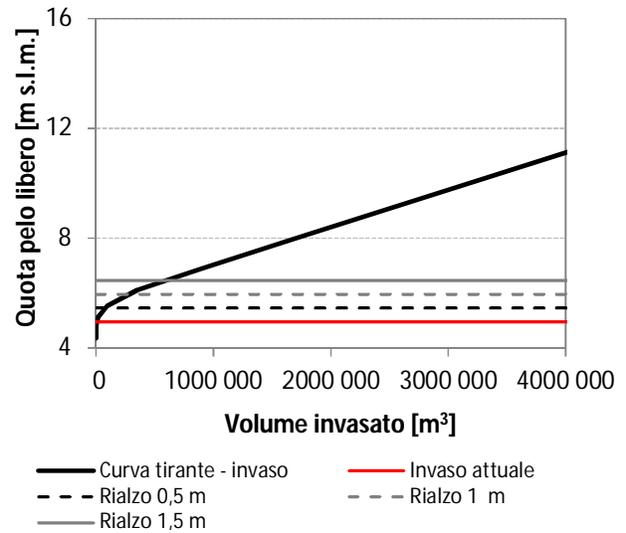
Cella 2

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
5.16	0
5.19	3
5.24	17
5.31	67
5.4	216
5.53	660
5.71	2 105
5.97	9 775
6.32	75 713
6.82	266 549
7.51	574 955



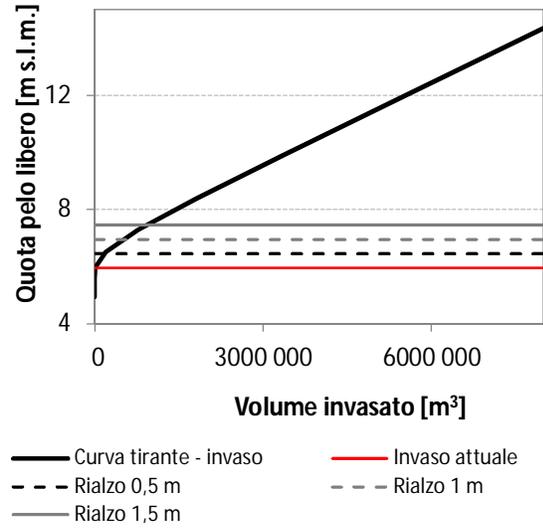
Cella 3

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
4.36	0
4.47	8
4.62	78
4.83	726
5.12	16 499
5.53	94 922
6.11	352 660
6.91	905 141
8.04	1 730 322
9.62	2 891 607
11.83	4 532 068



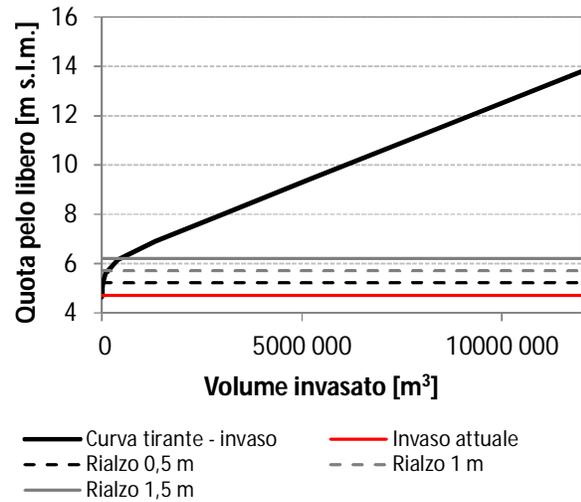
Cella 4

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
4.95	0
5.09	5
5.29	65
5.57	559
5.96	7 164
6.51	192 446
7.29	774 945
8.37	1 800 125
9.88	3 343 160
11.99	5 528 187
14.95	8 626 864



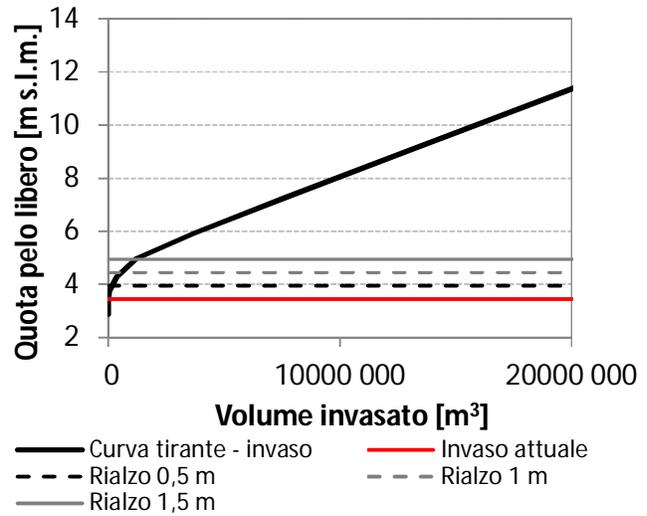
Cella 5

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
4.64	0
4.77	952
4.97	6 801
5.24	25 253
5.62	98 295
6.15	392 726
6.9	1 338 928
7.94	2 923 407
9.4	5 175 361
11.45	8 349 304
14.31	12 801 270



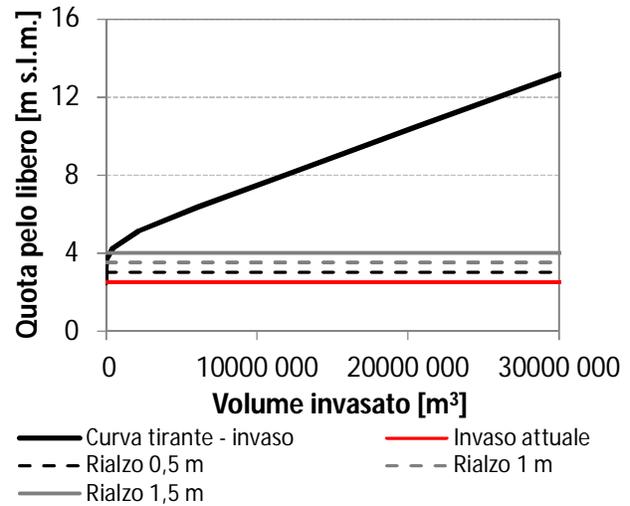
Cella 6

<i>Quota pelo libero</i> [m s.l.m.]	<i>Volume invasato</i> [m ³]
2.88	0
3.01	4
3.19	90
3.44	3 756
3.79	72 808
4.28	362 134
4.97	1 195 890
5.93	3 701 033
7.27	7 676 768
9.15	13 305 490
11.78	21 295 380



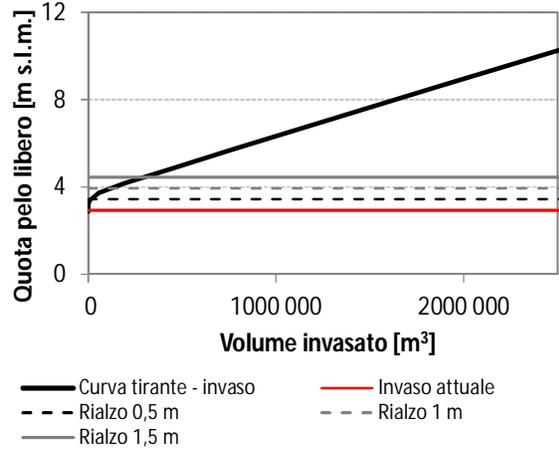
Cella 7

<i>Quota pelo libero</i> [m s.l.m.]	<i>Volume invasato</i> [m ³]
2.5	0
2.66	27
2.89	229
3.21	1 372
3.65	24 997
4.28	456 201
5.15	2 176 535
6.37	6 065 348
8.08	12 060 740
10.47	20 501 840
13.82	32 399 320



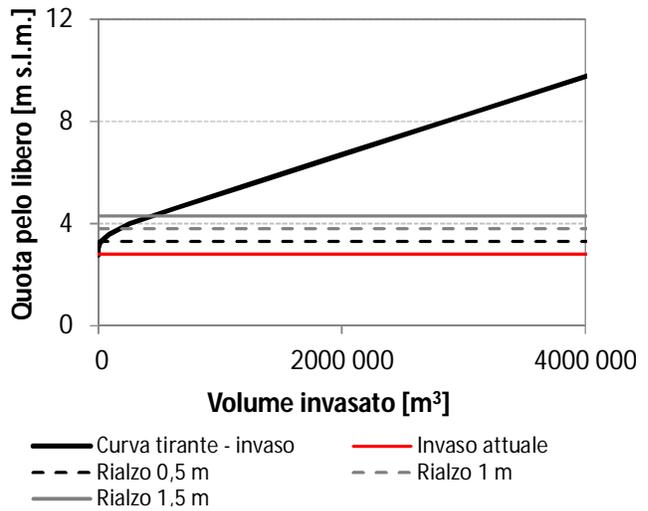
Cella 8

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
2.87	0
2.99	12
3.16	447
3.39	7 129
3.71	53 226
4.17	198 155
4.8	430 172
5.69	761 767
6.93	1 226 900
8.68	1 890 182
11.11	2 826 818



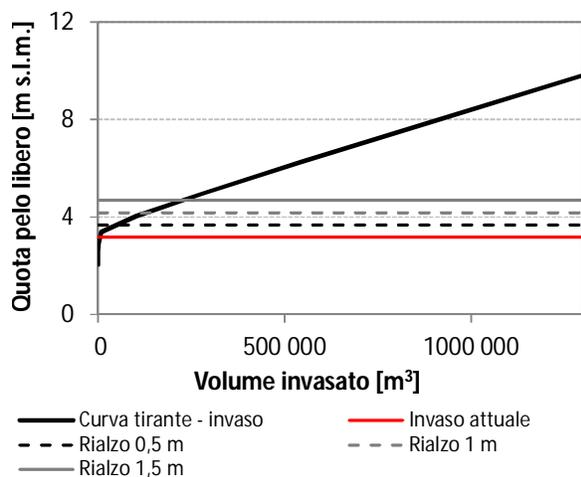
Cella 9

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
2.77	0
2.88	16
3.04	894
3.26	13 699
3.56	86 429
3.99	257 504
4.59	631 332
5.43	1 175 307
6.6	1 937 526
8.24	3 008 133
10.54	4 513 630



Cella 10

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
2.05	0
2.17	6
2.34	60
2.58	347
2.91	1 095
3.38	8 043
4.04	102 012
4.96	280 722
6.25	544 271
8.05	920 640
10.58	1 461 873



Cella 11

<i>Quota pelo libero [m s.l.m.]</i>	<i>Volume invasato [m³]</i>
2.84	0
2.96	7
3.12	70
3.35	698
3.67	7 472
4.11	86 176
4.74	341 731
5.61	739 726
6.84	1 319 056
8.56	2 150 518
10.96	3 341 052

