

CASSA DI ESPANSIONE DEL TORRENTE BAGANZA NEI COMUNI DI FELINO, SALA BAGANZA, COLLECCHIO E PARMA (PR-E-1047)

PROGETTO DEFINITIVO

A	10/2016	Prima emissione	MB	PM	DC
INDICE	DATA	MODIFICHE	DISEGN.	CONTR.	APPROV.

GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA E GEOTECNICA RELAZIONE TECNICA STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE ED IDRAULICA

MAJONE&PARTNERS
ENGINEERING

Prof. Ing. Ugo Majone
Dott. Ing. Denis Cerlini
Dott. Ing. Marco Belicchi
Dott. Ing. Nicola Pessarelli
Dott. Ing. Michele Ferrari
Dott. Ing. Gaetano Di Franca

MANDANTE
STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

AMBITER S.r.l.
società di ingegneria ambientale

Dott. Geol. Giorgio Neri
Dott. Amb. Gabriele Virgili
Dott. Amb. Alessio Ravera
Dott. Amb. Ecol. Adelia Sabatino
Dott. Nat. Silvia Del Fiore
Dott. Arch. Daniela Pisciotto
Dott. Leg. Rossana Valentini

MANDANTE
ASPETTI GEOLOGICI ED IDROGEOLOGICI

EG
ENGINEERING GEOLOGY

Prof. Geol. Giovanni Paolo Beretta
Dott. Geol. Maurizio Nespoli
Dott. Geol. Monica Avanzini
Dott. Geol. Anna Cantoni
Dott. Marta Maiocchi

MANDANTE
ANALISI DELL'ASTA FLUVIALE

Studio Prof. Ing.
Alberto Bizzarri

Prof. Ing. Alberto Bizzarri

MANDANTE
ASPETTI STRUTTURALI

Ing. Claudio Marcello S.r.l.
Dott. Ing. Carlo Claudio Marcello

MANDANTE
ASPETTI GEOTECNICI

colleselli & p.
INGEGNERIA GEOTECNICA
Prof. Ing. Francesco Colleselli

PER IL R.T.P.:

Dott. Ing. Denis Cerlini

(documento firmato digitalmente)

IL R.U.P.:

Dott. Ing. Mirella Vergnani

(documento firmato digitalmente)

CONSULENTI:

MODELLAZIONE FISICA E NUMERICA

DICATeA - Università degli studi di Parma
(Prof. Ing. Paolo Mignosa)

ASPETTI ARCHEOLOGICI

AR/S Archeosistemi società Cooperativa
(Archeologa Lorenza Bronzoni)

CODICE ELABORATO:

B A G 2 0 3 G E O R R E 0 5 A

ID (1)

CAP. (2)

TIPO (3)

DOC. (4)

PROGR. (5-6) REV. (7)

SCALA

OTTOBRE
2016

IL RESPONSABILE DELL'ATTIVITÀ SPECIALISTICA:

Prof. Ing. Paolo Mignosa

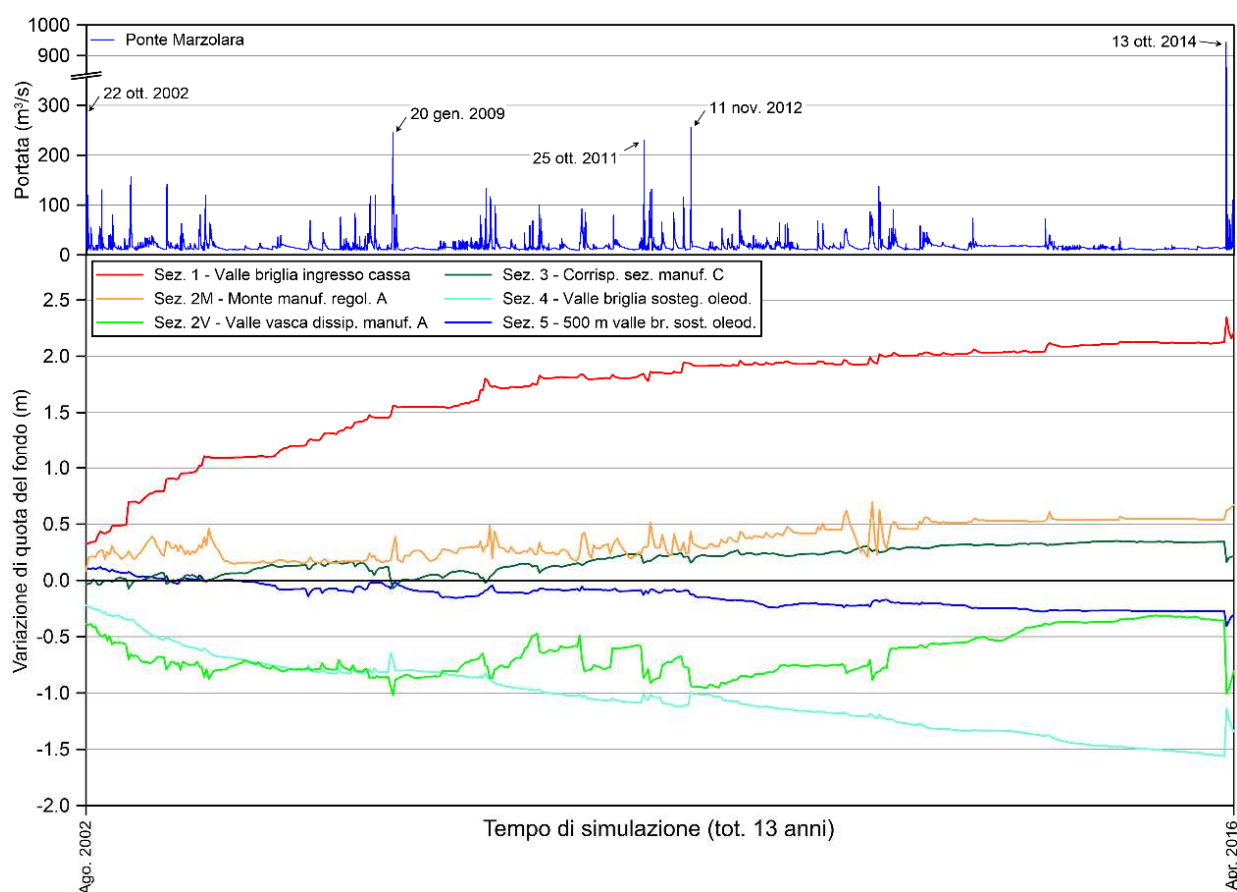
(documento firmato digitalmente)



*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente,
del Territorio e Architettura – **DICATeA**
Università degli Studi di Parma*

RELAZIONE TECNICA

STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO DEL TORRENTE BAGANZA



Gruppo di lavoro:

Prof. Paolo Mignosa, Ing. Marco D'Oria, Ing. Francesca Aureli, Ing. Jr. Mirco Boldrini

Parma, ottobre 2016

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. MODELLAZIONE DI ALVEI A FONDO MOBILE	4
2.1 CODICE DI CALCOLO HEC-RAS.....	4
2.1.1 <i>Equazione di continuità dei sedimenti.....</i>	<i>5</i>
2.1.2 <i>Classi granulometriche e capacità di trasporto.....</i>	<i>5</i>
2.1.3 <i>Limiti applicabili all'equazione di continuità</i>	<i>7</i>
2.1.4 <i>Variazione della geometria del fondo</i>	<i>9</i>
2.1.5 <i>Condizione al contorno di monte dei sedimenti</i>	<i>10</i>
3. AREA DI STUDIO E IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO.....	11
3.1 INQUADRAMENTO	11
3.2 DATI DISPONIBILI	12
3.2.1 <i>Modelli digitali del terreno</i>	<i>12</i>
3.2.2 <i>Serie storica dei livelli idrometrici a Marzolarà</i>	<i>12</i>
3.2.3 <i>Analisi granulometriche.....</i>	<i>14</i>
3.2.4 <i>Analisi delle tendenze evolutive degli ultimi anni.....</i>	<i>16</i>
3.3 MODELLO IDRAULICO 1D A FONDO MOBILE DEL TORRENTE BAGANZA.....	19
4. SIMULAZIONI EFFETTUATE E ANALISI DEI RISULTATI	23
4.1 STATO DI FATTO	23
4.1.1 <i>Influenza della condizione al contorno di monte.....</i>	<i>23</i>
4.1.2 <i>Analisi dei risultati</i>	<i>24</i>
4.2 SOLUZIONE "A"	26
4.2.1 <i>Simulazione di lungo periodo per la soluzione "A"</i>	<i>32</i>
4.3 SOLUZIONE "A OTTIMIZZATA"	35
4.3.1 <i>Simulazione di lungo periodo per la soluzione "A ottimizzata"</i>	<i>40</i>
5. CONCLUSIONI.....	42
6. BIBLIOGRAFIA	44

1. PREMESSA

Con Det. n°749 del 13.07.2016, L'AIPO - Agenzia interregionale per il fiume Po, ha reso efficace l'aggiudicazione della progettazione definitiva relativa ai *Lavori di realizzazione della Cassa di espansione del torrente Baganza nei comuni di Felino, Sala Baganza, Collecchio e Parma (PR-E-1047)* allo scrivente R.T.P. Majone & Partners S.r.l. – Ambiter S.r.l. – Studio Prof. Ing. Alberto Bizzarri – Studio Colleselli & Partners – EG Engineering Geology di G.P. Beretta e Associati – Ing. Claudio Marcello S.r.l. (di seguito RTP).

Il progetto preliminare (marzo 2015), trasmesso dall'AIPO a Regione e Autorità di Bacino del fiume Po, è stato validato ed inserito da questi ultimi, nel luglio 2015, tra le istanze di finanziamento per interventi di mitigazione del rischio idrogeologico proposte dalla Regione Emilia-Romagna, mediante la validazione delle schede istruttorie inserite nella piattaforma telematica ReNDIS-web, dando atto che l'intervento è coerente con gli atti di pianificazione territoriale e tra gli interventi prioritariamente individuati attraverso gli strumenti di analisi del rischio.

Con decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri in data 15 settembre 2015 è stato approvato il Piano stralcio per le aree metropolitane e le aree urbane con alto livello di popolazione esposta al rischio di alluvioni, nel quale l'intervento in questione è stato inserito in tabella D¹ allegata all'atto, con la previsione di un finanziamento di 55.000.000,00 Euro, come da previsione del progetto preliminare.

Al fine di individuare, nei tempi ristretti assegnati per la progettazione, soluzioni condivise che perseguissero obiettivi a scala sovracomunale (di bacino) nel rispetto delle esigenze locali, è stato avviato un percorso progettuale in grado di definire le migliori opzioni d'intervento attraverso una progettazione integrata e multidisciplinare, che analizzasse ex ante in modo coordinato le esigenze tecniche, le esigenze territoriali e le esigenze ambientali e che consentisse un confronto costruttivo con le Amministrazioni coinvolte e con i portatori di interesse e più in generale con la cittadinanza attiva.

Tale percorso di partecipazione con i diversi stakeholder, avviato da AIPO nell'autunno 2015 e conclusosi nel novembre dello stesso anno, ha così permesso d'individuare gli elementi migliorativi da utilizzare nello sviluppo della progettazione definitiva della Cassa d'espansione sul Torrente Baganza. In particolare, è emersa da diversi soggetti la necessità di sviluppare la progettazione della cassa di laminazione con una visione complessiva di bacino Parma-Baganza che permettesse, oltre alla realizzazione dell'invaso, l'individuazione delle azioni complementari da attuare lungo le aste di Parma e Baganza al fine della riduzione e mitigazione del rischio residuale.

Nel presente progetto definitivo è pertanto contenuta, oltre al progetto dell'opera in senso stretto, anche una prima complessiva risposta alle suddette richieste, mediante un'analisi idraulica e geomorfologica a livello d'asta fluviale nel tratto di Torrente Baganza compreso tra Calestano e la confluenza con il T. Parma, ed una diagnosi sulle

¹ Nella tabella D sono indicati gli interventi di mitigazione del rischio alluvionale che presentano un livello di progettazione preliminare e per i quali è necessario raggiungere tempestivamente un livello di progettazione definitivo od esecutivo al fine di consentire l'utilizzo immediato delle risorse che si renderanno disponibili

arginature esistenti, eseguita per tratti omogenei, nel tratto d'alveo del T. Parma a valle della città sino alla confluenza con il Fiume Po.

Il presente progetto definitivo è stato predisposto in conformità con l'art. 23 c.7 del D.Lgs 50/2016 nonché, in applicazione dell'art. 216, c.4 dello stesso, con gli artt.24÷32 del D.P.R. 207/2010 e s.m.i., ed individua compiutamente i lavori da realizzare nel rispetto dei criteri, dei vincoli, degli indirizzi e delle indicazioni stabiliti dalla stazione appaltante nell'ambito del progetto preliminare e delle successive fasi di partecipazione sopra accennate e nel rispetto, laddove possibile e/o pertinente, delle *“Linee guida per le attività di programmazione e progettazione degli interventi per il contrasto del rischio idrogeologico (versione 2.0 del settembre 2016 - #italiasicura)”*.

La presente Relazione Tecnica sintetizza i risultati della costruzione, taratura e simulazione di un modello idraulico a fondo mobile dell'asta del torrente Baganza, nel tratto Marzolaro-Ponte Nuovo.

Scopo principale del modello è di verificare l'influenza delle soluzioni progettuali prospettate per la realizzazione della cassa di espansione sul torrente Baganza sulla dinamica del trasporto solido. Nelle varie ipotesi progettuali la cassa prevede infatti la realizzazione di un manufatto di regolazione posto trasversalmente al corso d'acqua, nonché la sistemazione di un tratto di alveo a monte ed (eventualmente) a valle del manufatto stesso con riduzione della pendenza attuale dell'alveo e realizzazione di briglie (a monte) per riconnettere l'alveo “naturale” a quello sistemato e (eventualmente) di opere di sostegno a valle del manufatto stesso.

Questi interventi sono inevitabilmente tali da modificare la dinamica del trasporto solido lungo l'asta del torrente. Le simulazioni effettuate sono servite a valutare l'entità di tale modificazione e ad indirizzare verso la soluzione progettuale che fosse meno impattante sotto questo punto di vista.

La seguente Relazione è articolata come segue:

- nel Capitolo 2 viene brevemente introdotta la teoria dei modelli monodimensionali a fondo mobile, mettendo in evidenza potenzialità e limiti della stessa;
- nel Capitolo 3 viene inquadrata l'area in studio, vengono presentati i dati disponibili per la costruzione del modello e per l'effettuazione delle simulazioni. Vengono anche richiamate le analisi granulometriche all'uopo predisposte e quindi analizzate, mediante il confronto di due DEM realizzati a distanza di circa 7 anni l'uno dall'altro, le tendenze evolutive del corso d'acqua. Viene infine descritta la costruzione del modello del torrente;
- nel Capitolo 4 vengono descritte le simulazioni effettuate ed analizzati i risultati ottenuti, comparando in particolare le due soluzioni progettuali proposte;
- nel Capitolo 5, infine, vengono brevemente sintetizzate le conclusioni più rilevanti dello studio.

2. MODELLAZIONE DI ALVEI A FONDO MOBILE

L'utilizzo di modelli numerici per la simulazione di alvei a fondo mobile richiede la soluzione delle equazioni differenziali del moto a superficie libera e di continuità dei sedimenti, assieme ad alcune relazioni di chiusura per il calcolo della portata solida (cosiddette "formule di trasporto"), della concentrazione dei sedimenti trasportati in sospensione e della valutazione della cadente idraulica. A seconda del modello, le equazioni relative alla fase liquida e quella di continuità della fase solida possono essere risolte congiuntamente (modello accoppiato) o in maniera disgiunta (modello disaccoppiato). Esiste poi una differenziazione dei modelli in funzione del regime di moto e dello schema geometrico adottato (1D, 2D o 3D).

Si riportano di seguito le specifiche del codice di calcolo adottato in questo lavoro.

2.1 CODICE DI CALCOLO HEC-RAS

Per la modellazione numerica dei fenomeni di trasporto solido in alveo si è fatto uso del codice HEC-RAS v. 5.0.1 sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dello US Army Corps of Engineers (Brunner, 2016). Il modello idraulico è basato su uno schema di moto monodimensionale e, in presenza di trasporto di sedimenti, su un regime di moto quasi-stazionario (quasi-unsteady flow). In questa condizione di moto, un idrogramma di piena continuo viene sostituito da una serie discreta di profili di moto permanente, garantendo così una maggiore stabilità numerica della soluzione. Sebbene la portata liquida risulti costante all'interno di ciascuno degli intervalli temporali discreti considerati, i fenomeni di trasporto solido continuano la propria evoluzione. Per questo motivo, il modello quasi-stazionario fa esplicitamente uso di tre distinti intervalli temporali (time-step). Il primo, denominato "Flow Duration" (Figura 1) rappresenta la durata di ciascun intervallo discreto in cui HEC-RAS mantiene costante il valore di portata liquida; il secondo ("Computational Increment"), in genere inferiore al precedente, rappresenta il time-step con cui vengono aggiornati il profilo idrico e la geometria delle sezioni trasversali. Il "Computational Increment" è ulteriormente suddiviso in "Bed Mixing Time Steps" nei quali la curva granulometrica risulta aggiornata considerando i fenomeni di mescolamento o di corazzamento ("sorting" e "armoring").

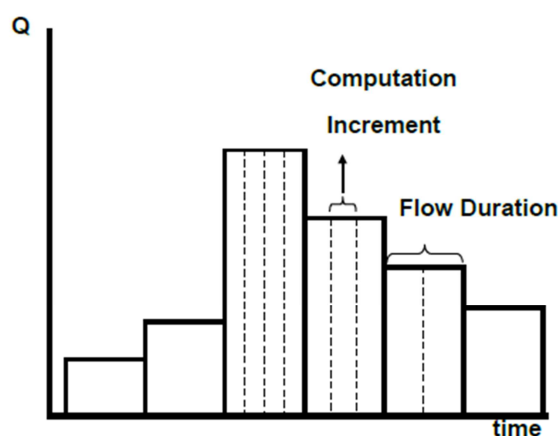


Figura 1 – Discretizzazione dell'idrogramma di piena in regime di moto quasi-stazionario.

2.1.1 Equazione di continuità dei sedimenti

Ai fini della modellazione del trasporto solido, HEC-RAS affianca alle equazioni del moto l'equazione di continuità dei sedimenti nota anche come relazione di Exner che, trascurando il trasporto in sospensione, ha espressione:

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x}$$

dove B rappresenta la larghezza della sezione trasversale interessata dal trasporto solido, η la quota del fondo alveo, λ_p la porosità del materiale solido, t il tempo, x l'ascissa curvilinea e Q_s la portata solida.

Secondo l'equazione di Exner, la differenza tra la quantità di sedimenti entranti e uscenti da uno specifico volume di controllo deve uguagliare la quantità di materiale in esso accumulato o da esso rimosso. HEC-RAS risolve l'equazione di continuità dei sedimenti calcolando la capacità di trasporto per il volume di controllo ($Q_{s\ out}$) e confrontandola con la quantità di sedimenti entranti nello stesso volume di controllo da monte o per apporti laterali ($Q_{s\ in}$): se la capacità di trasporto supera l'apporto solido, HEC-RAS soddisfa il deficit erodendo i sedimenti dal fondo; nel caso opposto deposita il surplus.

La capacità di trasporto dei sedimenti per il volume di controllo è, a sua volta, una complessa funzione dell'idrodinamica e delle proprietà del materiale solido.

2.1.2 Classi granulometriche e capacità di trasporto

HEC-RAS è in grado di considerare il fuso granulometrico del materiale solido. Secondo le impostazioni predefinite, i sedimenti sono suddivisi in 20 classi (da 0.002 mm a 2048 mm) sulla base della classica scala di Wentworth (scala logaritmica in base 2) in cui il diametro appartenente alla classe superiore risulta essere il doppio di quello appartenente alla classe immediatamente inferiore.

Con riferimento ad una sezione trasversale, la capacità di trasporto rappresenta la massa di sedimenti di una particolare classe granulometrica massima trasportabile in relazione alle caratteristiche idrauliche della corrente. HEC-RAS calcola la capacità di trasporto separatamente per ciascuna classe granulometrica dei sedimenti, utilizzando una delle otto formule di trasporto disponibili e di seguito brevemente descritte.

Ackers e White (1973)

L'equazione di Ackers e White è una formula di trasporto totale sviluppata sulla base di dati sperimentali ottenuti per materiale solido relativamente uniforme variabile dalla sabbia alla ghiaia fine.

Engelund e Hansen (1967)

L'equazione di Engelund e Hansen è sempre una formula di trasporto totale ricavata sulla base di dati sperimentali, considerando sabbia con diametro variabile da 0.19 mm a 0.93 mm. È una delle più semplici formule di trasporto ma le applicazioni sono limitate ad alvei composti da sabbia.

Laursen e Copeland (1968)

L'equazione di Laursen è anch'essa una formula di trasporto totale ricavata sperimentalmente su campioni di limo, generalizzata poi da Copeland (1980) al trasporto di ghiaia.

Meyer-Peter e Müller (1948)

L'equazione di Meyer-Peter e Müller è una delle prime formule di trasporto sviluppate ed è ancora una tra le più largamente utilizzate. Essa prevede che il movimento delle particelle solide si abbia quando l'indice di mobilità di Shields applicato supera quello per il movimento. La formula è stata ricavata sulla base di esperimenti con materiale sabbioso e ghiaioso e risulta essenzialmente applicabile a corsi d'acqua ghiaiosi.

Indicando con

$$\phi = \frac{q_s}{d\sqrt{\Delta g d}}$$

la portata solida normalizzata, dove q_s è la portata solida volumetrica per unità di larghezza dell'alveo, d è il diametro della particella, $\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$ il peso specifico immerso normalizzato del materiale solido e g l'accelerazione di gravità e con

$$\Psi = \frac{RJ}{\Delta d}$$

il parametro di mobilità di Shields, dove R è il raggio idraulico e J la cadente, e con Ψ_c il suo valore critico, la formula di Meyer-Peter e Müller si scrive

$$\phi = 8(\Psi - \Psi_c)^{1,5} \text{ con } \Psi_c = 0.047$$

In HEC-RAS è anche disponibile la correzione di Wong e Parker alla formula di Meyer-Peter e Müller basata sui risultati ottenuti da questi autori nel 2006:

$$\phi = 3.97(\Psi - \Psi_c)^{1,5} \text{ con } \Psi_c = 0.0495$$

Toffaletti (1968)

L'equazione di Toffaletti è una formula di trasporto totale sviluppata per le particelle di sabbia. Questa equazione viene in genere applicata a grandi corsi d'acqua essendo stata sviluppata sulla base di dati sperimentali derivanti da sistemi di questo tipo e con elevato trasporto di sedimenti in sospensione.

Yang (1973, 1984)

L'equazione di Yang è una formula di trasporto totale basata sul prodotto tra la velocità della corrente e lo sforzo tangenziale. Essa include due relazioni differenti a seconda che si voglia determinare il trasporto di sabbia o ghiaia e risulta molto sensibile alla velocità della corrente.

Wilcock (2003)

L'equazione di Wilcock e Crowe infine, è una formula per il trasporto di fondo per alvei con sabbia e ghiaia. Il

trasporto è fondamentalmente dipendente dal materiale in diretto contatto con la corrente e pertanto è adatta ai corsi d'acqua in cui la curva granulometrica riflette le proprietà del materiale in superficie.

Dopo aver calcolato la capacità di trasporto potenziale per ogni classe di sedimenti secondo una delle formule sopra esposte, si determina la capacità totale pesando le singole in funzione della distribuzione granulometrica.

Si ha quindi che:

$$T_c = \sum_{j=1}^n \beta_j T_j$$

dove T_c indica la capacità di trasporto totale, n il numero di classi dei sedimenti, β_j la percentuale di presenza della classe j nello strato potenzialmente erodibile e T_j la capacità di trasporto potenziale della j -esima classe.

2.1.3 Limiti applicabili all'equazione di continuità

L'equazione di continuità mette a confronto la capacità di trasporto con l'apporto di sedimenti per ciascuna classe granulometrica e ad ogni time-step. Tuttavia, questa differenza non è direttamente convertita in una variazione del fondo in quanto HEC-RAS applica alcuni vincoli fisici ai fenomeni di erosione e deposito, introducendo: un limite temporale al deposito, un limite temporale all'erosione e un processo di mescolamento e corazzamento del letto ("sorting" e "armoring").

Il limite temporale al deposito è basato sulla velocità di sedimentazione delle particelle. Si rapporta la distanza verticale media che una particella deve percorrere per raggiungere il fondo, funzione del profilo di concentrazione di ciascuna classe granulometrica, con quella che effettivamente può percorrere in un dato intervallo di tempo. In base a questo rapporto viene definito un coefficiente di efficienza al deposito che può ridurre il deposito stesso. HEC-RAS presenta cinque diversi metodi per valutare la velocità di sedimentazione: Ruby, Toffaletti, Van Rijn, Dietrich, Report 12.

Come il deposito, anche l'erosione è un processo che dipende dal tempo. HEC-RAS utilizza delle relazioni empiriche basate sulla "lunghezza caratteristica del moto" che, analogamente al deposito, permettono di definire un coefficiente di erosione che in alcune condizioni può limitare il fenomeno.

Un'altra limitazione all'erosione è legata ai fenomeni di mescolamento e corazzamento del letto. In alcune condizioni, il processo erosivo si esplica con una tendenza della corrente a rimuovere dal fondo le particelle più fini, permettendo la formazione di uno strato di materiale più grossolano definito "strato di corazzamento". Questo strato protegge il materiale più fine contenuto nel substrato diminuendo di conseguenza l'erosione in alveo. Ci sono, poi, condizioni idrodinamiche per le quali lo strato di corazzamento si può "rompere" innescando un rimescolamento del materiale solido.

HEC-RAS include tre diversi algoritmi per simulare questi fenomeni. Tutte le formulazioni dividono il fondo dell'alveo in uno strato attivo (Active Layer) ed in uno inattivo (Inactive Layer) (Figura 2). Lo strato attivo è quello

più superficiale ed è quello in cui si verifica il trasporto del materiale (o nel quale il materiale può essere trasportato). HEC-RAS calcola la capacità di trasporto basandosi sulla granulometria del solo strato attivo.

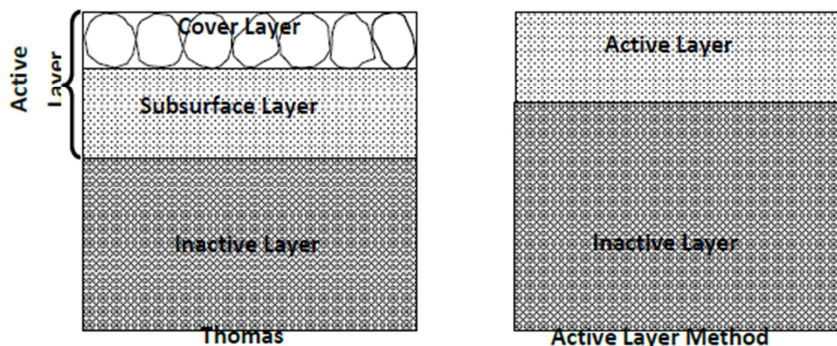


Figura 2 – Schema degli strati utilizzati per suddividere il fondo negli algoritmi di HEC-RAS.

I tre algoritmi di calcolo disponibili sono il metodo di Thomas (o Exner 5), quello di Copeland (o Exner 7) e il metodo dello strato attivo (Active Layer Method). Il metodo di Thomas è quello predefinito in HEC-RAS e del quale si danno maggiori dettagli. Esso consente un'ulteriore suddivisione dello strato attivo (Figura 2) in un "cover layer" (strato superficiale di copertura) e un "subsurface layer" (substrato). HEC-RAS calcola la capacità di trasporto considerando l'intero strato attivo (strato superficiale più substrato) ma il deposito o l'erosione avviene in prima battuta dal solo "cover layer".

Se le classi granulometriche più fini vengono erose più velocemente rispetto alle grandi, lo strato superficiale si arricchisce di materiale grossolano regolando i processi di erosione. HEC-RAS è in grado di prelevare materiale di una determinata granulometria senza ulteriori limitazioni fino a quando questa risulta essere disponibile nello strato di copertura. Quando il modello rimuove completamente una determinata granulometria dallo strato superficiale, esso proverà a soddisfare la capacità di trasporto di quella classe con i sedimenti del substrato. A questo punto sulla base di un coefficiente di corazzamento ("Armor Ratio", variabile tra 0 e 1) lo strato di superficie riduce o eventualmente preclude l'erosione dal substrato, lasciando la capacità di trasporto insoddisfatta.

Lo strato superficiale evolve durante la simulazione, variando la propria granulometria in risposta alla capacità di trasporto e all'apporto di sedimenti da monte. Tuttavia, ci sono due situazioni che possono causare la completa riconfigurazione dello strato superficiale:

Distruzione dello strato di copertura

Lo strato superficiale può erodersi fintantoché esso non risulta troppo sottile per regolare i processi di erosione. Raggiunto questo limite si ha un rimescolamento del materiale in superficie con il resto dello strato attivo individuando un nuovo, più spesso, strato di copertura superficiale.

Interrimento dello strato di copertura

HEC-RAS assume che lo strato superficiale non esista più, come unità stratigrafica distinta, se avviene un

processo di deposito che lo interriscie completamente (uno spessore di circa 60 cm). In questo caso si ha un rimescolamento del materiale costituente il fondo ed una completa riconfigurazione dello strato superficiale.

2.1.4 Variazione della geometria del fondo

Con riferimento ad un volume di controllo (Figura 3), una volta determinata la quantità di materiale da erodere o depositare, è necessario distribuirla nelle sezioni trasversali.

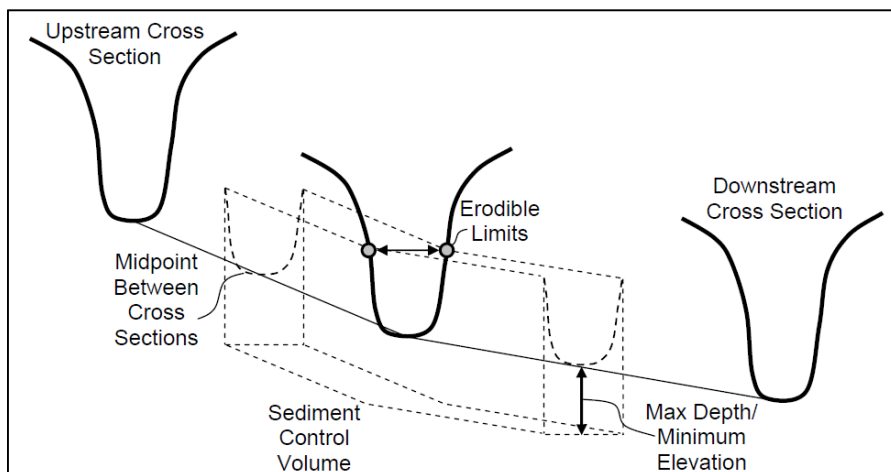


Figura 3 – Schema del volume di controllo associato con ciascuna sezione trasversale.

Il modello converte la massa in volume e distribuisce quest'ultimo a monte e a valle della sezione trasversale considerata, determinando così la variazione di area da assegnare alla sezione. HEC-RAS, poi, converte la variazione di area in una variazione della geometria della sezione applicando il "metodo veneer". Secondo il metodo veneer, tutti i punti della sezione al di sotto del pelo libero (e contenuti all'interno dei limiti inerodibili imposti dall'utente) vengono traslati in alto o in basso (rispettivamente in caso di deposito o erosione) della stessa quantità. La Figura 4 mostra un esempio di aggiornamento di una sezione trasversale nel caso di deposito o erosione.

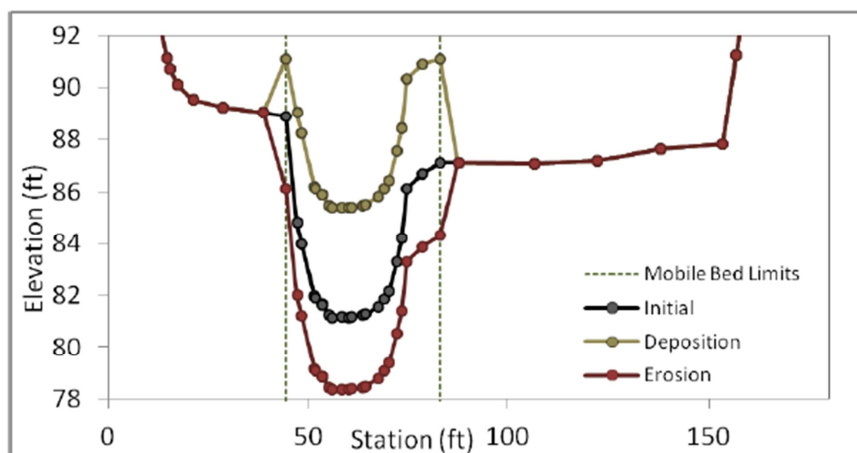


Figura 4 - Esempio di applicazione del metodo veneer nel caso di deposito o erosione della sezione trasversale.

2.1.5 Condizione al contorno di monte dei sedimenti

Oltre alle normali condizioni al contorno necessarie a chiudere matematicamente il problema idraulico (una condizione al contorno a monte ed una a valle, se in entrambe le sezioni la corrente è lenta) è necessario fornire una condizione al contorno relativa ai sedimenti in ciascuna sezione di ingresso al modello.

HEC-RAS consente di specificare tre tipi di condizioni al contorno:

1. **serie temporale:** adottando questa c.c. è possibile specificare un andamento temporale delle portate solide entranti (provenienti da monte) per ciascuna classe in cui è stato suddiviso il fuso granulometrico. Si tratta, come è comprensibile, di una condizione che, nella maggior parte dei casi, è di difficile valutazione. Come caso limite è possibile specificare una serie temporale di portata solida nulla per tutte le classi granulometriche. Ciò simula l'esistenza, appena a monte della sezione di ingresso del modello, di un'opera in grado di trattenere pressoché tutto il materiale proveniente da monte, come ad esempio una diga;
2. **scala delle portate liquido-solidi:** occorre specificare una relazione tra la portata liquida immessa e la corrispondente portata solida, per ciascuna delle classi in cui è stato suddiviso il fuso granulometrico. Essa può essere determinata dall'utilizzatore sulla base di formule che ritiene valide nel caso specifico e di cui ha esperienza. Anche in questo caso è possibile, come caso limite, specificare una portata solida nulla per qualunque valore della portata liquida, a rappresentare l'esistenza di un'opera in grado di trattenere tutto il materiale solido proveniente da monte;
3. **"equilibrium load":** selezionando questa condizione il modello calcola, sulla base delle caratteristiche geometriche dell'alveo e della formula di trasporto scelta, la portata solida che corrisponde alla capacità di trasporto della sezione di ingresso, ovvero alla massima portata che essa è in grado di trasportare, se il tratto di monte è in grado di conferirgliela. Anche in questo caso il calcolo è condotto per ciascuna delle classi in cui è stato suddiviso il fuso granulometrico. Eventualmente, è possibile moltiplicare il valore calcolato dal modello per un coefficiente numerico adimensionale. Se tale valore è inferiore all'unità, tutte le portate solide calcolate dal modello vengono ridotte proporzionalmente (nel caso di coefficiente pari a zero si è ricondotti a portata in ingresso sempre nulla); se è superiore all'unità le portate vengono invece incrementate, come se da monte potesse pervenire più materiale solido di quanto la sezione di ingresso sia in grado di trasportare: è questo, per esempio, il caso di un alveo che, a monte della sezione di ingresso, presenta una capacità di trasporto maggiore, ad esempio dovuta ad una pendenza maggiore. È questa senz'altro la condizione al contorno di più semplice attribuzione; variando il coefficiente è poi possibile apprezzare come e fino a quale distanza la condizione al contorno di monte sia tale da influenzare i risultati.

3. AREA DI STUDIO E IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO

3.1 INQUADRAMENTO

L'area individuata per la costruzione della cassa di espansione è, come è noto, ubicata al confine tra i comuni di Parma e Felino, circa 2 km a valle del ponte di Sala Baganza (Figura 5).



Figura 5 – Area individuata per la costruzione della cassa di espansione sul torrente Baganza.

Il modello a fondo mobile ha lo scopo di simulare l'evoluzione temporale dell'alveo, sollecitato dalle portate transitanti nel torrente Baganza. Lo studio non può essere limitato alla sola zona sistemata nell'intorno dell'opera, ma deve essere esteso a tutta l'asta fluviale che può subire una apprezzabile modificazione della dinamica del trasporto solido a seguito della realizzazione dell'opera stessa. Poiché la lunghezza del tratto influenzato, verso monte e verso valle, non è nota a priori, occorre procedere a favore di sicurezza.

Essendo la condizione al contorno di monte relativa ai sedimenti largamente approssimata, in mancanza di osservazioni dirette sul trasporto solido, è bene estendere verso monte il tratto modellato per una distanza

sufficiente ad annullare, o a ridurre fortemente, gli effetti di tale condizione sui risultati nella zona di maggiore interesse. Per questa ragione, oltre che per la disponibilità di dati idrometrici, si è deciso di prolungare verso monte il tratto modellato fino al ponte di Marzolaro, distante circa 12 km dalla zona interessata dalla costruzione della cassa di espansione.

La condizione al contorno di valle è stata posta in corrispondenza della sezione di Ponte Nuovo, ove si dispone di una stazione di misura idrometrica e di una stima della scala delle portate. Si è pertanto modellata l'asta del torrente Baganza dal Ponte di Marzolaro al Ponte Nuovo.

3.2 DATI DISPONIBILI

3.2.1 Modelli digitali del terreno

A partire dal 2008, nell'area in esame sono stati eseguiti tre rilevamenti aerei mediante laser scanner (LiDAR).

Il primo, effettuato nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale del 2008, copre l'asta del torrente Baganza a partire da circa 1.5 km a valle della passerella pedonale di San Vitale Baganza e sino alla confluenza con il torrente Parma. Il modello digitale del terreno (DEM) da esso ricavato ha una risoluzione spaziale di 1 m e risulta depurato dagli elementi sovramontanti (vegetazione, edifici, ponti).

In data 17 ottobre 2014, pochi giorni dopo l'evento alluvionale che ha colpito la città di Parma, la Compagnia Generale Riprese Aeree (CGR) ha eseguito un secondo rilevamento LiDAR dell'asta del torrente Baganza. Tale rilievo è stato messo a disposizione degli enti competenti a fini conoscitivi e per motivi di indagine e studio. Dal rilievo LiDAR che copre l'asta del torrente Baganza a partire da Calestano fino alla confluenza in Parma, è stato ricavato un DEM avente risoluzione spaziale di 1 metro. Il rilievo è provvisto di contestuali Ortofoto aventi risoluzione spaziale di 0.1 metri al suolo. Anche in questo caso il DEM è stato depurato dalla CGR dagli elementi sovramontanti (vegetazione, edifici, ponti) per consentire l'estrazione di sezioni da inserire in un modello idraulico 1D o, direttamente, per effettuare una modellazione idrodinamica bidimensionale.

Un terzo rilievo LiDAR, commissionato da AIPO, è stato eseguito nel 2016. Esso copre l'asta del torrente Baganza a partire da circa 5 km a valle della passerella pedonale di San Vitale Baganza e sino alla confluenza con il torrente Parma, pur presentando una maggiore estensione laterale rispetto ai precedenti rilievi. Il DEM da esso ricavato ha una risoluzione spaziale di 1 m e risulta depurato dagli elementi sovramontanti (vegetazione, edifici, ponti).

3.2.2 Serie storica dei livelli idrometrici a Marzolaro

Nella sezione di monte, posta in corrispondenza del ponte di Marzolaro, si dispone dell'andamento dei livelli idrometrici a scansione oraria, a partire dall'agosto 2002 fino ad oggi. Da un'analisi preliminare è emerso che, nella prima metà dell'ottobre 2002 e nel periodo fine aprile - metà novembre 2009, lo strumento non sembra aver funzionato regolarmente: tale periodo è stato quindi escluso dalla simulazione. I livelli idrometrici orari sono stati convertiti in portate mediante una scala delle portate ottenuta dal DICATeA dell'Università di Parma sulla base di

uno studio di dettaglio del corso d'acqua nell'intorno della sezione di misura. La scala delle portate è riportata in Figura 6.

Si è poi deciso di trasformare le serie di portate a scansione regolare (oraria) in una serie di corrispondenti valori medi giornalieri, nei periodi nei quali la variazione di portata nella giornata risultava modesta (tipicamente lontano dagli eventi di piena), mantenendo invece la scansione oraria ove le rapide variazioni di portata lo richiedevano. In pratica, si è implementata una routine in Matlab che raggruppa le portate a scansione giornaliera, sostituendo la media ai singoli valori orari, allorquando lo scarto quadratico medio (SQM) delle portate a scansione oraria risulta inferiore ad un prefissato valore, definito dall'utente. Analisi preliminari hanno portato a riconoscere che un valore di SQM pari a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ garantisce il mantenimento a scansione oraria di tutti gli eventi di piena, senza nel contempo "falsificare" apprezzabilmente gli andamenti temporali negli altri periodi nei quali si è sostituita la media giornaliera ai valori orari. Al fine di accelerare le simulazioni senza ridurre apprezzabilmente la significatività dei risultati, si è deciso poi di eliminare dalla serie così ottenuta tutti i valori di portata inferiori a $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Per questi valori il trasporto solido è infatti di modesta entità, come mostra l'assenza di torbidità delle acque del torrente in condizioni di magra. Dei circa 13 anni di dati osservati utilizzabili (agosto 2002 – aprile 2016, al netto dei periodi di malfunzionamento dello strumento) rimangono così poco meno di 500 giorni, che sono stati "compattati" e sui quali sono state effettuate le simulazioni. La "compattazione" conseguente all'eliminazione dei periodi di portate modeste (o nulle) impedisce di riportare nei grafici la sequenza temporale "storica" (occorrerebbe "scompattare" la serie, introducendo i periodi di "non simulazione" cioè dei "buchi" nel diagramma) sebbene sia sempre possibile, volendo, ricostruirla a posteriori.

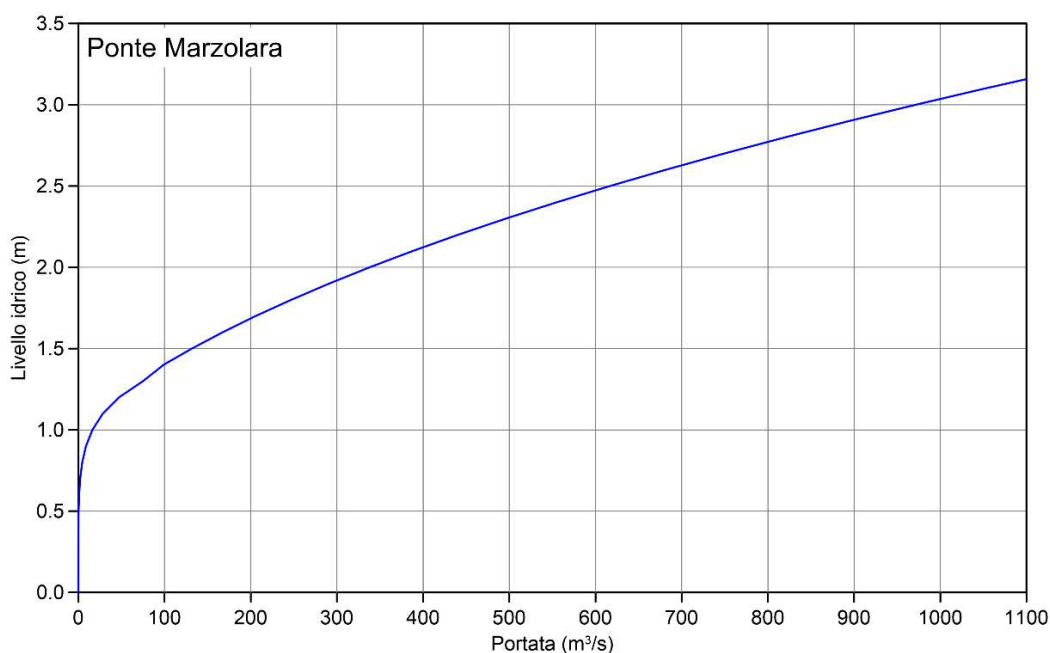


Figura 6 – Scala delle portate della sezione idrometrica in corrispondenza del Ponte di Marzolarà.

3.2.3 Analisi granulometriche

Per la modellazione numerica dei fenomeni di trasporto solido in alveo occorre specificare, per ciascuna sezione trasversale, la curva granulometrica del materiale che ne costituisce il letto. Per la caratterizzazione dei sedimenti del torrente Baganza sono stati condotti alcuni campionamenti in alveo nell'ambito delle indagini propedeutiche alla progettazione definitiva e commissionati al laboratorio Vicenzetto di Villa Estense (PD). Si riportano nel seguito i risultati principali rimandando alla specifica relazione per i dettagli.

Il tratto di torrente Baganza indagato si estende dal ponte di Marzolaro al ponte della tangenziale sud di Parma. Sono stati condotti cinque campionamenti denominati, da monte verso valle, come BAG1, BAG2, BAG3, BAG4 e BAG5. Il primo è stato condotto a monte del Ponte di Marzolaro, il secondo in prossimità della passerella pedonale di San Vitale Baganza, il terzo a valle del Ponte di Sala Baganza, il quarto in corrispondenza dell'abitato di San Ruffino e l'ultimo a monte del ponte della tangenziale sud di Parma, in località Casino della Rosa.

Per il campionamento dello strato superficiale è stato adottato il metodo numerale, con riferimento ad un transetto quadrato di lato 2 m, mediante una tecnica fotografica con successiva elaborazione delle immagini.

Successivamente al rilievo fotografico, è stato rimosso lo strato superficiale di materiale (di opportuno spessore) mediante un escavatore idraulico e prelevata dal substrato una quantità di sedimento sufficientemente rappresentativa della gamma granulometrica costituente il letto. La distribuzione granulometrica degli aggregati costituenti il substrato è stata ottenuta per setacciatura e relativa pesatura del materiale secco (metodo ponderale) secondo la norma UNI EN 933-1.

La Figura 7 mostra la curva granulometrica ottenuta per il substrato (metodo ponderale) nei cinque punti di campionamento, mentre la Figura 8 riporta le curve granulometriche relative allo strato superficiale (metodo numerale). Sebbene le differenze tra le curve granulometriche non siano sostanziali, si denota, con riferimento al substrato, un aumento percentuale delle frazioni più fini di materiale procedendo da monte verso valle. Il campionamento in corrispondenza del ponte di Sala Baganza presenta le percentuali più elevate di materiale di diametro inferiore a circa 20 mm.

Le curve granulometriche ottenute per il substrato e per lo strato superficiale non sono direttamente confrontabili a causa della diversa tipologia di campionamento (ponderale vs. numerale) e per il fatto che la tecnica fotografica non ha permesso di individuare particelle di diametro inferiore ai 2 mm. Ciononostante è possibile fare alcune considerazioni. È evidente che nello strato superficiale è presente materiale le cui dimensioni massime superano quelle dei sedimenti rinvenuti nel substrato. Si riscontra anche una tendenza alla presenza nello strato superficiale di materiale mediamente più grossolano rispetto allo strato più profondo. Questa differenziazione granulometrica in senso verticale è indicativa di un principio di corazzamento del fondo alveo del quale, come discusso nel Par. 2.1.3, si è tenuto conto nella modellazione numerica del trasporto solido.

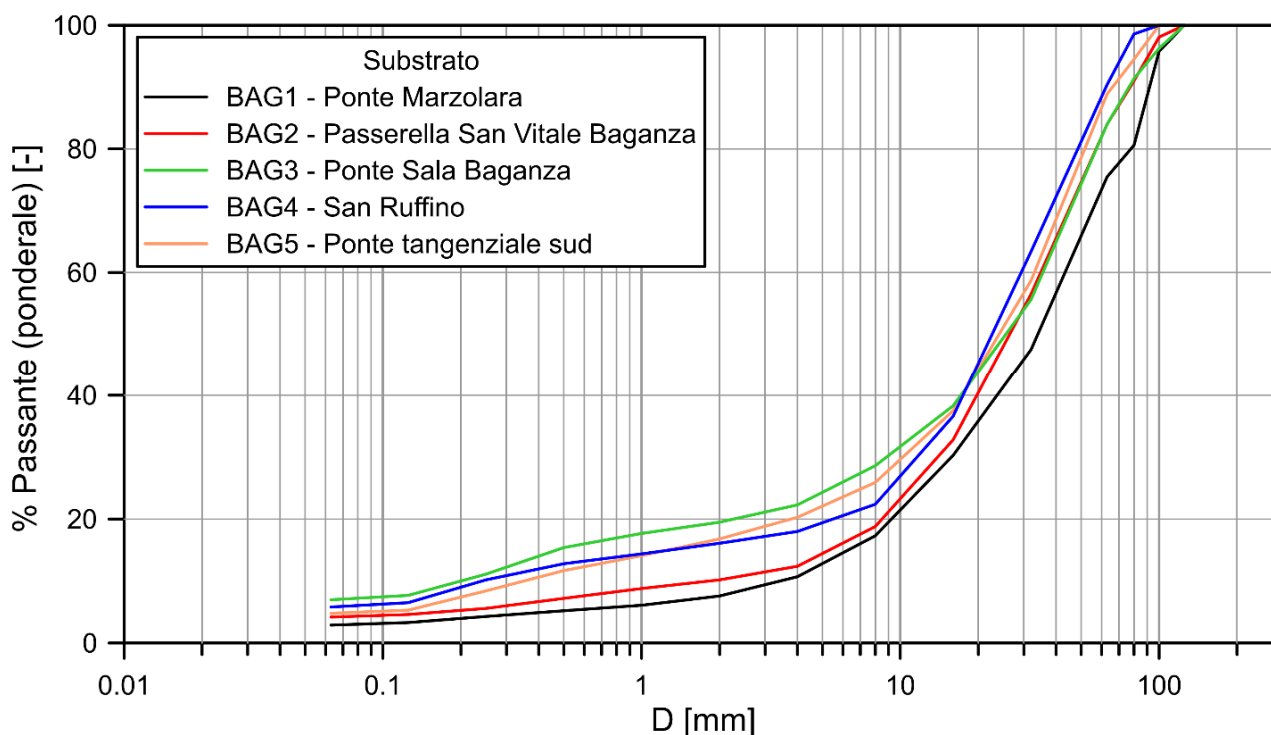


Figura 7 – Curva granulometrica del substrato nei cinque punti di campionamento.

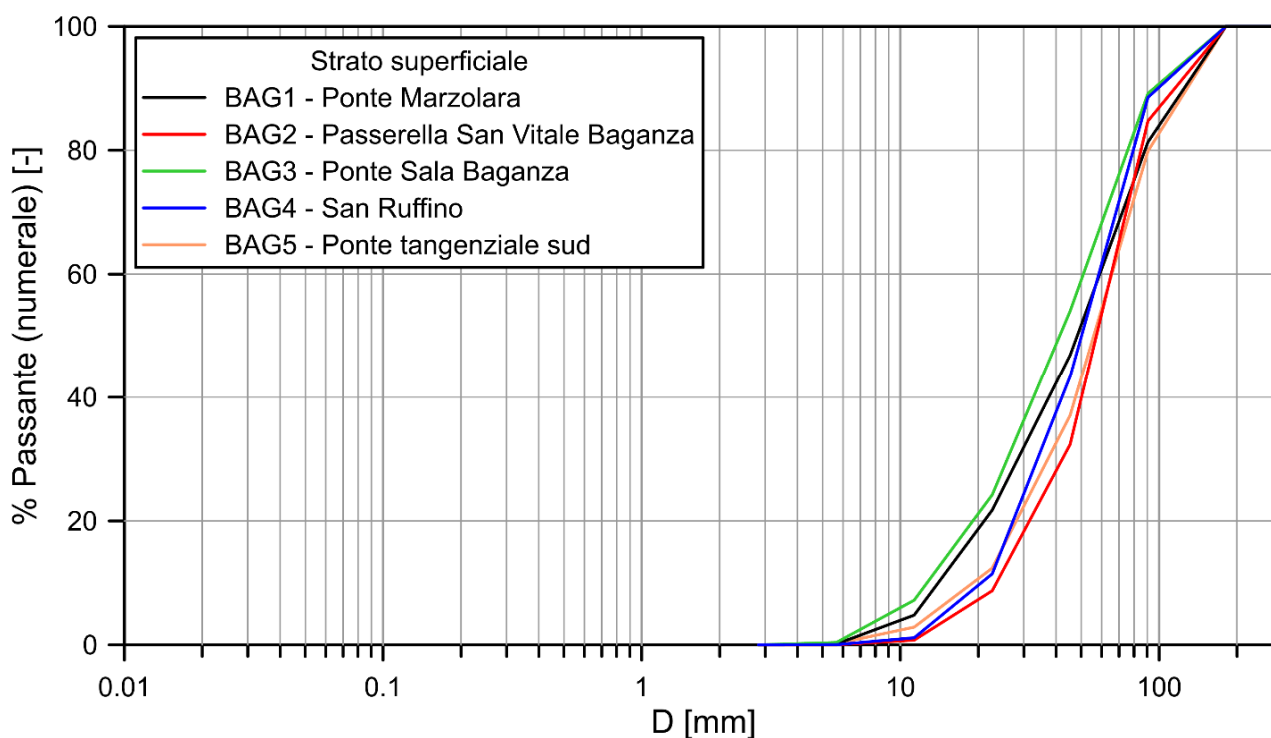


Figura 8 – Curva granulometrica dello strato superficiale nei cinque punti di campionamento.

3.2.4 Analisi delle tendenze evolutive degli ultimi anni

La crescente disponibilità di immagini aeree ad alta risoluzione ottenibili anche da fonti di pubblico dominio e quindi facilmente accessibili, consente oggi l'analisi quali-quantitativa delle tendenze evolutive di un corso d'acqua intrecciato mediante la stima di alcuni parametri significativi, grazie soprattutto alla presenza di rilievi realizzati nel corso del tempo. Il recente sviluppo delle tecnologie per il rilevamento offre inoltre l'opportunità di realizzare modelli digitali del terreno (DTM) ad alta risoluzione (2-8 punti al m²) su ampie porzioni di territorio, tra cui anche gli alvei dei corsi d'acqua a carattere torrentizio. Ciò rende almeno in linea di principio possibile il monitoraggio geomorfologico dei corsi d'acqua ed il bilancio dei sedimenti attraverso l'analisi di rilievi ripetuti nel tempo mediante la creazione di DEMs of Difference (DoDs) (Lane et al. 2003, Wheaton et al. 2010). Essendo ricavato dalla differenza di modelli digitali del terreno il DoD è affetto da un'incertezza superiore rispetto a quella dei DEM originari. Molta attenzione deve essere quindi dedicata alla stima del minimo livello di affidabilità del DoD che conduce a non ricomprendere nel bilancio di sedimenti le aree caratterizzate da variazione morfologica inferiore all'accuratezza attribuita al DoD stesso, con conseguente possibile perdita di informazione utile. Se l'attribuzione di un'incertezza uniformemente distribuita sull'area di interesse è la scelta più semplice, migliori risultati possono conseguirsi determinando un'accuratezza spazialmente variabile, calcolabile con differenti metodologie. Nel lavoro in esame si è seguito l'approccio proposto da Wheaton et al. (2010) in cui si perviene alla stima distribuita dell'incertezza spaziale a partire dal DEM e nota la nuvola di punti originariamente rilevati, mediante un sistema che consente di tenere debitamente conto della coerenza spaziale dei pattern di erosione e deposizione. Per effettuare le valutazioni è stato analizzato un tronco dell'alveo del torrente Baganza di lunghezza di poco superiore a 15 km, a partire dall'abitato di San Vitale Baganza fino alla confluenza nel torrente Parma. Per il confronto si sono utilizzati i due rilievi LiDAR che presentavano la massima sovrapposizione ed in particolare quello effettuato nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale del 2008 ed a seguito dell'alluvione dell'ottobre 2014 dalla Compagnia Generale Riprese aeree (CGR).

La determinazione dei DoDs è stata effettuata valutando un'incertezza distribuita spazialmente per ciascuno dei DEM posti in differenza, a partire dai dati minimali indispensabili, rappresentati dal DEM stesso e dalla nuvola di punti originari con cui esso è stato costruito. L'analisi è stata effettuata mediante il software di pubblico dominio GCD, Add-In di ArcGIS.

Complessivamente per l'asta fluviale presa in esame, nel periodo 2008-2014, il bilancio di sedimenti valuta una modesta tendenza all'erosione. A tale risultanza può avere tra l'altro contribuito in maniera significativa l'evento alluvionale immediatamente precedente il rilievo del 2014, a giudizio di tutti gli organi competenti caratterizzato da tempi di ritorno pressoché bisecolari.

Occorre tuttavia tenere presente che le analisi quantitative vengono condotte sulla base di una delimitazione univoca al variare del DEM della zona individuata come attiva dell'alveo, altrimenti gli errori in quota dei DEM vengono amplificati su vaste aree non appartenenti all'alveo stesso. Tale delimitazione comporta un certo grado di arbitrarietà (essendo tra l'altro necessariamente dedotta dalle immagini aeree contestuali al rilievo) e può essere molto differente da periodo a periodo soprattutto con riferimento ad alvei torrentizi di tipo intrecciato (braided) quale quello in esame. Considerando il tratto compreso tra Sala Baganza e l'abitato di Gaione, la zona di attività del

corso d'acqua presenta una sensibile variazione nel periodo 2008 - 2014, come mostrato dal confronto tra il dettaglio rappresentato in Figura 9 e in Figura 10 relativo rispettivamente all'anno 2008 (delimitazione a tratteggio) ed all'anno 2014 (delimitazione a linea continua). L'osservazione delle due figure conduce in primis alla consapevolezza che nel periodo di interesse il tratto in esame è andato verosimilmente incontro ad un allargamento con significativa erosione spondale. Tale comportamento è ben evidente nella rappresentazione del DoD relativo alla superficie ottenuta dall'unione delle regioni d'alveo attive nel 2008 e nel 2014 (Figura 11) in cui le zone di erosione più marcata si presentano in effetti in corrispondenza delle sponde.

Analisi quantitative condotte sulla base della delimitazione della fascia ottenuta dall'intersezione (anziché dall'unione) delle regioni di attività del corso d'acqua per il 2008 e per il 2014 (Figura 12) portano a riconoscere invece una modesta tendenza al deposito, con volumi depositati ($\approx 76000 \text{ m}^3$) di entità confrontabile con quella valutata come erosa ($\approx 86000 \text{ m}^3$) sulla base della delimitazione di Figura 11. Si evidenzia quindi come, in condizioni non lontane dall'equilibrio morfologico, la parte centrale dell'alveo (intersezione) presenti una modesta tendenza al deposito e le sponde tendano invece ad erodersi, con un complessivo allargamento medio dell'alveo.



Figura 9 – Limiti alveo attivo per gli anni 2008 e 2014 sovrapposti all'ortofoto AGEA 2008 per una porzione di alveo a valle dell'abitato di Sala Baganza.



Figura 10 – Limiti alveo attivo per gli anni 2008 e 2014 sovrapposti all'ortofoto del rilievo 2014 per una porzione di alveo a valle dell'abitato di Sala Baganza.

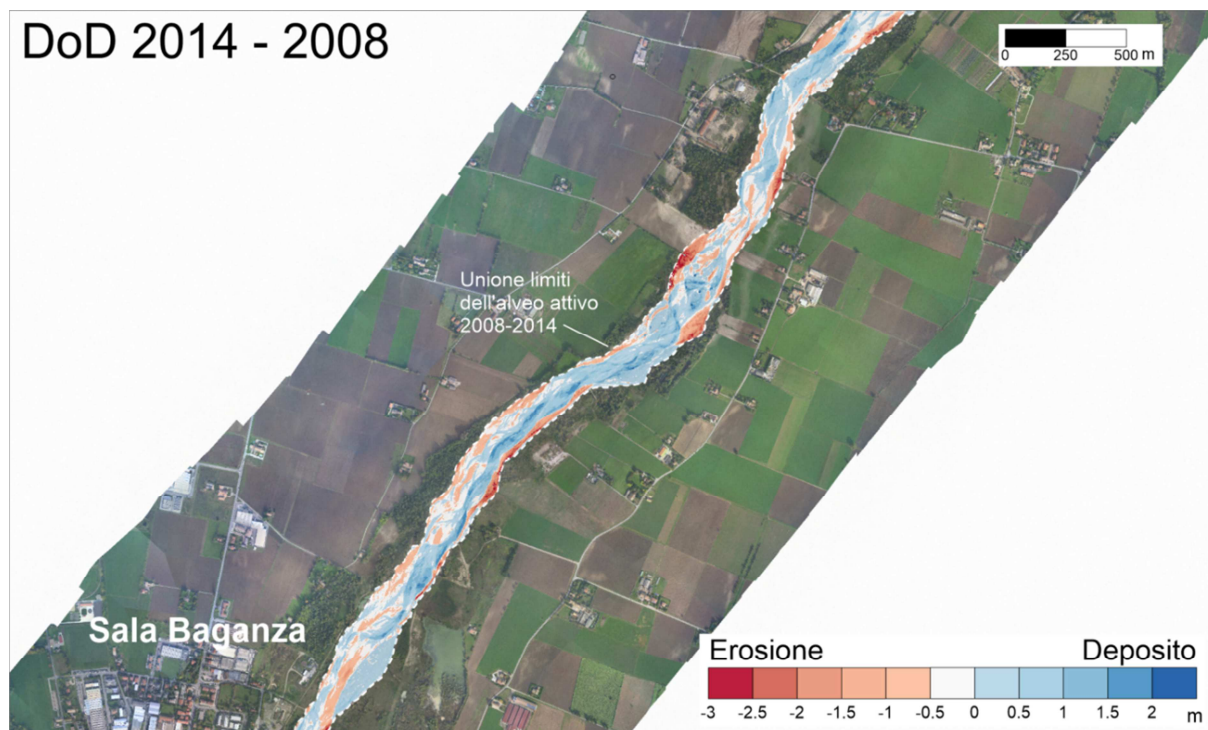


Figura 11 – DoD 2014 - 2008 considerando l'unione dei limiti dell'alveo attivo relativi al 2008 e 2014 per una porzione di alveo a valle dell'abitato di Sala Baganza.

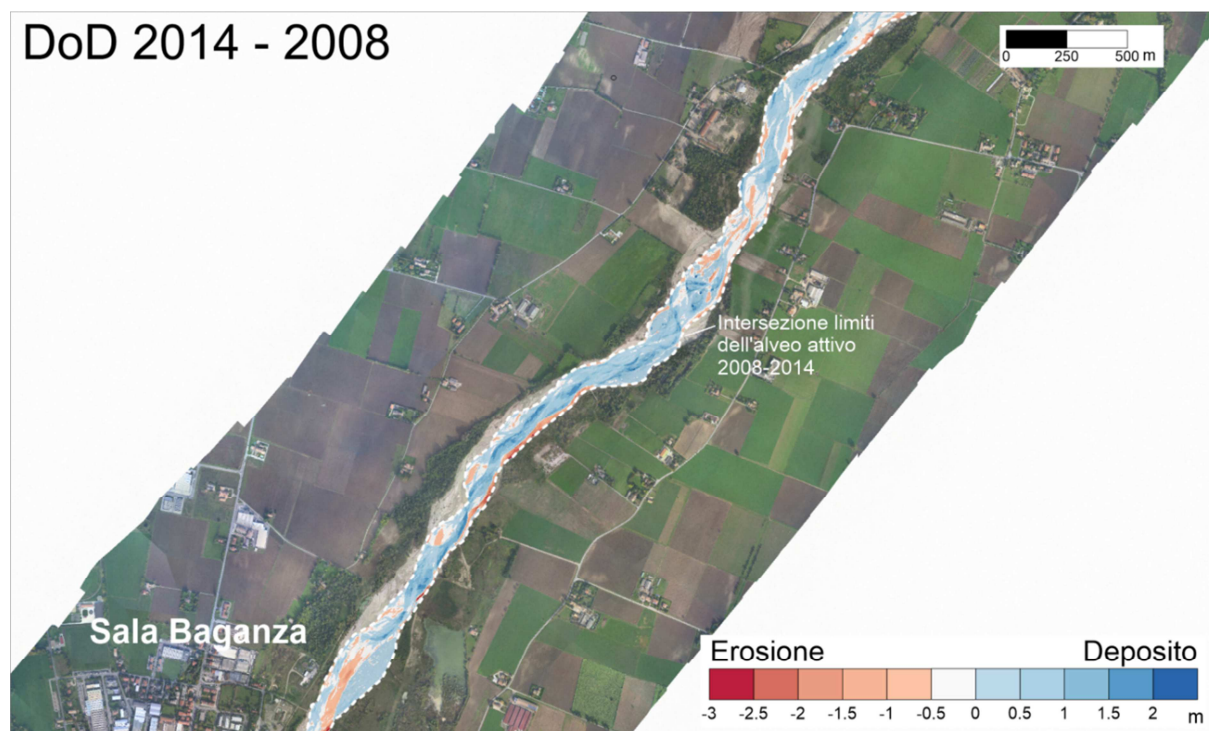


Figura 12 – DoD 2014 - 2008 considerando l'intersezione dei limiti dell'alveo attivo relativi al 2008 e 2014 per una porzione di alveo a valle dell'abitato di Sala Baganza

Il modello monodimensionale adottato non è in grado, per sua natura, di rappresentare gli allargamenti di sezione. La forma della sezione viene infatti modificata alzando o abbassando i punti della stessa, a seconda delle risultanze del modello, ma mai spostando i punti in senso orizzontale, ovvero allargando la sezione. Sulla base di queste considerazioni, se si vogliono confrontare i risultati della modellazione numerica dei fenomeni di trasporto solido con le tendenze evolutive ricavabili dalle analisi dei DEM è bene fare riferimento alla sola fascia ottenuta dall'intersezione delle regioni di attività del corso d'acqua nel tempo e non all'unione delle stesse.

3.3 MODELLO IDRAULICO 1D A FONDO MOBILE DEL TORRENTE BAGANZA

Come già descritto in precedenza, per la modellazione idraulica monodimensionale a fondo mobile del tratto di torrente Baganza in studio, si è fatto uso del codice di calcolo HEC-RAS.

Stabilita l'estensione del modello idraulico (Ponte di Marzolaro - Ponte Nuovo), si è fatto riferimento al DEM realizzato dalla CGR nel 2014 per valutare la geometria delle sezioni trasversali del corso d'acqua, essendo questo l'unico rilievo che copre interamente il tratto in studio. Come già evidenziato al Par. 3.2.1, infatti, i DEM del 2008 e 2016 non si estendono fino alla sezione scelta come condizione al contorno di monte del modello idraulico e per un'opportuna modellazione era preferibile fare riferimento ad un rilievo contemporaneo. In aggiunta, tra il rilievo LiDAR del 17 ottobre 2014 (post alluvione del 13 ottobre 2014) e quello del 2016 non si sono verificati eventi di particolare rilevanza, tali da indurre sostanziali modificazioni geometriche e morfologiche del corso d'acqua. A

conferma di quanto esposto, si è messa a confronto la geometria di 4 sezioni trasversali approssimativamente equispaziate nel tratto Sala Baganza - Gaione ottenuta con i dati geometrici estratti dai DEM del 2014 e 2016. Dall'analisi della Figura 13 si evince che, nel periodo trascorso tra la realizzazione dei rilievi LiDAR 2014 e 2016, le sezioni non hanno subito apprezzabili modificazioni, se non a livello molto locale negli alvei di magra.

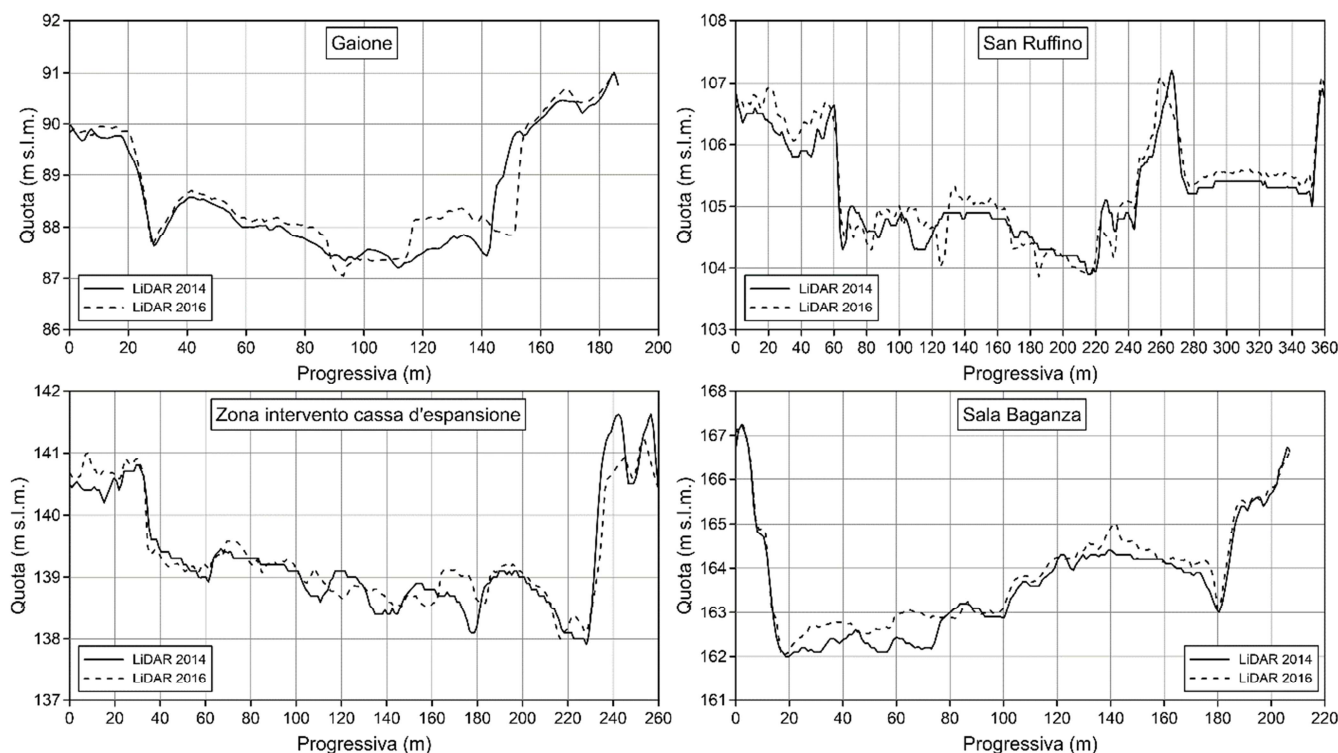


Figura 13 – Confronto tra la geometria di 4 sezioni trasversali nel tratto Sala Baganza - Gaione ottenuta con i dati geometrici estratti dai rilievi LiDAR del 2014 e 2016.

Per l'implementazione del modello si è utilizzato il software HEC-GeoRAS, un'interfaccia GIS che, sulla base del DEM e di una serie di linee bidimensionali, permette l'estrazione delle sezioni trasversali del corso d'acqua nel formato riconosciuto da HEC-RAS.

È stato dapprima definito il tracciato del thalweg del torrente Baganza nel tratto di interesse (Ponte di Marzolaro-Ponte Nuovo) in base al quale vengono calcolate le progressive (da valle verso monte, come richiede HEC-RAS).

Si è cercato di mantenere le sezioni trasversali tra loro equidistanti (distanze inferiori ai 100 m l'una dall'altra) infittendole solo laddove necessario, come nei tratti in cui si evidenzia un'accentuata espansione o contrazione delle dimensioni dell'alveo o dove si abbia una maggiore variazione di pendenza. Ove possibile, si è cercato di sovrapporre le nuove sezioni a quelle storiche del 1972. Le sezioni sono state estese lateralmente fino a comprendere l'intero alveo che, come è noto, ha caratteristiche "braided" (ad alvei intrecciati), perlomeno fino alla tangenziale Sud. L'alveo è quindi molto ampio e ricomprende, a parte le ulteriori erosioni di sponda, tutti i possibili percorsi che la corrente, divagando, può assumere. Le sezioni sono state poi regolarizzate mediante una funzione filtro (Cross Section Point Filter) di HEC-RAS, visto l'elevato numero di punti, non tutti necessari, estratti dal DEM.

Ai fini della modellazione del trasporto solido, si è proceduto ad una successiva interpolazione delle sezioni in modo da ridurre la loro mutua distanza ad un valore dell'ordine dei 25 m. Indagini preliminari hanno infatti indicato che, anche nel caso di alveo prismatico, ove quindi la sezione è costante con l'ascissa, è comunque opportuno disporre di sezioni relativamente vicine, allo scopo di migliorare l'accuratezza dei risultati.

La Figura 14 mostra la planimetria del tratto di torrente Baganza modellato, con l'indicazione delle sezioni trasversali.

Le curve granulometriche risultanti dalle indagini in alveo descritte al Par. 3.2.3 sono state utilizzate per assegnare in HEC-RAS il fuso granulometrico delle sezioni trasversali in corrispondenza dei campionamenti. Si è poi proceduto ad una interpolazione della granulometria per tutte le altre sezioni trasversali del corso d'acqua. La modellazione numerica è stata condotta utilizzando la formula di Meyer-Peter e Müller per la valutazione della capacità di trasporto, il metodo di Ruby per calcolare la velocità di sedimentazione delle particelle solide e il metodo di Thomas per descrivere i fenomeni di "sorting" e "armoring".

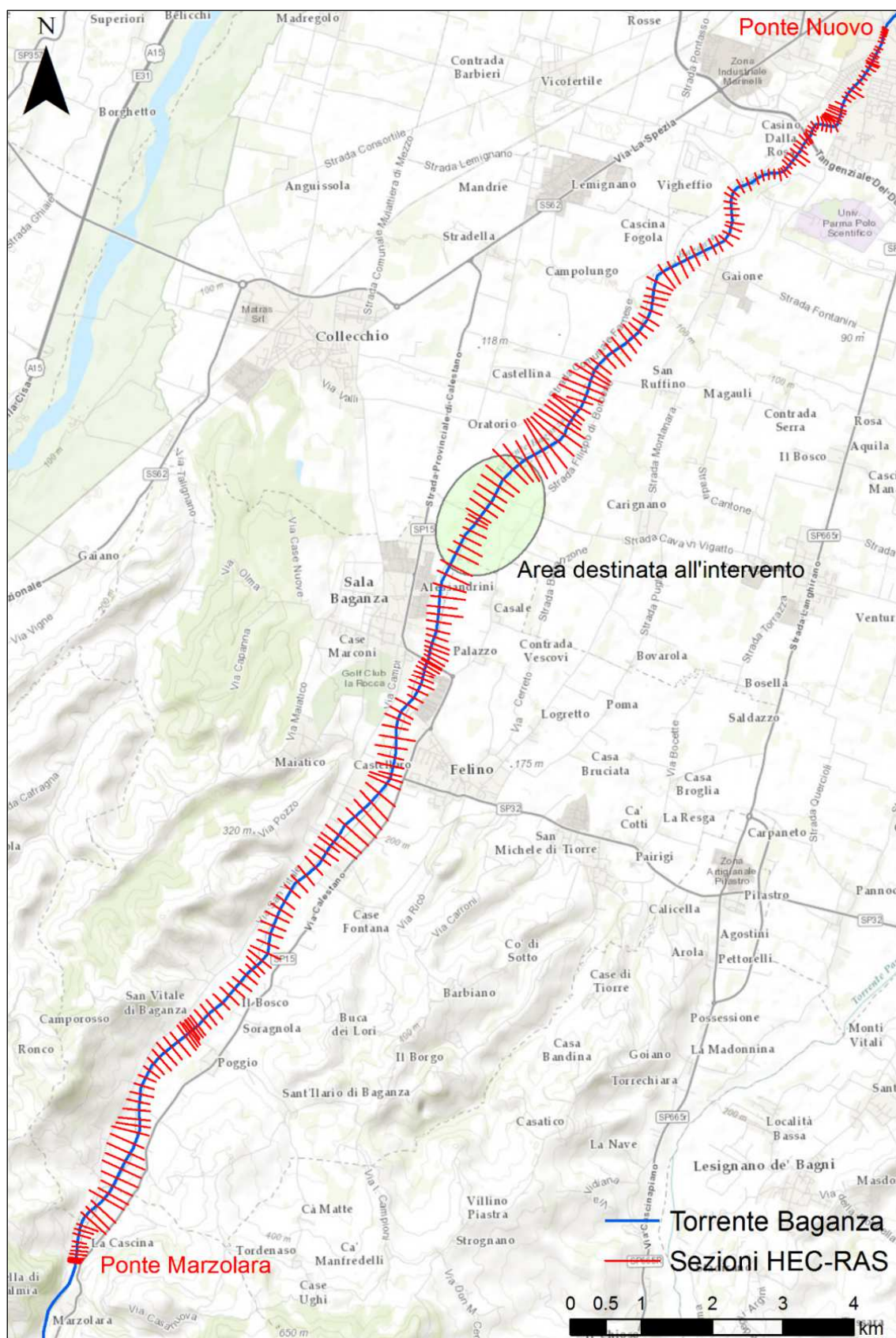


Figura 14 – Tratto di torrente Baganza modellato con HEC-RAS e zona destinata all'intervento.

4. SIMULAZIONI EFFETTUATE E ANALISI DEI RISULTATI

4.1 STATO DI FATTO

Una prima simulazione è stata condotta nello stato di fatto, ovvero nella condizione di assenza di qualsiasi tipo di intervento che possa modificare l'attuale assetto del torrente.

Si è simulato, come già riportato al Paragrafo 3.2.2, il periodo agosto 2002 - aprile 2016 (corrispondente a 13 anni di dati effettivamente utilizzabili), limitatamente ai valori di portata superiori ai $10 \text{ m}^3/\text{s}$. I risultati di tale simulazione, basata sui dati storici, comparati con le analisi delle tendenze evolutive riportate al Par. 3.2.4, hanno lo scopo di stabilire, nei limiti delle approssimazioni della modellazione monodimensionale, la capacità del modello di valutare correttamente le entità medie dei fenomeni legati al trasporto solido. Per tale motivo non si è ritenuto di dover estendere, come fatto nel seguito per le due soluzioni progettuali proposte, la simulazione oltre il periodo storico di dati disponibili.

Occorre precisare che l'assetto del torrente, ovvero le sezioni trasversali, sono state estratte dal DEM ottenuto mediante il rilievo LIDaR dell'ottobre 2014, post alluvione. Non si tratta quindi di una vera e propria simulazione "storica". Del resto, come già ricordato, il modello monodimensionale non è in grado di riprodurre l'erosione delle sponde ed il conseguente allargamento dell'alveo, in quanto i punti delle sezioni subiscono variazioni solo in senso verticale. I risultati vanno quindi presi con una certa cautela.

4.1.1 Influenza della condizione al contorno di monte

Come riportato al Par. 3.1, la c.c. che quantifica l'apporto di sedimenti proveniente da monte, in assenza di misure dirette, non può che essere ottenuta in base a ragionevoli assunzioni. Per valutarne l'influenza, sono state condotte due simulazioni con differenti ingressi di portata solida, a parità di tutte le altre condizioni. Più precisamente si sono adottate in ingresso a monte:

1. la portata solida calcolata dal modello come "equilibrium load", ovvero pari alla capacità di trasporto della sezione iniziale;
2. un apporto nullo nella medesima sezione.

Quest'ultima condizione è senz'altro poco realistica, non essendovi alcuna struttura in corrispondenza del ponte di Marzolaro, o a breve distanza a monte, che limiti o addirittura azzeri l'apporto di materiale solido. Tuttavia si è voluto esplorare questa condizione limite inferiore, per verificare fino a quale distanza dalla sezione di c.c. se ne risentisse l'effetto.

La Figura 15 mostra la variazione del fondo dell'alveo ("invert change") ovvero del punto più depresso di ciascuna sezione, al termine della simulazione e nelle due condizioni esaminate. Poiché l'*equilibrium load* corrisponde ad una condizione di equilibrio (dinamico) dei sedimenti nella sezione di ingresso (prog. 22150 m), la quota di fondo di questa sezione nella simulazione 1) rimane invariata nel tempo. La seconda condizione (apporto nullo) dà luogo invece ad una progressiva erosione dell'alveo, in quanto il materiale solido che non proviene da monte viene

prelevato dall'alveo stesso. Al termine della simulazione il fondo della sezione di ingresso ha subito un abbassamento di circa 8 metri, che si riducono ad 1 m circa 4 km più a valle. Aldilà dei valori assoluti, è apprezzabile che le differenze tra le due simulazioni diventino molto modeste dalla progressiva $x = 16000$ m (ovvero nel tratto $0 < x < 16000$) all'incirca corrispondente all'abitato di S. Michele Gatti, per diventare pressoché nulle dalla progressiva $x = 12000$ m (ovvero nel tratto $0 < x < 12000$) corrispondente all'incirca al Ponte di Sala Baganza.

La zona di intervento, evidenziata in figura, si trova circa 9-10 km a monte di Ponte Nuovo, ovvero in un tratto in cui l'influenza della condizione al contorno di monte è già scomparsa. Questo risultato conferma la correttezza dei risultati (nei limiti del modello monodimensionale adottato) in tutto il tratto di interesse. Si è comunque ritenuta più attendibile l'adozione di una c.c. di ingresso dei sedimenti pari all'*equilibrium load*, per cui tutte le simulazioni successive sono state realizzate adottando questa condizione.

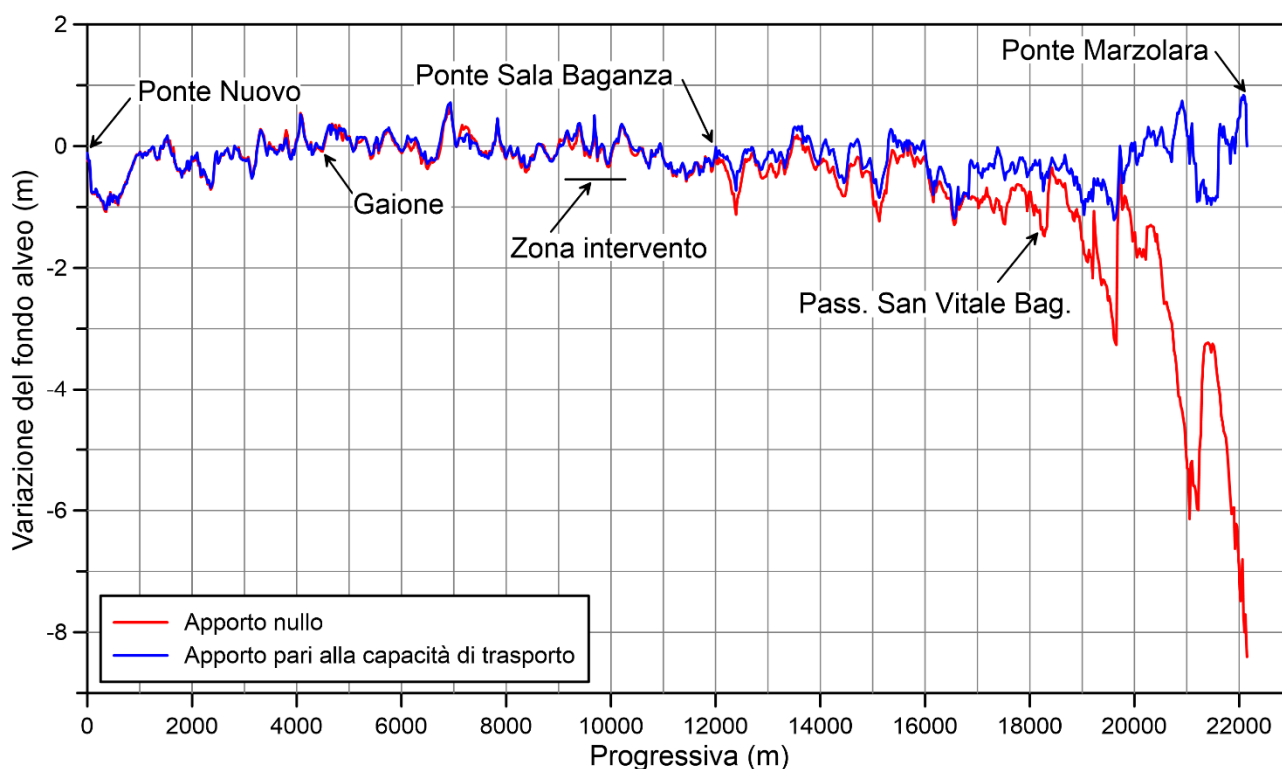


Figura 15 – Variazione del fondo alveo al termine della simulazione nel caso di apporto nullo o pari alla capacità di trasporto della sezione in prossimità del ponte di Marzolarà.

4.1.2 Analisi dei risultati

Analizzando più approfonditamente la Figura 15 nella situazione di apporto pari all'*equilibrium load* si osserva che le variazioni delle quote di fondo lungo l'asta $\Delta z(x)$ al termine della simulazione (13 anni) sono pressoché tutte contenute nel range $-1 \leq \Delta z \leq 1$ m, senza un trend deciso lungo l'ascissa. Ciò sembra indicare una situazione di sostanziale equilibrio dinamico del torrente. La quota minima della sezione, da sola, non è però sufficiente a comprendere appieno la dinamica. A questo scopo nella Figura 16 sono stati rappresentati i volumi cumulati in

ingresso ed in uscita dal tratto Sala Baganza-Gaione. Si è scelto tale tratto poiché è lo stesso analizzato nel paragrafo 3.2.4 mediante il DoD 2008-2014 e perché si è appena mostrato che la sezione di Sala Baganza non risulta praticamente più influenzata dalla condizione al contorno di monte. La simulazione restituisce un volume cumulado in ingresso (Sala Baganza) al termine della simulazione di circa $325 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, a fronte di un analogo volume in uscita di circa $230 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. La differenza (Figura 17) è quindi pari a $+95 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, ad indicare una, seppur moderata, tendenza al deposito, pari a circa $7 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{anno}$.

Si tratta di un valore abbastanza modesto, che può essere confrontato con la stima effettuata nel periodo 2008-2014 senza tener conto dell'allargamento dell'alveo (non simulabile mediante il modello 1D). Dall'analisi storica risultava un valore di $76 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ in sette anni, corrispondente ad un deposito di circa $11 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{anno}$ confrontabile, anche se leggermente superiore, con quello ottenuto mediante il modello. Si ritiene comunque, stanti le notevoli approssimazioni ed incertezze insite nel modello, che esso sia in grado di restituire risultati sufficientemente attendibili, soprattutto se analizzati in termini comparativi (stato di fatto - soluzione di progetto).

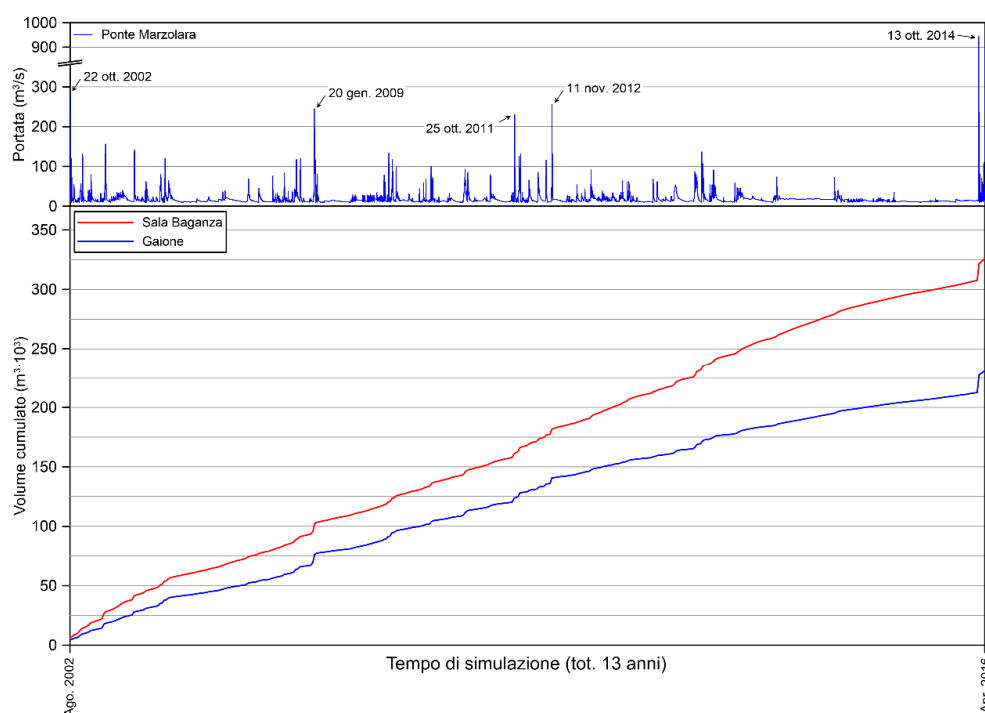


Figura 16 – Andamento temporale dei volumi cumulati entranti ed uscenti nel tratto Sala-Baganza – Gaione ottenuti mediante simulazione nel periodo agosto 2002 - aprile 2016.

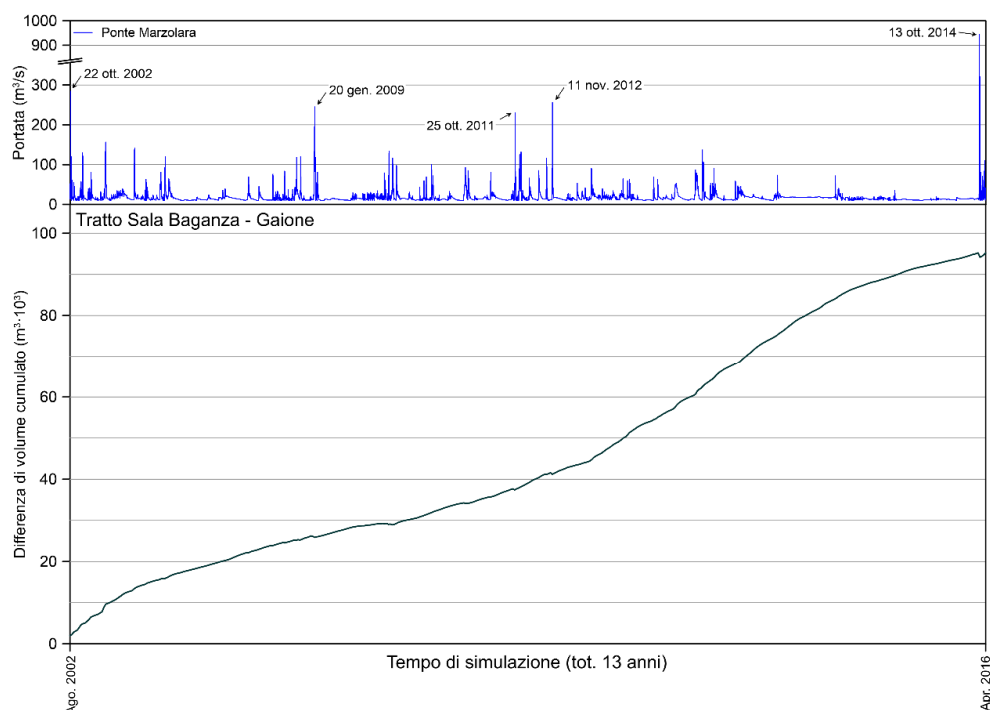


Figura 17 – Differenza tra i volumi cumulati entranti ed uscenti nel tratto Sala-Baganza – Gaione ottenuti mediante simulazione nel periodo agosto 2002 - aprile 2016.

4.2 SOLUZIONE “A”

La soluzione progettuale “A” ricalca quella prevista in fase di progettazione preliminare della cassa di espansione sul torrente Baganza. Si riportano di seguito solo gli elementi utili ai fini di questo studio. Con riferimento alla Figura 18, l’imbocco della cassa (sez. 1) avviene mediante tre briglie che complessivamente generano un dislivello di 12 m. All’interno dell’invaso è prevista una sistemazione dell’alveo utilizzando una sezione trasversale trapezia di base 100 m e una pendenza longitudinale pari allo 0.2% (inferiore all’attuale, pari a circa lo 1.2%) per un tratto di lunghezza di circa 1200 m che termina a monte del manufatto regolatore (Sez. 2M). Il tratto d’alveo sistemato presenta due arginelli (sponde con pendenza 2:1) con lo scopo di garantire che per portate fino a circa 300 m³/s la cassa non venga invasata. Il manufatto regolatore (Sez. 2) è alto 10 m e presenta sul fondo tre luci (8 m x 3 m) presidiate da paratoie. Procedendo verso valle è prevista la realizzazione di una vasca di dissipazione che termina in corrispondenza della Sez. 2V, circa 50 m a valle del manufatto regolatore, dove l’alveo torna ad essere quello naturale. Ai fini della restituzione dei risultati, sono state individuate altre due sezioni trasversali (Sez. 4, posta circa 300 m a valle del manufatto regolatore e Sez. 5, 500 m a valle della precedente) che coincidono, nella posizione, con le corrispettive identificate nella soluzione progettuale descritta al paragrafo successivo (sol. “A ottimizzata”).

Ai fini della modellazione numerica in HEC-RAS, l’insieme di briglie di ingresso alla cassa d’espansione è stato simulato introducendo una struttura in linea inderodibile assimilabile ad uno stramazzone in parete grossa. Anche il manufatto regolatore è stato simulato utilizzando una struttura in linea con il corso d’acqua che presenta le luci di

fondo e lo sfioratore superficiale a cui sono state assegnate le relative scale delle portate previste in fase di progettazione.

Tra la briglia di ingresso alla cassa ed il manufatto, a causa della ridotta pendenza dell'alveo e il progressivo effetto di rigurgito provocato dal manufatto stesso al crescere della portata transitante (necessario a far invasare la cassa), è da attendersi una riduzione della capacità di trasporto del materiale solido, con corrispondente deposito soprattutto delle granulometrie maggiori. Per la stessa ragione, a valle del manufatto ci si aspetta un processo erosivo, visto che ivi l'alveo ritorna ad avere pendenze e capacità di trasporto prossime a quelle che possiede nelle condizioni attuali e da monte, attraverso le bocche, proviene meno materiale solido. L'influenza della sistemazione si può estendere anche a monte del sistema di briglie posto in ingresso alla cassa d'espansione. La presenza di una sezione inerodibile fissa infatti la quota minima che l'alveo può raggiungere in quella posizione, influenzando la capacità di trasporto di un tratto più o meno esteso nel suo intorno.

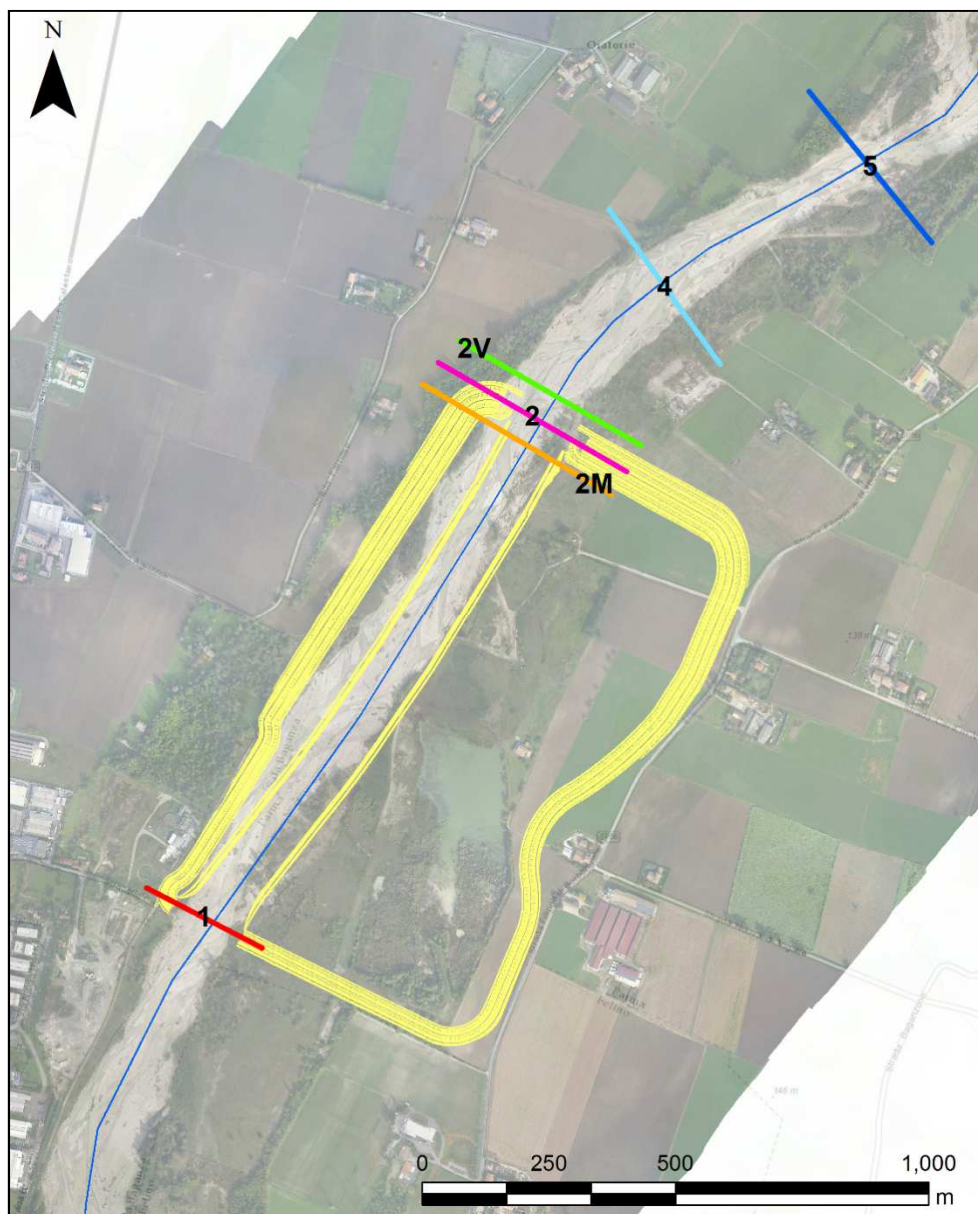


Figura 18 – Planimetria della soluzione progettuale “A” con indicazione di alcune sezioni trasversali significative.

Alcuni dei risultati più significativi ottenuti dal modello numerico sono rappresentati nelle Figure 19÷23.

La Figura 19 riporta l'evoluzione del fondo alveo nel tempo nelle cinque sezioni evidenziate in Figura 18. Per una più immediata lettura, i colori dei grafici sono gli stessi con cui sono state identificate le sezioni. Nella Sezione 1, poco a valle del piede del sistema di briglie, si osserva una costante tendenza all'innalzamento del fondo, a seguito di deposito di materiale, che raggiunge i 6 metri circa al termine del periodo simulato. Considerato che, in questa configurazione di progetto, il dislivello tra l'alveo “naturale” e quello “sistemato” era di circa 12 metri e veniva realizzato mediante tre briglie di uguale altezza, se ne deduce una tendenza all'interrimento totale della terza briglia e parziale anche della seconda. La tendenza non è lineare nel tempo sia per via del naturale avvicinarsi

delle portate, sia perché il deposito tende a ridursi all'aumentare della pendenza del tratto sistemato. La Sezione 2M, poco a monte del manufatto, manifesta invece una sostanziale tendenza alla stabilità (incremento della quota di fondo di 0.25 m al termine del periodo simulato): evidentemente, tutto quello che poteva depositarsi si è depositato già prima di raggiungere la Sezione 2M; inoltre, la notevole ampiezza delle bocche, progettate per evacuare 290-300 m³/s a pelo libero (a paratoie completamente aperte), provoca scarsi effetti di rigurgito per la maggior parte delle portate simulate. La Sezione 2V, immediatamente a valle della vasca di dissipazione, presenta una notevole tendenza all'erosione, con un abbassamento della quota del fondo di oltre 3 m al termine del periodo simulato. Ciò impone, per evitare danneggiamenti strutturali, la realizzazione di una soglia di sostegno a breve distanza dal manufatto. Di questo si discuterà nella soluzione "A ottimizzata". Nella Sezione 4, posta circa 300 m a valle della vasca di dissipazione, l'abbassamento del fondo al termine della simulazione si è già ridotto alla metà (-1.5 m), mentre nella Sezione 5, 800 m a valle del manufatto, l'erosione è tornata a valori modesti (-0.5 m) e più che accettabili. Quest'ultima considerazione fa ritenere sostanzialmente modesto l'effetto dell'opera già circa 1 km a valle della stessa.

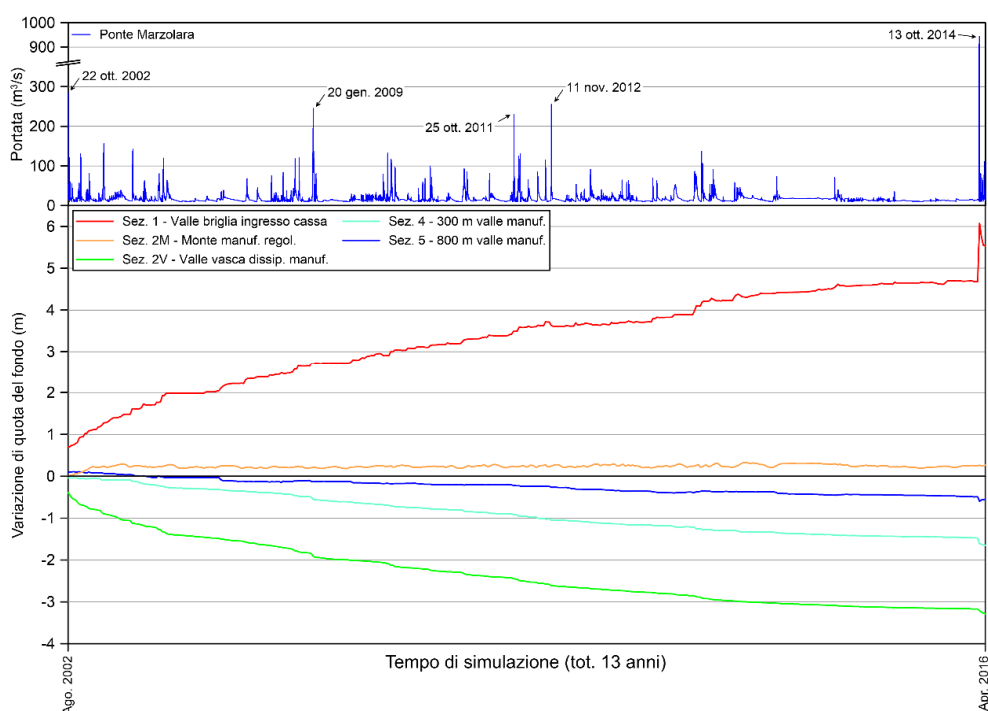


Figura 19 – Andamento temporale della quota di fondo nelle cinque sezioni riportate in Figura 18.

La Figura 20 riporta l'andamento temporale dei volumi transitati attraverso le Sezioni 1, 2 e 5 di Figura 18. Per una più immediata lettura, la Figura 21 riporta poi l'andamento temporale dei volumi depositati (+) o erosi (-) nel tratto 1-2 e 2-5, ottenuti mediante differenza dai valori precedenti.

Si nota chiaramente la spiccata tendenza al deposito nel tratto 1-2, a monte del manufatto, che raggiunge circa

$200 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ al termine del periodo di simulazione (13 anni) con un valore medio di circa $15 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{anno}$. Nel tratto 2-5, a valle del manufatto, si ha invece un'erosione pari a circa il 50% ($100 \cdot 10^3 \text{ m}^3$) di quanto depositato a monte.

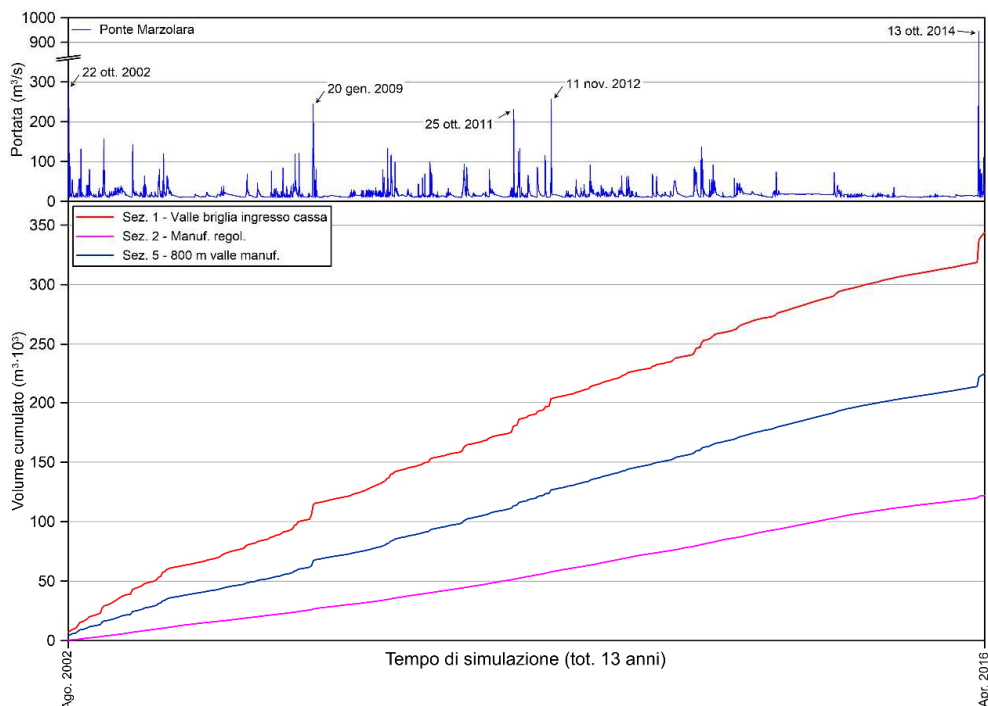


Figura 20 – Andamento temporale dei volumi transitanti attraverso le Sezioni 1, 2 e 5 di Figura 18.

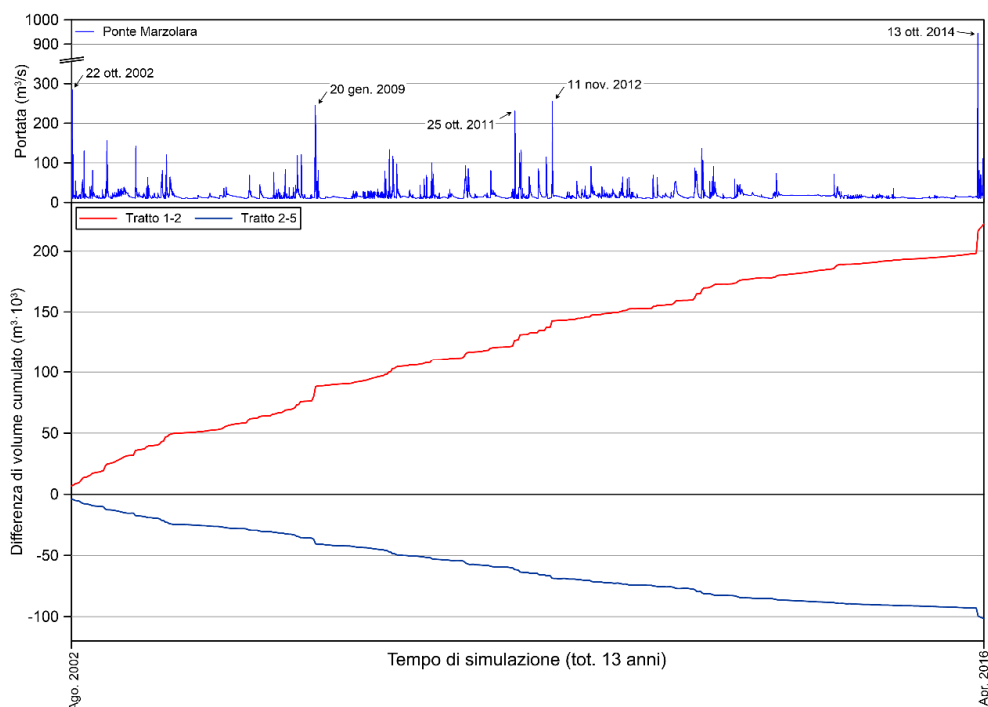


Figura 21 – Andamento temporale dei volumi depositati (+) o erosi (-) nel tratto 1-2 e 2-5 di Figura 18.

Qualche interessante considerazione di maggior dettaglio può effettuarsi osservando le Figure 22-23, che riportano la distribuzione granulometrica del materiale entrante-uscente dai Tratti 1-2 e 2-5. Dalla Figura 22 si evince che pressoché tutto il materiale di granulometria superiore ai 4 mm si deposita in cassa, mentre le granulometrie più fini riescono in buona parte a transitare a valle. La Figura 23 mostra poi che le granulometrie “mancanti” vengono prelevate dall’alveo a valle della cassa, ripristinando così nella Sezione 5 una distribuzione granulometrica non troppo dissimile da quella originale.

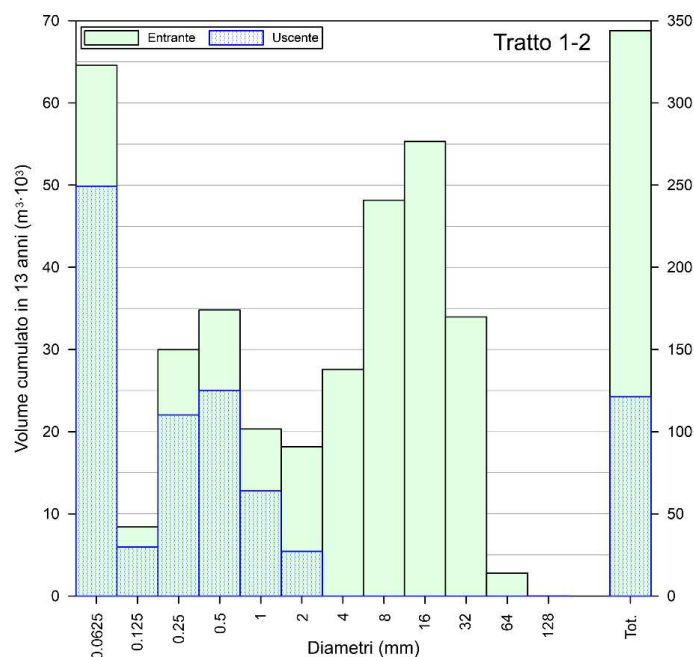


Figura 22 – Distribuzione granulometrica del materiale entrante-uscente dal Tratto 1-2.

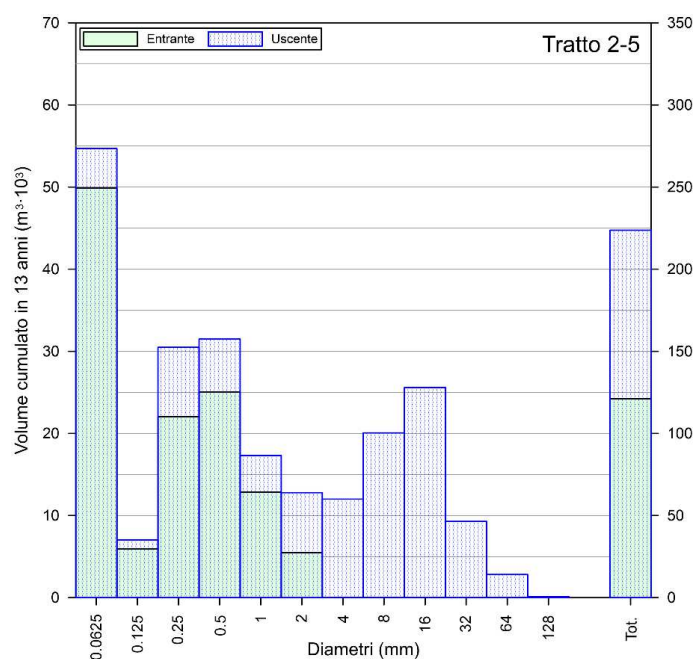


Figura 23 – Distribuzione granulometrica del materiale entrante-uscente dal Tratto 2-5.

4.2.1 Simulazione di lungo periodo per la soluzione "A"

Per la soluzione progettuale "A" si è condotta un'ulteriore simulazione di più lungo periodo. La serie storica delle portate in ingresso è stata replicata escludendo però l'intero anno 2014, contenente l'evento alluvionale del 13 ottobre, in quanto statisticamente di tempo di ritorno superiore all'orizzonte temporale simulato. Il periodo di analisi raggiunge così i 25 anni.

Le Figure 24÷26 riportano gli andamenti ottenuti delle quote di fondo e dei volumi di materiale solido transitati. Esse estendono le omologhe Figure 19÷21 ad un orizzonte venticinquennale.

Con riferimento alla Figura 24, è rilevabile, nel secondo periodo di simulazione, una riduzione dei processi di deposito ed erosione nelle sezioni considerate, anche se non si raggiunge mai un vero e proprio equilibrio. In particolare, il deposito nella Sez. 1 passa dai circa 6 m al termine dei primi 13 anni simulati ai circa 7 m dopo 25 anni; come già evidenziato in precedenza, infatti, il deposito tende a ridursi all'aumentare della pendenza del tratto sistemato all'interno della cassa d'espansione. Invece, la Sez. 2M, poco a monte del manufatto, manifesta ancora la sostanziale tendenza alla stabilità, con un incremento della quota di fondo di soli 0.25 m - 0.30 m al termine del periodo simulato. La tendenza all'erosione a valle del manufatto invece continua, seppure con un gradiente inferiore rispetto al primo periodo. Si passa nella Sez. 2V da circa 3 m dopo i primi 13 anni a circa 4 m alla fine del periodo simulato. Pertanto, come già riferito, è necessario prevedere la realizzazione di una soglia di sostegno a breve distanza dal manufatto per evitare danneggiamenti strutturali. Nella Sez. 4, 300 m a valle del manufatto, l'erosione si attesta sui 2.5 m (rispetto agli 1.5 m alla fine dei 13 anni) che si riducono ad 1 m (anziché 0.5 m) nella Sez. 5 posta 800 m a valle del manufatto.

La Figura 26 esemplifica le sopra esposte tendenze. Il materiale solido continua a depositarsi nel Tratto 1-2 mostrando solo una modesta tendenza alla diminuzione nel tempo. L'erosione nel Tratto 2-5 passa invece dai circa $100 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ alla fine dei primi 13 anni simulati ai $150 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ dopo 25 anni, evidenziando quindi una tendenza meno che lineare nel tempo.

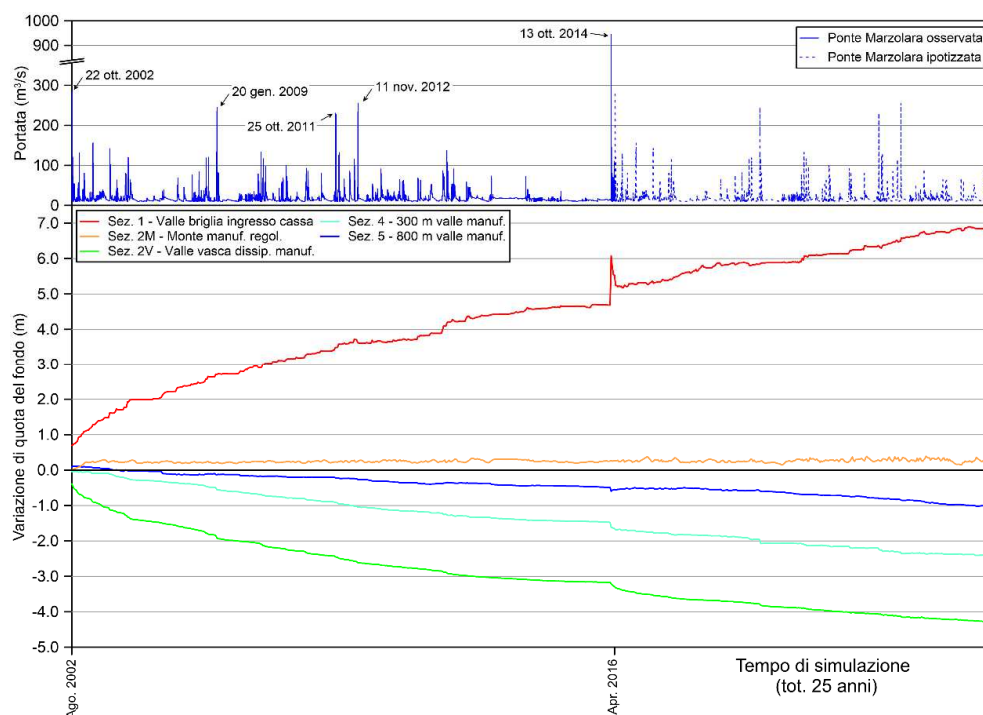


Figura 24 – Andamento temporale della quota di fondo nelle cinque sezioni riportate in Figura 18 per la simulazione di 25 anni complessivi.

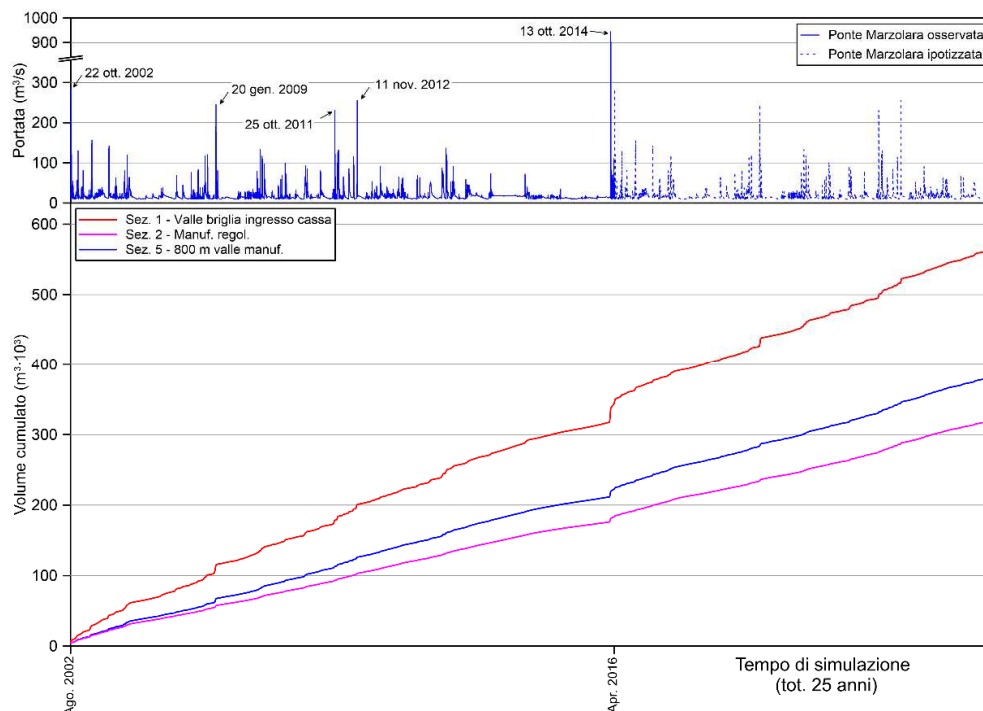


Figura 25 – Andamento temporale dei volumi transitanti attraverso le Sezioni 1, 2 e 5 riportate in Figura 18 per la simulazione di 25 anni complessivi.

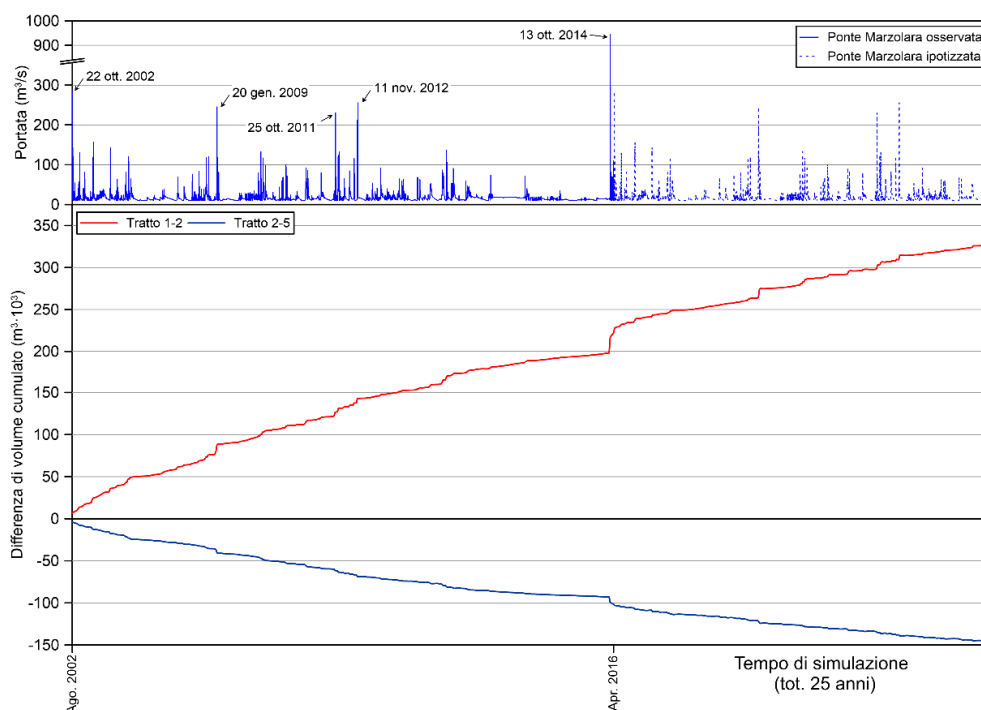


Figura 26 – Andamento temporale dei volumi depositati (+) o erosi (-) nel tratto 1-2 e 2-5 di Figura 18 per la simulazione di 25 anni complessivi.

4.3 SOLUZIONE “A OTTIMIZZATA”

Con riferimento alla Figura 27, nella soluzione progettuale “A ottimizzata”, l'imbocco della cassa (Sez. 1) avviene mediante una briglia che genera un dislivello di 5 m. All'interno dell'invaso è prevista una sistemazione dell'alveo con sezione trasversale trapezia di base 90 m e una pendenza del fondo pari allo 0.7% (inferiore all'attuale, pari a circa lo 1.2%, ma superiore a quella della soluzione “A” pari allo 0.2%) per un tratto di lunghezza di poco inferiore ai 500 m che termina a monte del manufatto regolatore principale (Sez. 2M). Il tratto d'alveo sistemato presenta due arginelli (sponde con pendenza 2:1) con lo scopo di garantire che per portate del corso d'acqua inferiori a circa 300 m³/s la cassa non venga precocemente invasata.

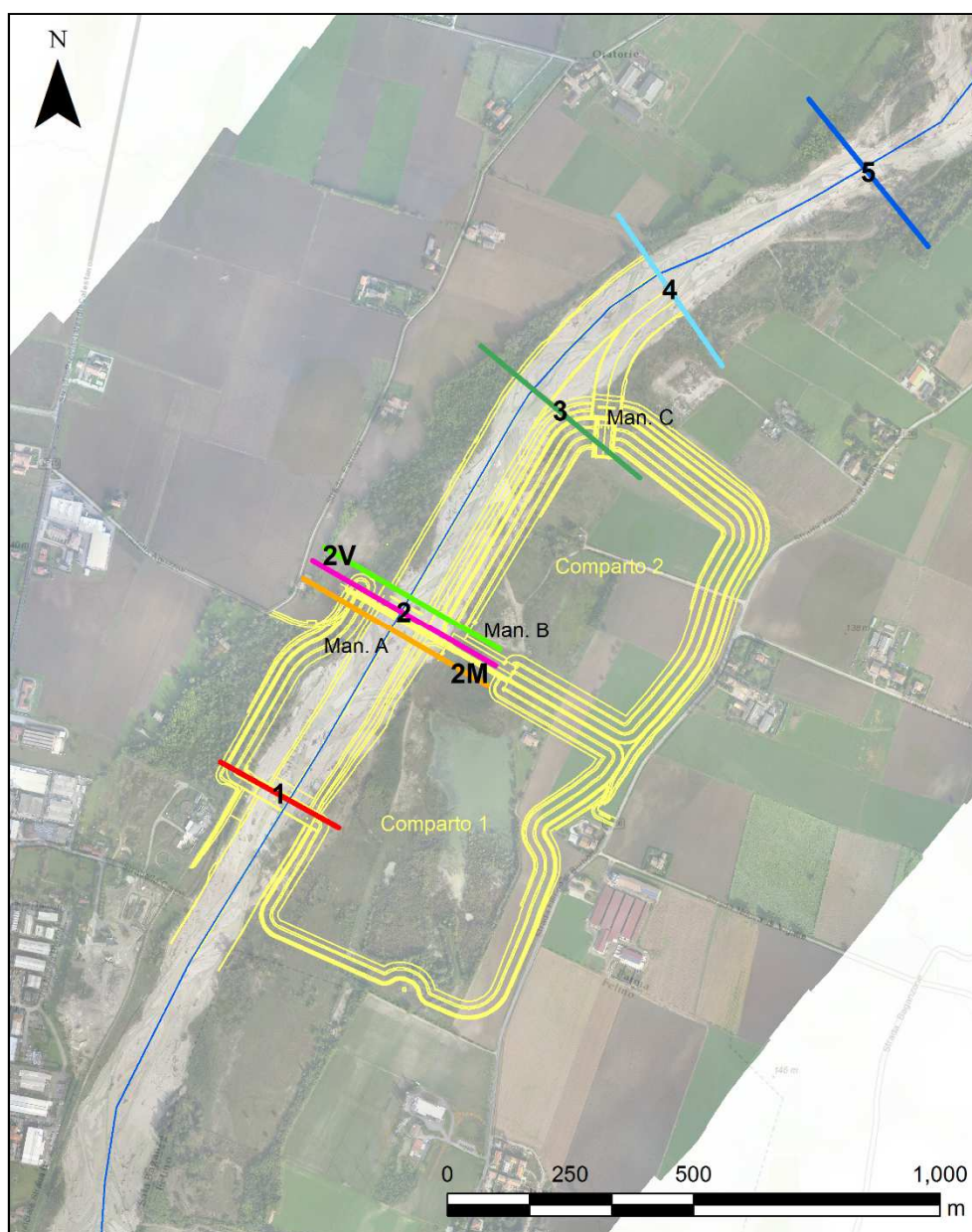


Figura 27 – Planimetria della soluzione progettuale “A ottimizzata” con indicazione di alcune sezioni trasversali significative.

Il manufatto regolatore principale (manufatto A, Sez. 2) è alto 11.9 m e presenta quattro luci di fondo (6 m x 3.5 m) presidiate da paratoie. Procedendo verso valle è prevista la realizzazione di una vasca di dissipazione e una zona d'alveo protetta da massi ciclopici che termina in corrispondenza della Sez. 2V, circa 50 m a valle del manufatto A. Anche a valle del manufatto principale l'alveo risulta sistemato per un tratto di lunghezza pari a circa 800 m (pendenza sempre dello 0.7%) con sezione trapezia di base 80 m fino alla Sez. 3 (in corrispondenza del man. C a servizio del comparto 2) che si allarga fino a circa 130 m in corrispondenza della Sez. 4. In quest'ultima sezione è prevista la realizzazione di una soglia a raso, inerodibile, a protezione di una condotta interrata di un oleodotto posto poco a monte di essa. Ai fini della restituzione dei risultati è stata individuata un'ulteriore sezione trasversale (Sez. 5) posta 500 m a valle della precedente.

Ai fini della modellazione numerica in HEC-RAS, la briglia di ingresso alla cassa d'espansione è stata simulata introducendo una struttura in linea inerodibile assimilabile ad uno stramazzone in parete grossa. Il manufatto regolatore principale (man. A) è stato simulato utilizzando una struttura in linea con il corso d'acqua che presenta le luci di fondo e lo sfioratore superficiale a cui sono state assegnate le relative scale delle portate previste in fase di progettazione. La soglia di fondo in corrispondenza della Sez. 4 è stata modellata imponendo in HEC-RAS che quella specifica sezione trasversale fosse inerodibile.

Analogamente a quanto riportato per la soluzione progettuale "A", nelle Figure 28÷32 sono riportati alcuni dei risultati più significativi ottenuti dal modello numerico per la soluzione progettuale "A ottimizzata".

La Figura 19 riporta l'evoluzione del fondo alveo nel tempo nelle cinque sezioni evidenziate in Figura 27. Rispetto alla soluzione "A" la Sezione 1 è posta più a valle della sua omologa, le Sezioni 2M e 2V sono più a monte, la Sezione 3 è sostanzialmente ubicata ove prima era posizionato il manufatto (Sezione 2), la Sezione 4 è posta al piede della soglia di sostegno dell'oleodotto e la Sezione 5 è ubicata circa 500 m più a valle. Nella Sezione 1, poco a valle del piede del salto di circa 5 m che connette l'alveo "naturale" con quello "sistemato", si osserva una costante tendenza all'innalzamento del fondo, a seguito di deposito di materiale, che supera di poco i 2 metri al termine del periodo simulato. Rispetto alla soluzione "A" l'innalzamento è ridotto a circa 1/3 e la maggior parte di esso si realizza nella prima metà del periodo simulato, con una più accentuata tendenza alla stabilizzazione verso la fine. Ciò può spiegarsi con la meno marcata variazione di pendenza del tratto sistemato (0.7% anziché 0.2% della soluzione "A") e la minor distanza tra la briglia ed il manufatto di regolazione. Naturalmente, sia dal punto di vista della funzionalità che da quello della manutenzione, questa riduzione di innalzamento del fondo è molto positiva.

La Sezione 2M, poco a monte del manufatto, manifesta invece una maggiore tendenza al deposito rispetto alla Soluzione "A" (incremento della quota di fondo di 0.60 m al termine del periodo simulato anziché 0.25 m): ciò è dovuto alla minore lunghezza del tratto 1-2. La Sezione 2V, immediatamente a valle della vasca di dissipazione, pur presentando complessivamente una tendenza all'erosione, dopo un primo periodo in cui raggiunge l'abbassamento di circa 1 m tende ad invertire questa tendenza, riducendo l'abbassamento del fondo a meno della metà, perlomeno prima del manifestarsi dell'evento particolarmente gravoso del 13 ottobre 2014. Ciò è spiegabile con l'aumento progressivo della pendenza del tratto a monte del manufatto, che consente ad una maggior quantità di materiale di pervenire al manufatto e transitare attraverso le luci di fondo. Nella Sezione 3, posta in

corrispondenza del manufatto C, si apprezza una modesta tendenza al deposito. Invece nella Sezione 4, posta al piede della soglia di sostegno dell'oleodotto, si assiste ad una progressiva tendenza all'erosione che raggiunge 1.5 m prima dell'evento del 13 ottobre 2014. Infine nella Sezione 5, 500 m a valle della suddetta soglia, l'erosione è tornata a valori modesti (-0.3 m) e più che accettabili.

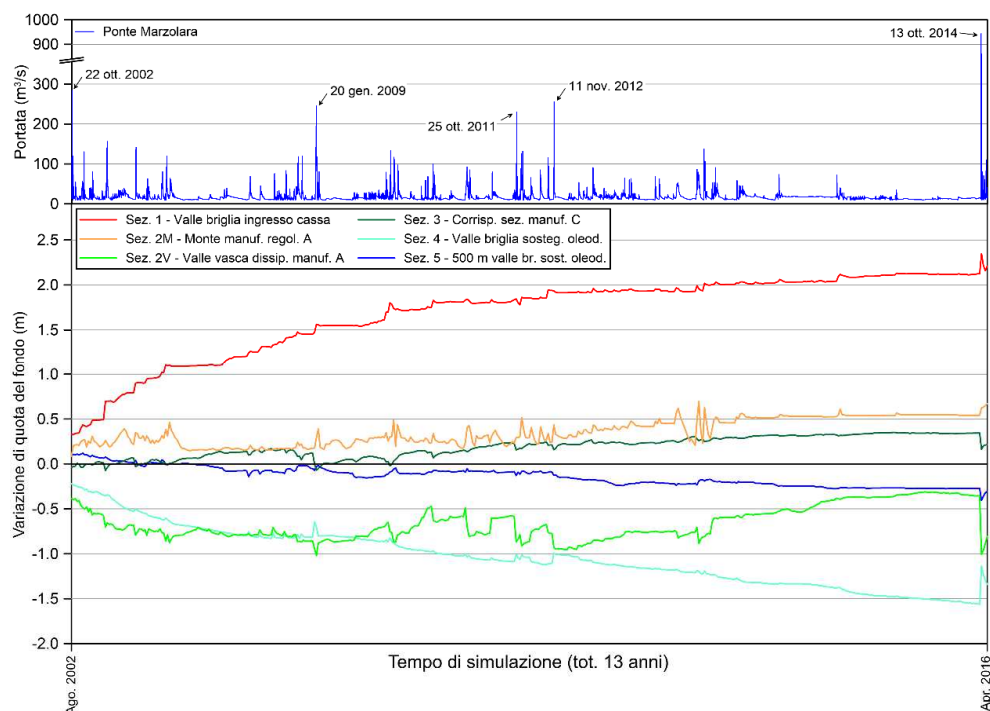


Figura 28 – Andamento temporale della quota di fondo nelle sei sezioni riportate in Figura 27.

La Figura 29 (analoga alla Figura 20 per la soluzione progettuale "A") riporta l'andamento temporale dei volumi transitati attraverso le Sezioni 1, 2 e 5 di Figura 27. Per una più immediata lettura, la Figura 30 (analoga alla Figura 21 per la soluzione progettuale "A") riporta l'andamento temporale dei volumi depositati (+) o erosi (-) nel tratto 1-2 e 2-5, ottenuti mediante differenza dai valori precedenti.

Dal confronto con le omologhe figure mostrate per la soluzione progettuale "A" si nota chiaramente una riduzione della tendenza al deposito nel tratto 1-2, a monte del manufatto, che raggiunge circa $65 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ al termine del periodo di simulazione (13 anni) con un valore medio di circa $5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{anno}$, ovvero circa 1/3 rispetto alla soluzione progettuale "A". Ciò è in parte, ma non solo, da ascrivere alla riduzione di lunghezza del tratto 1-2. Nel tratto 2-5, a valle del manufatto, si ha invece un'erosione pari a circa $25 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, ovvero solo un quarto dell'omologo valore ottenuto per la soluzione progettuale "A" ($100 \cdot 10^3 \text{ m}^3$) e pari circa al 40% di quanto depositato a monte.

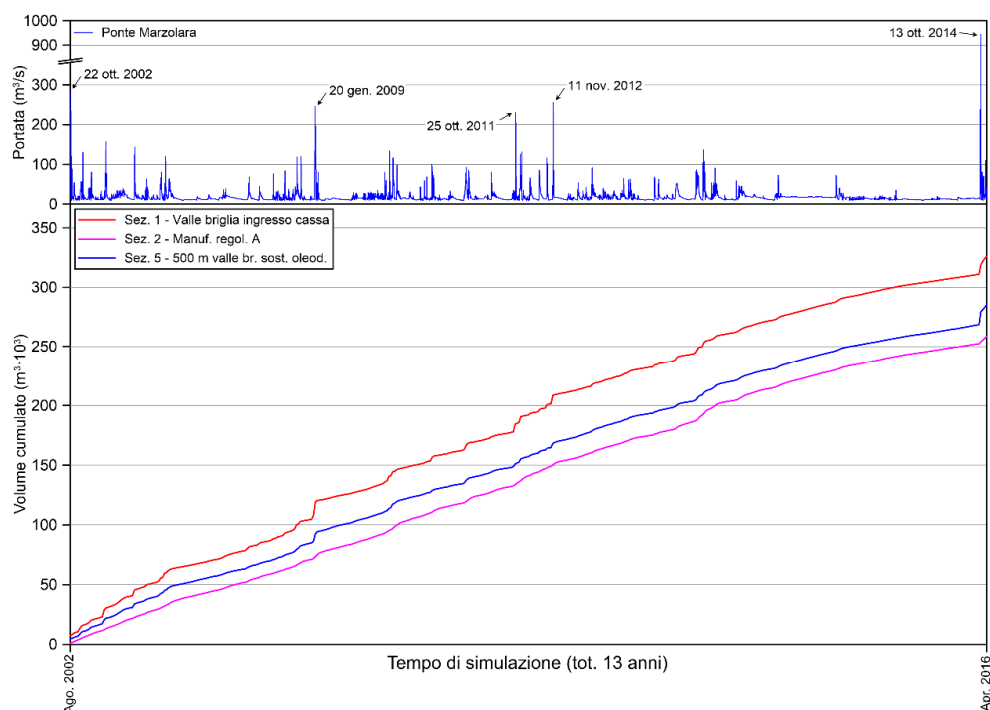


Figura 29 – Andamento temporale dei volumi transitanti attraverso le Sezioni 1, 2 e 5 riportate in Figura 27.

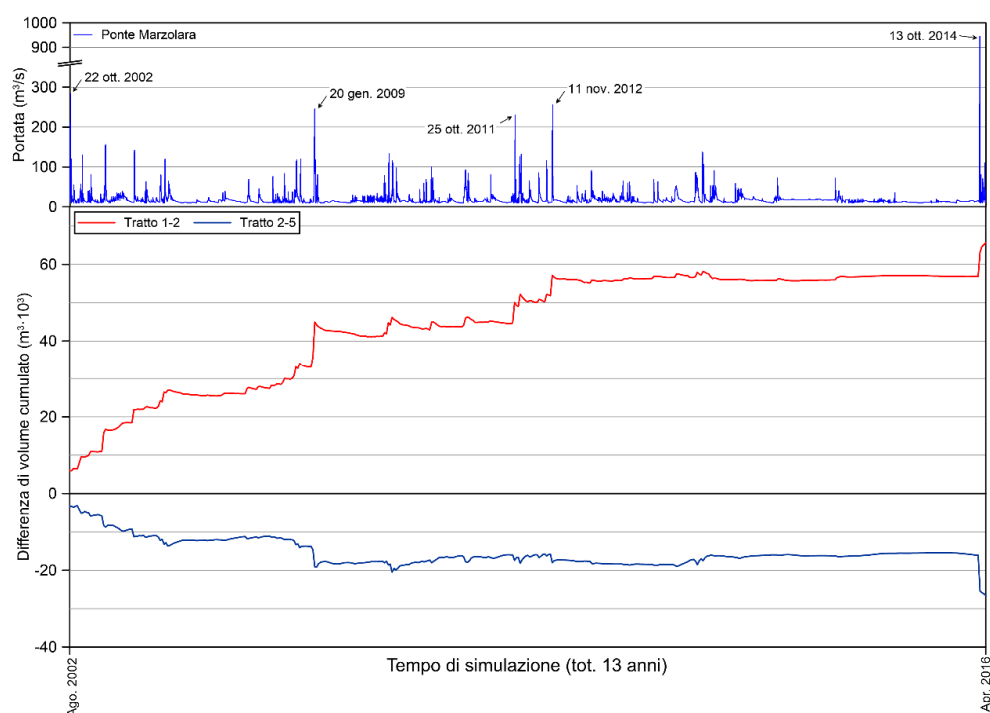


Figura 30 – Andamento temporale dei volumi depositati (+) o erosi (-) nel tratto 1-2 e 2-5 di Figura 27.

Le Figure 31-32, analoghe alle Figure 22-23 per la soluzione progettuale "A", riportano la distribuzione granulometrica del materiale entrante-uscente dai Tratti 1-2 e 2-5. Dalla Figura 31 si evince che, al contrario del caso precedente, anche una percentuale cospicua delle granulometrie di 4, 8 e 16 mm riesce a transitare attraverso la sezione 2 (ovvero il manufatto) e solo le granulometrie di 32 e 64 mm vengono trattenute pressoché totalmente. La Figura 32 mostra poi come queste ultime vengano prelevate dall'alveo a valle della cassa, ripristinando così nella Sezione 5 una distribuzione granulometrica non troppo dissimile da quella originale.

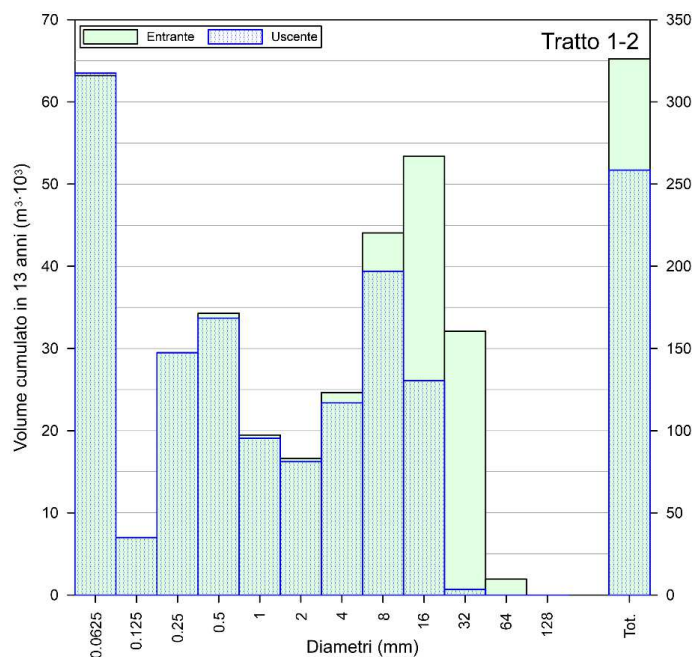


Figura 31 – Distribuzione granulometrica del materiale entrante-uscente dal Tratto 1-2.

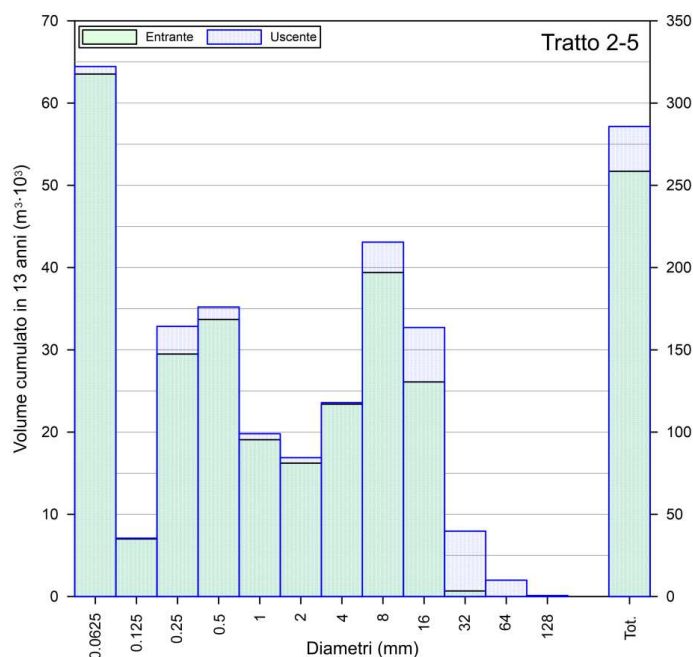


Figura 32 – Distribuzione granulometrica del materiale entrante-uscente dal Tratto 2-5.

4.3.1 Simulazione di lungo periodo per la soluzione “A ottimizzata”

Anche per la soluzione progettuale “A ottimizzata” si è condotta un’ulteriore simulazione di più lungo periodo. La serie storica delle portate in ingresso è stata replicata, escludendo però l’intero anno 2014, contenente l’evento alluvionale del 13 ottobre, in quanto statisticamente di tempo di ritorno superiore all’orizzonte temporale simulato, che raggiunge così i 25 anni.

Le Figure 33÷35 riportano gli andamenti ottenuti delle quote di fondo e dei volumi transitati. Esse estendono le omologhe Figure 28÷30 ad un orizzonte venticinquennale.

Confrontando la Figura 33 con l’omologa Figura 28 si apprezza, nel secondo periodo, la tendenza alla stabilizzazione di alcuni processi evolutivi. In particolare il deposito nella Sezione 1 tende a stabilizzarsi intorno ai 2-2.5 m. La tendenza all’erosione al piede della soglia di sostegno dell’oleodotto invece continua, seppure con un gradiente molto inferiore, raggiungendo i -1.75 m al termine del periodo di simulazione. Le quote di fondo delle altre sezioni intermedie e dell’ultima sezione (Sezione 5) tendono anch’esse ad assestarsi.

La Figura 35 esemplifica bene questa tendenza. I volumi depositati nel Tratto 1-2 e quelli erosi nel Tratto 2-5, pur con alterne vicende legate alle variazioni idrologiche, si mantengono mediamente costanti nell’ultimo periodo di simulazione. Ciò è ovviamente positivo, oltre che per la manutenzione e la funzionalità dell’opera, per la riduzione del disturbo che essa introduce nella dinamica complessiva del trasporto solido del torrente.

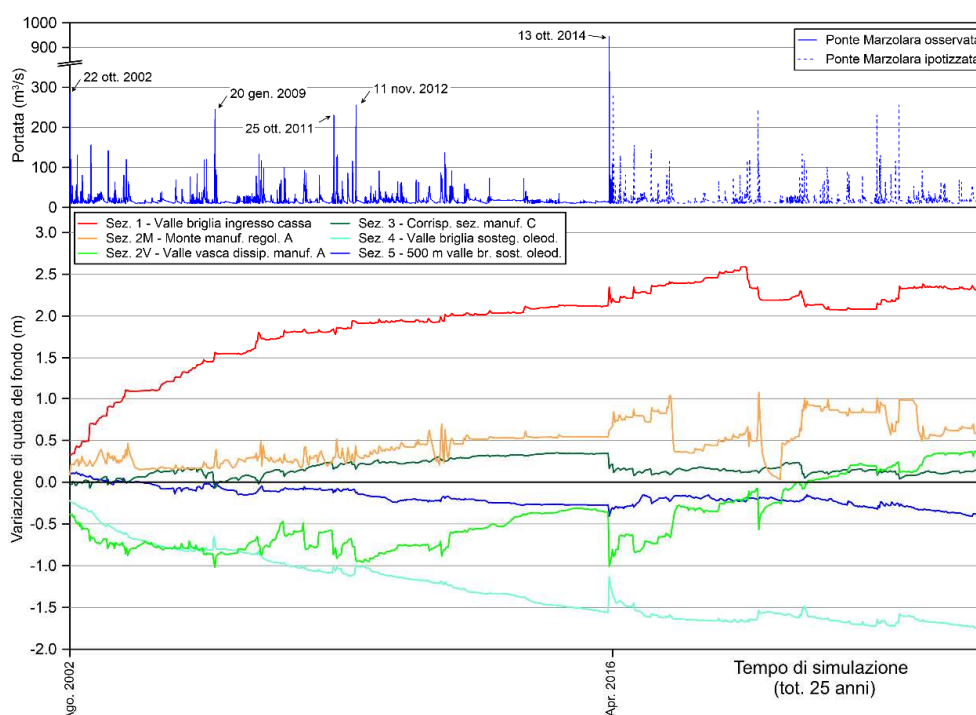


Figura 33 – Andamento temporale della quota di fondo nelle sei sezioni riportate in Figura 27 per la simulazione di 25 anni complessivi.

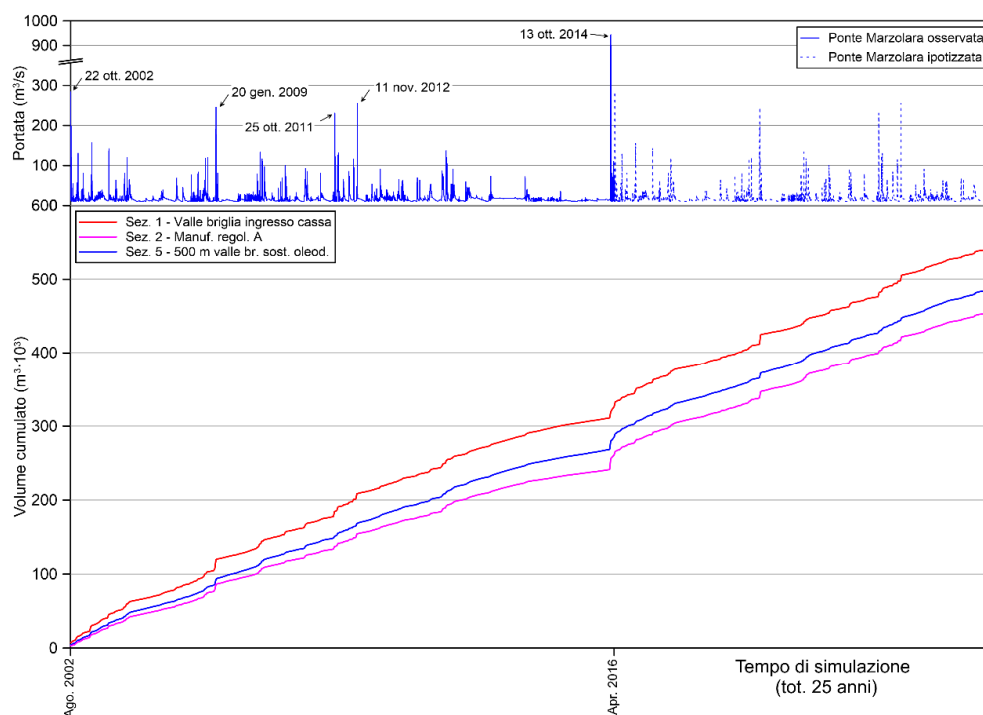


Figura 34 – Andamento temporale dei volumi transitanti attraverso le Sezioni 1, 2 e 5 riportate in Figura 27 per la simulazione di 25 anni complessivi.

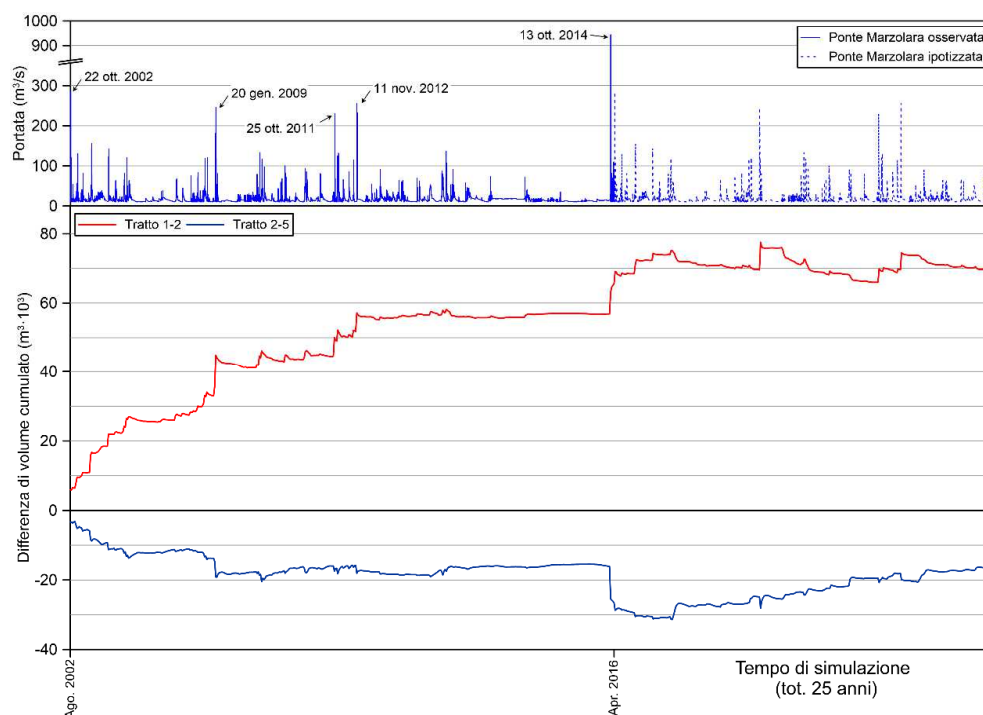


Figura 35 – Andamento temporale dei volumi depositati (+) o erosi (-) nel tratto 1-2 e 2-5 di Figura 27 per la simulazione di 25 anni complessivi.

5. CONCLUSIONI

I risultati delle simulazioni effettuate hanno consentito di valutare l'influenza, sulla dinamica del trasporto solido, delle soluzioni progettuali assunte nel progetto preliminare e nel presente progetto definitivo. In particolare si è analizzata la soluzione progettuale denominata "A", corrispondente al progetto preliminare, e la cosiddetta soluzione progettuale denominata "A ottimizzata" corrispondente al progetto definitivo: quest'ultima prevede, rispetto alla prima, una minore riduzione di pendenza dell'alveo sistemato (con riferimento allo stato di fatto) ed un tratto sistemato, a monte del manufatto di regolazione, di minor lunghezza.

In sintesi i risultati sono i seguenti:

- la soluzione progettuale "A", che prevede una sistemazione dell'alveo per un tratto di lunghezza di circa 1200 m a monte del manufatto regolatore con pendenza pari a 0.2% (rispetto alla pendenza attuale, pari a circa 1.2%) causa una elevata riduzione della capacità di trasporto della corrente, con conseguente tendenza al deposito a valle del sistema di briglie che connette l'alveo "naturale" con quello sistemato. L'innalzamento del fondo alveo al piede del sistema di briglie può valutarsi in 40-45 cm/anno ed il deposito a monte del manufatto in circa $15 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{anno}$. A valle della vasca di dissipazione del manufatto stesso si assiste invece ad una progressiva erosione dell'alveo, visto che la corrente presenta una capacità di trasporto, soprattutto per le granulometrie più grandi, non soddisfatta dal materiale che riesce a transitare attraverso le luci di fondo. L'erosione si può valutare in circa 25 cm/anno, con un volume eroso nel tratto immediatamente a valle del manufatto, di lunghezza pari a 800 m, di circa $7\text{-}8 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{anno}$. L'andamento non è lineare nel periodo simulato (13 anni), ma presenta una modesta tendenza all'attenuazione, a causa dell'aumento di pendenza del tratto sistemato di monte conseguente al deposito. Tuttavia il fenomeno prosegue anche verso la fine del periodo simulato. Si è poi esteso il periodo di simulazione, replicando in parte la serie storica dei dati disponibili, raggiungendo un orizzonte temporale pari a 25 anni idrologici. I risultati evidenziano una riduzione nel tempo dei processi di deposito ed erosione nelle sezioni considerate, anche se non sembra si raggiunga mai un vero e proprio equilibrio. Si registra sempre una modesta tendenza all'attenuazione dei fenomeni di deposito a causa dell'aumento di pendenza del tratto sistemato di monte; l'erosione a valle del manufatto continua, seppur con un gradiente minore;
- la soluzione progettuale "A ottimizzata", assunta nel progetto definitivo, prevede una sistemazione dell'alveo per un tratto di lunghezza di circa 500 m a monte del manufatto regolatore con pendenza pari a 0.7%, causa una minore riduzione della capacità di trasporto della corrente, con conseguente minore tendenza al deposito a valle del salto che connette l'alveo "naturale" con quello sistemato. L'innalzamento del fondo alveo al piede del salto può valutarsi in 15-16 cm/anno ed il deposito a monte del manufatto in circa $5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{anno}$. Rispetto alla soluzione "A" l'innalzamento è ridotto a circa 1/3 e la maggior parte di esso si realizza nella prima metà del periodo simulato, con una più accentuata tendenza alla stabilizzazione verso la fine. Ciò può spiegarsi con la meno marcata variazione di pendenza del tratto sistemato (0.7% anziché 0.2% della soluzione "A") e con la minor distanza tra la briglia ed il manufatto di regolazione (500 anziché 1200 m). Naturalmente, sia dal punto di vista della funzionalità che da quello della manutenzione, questa riduzione di innalzamento del fondo è molto

positiva. A valle della vasca di dissipazione del manufatto di regolazione l'andamento del fondo, pur presentando complessivamente una tendenza all'erosione, dopo un primo periodo tende ad invertire questa tendenza. Ciò è spiegabile con l'aumento progressivo della pendenza del tratto a monte del manufatto, che consente ad una maggior quantità di materiale di pervenire al manufatto stesso e transitare attraverso le luci di fondo. Invece nella sezione posta al piede della soglia di sostegno dell'oleodotto, si assiste ad una progressiva tendenza all'erosione, stimabile in 10-12 cm/anno. Infine 500 m a valle della suddetta soglia, l'erosione torna a valori modesti (2-3 cm/anno) e del tutto comparabili con quelli relativi all'assetto del corso d'acqua in assenza dell'opera. Visto l'andamento meno che lineare dei fenomeni nel tempo, si è anche proceduto, per questa soluzione, ad estendere la simulazione ad un periodo più lungo, pari a 25 anni idrologici. I risultati hanno confermato la tendenza alla stabilizzazione sia del deposito nel tratto sistemato di monte, sia dell'erosione a valle della vasca di dissipazione, che addirittura tende ad azzerarsi. Non risulta così per la sezione a valle della soglia di sostegno dell'oleodotto, che manifesta anche al termine del periodo una tendenza all'erosione, anche se con gradiente ridotto rispetto alla prima parte del periodo simulato.

In definitiva le simulazioni effettuate mostrano che la soluzione progettuale denominata "A ottimizzata", di cui appunto al presente progetto definitivo, pur modificando inevitabilmente la dinamica del trasporto solido lungo l'asta del torrente, risulta molto meno impattante rispetto alla soluzione denominata "A" e, soprattutto, mostra una discreta tendenza alla stabilizzazione dei fenomeni di deposito/ erosione sul medio-lungo periodo.

6. BIBLIOGRAFIA

Brunner, G. (2010). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Lane, S.N., Westaway, R.M., Murray Hicks, D. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3), 249-271.

Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136-156.