

DICCA
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

"Studio idraulico e morfodinamico del torrente Vobbia."

Rapporto finale
(Luglio 2019)

Committente: **Comune di Isola del Cantone**

Responsabile scientifico:

Prof. Ing. Marco Colombini

Collaboratori:

Ing. Michele Bolla Pittaluga

Indice

1 Articolazione temporale delle attività **4**

2 Analisi geomorfologica e sedimentologica dello stato attuale **5**
2.1 Identificazione sezioni per campagna rilievi topografici 5
2.2 Valutazioni idrologiche e sedimentologiche 8

3 Analisi dell'evoluzione storica del profilo altimetrico del fondo alveo **11**
3.1 Analisi dei dati plano-altimetrici 12

4 Analisi dell'evoluzione morfodinamica **18**
4.1 Formulazione matematica del problema 18
4.2 Simulazione del processo di interrimento 21
4.3 Evoluzione fondo 2004-2011 23
4.4 Evoluzione fondo 2011-2018 26
4.5 Evoluzione fondo 2004-2018 28
4.6 Evoluzione fondo 2018-2023 30

5 Conclusioni **35**

Premessa

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova (nel seguito indicato come DICCA) ha stipulato in data 27/9/2018 (decorrenza 1/10/2018) una convenzione con il Comune di Isola del Cantone (nel seguito Comune) relativa ad un'analisi idraulica e morfodinamica del tratto del torrente Vobbia in prossimità dell'abitato di Vobbietta.

L'esecuzione dello studio idraulico e morfodinamico del torrente Vobbia ha come fine la ricostruzione dell'evoluzione temporale dell'assetto del fondo del tratto posto a monte della diga di Vobbietta, con particolare riferimento alla quantificazione del sovralluvionamento e al relativo incremento del rischio di inondazione.

A questo proposito va ricordato che la legge 152/2006 sollecita le Autorità di Bacino, in concorso con gli altri Enti competenti, a predisporre il programma di gestione dei sedimenti a livello di bacino idrografico, quale strumento conoscitivo, gestionale e di programmazione di interventi relativo all'assetto morfologico dei corridoi fluviali. Il programma di gestione dei sedimenti ha l'obiettivo di migliorare lo stato morfologico ed ecologico dei corsi d'acqua e di ridurre il rischio di alluvioni tramite interventi sul trasporto solido, sull'assetto plano-altimetrico degli alvei e dei corridoi fluviali e sull'assetto e sulle modalità di gestione delle opere idrauliche e di altre infrastrutture presenti nel corridoio fluviale e sui versanti che interagiscano con le dinamiche morfologiche del reticolo idrografico. Il programma di gestione dei sedimenti deve prevedere, tra l'altro, la definizione di un quadro conoscitivo a scala spaziale e temporale adeguata, in relazione allo stato morfologico attuale dei corsi d'acqua, alla traiettoria evolutiva degli alvei, alle dinamiche e quantità di trasporto solido in atto, all'interferenza delle opere presenti con i processi morfologici.

Lo studio ha dunque come oggetto l'analisi dell'evoluzione morfodinamica del torrente Vobbia nel recente passato, oltre ad alcune valutazioni sulla dinamica del fondo alveo, sollecitato con una successione di eventi di piena, volte a determinarne la tendenza evolutiva.

La presente relazione costituisce il secondo ed ultimo rapporto previsto nell'ambito della convenzione. Esso si propone di descrivere i risultati delle analisi svolte e delle simulazioni morfodinamiche effettuate. Le attività relative alle fasi 1 e 2 (analisi dello stato attuale e dell'evoluzione storica del fondo alveo) sono già state parzialmente presentate nel rapporto metodologico trasmesso a gennaio 2019. La presente relazione include e completa tale rapporto e ad esso si sostituisce.

1 Articolazione temporale delle attività

Lo studio è stato suddiviso in tre diverse fasi, non necessariamente temporalmente sequenziali:

- **FASE 1** Analisi geomorfologica e sedimentologica dello stato attuale;
- **FASE 2** Analisi dell'evoluzione storica del fondo alveo;
- **FASE 3** Identificazione della tendenza evolutiva dell'alveo;

Nella presente relazione sono descritte tutte le attività svolte nell'ambito della presente convenzione durante il periodo ottobre 2018-luglio 2019, sia, quando necessario, quelle preparatorie, precedenti alla data della stipula.

2 Analisi geomorfologica e sedimentologica dello stato attuale

Obiettivo di questa prima fase è l'individuazione dell'assetto geomorfologico attuale del corso d'acqua. A tale scopo, il tratto oggetto di studio, che si estende per circa 1.6 km a monte della diga di Vobbietta, è stato analizzato attraverso il rilievo topografico, realizzato a cura del Committente, di alcune sezioni idrauliche individuate dal Dipartimento. Tra queste sono state ovviamente incluse quelle realizzate nel 2018 per conto del Committente.

2.1 Identificazione sezioni per campagna rilievi topografici

Nell'ambito dell'accordo di collaborazione scientifica definito dalla convenzione stipulata con il Comune, il DICCA ha definito le sezioni del corso d'acqua sulle quali verrà svolta l'analisi idraulica e morfodinamica in modo che il Comune potesse integrare le sezioni già recentemente rilevate nell'ambito di una campagna topografica già commissionata.

È stato svolto un primo sopralluogo, in data 14 giugno 2018, volto a visionare la zona interessata e a fine agosto 2018 è stata consegnata al Comune la planimetria del tratto oggetto di studio con indicate le tracce delle 24 sezioni individuate

Le sezioni sono state selezionate tra quelle indicate nella cartografia allegata alla Variante al Piano Territoriale di Coordinamento provinciale 'Variante Bacini Padani' (nel seguito VBP).

La numerazione delle sezioni segue quella dei seguenti rilievi, identificati da colori diversi nelle planimetrie di figura 1 e 2.

- **Celeste -** Rilievo 2018, commissionato dal Comune. Le sezioni dalla 7 alla 19 erano già state realizzate e sono state integrate, sempre a cura del Comune, dalle sezioni da 20 a 24. Le sezioni da 1 a 6 saranno realizzate in caso di svuotamento.

- **Blu -** Rilievo 2012, nell'ambito della VBP. Sezioni da 7 a 26.

- **Verde -** Rilievo 2011, nell'ambito del Progetto Gestione Sedimenti. Sezioni da 1 a 13.

- **Rosso -** Rilievo 2005, nell'ambito della VBP. Sezioni da 700 a 707.



Figura 1: Planimetrie del tratto considerato con sovrapposta la traccia delle sezioni idrauliche.



Figura 2: Planimetrie del tratto considerato con sovrapposta la traccia delle sezioni idrauliche.



Figura 3: La stazione idrometrica ARPA di Vobbietta nel 2005.

2.2 Valutazioni idrologiche e sedimentologiche

Lo studio si propone, nella Fase 3, di sollecitare il modello a fondo mobile del tratto considerato con una portata solida ed una liquida in ingresso e con un livello assegnato a valle in corrispondenza della diga di Vobbietta. Tali condizioni al contorno richiedono la conoscenza del regime idrologico del corso d'acqua.

La presenza nel tratto considerato di una stazione idrometrica di ARPA Piemonte (Figura 3), attiva dal 2004, ha consentito di ricostruire tali informazioni.

A tale fine sono state acquisite le portate giornaliere dal 2004 ad oggi, oltre alle scale di deflusso utilizzate, negli anni, per la conversione livelli-portate. Sono state inoltre acquisite le letture di livello campionate a scala oraria, che sono state poi effettivamente utilizzate per le simulazioni svolte nella seconda parte dello studio.

In Figura 4 sono riportate le letture in termini di livelli orari per il periodo 2004-2018. Pur con alcune lacune dovute a malfunzionamenti dell'idrometro o a interventi di manutenzione, il record temporale appare più che sufficiente sia per modellare l'evoluzione altimetrica del corso d'acqua in questi ultimi 15 anni sia per descriverne l'evoluzione futura, ipotizzando che lo stesso scenario idrologico si ripeta nei prossimi anni. Si notano alcuni eventi particolarmente significativi negli anni 2010 e 2014, mentre manca completamente l'anno 2011

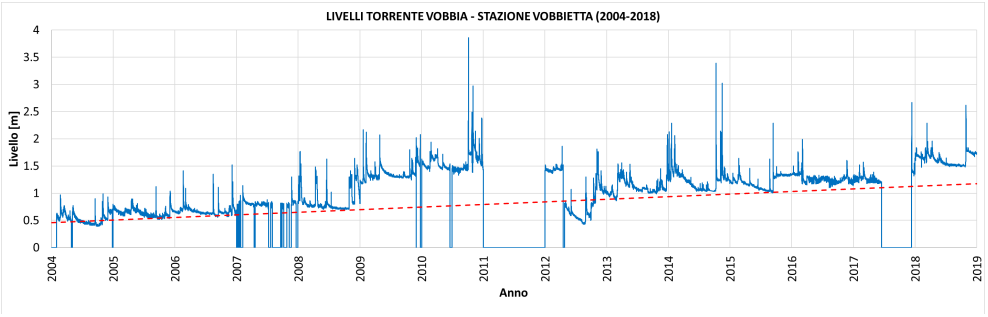


Figura 4: Livelli misurati alla stazione idrometrica ARPA (2004-2018).

e quindi l'evento del 4/11/2011 che ha colpito il bacino del Vobbia, così come la quasi totalità dei bacini liguri.

Va rilevato che la stazione idrometrica ARPA è posizionata su un tratto non plateato soggetto a sovralluvionamento ed è quindi caratterizzata da una marcata variabilità nel tempo della scala di deflusso, che viene continuamente aggiornata su scala annuale e, quando necessario, sub-annuale da ARPA Piemonte. La linea rossa tratteggiata in Figura 4 vuole approssimare il fondo scala delle diverse letture nel periodo 2004-08 e 2013-17 e mostra come il fondo, nella sezione di misura, si sia progressivamente innalzato ad una velocità media di circa 5 cm/anno, dato su cui torneremo nel seguito.

Utilizzando le scale di deflusso fornite da ARPA, i livelli orari di Figura 4 sono stato convertiti in portate, ricostruendo così lo scenario idrologico che ha sollecitato il torrente nel periodo considerato. Una rapida analisi dei dati idrologici mostra che la massima portata registrata (123 m^3/s) appare nel 2014 ed è associabile ad un tempo di ritorno pari a circa 25 anni. La portata con tempo di ritorno due anni, spesso indicata come portata morfologica rappresentativa corrisponde a circa 25 m^3/s, mentre la media dei massimi annuali nel periodo è pari a circa 36 m^3/s. Permane, a detta dei tecnici interpellati, una certa incertezza per quanto riguarda in particolare la misura delle portate al colmo negli eventi di piena, che appare però superabile nel contesto del presente studio, ricordando che gli eventi morfologicamente più significativi sono quelli associati ad eventi di morbida più che di piena.

Per quanto riguarda infine la caratterizzazione dei sedimenti in alveo si è acquisita una analisi granulometrica svolta nel 2013 dal Laboratorio Geotecnico GET s.r.l. che individua un d_{50} (diametro mediano della miscela) pari a circa 17 mm e un d_{90} pari a circa 40 mm.

Va ricordato che, assumendo condizioni di moto uniforme e scegliendo un'opportuna formula di trasporto, all'idrogramma delle portate liquide misurato può essere associato un sedimentogramma, che, per ogni valore della

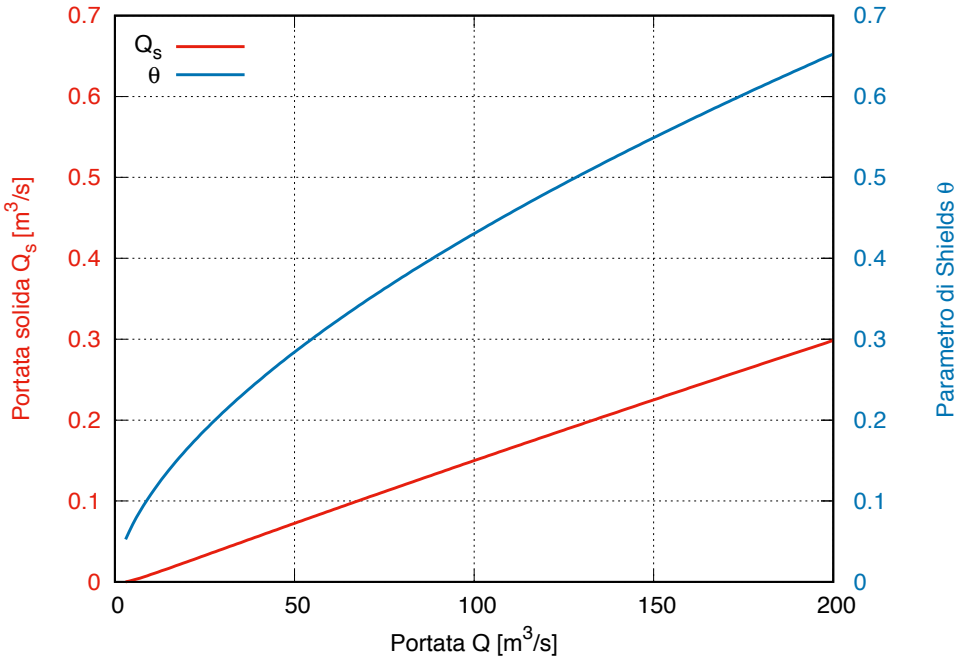


Figura 5: Capacità di trasporto e parametro di Shields in funzione della portata liquida in condizioni di moto uniforme.

portata liquida in ingresso, esprime la capacità di trasporto della corrente e quindi la portata solida in ingresso nel tratto considerato.

Nella Figura 5 è mostrata in blu la curva che esprime, per le diverse portate, la tensione adimensionale di Shields

$$\theta = \frac{RS}{(s-1)d_{50}} \tag{1}$$

dove R è il raggio idraulico (rapporto area/contorno bagnato), S è la pendenza media del tratto, s è la densità relativa dei sedimenti (2.65 per sabbia).

In rosso, nella stessa figura, è riportata la curva che permette di stimare la portata solida, secondo la

$$Q_s = b_f \sqrt{(s-1)g d_{50}^3}\,\Phi(\theta) \qquad \Phi(\theta) = 3.97(\theta - 0.0495)^{3/2} \tag{2}$$

dove b_f è la larghezza dell'alveo attivo a superficie libera e la portata solida adimensionale $\Phi(\theta)$ è stimata attraverso la formula di Wong & Parker (2006). Come si può notare, l'andamento della portata solida è quasi lineare e corrisponde a circa 0.0015 m^3 di sedimenti (senza considerare i vuoti) per m^3 di liquido.

3 Analisi dell'evoluzione storica del profilo altimetrico del fondo alveo

Obiettivo di questa seconda fase è quello di raccogliere informazioni sulla tendenza evolutiva dell'alveo nel recente passato. A tale scopo, sono stati raccolti i dati plano-altimetrici disponibili relativi ai tratto oggetto di studio, con particolare riferimento ai rilievi topografici utilizzati nelle verifiche idrauliche contenute nel Piano Territoriale di Coordinamento provinciale Variante Bacini Padani (VBP) ma anche a tutti quei rilievi topografici associati a interventi di sistemazione, già realizzati o in progetto, che permettano di risalire all'assetto altimetrico del corso d'acqua negli ultimi decenni.

In particolare, al momento della stesura del presente rapporto sono stati acquisiti le seguenti informazioni topografiche:

- Geometria HEC-RAS - Variante Bacini Padani (2005 - Regione Liguria)
- Rilievo Progetto Gestione Sedimenti (2011 - Regione Liguria)
- Geometria HEC-RAS - Variante Bacini Padani (2012 - Regione Liguria)
- Rilievo Studio B3S - (2018 - Comune di Isola del Cantone)
- Scala di deflusso stazione idrometrica Vobbietta - (2004-2018 - ARPA Piemonte)

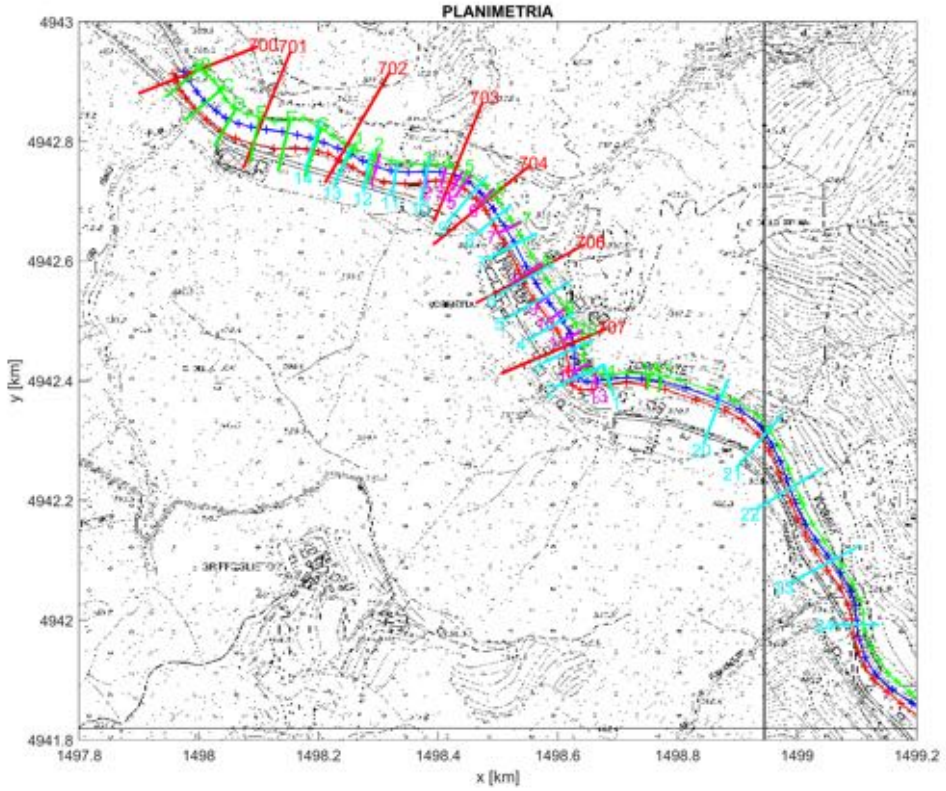


Figura 6: Planimetria del tratto considerato con indicazione delle sezioni relative ai diversi rilievi.

3.1 Analisi dei dati plano-altimetrici

Le sezioni rilevate nelle diverse campagne topografiche sono state sovrapposte planimetricamente in modo da consentire l'individuazione di un'unica coordinata longitudinale di riferimento (vedi figura 6), sulla base della quale sono stati realizzati i diversi profili altimetrici della linea di fondo alveo, ciascuno corrispondente ad un particolare rilievo e quindi in grado di descrivere l'assetto del fondo nel periodo corrispondente. Particolare cura è stata dedicata al posizionamento relativo dei diversi rilievi, anche attraverso la verifica di capisaldi di sezione o, più in generale, di punti fissi che consentissero di collocare accuratamente in senso altimetrico i rilievi effettuati in anni diversi, per un corretto confronto. Quanto sopra vale ovviamente anche per il rilievo topografico 2018, di cui alla sezione 2.1.

I dati topografici dei rilievi dei diversi anni sono stati poi analizzati per estrarre due informazioni sintetiche da ciascuna sezione del rilievo: il thalweg, identificato dalla quota del punto più basso della sezione e la quota

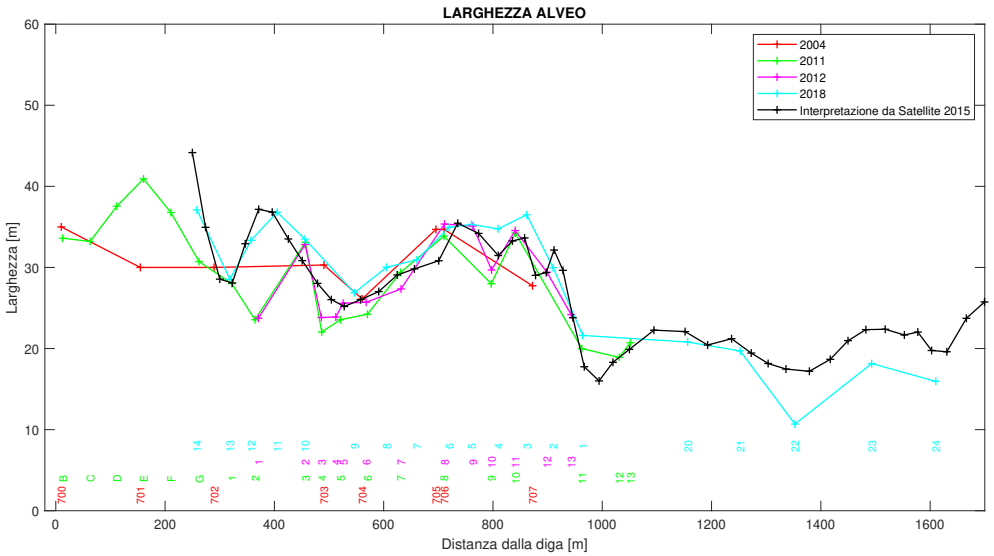


Figura 7: Variazione della larghezza dell'alveo attivo nel tratto considerato.

media del fondo, identificata come il valor medio delle quote dei punti appartenenti all'alveo attivo, cioè quella parte della sezione che, se bagnata, partecipa attivamente al trasporto di sedimenti. Il dato medio fornisce in genere un risultato più stabile rispetto al thalweg, che risente fortemente della morfologia locale, ma richiede di definire a priori l'alveo attivo.

In Figura 7 viene riportata la larghezza dell'alveo attivo così come determinata dall'analisi delle sezioni rilevate. Si può notare come, procedendo da valle verso monte, le sezioni del primo chilometro siano caratterizzate da una larghezza media pari a circa 30-35 metri, mentre nel secondo chilometro tale valore scenda bruscamente a circa 15-20 metri, mantenendosi poi approssimativamente costante.

Nelle Figure 8 e 9 sono riportati, rispettivamente, i profili altimetrici del thalweg e del fondo medio per i diversi rilievi acquisiti. Si può notare come in entrambi i grafici si osservi la presenza di un ingente deposito nel periodo compreso tra il 2004 e il 2011, che va progressivamente crescendo da monte verso valle, fino a raggiungere spessori dell'ordine di diversi metri in prossimità della diga. Il confronto tra i rilievi 2012 e 2018 sembrerebbe indicare un sostanziale equilibrio, con una modesta tendenza al deposito solo nell'ultima sezione a monte del lago. Va sottolineato, però, che nel periodo 2010-2014 l'alveo è stato soggetto a ripetuti interventi di asportazione di sedimenti e a significativi apporti solidi legati agli intensi eventi di piena del 2011 e del 2014 e solo dal 2015 ha ripreso la sua naturale tendenza evolutiva.

In particolare, in una relazione del Servizio Controllo e Gestione del Ter-

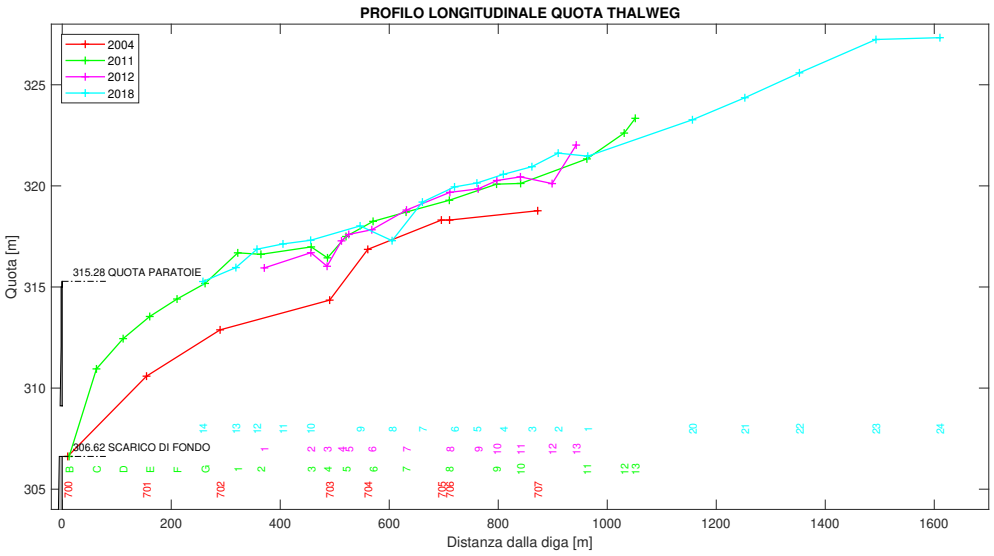


Figura 8: Profilo del thalweg nei diversi rilievi.

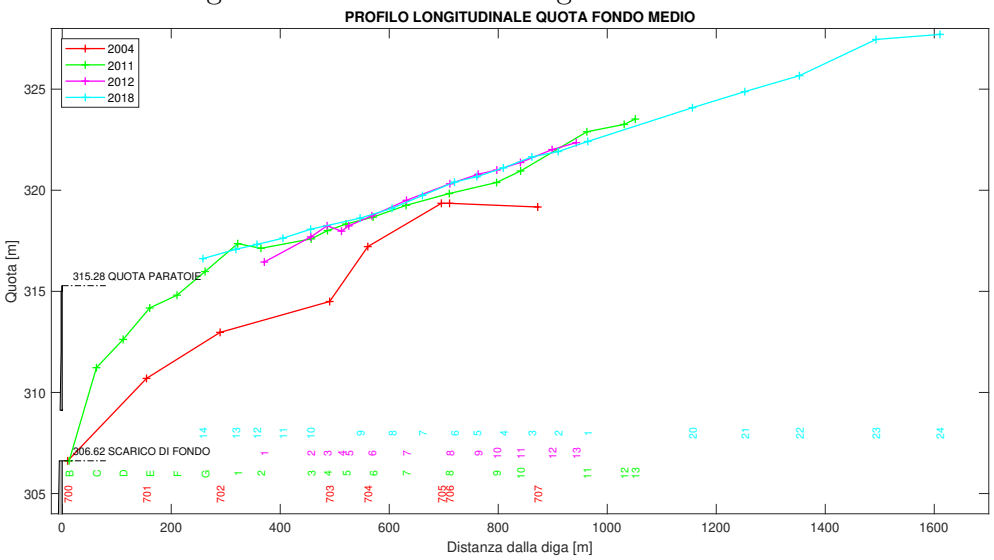


Figura 9: Profilo della quota media del fondo attivo nei diversi rilievi.

ritorio della Provincia di Genova risalente al 2013 vengono stimati i volumi asportati nel tratto in esame nei diversi anni:

Anno	2010	2011	2012	2013	2014
Prelievo $[m^3]$	6000	4800	2600	1500	5250

A titolo di confronto, nella stessa relazione è stato stimato in circa 2600 m^3 il volume complessivo di sedimenti depositati durante l'evento di piena del novembre 2011. Al momento della stesura della relazione, il prelievo

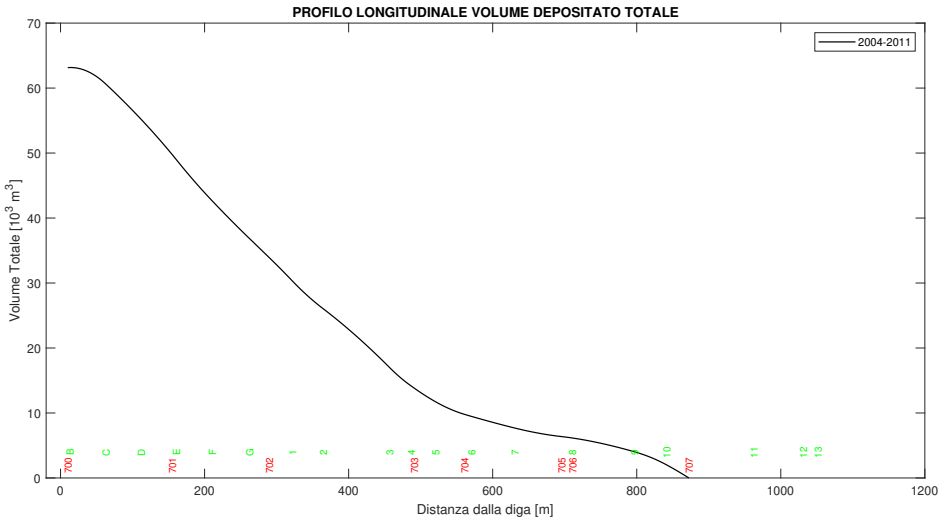


Figura 10: Volume depositato nel periodo 2004-2011 in funzione della distanza dalla diga.

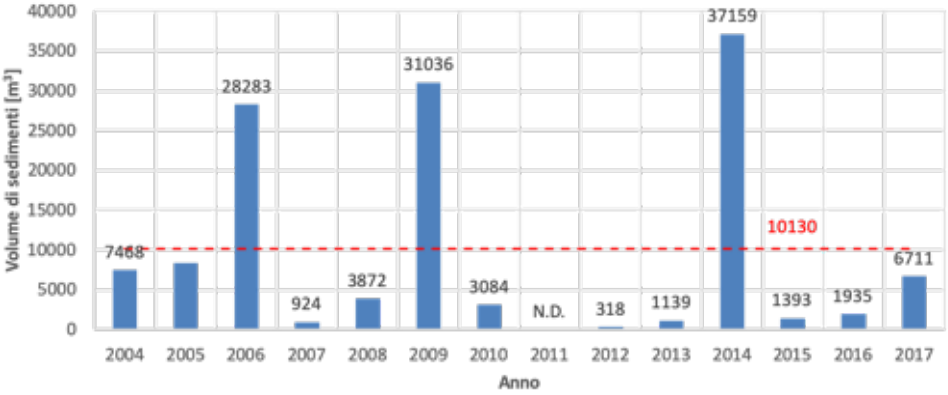


Figura 11: Apporto di sedimenti annuo stimato sulla base della ricostruzione dei sedimentogrammi in ingresso nel tratto considerato.

ipotizzato per il 2013 era di circa 7600 m^3 ma è stato poi ridotto in corso d'opera e suddiviso tra 2013 e 2014 (Fonte: Regione Liguria). Non si ha notizia di ulteriori prelievi negli anni seguenti.

Il grafico in Figura 10 mostra l'andamento del volume depositato nel periodo 2004-2011 in funzione della distanza dalla diga. In particolare, allontanandosi dalla diga il grafico riporta il volume di sedimenti complessivamente depositato nel tratto a monte della sezione considerato. Come può notarsi, l'invaso della diga è soggetto ad un progressivo interrimento, i cui effetti si propagano verso monte generando un sovralluvionamento in corrispondenza dell'abitato di Vobbietta pari a circa 10000 m^3 in termini di volume comples-

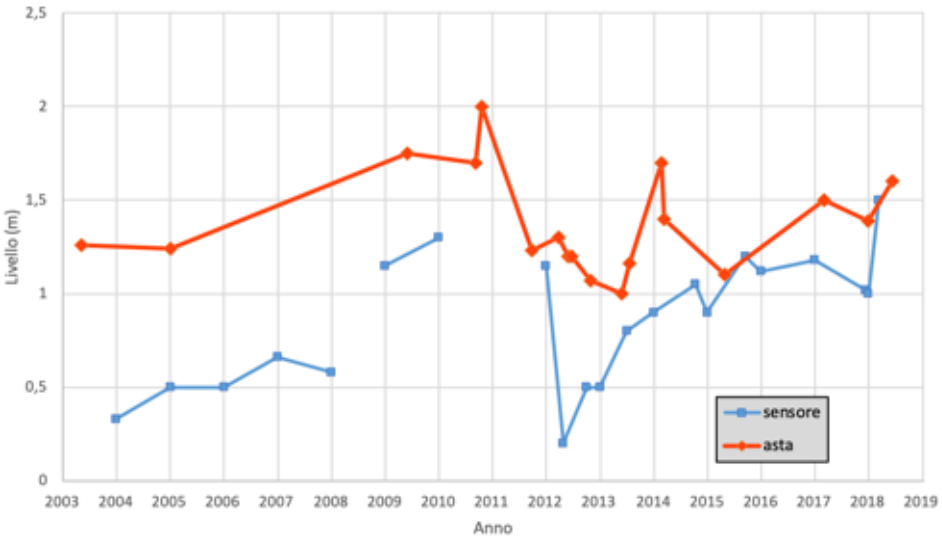


Figura 12: Variazione del fondo scala della stazione idrometrica ARPA Piemonte.

sivamente depositato nel tratto. Nel settennio considerato il volume complessivo dei sedimenti depositati è stato stimato in circa 66000 m^3 a cui vanno aggiunti i circa 11000 m^3 asportati nel periodo 2010-2011. Mediamente si tratta di circa 11000 m^3/anno, come confermato anche dal grafico di Figura 11 dove sono rappresentati i volumi complessivi depositati nei diversi anni sulla base delle ricostruzione dei sedimentogrammi in ingresso, assumendo che tutti i sedimenti in ingresso vengano depositati nel tratto considerato. Si noti come l'apporto annuo negli anni 2006, 2009 e 2014 sia sensibilmente maggiore rispetto agli altri anni, raggiungendo valori dell'ordine dei 37000 m^3, ma il valore medio annuo si attesti nuovamente intorno agli 11000 m^3.

L'analisi della scala di deflusso associata alla stazione idrometrica di ARPA Piemonte posta in corrispondenza del ponte di Vobbietta (vedi Figura 6) fornisce ulteriori interessanti informazioni. Su una pila dello stesso ponte è inoltre posizionata un'asta idrometrica, che consente di stimare la quota del fondo alveo al piede della pila stessa e, per questo motivo, è stata più volte fotografata negli anni. In Figura 12 sono mostrati in blu i diversi valori del fondo scala (la lettura corrispondente a portata nulla) identificati da ARPA Piemonte e in rosso le stime della quota del fondo alveo in corrispondenza dell'asta idrometrica effettuate attraverso la documentazione fotografica.

Si può notare come nel periodo 2004-2010 la quota del fondo scala vada via via aumentando, con velocità di crescita praticamente costante (pari a circa 5-10 cm/anno), a testimoniare il progressivo innalzamento del fondo

in corrispondenza del sensore di misura. Va sottolineato che tra il 2008 e il 2009 il sensore è stato spostato dall'arcata in sponda sinistra ad una più centrale, con una modifica del fondo scala dell'ordine dei 30-40 cm a cui non deve evidentemente essere associato un sovralluvionamento. Come già discusso nella sezione dedicata all'analisi idrologica il dato relativo al 2011 è completamente assente, presumibilmente per un fermo di manutenzione. Nel 2012 si osserva un brusco abbassamento del fondo, che riporta la lettura ai livelli del 2004. Dal 2012 fino al 2016 il fondo ricomincia a salire, ad una velocità media di circa 20-25 cm/anno, riportandosi al valore rilevato nel 2009. Dal 2016 al 2018, infine, il dato rimane sostanzialmente stabile, con un leggero abbassamento nel 2017 seguito da un brusco innalzamento nel 2018 che conduce al massimo mai osservato, pari a 1.5 m.

Il dato è puntuale, e quindi risente degli interventi di sistemazione solo nel momento in cui questi insistono sulla sezione dove è posizionata la stazione, ma nel complesso la tendenza evolutiva del corso d'acqua sembra essere chiara. Un'ulteriore conferma viene dalla stima della quota del fondo effettuata, nei diversi anni, sulla base delle fotografie dell'asta idrometrica installata su una pila del ponte stesso e rappresentate con linea rossa in Figura 10. Anche se con minore accuratezza, dovuta ai fenomeni di erosione e deposito che si manifestano in vicinanza delle pile dei ponti, il dato sembra riprodurre lo stesso comportamento.

4 Analisi dell'evoluzione morfodinamica

In quest'ultima fase dello studio, sono state svolte diverse simulazioni numeriche sollecitando il tratto in esame con i valori di portata liquida corrispondenti alle letture idrometriche registrate in corrispondenza della stazione idrometrica di ARPA Piemonte e identificando le corrispondenti portate solide in ingresso che si ipotizza coincidere con le relative capacità di trasporto della corrente.

Le simulazioni svolte avevano un duplice obiettivo: ricostruire l'evoluzione altimetrica del fondo alveo nel recente passato al fine di verificare il comportamento del modello alla luce dei rilievi acquisiti nella fase 2 e individuare la tendenza evolutiva dell'alveo a partire dallo stato attuale, ipotizzando che lo scenario idrologico registrato in questi ultimi anni si ripeta identicamente.

Nella ricostruzione sono stati presi in esame gli effetti morfodinamici associati ai consistenti prelievi di sedimenti avvenuti negli anni 2010-2015 e la progressiva riduzione della superficie del lago Savio dovuta all'avanzamento del fronte di sedimenti. È stato inoltre simulato l'effetto di un eventuale abbassamento della diga di Vobbietta.

4.1 Formulazione matematica del problema

Il problema matematico che si pone è quello di determinare l'andamento nello spazio e nel tempo del profilo della superficie libera e del profilo altimetrico del fondo del tratto del torrente Vobbia in esame, sotto le seguenti condizioni:

1. nella sezione iniziale viene assegnata la portata liquida in funzione del tempo e una portata solida assunta pari alla capacità di trasporto della corrente con i valori istantanei e locali di profondità e portata;

2. il profilo altimetrico iniziale del fondo è quello che si evince dai rilievi forniti dal Committente; in alcune simulazioni è stato artificialmente rimosso un assegnato volume di sedimenti, simulando un intervento di sistemazione;

3. nella sezione terminale del tronco esaminato viene imposta una quota corrispondente al livello che si realizzerebbe in corrispondenza delle paratoie della diga per il valore istantaneo di portata defluente.

4. non sono stati simulati gli interventi di svuotamento e di scarico della diga avvenuti nel periodo considerato in quanto sporadici e in grado di movimentare ridotte quantità di sedimenti.

Indicate con x una coordinata spaziale definita lungo l'asse del corso d'acqua e con t la variabile temporale, le funzioni incognite del problema sono (fig. 13):

$h(x,t)$ carico piezometrico (quota della superficie libera) nella sezione x all'istante t;
$\eta(x,t)$ quota media del fondo della sezione;
$Q(x,t)$ portata volumetrica liquida che attraversa la sezione x all'istante t.

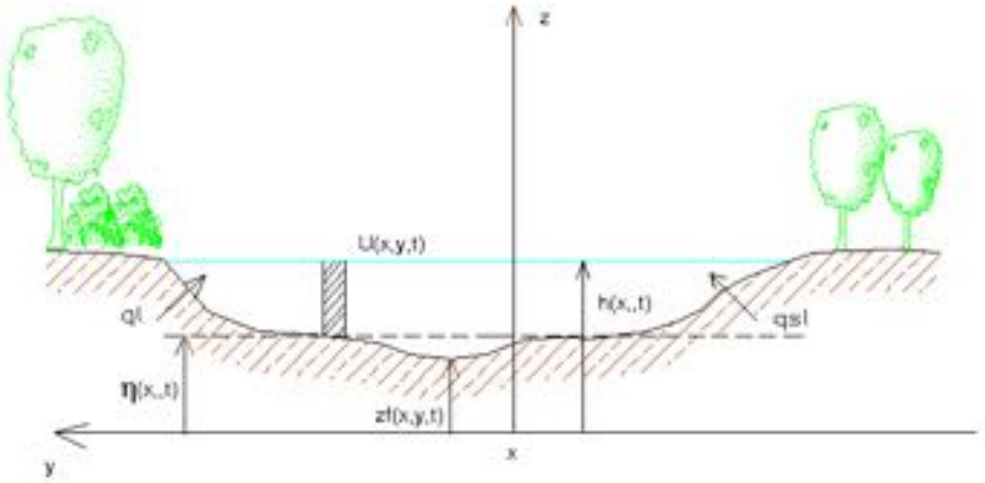


Figura 13: Schema della generica sezione dell'alveo e notazioni.

La loro determinazione richiede la soluzione del sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che impongono i principi di conservazione della massa e della quantità di moto per le fasi fluida e solida. Esse si scrivono nella forma:

Conservazione della massa per la fase fluida

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

Principio della quantità di moto per la fase fluida

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\beta \frac{Q^2}{\Omega}\right) + g\Omega \frac{\partial h}{\partial x} + g\Omega j = 0 \tag{4}$$

Conservazione della massa per la fase solida

$$(1-p) b_f \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

dove b_f è la larghezza del fondo attivo della sezione, β rappresenta il coefficiente correttivo della quantità di moto, assunto nel seguito unitario, j è la perdita di carico totale per unità di lunghezza, p è la porosità dei sedimenti e Q_s è la portata volumetrica solida integrata sulla sezione.

Il calcolo delle quantità Ω e j si effettua, in sezioni di forma irregolare, attraverso opportuni integrali nella sezione. Si trova:

$$\Omega = \int_b (h - z_f(y))dy \tag{6}$$

$$j = \frac{Q^2}{gC^2\Omega^2 R} = \frac{Q^2}{g\left[\int_b c(y)(h - z_f(y))^{3/2}dy\right]^2} \tag{7}$$

avendo indicato con b la larghezza della superficie libera, con $z_f(y)$ la quota del punto generico del fondo della sezione e con $c(y)$ la conduttanza locale, espresse in funzione della coordinata trasversale y. I valori di z_f si otterranno dai rilievi delle sezioni, mentre per la quantificazione della conduttanza locale $c(y)$ sarà adottata la formula di Strickler:

$$c = \frac{k_s}{\sqrt{g}}(h - z_f)^{1/6} \tag{8}$$

con k_s coefficiente dimensionale di Strickler assunto pari a 33 $m^{\frac{1}{3}}/s$.

Per la valutazione della portata solida Q_s si farà ricorso a relazioni empiriche disponibili in letteratura che ne forniscono il valore riferito all'unità di larghezza q_s in funzione dei valori assunti localmente dalle grandezze idrodinamiche e assumendo i sedimenti uniformi e di diametro d pari al d_{50} rilevato attraverso le misure sedimentologiche. In particolare, si farà riferimento alla relazioni (1) e (2), dove il valore locale della tensione di Shields θ riferito al diametro d può porsi in generale nella forma:

$$\theta = \frac{u_*^2}{(s-1)gd} = \frac{(h - z_f)}{(s-1)d}j \tag{9}$$

avendo indicato con u_* la velocità d'attrito e ipotizzando che lo stato della corrente possa schematizzarsi come successione lentamente variabile nello spazio e nel tempo di stati quasi uniformi.

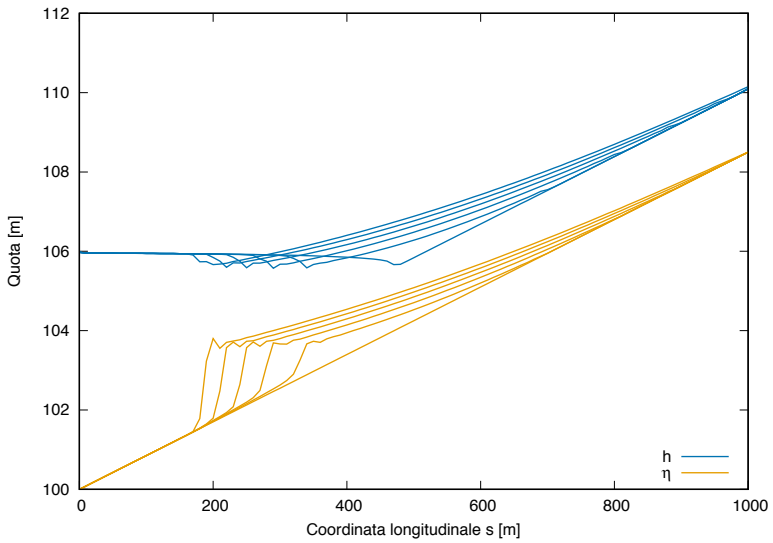


Figura 14: Simulazione a fondo mobile di un canale a sezione trapezoidale con sbarramento.

4.2 Simulazione del processo di interrimento

In Figura 14 è riportato il risultato di una simulazione a fondo mobile realizzata in un canale schematico a sezione trapezoidale, con caratteristiche geometriche simili a quelle del tratto del torrente Vobbia considerato. La portata liquida in ingresso così come la quota di valle, sono costanti nel tempo.

La simulazione parte da un fondo a pendenza costante pari a 0.0085 e mostra la propagazione di un'onda di deposito (in marrone) e il suo effetto sul profilo della superficie libera (in blu). Si è simulato un periodo di circa 7 ore durante le quali la portata liquida in ingresso era pari a 200 m^3/s. I diversi profili sono spaziati temporalmente di circa 1.5 ore.

Si può osservare come la corrente veloce in moto uniforme proveniente da monte si raccordi al profilo quasi orizzontale di corrente lenta imposto dallo sbarramento attraverso un risalto idraulico. La sezione dove si localizza il risalto identifica dunque il lembo superiore del lago Savio. Si noti come il fronte di sedimenti si stia propagando all'interno del lago e come la pendenza del tratto di monte vada via via diminuendo. Il risultato netto è quello di una riduzione della superficie del lago (il risalto si sposta, insieme al fronte, verso la diga) e di un progressivo innalzamento del fondo in tutto il tratto, sempre meno intenso quanto più ci si allontana dalla diga. Pur con tempi e intensità diverse, questa semplice simulazione riproduce qualitativamente, come mostrato nel seguito, la dinamica del fondo alveo nel tratto a monte



Figura 15: Interrimento della diga del Castello.

della diga di Vobbietta e il progressivo interramento del lago.

Procedendo con la simulazione si osserverebbe il progressivo interramento dell'invaso. Solo quando la quota del fondo raggiunge la quota superiore dello sbarramento i sedimenti, finalmente in grado di propagarsi verso valle, potrebbero consentire il realizzarsi di un profilo a pendenza costante in equilibrio con le portate, liquide e solide, in ingresso. Questa configurazione è in effetti osservabile poco più a monte, in corrispondenza della diga del Castello, costruita negli anni 20 e utilizzata per scopi industriali fino agli anni 90. A causa del danneggiamento delle opere idrauliche della diga dovuto ad un evento alluvionale, il lago fu lasciato vuoto per diversi anni e la diga venne abbassata di circa 3 m rispetto agli originali 9 m. Il bacino venne di nuovo ripristinato nel 2010, ma già nel 2011 si presentava completamente interrato, come nella foto di figura 15 ripresa durante il sopralluogo del Giugno 2018.

4.3 Evoluzione fondo 2004-2011

La prima serie di simulazioni si propone di riprodurre l'evoluzione altimetrica dell'alveo intercorsa nel periodo 2004-2011, partendo dall'assetto rilevato nel 2004, sollecitando il modello con le portate liquide orarie rilevate alla stazione ARPA e con le corrispondenti portate solide stimate attraverso le (2) e confrontando il risultato finale della simulazione con l'assetto del fondo rilevato nel 2011. Si noti che, per convenzione, nel seguito si farà sempre riferimento al primo di gennaio dell'anno citato.

Nelle figure 16 e 17 si può osservare il progressivo avanzamento del fronte di sedimenti, mediamente pari a circa 40 m/anno, a cui corrisponde un pari arretramento della linea di riva del lago Savio. Nel complesso il confronto con il rilievo 2011 appare più che soddisfacente, in particolare per quanto riguarda il fondo medio, il cui assetto longitudinale risulta molto più regolare di quello del thalweg, più sensibile alla geometria della sezione.

La principale differenza rispetto del profilo simulato rispetto a quello rilevato al 2011 consiste nel differente assetto del fondo nella zona del lago. Il fronte simulato risulta infatti molto più ripido del fondo rilevato, anche se il complessivo volume depositato risulta approssimativamente conservato. La forte pendenza del fronte simulato è dovuta al fatto che, al momento dell'ingresso nel lago, la corrente subisce un brusco allargamento che conduce ad una riduzione della velocità media e all'annullarsi della capacità di trasporto, con il risultato di depositare localmente tutti i sedimenti trasportati. Nelle simulazioni viene infatti completamente trascurata, perché poco influente in condizioni di normale trasporto, l'inerzia dei sedimenti stessi. Anche l'assunzione di una granulometria uniforme ha un'influenza sull'assetto del fronte perché, a parità di profondità e velocità della corrente e, quindi, di tensione al fondo, il parametro di Shields aumenta al diminuire del diametro dei sedimenti. Il materiale più fine è quindi in grado di essere trasportato anche per quei valori di profondità per cui il sedimento di diametro mediano utilizzato nelle simulazioni risulta immobile. Come conseguenza, in prossimità del fronte si realizza un processo di selezione granulometrica secondo cui le frazioni fini possono avvicinarsi alla diga più di quelle grossolane, conducendo, in ultima analisi, ad un fronte meno ripido.

Nelle figure 18 e 19 le valutazioni numeriche sono confrontate con le osservazioni di campo per quanto riguarda la variazione della quota del fondo medio nel periodo 2004-2011 e il volume depositato al variare della distanza dalla diga. In entrambi i casi si può notare un ottimo accordo delle simulazioni con le stime del deposito effettuate attraverso i rilievi topografici, a testimonianza di quanto il modello numerico qui utilizzato ben rappresenti la dinamica del processo di interrimento della diga.

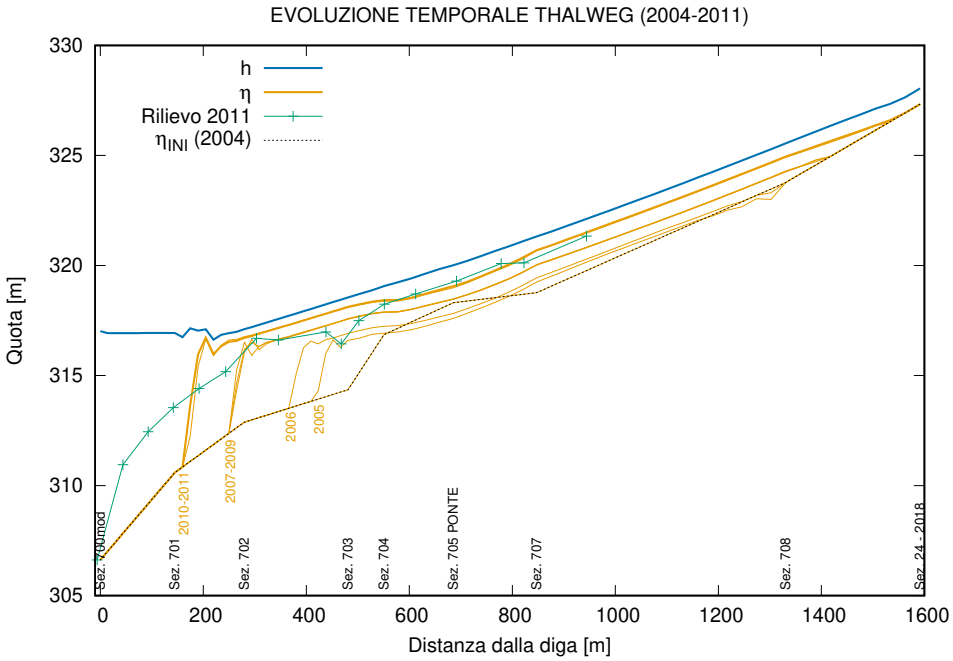


Figura 16: Evoluzione temporale del thalweg (2004-2011).

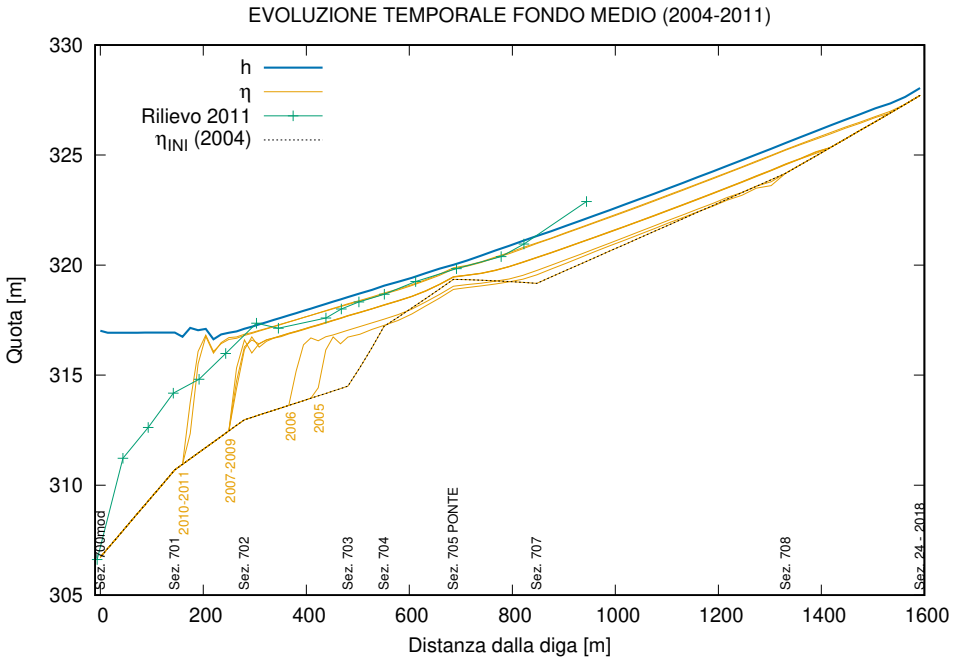


Figura 17: Evoluzione temporale del fondo medio (2004-2011).

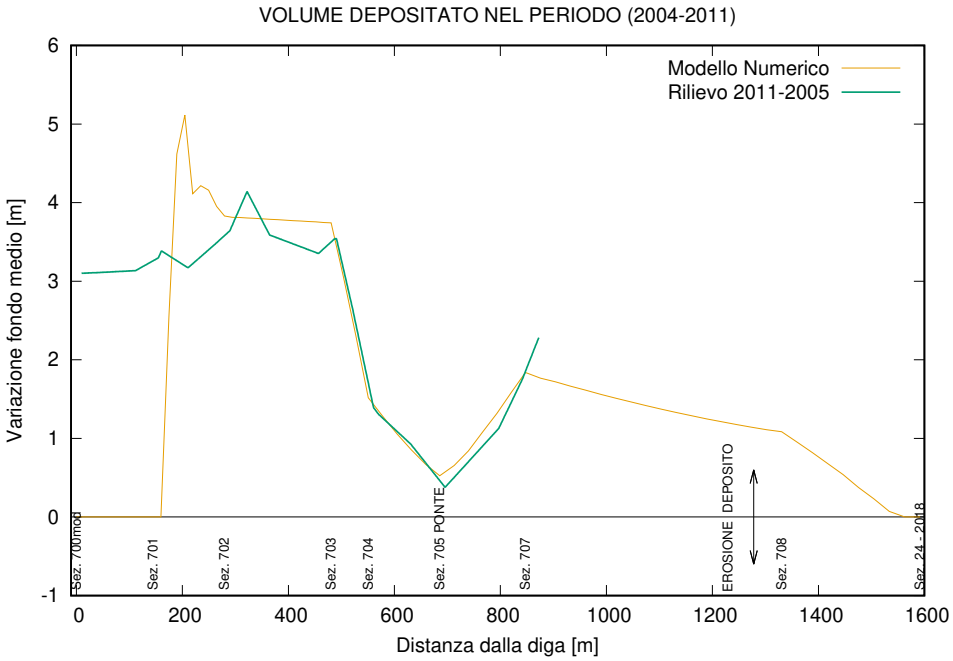


Figura 18: Variazione della quota del fondo medio nel periodo 2004-2011.

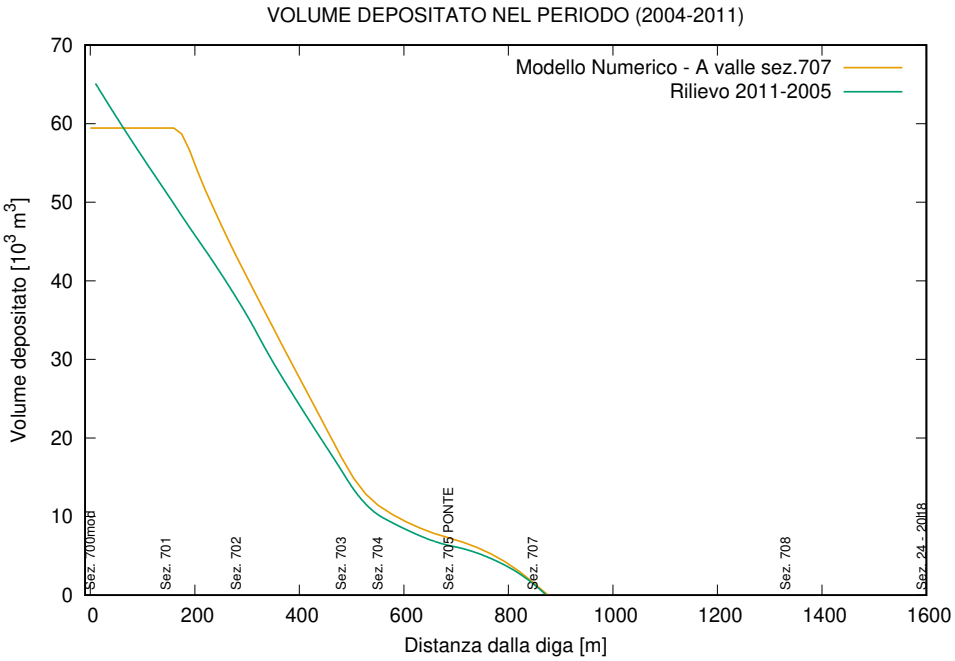


Figura 19: Volume depositato nel tratto nel periodo 2004-2011.

4.4 Evoluzione fondo 2011-2018

Nel periodo compreso tra il 2011 e il 2015 sono stati effettuati diversi interventi di sistemazione nel tratto considerato, che hanno comportato l'asportazione di materiali dall'alveo, per un totale di circa 21000 m^3 e la riprofilatura delle sezioni. In mancanza di rilievi topografici di dettaglio, la ricostruzione dell'evoluzione morfodinamica nel periodo 2011-2018 deve considerarsi puramente qualitativa ed è stata realizzata partendo dal rilievo 2011 e ipotizzando di concentrare gli interventi di asportazione di sedimenti in due distinti momenti, il primo, di circa 11000 m^3, nel 2011 e il secondo, di circa 10000 m^3, nel 2015. Entrambi i prelievi sono stati realizzati nel tratto compreso tra le sezioni 702 e 707, secondo la numerazione del Piano di Bacino.

Nelle figure 20 (2011-15) e 21 (2015-18) sono riportati i profili altimetrici del fondo medio iniziale prima e dopo l'asportazione di sedimenti, i profili ottenuti come risultato delle simulazioni nei diversi anni e i profili risultanti da rilievi topografici effettuati nel periodo considerato. Anche in questo caso le simulazioni sono state realizzate sollecitando il modello con le portate liquide orarie rilevate alla stazione ARPA e con le corrispondenti portate solide stimate attraverso le (2).

E' interessante notare come lo scavo causato dall'asportazione di sedimenti venga riempito nel giro di un anno o due, mentre il fronte si mantiene stabile. Una volta che il fondo ha ritrovato una pendenza praticamente costante, annullando l'effetto della rimozione di sedimenti, il processo di interrimento riprende, il fronte procede verso la diga riducendo progressivamente l'estensione del lago e, parallelamente, il fondo in tutto il tratto ricomincia ad innalzarsi. Va sottolineato come il fronte dei sedimenti sia sostanzialmente immobile nei periodi 2011-2014 e 2015-2017, in cui l'apporto di sedimenti, relativamente modesto, viene completamente utilizzato per depositare nell'area dove sono stati simulati i prelievi. E' solo in corrispondenza degli eventi intensi del 2014 che vengono movimentati volumi di sedimenti sufficienti a fare nuovamente avanzare il fronte e arretrare la linea di riva del lago Savio.

Il buon accordo tra il profilo del fondo medio simulato e quello rilevato al 2018 mostra come non sia necessario, né particolarmente istruttivo, simulare con maggiore dettaglio l'estensione e la tempistica dei prelievi di materiale in alveo. Al contrario, appare sufficiente conservare il complessivo volume di materiale asportato, a patto ovviamente che quest'ultimo sia una frazione del materiale depositato nel periodo di interesse.

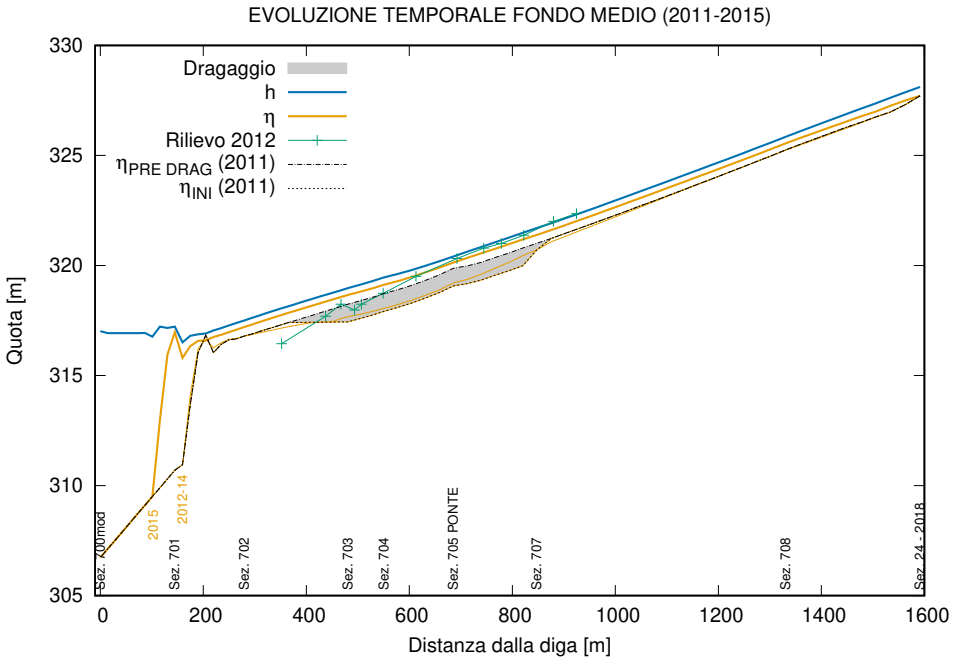


Figura 20: Evoluzione temporale del fondo medio (2011-2015).

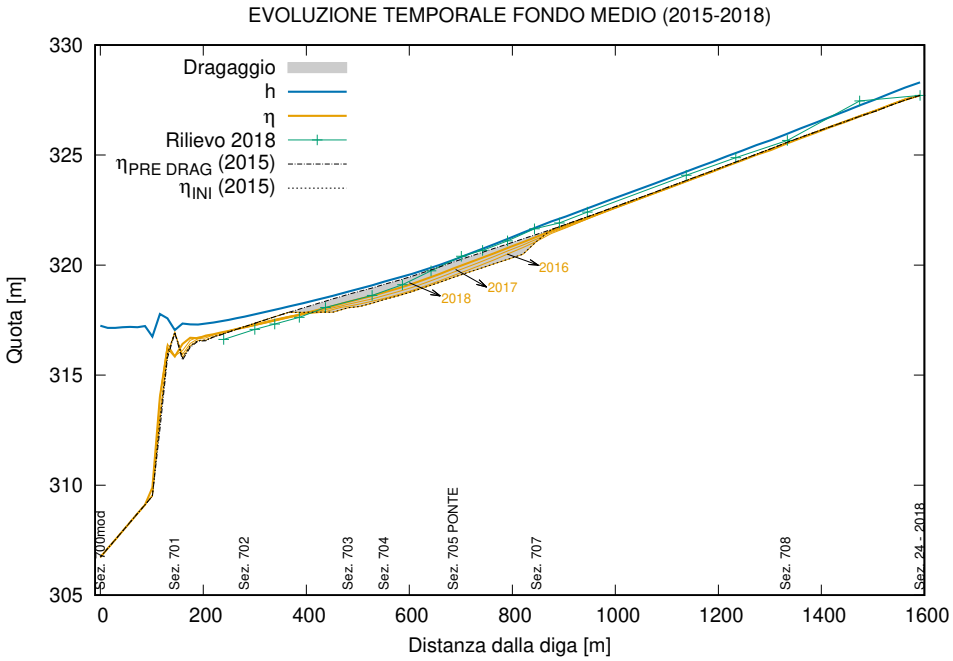


Figura 21: Evoluzione temporale del fondo medio (2015-2018).

4.5 Evoluzione fondo 2004-2018

Nella presente sezione ci si propone di descrivere l'evoluzione morfodinamica del corso d'acqua simulata nel periodo 2004-2018 attraverso due risultati sintetici e a carattere locale: l'evoluzione temporale della quota del fondo alla stazione idrometrica di Vobbietta e quella della distanza dalla diga del fronte di sedimenti all'interno del lago, facilmente correlabile con la distanza della linea di riva.

Come già accennato in precedenza, la scala di deflusso alla stazione idrometrica ARPA viene continuamente aggiornata, vista la necessità di inseguire un fondo soggetto a un progressivo innalzamento, solo saltuariamente interrotto dagli interventi di sistemazione avvenuti tra il 2010 e il 2015.

Le letture del fondo scala della stazione idrometrica, mostrate in Figura 12 costituiscono quindi un importante banco di prova per stimare l'efficacia delle simulazioni morfodinamiche, pur ricordando che si tratta di una misura puntuale e istantanea del fondo, che viene effettuata sulla verticale del sensore durante periodi di magra o di secca, con frequenza almeno annuale. La stazione è stata inoltre riposizionata nel 2008, spostandola dall'arcata in sponda destra ad una più centrale, seguendo proprio l'alveo di magra.

In Figura 22 è mostrata l'evoluzione simulata del fondo in corrispondenza della sonda (η locale) confrontata con la quota del fondo osservata (Osservato) e con il valore del fondo medio nella sezione (η medio). In ascisse sono riportate le ore simulate (quelle in cui era presente un trasporto attivo) e quindi gli anni con il maggior numero di eventi intensi (2006, 2009 e 2014) prendono da soli più del 80% delle simulazioni. Le osservazioni, effettuate in date note, sono state comunque posizionate correttamente nel grafico.

Esaurito il primo transitorio 2004-2009, il risultato delle simulazioni risulta in buon accordo qualitativo con le osservazioni, riproducendo correttamente il progressivo innalzamento del fondo e bene approssimando il livello del fondo al 2018. Si noti il cambio della quota locale del fondo (e non del fondo medio) avvenuto nel 2008 per effetto dello spostamento della sonda e le brusche diminuzioni di quota (locale e media) concentrate nel 2010 e nel 2015, che simulano le asportazioni di sedimenti effettuati nel periodo corrispondente. I maggiori scostamenti si osservano nel periodo 2012-2015 e sono probabilmente legati al fatto di aver concentrato le asportazioni di sedimenti in due soli prelievi: suddividendo i prelievi in modo più omogeneo nel periodo, la curva simulata sarebbe stata probabilmente più aderente al dato osservato. È da sottolineare comunque il buon accordo tra dato simulato ed osservato al 2018.

Per quanto riguarda il progressivo interrimento del lago Savio, esso appare evidente dalla Figura 23, dove, sempre in termini di ore simulate, viene

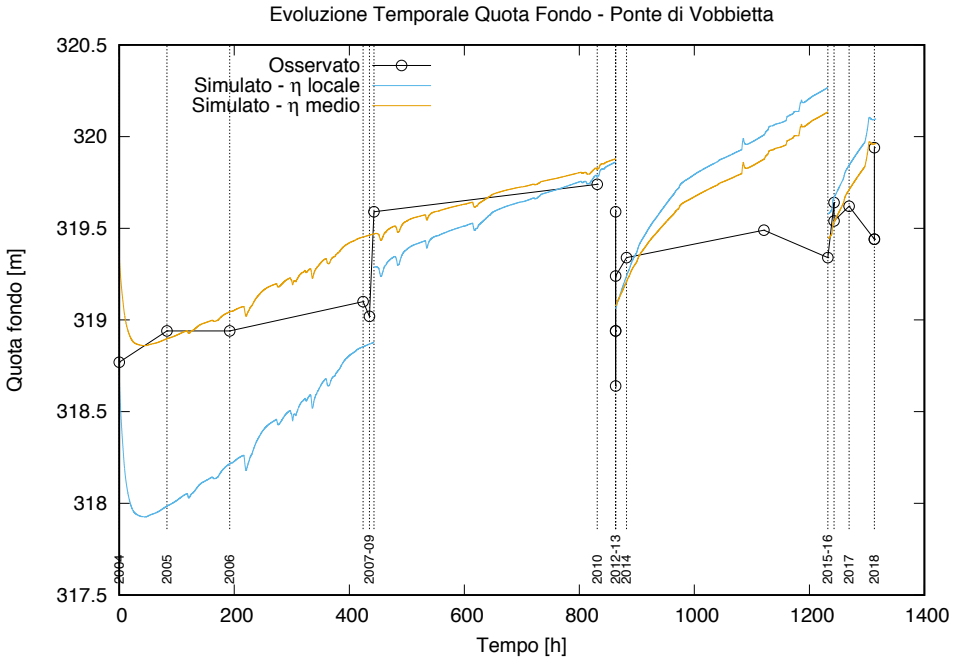


Figura 22: Evoluzione temporale della quota del fondo alla stazione idrometrica di Vobbietta.

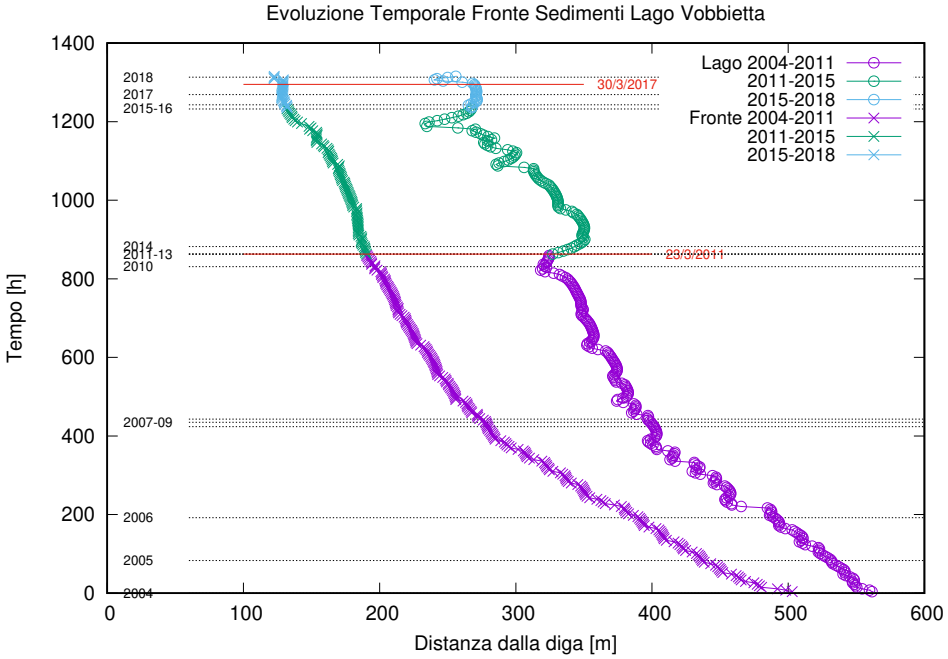


Figura 23: Evoluzione temporale della distanza dalla diga di Vobbietta del fronte di sedimenti e della linea di riva del lago Savio.

riportata l'evoluzione temporale della distanza dalla diga della linea di riva del lago, che misura efficacemente l'estensione superficiale del lago stesso. Si noti che l'asse temporale, come nel caso precedente, riporta le ore simulate e non è quindi equispaziato negli anni, che sono comunque rappresentati nel grafico attraverso le linee orizzontali.

Secondo le simulazioni, il lago Savio si estendeva nel 2004 fino a circa 550 m dalla diga e a circa 150 m a valle del ponte di Vobbietta. La linea di riva arretra rapidamente nel periodo 2004-2007, ad una velocità di circa 50 m/anno, risulta stabile nel 2008 e poi nel 2009 arretra ulteriormente di circa 70 m. Nel 2010 la linea di riva risulta posizionata a circa 320 m dalla diga e negli anni seguenti, per effetto del primo prelievo simulato di sedimenti, avanza nuovamente fino a circa 350 m, mentre nel 2014 si ha un nuovo avanzamento dell'ordine di 70 m. Dopo il secondo prelievo simulato di sedimenti la linea di riva si attesta a poco meno di 300 m dalla diga e a poco più di 400 metri dal ponte di Vobbietta.

Nel grafico di Figura 23 è rappresentata anche la distanza dalla diga del fronte di sedimenti, che è sempre sommerso all'interno del lago e segue una dinamica del tutto simile a quella della linea di riva. Va sottolineato peraltro che l'evoluzione temporale della linea di riva ben rappresenta l'innalzamento del fondo a monte del lago, mentre l'avanzamento del fronte dipende essenzialmente dalla quantità totale di sedimenti trasportati. L'effetto delle asportazioni simulate di sedimenti è infatti ben visibile sulla linea di riva, che avanza allontanandosi dalla diga nel 2011 e nel 2015 in corrispondenza dei prelievi simulati, mentre è praticamente assente sulla dinamica del fronte.

Per quanto le valutazioni di cui sopra debbano considerarsi essenzialmente qualitative, è interessante notare come i risultati delle simulazioni mostrino un buon accordo con le immagini satellitari riprese nel 2011 e nel 2017 presentate in Figura 24. Nel 2011 la linea di riva risulta infatti posizionata a circa 350 m dalla diga, mentre il fronte, visibile sotto la superficie dell'acqua, può essere collocato a circa 250 m dalla diga stessa. Nel 2017, la linea di riva si è spostata a circa 300 m dalla diga e il fronte a circa 150 m. In entrambi i casi l'accordo delle simulazioni (si vedano le linee rosse sul grafico di Figura 23) con le osservazioni appare più che soddisfacente.

4.6 Evoluzione fondo 2018-2023

Le ultime simulazioni realizzate nell'ambito del presente studio hanno come obiettivo quello di analizzare l'evoluzione morfodinamica del torrente Vobbia nel quinquennio 2018-2023, partendo dal fondo rilevato al 2018 e ipotizzando che lo scenario idrologico misurato nel quinquennio 2013-2018 si ripeta identicamente. Il modello è stato dunque sollecitato con un idrogramma ed

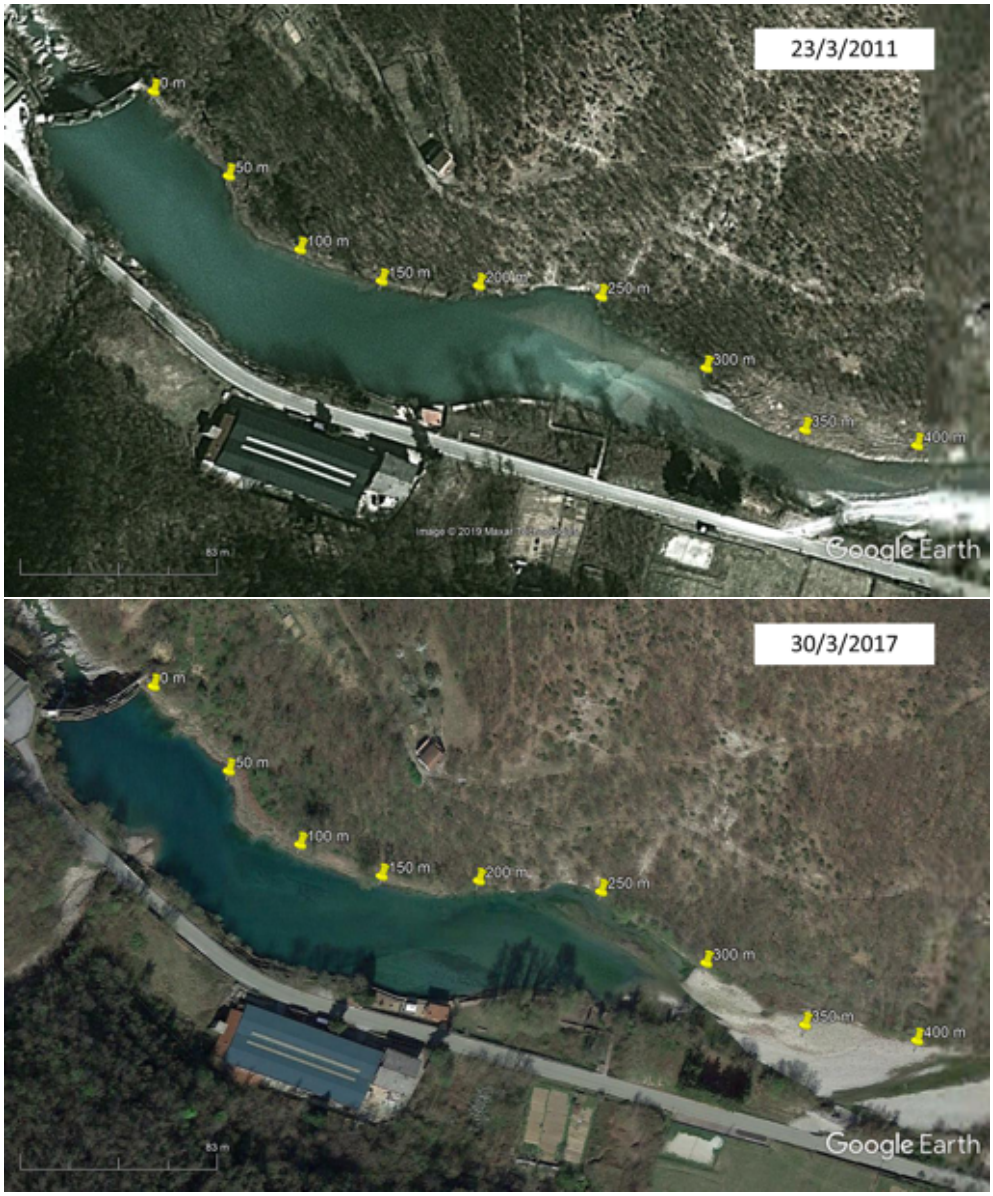


Figura 24: Immagini satellitari del lago Savio al 23/3/2011 e al 30/3/2017.

un sedimentogramma in ingresso identici a quelli utilizzati nelle simulazioni precedenti relativamente per il periodo 2013-2018.

Pur non essendo particolarmente significativa dal punto di vista statistico, questa scelta conduce ad uno scenario che ben descrive il regime idrologico e sedimentologico del corso d'acqua, comprendendo tre anni (2013, 2015 e 2016) in cui l'apporto di sedimenti è compreso tra i 1000 e i 2000 m^3, un anno (2017) in cui si superano i 6500 m^3 e il 2014, anno in cui i diversi eventi di piena conducono al massimo apporto di sedimenti (ca 37000 m^3) nel periodo considerato.

Nella Figura 25 sono presentati i risultati delle simulazioni così realizzate, che mostrano come, durante il primo anno, corrispondente al 2013, compaiano solo piccoli aggiustamenti del fondo mentre nel 2019 si abbia un brusco innalzamento del fondo e ad un rapido avanzamento del fronte, legato allo scenario idrologico del 2014. Negli anni successivi il processo di sovralluvionamento progredisce più lentamente.

In Figura 26 vengono mostrate l'evoluzione della linea di riva e del fronte di sedimenti ipotizzate per il quinquennio 2018-2023. Nonostante l'incertezza associata alle oscillazioni dovute all'algoritmo di calcolo, la linea di riva, nel periodo considerato, arretra di almeno 150 m rispetto al dato 2018, così come il fronte di sedimenti all'interno del lago, che si porta molto a ridosso della diga. La situazione al 2023 risulta critica, sia per la riduzione della superficie del lago sia per il suo progressivo interrimento. Va ricordato che l'operazione di 'flushing' di sedimenti, oggi realizzata sporadicamente attraverso l'apertura dello scarico di fondo e il conseguente svuotamento del lago, diventerebbe sempre più difficoltosa qualora il fronte di sedimenti ricoprisse l'apertura dello scarico stesso, conducendo inevitabilmente al completo riempimento del bacino.

Nelle ultime due simulazioni la quota delle paratoie della diga è stata artificiosamente abbassata di 1-2 m, al fine di studiare l'effetto di tale intervento sui profili di fondo. Come si può notare dalla Figura 27, l'abbassamento di 1 metro riduce l'innalzamento del profilo nel periodo 2018-2023 rispetto allo stato attuale (vedi Figura 25), anche se il fronte di sedimenti ha ormai raggiunto la diga e il lago è praticamente scomparso. È solo con un abbassamento di 2 m (Figura 28) che il profilo nel tratto del ponte di Vobbietta risulta praticamente stabile, assestandosi sulle quote del 2018. Il fronte di deposito inizia a propagarsi verso monte e il profilo del fondo tende ad assestarsi su quel profilo di equilibrio che si realizzerà pienamente solo dopo il completo interrimento della diga, secondo una dinamica del tutto simile a quella già realizzatasi sul torrente Vobbia in corrispondenza della diga del Castello.

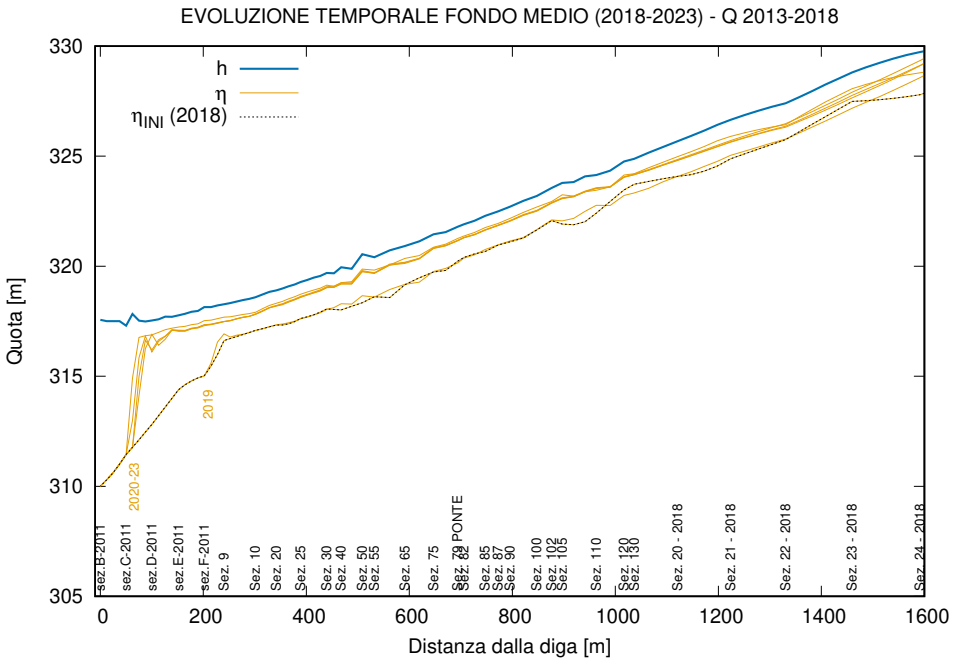


Figura 25: Evoluzione temporale del fondo medio (2018-2023).

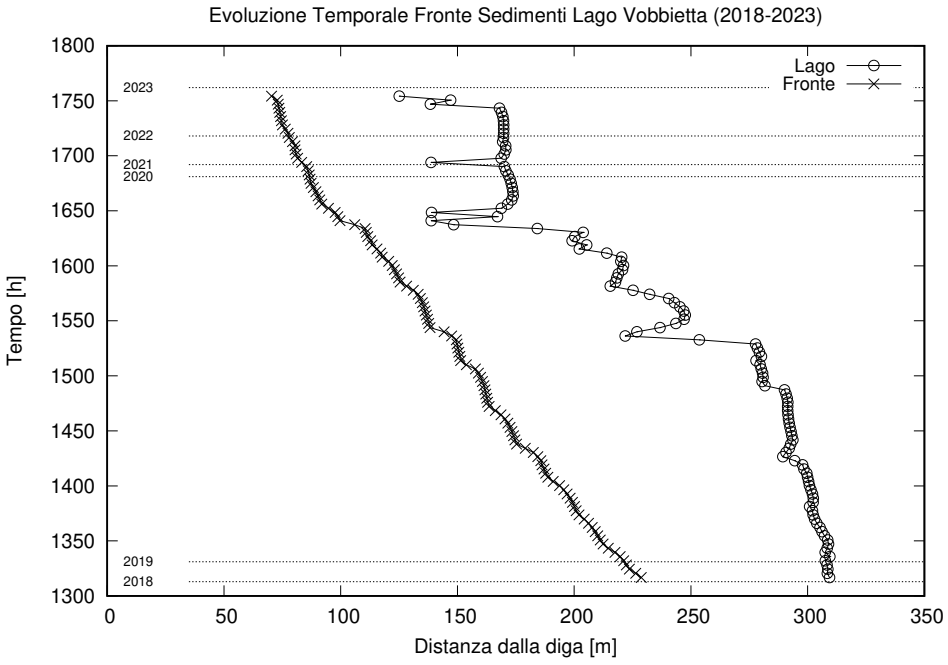


Figura 26: Evoluzione temporale della distanza dalla diga di Vobbietta del fronte di sedimenti e della linea di riva del lago Savio.

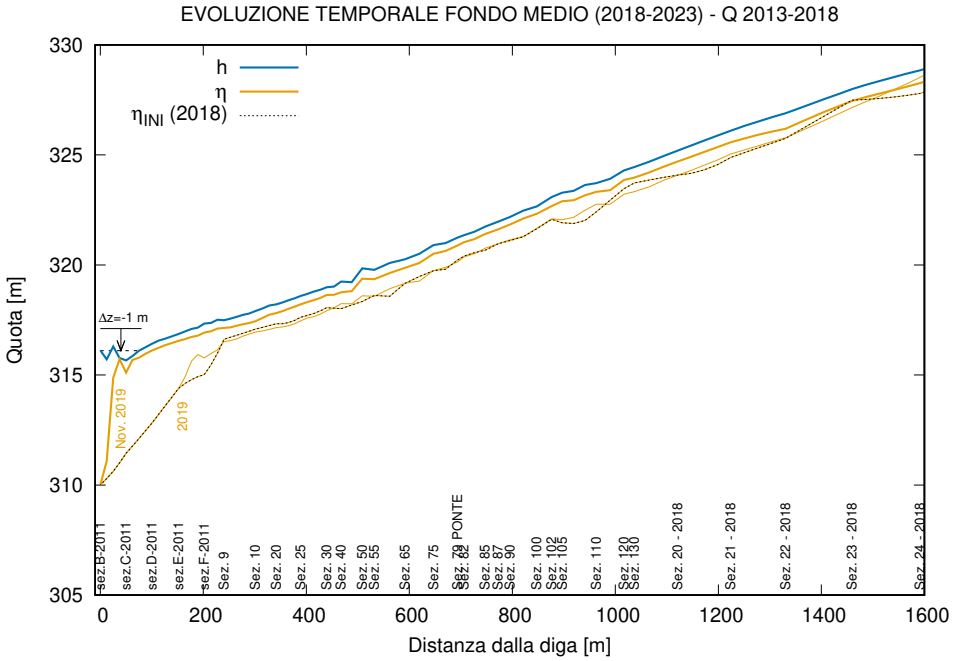


Figura 27: Evoluzione temporale del fondo medio (2018-2023) nell'ipotesi di un abbassamento di 1 m della quota della diga di Vobbietta.

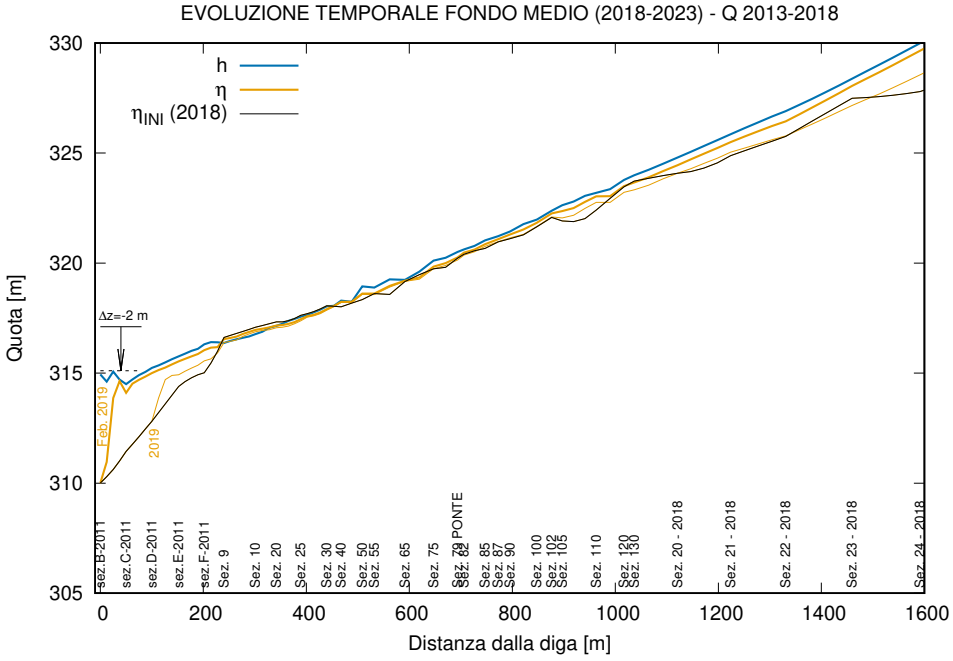


Figura 28: Evoluzione temporale del fondo medio (2018-2023) nell'ipotesi di un abbassamento di 2 m della quota della diga di Vobbietta.

5 Conclusioni

Dalle osservazioni di campo, dai rilievi topografici e dalle relazioni idrauliche acquisite appare ormai assodato che il tratto del torrente Vobbia a monte della diga di Vobbietta è soggetto ad un progressivo sovralluvionamento, dovuto al deposito dei sedimenti trasportati dalla corrente in corrispondenza dello sbarramento.

Il processo di interramento del bacino, che implica un progressivo innalzamento del fondo in corrispondenza dell'abitato di Vobbietta, è stato artificialmente interrotto negli anni 2010-2015 attraverso ripetuti prelievi di sedimenti per un volume complessivo pari a circa 21000 m^3. Per confronto, si noti che l'apporto di sedimenti associato ad una piena intensa (si pensi all'evento 2011) è stato stimato dell'ordine di 3000 m^3. Al termine degli interventi di sistemazione, come confermato dalla lettura della stazione idrometrica di Vobbietta, il processo è puntualmente ripreso, riportando rapidamente il fondo ai livelli raggiunti prima di tali prelievi, anche grazie agli importanti volumi di sedimenti movimentati durante gli intensi eventi di piena del 2011 e del 2014.

Le simulazioni effettuate mostrano come il modello a fondo mobile sia in grado di modellare efficacemente la dinamica del fronte di deposito all'interno del lago Savio e della linea di riva del lago stesso, fornendo una buona descrizione sia qualitativa sia quantitativa del fenomeno di sovralluvionamento nel suo complesso. L'assetto del fondo alveo al 2018 è stato riprodotto con buona precisione a partire dal fondo rilevato nel 2004, sollecitando il modello con la portata liquida misurata alla stazione idrometrica ARPA e stimando la portata solide in ingresso attraverso la capacità di trasporto della corrente. Nel bilancio complessivo sono stati considerati anche i prelievi effettuati nel periodo 2010-2015, mentre è assente l'apporto di sedimenti nei periodi in cui la stazione idrometrica era in stato di fermo e, in particolare, l'intero anno 2011.

Il legame portata solida/liquida qui proposto consente, attraverso una semplice integrazione del sedimentogramma in ingresso, di risalire al volume complessivamente depositato nel tratto, partendo da un idrogramma misurato alla stazione idrometrica ARPA. Ciò potrà consentire, in futuro, una stima speditiva dei volumi di sedimenti associati ad un generico evento di piena.

Anche le valutazioni puntuali relative alla stazione idrometrica ARPA e alla linea di riva del lago Savio descrivono in maniera soddisfacente le misure e le osservazioni svolte nel periodo 2004-2018, con una minore accuratezza per il periodo 2010-2015, dovuta alla difficoltà di simulare in maniera dettagliata

i prelievi di sedimenti effettuati in tale periodo e alla non disponibilità dei dati idrologici per l'intero anno 2011.

I dati idrologici dell'ultimo quinquennio sono stati infine utilizzati per simulare l'evoluzione del fondo alveo dal 2018 al 2023, mostrando che se lo scenario idrologico di quest'ultimo periodo si ripetesse identicamente, il processo di sovralluvionamento procederebbe innalzando la quota del fondo medio al ponte di Vobbietta di più di 1 m e riducendo ulteriormente l'estensione del lago Savio, la cui linea di riva si posizionerebbe a soli 150 m dalla diga.

In conclusione, il processo di interramento della diga di Vobbietta appare inarrestabile e solo limitabile attraverso ripetuti prelievi di sedimenti, che asportino periodicamente i sedimenti depositati. In alternativa, un abbassamento della quota della diga di circa 2 m consentirebbe di assestare il profilo sui valori rilevati nel 2018. Quest'ultimo intervento, peraltro, non farebbe che accelerare il completo interrimento della diga, unica condizione per consentire ai sedimenti trasportati dalla corrente di superare la diga proseguendo verso valle, realizzando condizioni di equilibrio compatibili con un profilo finalmente stabile.