

RIMOZIONE DI SEDIMENTI PER FLUITAZIONE CONTROLLATA DAL SERBATOIO DI SERNIO: STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO A VALLE DELLO SBARRAMENTO

P. Espa¹, M. L. Brignoli¹, A. Previde Prato¹, G. Crosa², S. Quadroni² & G. Gentili³

- (1) Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università dell'Insubria, Italia, e-mail: paolo.espa@uninsubria.it
- (2) Dipartimento di Scienze Teoriche e Applicate, Università dell'Insubria, Italia e-mail: giuseppe.crosa@uninsubria.it
- (3) Graia S.r.l., Italia, e-mail: gaetano.gentili@graia.eu

SOMMARIO

L'evacuazione di sedimenti per fluitazione controllata dal serbatoio di Sernio (sull'asta dell'Adda sopralacuale) ha avuto luogo nel luglio 2010. Circa 20'000 m³ di materiale sono stati rimossi in sei giorni non consecutivi di attività, mantenendo la concentrazione di solidi delle acque scaricate inferiore a 3 g/l. Il presente lavoro riporta i risultati dell'indagine sperimentale del trasporto solido lungo il fiume Adda per un tratto di circa 30 km a valle del serbatoio. La simulazione monodimensionale dell'evento monitorato ha fornito risultati in soddisfacente accordo con le osservazioni sperimentali raccolte.

1 INTRODUZIONE

La fluitazione rappresenta una possibile alternativa tecnica per contenere la perdita di capacità di un serbatoio a causa della sedimentazione (Morris & Fan, 1997). Di contro, l'elevato carico solido delle acque evacuate può impattare considerevolmente sull'ecosistema acquatico a valle del serbatoio soggetto a operazioni di fluitazione (Crosa et al., 2010; Rathburn & Wohl, 2001). Tale impatto è imputabile a tre componenti principali, i cui singoli effetti sono difficilmente scindibili da quelli delle altre:

- incremento della concentrazione di sedimento (in particolare in sospensione),
- incremento della portata liquida,
- deposizione di sedimento ed alterazione morfologica del fondo alveo.

Usualmente, per limitare l'impatto ambientale delle operazioni di fluitazione, vengono fissati dei limiti sia sulla concentrazione di solidi delle acque scaricate che sulla durata dell'intervento. Sarebbe auspicabile che i suddetti vincoli si basassero sulla previsione dell'impatto dell'operazione in progetto tenendo adeguatamente in considerazione specificità morfologiche ed ecologiche dell'asta fluviale a valle dello sbarramento. Di fatto, in mancanza di conoscenze più approfondite e di strumenti modellistici appropriati, si ricorre a criteri perlopiù empirici e, in certe occasioni, significativamente differenti tra loro (Crosa et al., 2010).

Alcuni lavori della letteratura di settore hanno affrontato il problema della

modellazione numerica del trasporto solido in occasione di operazioni di fluitazione. Ad esempio, *Liu et al.* (2004) hanno simulato con un codice monodimensionale un evento di fluitazione che ha riguardato due serbatoi in serie sulla stessa asta fluviale. Altri Autori hanno recentemente focalizzato l'attenzione sul trasporto solido all'interno del serbatoio, utilizzando modelli numerici 3-D sia a scala reale (*Gallerano & Cannata*, 2011) che a scala di laboratorio (*Haun & Olsen*, 2012).

La presente memoria concerne la rimozione di sedimento per fluitazione da un piccolo serbatoio sull'asta dell'Adda sopralacuale. L'obiettivo del lavoro consiste nell'illustrazione dei principali risultati sperimentali raccolti nella campagna di misura del trasporto solido effettuata in corso d'opera e di quelli dell'indagine numerica condotta per simulare lo scenario documentato.

2 MATERIALI E METODI

2.1 Serbatoio di Sernio e asta fluviale oggetto d'indagine

Il serbatoio di Sernio ha una capacità di circa $750 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ed è realizzato sbarrando l'alto corso dell'Adda a circa 75 km dalla foce nel lago di Como (Figura 1). Il serbatoio ha funzione di regolazione perlopiù giornaliera dell'impianto idroelettrico di Stazzona (potenza installata 30 MW, portata massima turbinabile $40 \text{ m}^3/\text{s}$ - C2 in Figura 1). L'opera di sbarramento è una traversa a quattro luci presidiate da paratoie piane a strisciamento; alla massima altezza di ritenuta, pari a 7,8 m sul piano delle paratoie abbassate, il serbatoio si estende 1,5 km a monte della traversa.

Il bacino imbrifero sotteso alla sezione di sbarramento è di 885 km^2 , con quote variabili tra 490 e $4 \cdot 10^3 \text{ m}$. La portata media annua è di circa $25 \text{ m}^3/\text{s}$; le medie mensili presentano valore massimo a giugno, circa doppio rispetto alla portata media annua.

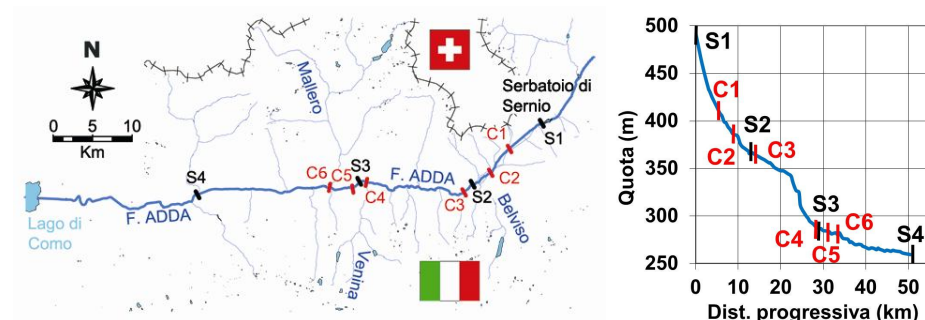


Figura 1. Planimetria e profilo altimetrico dell'asta dell'Adda oggetto di indagine. Sulle sezioni S1, S2, S3 sono localizzate le stazioni di misura della Concentrazione dei Solidi Sospesi (CSS); la sezione S4 (sbarramento di Ardenno) chiude il tratto simulato; sulle sezioni da C1 a C6 sono localizzati gli scarichi delle principali centrali idroelettriche.

La caratterizzazione di massima della granulometria del sedimento da rimuovere è stata ottenuta analizzando sei campioni raccolti a livello del serbatoio minimo per il funzionamento dell'impianto di Stazzona. Con riferimento alla nota classificazione Udden-Wentworth (*Wentworth, 1922*), il 60÷100% del materiale costituente ciascun campione è risultato più fine della sabbia grossolana (diametro minore di $500 \mu\text{m}$, il

30÷60% limo e argilla (diametro inferiore a 62 μm) con componente argillosa (diametro inferiore a 4 μm) variabile tra 0 e 10%.

L'asta fluviale oggetto di indagine (Figura 1) è compresa tra le sezioni S1 (sbarramento di Sernio) ed S4 (sbarramento di Ardenno) ed è lunga 50,5 km. La sua pendenza media è leggermente inferiore allo 0,5%, passando dall'1% nel tratto S1-S2, allo 0,5% in quello S2-S3 a poco più dello 0,1% nel tratto S3-S4. La larghezza dell'alveo interessato al deflusso nelle condizioni esaminate varia approssimativamente da 50 a 130 m procedendo verso valle.

Nel tratto analizzato, i principali tributari sono tutti sfruttati per la produzione di energia idroelettrica. Le immissioni laterali di portata più significative sono quindi riconducibili agli scarichi dei seguenti impianti idroelettrici (Figura 1):

- centrale Poschiavino (C1 in Figura 1; portata massima turbinabile 14 m^3/s),
- centrale Stazzona (C2 in Figura 1; portata massima turbinabile 40 m^3/s),
- centrale Belviso (C3 in Figura 1; portata massima turbinabile 13 m^3/s),
- centrale Venina (C4 in Figura 1; portata massima turbinabile 25 m^3/s),
- centrale Sondrio (C5 in Figura 1; portata massima turbinabile 26 m^3/s),
- centrale Mallerio II (C6 in Figura 1; portata massima turbinabile 8,5 m^3/s).

2.2 Operazione di fluitazione e misure effettuate

La fluitazione di sedimenti dal serbatoio di Sernio ha avuto luogo nel periodo di maggio-luglio 2009 e nel mese di luglio 2010, beneficiando in tal modo della massima disponibilità idrica stagionale. Le operazioni sono state effettuate in giorni non consecutivi in modo da ridurne l'impatto ecologico e per conciliarle con le necessità degli ulteriori utenti del corso d'acqua (consorzi irrigui, pescatori, sportivi, ...). I valori limite della concentrazione dei solidi sospesi (CSS) sono stati fissati riferendosi ai risultati di un progetto di ricerca predisposto all'uso dalla provincia di Sondrio (*Regione Lombardia*, 2008). In particolare, tenuto conto che l'Adda a valle della zona di intervento possiede tratti di alto pregio ittico, il limite di CSS medio su tutto il periodo delle operazioni è stato posto a 1,5 g/l, il limite per l'allerta e conseguente modifica in corso d'opera dell'intervento a 3 g/l. La gestione del *flushing* del serbatoio di Sernio in conformità ai vincoli stabiliti è stata attuata sulla base delle misure in continuo presso una stazione di monitoraggio della CSS allestita poche centinaia di metri a valle dell'opera di sbarramento che genera il serbatoio (sezione S1, Figura 1).

L'operazione di fluitazione del 2009 è descritta nel dettaglio in *Espa et al.* (2010). Nel presente lavoro verrà analizzata quella dell'anno successivo nella quale, peraltro, alcune misure sono state esplicitamente finalizzate a perfezionare l'input al modello di calcolo utilizzato. L'operazione del 2010 è stata più semplice e più breve rispetto a quella dell'anno precedente:

- la sua durata complessiva è pari a sei giorni (per la precisione le tre coppie 8-9, 15-16 e 19-20 luglio);
- essa è stata condotta fin dall'inizio a paratoie completamente sollevate (realizzando così deflusso non rigurgitato da valle all'interno del serbatoio - *free-flow flushing*) e con l'ausilio di macchine per movimento-terra;
- nelle giornate di fluitazione l'impianto idroelettrico di Stazzona era perciò fuori servizio salvo che per poche ore notturne;
- la portata media uscente dal serbatoio durante le ore di lavoro è dell'ordine di 60-90 m^3/s (leggermente inferiore a quella registrata nell'anno precedente);

- al di fuori dell'orario lavorativo (e cioè sostanzialmente nelle ore notturne) la portata rilasciata veniva ridotta fino a valori dell'ordine di $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Oltre alla sonda (mod. *Lange SC100*) utilizzata per gestire le operazioni di rimozione conformemente ai vincoli cui si è fatto cenno, la campagna di misura è stata estesa fino alla distanza di circa 29 km a valle del serbatoio (sezione S3, Figura 1) per quantificare la riduzione della CSS per effetto combinato della diluizione e della deposizione. In particolare, nelle sezioni S2 (presso il ponte di Tresenda) ed S3 (presso il ponte di Faedo), i rilievi sono stati effettuati solo in alcuni giorni e durante le ore diurne, impiegando due turbidimetri portatili (rispettivamente *Partech 740* e *Insite 3150*). Tutti i turbidimetri sono stati calibrati a posteriori mediante analisi di campioni (132 in tutto) in laboratorio secondo i protocolli *APHA et al.* (2005). Per determinare la granulometria del sedimento trasportato in sospensione, nelle sezioni di monitoraggio della CSS (non in tutte le giornate di fluitazione per tutte le stazioni) sono stati prelevati dei campioni di acqua torbida da un litro (5-6 ogni mezz'ora) e lasciati decantare. Il sedimento raccolto è stato quindi analizzato in laboratorio.

In ragione della granulometria del sedimento fluitato (piuttosto fine) e delle caratteristiche del deflusso nelle sezioni di misura (sezioni compatte, velocità medie elevate, elevata agitazione turbolenta per interferenza della corrente con opere in alveo), le misure di CSS e quelle di granulometria si ritengono rappresentative del trasporto solido complessivo nelle sezioni di misura. Nella sezione S1, in particolare, il campionamento avveniva a valle del salto dovuto a una briglia; inoltre, il volume complessivamente evacuato misurato mediante batimetria e quello calcolato a partire dalle misure di CSS e di portata in S1 (Tabella 1) sono risultati praticamente uguali (il valore della densità complessiva del sedimento - *bulk density* - adottato al riguardo è pari a $1'250 \text{ kg/m}^3$). Discorso pressoché analogo può essere fatto relativamente alle stazioni S2 ed S3, ambedue a valle di ponti, sebbene in tali casi ci si possa attendere una certa sottostima (peraltro difficilmente quantificabile) della componente più grossolana.

2.3 Simulazione numerica del trasporto solido

Il software utilizzato per effettuare la simulazione del trasporto solido a valle del serbatoio è SRH-1D versione 2.8 (*Huang & Greimann, 2011*). Tale codice è in grado di simulare, nei limiti dell'approssimazione monodimensionale, il trasporto solido in alveo a pelo libero nei termini in cui si pone operativamente nell'operazione di flushing documentata (portate liquide e solide rapidamente variabili nel tempo, possibilità di passaggio della corrente attraverso lo stato critico, contributi laterali di portata significativi).

Il programma integra un'unica equazione differenziale di convezione/diffusione per il trasporto complessivo (*total load*) di tutte le classi granulometriche presenti; la modalità di trasporto (sul fondo o in sospensione) è quindi stabilita per ciascuna frazione in funzione del valore del parametro di sospensione, rapporto tra velocità di caduta in acqua ferma e velocità di attrito moltiplicata per la costante di von Kármán (*Greimann et al., 2008*). Quest'ultima è stata fissata pari a 0,4, valore che appare appropriato al caso analizzato, come verificato grazie al diagramma di *Einstein & Chien* (1955) riportato in *Vanoni* (1975).

Il sedimento coesivo (diametro inferiore a $62 \mu\text{m}$) è modellato in maniera differente da quello non coesivo: per quest'ultimo è possibile selezionare l'appropriata formula per la capacità di trasporto. Deposizione ed erosione del materiale coesivo sono

controllate dai valori di sforzo tangenziale limite per deposizione parziale e totale, per erosione di superficie e di massa (*van Rijn*, 1993) inseriti dall'utilizzatore. I valori dei parametri relativi alla modellazione di deposito ed erosione del materiale coesivo non vengono di seguito specificati in quanto scarsamente significativi. Infatti, nel tratto monitorato (ossia tra le sezioni S1 e S3) ed in corrispondenza ai deflussi registrati durante la fluitazione, lo sforzo tangenziale medio non raggiunge in nessun caso i valori soglia per la deposizione indicati in letteratura e dell'ordine di $0,1-1 \text{ N/m}^2$ (*Huang & Greimann*, 2011; *Yang*, 2006).

Il fondo alveo è modellato in più strati sovrapposti di granulometria opportuna, tra i quali l'unico interagente con la corrente è quello superiore (*active layer*), il cui spessore è fissato dall'utente.

La geometria dell'asta simulata (Figura 1) è ricavata da un rilievo topografico che tra le stazioni S1 e S4 comprende 88 sezioni trasversali alla distanza media di circa 0,5 km. Al coefficiente di Gauckler-Strickler è stato assegnato un unico valore ($k_S = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$), calibrato grazie agli andamenti temporali della CSS rilevati nelle stazioni S2 ed S3. Il fondo alveo è stato schematizzato come inerodibile, poiché in alternativa i risultati relativi al trasporto solido sarebbero dipesi in maniera preponderante dalla granulometria attribuita al fondo alveo (la cui determinazione presenta peraltro non poche incertezze). La formula prescelta per il calcolo della capacità di trasporto del materiale non coesivo è quella di *Yang* (1973), che risulta appropriata sia alla granulometria del sedimento fluitato che alla presenza di tratti in corrente veloce (*Yang*, 2006). La velocità di caduta in acqua ferma è ricavata dai classici diagrammi di *U.S. Interagency Committee on Water Resources* (1957), assumendo un fattore di forma pari a 0,70 e la temperatura dell'acqua pari a 10°C . Quest'ultimo valore è stato selezionato sulla scorta di sparse misure, effettuate perlopiù nel corso dell'evento del 2009, che hanno mostrato temperature variabili tra 9 e 12°C , con massime oscillazioni giornaliere in ogni stazione inferiori al grado centigrado.

Gli ulteriori input al modello sono le misure di CSS in S1, la granulometria del sedimento in S1 (assunta costante per ciascun giorno di fluitazione e pari a quella rilevata), la portata fuoriuscita dal serbatoio (e fornita dal gestore) le portate scaricate in Adda dagli impianti idroelettrici richiamati in 2.1, il cui andamento temporale è stato generalmente fornito dai concessionari (solo in rari casi è stato necessario ipotizzarlo).

Nell'estremo di valle del tratto simulato (S4) la quota di pelo libero è stata imposta costante e pari a quella di massimo invaso nel serbatoio di Ardenno, ipotesi peraltro ragionevolmente vicina alle condizioni effettive.

Non si è tenuto conto né del carico solido immesso dai tributari (e che, soprattutto relativamente alle frazioni molto fini, può avere una qualche consistenza nel periodo di scioglimento delle nevi), né nella mobilitazione di materiale originariamente presente sul fondo dell'alveo. In tal senso, i risultati numerici potrebbero sottostimare quelli sperimentali.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Operazione di fluitazione e misure della CSS

Come accennato in 2.2, le misure dei turbidimetri sono state calibrate a posteriori grazie ai campioni analizzati in laboratorio; le curve di taratura utilizzate hanno struttura

$CSS_{CORRETTA} = a \times (CSS_{RILEVATA})^b$, con ovvio significato dei simboli. Le espressioni così ottenute sono:

- Sezione S1 (sonda *Lange*): $CSS_{CORRETTA} = 1,98 \times (CSS_{RILEVATA})^{0,75}$, $R^2=0,86$
- Sezione S2 (sonda *Partech*): $CSS_{CORRETTA} = 1,40 \times (CSS_{RILEVATA})^{1,24}$, $R^2=0,85$
- Sezione S3 (sonda *Insite*): $CSS_{CORRETTA} = 1,10 \times (CSS_{RILEVATA})^{1,70}$, $R^2=0,86$

I coefficienti delle regressioni sono simili a quelli ricavati per le stesse sonde nelle medesime stazioni in occasione della fluitazione del 2009 (Espa et al., 2010), in particolare quelli ricavati nella stazione immediatamente a valle dello sbarramento di Sernio. I moduli delle differenze tra *CSS* misurate in laboratorio e *CSS* rilevate con i turbidimetri e calibrate a posteriori valgono in media 0,18 g/l, 0,08 g/l e 0,04 g/l, rispettivamente nelle stazioni S1, S2 ed S3; questi valori corrispondono al 19%, 16% e 18% qualora gli scarti siano rapportati ai corrispondenti valori misurati in laboratorio.

I risultati dell'analisi granulometrica del sedimento raccolto in S1 mette però in luce che la granulometria può variare da un giorno all'altro, verosimilmente in risposta alla particolare area del serbatoio interessata dall'asportazione meccanica. Tali risultati sono riportati in Tabella 1 e mostrano che, sebbene il 90% del passante risulti generalmente inferiore ai 500 µm, la ripartizione tra le classi può variare in modo consistente tra le diverse giornate di fluitazione, con frazione limo/argillosa variabile da un minimo del 28% (9 luglio) a un massimo del 65% (19 luglio). Per ogni giornata di fluitazione, la Tabella 2 elenca le ore di lavoro, la portata liquida media in S1, la *CSS* media e quella di picco nella stessa stazione, e la massa fluitata.

Sezione/data	Diametro (mm)									
	<0,063	0,063-0,125	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1	1-2	2-4	4-8	8-16	
S1	09 luglio	28	12	29	21	7	3	1	-	-
	15 luglio	44	14	20	13	5	2	1	1	1
	16 luglio	33	14	24	17	8	3	1	-	-
	19 luglio	65	9	10	8	5	2	1	-	-
	20 luglio	36	17	22	15	7	2	1	-	-
S2	09 luglio	76	16	6	1	-	-	-	-	-
	16 luglio	70	20	9	1	-	-	-	-	-
	20 luglio	71	17	11	1	-	-	-	-	-
S3	16 luglio	75	18	6	-	-	-	-	-	-
	20 luglio	75	16	9	1	-	-	-	-	-

Tabella 1. Percentuale media giornaliera dei diametri del sedimento trasportato in sospensione durante la fluitazione del luglio 2010 nelle sezioni S1, S2 e S3.

Data	Ore di lavoro	Portata media giornaliera in S1	CSS media giornaliera in S1	CSS massima in S1	Massa fluitata
	(h)	(m ³ /s)	(g/l)	(g/l)	(t)
8 luglio	12	63	0,7	2,5	4'300
9 luglio	12	53	0,8	2,2	3'400
15 luglio	12	67	0,9	3,6	5'800
16 luglio	12	57	0,9	2,2	4'400
19 luglio	9	59	0,9	3,0	6'000
20 luglio	10	44	0,3	0,9	1'200

Tabella 2. Valori giornalieri delle quantità di maggiore rilievo nella fluitazione del 2010.

Il costo di rimozione dell'unità di volume di deposito (considerando la mancata produzione di energia presso l'impianto di Stazzona nonché il costo del cantiere) ammonta a 13-14 €/m³ relativamente all'operazione del 2010. L'analogo valore calcolato per la fluitazione del 2009 è sensibilmente inferiore (4-5 €/m³ - *Espa et al.*, 2010). L'incremento di costo è dovuto in parte ad un aumento del prezzo dell'energia elettrica ma, soprattutto, ad una riduzione di efficienza dell'operazione in termini di massa evacuata: in cinque giornate dell'evento 2009 il sedimento rimosso ha infatti eguagliato o superato le 10'000 tonnellate al giorno.

3.2 Simulazione numerica

Vengono presentati di seguito gli output di un'unica simulazione relativa all'arco di tempo di 23 giorni, dall'8 al 31 luglio 2010, con passo temporale di calcolo pari a 50 s. I risultati relativi alle tre coppie di giornate dell'evento di fluitazione documentato sono forniti in Figura 3. Nella stessa figura è riportata anche la CSS rilevata in S1 (condizione al contorno di monte); tale CSS è stata assunta nulla in tutte le altre giornate simulate. La granulometria del sedimento evacuato è nota in tutte le giornate fuorché nella prima (Tabella 1); per simulare la prima giornata di fluitazione si è fatto quindi ricorso alla curva granulometrica media rilevata in S1. La CSS simulata viene raffrontata a quella misurata nelle sezioni S2 e S3. Le misure in S2 ed S3, come spiegato, non sono disponibili tutti i giorni ed hanno durata limitata al periodo diurno. Nelle stesse stazioni, per le giornate in cui è disponibile l'analisi granulometrica del sedimento trasportato in sospensione (Tabella 1), anche le granulometrie simulate vengono confrontate con le misure. Al riguardo, le granulometrie simulate sono state ottenute processando l'output della simulazione per lo stesso intervallo temporale di effettuazione dei campionamenti.

Nel complesso i risultati della simulazione appaiono ragionevolmente in scala con i dati osservati nelle due stazioni di valle. I moduli delle differenze tra CSS misurate (medie giornaliere relative al periodo di effettuazione delle misure) e corrispondenti CSS simulate valgono in media 0,21 e 0,03 g/l, rispettivamente nelle stazioni S2 ed S3 (e cioè il 32% e l'8% considerando i rapporti tra gli scarti ed i corrispondenti valori misurati). Sebbene nella sezione S2 il calcolo non sia in grado di riprodurre i picchi osservati nelle prime tre giornate di fluitazione (8-9-15 luglio), nelle giornate del 16 e del 20 luglio queste discrepanze si riducono. È immaginabile che i picchi di cui si è detto siano connessi alla risospensione di materiale fine già depositato in alveo (e, come detto, non considerato nel calcolo), dovuta agli incrementi repentini di portata liquida caratteristica delle fasi iniziali delle operazioni. Il progressivo dilavamento di questo materiale al procedere delle operazioni potrebbe giustificare il maggiore accordo con le osservazioni nelle successive giornate di fluitazione. La sovrastima della granulometria simulata rispetto a quella osservata il 20 luglio sembrerebbe congruente a quanto detto in precedenza. L'evidente sovrastima da parte della simulazione della CSS misurata in S2 il 19 luglio potrebbe invece essere ricondotta alla granulometria del sedimento fluitato in quella giornata, caratterizzato dal massimo valore registrato della componente limo/argillosa (Tabella 1). L'accordo tra dati osservati e simulati appare generalmente soddisfacente in S3, sia in termini di CSS che di granulometria, sebbene le osservazioni siano meno complete.

In Figura 4 viene infine mostrato l'andamento temporale del deposito simulato nel tratto più a monte dell'asta oggetto di studio. Si è preferito limitarsi a tale tratto poiché è quello per il quale i risultati di questa analisi sono maggiormente significativi ai fini

della valutazione dell'eventuale impatto ambientale dell'operazione di fluitazione.

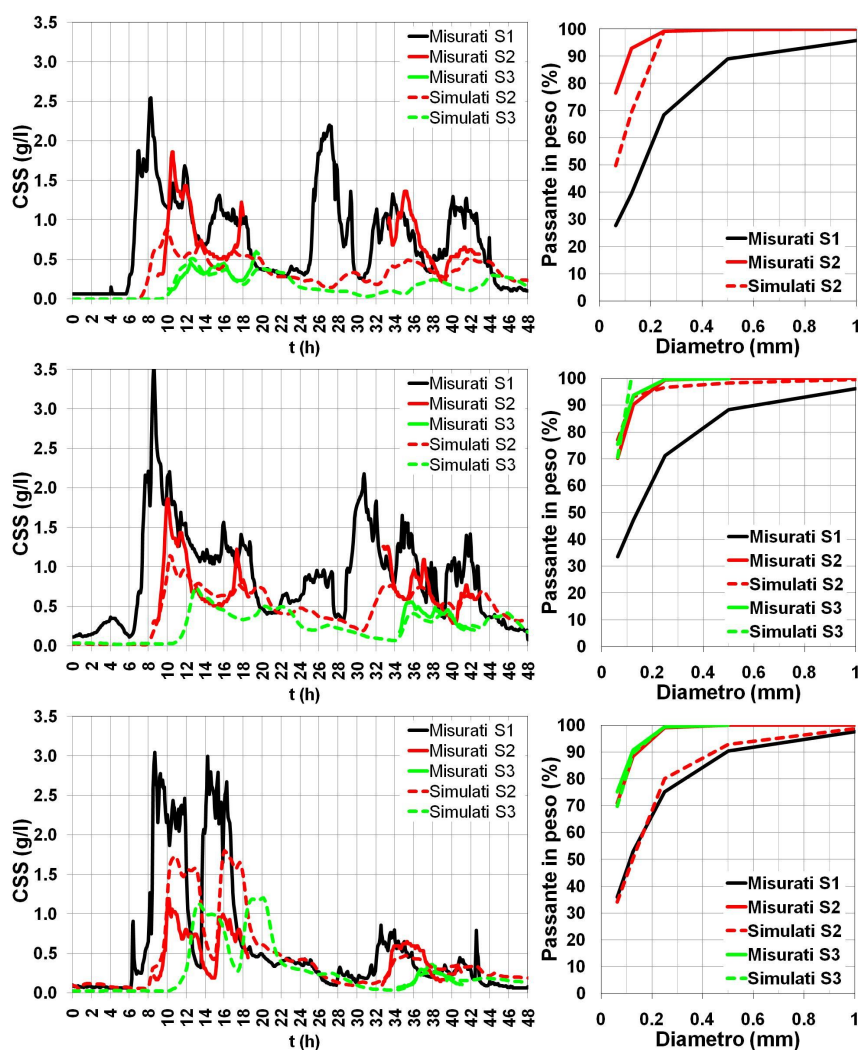


Figura 3. Andamento temporale della CSS misurata e della CSS simulata (a sinistra) e curve granulometriche del sedimento trasportato (a destra). Dall'alto in basso: 8-9 luglio con granulometrie del 9 luglio; 15-16 luglio con granulometrie del 16 luglio; 19-20 luglio con granulometrie del 20 luglio.

La massima deposizione di sedimento prevista dalla simulazione ha luogo approssimativamente in corrispondenza dello scarico della centrale di Stazzona e raggiunge valori di circa 1'000 t/km al termine dell'ultimo giorno di fluitazione (20 luglio), per poi dimezzarsi nella settimana successiva (Figura 4). Poiché la larghezza dell'alveo a quella distanza progressiva è prossima ai 50 m, il deposito massimo per unità di superficie è quantificabile in circa 20 kg/m² o, equivalentemente, in 2 cm al

massimo. Tenuto conto che delle 25'000 tonnellate complessivamente fluite (Tabelle 1 e 2) quasi la metà ha pezzatura maggiore o uguale alla sabbia fine ($d > 125 \mu\text{m}$) e circa un quarto ha pezzatura maggiore o uguale alla sabbia media ($d > 250 \mu\text{m}$), considerato inoltre l'andamento temporale del deposito simulato (Figura 4), è possibile ritenere trascurabile l'impatto ambientale connesso a significative modificazioni morfologiche in alveo a causa dell'operazione di fluitazione.

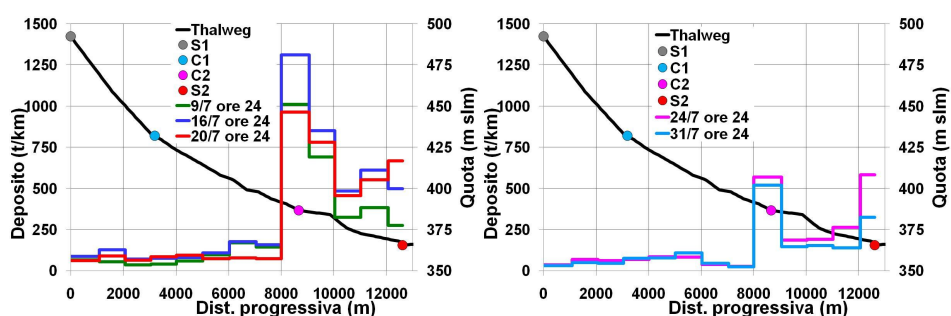


Figura 4. Andamento temporale del deposito per unità di lunghezza simulato tra le sezioni S1 ed S2. Rispettivamente al termine di ciascuna coppia di giornate della fluitazione del 2010 (sinistra) e dopo quattro e undici giorni dalla conclusione delle operazioni (destra).

4 CONCLUSIONI

Nella fluitazione del serbatoio di Sernio del luglio 2010 sono state evacuate circa 25'000 tonnellate di sedimento, per il 40% di natura limo/argillosa e per la rimanente parte sabbiosa. L'operazione è stata effettuata a paratoie completamente sollevate e con l'ausilio di macchine per movimento-terra. La concentrazione di sedimento nelle acque scaricate è stata mantenuta al di sotto di 3 g/l, limite assegnato all'intervento.

In tre stazioni lungo il fiume Adda (rispettivamente poche centinaia di metri, 12,6 km e 30 km a valle del serbatoio) la CSS è stata misurata con turbidimetri ottici. Sia a causa della granulometria del sedimento rimosso che delle condizioni idrodinamiche locali, caratterizzate da elevata turbolenza, si ritiene che tali misure siano ben rappresentative del trasporto solido nel suo complesso, quantomeno quello legato all'attività di fluitazione.

Le misure di CSS, granulometria del sedimento e portata liquida acquisite nella stazione a ridosso del serbatoio, nonché quelle relative alle immissioni laterali di portata liquida (perlopiù riconducibili a scarichi di impianti idroelettrici) sono state utilizzate come input nella simulazione numerica del trasporto solido su un'asta fluviale di circa 50 km a valle del serbatoio. Nei limiti dell'approssimazione monodimensionale e malgrado alcune drastiche schematizzazioni effettuate (in particolare il fondo dell'alveo è stato modellato come inderodabile), i risultati numerici appaiono in scala con le osservazioni, incoraggiando all'utilizzo della modellistica numerica a fini predittivi in operazioni di fluitazione controllata di sedimento. In particolare, nei primi dieci chilometri del tratto simulato, la massima deposizione di sedimento prevista dalla simulazione ha raggiunto valori di circa 1'000 t/km (equivalenti a meno di 2 cm di sedimento uniformemente distribuito) al termine dell'operazione, per poi dimezzarsi

nella settimana successiva. Pertanto, sembrerebbe possibile escludere significative modificazioni morfologiche dell'alveo e conseguenti impatti sull'habitat acquatico a causa della fluitazione documentata.

Ringraziamenti. Il lavoro presentato in questa memoria è stato parzialmente supportato da fondi del progetto INTERREG Italia/Svizzera ECOIDRO (*Uso dell'Acqua e Salvaguardia Ambientale e della Biodiversità nei Bacini di Adda, Mera, Poschiavino e Inn* - ID 7630754). Gli autori ringraziano sinceramente il personale di A2A che ha contribuito alla raccolta dei dati, in particolare gli ingegneri Ferdinando Bondiolotti e Giacomo Della Vedova ed il signor Bruno Pianta.

BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA & WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, XXI Ed. Washington, American Public Health Association, Method 2540, 2005, 2-55/2-60.
- Crosa, G., Castelli, E., Gentili, G. & Espa, P. Effects of suspended sediments from reservoir flushing on fish and macroinvertebrates in an alpine stream, *Aquatic Sciences* 2010, 72(1).
- Espe, P., Brignoli, M.L., Previde Prato, A., Castelli, E., Crosa, G. & Gentili, G. Rimozione di sedimenti per fluitazione dal serbatoio di Sernio (SO), *XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Palermo, 2010.
- Gallerano F. & Cannata G. Compatibility of Reservoir Sediment Flushing and River Protection, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(10), 1111-1125.
- Greimann, B., Lai, L. & Huang, J. Two-Dimensional Total Sediment Load Model Equations, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(8), 1142-1146.
- Haun, S. & Olsen, N. R. B. Three-dimensional numerical modelling of the flushing process of the Kali Gandaki Hydropower Reservoir, *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2012, 17(1), 25-33.
- Huang, J.V. & Greimann, B. SRH-1D 2.8 User's Manual. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, U.S. Department of Interior, Denver, Colorado, 2011.
- Liu J., Minami S., Otsuki H., Liu B. & Ashisa K. Prediction of Concerted Sediment Flushing, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(11), 1089-1096.
- Morris, G.L. & Fan, J. Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use, Mc Graw Hill, New York, 1997.
- Rathburn, S.L. & Wohl, E.E. One-dimensional sediment transport modeling of pool recovery along a mountain channel after a reservoir sediment release, *Regulated Rivers*, 2001, 17, 251-273.
- Regione Lombardia. Definizione dell'impatto degli svassi dei bacini artificiali sull'ittiofauna e valutazione di misure di protezione, Quaderni della ricerca n. 90, Luglio 2008, Copyright Regione Lombardia, 2008.
- U.S. Interagency Committee on Water Resources, Subcommittee on Sedimentation. Some fundamentals of particle size analysis. Report n. 12, 1957.
- Vanoni, V.A. Sedimentation Engineering. ASCE, New York, 1975.
- van Rijn, L.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, Aqua Publications, 1006 AN Amsterdam, The Netherlands, 1993.
- Wentworth, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments, *Journal of Geology*, 1922, 30, 377-392.
- Yang, C.T. Incipient motion and sediment transport. *Journal of Hydraulic Division*, 1973, 99(10), 1679-1704.
- Yang, C.T. Erosion and Sedimentation Manual. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, 2006.