

FIUMICINO  
WATERFRONT

SOGGETTO ESECUTORE E FINANZIATORE



INTERVENTO N. 146



CITTÀ DI  
FIUMICINO

SOGGETTO PROPONENTE ED ATTUATORE



**RINA CONSULTING S.P.A.**

Via Antonio Cecchi 6, 16129 Genova

tel +39 010 31961

www.rina.org

Registro imprese di Genova: 03476550102

Partita IVA: 03476550102



**Atelier(s) Alfonso Femia s.r.l.**

Via Interiano 3/11, 16124 Genoa

tel. +39 010.540095 fax 010.5702094

Via Cadolini 32/38, 20137 Milan

tel. +39 02.54019701 fax 010.54115512

55 rue des petites écuries, 75010 Paris

tel +331.42462894

genova@atelierfemia.com - www.atelierfemia.com

Registro imprese di Genova: 01601780990

Partita IVA: 01601780990



RESPONSABILE COORDINAMENTO  
DELLE DISCIPLINE SPECIALISTICHE

Ing. **ALESSANDRO ODASSO**

Direttore Tecnico - Rina Consulting S.p.A.

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

Arch. Alfonso FEMIA - Architettura e Landscape

Ing. Marco COMPAGNINO - Studio di impatto ambientale

Dott. Sandro LORENZATTI - Archeologia

Ing. Michele DI LAZZARO - Studio Idraulico e idrologico

Arch. Riccardo COCCIA - Prevenzione incendi

Ing. Alessandro VITA - Studio Geotecnico

Dott. Geol. Roberto SALUCCI - Geologia

Ing. Federico BARABINO - Sicurezza

Dott. Geol. Paolo RAVASCHIO - Rilievi e indagini

Ing. Flavio MARANGON - Studio trasportistico

Ing. Bruno RAMPINELLI ROTA - Compatibilità vincoli aeronautici

COORDINAMENTO DELLA PROGETTAZIONE

Ing. Marino BALZARINI - Project Management Consultancy

Ing. Valentina BALATA - Project Engineer

Ing. Alessandro PIAZZA - Coordinamento Opere Civili

Ing. Damiano SCARCELLA - Coordinamento Opere Marittime

Arch. Sara GOTTARDO - Coordinamento Architettura e Landscape

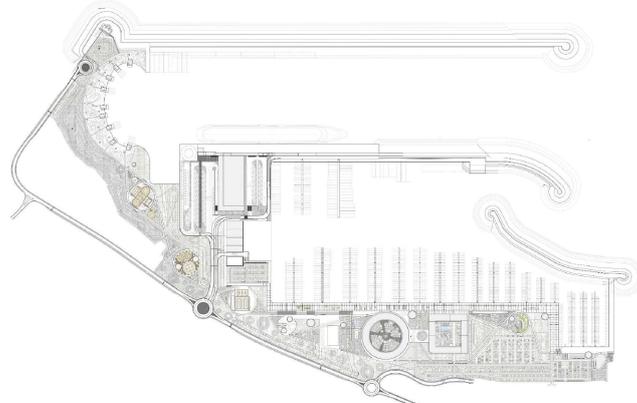
UNITÀ DI PROGETTO

Ing. Massimo GUIDI - Dirigente Comune di Fiumicino

## PORTO TURISTICO-CROCIERISTICO DI FIUMICINO ISOLA SACRA

CUP:F1122000320007

### PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA



### INQUADRAMENTO GENERALE GEOLOGIA E IDROLOGIA-GEOTECNICA-SISMICA RELAZIONE SUL TRASPORTO SOLIDO DEL TEVERE

| COMMESSA | SERVIZIO LOTTO | OPERA | DISCIPLINA | TIPO | PROG. | REV. | SCALA |
|----------|----------------|-------|------------|------|-------|------|-------|
| P0031150 | D0             | MP00  | GI         | REL  | 09    | 00   |       |

| REV. | DESCRIZIONE                | REDATTO       | VERIFICATO  | APPROVATO | DATA    |
|------|----------------------------|---------------|-------------|-----------|---------|
| 00   | Emissione per integrazioni | M. DI LAZZARO | M.BALZARINI | A.ODASSO  | 06/2024 |
| -    | -                          | -             | -           | -         | -       |
| -    | -                          | -             | -           | -         | -       |
| -    | -                          | -             | -           | -         | -       |
| -    | -                          | -             | -           | -         | -       |

NOME FILE: P0031150-D-0-MP00-GI-REL-09\_00

**PORTO TURISTICO-CROCIERISTICO DI FIUMICINO ISOLA  
SACRA**

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA  
FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE  
NUMERICA**

**P0031150-MP00-GI-REL-01\_00**

---

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

---

Ing. Michele Di Lazzaro

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma n. A24238

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### INDICE

|                            |  | Pagina    |
|----------------------------|--|-----------|
| <b>INDICE DELLE FIGURE</b> |  | <b>4</b>  |
| 1.1                        | OBIETTIVI DELLO STUDIO   | 6         |
| 1.2                        | CARATTERI GENERALI DEL TRASPORTO SOLIDO SUL FIUME TEVERE                                   | 7         |
| 1.3                        | L'OPERA IN PROGETTO  | 9         |
| 1.4                        | NORMATIVA E PUBBLICAZIONI DI RIFERIMENTO   | 10        |
| 1.5                        | INQUADRAMENTO NELLA PIANIFICAZIONE DI BACINO   | 10        |
| <b>2</b>                   | <b>DATI DI IDROLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DEL TEVERE A ROMA</b>                                | <b>14</b> |
| 2.1                        | OSSERVAZIONI DI TRASPORTO SOLIDO SUL TEVERE  | 14        |
| 2.2                        | CARATTERISTICHE SUL TRASPORTO SOLIDO DEL TEVERE ROMA                                       | 17        |
| 2.3                        | MISURE DI CONCENTRAZIONE   | 18        |
| 2.4                        | CARATTERISTICHE IDROLOGICHE  | 19        |
|                            | 2.4.1 Curva di durata  | 19        |
|                            | 2.4.2 Forma dell'idrogramma  | 21        |
| <b>3</b>                   | <b>SIMULAZIONE NUMERICA DEL TRASPORTO SOLIDO SUL TRATTO TERMINALE DEL FIUME<br/>TEVERE</b> | <b>22</b> |
| 3.1                        | STATO DEI LUOGHI   | 23        |
| 3.2                        | DESCRIZIONE DELLO STATO POST OPERAM (MODELLO)  | 25        |
| 3.3                        | MODELLAZIONE IDRAULICA   | 27        |
| 3.4                        | CARATTERISTICHE DEL MODELLO NUMERICO   | 27        |
|                            | 3.4.1 MODELLO NUMERICO IDRODINAMICO  | 27        |
|                            | 3.4.2 MODELLO NUMERICO TRASPORTO SOLIDO  | 31        |
| 3.5                        | MODELLO NUMERICO   | 35        |
| 3.6                        | RISULTATI (CONCENTRAZIONE DEI SEDIMENTI)   | 38        |
| 3.7                        | ANALISI DEI RISULTATI SUL TRANSETTO TERMINALE (FIUMARA GRANDE)                             | 44        |
| 3.8                        | ANALISI DEI RISULTATI SUL CANALE DI FIUMICINO  | 49        |
| 3.9                        | BUDGET ANNUALE DI SEDIMENTI  | 52        |
| 3.10                       | RICOSTRUZIONE DI UNA ANNUALITA' DI PORTATA E TRASPORTO SOLIDO                              | 59        |
| 3.11                       | CONCLUSIONI  | 61        |

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### INDICE DELLE FIGURE

|  |    |
|--|----|
| Figura 1-1 - Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale - Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (II ciclo) – mappa della pericolosità idraulica per esondazione del fiume Tevere  | 12 |
| Figura 1-2 - Autorità di Bacino del fiume Tevere - Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (I ciclo) – mappa della pericolosità idraulica per esondazione della rete dei canali di bonifica dell'Agro Romano redatta ai sensi della Direttiva Alluvioni (2007/60/CE) | 12 |
| Figura 1-3 - Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale - Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (II ciclo) – mappa del Rischio ai sensi del D. Lgs. 49/2010   | 13 |
| Figura 1-4 Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico per il Bacino del Fiume Tevere aggiornato nella mappatura dell'area in oggetto con Decreto Segretariale n°46/22 del Giugno 2022   | 13 |
| Figura 2-1 successione degli interventi di ritenuta sul corso del fiume Tevere   | 15 |
| Figura 2-2 Serie storica ricostruita dei budget annuali di quantitativo di trasporto   | 15 |
| Figura 2-3 Misure della campagna sperimentale del 1990-1991; altezze e portate liquide alla stazione di Ripetta; associazione delle portate liquide e solide; deflusso torbido misurato; numero di giorni di estrapolazione della misura                             | 17 |
| Figura 2-4 Misure della campagna sperimentale del 1990-1991; curva granulometrica di diversi campioni raccolti durante la campagna (analisi dei campioni).   | 17 |
| Figura 2-5 Valutazione della concentrazione dei sedimenti solidi nel tratto del Tevere (foce di Fiumara Grande). Tratto dal database di Eionet   | 19 |
| Figura 2-6 Rappresentazione della curva di durata del Tevere a Roma, tratto dal Progetto di piano di bacino del fiume Tevere, 5° stralcio funzionale, per il tratto metropolitano da Castel Giubileo alla foce" (PS5).   | 20 |
| Figura 2-7 interpolazione della curva di durata per il Tevere a Ripetta  | 20 |
| Figura 2-8-andamento delle piene del 1870, 1900, 1915 e 1937   | 21 |
| Figura 2-9 - andamento della piena del 1870, riscalato per il valore di piena al colmo inferito  | 21 |
| Figura 3-1 Inquadramento area di progetto – tratto terminale della Fiumara Grande  | 23 |
| Figura 3-2 Altimetria del sito oggetto dell'intervento. In nero: argine di nuova realizzazione.  | 24 |
| Figura 3-3 Tombino idraulico – a destra: vista satellitare; a sinistra: vista in prospettiva.  | 24 |
| Figura 3-4 Viabilità di progetto – vista planimetrica  | 25 |
| Figura 3-5 – grading del terreno in funzione dell'area drenata e dell'elevazione   | 32 |
| Figura 3-6 pannello del codice Hec Ras per l'assegnazione della rating curve sedimentologica nella sezione di monte del tratto modellato   | 32 |
| Figura 3-7 – Pannello del codice Hec Ras con la tabella di assegnazione delle portate solide (caso di sedimentogramma storico)   | 33 |
| Figura 3-8 Dominio di calcolo  | 35 |
| Figura 3-9 Mappatura delle classi di uso del suolo   | 37 |
| Figura 3-10 Concentrazione massima potenziale – $Q=100m^3/s$ .   | 38 |
| Figura 3-11 Concentrazione massima potenziale – $Q=200m^3/s$ .   | 39 |
| Figura 3-12 Concentrazione massima potenziale – $Q=300m^3/s$ .   | 40 |
| Figura 3-13 Concentrazione massima potenziale – $Q=400m^3/s$ .   | 41 |
| Figura 3-14 Concentrazione massima potenziale – $Q=800m^3/s$ .   | 42 |
| Figura 3-15 Concentrazione massima potenziale lungo la sezione di controllo di Fiumara Grande.   | 43 |
| Figura 3-16 Concentrazione massima potenziale lungo la sezione di controllo del Canale di Fiumicino  | 43 |
| Figura 3-17 Posizione del transetto di controllo dei sedimenti sul ramo di Fiumara Grande  | 44 |

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 3-18 Integrazione numerica dei contributi di portata e concentrazione – da Richards, R.P. 1998. Estimation of pollutant loads in rivers and streams: a guidance document for NPS programs. U.S. EPA Region VIII Grant X998397-01-0, Water Quality Laboratory   | 45 |
| Figura 3-19 Andamento della velocità sulla sezione terminale del ramo di Fiumara Grande per le portate di 100, 200, 300, 400, 800 e 1600 m <sup>3</sup> /s.   | 46 |
| Figura 3-20 Andamento del tirante sulla sezione terminale del ramo di Fiumara Grande per le portate di 100, 200, 300, 400, 800 e 1600 m <sup>3</sup> /s.  | 47 |
| Figura 3-21 Andamento del carico di sedimenti W(x) in kg/s sulla sezione terminale del ramo di Fiumara Grande per le portate di 100, 200, 300, 400, 800 e 1600 m <sup>3</sup> /s.   | 48 |
| Figura 3-22 Andamento della velocità sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m <sup>3</sup> /s.   | 49 |
| Figura 3-23 Andamento del tirante sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m <sup>3</sup> /s.  | 50 |
| Figura 3-24 Andamento della portata parziale sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m <sup>3</sup> /s.   | 50 |
| Figura 3-25 Andamento del contributo di sedimento in kg/s sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m <sup>3</sup> /s.  | 51 |
| Figura 3-26 Classi di frequenza delle portate per un anno medio del Tevere a Ripetta (senza occorrenza di piena straordinaria)  | 52 |
| Figura 3-27 Classi di frequenza delle portate per un anno medio del Tevere a Ripetta (nel caso di occorrenza di piena straordinaria)  | 53 |
| Figura 3-28 Carico di solidi sospesi totali giornalieri sul fiume Tevere in funzione della portata liquida fluente; i carichi sono praticamente trascurabili per portate fino a 200 m <sup>3</sup> /s, e forniscono valori di TSS compresi tra 15 kg/d e 24 kg/d per portate tra 300 e 800 m <sup>3</sup> /s. | 55 |
| Figura 3-29 Andamento della portata totale del Tevere a Ripetta - annualità del 1992 ricostruita per integrazione delle portate mancanti e normalizzata per la media annuale delle portate medie giornaliere del Tevere a Ripetta; ripartizione delle portate sui due rami deltizi                            | 59 |
| Figura 3-30 Andamento del carico solido rilasciato alla foce - ramo di Fiumara Grande e ramo del canale di Fiumicino, sulla base delle associazioni di portata liquida e solida di figura 3-28.   | 60 |

---

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

---

## 1.1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

Il presente elaborato è stato prodotto per rispondere alle richieste di integrazioni della Commissione Tecnica PNRR-PNIEC (Prot. MASE-2024-0011678 del 09/02/2024), della Soprintendenza Speciale per il PNRR del MIC (Prot. MASE-2024-0023735 del 08/02/2024) e alla richiesta di integrazioni/osservazioni VIAN 007/2024 della Regione Lazio - "Direzione Regionale ambiente, cambiamenti climatici, transizione energetica e sostenibilità, parchi" (Prot. MASE-2024-0056308 del 25/03/2024), nell'ambito della Procedura di VIA (PNIEC-PNRR) ai sensi dell'art.23 del D.Lgs.n.152/2006, avviata con Istanza del 6 Ottobre 2023, per il "Progetto per la realizzazione del Porto turistico-crociéristico di Fiumicino - Isola Sacra".

La Commissione Tecnica PNRR-PNIEC, in particolare, ha richiesto quanto segue: "Atteso che nella "Relazione di Compatibilità Idraulica" si dichiara che la progettazione realizzata non comporta il peggioramento delle variabili di deflusso per l'area di espansione, si richiede di descrivere in che modo sarà garantita la funzionalità idraulica del sistema di foce del Tevere nell'area posta a monte del tracciato di via del Faro, modificata nel suo tracciato altimetrico a seguito degli interventi previsti."

”.

Pertanto, il presente documento costituisce lo "Studio quantitativo del trasporto di sedimenti alla foce del fiume Tevere mediante modellazione numerica" nell'ambito dello Studio di Impatto Ambientale per il progetto riferito all'intervento di costruzione del progetto consistente nella realizzazione di un porto con funzione di approdo crociéristico e diportistico.

La presente relazione è stata redatta a conclusione di uno studio finalizzato alla valutazione del quantitativo di sedimenti giornalieri e annui, in funzione delle portate medie giornaliere esitate e delle caratteristiche idrologiche complessive del tratto terminale del Fiume Tevere, nell'ambito di un incarico per l'approfondimento dei potenziali impatti ambientali del nuovo porto turistico-crociéristico di Fiumicino Isola Sacra.

Per ottenere tale valutazione, si è implementato un *modello idraulico accoppiato 1D-2D* nel quale è stata aggiunta la componente di trasporto di sedimenti solidi (generalmente indicata in letteratura con l'acronimo Total Suspended Solids, TSS), basata sulle caratteristiche idrodinamiche della corrente in ciascuna sezione e sulle equazioni di movimentazione / rideposizione dei sedimenti.

Il modello utilizzato è quello dell'Hydrologic Engineering Corp – River Analysis System nella versione 6.02 sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center (HEC), divisione dell'Institute of Water Resources (IWR) dello US Army Corps of Engineers, utilizzato in condizioni di moto vario, e già implementato – nella sola componente idraulica - per la valutazione del rischio idraulico connesso alla realizzazione del nuovo porto.

La finalità dell'implementazione del modello è la valutazione del trasporto solido associato alle diverse condizioni di portata fluenti nei due tratti terminali del Tevere (ramo di Fiumara Grande e ramo di Fiumicino); tale valutazione

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

è quindi finalizzata all'utilizzo del dato quale sorgente puntuale di sedimento per un successivo modello di propagazione e trasporto dei sedimenti in mare.

Per determinare le caratteristiche del modello, esplicitate attraverso l'uso dei parametri, ci si è basati su dati di letteratura relative alle caratteristiche idrologiche complessive e alla caratterizzazione dei sedimenti trasportati nel tratto terminale del Tevere da Roma alla foce.

In particolare ci si è avvalsi di un'indagine di letteratura

- Sulla distribuzione dei diametri dei sedimenti caratteristici (curva granulometrica)
- Su misure reperite relative alla torbidità del corso d'acqua
- Su misure di concentrazione
- Sulla distribuzione del valore di portata media nel corso dell'anno.

## 1.2 CARATTERI GENERALI DEL TRASPORTO SOLIDO SUL FIUME TEVERE

Il trasporto solido di un fiume è direttamente dipendente dalla capacità del bacino di fornire materiale e dalla capacità che il fiume ha di trasportare il materiale che vi giunge.

Nel bacino del fiume Tevere le azioni antropiche hanno ormai variato la capacità di trasporto solido, soprattutto nell'asta principale, a causa della costruzione di dighe, traverse e serbatoi artificiali.

Il trasporto solido in sospensione si verifica quando le particelle solide erose sono di dimensioni tali da essere trasportate "sospese" nella corrente liquida. Condizione necessaria per tale tipo di trasporto è che le velocità ascensionali di agitazione superino la velocità di sedimentazione propria delle particelle. Naturalmente, non è la dimensione delle particelle che determina il loro trasporto al fondo o in sospensione, ma la loro dimensione in riferimento alla velocità della corrente; succede quindi che, in un corso d'acqua, le stesse particelle che sono normalmente trasportate al fondo possono essere trasportate in sospensione durante una fase di piena, o, al contrario, che, nello stesso corso d'acqua, le particelle trasportate in sospensione nelle aste del corso iniziale a forte pendenza, vengano poi trasportate al fondo nel corso finale.

In generale, la concentrazione media della sospensione torbida è una funzione crescente con la profondità, anche se, durante i campionamenti in una data sezione, è possibile riscontrare numerose anomalie. La misurazione del trasporto in sospensione si realizza campionando, in una data stazione di misura, vari campioni d'acqua di volume determinato (solitamente 1 litro) e, quindi, pesando il materiale trattenuto dopo la filtrazione, ottenendo così la torbidità specifica espressa in g/l.

Il trasporto solido, sia al fondo che in sospensione, è strettamente legato al regime idrologico, ed avviene in misura maggiore in condizioni di piena, quando la portata liquida e la velocità della corrente sono maggiori.

In generale si è osservato che, durante una piena, si susseguono, nell'ordine, il massimo della velocità media della corrente, il massimo della sua portata liquida ed il più alto livello idrometrico. Da ciò consegue che la concentrazione della torbidimetria cresce rapidamente durante la fase crescente dei livelli idrici, con un massimo generalmente precedente al colmo di piena.

Come già accennato, elemento determinante per l'equilibrio di un alveo fluviale a fondo mobile è la quantità di materiale solido che la corrente idrica trasporta nelle sue tre forme: in sospensione, in soluzione, per trascinamento. Qualunque elemento estraneo intervenga a mutare le quantità di materiale che competono ad ogni tipo di corrente, dà origine a complessi fenomeni che hanno come conseguenza una particolare modellazione dell'alveo. Nel caso del Tevere, si è finora constatato un progressivo, consistente impoverimento del contenuto della corrente e una riduzione del materiale trascinato sul fondo.

Le misure del trasporto solido del Tevere a Ripetta, limitatamente a quelle in sospensione, sono state eseguite dall'Ufficio Idrografico di Roma dal 1932 al 1973. Da gennaio a dicembre del 1985 sono state eseguite misure sperimentali del trasporto solido a Roma per una tesi di laurea, e dal marzo 1990 al marzo 1991 è stata svolta una campagna di misure alla teleferica di Porta Portese del Servizio Idrografico, nell'ambito delle attività di ricerca per l'Autorità di Bacino.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Uno studio, condotto da Bersani-Piotti nel 1994, ha estrapolato i valori, misurati dal '64 al '73, fino al 1992. L'estrapolazione è stata eseguita con l'espressione:

$$Q_S = 0,0575 Q_L + 0,16$$

Che lega il trasporto solido  $Q_S$  in  $10^6$  t/a, alla portata idrica somma  $Q_L$  in  $10^3$  m<sup>3</sup>/sec.

L'andamento dei trasporti misurati e ricostruiti evidenzia chiaramente il calo medio progressivo del trasporto solido a Ripetta. Premesso che il bacino di alimentazione del materiale solido non ha subito sostanziali modifiche, essendosi mantenuto a carattere prevalentemente agricolo e che le piene, principale veicolo del materiale solido, negli ultimi decenni hanno subito riduzioni, ma non proporzionali a quelle riscontrate per il trasporto solido, le cause del forte calo del trasporto solido negli ultimi anni vanno ricercate, essenzialmente, nella realizzazione di traverse di sbarramento, a monte delle quali la sedimentazione è ridotta per la modestia dell'invaso, ma la trattenuta del materiale di fondo è totale, ed il prelievo di materiale dall'alveo a fini costruttivi, cessato solo, a norma di legge, nel 1983.

Il trasporto solido nel Tevere avviene in massima parte in sospensione ed è concentrato in quei periodi dell'anno in cui avvengono i fenomeni di piena.

Durante tali eventi, la diga di Corbara arresta la totalità del trasporto di fondo e buona parte del trasporto torbido. La diga di Alviano, invece, sembra aver variato nel tempo il suo comportamento, infatti, nei primi anni del suo funzionamento, il bacino di Alviano ha costituito un recettore quasi totale del materiale solido proveniente da monte, mentre poi, procedendo nel tempo l'interrimento del fondo, la quantità di materiale solido trattenuta risulta progressivamente minore. Più a valle, gli sbarramenti di Gallese, Nazzano e Castel Giubileo, sempre in condizioni di piena del fiume, svolgono una funzione di arresto del materiale solido molto limitata, a causa dell'apertura della paratoie durante tali eventi.

La presenza delle dighe e degli sbarramenti ha comunque determinato i cinque tratti di fiume in erosione. In particolare, per l'ultimo tratto, di 44 km di lunghezza, da Ponte Milvio al mare, è possibile individuare tra le cause principali dell'erosione la costruzione del drizzagno di Spinaceto.

L'anno di misure sperimentali, marzo '90- marzo '91, fornendo a Roma un valore di 0.67 milioni di tonnellate, sembra indicare che il trasporto torbido del Tevere si sia al momento stabilizzato intorno al valore che aveva agli inizi degli anni '70. Visto l'interrimento ancora parziale dei bacini di Corbara e Alviano, è lecito pensare che il valore del trasporto torbido si manterrà attorno a questo valore ancora per diversi anni.

E' comunque dimostrata una forte diminuzione del trasporto solido misurato a Roma dagli anni '30 ad oggi.

Poichè negli ultimi sessanta anni (data a cui risale l'inizio delle osservazioni sperimentali del trasporto solido) le condizioni climatiche nel bacino del fiume Tevere possono considerarsi costanti, così come non è variato in maniera sostanziale l'uso del suolo, rimasto prevalentemente agricolo, gli apporti solidi che giungono attualmente nel fiume possono essere considerati dello stesso ordine di grandezza in tutto il periodo considerato.

Non essendo quindi sufficiente l'interrimento dei bacini di Corbara e Alviano per giustificare la diminuzione nel tempo del trasporto solido, senza dubbio, un ruolo determinante nel bilancio è da attribuirsi ai prelievi di materiale in alveo, e agli effetti che questi prelievi, anche se sospesi dal 1983, continuano ad avere sul fiume.

Se il trasporto solido di fondo, che sembra avere importanza predominante per la modellazione dell'alveo, è strettamente legato ai fenomeni di piena, è interessante notare come il deflusso torbido possa essere collegato all'erosione. Dalle analisi effettuate e dai dati acquisiti nel corso di uno studio condotto dalla società VAMS nel 1992, infatti, risulta che le condizioni di magra, in assenza di trasporto solido, siano più importanti ai fini erosivi rispetto alla condizione di massima piena e portata solida. In regime di morbida, quindi, con assenza di apporto di materiale da monte, la velocità d'attrito può essere tale da produrre, anche in virtù di tempi di durata potenzialmente molto lunghi, fenomeni erosivi notevoli. Ciò sembra confermato da recenti teorie e prove sperimentali: in particolare, dalle ricerche di Gill, si evince che la situazione più gravosa, nei confronti dello scavo, è quella di incipiente trasporto di fondo.

Se, come già visto, il culmine nell'approfondimento del fondo del Tevere è stato raggiunto a cavallo degli anni '60-'70, bisogna anche rilevare che, a partire dagli anni '60, si è verificata una progressiva riduzione dell'entità e del numero dei fenomeni di piena, a cui corrisponde un aumento dei periodi di magra. E' interessante notare come, in corrispondenza di ogni periodo di magra, si registrino singoli valori del trasporto solido molto bassi ma che, sommati nell'arco della durata della magra stessa, forniscono valori affatto trascurabili.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Allo stato attuale, lungo il corso del Tevere, da Corbara al mare, l'unico tratto di fiume dove l'alveo fluviale sembra in accumulo di inerti è situato immediatamente a monte della traversa di Nazzano, mentre sono numerosi i tratti in erosione. La stabilità dell'alveo e delle opere su di esso realizzate può essere pregiudicata dall'erosione dell'alveo fluviale.

La tendenza all'erosione può naturalmente essere contrastata anche con opportune opere idrauliche tendenti, ad esempio, a diminuire la velocità della corrente. Nel caso del fiume Tevere si ricordano le 7 soglie nel tratto urbano che hanno diminuito solo in parte l'erosione in atto dell'alveo; appare quindi indispensabile mantenere in vigore il divieto di prelevare materiale in alveo.

Uno studio del 2007 indica che i terreni drenati dal Tevere, a monte di Roma, sono per il 26,5% erodibili, per il 45% poco erodibili; la restante parte del bacino risulta costituita da arenarie compatte, scisti e calcari compatti e dolomie che, generalmente, danno un apporto solido molto ridotto.

Il contributo medio annuo di sedimento sarebbe, quindi, poco meno di  $140\text{m}^3/\text{km}^2$ , che corrisponde ad una degradazione annua media, su tutto il bacino, di 0,14mm, valore estremamente ridotto se rapportato alla situazione di orogenesi recente del bacino.

La diga di Corbara è impostata su un tratto di alveo a forte acclività, costituito da arenarie e marne della serie autoctona toscana. Essa ha rappresentato, fino ad oggi, la prima interruzione antropica dell'unità geomorfologica del bacino del f. Tevere, seguita, nella parte alta del bacino, dalla diga di Montedoglio. Nei pressi di Alviano è situato un altro recettore antropico del trasporto solido proveniente da monte.

La diga di Alviano ha creato un'ampio, ma poco profondo, invaso ad uso idroelettrico, il cui interrimento è costituito prevalentemente dagli apporti terrigeni del bacino del fiume Paglia. A valle dello sbarramento di Alviano, vi è la confluenza di due tributari di destra: i Torrenti Rigo e Vezza, i cui bacini interessano un'area costituita dai prodotti vulcanici dell'apparato Vulsino. A monte dell'abitato di Orte, la confluenza con il Rio Grande, affluente sinistro, convoglia nel corso d'acqua principale sedimenti prevalentemente carbonatici del Trias e Giura della serie umbro-marchigiana.

### 1.3 L'OPERA IN PROGETTO

La realizzazione del **porto turistico di Fiumicino Isola Sacra** è prevista nella parte meridionale dell'area di Isola Sacra, in adiacenza della Foce di Fiumara Grande. La concessione demaniale per la sua costruzione, di durata novantennale, è stata affidata alla società Iniziative Portuali S.p.a. (IP) nel febbraio 2010 dal Comune di Fiumicino, sulla base di un *Accordo di Programma* sottoscritto con lo stesso comune e con la Regione Lazio.

Il progetto sviluppato da IP prevedeva la realizzazione di 1,400 posti barca e di un cantiere nautico da 10,300 mq. A questi si aggiungevano oltre 40,000 mq di edilizia, destinata in gran parte a residenze, ma anche ad un albergo e superfici commerciali, di ristorazione e di servizio.

Le attività di costruzione del Porto, cominciate nel 2010, sono state interrotte dal concessionario dopo pochi mesi e ad oggi risulta realizzata solo una parte della diga foranea, senza che siano state realizzate né la marina, né le opere edili, né le opere necessarie all'urbanizzazione dell'area in concessione, al soddisfacimento degli standard urbanistici, né quelle aggiuntive previste a servizio di Isola Sacra, lasciando le aree di progetto in un generale stato di degrado.

Nel 2022 la Fiumicino Waterfront S.r.l., società costituita ad hoc da dal fondo iCON Infrastructure LLP e dalla Royal Caribbean Group, ha rilevato la concessione demaniale per la realizzazione e gestione del porto turistico di Fiumicino, rivisitando il progetto originale di Iniziative Portuali S.p.A e, pur mantenendo la prevalente funzione nautica da diporto (in accordo al DPR 2 Dicembre 1997 n. 509 - Decreto Burlando "porti turistici"), introduce la funzione turistico-crociéristica nel più esterno dei due bacini che compongono il porto.

Lo studio è articolato in una parte di analisi idrologica e sedimentologica, relativa alla stima delle portate di riferimento del Tevere a Ripetta, che costituisce l'input di forzante per la parte idraulica, e delle caratteristiche dei sedimenti.

La simulazione idraulica è stata condotta lungo il tratto del fiume Tevere dal Ponte Guglielmo Marconi a Roma alla foce del fiume stesso, integrando in termini di aree di esondazione potenziale tutte le aree ubicate a Sud della Fiumara Grande, l'Isola Sacra e le aree poste a nord del Canale di Fiumicino. Ad essa è stata aggiunta una componente per la valutazione del trasporto di sedimenti sulla base delle equazioni di movimentazione degli stessi, in funzione di tirante e velocità.

## 1.4 NORMATIVA E PUBBLICAZIONI DI RIFERIMENTO

Si presenta nel seguito un elenco delle Normative e Pubblicazioni in riferimento alle quali è sviluppato il documento.

1. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale - Piano di Assetto Idrogeologico;*
2. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale - Piano stralcio per il tratto metropolitano del Tevere da Castel Giubileo alla foce – PS5;*
3. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale – PAI – Norme Tecniche di Attuazione;*
4. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale – PAI – Norme Tecniche di Attuazione – Progetto di Il aggiornamento del Piano di bacino stralcio per il tratto metropolitano del Tevere da Castel Giubileo alla foce – PS5 – Allegati alle norme tecniche di attuazione;*
5. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale – Fasce e rischio idraulico sul reticolo secondario e minore (Rete canali di bonifica dell'Agro Romano) – Tavola PB88 – I – Rete canali di bonifica;*
6. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale – deliberazione n. 20/2019 – Riesame ed aggiornamento delle mappe della pericolosità e del rischio alluvioni. Adozioni delle misure di salvaguardia;*
7. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale – Aree sottoposte a misure di salvaguardia ai sensi della Delibera n° 20 del 20/12/2019 della Conferenza Istituzionale Permanente dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale – Tavola 43;*
8. *Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale (ex Autorità di Bacino del fiume Tevere) – Studio idrologico ed idraulico bidimensionale per l'aggiornamento del piano di assetto idrogeologico del reticolo secondario per l'area di Roma Capitale – Relazione Linee Guida;*
9. *D. Lgs. 23 febbraio 2010 n.49 – Piano di Gestione del Rischio Alluvioni – Mappe di pericolosità e rischio – Relazione sugli aspetti metodologici;*
10. *DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 29 settembre 1998*
11. *Comune di Roma – Piano Comunale di Protezione Civile (art. 12, comma 2, lett. e) del D.lgs-1/2018) – Piano di Emergenza Comunale (D.F.R. Lazio 363/2014) – Fascicolo 2 – Rischio Idraulico;*
12. *Centro Studi Deflussi Urbani – Sistemi di fognatura – Manuale di progettazione;*
13. *Centro Studi Deflussi Urbani – Acque di prima pioggia nei sistemi di fognatura. Manuale di progettazione;*
14. *Idraulica dei sistemi fognari. Dalla teoria alla pratica (Gisonni C., Hager W.H.);*
15. *Progetto VAPI (Valutazione delle Piene in Italia);*
16. *Norme tecniche per le costruzioni 2018.*

## 1.5 INQUADRAMENTO NELLA PIANIFICAZIONE DI BACINO

Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni I ciclo del Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale, è stato adottato il 17 dicembre 2015 con deliberazione n. 6 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere, costituito ai sensi dell'art.12, comma 3, della legge n. 183/1989 e integrato dai componenti designati dalle Regioni il cui territorio ricade nel Distretto Idrografico non già rappresentante nel medesimo Comitato.

Per il II ciclo del PGRA, gli elaborati di aggiornamento sono stati esaminati e condivisi nella seduta della Conferenza Operativa del 15 dicembre 2021, che ha espresso al riguardo parere favorevole.

Il Piano è stato preceduto, come previsto dalle normativa sopra ricordate, da una lunga fase di attività preparatorie tra le quali – la più importante – la fase di mappatura della pericolosità e del rischio del Distretto idrografico dell'Appennino centrale.

Il Piano consta di due sezioni

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

- la parte A) riguarda principalmente l'attività di pianificazione di bacino di cui agli articoli 65, 66, 67, 68 del decreto legislativo n. 152/06, facendo salvi gli strumenti di pianificazione già predisposti nell'ambito della pianificazione di bacino già prodotta nell'ambito della normativa previgente; essa è in particolare quella che rileva dal punto di vista della mappatura delle aree rischio di cui alle Figura 1-1 e 1-2
- la parte B) riguarda, in coordinamento con le altre Regioni e con il Dipartimento nazionale della Protezione Civile, il sistema di allertamento, nazionale, statale e regionale, per il rischio idraulico di cui alla Direttiva P.C.M. 27/2/2004.

Con il parere n. 12 del 26 marzo 2021 la Commissione tecnica VIA VAS ha escluso il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto dell'Appennino Centrale dall'assoggettabilità a VAS fornendo alcune osservazioni/prescrizioni recepite mediante una relazione integrativa nel Piano gestione Rischio Alluvioni in adozione.

Infine, in data 20 dicembre 2021 con Delibera n.27/2021 la Conferenza Istituzionale Permanente ha adottato l'aggiornamento del PGRA ai sensi degli art.65 e 66 del D.Lgs 152/2006 e con il DPCM del 1 dicembre 2022 il Piano è stato definitivamente approvato.

Per i contenuti delle mappe del II ciclo la delibera di presa d'atto della conferenza istituzionale permanente è del 20 dicembre 2019.

Dal punto di vista della Pianificazione di Bacino, l'area in cui verrà realizzato il nuovo porto turistico risulta ricadere alla data di emissione del progetto nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale (ABDAC), che ricomprende anche l'area già di pertinenza dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere.

Tale area risulta perimetrata ai sensi del sopra citato PGRA (D. Lgs. 49/2010) e classificata come *area a bassa pericolosità idraulica (P1)* per quanto riguarda la potenziale esondazione del fiume Tevere e dei bacini minori (pericolosità complessiva, figura 1-1).

Per quanto riguarda la pericolosità relativa al potenziale allagamento per il reticolo minore, è opportuno rilevare che l'area, nell'ambito della redazione delle mappe del *I ciclo di PGRA* da parte dell'allora competente *Autorità di Bacino del Fiume Tevere*, non è risultata perimetrata (figura 1-2); questo indicava che l'attenzione maggiore in termini di pericolosità idraulica deriva dagli effetti di allagamento dovuti all'impossibilità del reticolo secondario di esitare le portate degli scoli minori al Tevere, e che quindi lo scenario di riferimento principale per l'area di intervento è rappresentato principalmente dalla piena del fiume, dato confermato anche dalle modellazioni di cui alla presente relazione.

Si è in ogni caso ritenuto valutare in modo specifico se l'intervento in oggetto, per effetto della modifica delle quote del terreno nell'area di nuova realizzazione, dovesse avere qualche impatto sul regime dei fossi di bonifica adiacenti.

Per quanto riguarda il rischio idraulico, dal punto di vista del rischio di esondazione del fiume Tevere l'area oggetto dell'intervento è perimetrata nel PGRA ai sensi del D. Lgs. 49/2010 e del DPCM del 29/9/1998 come area a rischio medio, essendo bassa la pericolosità idraulica pari a P1 ma con un elevato valore dei beni esposti (area portuale), come indicato in figura 1-3.

Il Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico per il Bacino del Fiume Tevere è stato aggiornato nella mappatura dell'area in oggetto con Decreto Segretariale n°46/22 del Giugno 2022; la nuova mappa integrata di pericolosità e rischio presenta delle modifiche rispetto alla precedente versione dell'aggiornamento del PAI per il tratto metropolitano del Tevere da Castel Giubileo alla foce (PS5, che riportava l'assetto idraulico con le fasce fluviali e le zone a rischio del Tevere).

Il PAI vigente è rappresentato in figura 1-4 e perimetra l'area di intervento come area a rischio R3.



**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

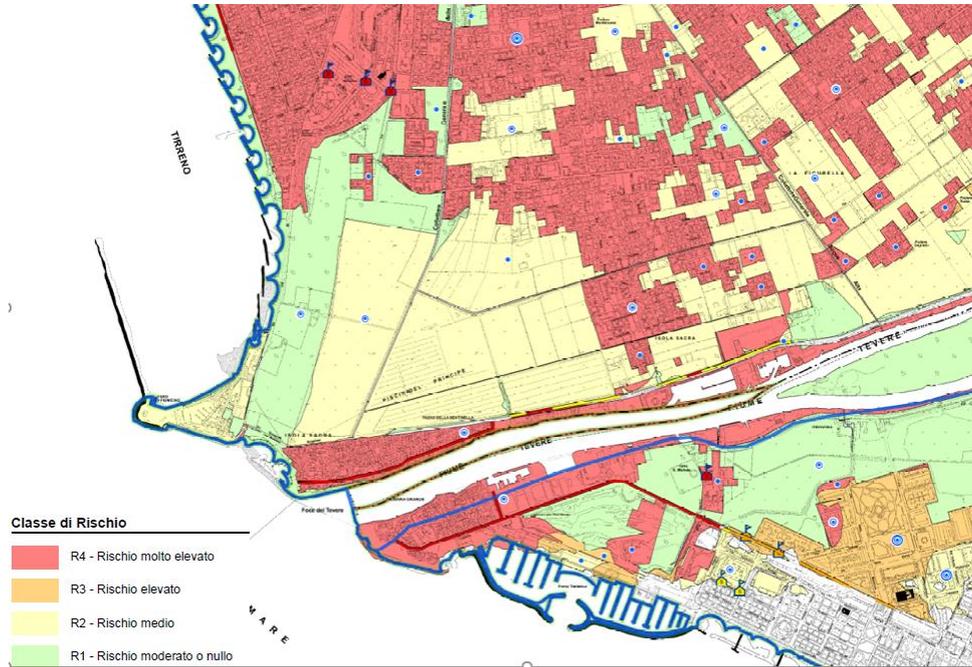


Figura 1-3 - Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale - Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (II ciclo) – mappa del Rischio ai sensi del D. Lgs. 49/2010

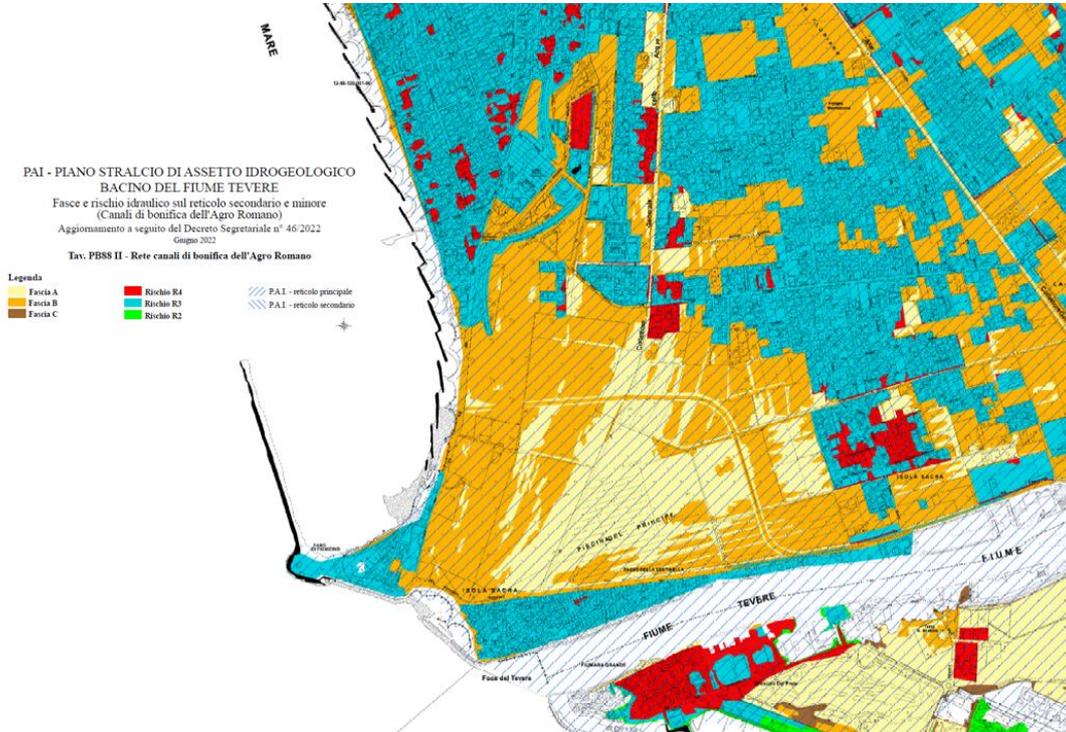


Figura 1-4 Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico per il Bacino del Fiume Tevere aggiornato nella mappatura dell'area in oggetto con Decreto Segretariale n°46/22 del Giugno 2022

---

## 2 DATI DI IDROLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DEL TEVERE A ROMA

Si riportano in questa sezione alcune indicazioni reperite nella letteratura scientifica di settore, con particolare riguardo:

- Ai quantitativi di sedimento trasportati e rilasciati dal fiume Tevere nel suo tratto terminale
- Alle caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria
- Alle caratteristiche di concentrazione dei sedimenti in sospensione
- Alla definizione di alcune variabili idrologiche necessarie allo studio proposto.

Tutti i dati individuati risultano strumentali alla implementazione del modello numerico di cui al successivo capitolo 3.

### 2.1 OSSERVAZIONI DI TRASPORTO SOLIDO SUL TEVERE

Bersani ed Amici (il trasporto solido sul fiume Tevere, in Idrotecnica, maggio-giugno 1993), presentano una review del tema del trasporto solido sul corso del basso Tevere e i risultati di una campagna svolta nell'ambito del Piano di bacino del fiume Tevere (campagna 1990-1991), della durata di un anno, periodo nel quale sono state eseguite 26 misurazioni del trasporto solido con una frequenza di una misura ogni due settimane circa; occorre notare che misure di trasporto solido risultano particolarmente rare, e che in particolare sul Tevere erano state eseguite solo nel periodo 1873-1879 dalla Stazione Agraria di Roma e nel periodo 1932-73 dall'Ufficio del Servizio Idrografico di Roma. Gli autori osservano già che i valori di deflusso torbido in migliaia di tonnellate passano da valori superiori a  $5000 \times 10^3$  tonnellate a valori di alcune centinaia di tonnellate negli anni 70 (dopo quindi la realizzazione della diga di Corbara); i risultati sono riportati in forma di tabella nella seguente figura 2-1.

L'influenza sul trasporto solido è legata alle variazioni antropiche lungo l'asta, costituite dalla costruzione delle centrali idroelettriche dell'ENEL. Infatti nel 1946 sono iniziati i lavori per la costruzione dello sbarramento di Castel Giubileo, nel 1956 è stato ultimato lo sbarramento di Nazzano, nel 1962 è entrata in funzione la centrale idroelettrica con sbarramento di Ponte Felice ed infine agli inizi degli anni '60 sono stati ultimati ed entrati in funzione i due impianti con diga e serbatoio di Corbara e Alviano. Oltre all'effetto di intrappolamento intrinseco che hanno i diversi invasi, vale la pena sottolineare che sul Tevere i bacini artificiali (Corbara in particolar modo) innalzando il livello di base del fiume hanno diminuito i valori di erosione a monte.

I valori riscontrati durante le misure del 1990-1991 sono invece riportati nella tabella e figura seguente (2-2); essi mostrano valori del trasporto solido molto variabili, compresi tra circa  $100 \times 10^3$  kg/d a  $558265 \times 10^3$  kg/d (quest'ultimo valore è stato stimato per una portata liquida fluente di  $646 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Occorre osservare che il valore di trasporto solido misurato in una data giornata è stato mantenuto inalterato per tutti i giorni successivi alla misura stessa, fino alla misura successiva; nel caso particolare, i valori misurati il 12/12/1990 sono stati "protratti" per i successivi 11 giorni; di fatto questa misura di trasporto inferita su questo evento condiziona pesantemente il budget sedimentologico annuale, rappresentando da sola l'83% dell'intero evento. Se questa approssimazione può risultare accettabile sui bassi valori di trasporto solido, impatta sicuramente invece il caso specifico in cui è presente un evento "outlier".

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00



Figura 2-1 successione degli interventi di ritenuta sul corso del fiume Tevere solido e valutazione del trasporto solido unitario (da Bersani ed Amici, 1993)

| Anno | Deflusso torbido<br>(ton × 10 <sup>3</sup> ) | Defl. torb. unit.<br>(ton/km <sup>2</sup> ) |      |      |     |
|------|--|---|------|------|-----|
| 1932 | 6452   | 390   | 1953 | 4302 | 260 |
| 1933 | 5066   | 306   | 1954 | 3492 | 211 |
| 1934 | 9118   | 551   | 1955 | 2417 | 146 |
| 1935 | 9854   | 595   | 1956 | 3899 | 236 |
| 1936 | 6137   | 371   | 1957 | 1119 | 68  |
| 1937 | 11595  | 701   | 1958 | 3282 | 198 |
| 1938 | 4811   | 291   | 1959 | 3041 | 184 |
| 1939 | 8727   | 528   | 1960 | 8032 | 486 |
| 1940 | 6640   | 401   | 1961 | 3397 | 205 |
| 1941 | 9075   | 549   | 1962 | 3497 | 211 |
| 1942 | 5739   | 349   | 1963 | 3891 | 235 |
| 1943 | 3770   | 228   | 1964 | 1933 | 117 |
| 1944 | 10872  | 657   | 1965 | 3198 | 197 |
| 1945 | 1153   | 70  | 1966 | 1860 | 112 |
| 1946 | 12900  | 780   | 1967 | 577  | 35  |
| 1947 | —  | —   | 1968 | 1854 | 112 |
| 1948 | —  | —   | 1969 | 2588 | 156 |
| 1949 | 3251   | 196   | 1970 | 659  | 39  |
| 1950 | 4252   | 257   | 1971 | 284  | 17  |
| 1951 | 8365   | 506   | 1972 | 853  | 52  |
| 1952 | 7012   | 424   | 1973 | 383  | 23  |

**F. Tevere a Roma**

**Deflusso torbido**

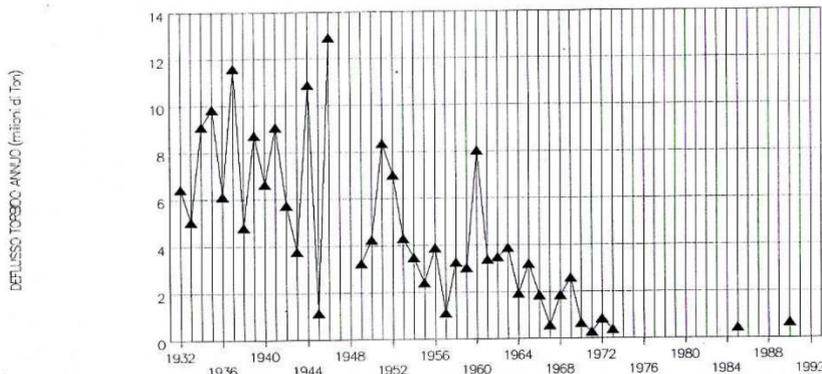
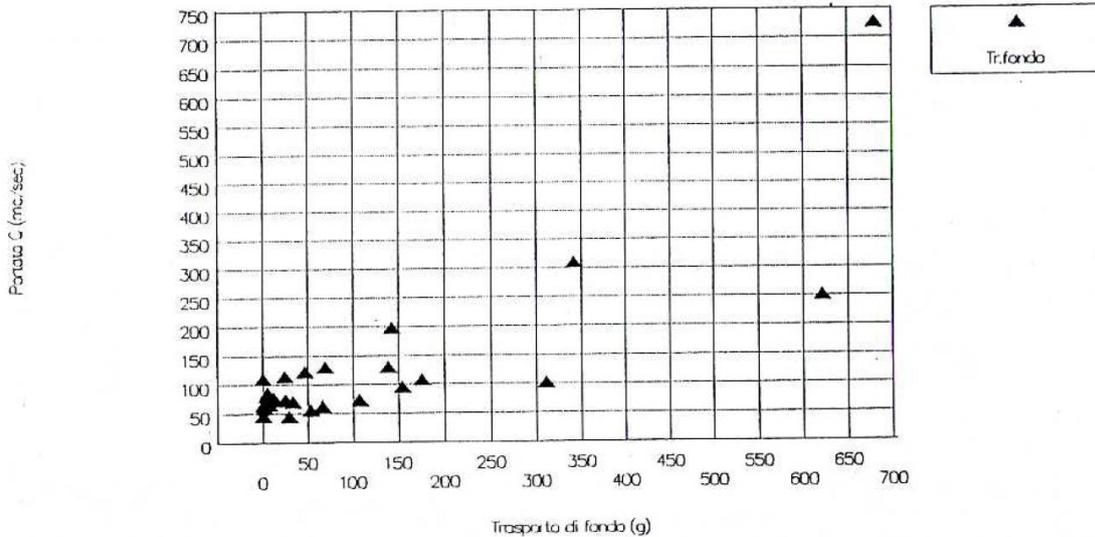


Figura 2-2 Serie storica ricostruita dei budget annuali di quantitativo di trasporto solido e valutazione del trasporto solido unitario (da Bersani ed Amici, 1993)

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

| Campagna di misurazioni periodiche n. | Data     | Trasporto solido in sospensione g/l | Altezza scala idrometrica a Ripetta m | Portata liquida corrispondente m <sup>3</sup> /sec | Portata torbida kg/sec | Distanza di tempo tra due misure giorni | Tempo di estrapolazione della misura giorni | Deflusso torbido corrispondente kg x 10 <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|----------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------|---|---|--|
| 1                                     | 26-3-90  | 0,004                               | 4,80                                  | 64,2   | 0,257                  | 0                                       | 5   | 111  |
| 2                                     | 5-4-90   | 0,016                               | 4,77                                  | 59,5   | 0,952                  | 10                                      | 15,5  | 1275   |
| 3                                     | 26-4-90  | 0,020                               | 5,10                                  | 80,0   | 1,600                  | 21                                      | 21  | 2903   |
| 4                                     | 17-5-90  | 0,013                               | 5,21                                  | 86,0   | 1,120                  | 21                                      | 18  | 1742   |
| 5                                     | 1-6-90   | 0,083                               | 4,86                                  | 66,0   | 5,478                  | 15                                      | 14  | 662  |
| 6                                     | 14-6-90  | 0,016                               | 5,05                                  | 76,5   | 1,224                  | 13                                      | 14  | 1481   |
| 7                                     | 29-6-90  | 0,017                               | 4,97                                  | 72,5   | 1,233                  | 15                                      | 14  | 1491   |
| 8                                     | 12-7-90  | 0,017                               | 4,98                                  | 74,0   | 1,258                  | 13                                      | 14  | 1521   |
| 9                                     | 27-7-90  | 0,040                               | 4,59                                  | 44,9   | 1,794                  | 15                                      | 25  | 3875   |
| 10                                    | 31-8-90  | 0,003                               | 4,92                                  | 70,0   | 0,210                  | 35                                      | 23,5  | 426  |
| 11                                    | 12-9-90  | 0,033                               | 4,70                                  | 56,0   | 1,848                  | 12                                      | 12  | 1916   |
| 12                                    | 24-9-90  | 0,037                               | 4,78                                  | 62,0   | 2,294                  | 12                                      | 13  | 2577   |
| 13                                    | 8-10-90  | 0,030                               | 4,96                                  | 73,0   | 2,190                  | 14                                      | 15,5  | 2933   |
| 14                                    | 25-10-90 | 0,043                               | 5,38                                  | 95,0   | 4,085                  | 17                                      | 21  | 7412   |
| 15                                    | 19-11-90 | 0,010                               | 4,61                                  | 46,0   | 0,460                  | 25                                      | 18,5  | 735  |
| 16                                    | 1-12-90  | 0,080                               | 5,64                                  | 110,2  | 8,816                  | 12                                      | 11,5  | 8760   |
| 17                                    | 12-12-90 | 0,890                               | 9,50                                  | 726,0  | 646,140                | 11                                      | 10,0  | 558265   |
| 18                                    | 21-12-90 | 0,123                               | 6,60                                  | 252,0  | 30,996                 | 9                                       | 14,5  | 38832  |
| 19                                    | 10-1-90  | 0,017                               | 6,24                                  | 198,0  | 3,366                  | 20                                      | 17,5  | 5089   |
| 20                                    | 25-1-91  | 0,013                               | 5,60                                  | 108,0  | 1,404                  | 15                                      | 10,5  | 1274   |
| 21                                    | 31-1-91  | 0,060                               | 5,76                                  | 133,0  | 7,980                  | 6                                       | 6,5   | 4481   |
| 22                                    | 7-2-91   | 0,027                               | 5,75                                  | 130,0  | 3,510                  | 7                                       | 9,5   | 2881   |
| 23                                    | 19-2-91  | 0,030                               | 7,00                                  | 310,4  | 9,310                  | 12                                      | 14  | 11261  |
| 24                                    | 7-3-91   | 0,017                               | 5,75                                  | 130,0  | 2,210                  | 16                                      | 15  | 2864   |
| 25                                    | 21-3-91  | 0,060                               | 5,66                                  | 114,0  | 6,840                  | 14                                      | 10,5  | 6205   |
| 26                                    | 28-3-91  | 0,027                               | 5,72                                  | 122,0  | 3,294                  | 7                                       | 3,5   | 996  |
| Deflusso torbido totale               |          |                                     |                                       |  |                        |   |   | 671968   |



## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Figura 2-3 Misure della campagna sperimentale del 1990-1991; altezze e portate liquide alla stazione di Ripetta; associazione delle portate liquide e solide; deflusso torbido misurato; numero di giorni di estrapolazione della misura

### 2.2 CARATTERISTICHE SUL TRASPORTO SOLIDO DEL TEVERE ROMA

Ancora Bersani ed Amici, 1993, indicano che dopo l'evento di piena del dicembre 1990 è stato raccolto a Roma sulla banchina in riva sinistra del fiume, a valle di Ponte Principe Amedeo Savoia Aosta, un campione di un deposito sabbioso formatosi a seguito dell'evento stesso di piena, che può essere considerato come rappresentativo del trasporto in sospensione del Tevere a Roma durante le piene.

Il campione sottoposto all'analisi granulometrica è risultato essere completamente sabbioso (sabbia 100%) con un diametro medio  $D_{50} = 0,51$  mm.

Inoltre sul materiale prelevato al fondo dalla trappola per effettuare le misure descritte è stato possibile effettuare l'analisi granulometrica sia su un campione cumulativo di tutti i prelievi (eccetto i prelievi n.6 e 7) e sia sul campione prelevato nella misura n. 17 del 12/12/1990, rappresentativo dell'unico evento di piena avutosi durante l'anno di misure (con  $h_{max}$  all'idrometro di Ripetta di circa 11 metri).

Le curve granulometriche ottenute sono riportate in figura 2-4

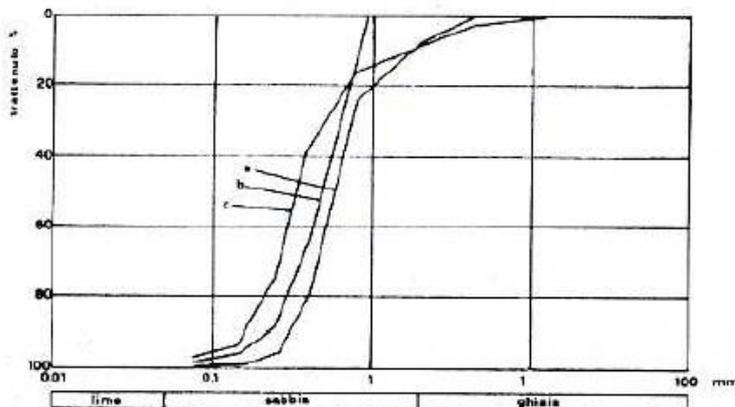


Figura 2-4 Misure della campagna sperimentale del 1990-1991; curva granulometrica di diversi campioni raccolti durante la campagna (analisi dei campioni).

Per quanto riguarda il campione cumulativo, di tutte le misure, questo ha un diametro mediano  $D_{50}$  di 0,58 mm, molto simile a quello individuato per il campione cumulativo di tutti i prelievi; leggermente inferiore invece il diametro mediano individuato nella misura della piena del dicembre 1990.

Dalle rilevazioni condotte appare che:

- Il trasporto solido è quantitativamente concentrato nei giorni dell'anno in cui si riscontrano eventi di portata superiori alla media;
- la dimensione dei granuli trasportati dal Tevere durante le piene è circa la stessa sia al fondo che in sospensione. Nel caso della piena non eccezionale del dicembre '90 a Roma (altezza idrometrica massima a Ripetta 11 metri) si è riscontrato infatti un diametro medio  $D_{50} = 0,5$  mm per i campioni rappresentativi

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

di entrambi i tipi di trasporto solido, con l'unica differenza che nel materiale trasportato al fondo è stata riscontrata la presenza anche di materiale ghiaioso

- La diminuzione del trasporto solido misurata a Roma nel corso dell'ultimo secolo non è attribuibile soltanto alla presenza degli sbarramenti dell'ENEL sull'asta principale e sui suoi affluenti sia perché è iniziata in epoca precedente alla loro costruzione, sia perché si è visto che i depositi accumulati nel periodo di funzionamento dei serbatoi di Corbara ed Alviano e nel tratto a monte dello sbarramento di Nazzano, non compensano la diminuzione del deflusso torbido misurata a valle della stazione di Roma Ripetta- Porta Portese nello stesso periodo di tempo.

Dal punto di vista litominearologico, i campioni prelevati mostrano che i granuli più grossi sono costituiti per circa il 55% da minerali e frammenti litici provenienti da rocce sedimentarie e solo marginalmente da metamorfiche. La percentuale di minerali provenienti da rocce eruttive diminuisce a circa il 23 % all'analisi dei minerali più minuti trattenuti al setaccio.

| Elementi trattenuti al setaccio ASTM n. 40 (diametro 0,420 mm) Numero totale elementi esaminati: 552 |        |      |
|--|--------|------|
| LITOMINERALOGIA  | Numero | %    |
| Piroclastite + lava  | 278    | 50.4 |
| Quarzo   | 187    | 33.9 |
| Calcite  | 37     | 6.7  |
| Anfiboli + Pirosseni   | 14     | 2.5  |
| Calcare  | 12     | 2.2  |
| Miche  | 10     | 1.8  |
| Selce  | 7      | 1.2  |
| Quarzite   | 5      | 0.9  |
| Frammenti gusci molluschi  | 2      | 0.4  |

| Elementi trattenuti al setaccio ASTM n. 200 (diametro 0,075 mm) Numero totale elementi esaminati: 512 |        |      |
|---|--------|------|
| LITOMINERALOGIA   | Numero | %    |
| Quarzo  | 270    | 52.7 |
| Anfiboli + Pirosseni  | 116    | 22.6 |
| Calcite   | 96     | 18.8 |
| Gusci foraminiferi  | 30     | 5.9  |

Tabella relativa all'analisi litominearologica dei campioni prelevati sul tratto terminale del fiume Tevere

### 2.3 MISURE DI CONCENTRAZIONE

Per il periodo recente, sono disponibili alcune misure di concentrazione di sedimenti solidi sospesi, fornite dal network EIONET (European Environment Information and Observation Network).

Le concentrazioni individuate per il tratto terminale de Tevere variano tra circa 2 mg/l a circa 25 mg/l.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

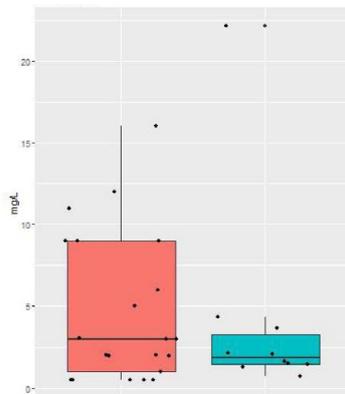


Figura 2-5 Valutazione della concentrazione dei sedimenti solidi nel tratto del Tevere (foce di Fiumara Grande). Tratto dal database di Eionet

Una stima della portata solida giornaliera, associata alle concentrazioni individuate è riportata nella seguente tabella.

| <b>grandezza</b>           | <b>u.m.</b>       | <b>valore in giornata di tempo asciutto</b> | <b>valore di morbida</b> | <b>valore per piena significativa</b> |
|----------------------------|-------------------|---|--------------------------|---------------------------------------|
| densità dei TSS            | mg/l              | 2   | 15                       | 25                                    |
| densità dei TSS            | kg/m <sup>3</sup> | 0.002                                       | 0.015                    | 0.025                                 |
| portata liquida            | m <sup>3</sup> /s | 200   | 400                      | 1000                                  |
| portata solida             | kg/s              | 0.4   | 6                        | 25                                    |
| portata solida giornaliera | kg/giorno         | 34560                                       | 518400                   | 2160000                               |

## 2.4 CARATTERISTICHE IDROLOGICHE

### 2.4.1 Curva di durata

Per la curva di durata viene utilizzata la seguente interpolazione del numero di giorni con portata oltre assegnata soglia; tale distribuzione delle portate è stata reperita nel "Progetto di piano di bacino del fiume Tevere, 5° stralcio funzionale, per il tratto metropolitano da Castel Giubileo alla foce" (PS5), riportata in figura 2-6.

Sulla base di tale curva, interpolata, è stata elaborata una statistica di frequenza delle portate medie giornaliere del Tevere a Ripetta, rappresentata in figura 2-7

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

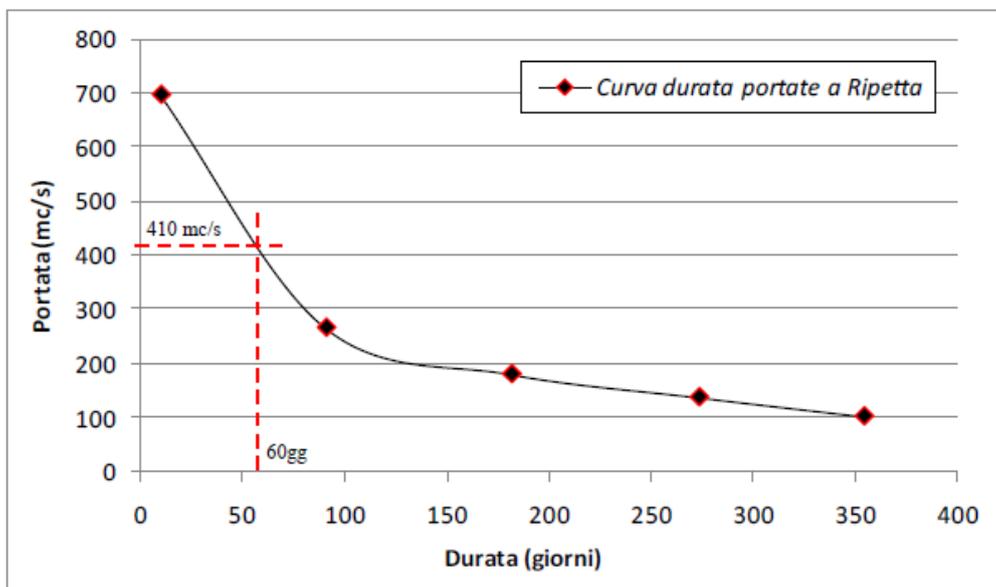


Figura 2-6 Rappresentazione della curva di durata del Tevere a Roma, tratto dal Progetto di piano di bacino del fiume Tevere, 5° stralcio funzionale, per il tratto metropolitano da Castel Giubileo alla foce" (PS5).

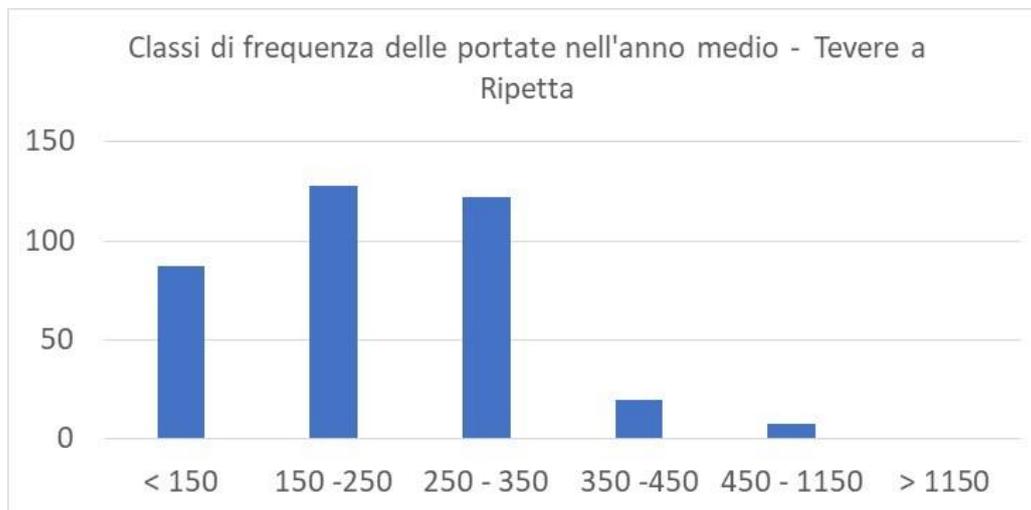


Figura 2-7 interpolazione della curva di durata per il Tevere a Ripetta

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### 2.4.2 Forma dell'idrogramma

Per l'adozione della forma dell'idrogramma di piena si è fatto riferimento alle piene storiche degli ultimi 150 anni per le quali sono disponibili gli idrogrammi completi registrati a Ripetta.

Di queste quattro piene, non sono state considerate le piene del 1915 e 1937, perché generate da eventi multipli in successione, con successive fasi di precipitazione, che hanno sostenuto le portate nel corso d'acqua per diversi giorni. Come si vedrà nella simulazione idraulica, anche adottando piene con durate complessive decisamente inferiori a quelle storiche registrate, la variazione delle condizioni di inviluppo (massimi livelli registrati) dipende solo in modo molto debole dal volume complessivo della piena; non si è ritenuto quindi adottare eventi complessi con periodi di morbida prolungati.

Tra le piene del 1870 e 1900, entrambe piuttosto simili nella fase ascendente, la piena del 1870 presenta volumi leggermente superiori.

Per tale ragione, si è assunta come forma della piena di riferimento per la successiva simulazione idraulica la piena del 1870.

L'idrogramma ricostruito è quello riportato in figura 2-9.

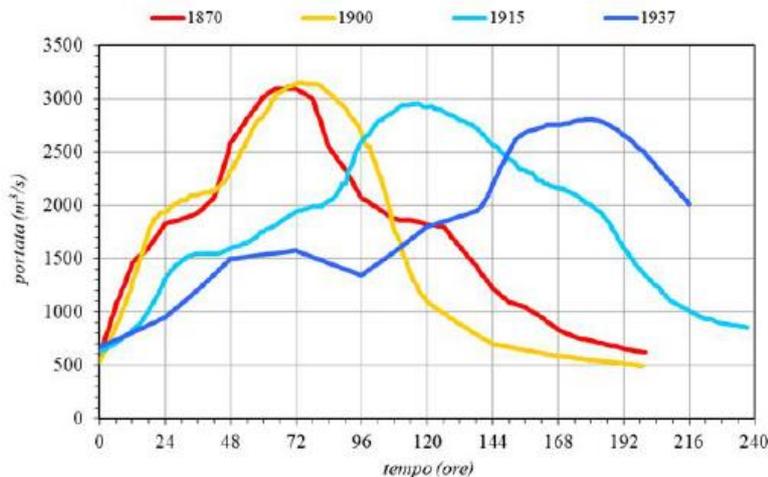


Figura 2-8-andamento delle piene del 1870, 1900, 1915 e 1937

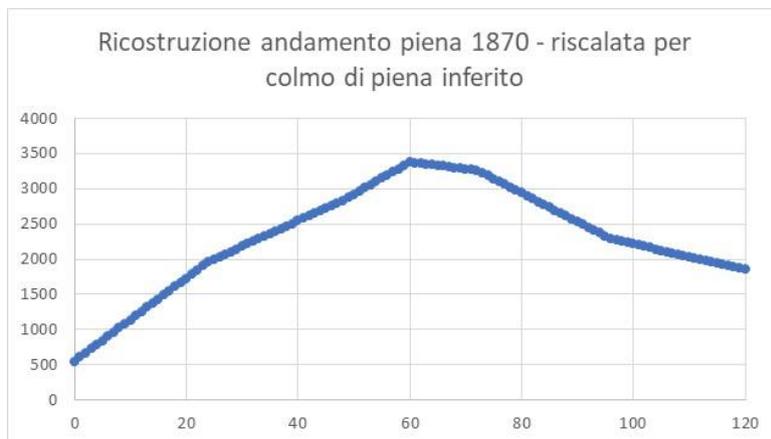


Figura 2-9 - andamento della piena del 1870, riscalato per il valore di piena al colmo inferito

---

### 3 SIMULAZIONE NUMERICA DEL TRASPORTO SOLIDO SUL TRATTO TERMINALE DEL FIUME TEVERE

Il presente capitolo descrive la metodologia adottata, le assunzioni fatte e i risultati ottenuti di un *modello idraulico accoppiato 1D-2D* nel quale è stata implementata la componente di trasporto di sedimenti solidi (generalmente indicata in letteratura con l'acronimo Total Suspended Solids, TSS), basata sulle caratteristiche idrodinamiche della corrente in ciascuna sezione.

Il modello utilizzato è quello dell'Hydrologic Engineering Corp – River Analysis System nella versione 6.02 sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center (HEC), divisione dell'Institute of Water Resources (IWR) dello US Army Corps of Engineers, utilizzato in condizioni di moto vario.

La finalità dell'implementazione del modello è la stima del trasporto solido associato alle diverse condizioni di portata fluenti nei due tratti terminali del Tevere (ramo di Fiumara Grande e ramo di Fiumicino).

Per l'implementazione del modello si è proceduto in accordo con le seguenti fasi:

- individuazione del sistema fisico di riferimento e del modello digitale di terreno da utilizzare
- determinazione delle sezioni di calcolo per il modello monodimensionale e del dominio di calcolo bidimensionale;
- definizione dei parametri di calcolo idraulico;
- determinazione delle caratteristiche per il calcolo della componente di trasporto solido in sospensione;
- scelta delle condizioni al contorno a monte e a valle del tratto simulato;
- analisi dei risultati per le portate di riferimento sui transetti di rilascio dei sedimenti (transetti terminali di fiumara Grande e canale di Fiumicino)
- integrazione dei risultati sul transetto per l'ottenimento di un quantitativo di TSS in forma di sorgente puntuale, alla scala giornaliera, in funzione della portata media giornaliera
- integrazione successiva dei dati attesi di trasporto giornaliera con la curva di durata del Tevere, espressa in forma discreta, per la determinazione del budget sedimentologico, utile alla successiva simulazione della propagazione di sedimenti a mare.

L'implementazione del modello, includendo la parte di trasporto solido, richiede un notevole sforzo computazionale, con simulazioni che impegnano un calcolatore con processore Gen Intel® Core™ i9-14900K per circa 40 ore, fino al raggiungimento di condizioni stabili di trasporto sul tronco considerato.

Le portate di riferimento, per le quali condurre le simulazioni di moto vario, sono state prescelte sulla base delle precedenti indicazioni di letteratura, tra quelle di riferimento per l'attivazione di quantità significative di trasporto solido, fino alle massime portate attese per tempi di ritorno medi; in effetti, come si vedrà nel dettaglio nella discussione dei risultati, le portate concomitanti con gli eventi molto rari di fatto contribuiscono in maniera trascurabile al trasporto solido totale annuo, proprio in ragione della loro rarità.

Il trasporto annuo è di fatto formato dai periodi di morbida, superiori a circa 300 m<sup>3</sup>/s.

Per tale ragione, dal punto di vista idrologico, si sono prese a riferimento le portate di 100, 200, 300, 400, 600, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s; le portate più basse prescelte proprio al fine di verificare su quale range di valori si attivi la movimentazione di quantità significative di trasporto solido.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### 3.1 STATO DEI LUOGHI

In questa sezione vengono richiamate le caratteristiche del contesto territoriale caratterizzante il sito oggetto di studio, costituenti il dominio fisico del modello implementato, e le modifiche prevedibili su scala territoriale nel corso della realizzazione delle opere in progetto, in termini di propagazione dell'onda di piena liquida nel tratto terminale della Fiumara Grande.

L'analisi è rivolta, oltre che al lotto di nuova edificazione, costituito dal margine rivierasco occidentale ubicato a Nord della foce del Tevere, alla regione limitrofa coinvolta nei processi di formazione e propagazione delle onde di piena del fiume Tevere stesso.

L'inquadramento complessivo è rappresentato nella seguente figura 3-1.

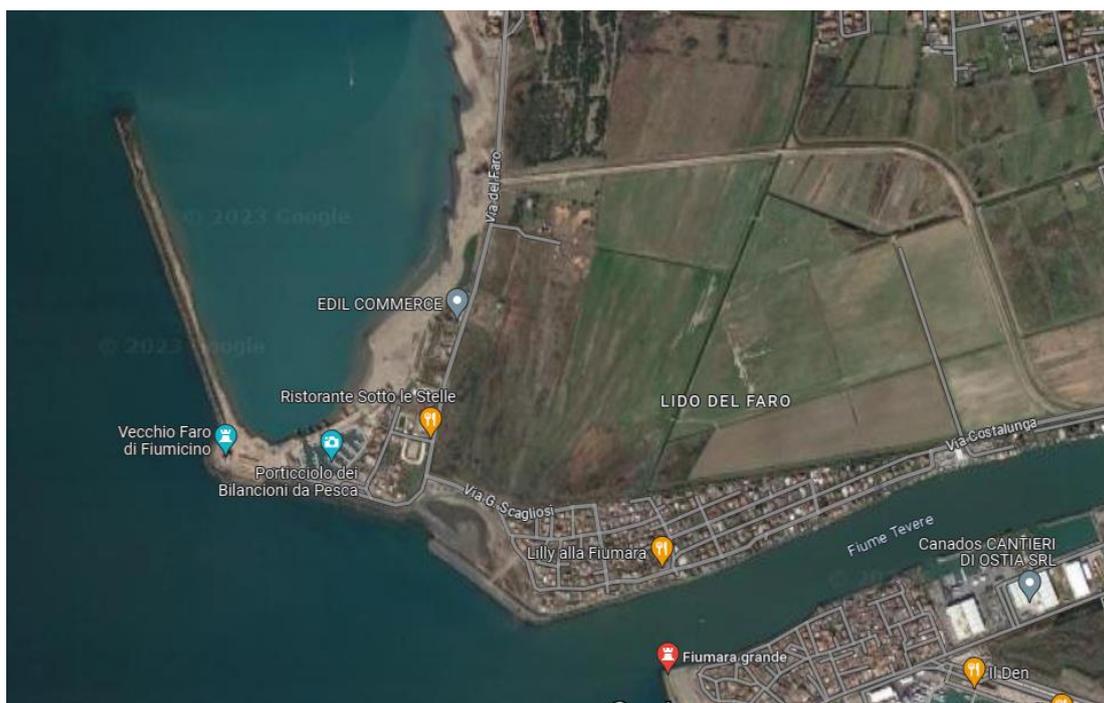


Figura 3-1 Inquadramento area di progetto – tratto terminale della Fiumara Grande

L'area oggetto d'intervento si sviluppa in destra idraulica del tratto in foce del fiume Tevere, nella regione compresa tra via del Faro (comune di Fiumicino) e la linea di costa, in prossimità del borgo di Fiumara Grande. La porzione di territorio, a ridosso della via litoranea, si presenta sotto forma di terreno incolto ed è confinante a Nord-Est con l'area di espansione del Fiume Tevere. La regione in esame è delimitata a Nord-Est dall'argine di recente realizzazione realizzato per consentire la protezione idraulica del quartiere di Isola Sacra dai fenomeni di esondazione del fiume; tale argine ha modificato in modo consistente le dinamiche di espansione del Tevere.

L'argine in oggetto, realizzato dall'ex Ardis, è stato implementato nella modellazione del presente studio, in quanto già portato a termine; tanto per tenere conto anche della richiesta pervenuta con nota dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale – protocollo 1447 - registrata alla Regione Lazio il 27/2/2019.

Dal punto di vista delle elevazioni, il piano di campagna è generalmente caratterizzato da quote altimetriche comprese tra 0 e 1.0 m slm, con valori di minimo collocati in prossimità dei canali di bonifica. La viabilità esistente (Via del Faro), parallela alla costa con direzione prevalente Nord-Est, presenta un assetto in rilevato, con livello compreso tra +0.50 - 1.8m slm. L'infrastruttura si colloca in media a 50-100 cm di elevazione superiore a quella del piano campagna che caratterizza l'area di espansione del Tevere, delimitata sui lati settentrionale e orientale dall'argine di nuova realizzazione (figura successiva).

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

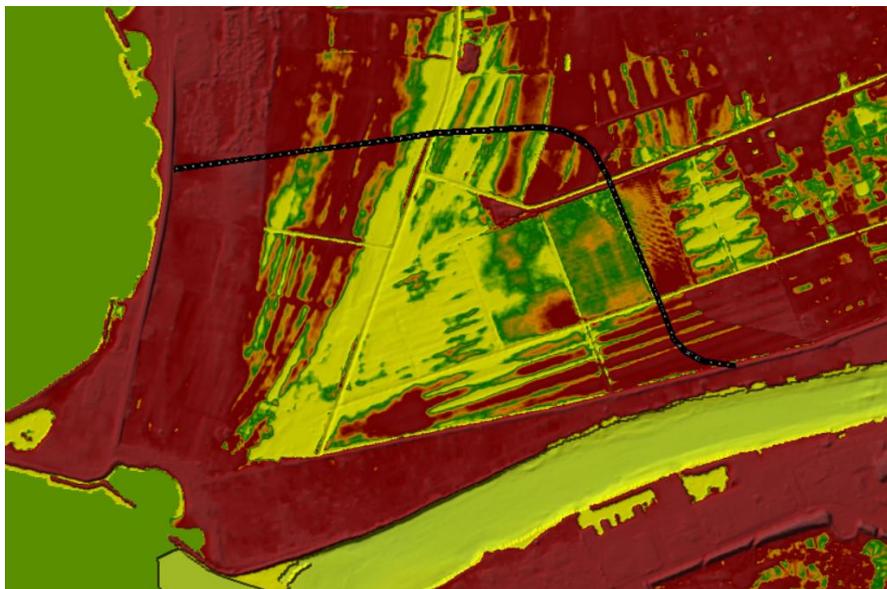


Figura 3-2 Altimetria del sito oggetto dell'intervento. In nero: argine di nuova realizzazione.

L'argine di nuova realizzazione, da parte della Regione Lazio, caratterizzato da un'altezza media compresa tra 250 e 300 cm (quota assoluta), presenta un ingombro in coronamento pari a 3 metri, e un ingombro alla base pari a circa 22 m. Come è possibile osservare dalle immagini che seguono, lungo l'argine, sul lato settentrionale del suo perimetro, è presente un tombino idraulico scatolare a sezione quadrangolare di 200x200 cm che permette la continuità idraulica del canale di bonifica a sezione trapezoidale di dimensioni 500x150cm. Il canale rappresenta la continuità degli scoli trasversali ad esso afferenti, in esito verso Nord (non quindi verso la Fiumara Grande).



Figura 3-3 Tombino idraulico – a destra: vista satellitare; a sinistra: vista in prospettiva.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Collocato centralmente all'area in esame, il presidio attraversa l'abitato di Isola Sacra (direzione Nord-Est) e defluisce all'interno dell'impianto di sollevamento collocato in prossimità del Canale di Fiumicino.

Dal sopralluogo realizzato è stato possibile osservare la pressoché totale assenza di deflusso, condizione questa attribuibile alle ridotte pendenze longitudinali del presidio. In caso di evento di piena e attivazione dell'area di laminazione, dunque, appare plausibile che lo svuotamento controllato della regione possa realizzarsi attraverso il tombino/canale per gradiente idraulico generato dai differenti livelli raggiunti a Sud-Ovest e Nord-Est del rilevato arginale.

In sede di verifiche di compatibilità degli interventi di progetto, dunque, si è deciso cautelativamente di non tener conto della presenza del tombino scatolare, ipotizzando che le modeste portate convogliabili dal manufatto possano ritenersi trascurabili in presenza di un evento critico di periodicità statistica media elevata; in tal senso, l'ipotesi risulta appunto cautelativa rispetto alla possibilità che una seppur modestissima quota dei volumi immagazzinati nell'area possa defluire nel canale stesso.

### 3.2 DESCRIZIONE DELLO STATO POST OPERAM (MODELLO)

Il Progetto della nuova infrastruttura portuale comporta la modifica della porzione di territorio compresa tra la via litoranea e la costa secondo le modalità che seguono:

Via del Faro – la viabilità di progetto mantiene il tracciato planimetrico e viene modificata nell'assetto altimetrico. Il livello medio del profilo in asse alla strada viene innalzato su valori medi compresi tra 2 m e 4 m s.l.m. Contestualmente la viabilità è soggetta a locali allargamenti della sezione (rotatorie).

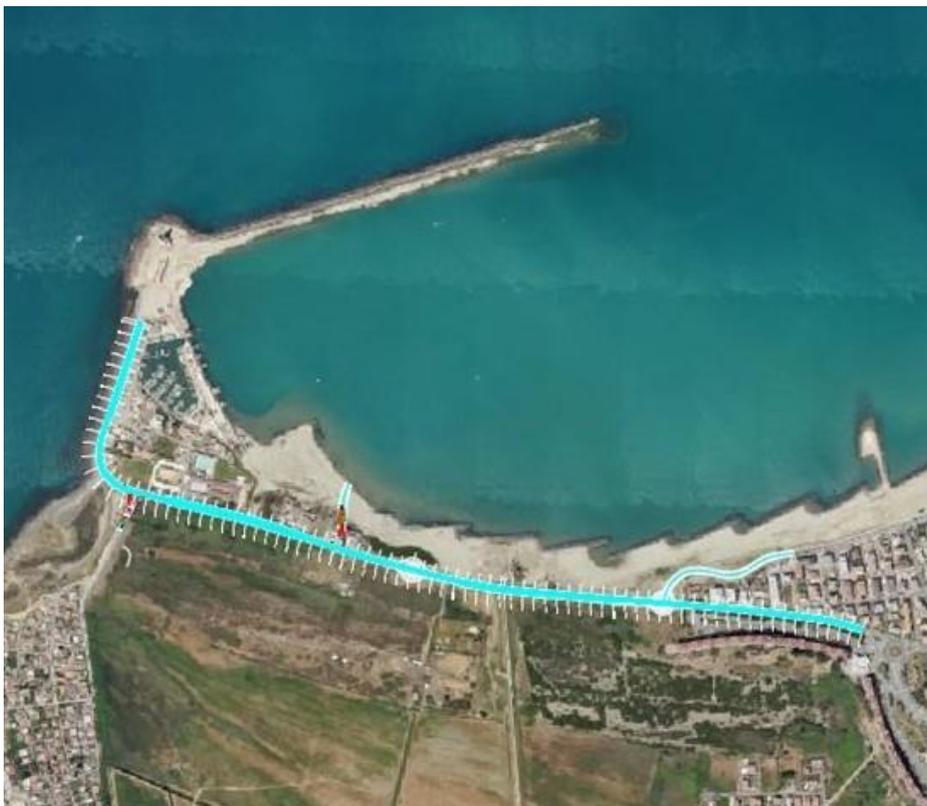


Figura 3-4 Viabilità di progetto – vista planimetrica

## **STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

---

Nell'area portuale vengono realizzati gli edifici, le infrastrutture di collegamento previsti dalla sezione progettuale. Dal punto di vista complessivo, l'area delimitata a sud e ad est dalla via del Faro viene posta a quote superiori a quelle attuali; gli esiti delle verifiche idrauliche dovranno quindi riguardare se la parziale sottrazione dei volumi soggetti alla nuova infrastrutturazione rispetto alla disponibilità di esondazione delle piene del Tevere possa avere una qualche influenza sui tiranti nelle zone limitrofe.

Per tale ragione si è provveduto a realizzare un modello idraulico che tenesse conto:

- della dinamica di trasferimento in alveo della piena del Tevere, comprendendo anche gli effetti di laminazione che si verificano su un lungo tratto della porzione extra-urbana del fiume, a partire dal ponte Guglielmo Marconi a Roma;
- della dinamica di invaso e svaso dell'area limitrofa alla foce del Tevere – sul lato settentrionale che, con la realizzazione del nuovo argine da parte di ex Ardis, si viene a configurare come un importante volume di laminazione in fregio alla porzione terminale del corso d'acqua
- dei deflussi occorrenti sul canale di Fiumicino, che concorrono alla determinazione dei livelli sul tratto finale del fiume compreso tra la diramazione in corrispondenza del lago Traiano e la foce stessa, e della relativa ripartizione delle portate tra i due rami del fiume.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### 3.3 MODELLAZIONE IDRAULICA

Il presente capitolo ha come obiettivo la descrizione delle modalità adottate per la realizzazione delle simulazioni idrauliche della regione oggetto di studio. Esse sono strumentali alla implementazione delle equazioni di trasporto solido per la valutazione dei quantitativi di trasporto di sedimenti in funzione delle caratteristiche idrodinamiche della portata fluente in alveo.

Come già anticipato all'interno della Premessa al presente documento, le simulazioni idrauliche sono state sviluppate mediante Software Open Source Hec-Ras 2D 6.2, annoverato dalla FEMA (Federal Emergency Management Association) degli Stati Uniti d'America tra gli strumenti referenziati per supportare un'indagine modellistica 1-2D.

I capitoli che seguono riportano una breve trattazione teorica relativa alle simulazioni idrodinamiche e di trasporto solido e illustrano i risultati ottenuti.

### 3.4 CARATTERISTICHE DEL MODELLO NUMERICO

#### 3.4.1 MODELLO NUMERICO IDRODINAMICO

Il modello idraulico implementato è il software HEC-RAS 6.02 sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center (HEC), divisione dell'Institute of Water Resources (IWR) dello US Army Corps of Engineers. HEC-RAS consente il calcolo sia monodimensionale sia bidimensionale, ovvero una loro combinazione, del profilo idraulico per corsi d'acqua naturali o artificiali, in condizioni di moto permanente o di moto vario.

Nel dominio di calcolo 1D il modello integra le equazioni di De Saint Venant 1D per le correnti a pelo libero (sistema alle derivate parziali di tipo iperbolico a due incognite, che dipendono dalla progressiva spaziale  $x$  e dal tempo), ricavate dalle equazioni di conservazione della massa (equazione di continuità) e di bilancio della quantità di moto, sotto opportune ipotesi (fluido incomprimibile, correnti lineari o gradualmente variate - ossia con traiettorie delle particelle fluide rettilinee e parallele, dove le componenti del vettore velocità sono nulle nel piano normale alla direzione della corrente, e distribuzione idrostatica della pressione sulla sezione trasversale – e pendenza di fondo limitata):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial H}{\partial x} + S_f \right) \end{array} \right.$$

dove (per la generica sezione fluviale, identificata nello spazio dall'ascissa curvilinea  $x$ , e per il generico istante di tempo  $t$ ):

$Q$  è la portata;

$v$  è la velocità media della corrente;

$A$  è l'area bagnata della sezione trasversale;

$H$  è la quota sul livello del mare del pelo libero ( $H=h+z_0$ , con  $h$  tirante idrico e  $z_0$  quota del fondo sul livello medio del mare);

$S_f$  è la cadente, ovvero la perdita di energia per unità di peso della corrente e per unità di lunghezza del corso d'acqua;

$q_l$  è l'eventuale termine sorgente (portata per unità di lunghezza dovuta agli apporti laterali);

$g$  è l'accelerazione di gravità.

Il sistema di equazioni alle derivate parziali non lineare del primo ordine, generalmente non integrabile in forma analitica, viene approssimato alle differenze finite e risolto numericamente dal codice di calcolo attraverso la tecnica iterativa Newton-Raphson.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Il codice HEC-RAS suddivide l'area interessata al moto in tre zone principali perpetuando la convenzione introdotta con HEC-2: zona golenale sinistra (left overbank, lob), alveo ordinario (channel, ch), zona golenale di destra (right overbank, rob). Per tener conto dell'andamento curvilineo dell'asse, la distanza di calcolo tra due sezioni viene ponderata rispetto alla frazione di portata che fluisce rispettivamente in golena sinistra (lob), nel canale ordinario (ch) e nella golena destra (rob). La lunghezza mediata del tratto L è calcolata quindi nel seguente modo:

$$L = \frac{L_{lob} \cdot \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \cdot \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \cdot \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

con

$L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$  lunghezze del tratto relative rispettivamente all'area golenale sinistra (lob), al canale principale (ch) e all'area golenale destra (rob);

$\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$ ,  $\bar{Q}_{rob}$  portate medie attraverso la sezione rispettivamente in golena sinistra, canale principale e golena destra.

La determinazione della conveyance della sezione e del coefficiente  $\alpha$  di ragguglio delle altezze cinetiche richiede di norma una maggior suddivisione del flusso in porzioni di sezione all'interno delle quali la velocità possa ritenersi uniformemente distribuita. Nelle zone golenali, l'approccio usato da HEC-RAS (o meglio l'approccio di default, ma il programma ne contempla anche altri di carattere opzionale) consiste nell'assumere come base della suddivisione linee verticali, in corrispondenza dei punti di discontinuità nel valore della scabrezza n.

La valutazione della conveyance per ogni elemento viene quindi effettuata con la formula di Manning scritta per unità di misura del sistema internazionale:

$$Q = K \cdot S_f^{1/2}, \quad K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3}$$

con i parametri:

K = conveyance (m<sup>3</sup>/s)

n = coefficiente di scabrezza di Manning (m<sup>-1/3</sup>s)

A = area di flusso (m<sup>2</sup>)

R = raggio idraulico (m)

tutti riferiti alla singola porzione di flusso. Le conveyance parziali di ogni area golenale vengono quindi sommate per ottenere infine i due valori di conveyance relativi rispettivamente alla golena destra e sinistra. Di norma, il canale principale è invece trattato come un unico elemento dotato di un solo valore di conveyance. Il valore finale unico di K per l'intera sezione è ottenuto come somma dei tre contributi parziali (lob, ch, rob).

Per ciò che concerne invece il coefficiente di ragguglio  $\alpha$ , ad ogni sezione resterà associata una sola superficie libera e di conseguenza una sola altezza cinetica. Pertanto, per un dato valore del tirante idrico nella sezione, l'altezza cinetica viene calcolata come un valor medio pesato alla portata fra quelli associati alle tre sottosezioni: golena sinistra, canale, golena destra.

In pratica l'altezza cinetica è calcolata mediante la seguente relazione generale:

$$\alpha \cdot \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot \left( \frac{V_i^2}{2g} \right)}{Q_{tot}}$$

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

da cui  $\alpha$  risulta:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot V_i^2}{Q \cdot V^2}$$

Il programma considera, riguardo alle perdite di carico concentrate, una contrazione ogni volta che l'altezza cinetica della sezione di monte risulta maggiore di quella della sezione più a valle, viceversa per l'espansione.

La modalità attraverso cui il programma calcola per ogni sezione il valore incognito dell'altezza della superficie libera, a partire da dati geometrici e di portata assegnati in input, è costituita da una soluzione iterativa delle equazioni dell'energia e delle perdite di carico. La procedura di calcolo consiste, più in dettaglio, nei seguenti passi:

scelta di un valore di primo tentativo per la quota della superficie libera (WS1, water surface) in corrispondenza della sezione di monte, per correnti lente, o di valle, per correnti veloci;

calcolo, a partire dal valore assunto al passo 1, dei corrispondenti valori di conveyance totale e di altezza cinetica;

stima di  $\bar{S}_f$  e soluzione dell'equazione delle perdite di carico per il calcolo delle perdite di carico totali  $h_e$ ;

soluzione, a partire dai valori ottenuti al passo 2 e 3, dell'equazione dell'energia per il calcolo della superficie libera WS2;

confronto fra il valore di WS2 calcolato ed il valore assunto al passo 1 e reiterazione dei passi 1-5 fino al raggiungimento della convergenza, definita per default da una differenza fra i due valori inferiore a 0,003 m (o qualsiasi altra tolleranza definibile dall'utente).

La scelta del valore dell'altezza della superficie libera di partenza viene effettuata con metodi che variano fra la prima e le successive iterazioni: per il primo tentativo si adotta un valore ottenuto dalla proiezione dell'altezza calcolata alla sezione precedente; alla seconda iterazione il valore di primo tentativo viene incrementato del 70% dell'errore (WS<sub>calcolata</sub> - WS<sub>assunta</sub>) relativo al primo step; infine il terzo tentativo e seguenti sono basati sul metodo "secante", che proietta il valore della differenza fra quota calcolata e quota assunta ai due tentativi precedenti, secondo la relazione:

$$WS_i = WS_{i-2} - Err_{i-2} \cdot \frac{Err_{ass}}{Err_{dif}}$$

con

WS<sub>i</sub> = valore di WS assunto al passo i-esimo

WS<sub>i-1</sub> = valore di WS assunto nella (i-1)-esima iterazione

WS<sub>i-2</sub> = valore di WS assunto nella (i-2)-esima iterazione

Err<sub>i-2</sub> = errore relativo alle due iterazioni precedenti (WS<sub>calcolato, i-2</sub> - WS<sub>i-2</sub>);

Err<sub>ass</sub> = WS<sub>i-2</sub> - WS<sub>i-1</sub>;

Err<sub>dif</sub> = WS<sub>i-1</sub> - WS<sub>calcolato, i-1</sub> + Err<sub>i-2</sub>

La variazione di WS fra un tentativo e il successivo è vincolata ad un massimo di  $\square 50\%$  del valore assunto allo step precedente. Il numero massimo delle iterazioni risulta comunque limitato (per default pari a 20) e nel corso di esse il programma tiene traccia del valore di WS che produce il minimo errore fra valore assunto e valore calcolato, indicato come "superficie libera di minimo errore". Qualora il massimo delle iterazioni venga eguagliato prima del raggiunto bilanciamento, il programma calcola l'altezza critica e verifica se l'errore associato alla superficie libera di minimo errore è inferiore ad una prefissata tolleranza. Se questo accade e se tale superficie è ben posta rispetto all'altezza critica calcolata (ovvero è maggiore dell'altezza critica per corrente lenta e minore per corrente veloce), allora il programma assume proprio tale valore come risposta finale del processo iterativo, altrimenti adotta l'altezza critica, producendo in entrambi i casi una nota informativa. L'incapacità di bilanciare l'equazione dell'energia entro il dato numero di iterazioni è generalmente da imputarsi ad un inadeguato numero di sezioni. L'altezza critica viene assunta anche ogniqualvolta la superficie libera calcolata risulta "mal posta" rispetto ad essa, ovvero quando risulta

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

al di sotto dell'altezza critica per correnti lente e al di sopra per correnti veloci. HEC-RAS calcola l'altezza critica mediante un processo iterativo in cui viene assunto un valore di WS cui corrisponde il valore minimo del carico totale H.

I metodi impiegati per sviluppare tale processo sono due: il metodo "parabolico" ed il metodo "secante". Il primo risulta più veloce a livello computazionale, ma in grado di localizzare un solo punto di minimo. Dal momento che per la maggior parte delle sezioni esiste un solo minimo del carico totale, il metodo parabolico rappresenta il metodo di default di HEC-RAS, riservandosi il programma la facoltà di passare al metodo secante qualora il primo non converga.

Il passaggio attraverso l'altezza critica rende tuttavia inapplicabile l'equazione dell'energia, la quale si basa sull'ipotesi di condizioni di flusso gradualmente variato.

Tutti i fenomeni che producono una transizione corrente lenta - corrente veloce e viceversa, quali variazioni di pendenza, costrizioni associate alla presenza di un ponte, confluenze, ecc., sono quindi affrontati da HEC-RAS col ricorso all'equazione dei momenti.

Nel dominio di calcolo 2D (non previsto nella presente trattazione) il programma utilizza le equazioni di Shallow Water (o equazioni di De Saint Venant 2D), semplificazioni delle equazioni di Navier-Stokes mediate (su un periodo di tempo sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni che si vogliono seguire e sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza); oltre all'ipotesi di fluido incomprimibile, si assume che la scala verticale delle lunghezze sia molto più piccola della scala orizzontale e quindi che la componente verticale della velocità risulti trascurabile e che la pressione sia distribuita in maniera idrostatica. Assumendo infine trascurabili i termini inerziali nell'equazione di bilancio della quantità di moto si semplifica ulteriormente l'equazione di bilancio della quantità di moto ottenendo l'equazione di diffusione dell'onda:

$$\frac{n^2|V|V}{(R(H))^{4/3}} = -\nabla H$$

da cui si ricava:

$$V = -\frac{(R(H))^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}}$$

dove V è il vettore velocità, n è il coefficiente di Manning, R(H) è il raggio idraulico della sezione e  $\nabla H$  è il gradiente della quota della superficie idrica sul livello del mare.

Combinando quest'ultima con l'equazione di continuità, in forma vettoriale:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q_l = 0$$

si ottiene il modello Diffusive Wave Approximation of the Shallow Water equations (DSW) utilizzato da Hec-Ras nel calcolare il moto all'interno del dominio bidimensionale nel modello, rappresentato dall'equazione:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q_l = 0$$

$$\beta = \frac{(R(H))^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}}$$

La soluzione ai volumi finiti adottata da Hec-Ras sfrutta infine le informazioni idrauliche fornite dal modello digitale del terreno (DTM) utilizzato, che definisce area bagnata, volume e raggio idraulico del livello H in un generico istante temporale.

La portata in uscita dal dominio 1D è regolata dall'equazione dello stramazzo, implementata lungo gli sfioratori laterali disposti tra le sezioni per le quali i tiranti idraulici eccedono l'altezza degli argini golenali:

$$Q = C_d L H^{3/2}$$

In cui L è la lunghezza di sfioro, H è la differenza di altezza tra la superficie libera della corrente e la quota di sfioro; il coefficiente di sfioro,  $C_d$ , è definito in base al dislivello tra il ciglio spondale dell'alveo e il terreno adiacente, in base alle indicazioni fornite dalla tabella:

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

| What is being modeled with the Lateral Structure                       | Description   | Range of Weir Coefficients                                |
|--|---|---|
| Levee/Roadway – 3ft or higher above natural ground                     | Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow                                | <b>1.5 to 2.6</b> (2.0 default)<br>SI Units: 0.83 to 1.43 |
| Levee/Roadway – 1 to 3 ft elevated above ground                        | Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow, but becomes submerged easily. | <b>1.0 to 2.0</b><br>SI Units: 0.55 to 1.1                |
| Natural high ground barrier – 1 to 3 ft high                           | Does not really act like a weir, but water must flow over high ground to get into 2D flow area.   | <b>0.5 to 1.0</b><br>SI Units: 0.28 to 0.55               |
| Non elevated overbank terrain. Lat Structure not elevated above ground | Overland flow escaping the main river.  | <b>0.2 to 0.5</b><br>SI Units: 0.11 to 0.28               |

### 3.4.2 MODELLO NUMERICO TRASPORTO SOLIDO

L'implementazione di simulazioni di trasporto solido in HecRas prevede l'accoppiamento di un modello idrodinamico, necessario alla ricostruzione delle condizioni di deflusso (tirante e velocità), con un modello che permetta di identificare:

1. La distribuzione granulometrica relativa al dominio di calcolo;
2. Le condizioni di trasporto solido iniziali e al contorno;
3. Le equazioni che meglio descrivono il fenomeno la capacità di trasporto solido.

I paragrafi che seguono forniscono una breve panoramica sulle tematiche di cui ai precedenti punti.

#### 3.4.2.1 DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA

La distribuzione granulometrica relativa al dominio di studio è ottenuta individuando la frazione percentuale della componente inerte, per assegnato diametro, soggetta all'azione della corrente. Il programma permette l'assegnazione più curve granulometriche, anche in ragione della stratigrafia, e delle superfici eventualmente non soggette a erosione (bed-rock).

La rappresentazione della componente solida può essere ottenuta come:

1. %Finer – curva granulometrica cumulativa;
2. Grain Class Fraction/Weight – rappresentazione della frazione percentuale di ciascuna componente.

Il programma permette inoltre di associare al dominio una stratigrafia a "gruppo" che individua distribuzioni granulometriche differenti in ragione della profondità.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

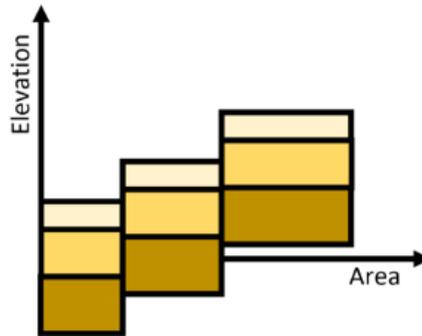


Figura 3-5 – grading del terreno in funzione dell'area drenata e dell'elevazione

3.4.2.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

In HecRas è possibile definire 5 tipologie distinte di condizioni al contorno per il trasporto solido:

1. Rating Curve – l'approccio permette di associare la portata liquida che caratterizza il corso d'acqua in esame alla portata solida in arrivo a monte del dominio. Nel caso in esame, oltre alla definizione dei valori di flusso liquido e solido, risulta necessario stabilire la distribuzione granulometrica dell'inerte. Tale opzione è solitamente adottata in presenza di misurazioni che permettano di ricostruire il dato di portata solida in ragione all'andamento della componente liquida.

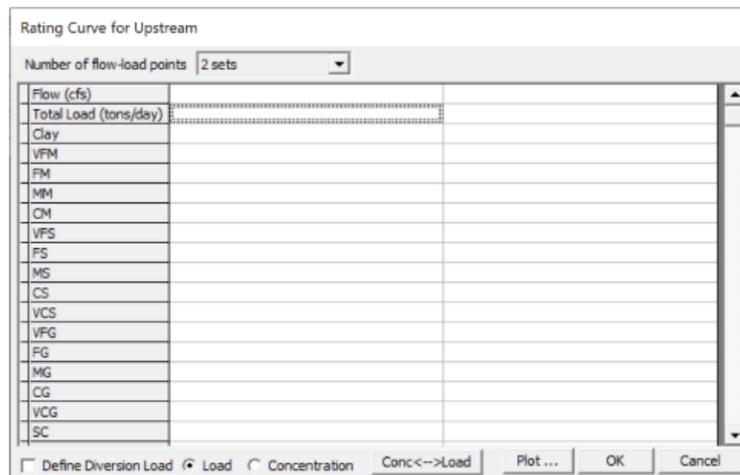


Figure 2. **Sediment Rating Curve** editor.

Figura 3-6 pannello del codice Hec Ras per l'assegnazione della rating curve sedimentologica nella sezione di monte del tratto modellato

2. Sediment Load Series – l'approccio permette di associare l'andamento nel tempo dei valori di portata solida rispetto alla frazione granulometrica. Così come nel caso precedente, l'adozione di questa opzione è solitamente correlata alla presenza di misurazioni.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

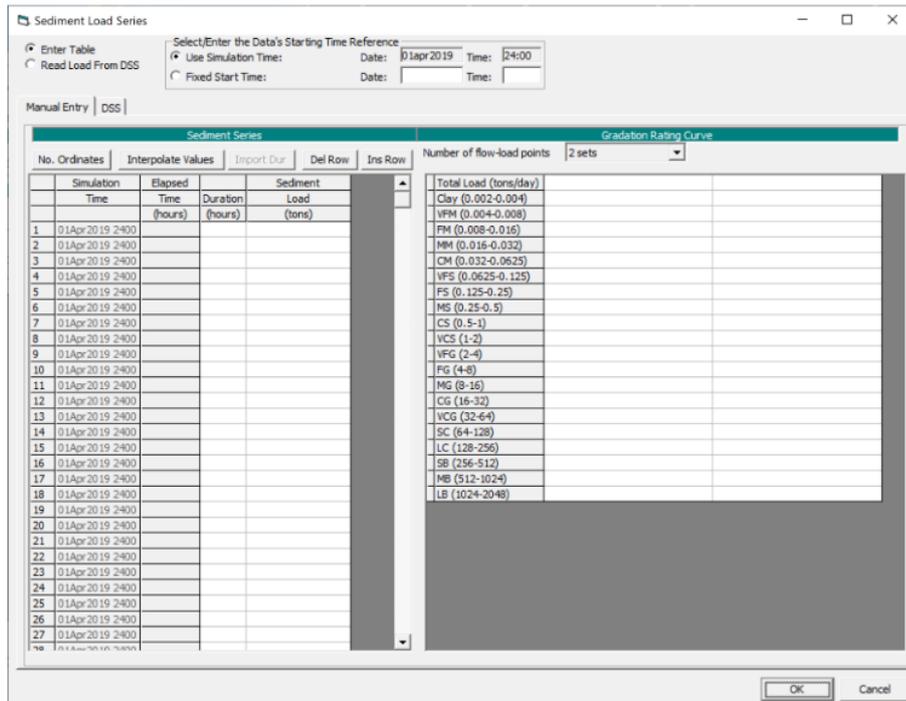


Figura 3-7 – Pannello del codice Hec Ras con la tabella di assegnazione delle portate solide (caso di sedimentogramma storico)

3. Equilibrium load – l’approccio permette di associare a monte il valore di portata solida che garantisce le condizioni di equilibrio della sezione/celle di calcolo. Alle condizioni indicate, pertanto, si assume che il deflusso attraverso il contorno del dominio di calcolo sia a gradiente di concentrazione nulla. Tale opzione è solitamente adottata in assenza di misurazioni o ove si possa immaginare che il fenomeno di trasporto solido avvenga in assenza di modifiche locali delle porzioni al contorno (erosione compensata completamente dalla deposizione di inerte);
4. Clear water – l’approccio ipotizza che a monte non ci sia alcuna componente di portata solida;
5. Capacity ratio – l’approccio rappresenta una generalizzazione della condizioni di equilibrio di trasporto solido. Di fatto, la condizione al contorno permette di parzializzare la componente solida che garantisce l’equilibrio.

**3.4.2.3 EQUAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO**

L’equazione del trasporto solido in Hec Ras è rappresentata dalla relazione:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \nabla(hUC) = \nabla(\epsilon h \nabla C) + E - D$$

Con h tirante idraulico, C concentrazione della componente solida, U velocità di deflusso, β fattore correttivo del trasporto solido e E, D frazione complessiva soggetta a erosione/deposizione. In fase di definizione della componente granulometrica che caratterizza il dominio di indagine, risulta necessario stabilire la funzione di trasporto solido potenziale che meglio si adatta al campione. Il programma permette di adottare le formulazioni che seguono:

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

1. Ackers and White;
2. England and Hansen;
3. Copeland's form of Laursen;
4. Meyer-Perter and Muller;
5. Taffaleti;
6. MPM-Taffaleti;
7. Yang;
8. Wilcock and Crowe;
9. Soulsby-Van Rijnn
10. Van Rijn;
11. Wu.

Nel caso di campioni uniformi con frazioni appartenenti alle sabbie-sabbie fini bene si adatta la proposta di Ackers and White, rappresentata dall'accoppiamento della seguenti 3 equazioni:

- 1) Equazione del flusso di sedimenti (sediment flux), definita in funzione del peso specifico dei sedimenti, del diametro medio delle particelle, del tirante idrico, della velocità di moto incipiente e dell'esponente di transizione, secondo la seguente formulazione:

$$X = \frac{G_{gr} s d}{D \left( \frac{u_*}{V} \right)^n}$$

Transport Parameter  
Sediment Flux

Where:  
 s = sediment specific gravity  
 d = median particle size  
 D = effective depth  
 u\_\* = Shear Velocity ( $\tau$ )<sup>0.5</sup>  
 V = Average Channel Velocity  
 n = transition exponent (based on sediment size)

- 2) Equazione del trasporto potenziale, fornito attraverso una legge di potenza di natura empirica in cui A, m e c vengono assegnati in funzione delle caratteristiche dei sedimenti

$$G_{gr} = C \left[ \frac{F_{gr} - A}{A} \right]^m$$

Sediment Mobility    Threshold Mobility  
Transport Potential

Empirical Power Coefficients

e.g. for  $d > 2mm$   
 A=0.17  
 m=1.78  
 C=0.25

- 3) Equazione che descrive la mobilità dei sedimenti, in funzione del diametro medio e del tirante effettivo:

$$F_{gr} = \frac{u_*^n V^{1-n}}{\sqrt{g(s-1)d} (\sqrt{32 \log(ad/D)})^{1-n}}$$

Sediment Mobility

Relativamente al diametro medio dei sedimenti, sulla base delle indicazioni fornite in letteratura sono state condotte simulazioni con diametro medio compreso tra 0,5 e 0,7 mm (valore medio di letteratura pari a 0,5 mm); i risultati ottenuti hanno mostrato che i quantitativi di trasporto solido complessivo dipendono solo molto debolmente da questo parametro, nell'ambito dei valori accettabili per la sua assegnazione.

### 3.5 MODELLO NUMERICO

#### Modello digitale del terreno

Come anticipato in fase di introduzione, la simulazione è realizzata in un dominio bidimensionale che riproduce le batimetrie della foce del fiume. Al fine di ridurre gli effetti di “bordo” legati all’applicazione dell’idrogramma di piena (monte), si è deciso di estendere il campo di studio a 10km dalla zona di interesse.



Figura 3-8 Dominio di calcolo

La ricostruzione del dominio bidimensionale è stata ottenuta per sovrapposizione di modelli digitali del terreno derivati da differenti fonti e caratterizzati da livello di risoluzione differente. Nel dettaglio:

1. rilievo Lidar restituito su una griglia a maglie di lato 100x100cm fornito dall'ex Ministero dell'Ambiente - Ministero dell'Ambiente e Sicurezza Energetica – nell'ambito del Piano Straordinario per il Telerilevamento (PST), ed esteso dalla foce del Fiume Tevere (Isola Sacra) alla città di Roma;
2. rilievo Lidar 200x200cm fornito dal Ministero dell'Ambiente e Sicurezza Energetica nell'ambito del medesimo Piano sopra descritto – copertura della fascia costiera; i due modelli digitali sono stati integrati in un dato senza soluzione di continuità;
3. rilievo di dettaglio dell'area di intervento, inclusa via del Faro e l'argine di recente realizzazione collocato in destra idraulica in zona borgo di Fiumara Grande.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### Dominio modello numerico – mesh di calcolo

La modellazione numerica è stata sviluppata in ragione del dato topografico riportato nel precedente paragrafo. In riferimento alla richiesta dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale (Prot. 0001447), le simulazioni includono l'argine di difesa dell'abitato di Isola Sacra (Ante-Post Operam) e la strada di nuova progettazione di Via del Faro (Post Operam). Il campo di simulazione bidimensionale è realizzato a mezzo di maglie regolari di dimensione 200x200cm.

### Modello numerico – scabrezza idraulica

Il coefficiente di scabrezza  $n$  di Manning rappresenta un parametro di taratura dei modelli e andrebbe definito, nel rispetto degli intervalli presenti in letteratura, attraverso analisi granulometriche e morfologiche dei corsi d'acqua. Per la presente progettazione si è ritenuto opportuno procedere in solo riferimento ai valori attribuibili alla superficie rispetto alla classe di uso del suolo.

| Code | Designation                                   | n     |
|------|---|-------|
| 111  | Continuous urban fabric                       | 0.230 |
| 112  | Discontinuous urban fabric                    | 0.115 |
| 121  | Industrial or commercial units                | 0.230 |
| 122  | Roads and rail networks and associated land   | 0.038 |
| 124  | Airports                                      | 0.230 |
| 131  | Mineral extraction sites                      | 0.104 |
| 132  | Dump sites                                    | 0.115 |
| 133  | Construction sites                            | 0.115 |
| 142  | Sport and leisure facilities                  | 0.023 |
| 211  | Non-irrigated arable land                     | 0.043 |
| 212  | Permanently irrigated land                    | 0.043 |
| 213  | Rice fields                                   | 0.023 |
| 221  | Vineyards                                     | 0.043 |
| 222  | Fruit trees and berry plantations             | 0.043 |
| 223  | Olive groves                                  | 0.043 |
| 231  | Pastures                                      | 0.298 |
| 241  | Annual crops associated w/permanent crops     | 0.043 |
| 242  | Complex cultivation patterns                  | 0.023 |
| 243  | Agriculture, w/significant natural vegetation | 0.058 |
| 244  | Agro-forestry areas                           | 0.058 |
| 311  | Broad-leaved forest                           | 0.230 |
| 312  | Coniferous forest                             | 0.127 |
| 313  | Mixed forest                                  | 0.230 |
| 321  | Natural grasslands                            | 0.039 |
| 322  | Moors and heathland                           | 0.058 |
| 323  | Sclerophyllous vegetation                     | 0.058 |
| 324  | Transitional woodland-shrub                   | 0.058 |
| 331  | Beaches, dunes, sands                         | 0.138 |
| 332  | Bare rocks                                    | 0.104 |
| 333  | Sparsely vegetated areas                      | 0.104 |
| 334  | Burnt areas                                   | 0.104 |
| 411  | Inland marshes                                | 0.115 |
| 511  | Water courses                                 | 0.035 |
| 512  | Water bodies                                  | 0.035 |

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00



Figura 3-9 Mappatura delle classi di uso del suolo

### Modello numerico – definizione della curva granulometrica

In ottemperanza alle indicazioni relative alla distribuzione granulometrica del trasporto solido associato al fiume Tevere, le simulazioni sono state realizzate ipotizzando la presenza di sole sabbie fini e limi (95% e 5% rispettivamente). Per le analisi, inoltre, si è operato in riferimento alla funzione di trasporto solido massimo potenziale di Ackers-White.

### Modello numerico – condizioni al contorno

Per le simulazioni in esame sono state adottate le condizioni al contorno che seguono:

1. Condizione idrodinamica di monte – a monte del dominio di calcolo stati applicati 6 idrogrammi costanti relativi alle portate di 100 m<sup>3</sup>/s, 200 m<sup>3</sup>/s, 300 m<sup>3</sup>/s, 400 m<sup>3</sup>/s, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.
2. Al fine di ottenere il raggiungimento di condizioni stazionarie, la simulazione è stata condotta per un intervallo temporale non inferiore a 30 ore;
3. Condizione idrodinamica di valle – a valle del dominio di calcolo si è ipotizzato un livello idraulico costante pari a 0.00 m sm in condizione di completa assenza di fenomeni di oscillazione attribuibili alle maree, storm surge, wave set-up.  
Tale approccio, difatti, è considerato cautelativo rispetto al flusso solido che viene convogliato in mare, andando a definire quindi condizioni di *trasporto solido massimo potenziale*;
4. Condizione di trasporto solido di monte – in considerazione dello stato di generale equilibrio morfologico che caratterizza la foce del fiume Tevere in presenza delle portate critiche modellate, a monte del dominio di calcolo si sono ipotizzate condizioni di equilibrio morfologico.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

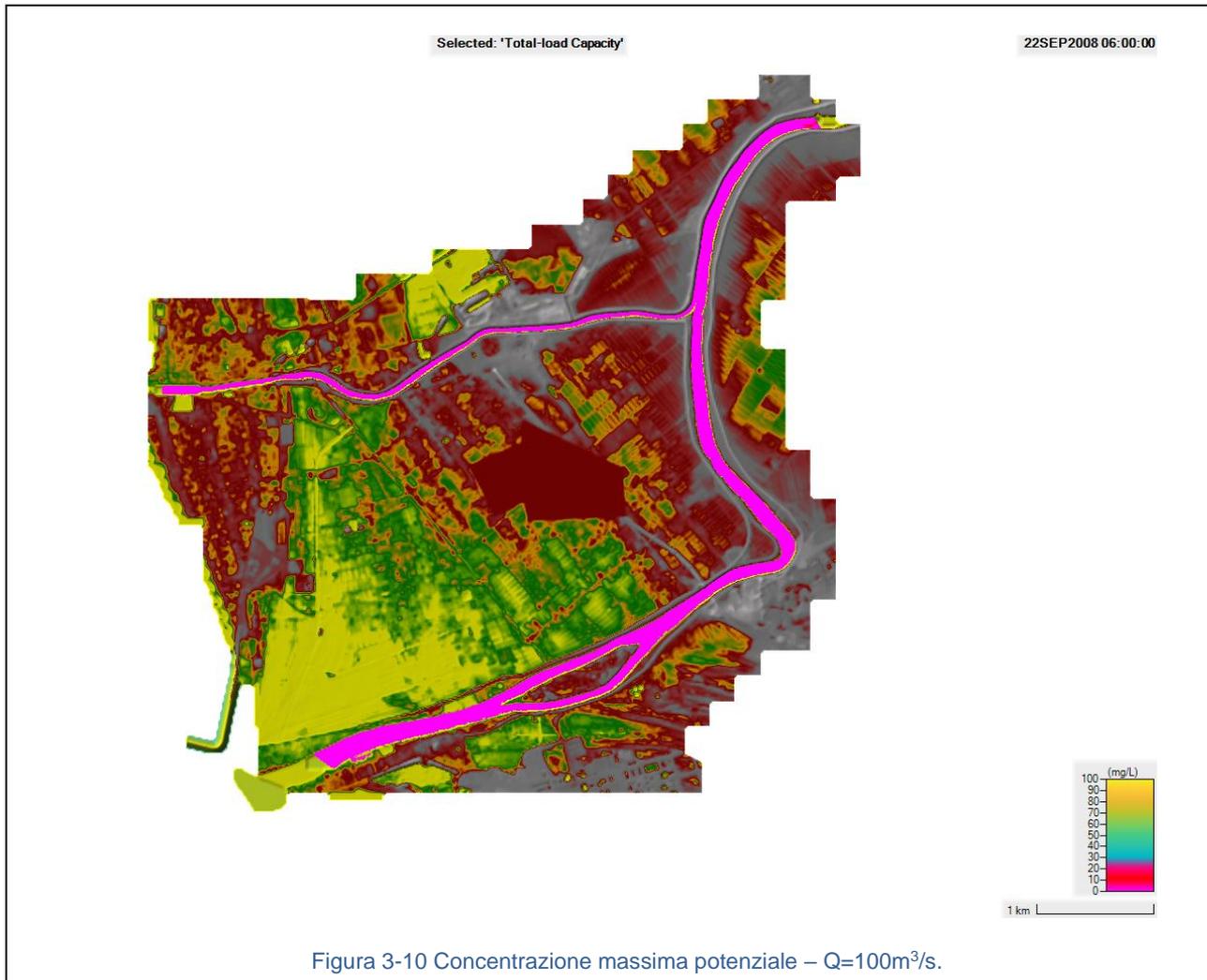
**3.6 RISULTATI (CONCENTRAZIONE DEI SEDIMENTI)**

Vengono presentati in questo paragrafo i risultati ottenuti mediante le simulazioni idrauliche condotte attraverso le simulazioni Hec Ras in moto vario; i risultati vengono presentati in forma di distribuzione spaziale della concentrazione dei sedimenti, sui due rami deltizi del Tevere, una volta che la simulazione ha superato la fase di transitorio e la portata fluente si è attestata sul valore desiderato (non si hanno quindi più variazioni legate al transitorio neanche sulla parte di trasporto solido).

Come già riportato, tutte le modellazioni sono state realizzate nell'ipotesi di un evento con portata massima predefinita, pari a 100 m<sup>3</sup>/s, 200 m<sup>3</sup>/s, 300 m<sup>3</sup>/s, 400 m<sup>3</sup>/s, 800 m<sup>3</sup>/s e 1600 m<sup>3</sup>/s, prescelte al fine di assegnare le massime portate solide esitabili per le diverse condizioni di deflusso nei due rami di foce.

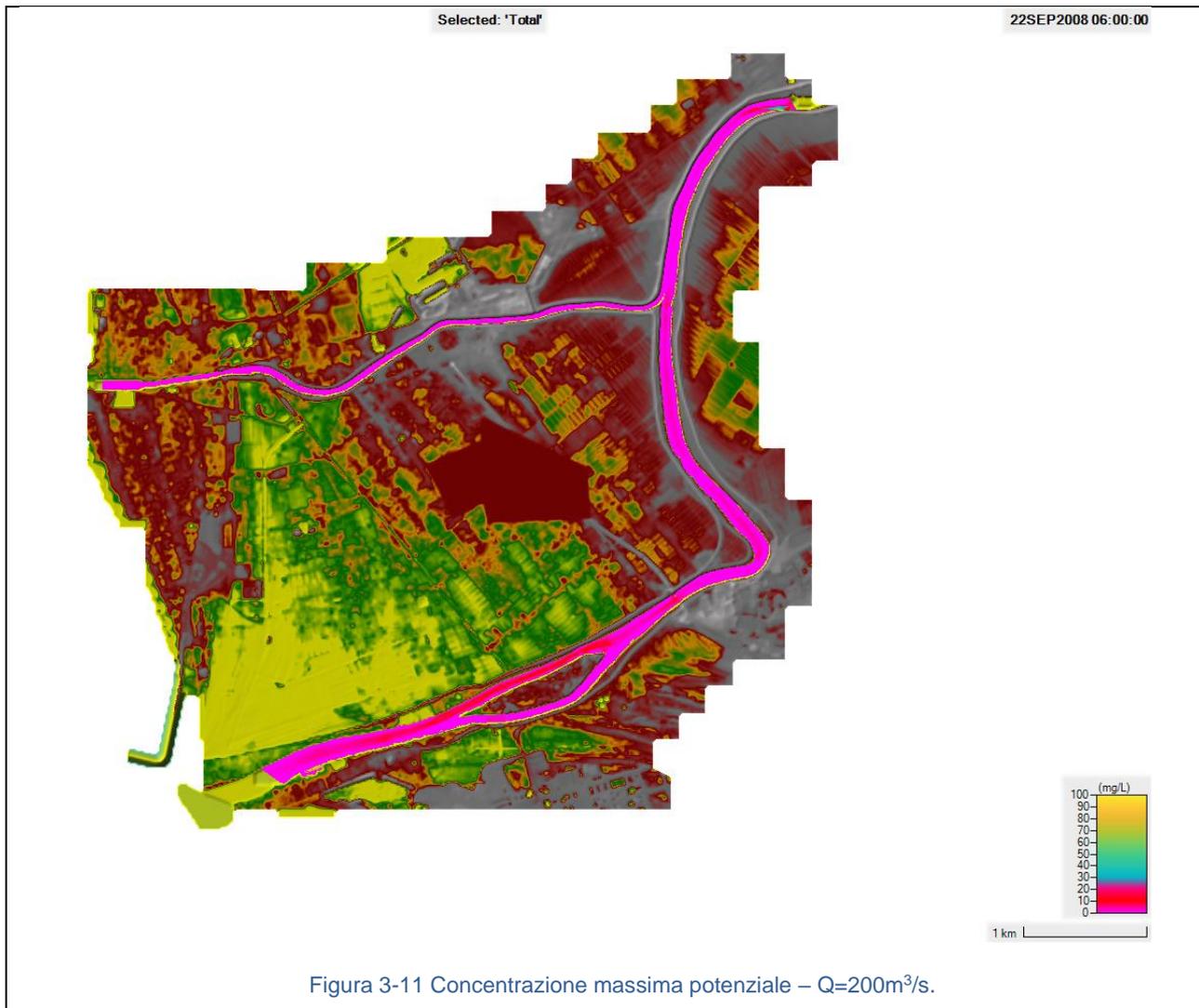
I risultati sono illustrati in forma di distribuzione spaziale della concentrazione *c*, e successivamente in forma di variabili idrodinamiche e sedimentologiche sul transetto terminale (Fiumara Grande) e sul canale di Fiumicino; su quest'ultimo portate e concentrazioni sono non nulle solo per le portate più importanti (superiori a 400 m<sup>3</sup>/s).

Le concentrazioni presentate sono espresse in mg/l; i quantitativi di trasporto solido vengono quindi ottenuti per integrazione spaziale sul transetto delle variabili idrodinamiche (velocità e tirante lungo la sezione) con la concentrazione puntuale, come chiarito nel paragrafo successivo.



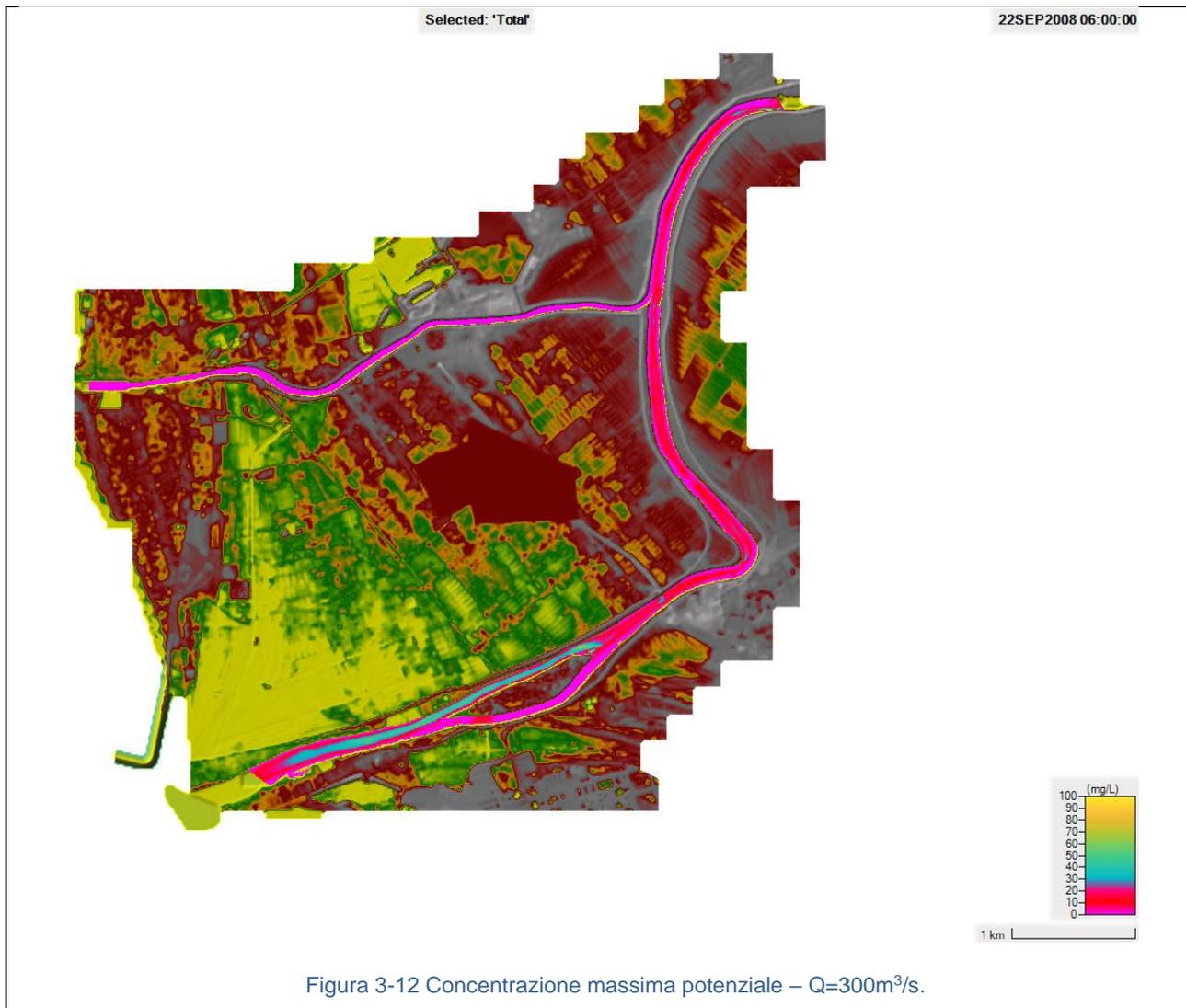
## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00



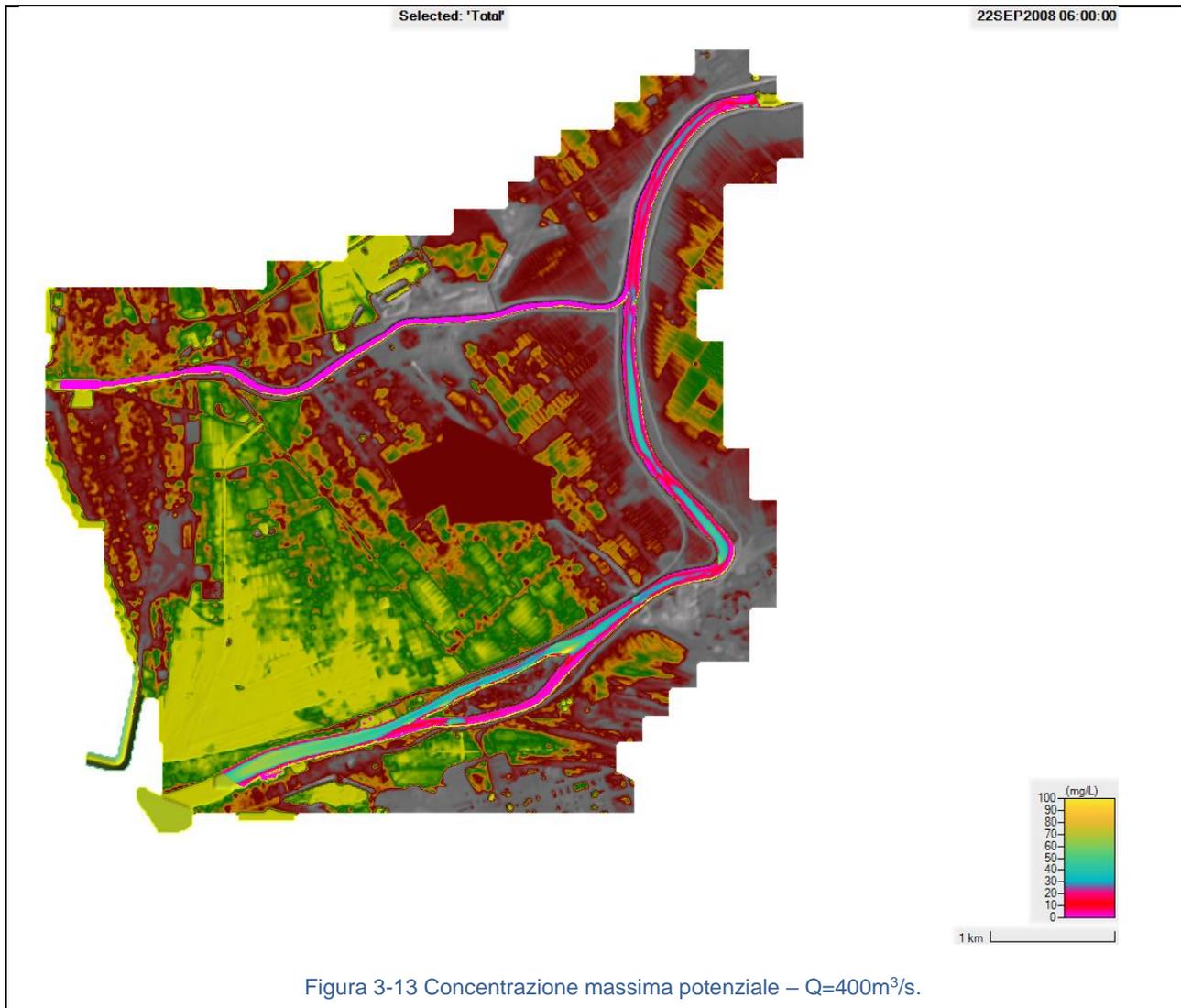
## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00



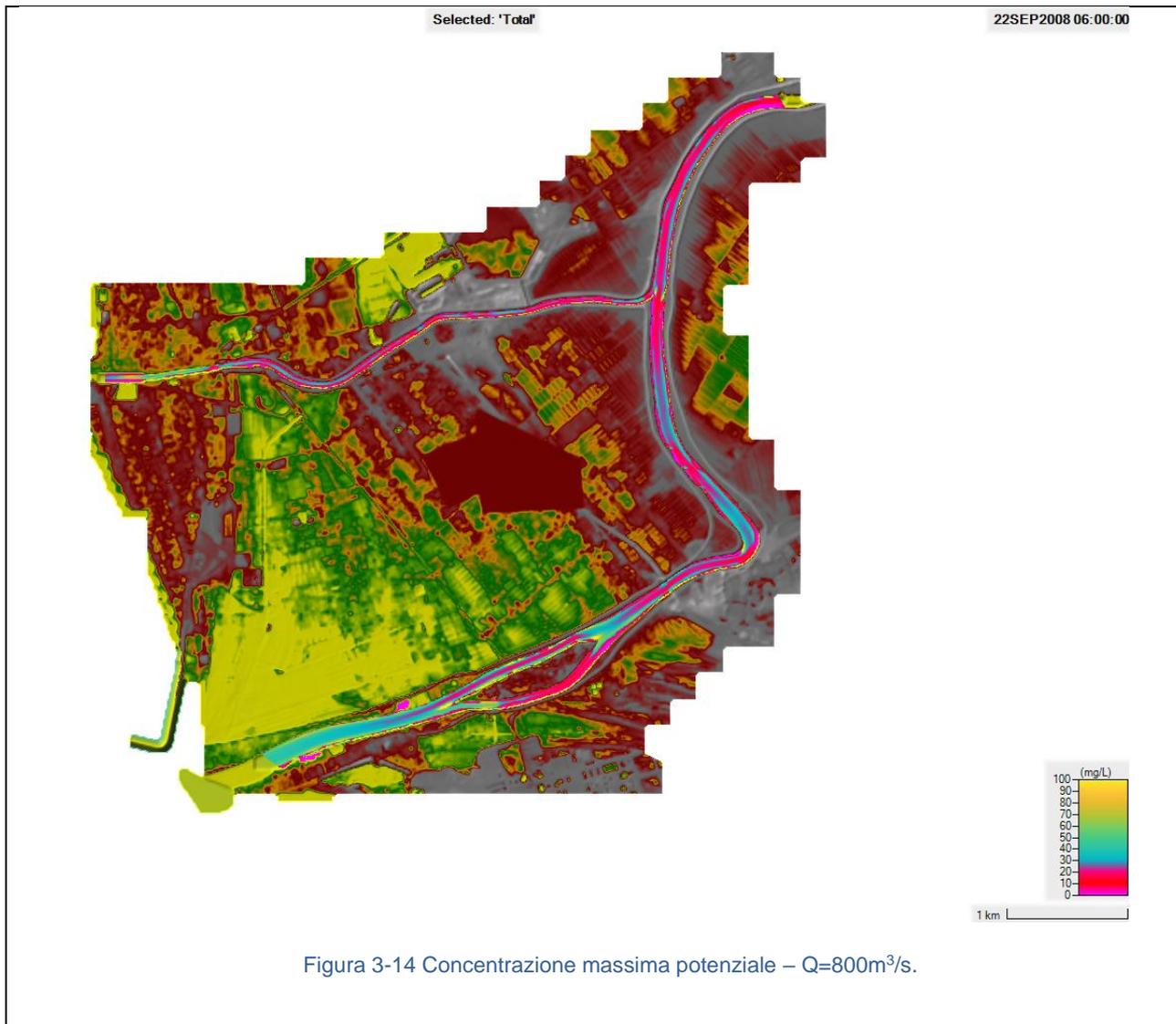
**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00



# STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00



### STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

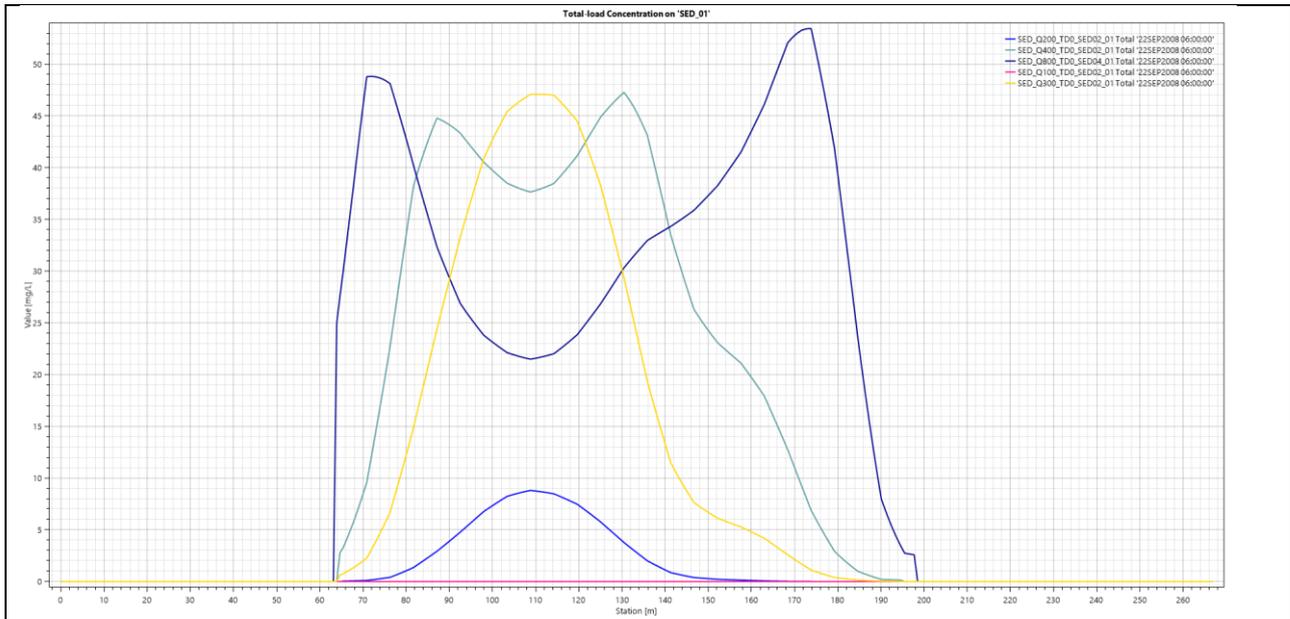


Figura 3-15 Concentrazione massima potenziale lungo la sezione di controllo di Fiumara Grande.

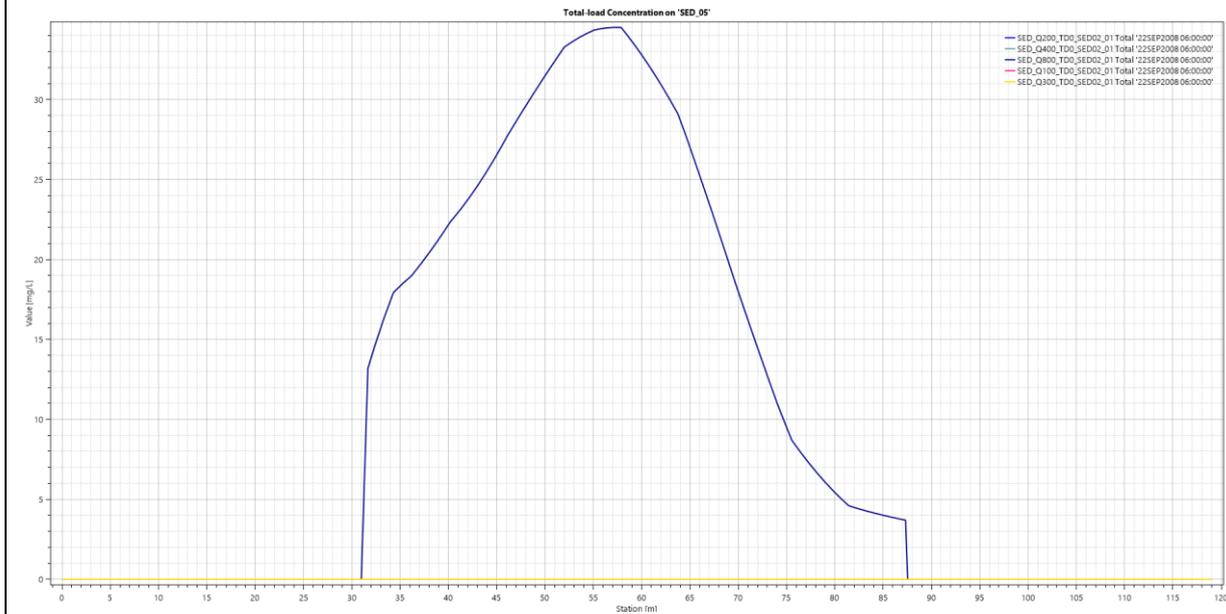


Figura 3-16 Concentrazione massima potenziale lungo la sezione di controllo del Canale di Fiumicino

### 3.7 ANALISI DEI RISULTATI SUL TRANSETTO TERMINALE (FIUMARA GRANDE)

Vengono riportati nel seguito i risultati delle grande idrodinamiche e sedimentologiche elaborati in una sezione immediatamente precedente l'esito delle portate e dei sedimenti a foce (Fiumara Grande), per evitare potenziali effetti distorsivi determinati dalla presenza, nella sezione successiva corrispondente alla foce, della condizione al contorno del modello idraulico (condizione di valle).

Il transetto lungo il quale vengono riportate le grande idrauliche e sedimentologiche come output del modello è riportato nella figura seguente.

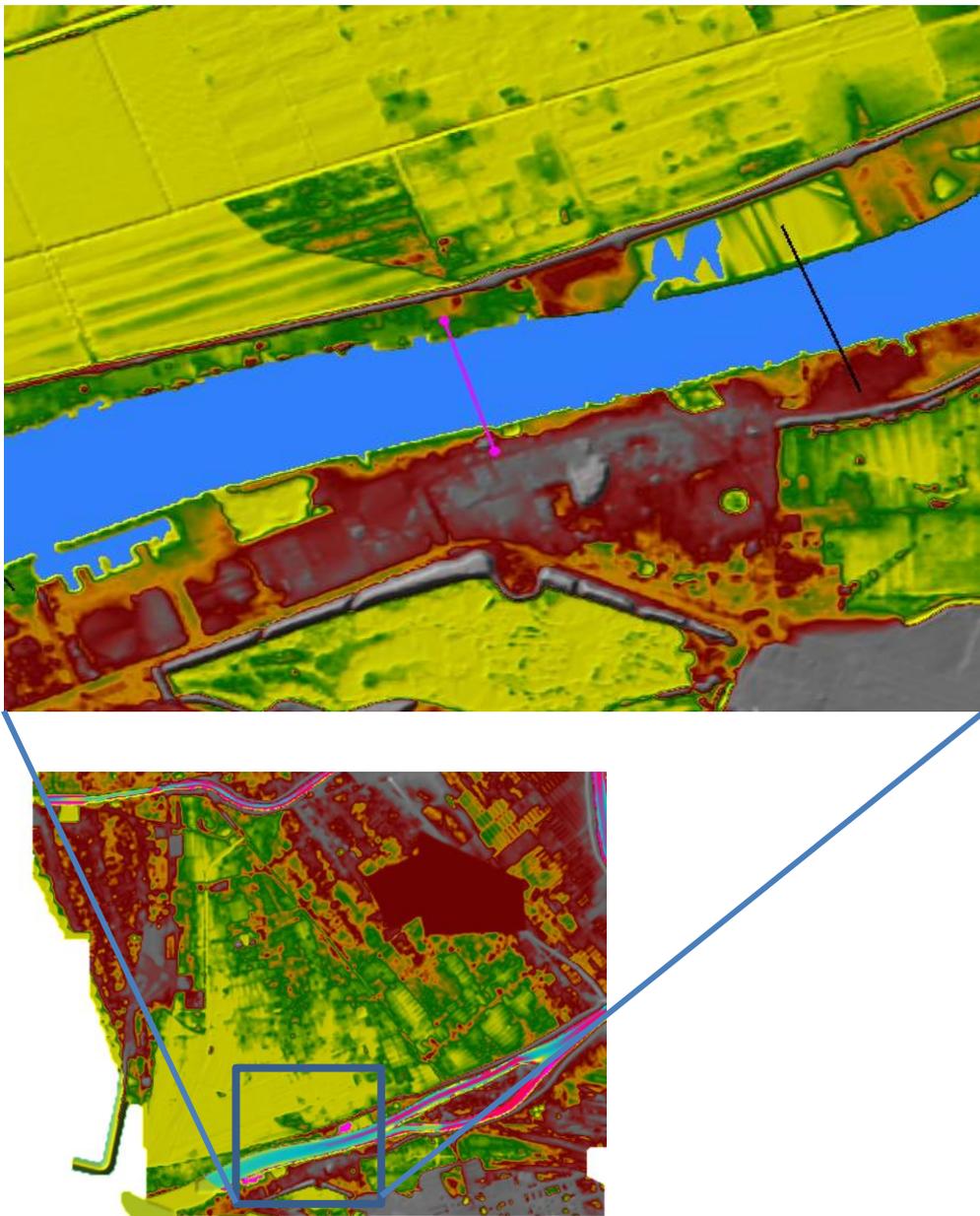


Figura 3-17 Posizione del transetto di controllo dei sedimenti sul ramo di Fiumara Grande

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Il contributo di sedimenti di ciascuna porzione di segmento del transetto è ottenuta per integrazione numerica.

Infatti mentre la portata sulla singola porzione di transetto si ottiene come

$$dQ(x) = v(x)y(x)dx = v(x)dA(x)$$

dove  $v(x)$  è la velocità puntuale e  $y(x)$  è il tirante puntuale,

la portata complessiva uscente dalla sezione è pari a

$$Q = \int v(x)y(x)dx$$

dove l'integrale è esteso a tutta l'estensione del transetto.

Il contributo di trasporto solido su ciascuna porzione di segmento del transetto si ottiene come

$$dW(x) = c(x)dQ(x) = c(x)v(x)y(x)dx = c(x)v(x)dA(x)$$

e il quantitativo di trasporto solido (kg/s) è ottenuto per integrazione delle medesime variabili sull'intero transetto

$$W = \int dW(x) = \int c(x)dQ(x) = \int c(x)v(x)y(x)dx$$

Tale integrale, risolto per via numerica, fornisce il quantitativo di sedimenti in uscita dal sistema fluviale e disponibili alla propagazione in mare.

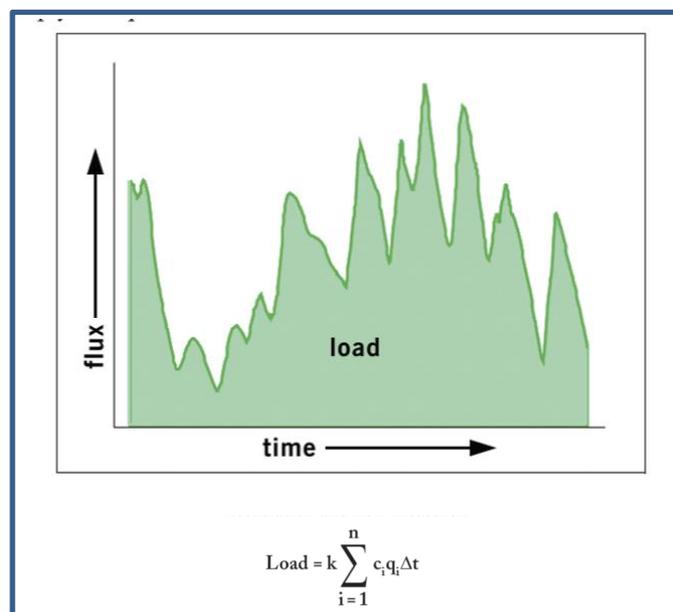


Figura 3-18 Integrazione numerica dei contributi di portata e concentrazione – da Richards, R.P. 1998. Estimation of pollutant loads in rivers and streams: a guidance document for NPS programs. U.S. EPA Region VIII Grant X998397-01-0, Water Quality Laboratory

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

**Andamento della velocità lungo il transetto di Fiumara Grande**

La velocità lungo il transetto analizzato è riportata, per le diverse portate di simulazione (100- 200- 300 – 400 – 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s) nel seguente grafico; esso presenta un regolare profilo logaritmico, con valori massimi nel tratto centrale del transetto. Le velocità massime attese sono dell'ordine di 1 m/s per portate fino a 400 m<sup>3</sup>/s, 1,5 m/s per portate fino a 800 m<sup>3</sup>/s e 2,5 m/s per portate di 1600 m<sup>3</sup>/s.

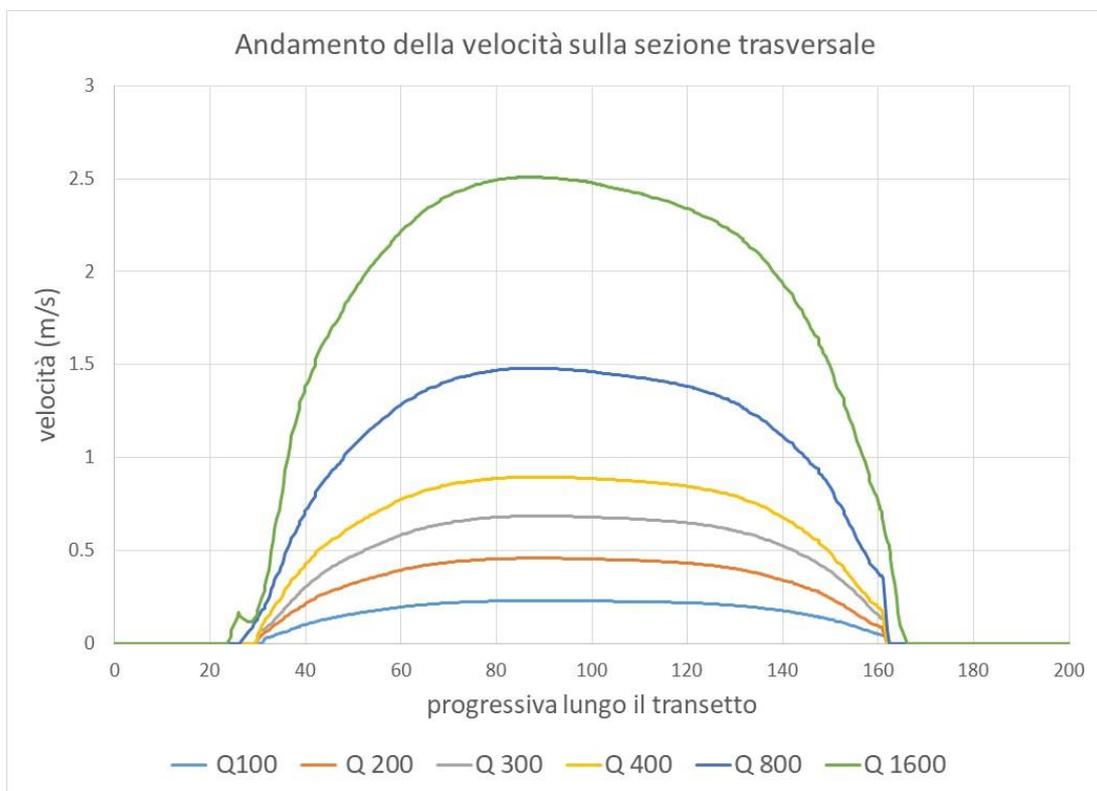


Figura 3-19 Andamento della velocità sulla sezione terminale del ramo di Fiumara Grande per le portate di 100, 200, 300, 400, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

***Andamento del tirante lungo il transetto di Fiumara Grande***

Il tirante lungo il transetto analizzato è riportato, per le diverse portate di simulazione (100- 200- 300 – 400 – 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s) nel seguente grafico; esso presenta valori massimi poco variabili in funzione della portata, nella zona centrale, con profondità comprese tra i 4,5 e i 5,5 metri per le diverse portate analizzate.

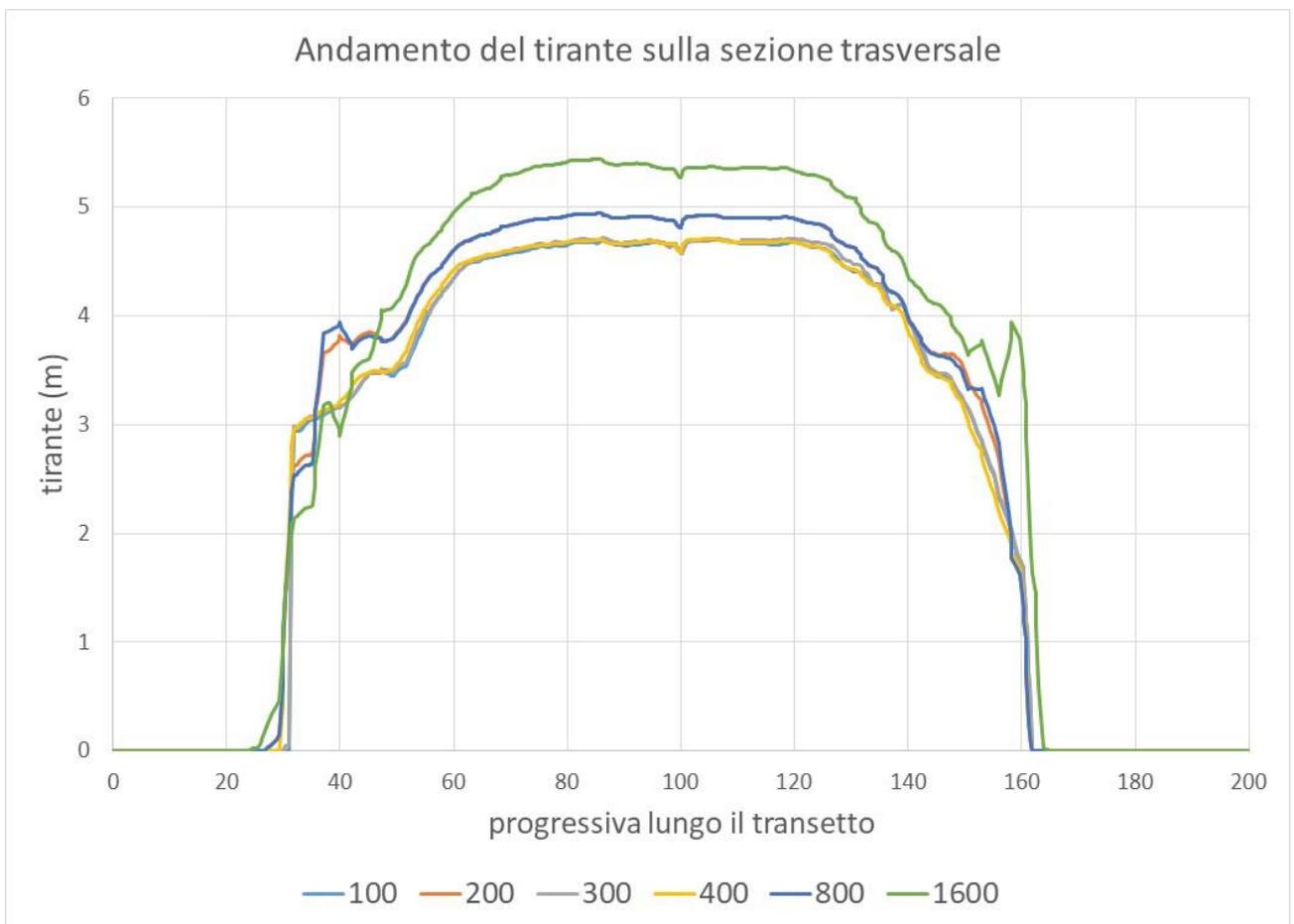


Figura 3-20 Andamento del tirante sulla sezione terminale del ramo di Fiumara Grande per le portate di 100, 200, 300, 400, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### Andamento del carico di solidi sospesi lungo il transetto di Fiumara Grande

L'andamento del carico di solidi sospesi (TSS) lungo il transetto analizzato è riportato, per le diverse portate di simulazione (200- 300 – 400 – 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s) nel seguente grafico; il dato è ottenuto, come indicato ad inizio paragrafo, per integrazione della variabili idrodinamiche e di quelle di concentrazione.

Il dato è aggregato in porzioni di transetto della lunghezza di circa 10 metri, ed espresso in kg/s.

Esso presenta valori massimi piuttosto costanti lungo la sezione, ad eccezione delle parti prossimali alle sponde. Nella zona centrale, i carichi risultano poco variabili e circa uguali a 2 kg/s ogni 10 metri di transetto per portate tra 400 e 800 m<sup>3</sup>/s, e decisamente superiori per portate di 1600 m<sup>3</sup>/s. Per la portata di 200 m<sup>3</sup>/s infine il carico appare molto limitato, e risulta praticamente nullo per la portata di 100 m<sup>3</sup>/s.

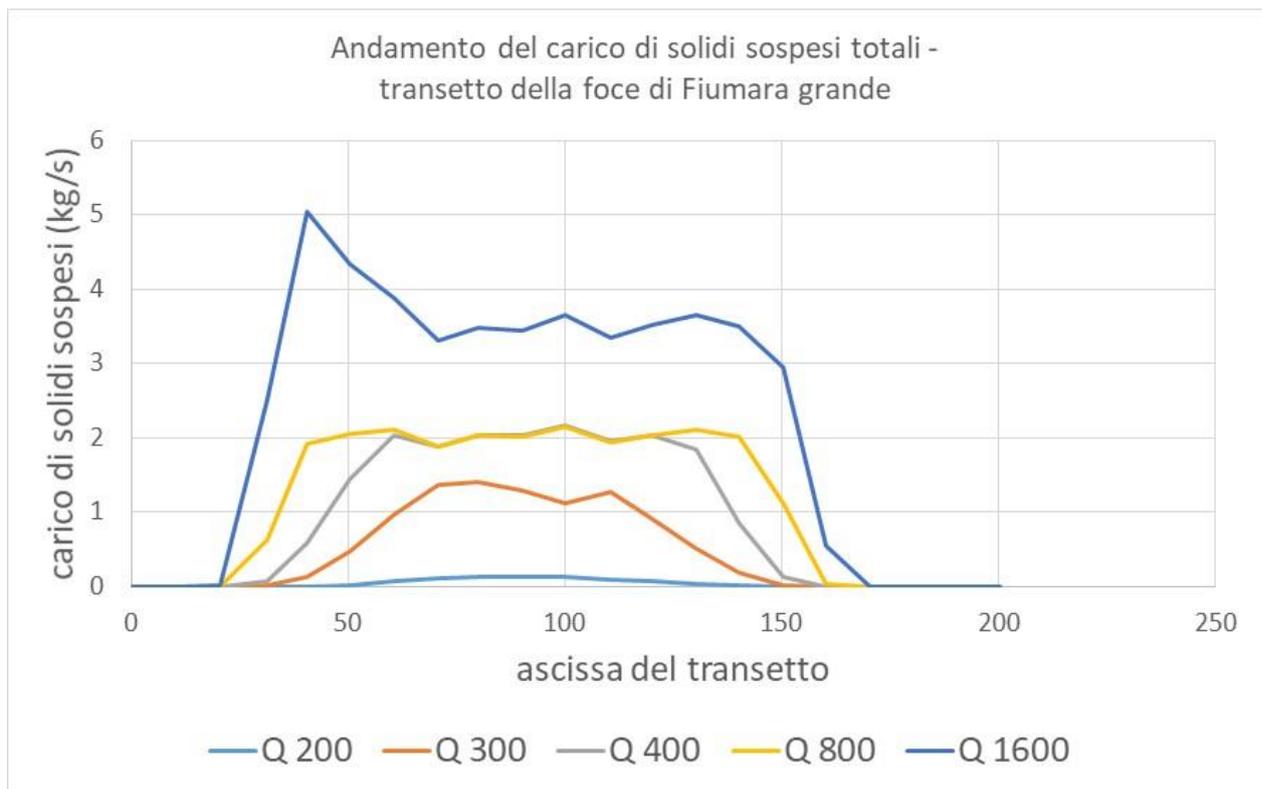


Figura 3-21 Andamento del carico di sedimenti  $W(x)$  in kg/s sulla sezione terminale del ramo di Fiumara Grande per le portate di 100, 200, 300, 400, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.

### 3.8 ANALISI DEI RISULTATI SUL CANALE DI FIUMICINO

Relativamente al canale di Fiumicino, si osserva che il suo contributo diviene significativo solo per portate superiori ai 400 m<sup>3</sup>/s; riveste quindi un ruolo non trascurabile solo in fase di piena, ma il contributo complessivo al trasporto solido è di fatto abbastanza limitato se non sugli 800 m<sup>3</sup>/s e oltre (piene rare).

I risultati sul transetto terminale del canale di Fiumicino sono riportati nelle figure seguenti in termini di velocità, tirante portata e trasporto solido (TSS).

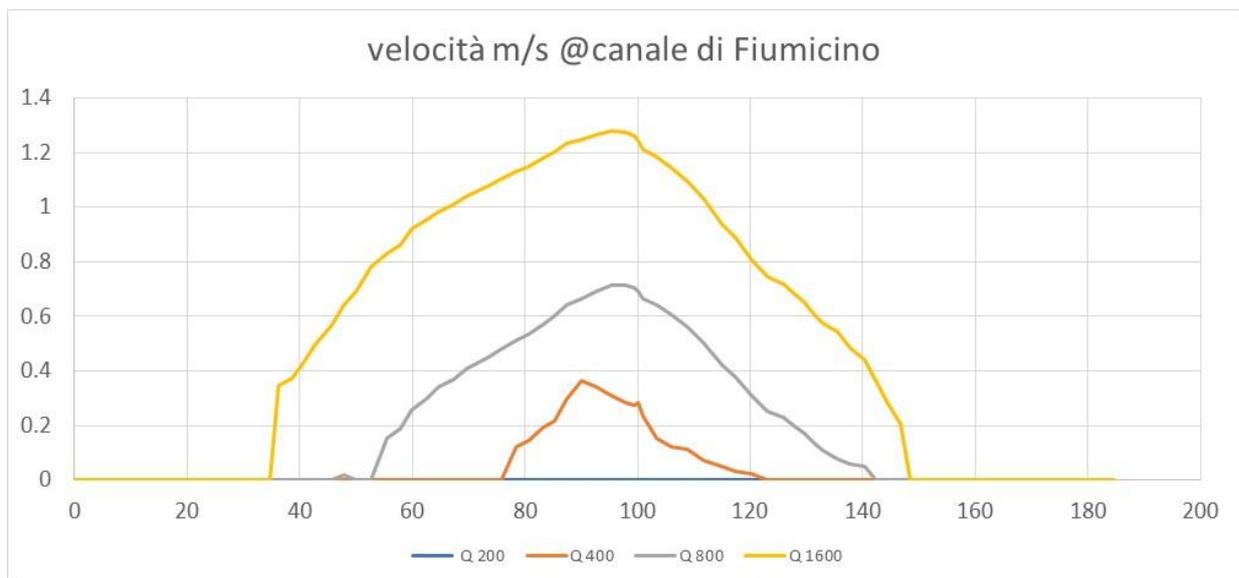


Figura 3-22 Andamento della velocità sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

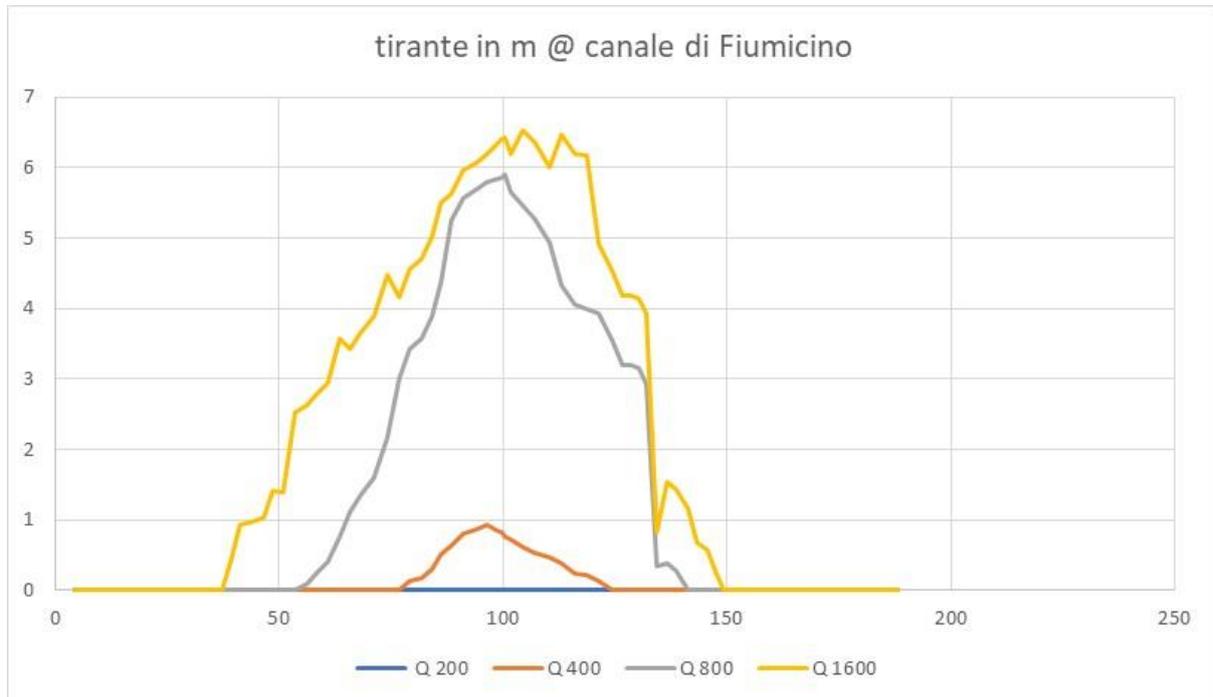


Figura 3-23 Andamento del tirante sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.

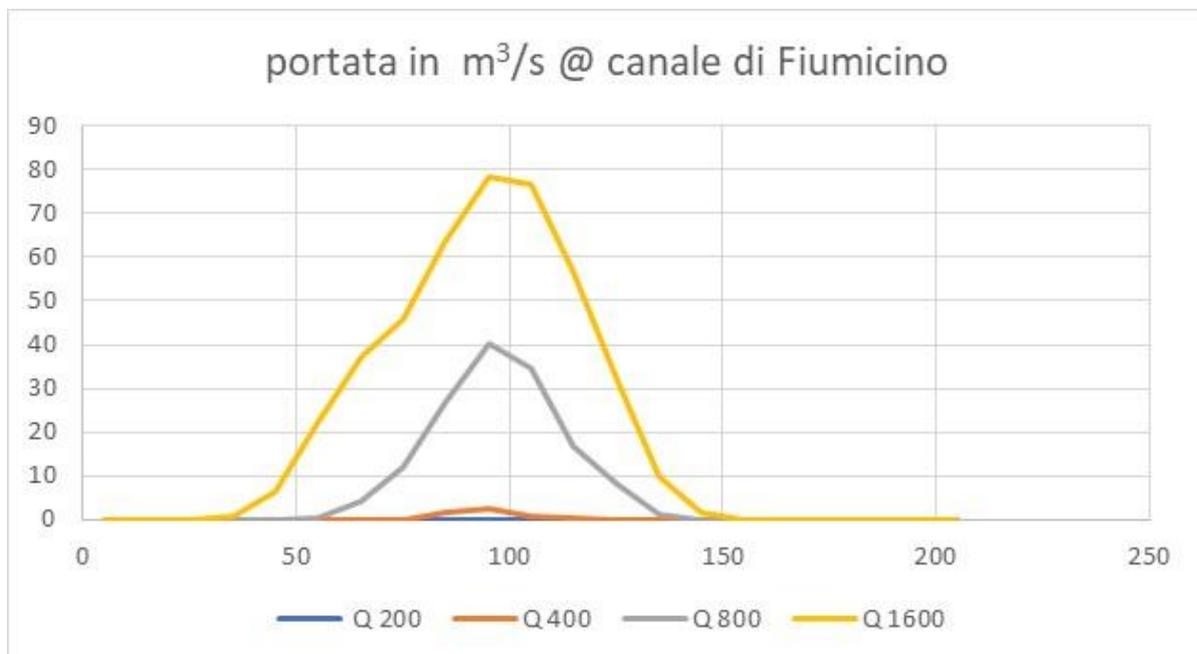


Figura 3-24 Andamento della portata parziale sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.

### STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

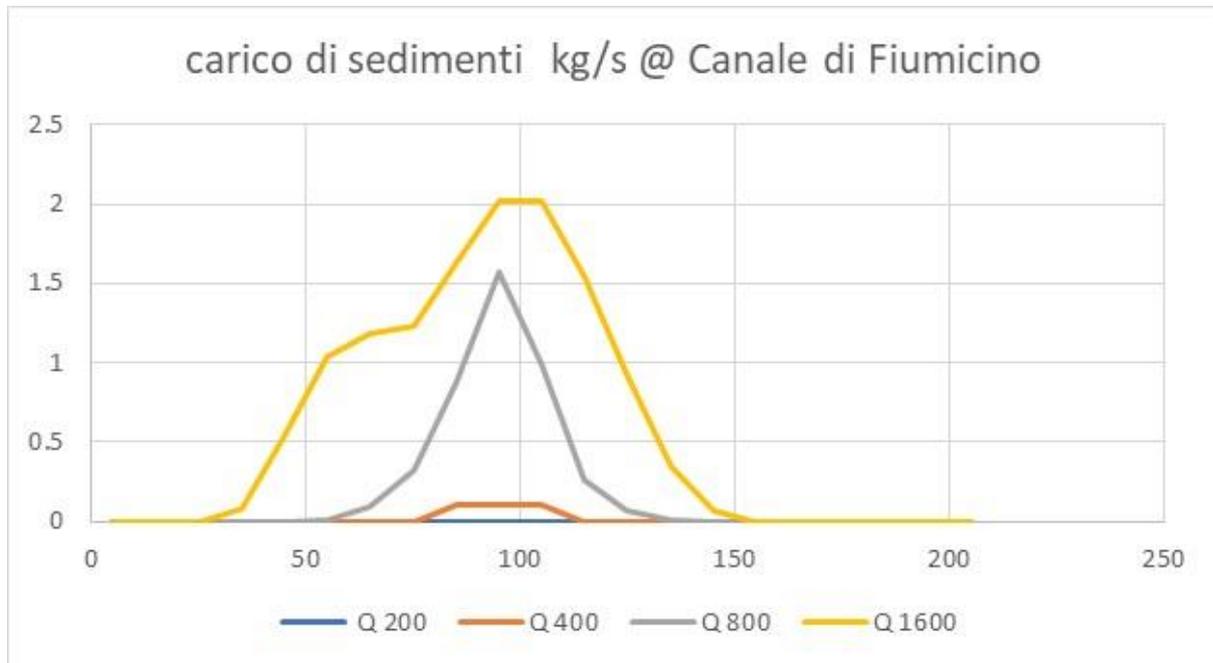


Figura 3-25 Andamento del contributo di sedimento in kg/s sulla sezione terminale del canale di Fiumicino per le portate 200, 400, 800 e 1600 m<sup>3</sup>/s.

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### 3.9 BUDGET ANNUALE DI SEDIMENTI

Per la determinazione dei quantitativi annui sversati si è fatto ricorso all'informazione sulle classi di durata in frequenza delle portate del Tevere a Ripetta, ricorrendo quindi, ad una discretizzazione della curva di durata del Tevere stesso. La curva di durata rappresenta infatti la persistenza delle portate oltre un valore soglia nel corso dell'anno medio, basata sulla elaborazione statistica delle portate medie giornaliere in una sezione di chiusura; da essa si può facilmente estrapolare la distribuzione discreta in frequenza delle medesime portate.

Questa procedura si è resa necessaria in quanto simulare periodi lunghi (quali un anno intero di portate nel corso del tratto terminale del Tevere) o molti valori diversi di portata, per ricostruire la continuità della curva di durata per tutti i valori giornalieri, sarebbe risultato troppo complesso per l'onere computazionale associato alle singole simulazioni.

Viceversa, sono state individuate della classi di portata significative per l'attivazione ed il sostenimento del trasporto solido, che, come detto, agisce soprattutto su portate che sono al contempo sufficientemente elevate da determinare significativo trasporto in sospensione ma anche consistenti nel corso dell'anno in termini di frequenza; viceversa portate molto elevate (superiori a circa 400 m<sup>3</sup>/s) hanno la caratteristica di determinare un trasporto per unità di tempo molto elevato, ma sono troppo rare in frequenza per incidere significativamente sul budget annuale di sedimenti.

In particolare, le classi di portata individuate e le relative portate medie, associate ad un numero di giorni atteso nel corso dell'anno, sono riportate nei due seguenti grafici.

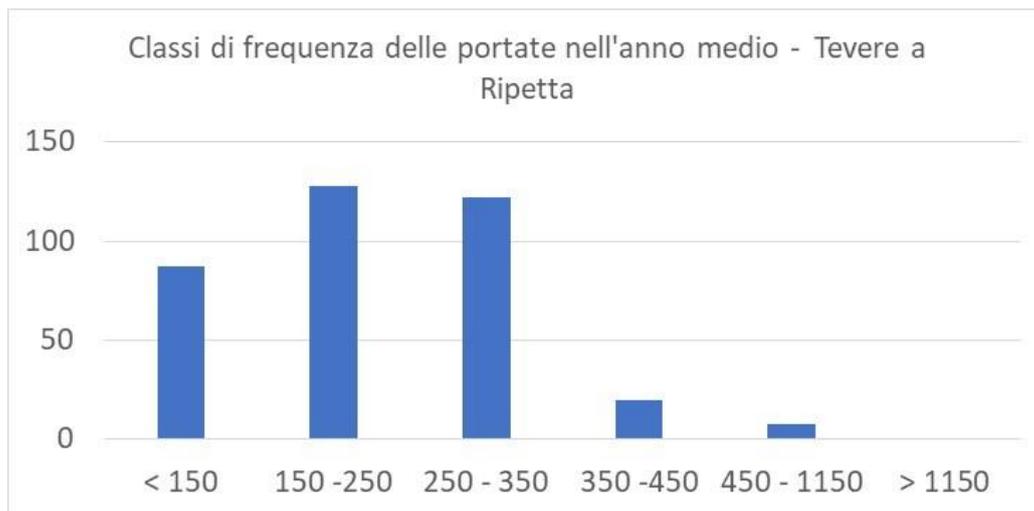


Figura 3-26 Classi di frequenza delle portate per un anno medio del Tevere a Ripetta (senza occorrenza di piena straordinaria)

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

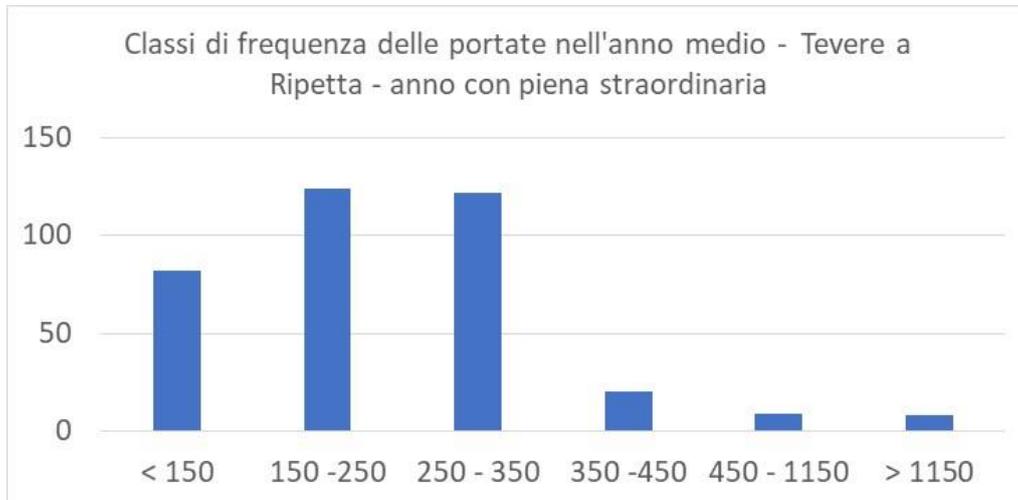


Figura 3-27 Classi di frequenza delle portate per un anno medio del Tevere a Ripetta (nel caso di occorrenza di piena straordinaria)

Si sono distinti i due casi di

- Anno medio (senza occorrenza di una piena straordinaria - caratterizzata dal superamento del valore di 1150 m<sup>3</sup>/s); suddivisione delle portate in 6 classi caratteristiche;
- Anno con occorrenza di una piena ordinaria - superamento del valore di 1150 m<sup>3</sup>/s; in quest'ultimo caso, date le caratteristiche di durata del Tevere a Roma, si assiste al permanere della portata sopra il livello di piena ordinaria anche per più giorni.

In ciascuno dei due casi, sulla base dei dati idrologici e delle simulazioni sedimentologiche, disponiamo:

- della frequenza relativa del numero di giorni corrispondente ad un assegnato deflusso o classe di deflusso
- dell'apporto di sedimenti attesi istantanei, in termini di kg/s, per quel medesimo deflusso o classe di deflusso

L'apporto di sedimenti atteso per ciascun valore di portata medio si ottiene integrando sul giorno il dato puntuale ottenuto dalla simulazione; i risultati sono forniti nella tabella seguente in termini di kg/d e nel grafico successivo.

Come si vede,

- il contributo risulta trascurabile sia in periodo di magra, sia per valori di portata vicini alla portata media giornaliera (circa 230 m<sup>3</sup>/s)
- diviene significativo per valori tra i 400 e gli 800 m<sup>3</sup>/s
- arriva a valori elevati per le portate massime di piena (tempi di ritorno superiori a 20 anni, quindi decisamente rari in termini di frequenza).

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Tabella 3.1 - Contributo di trasporto solido giornaliero sulla Fiumara Grande e sul canale di Fiumicino in funzione della portata in ingresso sul Tevere a Roma

| Portata media | portata solida Fiumara grande | portata solida canale Fiumicino |
|---------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 100           | 0.3                           | 0.0                             |
| 200           | 0.8                           | 0.0                             |
| 300           | 15.4                          | 0.0                             |
| 400           | 19.1                          | 0.3                             |
| 800           | 24.0                          | 4.2                             |
| 1600          | 47.2                          | 12.6                            |

Infine, dalla conoscenza di frequenza empirica e dal volume e massa di sedimenti attesi per ciascuna portata, per integrazione sul periodo di una annualità si ottiene il quantitativo di sedimenti rilasciato nel corso dell'anno solare sia dalla sorgente puntuale di Fiumara Grande, sia da quella del canale di Fiumicino.

La variabilità che si ottiene in termini di budget annuale di solidi sospesi totali è in realtà piuttosto limitata tra il caso di anno con piene ordinarie e di anno con piene non ordinarie; infatti in un anno senza piene straordinarie il quantitativo totale stimato è compreso tra  $220$  e  $230 \times 10^3$  tonnellate annue, mentre in occasione di annualità con piene di rilevanza statistica (superiore in termini di tempo di ritorno a 20 anni), l'incremento di trasporto legato ai periodi di piena non ordinaria non supera le  $40 \times 10^3$  tonnellate annue (pari a circa  $270 \times 10^3$ , circa 19% in più).

I valori ottenuti sono leggermente superiori a quelli inferiti dalle misurazioni di Bersani ed Amici del 1991 ("il trasporto solido sul fiume Tevere, 1991"), le uniche disponibili in letteratura successive alla realizzazione degli invasi di Corbara, di Caste Giubileo ed alla rinaturalizzazione dell'area di Nazzano. Occorre tuttavia osservare che, nelle misurazioni di Bersani ed Amici, il valore di trasporto torbido puntuale viene "estrapolato" come costante fino al valore successivo, così che la singola misura di piena (di portata liquida e solida), se non seguita da un nuovo dato ragionevolmente vicino temporalmente, risulta condizionare il budget annuo in modo molto significativo. Nello specifico, quasi l'80% del trasporto solido annuale viene attribuito, nella predetta pubblicazione, ad un'unica misura di portata, che viene estesa per un periodo successivo di ben 11 giorni.

I risultati per ciascuna classe di portata e cumulativi annuali sono riportati nelle tabelle 3-2 e 3-3, in funzione della tipologia di distribuzione annuale delle portate medie giornaliere (con evento non ordinario e in assenza di esso).

\

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

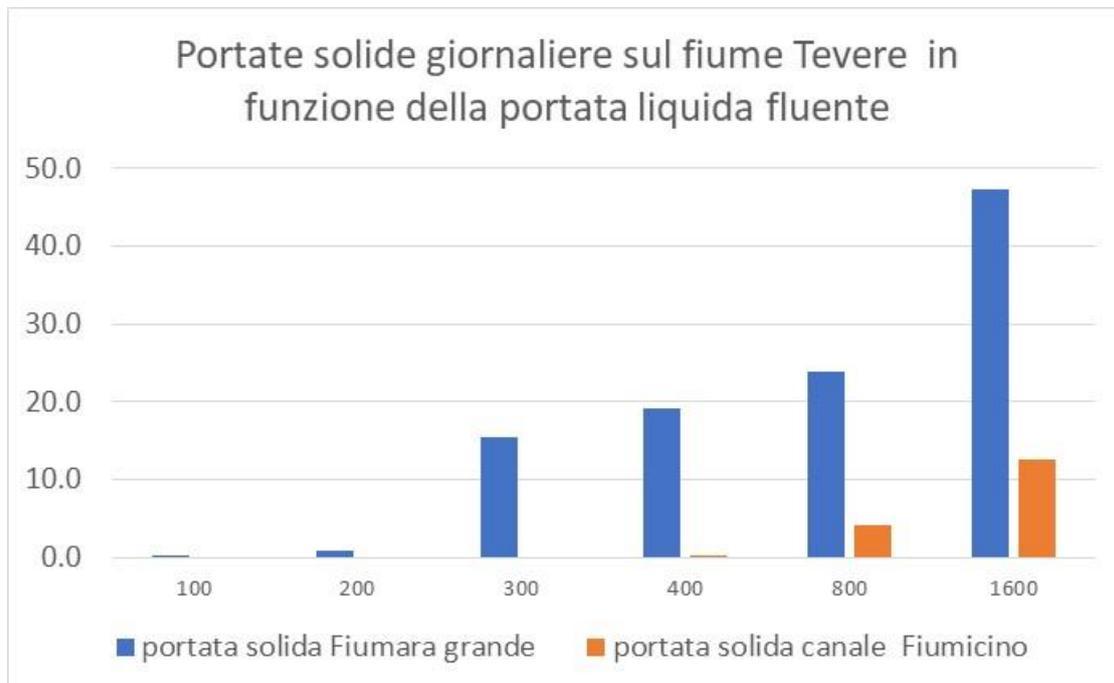


Figura 3-28 Carico di solidi sospesi totali giornalieri sul fiume Tevere in funzione della portata liquida fluente; i carichi sono praticamente trascurabili per portate fino a 200 m³/s, e forniscono valori di TSS compresi tra 15 kg/d e 24 kg/d per portate tra 300 e 800 m³/s.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Tabella 3.2 – Distribuzione delle portate sui due rami per ciascuna portata in ingresso al nodo di Roma Ripetta; carichi istantanei e giornalieri associati a ciascuna classe di portata; carico totale annuo di sedimenti solidi sospesi; annualità senza piene straordinarie

| <b>CARICO DI SEDIMENTI NELL'ANNO MEDIO - FIUME TEVERE</b>   |                   |        |          |           |          |            |        |                     |
|---|-------------------|--------|----------|-----------|----------|------------|--------|---------------------|
| <b>N° giorni nella classe di portata liquida (giorni con portata ricompresa nella classe assegnata)</b>               | d                 | 87     | 128      | 122       | 20       | 8          | 0      | <b>Budget annuo</b> |
| <b>classi di portata liquida Tevere (intervalli di portata)</b>   | m <sup>3</sup> /s | < 150  | 150 -250 | 250 - 350 | 350 -450 | 450 - 1150 | > 1150 |                     |
| <b>valore mediano di ciascuna classe Q liquida Tevere</b>   | m <sup>3</sup> /s | 100    | 200      | 300       | 400      | 800        | 1600   |                     |
| <b>di cui portata liquida sul canale di Fiumicino (derivata sul ramo di Fiumicino)</b>                                | m <sup>3</sup> /s | 0      | 0        | 0         | 5        | 144        | -      |                     |
| <b>portata solida istantanea in esito alla Fiumara grande</b>   | kg/s              | 0.25   | 0.8      | 15.4      | 19.1     | 24.0       | -      |                     |
| <b>portata solida istantanea in esito canale Fiumicino</b>  | kg/s              | 0      | 0.0      | 0.0       | 0.3      | 4.2        | -      |                     |
| <b>Carico giornaliero di sedimenti (integrato sul giorno) sulla Fiumara grande, per ciascuna classe di portata</b>    | t/d               | 21.6   | 69.3     | 1330.6    | 1649.9   | 2073.8     | -      |                     |
| <b>Carico giornaliero di sedimenti (integrato sul giorno) sul canale di Fiumicino, per ciascuna classe di portata</b> | t/d               | 0      | 0.0      | 0.0       | 25.9     | 363.7      | -      |                     |
| <b>Carico totale annuo di sedimenti per ciascuna classe di portata</b>  | t                 | 1879.2 | 8875.7   | 162328.3  | 33517.3  | 19500.2    | -      |                     |
| <b>Carico di sedimenti annuo (budget annuo)</b>   | t                 |        |          |           |          |            |        |                     |

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

Tabella 3.3 – Distribuzione delle portate sui due rami per ciascuna portata in ingresso al nodo di Roma Ripetta; carichi istantanei e giornalieri associati a ciascuna classe di portata; carico totale annuo di sedimenti solidi sospesi; annualità con piena straordinaria

| <b>CARICO DI SEDIMENTI NELL'ANNO CON PIENA STRAORDINARIA - FIUME TEVERE</b>   |      |        |          |           |          |            |         |
|---|------|--------|----------|-----------|----------|------------|---------|
| <b>N° giorni nella classe di portata liquida (giorni con portata ricompresa nella classe assegnata)</b>               | d    | 82     | 124      | 122       | 20       | 9          | 8       |
| <b>classi di portata liquida Tevere (intervalli di portata)</b>   | m3/s | < 150  | 150 -250 | 250 - 350 | 350 -450 | 450 - 1150 | > 1150  |
| <b>valore mediano di ciascuna classe Q liquida Tevere</b>   | m3/s | 100    | 200      | 300       | 400      | 800        | 1600    |
| <b>di cui portata liquida sul canale di Fiumicino (derivata sul ramo di Fiumicino)</b>                                | m3/s | 0.0    | 0.0      | 0.0       | 5.0      | 144.0      | 431.3   |
| <b>portata solida istantanea in esito alla Fiumara grande</b>   | kg/s | 0.3    | 0.8      | 15.4      | 19.1     | 24.0       | 47.2    |
| <b>portata solida istantanea in esito canale Fiumicino</b>  | kg/s | 0.0    | 0.0      | 0.0       | 0.3      | 4.2        | 12.6    |
| <b>Carico giornaliero di sedimenti (integrato sul giorno) sulla Fiumara grande, per ciascuna classe di portata</b>    | t/d  | 21.6   | 69.3     | 1330.6    | 1649.9   | 2073.8     | 4080.9  |
| <b>Carico giornaliero di sedimenti (integrato sul giorno) sul canale di Fiumicino, per ciascuna classe di portata</b> | t/d  | 0.0    | 0.0      | 0.0       | 25.9     | 363.7      | 1092.1  |
| <b>Carico totale annuo di sedimenti per ciascuna classe di portata</b>  | t    | 1771.2 | 8598.3   | 162328.3  | 33517.3  | 21937.7    | 41383.8 |

**Budget annuo**

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

---

|   |   |  |  |  |  |  |  |                 |
|---|---|--|--|--|--|--|--|-----------------|
| <b>Carico di sedimenti annuo (budget annuo)</b> | t |  |  |  |  |  |  | <b>269536.7</b> |
|---|---|--|--|--|--|--|--|-----------------|

## STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### 3.10 RICOSTRUZIONE DI UNA ANNUALITA' DI PORTATA E TRASPORTO SOLIDO

Al fine di consentire la simulazione di una intera annualità di trasporto solido in termini di contributo di portata liquida e solida, così da poter disporre di una simulazione degli effetti quantitativi del contributo di trasporto proveniente dal Tevere nelle due foci di Fiumara Grande e Fiumicino, e valutare per via modellistica gli effetti della realizzazione del nuovo porto crocieristico di Isola Sacra, è stato ricostruito l'andamento di una annualità intera (sequenza di portate di 365 giorni) scegliendo un anno solare con piena di tipo non ordinario (portata al colmo pari a 1400 m<sup>3</sup>/s), ma di durata della piena limitata; l'anno simulato è stato il 1992.

Assunte le portate giornaliere ricavate dagli annali idrologici, l'andamento della portata media giornaliera ricostruita è riportata in figura 3-29; il relativo contributo di portata solida, ricostruito sulla base delle portate associate di figura 3-28, esitato dalle due foci è riportato nel successivo grafico di figura 3-30.

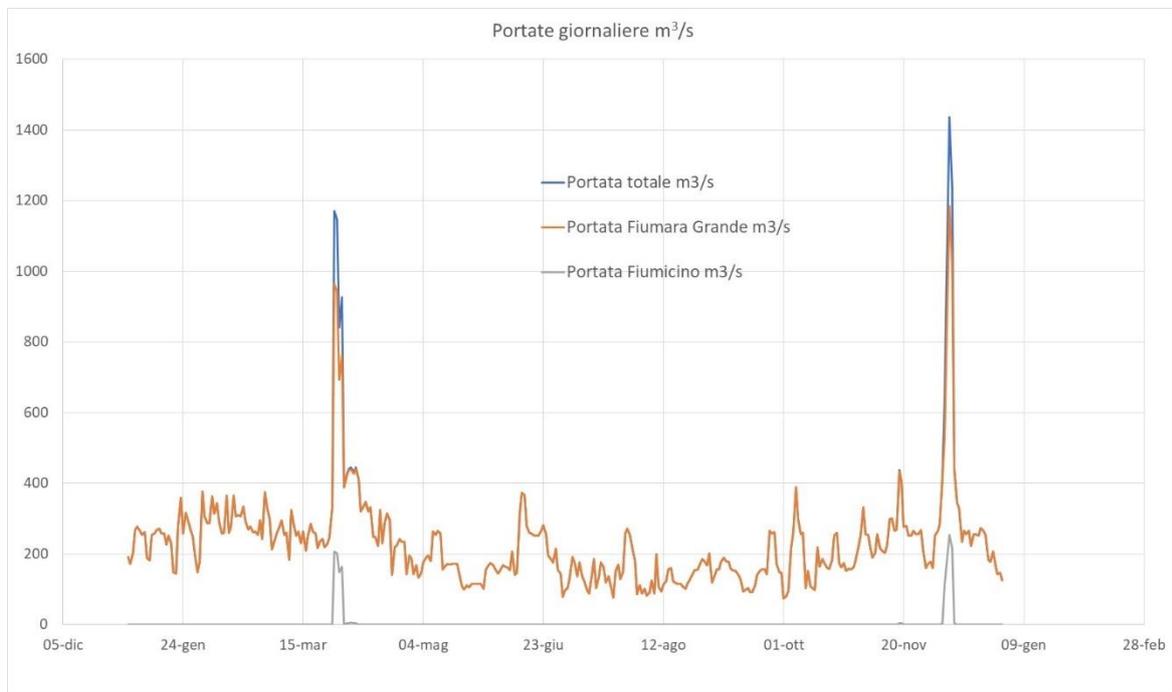


Figura 3-29 Andamento della portata totale del Tevere a Ripetta - annualità del 1992 ricostruita per integrazione delle portate mancanti e normalizzata per la media annuale delle portate medie giornaliere del Tevere a Ripetta; ripartizione delle portate sui due rami deltizi

### STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

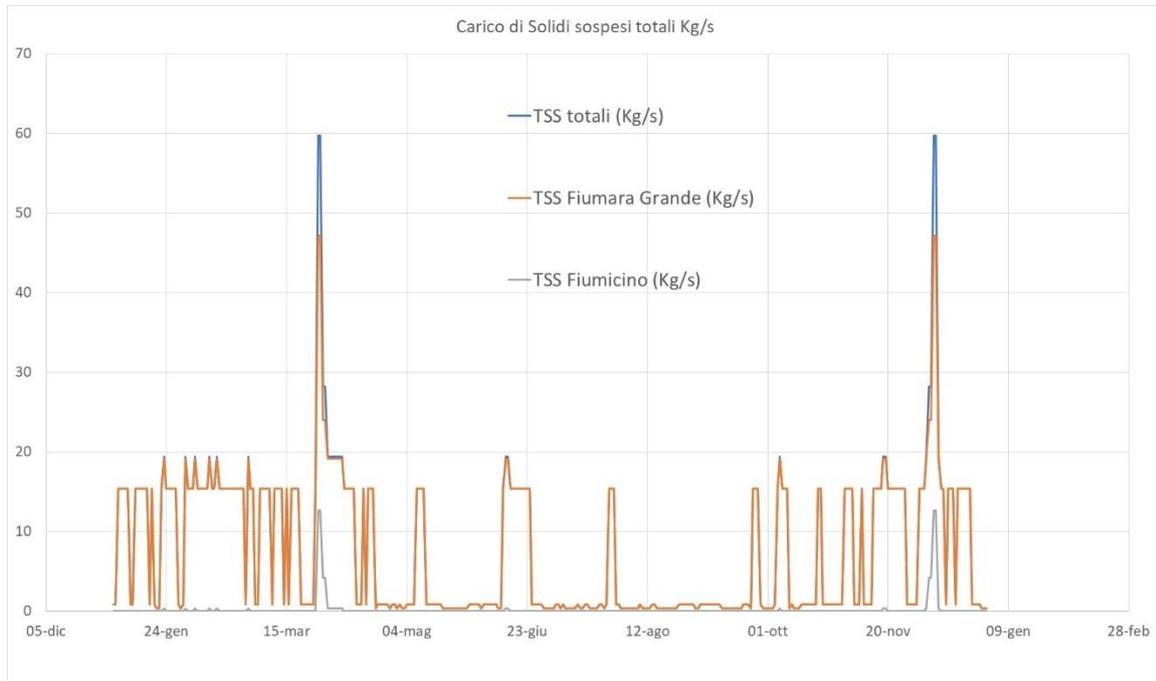


Figura 3-30 Andamento del carico solido rilasciato alla foce - ramo di Fiumara Grande e ramo del canale di Fiumicino, sulla base delle associazioni di portata liquida e solida di figura 3-28.

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

### 3.11 CONCLUSIONI

Nel presente studio sono state condotte simulazioni di trasporto solido nel tratto terminale del fiume Tevere, includendo la diramazione delle due foci di Fiumara Grande e canale di Fiumicino, tramite modello integrato 1D-2D Hec-Ras, ed attivazione del relativo modulo di trasporto di solidi sospesi, con condizione di tipo *massimo trasporto potenziale* (non viene limitato quindi l'apporto nella sezione di monte considerata dal modello).

Come condizione di valle, trattandosi non di un modello di rischio idraulico ma finalizzato alla valutazione del trasporto, si è ritenuto appropriato e cautelativo imporre la condizione di livello medio marino pari a 0,00 metri s.l.m., onde ottenere una stima del potenziale massimo di trasferimento dei solidi sospesi alla foce del fiume; d'altra parte, come confermato dai risultati, si ha che la formazione del budget annuo di sedimenti alla foce non è legata ad eventi meteomarinari intensi, ma a condizioni di portata leggermente superiore al livello medio (circa 230 m<sup>3</sup>/s).

La caratterizzazione granulometrica del materiale in sospensione è stata effettuata sulla base di misure sperimentali di torbidità, con rilevamento della curva in distribuzione di diametro equivalente dei sedimenti. Il valore mediano è stato assunto pari a 0,5 mm; il valore medio dei valori mediani delle varie curve è risultato essere infatti pari a 0,51 mm.

Il tratto simulato è stato già oggetto di uno studio tramite modello bidimensionale, per portate fino a quella duecentennale (portata di 3372 m<sup>3</sup>/s) implementato per la valutazione di compatibilità idraulica degli interventi legati alla realizzazione del Porto crocieristico di Isola Sacra (in particolare per la valutazione della compatibilità dell'innalzamento del rilevato della via del Faro nei confronti della piena del fiume).

Lo studio è stato condotto per fornire in output le velocità, i tiranti e le concentrazioni lungo i transetti terminali dei due rami deltizi. Da questi risultati, espressi in forma distribuita lungo la sezione (transetto di output), è stato possibile determinare il contributo di portata liquida e solida totale in uscita a Fiumara Grande e al canale di Fiumicino, per un set di classi di portata assegnata (che sono state individuate in 100 m<sup>3</sup>/s, 200 m<sup>3</sup>/s, 300 m<sup>3</sup>/s, 400 m<sup>3</sup>/s, 800 m<sup>3</sup>/s, 1600 m<sup>3</sup>/s). Lo studio di classi specifiche di portata liquida è stato obbligato dal notevole onere computazionale del modello accoppiato di trasporto liquido e solido.

Le valutazioni condotte hanno permesso di stimare che il trasporto solido è trascurabile per le portate fino a 200 m<sup>3</sup>/s (contributo giornaliero inferiore a 70 t/d), mentre diviene sensibile già sui 300 m<sup>3</sup>/s (contributo giornaliero superiore a 1300 t/d). L'aumento del contributo di trasporto solido diviene successivamente meno che lineare all'aumentare della portata; il valore di contributo giornaliero atteso è di circa 2000 t/d. Il valore di portata incipit del trasporto solido significativo è quindi congruente (anche se leggermente inferiore) a quello precedentemente indicato in letteratura (valore "soglia" di 320-340 m<sup>3</sup>/s in termini di portata liquida).

I dati attesi di volume rilasciato giornaliero sono stati quindi combinati con la statistica di frequenza, per classi, delle portate medie giornaliere del Tevere a Ripetta; si è quindi utilizzato il dato di frequenza di portata liquida per inferire la frequenza statistica delle portate solide.

I risultati delle simulazioni per un anno "medio" (cioè senza piene straordinarie) e per un anno con piena straordinaria sono riportati nello studio in forma aggregata (in termini di bilancio aggregato per classi di portate, di cui è fornita la frequenza media in giorni, e di budget sedimentologico annuale).

I risultati sono congruenti con i lavori di letteratura sulla stima del trasporto solido in sospensione nel tratto terminale del Tevere (per le quali è stata individuata una sola, non sistematica, campagna di misura della torbidità, peraltro risalente all'inizio degli anni 90 del secolo scorso), anche se alcuni bias di queste campagne sono evidenti (ad esempio, viene attribuito lo stesso valore di trasporto solido a tutto il periodo intercorrente tra due misure; ovviamente questo tende a sovrastimare la quantità di TSS in concomitanza con l'accadimento di morbide e piene significative).

Sono stati inoltre confrontati i risultati ottenuti con osservazioni sperimentali di portata liquida e solida accoppiate e con alcune misure di concentrazione (non quindi di TSS, ma di concentrazioni misurate). I risultati sono molto simili, considerando che la valutazione di tali grandezze presenta caratteristiche di forte variabilità nello spazio e nel tempo. Valutazioni di tipo geologico a su larga scala temporale, ad esempio con tutti i lavori che stimano l'apporto di TSS sul Tevere in base all'evoluzione della linea di riva, non possono fornire risultati utili per la caratterizzazione quantitativa del budget di sedimenti: la morfologia del contributo sedimentario sul bacino del Tevere è cambiata completamente negli ultimi 70 anni per la realizzazione degli invasi di Montedoglio, Corbara, Alviano, e San Liberato, oltre alle traverse di Ponte Felice, Nazzano e Castel Giubileo, oltre che per la rinaturalizzazione di alcune

**STUDIO QUANTITATIVO DEL TRASPORTO DI SEDIMENTI ALLA FOCE DEL FIUME  
TEVERE MEDIANTE MODELLAZIONE NUMERICA**

P0031150-MP00-GI-REL-01\_00

---

aree che fungono da ulteriori trappole di sedimenti (Alviano), per cui una foto dello stato attuale può essere congruente solo con misure sperimentali degli anni 90 o successive. Tutti i dati di tipo storico convergono sull'ipotesi che al momento l'evoluzione della linea di costa sia stabilizzata

La modellazione ha quindi fornito risultati distribuiti sulla sezione di consegna al dominio idrico marittimo, che sono stati comunque integrati per ottenere un unico valore puntuale di budget di solidi sospesi come *point source*. Il TSS è praticamente inesistente e può essere trascurato per portate influenti del Tevere sia a 100 m<sup>3</sup>/s sia sui 200 m<sup>3</sup>/s – risultato confermato anche diminuendo leggermente la granulometria.

Il canale di Fiumicino diviene significativo solo per portate superiori ai 400 m<sup>3</sup>/s; quindi è importante in fase di piena ordinaria e straordinaria, ma il contributo complessivo al trasporto solido è di fatto abbastanza limitato se non per le piene rare.

In generale il problema sedimentologico è stato approcciato in termini di *potenziale massimo di trasporto* (quanto può esitare in un anno con portate significative, includendo anche il caso di piena straordinaria); si è verificato che l'apporto aggiuntivo delle piene non ordinarie è nel complesso limitato, determinando il passaggio del totale annuo dei sedimenti da circa 226K tonnellate annue a circa 270K tonnellate annue.