



---

**Venezia2021**

**Programma di ricerca scientifica  
per una laguna “regolata”**

---

**Linea 1.2**

***Apporto in laguna di acque e materiale  
solido da due tributari del bacino scolante***

---

Rapporto Finale

*Periodo 01/11/2018- 30/06/2022*

---

**Roberto Zonta (ISMAR-CNR)**

---

10/11/2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Roberto Zonta".

## EXECUTIVE SUMMARY

### 1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

L'attività di ricerca della Linea si è focalizzata sull'obiettivo di acquisire un quadro conoscitivo dello stato e del funzionamento dell'interfaccia terra-laguna in corrispondenza della foce di due importanti tributari di acqua dolce: Canale Osellino e Fiume Dese. Alla base dello studio c'è stata l'acquisizione in continuo dei valori di portata (Q) e di concentrazione di particolato sospeso (SPM, mg L<sup>-1</sup>) nella sezione principale. Questo ha permesso di stimare i valori medi annuali di Q e di carico solido (L<sup>SPM</sup>):  $1.99 \pm 0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $2537 \pm 208 \text{ t anno}^{-1}$  per l'Osellino,  $6.75 \pm 0.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $13308 \pm 927 \text{ t anno}^{-1}$  per il Dese (in quest'ultima stima non è stata considerata l'incidenza di un evento di piena eccezionale (13/04/21) che ha prodotto un carico solido giornaliero pari a 3193 t, Fig.1). Questi valori sono stati confrontati con stime pregresse.

Per la misura dei valori di SPM (e quindi di L<sub>SPM</sub>) in continuo, è stata messa a punto una metodologia basata sull'elaborazione di dati di backscatter; questi vengono acquisiti da strumentazione autoregistrante per effetto della deformazione di un segnale acustico indotta dal passaggio del particolato sospeso attraverso la sezione di misura. La metodologia è potenzialmente estendibile alla rete flussometrica di acquisizione delle portate del Provveditorato OO.PP., permettendo in tal modo di misurare il trasporto solido alla laguna da numerosi tributari del bacino scolante. Il dataset acquisito può essere utile per la gestione e la protezione di queste aree all'interfaccia terraferma-laguna e descrive uno stato di riferimento per valutare variazioni che eventualmente intercorreranno, in un prossimo futuro, sia come conseguenza dei cambiamenti climatici sia per la regolazione dei flussi alle bocche di porto della laguna, grazie al sistema MOSE.

La disponibilità di serie temporali di Q e SPM in una stazione di misura principale, con il corredo di misure puntuali effettuate in altre sezioni, ha permesso di investigare la circolazione idrica nei due sistemi di foce. Inoltre, ha consentito di studiare dettagliatamente gli eventi di piena occorsi nel periodo di studio, così come gli effetti delle chiusure del MOSE sull'idrodinamica locale. Nel sistema Osellino (Fig. 2), il sollevamento delle barriere determina - in un breve transiente  $\Delta t$ , pari mediamente a 30 minuti - una rapida diminuzione del livello idrico cui consegue una crescita repentina della Q. Questo breve "calante di marea" produce una velocità di variazione della Q ( $\Delta Q/\Delta t$ ) mediamente 7 e 11 volte superiore rispetto alle situazioni che si verificano nella sezione in condizioni di quadratura e sigize, rispettivamente, e provoca generalmente un aumento del particolato in sospensione. L'effetto sopra descritto si registra con intensità molto inferiori nella sezione di misura sul Fiume Dese, perché più distante dalla bocca di Porto del Lido.

Una parte dell'attività è stata focalizzata allo studio del particolato proveniente dal bacino scolante, che è un materiale potenzialmente fondamentale per contrastare l'impoverimento della *morfo diversità* lagunare nelle aree all'interfaccia con la terraferma. In entrambi i sistemi di foce, sono state osservate e studiate delle "distorsioni" morfologiche (Fig. 3). Nell'Osellino, il sedimento si accumula in alveo - dalla foce a Punta San Giuliano - e nell'area laterale a sinistra della foce. Nella prospettiva di un'attività di dragaggio, questi sedimenti sono classificabili come "C" secondo il protocollo del Ministero dell'Ambiente (8/4/93) a causa della concentrazione di Cu (media = 71.5) che eccede il limite di 50 mg kg<sup>-1</sup>. L'intervento morfologico in atto sull'Osellino, che interessa l'intero tratto dall'abitato di Mestre alla foce, potrebbe attenuare la situazione di interrimento della foce, soprattutto se sarà impedito il flusso della marea verso monte attraverso il ripristino delle porte vinciane denominate "Le Rotte". Per contrasto, nel settore orientale contiguo all'accumulo di sedimento in foce, è presente un'ampia depressione, dove il deficit di sedimento produce scarso ricambio al fondo e la presenza di sedimenti ridotti e scarsamente coesivi. Per quanto riguarda l'alveo principale del Fiume Dese si è osservata una progressiva perdita di sezione liquida; per lunghi tratti, inoltre, le sezioni risultano fortemente asimmetriche. Il sedimento in eccesso trattenuto in alveo è classificabile come "B" a causa della concentrazione di Cu (media = 51.6) che eccede il limite di 50 mg kg<sup>-1</sup> per una percentuale inferiore al 10%. Il settore nord della Palude di Cona, che riceve le acque del Fiume Dese attraverso il Canale di Santa Maria e la Bocca Carozza, è anch'esso soggetto ad un progressivo interrimento. Il sedimento in eccesso è assimilabile come classe "A" poiché il solo Cr (media = 23.1) eccede il limite di 20 mg kg<sup>-1</sup>.

## 2. Tre risultati concreti divulgabili ai decisori politici/ pubblico generico

### 2.1 Stima della portata e del carico solido annuali dal Canale Osellino e dal Fiume Dese

Nel Canale Osellino e nel Fiume Dese, la portata ( $Q$ ) e la concentrazione di particolato sospeso (SPM) sono state misurate in continuo producendo una stima del carico solido ( $L_{SPM}$ ) trasferito alla laguna. Questo ha permesso di comprendere il comportamento del sistema (come, ad esempio, negli eventi di piena - Fig. 1) con un dettaglio superiore rispetto al passato.

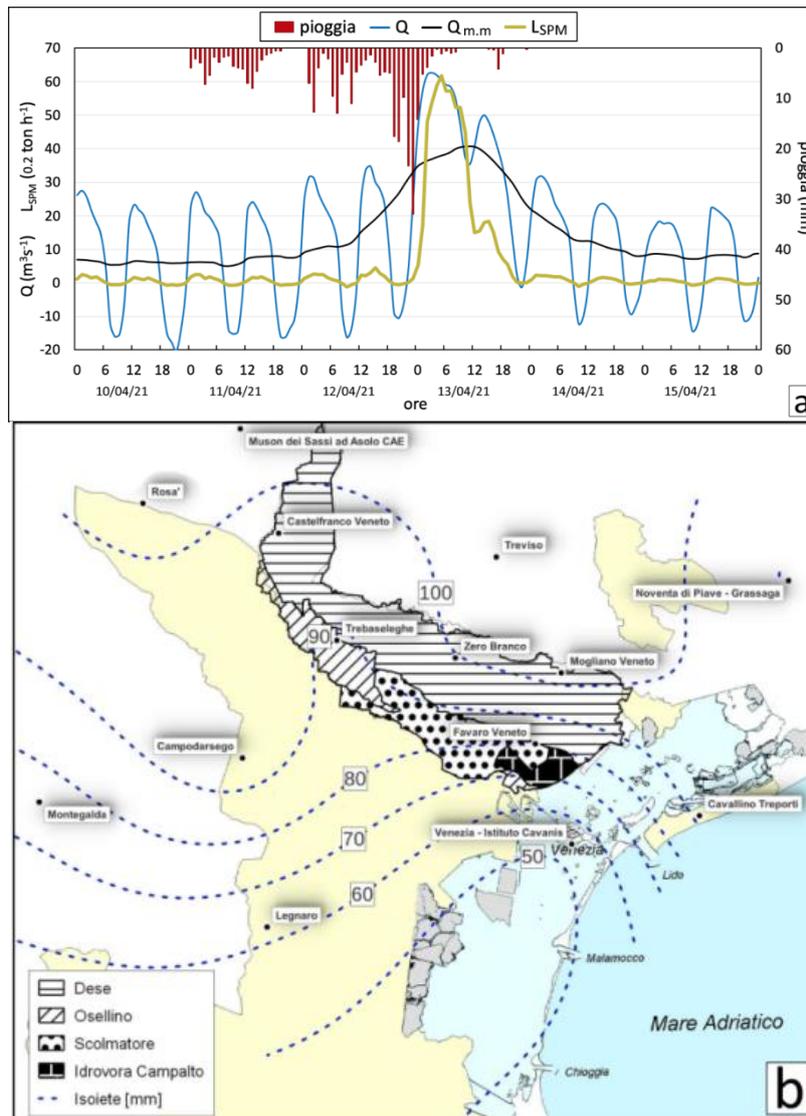


Figura 1. a) Idrogramma di piena dell'evento del 13 aprile 2021, sul Fiume Dese. Andamenti orari della portata ( $Q$ ) e della sua media mobile ( $Q_{m.m.}$ , intervallo di 25 ore del dato orario). È sovrapposto un indice di pioggia costituito dalla somma delle precipitazioni registrate nelle stazioni pluviometriche di Castelfranco, Zero Branco e Mogliano Veneto; b) mappa delle isoiete dell'evento di precipitazione.

### 2.2 Effetto delle chiusure del sistema MOSE sull'idrodinamica dei due tributari

Le chiusure del sistema MOSE hanno un impatto sull'idrodinamica locale dei due tributari: nelle sezioni di misura, si osservano una diminuzione del livello idrico ( $\Delta m$ ) e una crescita della  $Q$  ( $\Delta Q$ ), in un breve transiente  $\Delta t$  (Fig. 2). Nel Canale Osellino, il  $\Delta m$  determina una velocità di variazione della  $Q$  ( $\Delta Q/\Delta t$ ) circa 10 volte superiore rispetto alle situazioni che si verificano abitualmente nella sezione ed un aumento più o meno

significativo della concentrazione di SPM. Nel Fiume Dese, l'effetto della chiusura si registra con un maggiore ritardo, producendo  $\Delta m$  significativamente inferiori e minori effetti sulla Q.

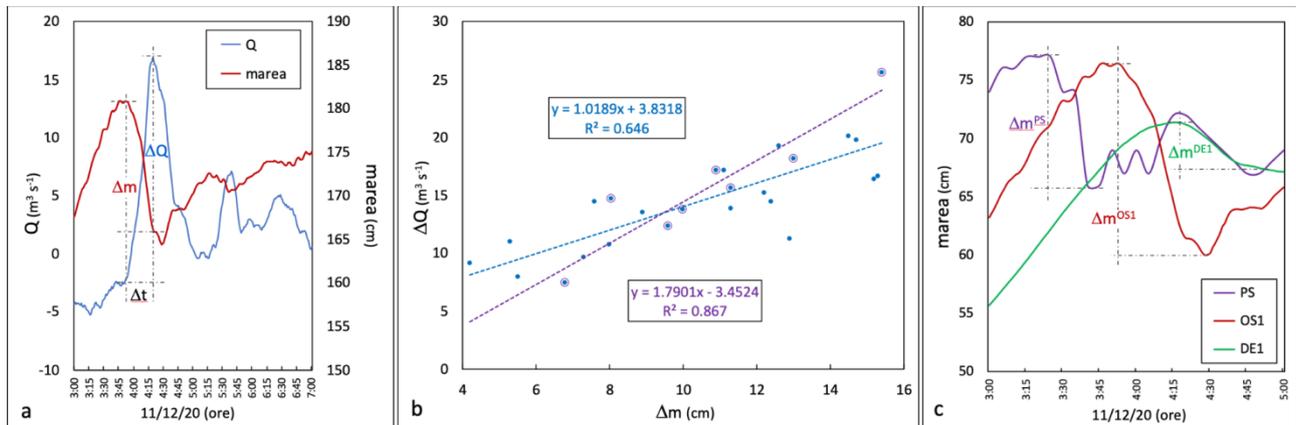


Figura 2. a) Esempio dell'effetto della chiusura del sistema MOSE sui valori di Q nella sezione OS1; b) diagramma di regressione fra  $\Delta Q$  e  $\Delta m$  relativo a 25 eventi di chiusura. I dati cerchiati in viola corrispondono alle situazioni con vento di intensità  $\geq 4$  (scala di Beaufort); c) transiente di diminuzione del livello idrico nell'Osellino (OS1), nel Dese (DE1) e a Punta Salute (PS).

### 2.3 Morfologia dei sistemi di foce

In entrambi i sistemi di foce si osservano delle "distorsioni" morfologiche, che ostacolano il diffondersi del particolato verso la laguna aperta e facilitano - all'opposto - l'ostruzione delle morfologie tipiche dell'interfaccia terra-laguna (Fig. 3). In particolare, gli alvei di entrambi i tributari mostrano segnali di rapido interrimento in prossimità della foce, con conseguenti difficoltà per la navigazione, e nel caso del Dese fenomeni erosivi che producono marcate asimmetrie nelle sezioni idrauliche. Il quadro morfologico acquisito nei due sistemi pone l'accento sulla necessità di pianificare opportuni interventi di manutenzione degli alvei.

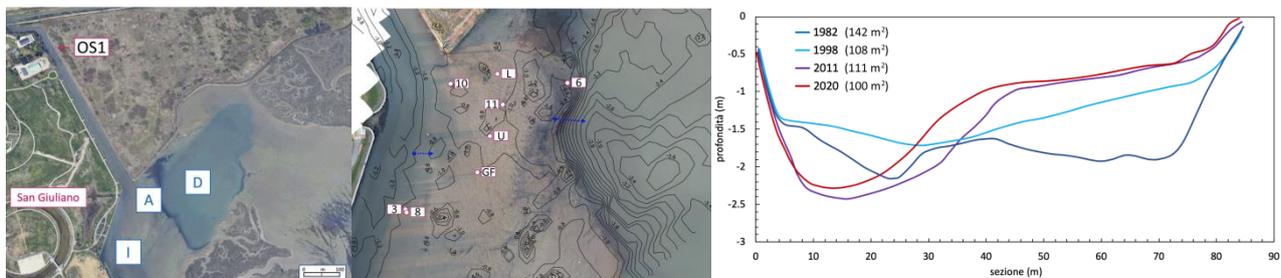


Figura 3. sinistra) Area di foce dell'Osellino: alveo interrato (I), accumulo laterale di sedimento (A), depressione del fondo (D); centro) dettaglio dell'accumulo laterale (A), con sovrapposte le linee batimetriche; destra) diminuzione nel tempo della sezione liquida nella stazione DE2 sul fiume Dese, nel periodo 1982 - 2020.

### 3. Spunti per il futuro

Le attività di misura in continuo della portata e del carico solido con la strumentazione autoregistrante tuttora installata nel canale Osellino (sezione OS1) e nel fiume Dese (sezione DE1) andrebbero proseguite, per dare continuità alle serie temporali acquisite. Per quanto riguarda il Canale Osellino, si ricorda che questo tributario non rientra fra quelli monitorati con la rete flussometrica del Provveditorato OO.PP. per la misura della portata dei tributari del bacino scolante. Inoltre, dal centro di Mestre alla foce (ed incluso il Canale San Giuliano - Tessera), l'Osellino è attualmente oggetto di un rilevante intervento morfologico e continuare l'acquisizione di dati in continuo alla foce sarebbe utile per valutare gli effetti dell'intervento nel quadro ambientale generale. La sezione sul Fiume Dese, invece, è ubicata a valle di due stazioni di misura della rete

flussometrica, rispettivamente sul Fiume Zero e sullo stesso Dese. Tuttavia - a differenza delle sezioni a monte - la strumentazione installata permette la misura del trasporto solido, che è un dato importante per la conoscenza e la gestione del sistema lagunare. A tale proposito, si auspica che anche la rete flussometrica possa iniziare ad acquisire questa tipologia di dati. La disponibilità di valori di Q e SPM registrati in continuo in alcune stazioni di riferimento permetterebbe di utilizzare più concretamente le immagini satellitari per valutare la dispersione in laguna del particolato originato dal bacino scolante.

Un secondo tema incentrato sulla salvaguardia dei sistemi di foce lagunari è quello del controllo delle batimetrie in sezioni di riferimento, da effettuarsi con periodicità prestabilita e/o in seguito ad eventi di piena rilevanti. Grazie alla strumentazione single beam (installata su supporti autonomi per la misura in ambienti super-shallow) questa tipologia di misure può essere effettuata in tempi relativamente brevi e può permettere l'indagine di processi morfologici dinamici all'interfaccia terraferma-laguna. Questa attività può essere accompagnata dal prelievo *ad hoc* di carote di sedimento, per indagini strutturali e di proxy della contaminazione.

Un ultimo punto riguarda gli oltre 400 campioni di particolato sospeso raccolti con le trappole per sedimento (conservati sia in forma umida che essiccata) che costituiscono un segnale integrato - su base circa mensile - del trasferimento di inquinanti dai due sottobacini alla laguna. Potrebbe essere interessante selezionarne una parte, sulla base del dataset dei valori di Q,  $L_{SPM}$  e precipitazione, da analizzare per il contenuto di alcuni contaminanti prioritari (ed eventualmente emergenti).

## DESCRIZIONE ESTESA

### 4. Descrizione delle attività

#### Attività di campo, strumentazione, acquisizione dati fisici e chimico-fisici

Sono state allestite 3 stazioni di misura correntometriche autoregistranti, una nel canale Osellino (OS1) il giorno 28 agosto 2019 e due nel fiume Dese (DE1 e DE4), rispettivamente il 27 novembre 2020 ed il 21 luglio 2020 (Fig. 4). In OS1 e in DE1 la strumentazione comprende un sensore di misura della velocità OTT SLD – 1 MHz/25m dotato di sensore di livello ceramico OTT PLS (Corr-Tek Idrometria Srl). In DE4 è stato installato un correntometro acustico Channel Master H-ADCP 1200 kHz (Teledyne RD Instruments). Gli strumenti sono in grado di indagare l'intera sezione di misura e di acquisire e trasmettere dati correntometrici e di *backscatter* acustico tramite una centralina alimentata da pannello solare a terra. La stazione di misura in DE1 è stata allestita in sostituzione di due correntometri elettromagnetici autoregistranti (S4, InterOcean Systems) installati in precedenza (25 settembre 2019) che hanno dato luogo a diversi malfunzionamenti e avarie. La strumentazione impiegata è della stessa tipologia di quella della rete flussometrica di misura delle portate, gestita dal Consorzio Venezia Nuova per conto del Provveditorato OO.PP. sui canali e fiumi Dese, Zero, Sile, Silone, Lusore, Lova, Cuori e Bondante.

Sono state effettuate 7 campagne di misura nel canale Osellino e 8 nel fiume Dese, in differenti condizioni di marea e di deflusso, sia nelle sezioni dei due tributari allestite con strumentazione autoregistrante che in altre sezioni di interesse (Fig. 4). Le misure hanno riguardato il flusso idrico (profilatore acustico Doppler ADCP, *vessel-mounted*) e le variabili chimico-fisiche nella colonna d'acqua (temperatura, salinità, conducibilità e torbidità - sonda multiparametrica Idronaut CTD OS 316 Plus). Nelle sezioni con strumentazione autoregistrante, queste misure hanno permesso di calibrare i dati di portata acquisiti in continuo, con il metodo della velocità indice (WMO, 2010<sup>1</sup>). Inoltre è stato misurato il trasporto solido, attraverso il prelievo di campioni d'acqua per la determinazione della concentrazione e delle caratteristiche dimensionali del particolato sospeso. Queste analisi hanno permesso di calibrare i dati di *backscatter* acquisiti con l'ADCP *vessel-mounted* e con i correntometri installati nelle stazioni autoregistranti.

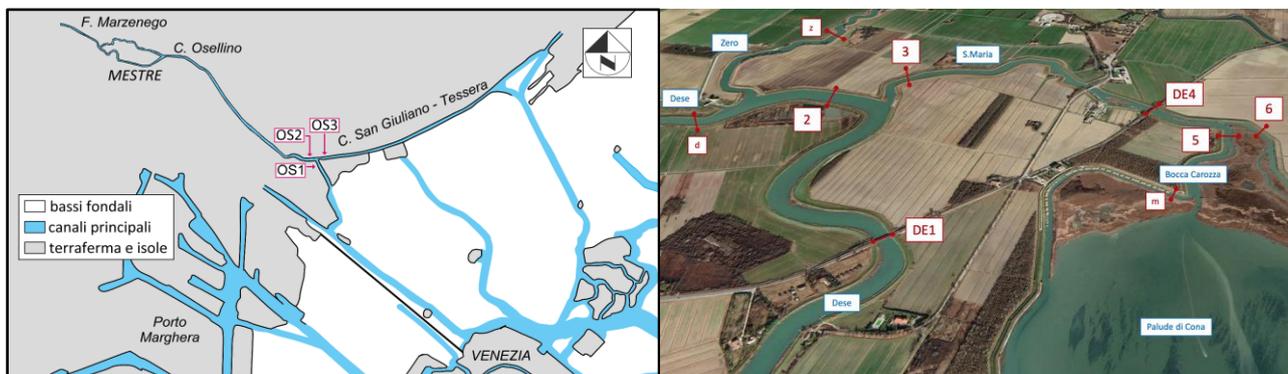


Figura 4. Sezioni di interesse indagate durante le campagne di misura idrodinamiche nell'area di foce del canale Osellino (sinistra) e del fiume Dese (destra).

Nello studio del trasporto solido, è stato sperimentato anche l'utilizzo di trappole per sedimento per la misura della sedimentazione (apparente) in vari siti nei sistemi di foce. Le uscite per la raccolta dei campioni di particolato sedimentato nelle trappole sono state svolte con periodicità circa mensile in entrambi gli apparati di foce, da settembre 2019 a dicembre 2021; il numero di siti investigati è stato aumentato nel tempo. L'ubicazione e la nomenclatura dei siti di misura e un esempio di trappola sono mostrati in Fig. 5.

<sup>1</sup> WMO (2010). World Meteorological Organization. Manual on stream gauging. WMO No. 1044, pp. 252.



Figura 5. Ubicazione e nomenclatura dei siti prevalentemente utilizzati per le trappole per sedimenti, nel sistema Osellino (sinistra) e Dese (centro). Tipologia utilizzata di trappola per sedimenti (destra).

Due serie di carote di sedimenti sono state raccolte, nei mesi di maggio 2019 e marzo 2021, negli apparati di foce del canale Osellino e del fiume Dese (Fig. 6), utilizzando un carotiere in acciaio del tipo “a siringa” e liner in Plexiglas. Il prelievo effettuato nel mese di maggio 2019 ha avuto carattere esplorativo. Nel mese di marzo 2021, sono state raccolte 12 carote nel sistema Osellino (di lunghezza da 33 a 42 cm) e 16 carote nel sistema Dese (di lunghezza da 35 a 51 cm), ad integrazione e completamento dell’indagine.



Figura 6. Ubicazione e nomenclatura dei siti di prelievo di carote di sedimenti nei sistemi Osellino (sinistra) e Dese (destra) - marzo 2021.

In entrambi i sistemi sono state svolte indagini batimetriche utilizzando il veicolo autonomo di superficie OpenSwap. La batimetria del canale Osellino e della sua foce (Fig. 7, sinistra) è stata misurata nel mese di aprile 2019, con un’accuratezza spaziale di 5 m. Nel mese di gennaio 2020, sono state acquisite ortofoto ad alta risoluzione di un tratto del canale San Giuliano - Tessera per mezzo di un aeromobile a pilotaggio remoto DJI SPARK con sensore ottico da 1/2.3” e obiettivo 25 mm f/2.6. Con le ortofoto è stato prodotto un Digital Surface Model (DSM) in ambiente GIS, grazie al quale è stato possibile estrarre la batimetria delle sezioni dell’alveo (Fig. 7, destra).

Nell’apparato di foce del fiume Dese sono stati eseguiti tre rilievi batimetrici. Un tratto dell’alveo principale, dalla stazione di acquisizione in continuo DE1 verso la diramazione del canale di Santa Maria (Fig. 8, sinistra, 1) nel mese di ottobre 2019. Un rilievo batimetrico del tratto finale della Bocca Carozza e dei bassi fondali contigui della Palude di Cona (Fig. 8, sinistra, 2) è stato eseguito nei giorni 29-30 settembre 2020. Infine, una serie di sezioni di particolare interesse (ad esempio, per l’indagine con trappole per sedimenti) sono state rilevate il 17 dicembre 2020 (Fig. 8, sinistra).

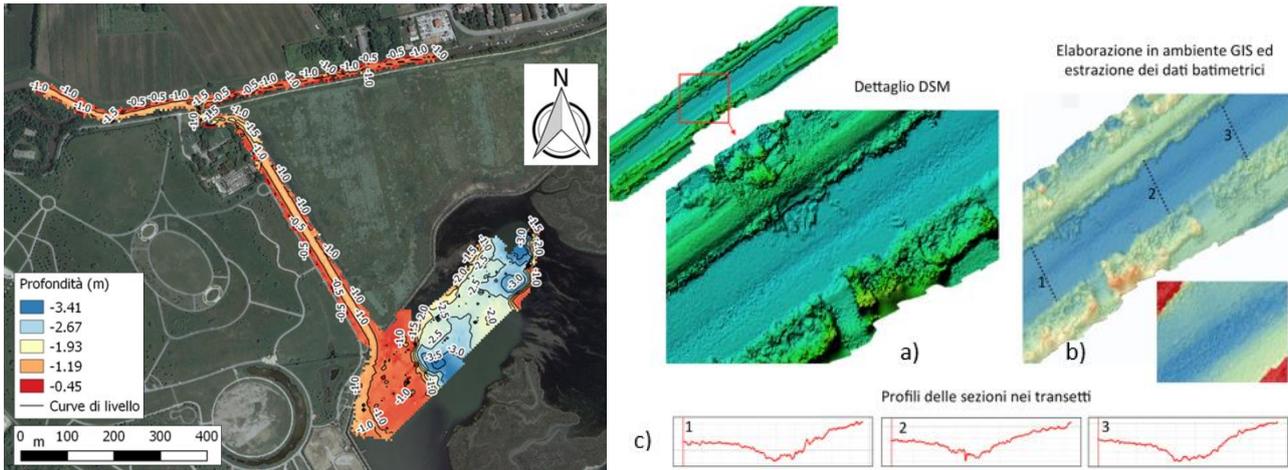


Figura 7. Sinistra): rilievo batimetrico del Canale Osellino e della sua foce; destra): esempio di a) utilizzo del Digital Surface Model (DSM) e b) dell’elaborazione in ambiente GIS per estrarre c) la batimetria di tre sezioni dell’alveo.

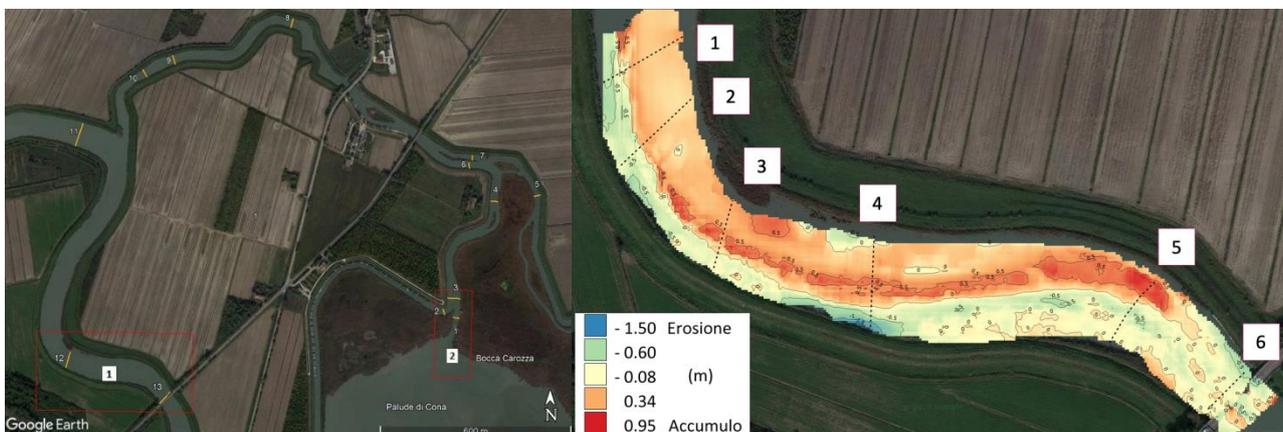


Figura 8. Sinistra): settori (1, 2) e sezioni oggetto di rilievi batimetrici nella foce del Fiume Dese; destra): variazioni batimetriche intercorse fra il 2012 e il 2019 in un tratto dell’alveo (settor 1, a sinistra).

### Analisi del sedimento e del particolato sospeso

Le carote di sedimento sono state analizzate preliminarmente in Tomografica Computerizzata (*CT-scan*), nello stato di prelievo, producendo sia immagini utili al sub-campionamento e all’interpretazione dei dati, sia profili numerici del *CT-number* (Zonta et al., 2021<sup>2</sup>).

I campioni prodotti dal sub-campionamento delle carote sono stati successivamente trattati e analizzati per determinare il contenuto d’acqua, la porosità, le caratteristiche dimensionali e la concentrazione di differenti analiti (Fe, Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn, P, TN, OC, TC).

Nei campioni d’acqua prelevati nelle sezioni di misura principali e secondarie è stata determinata la concentrazione del particolato sospeso (metodica IRSA CNR, Quaderno 100/2050/94) e lo spettro dimensionale (LISST-100X).

<sup>2</sup> Zonta R, Fontolan G, Cassin D, Dominik J. (2021) X-ray Computed Tomography as a Tool for Screening Sediment Cores: An Application to the Lagoons of the Po River Delta (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering* 9(3):323. doi: 10.3390/jmse9030323

I campioni di particolato raccolti con le trappole per sedimento sono stati trattati per determinare il tasso di sedimentazione; inoltre, in ciascun campione è stato determinato un proxy del contenuto percentuale di materia organica (LOI, loss on ignition).

#### Elaborazione e interpretazione dei dati

Il primo passaggio dell'elaborazione dati è stata la calibrazione delle sezioni di misura attrezzate con strumentazione autoregistrante, sia per la Q che per la SPM. Le relazioni di calibrazione sono state affinate nel tempo, per entrambe le variabili. Su tale base, sono state ottenute le serie temporali di portata (Metodo della velocità indice, WMO, 2010), di concentrazione del particolato solido sospeso (SAID tool, Domanski et al., 2015<sup>3</sup>) e quindi di carico solido ( $L_{SPM}$ ).

Preliminarmente all'elaborazione delle serie temporali di Q e  $L_{SPM}$ , è stata effettuata un'analisi degli eventi di precipitazione, grazie ai dati orari registrati in 16 stazioni pluviometriche forniti da ARPAV, che è stata necessaria per valutare il comportamento del deflusso nelle sezioni di misura. Questa analisi è servita anche a caratterizzare il periodo di studio rispetto ai livelli di precipitazione annuali degli anni precedenti, a partire dal 1995.

In ambiente GIS, attraverso l'analisi spaziale dei dati di pioggia, sono stati determinati gli afflussi quindicinali e mensili sui sottobacini, necessari per l'analisi afflussi-deflussi; quest'ultima è stata interpretata in riferimento alla regolazione del deflusso operata dagli Enti gestionali e all'apporto di acque che provengono dall'esterno dei sottobacini. L'analisi GIS ha inoltre consentito di caratterizzare gli eventi di piena occorsi nei due tributari.

Le serie temporali acquisite dalla strumentazione autoregistrante sono state utilizzate per la stima della Q media e del  $L_{SPM}$  annuali. Sulla stessa base di dati, sono stati individuati ed analizzati gli eventi di piena occorsi durante il periodo di studio e stimata la loro incidenza annuale, sia sulla portata che sul carico solido. Le stime prodotte dallo studio sono state confrontate con quelle prodotte per l'anno 1999 (progetto DRAIN).

Le serie temporali succitate sono state utilizzate anche per caratterizzare i periodi di misura scanditi dal prelievo dei campioni raccolti con le trappole per sedimento, in termini di piovosità, Q media e  $L_{SPM}$ . Questi dati sono stati posti in relazione con i valori della sedimentazione media (apparente,  $\text{kg m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ), calcolata dai dati analitici ottenuti con l'impiego delle trappole per sedimento.

I dati correntometrici e chimico-fisici acquisiti nelle sezioni secondarie sono stati contestualizzati nelle serie temporali di Q e SPM e utilizzati per descrivere la circolazione nei due sistemi di foce, in particolari condizioni di marea. Nel caso del sistema Dese, la disponibilità di dati in serie temporale di Q e SPM acquisiti in una seconda sezione (DE4) ha permesso di ottenere informazioni utili per lo studio della circolazione di estuario, in particolare sulla ripartizione dei deflussi (e del trasporto solido) tra l'alveo principale del Fiume Dese e il Canale di Santa Maria.

I dati acquisiti con le misure batimetriche sono stati elaborati in ambiente GIS, per produrre mappe batimetriche e la morfologia bidimensionale di tutte le sezioni di interesse. I dati batimetrici sono stati confrontati con dati pregressi (ove disponibili).

I dati analitici ottenuti dalle carote di sedimento sono stati elaborati per singolo profilo e per aree di interesse e i livelli di concentrazione dei contaminanti prioritari sono stati valutati rispetto le linee guida nazionali e internazionali.

---

<sup>3</sup> Domanski M.M., Straub T.D. and Landers M.N. (2015). *Surrogate Analysis and Index Developer (SAID) Tool*. No. 2015-1177. US Geological Survey. doi: 10.3133/ofr20151177

## 5. Risultati per attività

Uno dei principali problemi della Laguna di Venezia sono i processi erosivi, via via intensificatisi nell'ultimo secolo, che comportano un approfondimento del sistema e un impoverimento della *morfo diversità*, con una perdita generale di sedimenti che dalle zone poco profonde vengono trasferiti ai canali lagunari e al Mare Adriatico (Zonta et al., 2018<sup>4</sup>). Gli effetti a lungo termine degli interventi morfologici operati in laguna e dell'uso dell'ambiente da parte dell'uomo sono stati un progressivo aumento della profondità media dell'acqua, l'erosione delle velme, la contrazione della superficie delle barene, l'interrimento dei canali di marea secondari e dei *ghebbi* (es.: Day et al., 1999<sup>5</sup>; Carniello et al., 2009<sup>6</sup>; Madricardo and Donnici, 2016<sup>7</sup>; Sarretta et al., 2010<sup>8</sup>).

Stime del bilancio sedimentario della laguna sono state effettuate con studi modellistici (Tambroni and Seminara, 2006<sup>9</sup>) e approcci basati sull'analisi delle variazioni batimetriche (Pillon et al., 2003<sup>10</sup>; Magistrato alle Acque di Venezia e Technital, 2007<sup>11</sup>; Sarretta et al., 2010). Per quanto riguarda gli scambi laguna - mare, le osservazioni sperimentali più recenti sono state condotte da Defendi et al. (2010)<sup>12</sup> con misure di idrodinamica alle bocche di porto; i risultati indicano una tendenza generale alla perdita di sedimenti, con un valore complessivo di  $572 \cdot 10^3$  t anno<sup>-1</sup>. La perdita più importante avviene attraverso la bocca di porto di Lido ( $384 \cdot 10^3$  t anno<sup>-1</sup>, 67%), quindi attraverso quella di Chioggia ( $140 \cdot 10^3$  t anno<sup>-1</sup>, 25%) e infine attraverso quella di Malamocco ( $48 \cdot 10^3$  t anno<sup>-1</sup>, 8%). La loro stima di trasferimento di sedimenti dalla laguna al Mare Adriatico nel periodo 2004 - 2007 è pari a  $0.381$  Mm<sup>3</sup> anno<sup>-1</sup>, ed è meno della metà di quella di Sarretta et al. (2010), che hanno stimato una perdita di ca.  $0.8$  Mm<sup>3</sup> anno<sup>-1</sup> nel periodo 1970-2002 sulla base delle differenze batimetriche (Zonta et al., 2018).

---

<sup>4</sup> Zonta R., Botter M., Cassin D., Bellucci L.G., Pini R., Dominik J. (2018). Sediment texture and metal contamination in the Venice Lagoon (Italy): A snapshot before the installation of the MOSE system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 205, 131-151. doi: 10.1016/j.ecss.2018.03.007

<sup>5</sup> Day J.W., Rybczyk J., Scarton F., Rismondo A., Are D., Cecconi G. (1999). Soil accretionary dynamics, sea-level rise and the survival of wetlands in Venice Lagoon: a field and modelling approach. *Estuar. Coast Shelf Sci.*, 49, 607-628. doi: 10.1006/ecss.1999.0522

<sup>6</sup> Carniello L., Defina A., D'Alpaos L. (2009). Morphological evolution of the Venice lagoon: evidence from the past and trend for the future. *J. Geophys. Res.*, 114, F04002. doi: 10.1029/2008JF001157

<sup>7</sup> Madricardo F., Donnici S. (2014). Mapping past and recent landscape modifications in the Lagoon of Venice through geophysical surveys and historical maps. *Anthropocene*, 6, 86-96. doi: 10.1016/j.ancene.2014.11.001

<sup>8</sup> Sarretta A., Pillon S., Molinaroli E., Guerzoni S., Fontolan G. (2010). Sediment budget in the lagoon of Venice, Italy. *Continental Shelf Res.*, 30, 934-949. doi: 10.1016/j.csr.2009.07.002

<sup>9</sup> Tambroni N. & Seminara G. (2006). Are inlets responsible for the morphological degradation of Venice Lagoon? *Journal of Geophysical Research*, 111, F03013, doi: 10.1029/2005JF000334.

<sup>10</sup> Pillon S., Fontolan G., Bezzi A., Burla I., Tessari U., Simeoni U., Zamariolo A., Tromellini E., Gabellini M. (2003). A GIS-based morphological evolution of the Venice Lagoon. In: Proc. VI International Conference on Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST03, 2, pp. 1269-1280.

<sup>11</sup> Magistrato alle Acque di Venezia e Technital (2007). Studio C.2.10/III-Attività di aggiornamento del piano degli interventi per il recupero morfologico in applicazione della delibera del Consiglio dei Ministri del 15.03.01. Studi integrativi. Rapporto finale - Modello morfologico a maglia curvilinea. Relazione di sintesi. Prodotto dal Concessionario, Consorzio Venezia Nuova.

<sup>12</sup> Defendi V., Kovačević V., Arena F., & Zaggia L. (2010). Estimating sediment transport from acoustic measurements in the Venice Lagoon inlets. *Continental shelf research*, 30(8), 883-893. doi: 10.1016/j.csr.2009.12.004

Il carico di particolato trasferito alla laguna dal bacino scolante attraverso i tributari di acqua dolce (Zonta et al., 2005a<sup>13</sup>, Zuliani et al., 2005<sup>14</sup>) è stato stimato, per l'anno 1999, pari a  $33.5 \cdot 10^3 \text{ t anno}^{-1}$  (Collavini et al., 2005<sup>15</sup>), che corrisponde a circa il 6% delle perdite di sedimento stimate attraverso le bocche di porto. Sebbene tale percentuale sia un contributo molto piccolo nel bilancio dei processi che determinano l'approfondimento dei fondali lagunari, il particolato proveniente dal bacino scolante è potenzialmente fondamentale per contrastare l'impovertimento della *morfodiversità* lagunare nelle aree all'interfaccia con la terraferma, dove sono ancora presenti le tipiche morfologie dei bassi fondali (paludi, barene, *ghebbi*).

Il bacino idrografico scolante in laguna (superficie di ca. 2038 km<sup>2</sup>, con una popolazione di circa 10<sup>6</sup> abitanti) comprende alcuni importanti centri urbani, attività zootecniche e agricole (circa il 70% della superficie è coltivata), nonché distretti industriali di medio-piccole dimensioni. È costituito da un insieme di sottobacini affluenti che hanno caratteristiche morfologiche ed estensione diverse (Zonta et al., 2005a). Sebbene sia costituito principalmente da una pianura alluvionale a bassa pendenza, la parte settentrionale del bacino appartiene alla pedemontana veneta dove un allineamento di risorgive dà origine al Fiume Marzenego (che diviene Canale Osellino, in corrispondenza dell'abitato di Mestre) ed al Fiume Dese (e ad altri fiumi: Meolo, Sile, Vallio). Questi corsi idrici sono essenziali per l'equilibrio della laguna in quanto forniscono un apporto permanente di acqua dolce, sostanzialmente indipendente dal regime delle precipitazioni e assicurato anche nei periodi più seccitosi.

Attraverso vari collettori, acque di altri canali possono temporaneamente essere convogliate nell'Osellino e nel Dese. In generale, vari aspetti legati alla gestione idraulica del sistema - quali derivazioni continue ed occasionali, interconnessioni tra affluenti vicini - introducono un fattore dinamico sulla morfologia della rete idraulica; questo limita l'identificazione dell'effettiva superficie che contribuisce all'afflusso e al deflusso. In particolare, in situazioni di magra e durante i periodi irrigui, i due corpi idrici possono ricevere un contributo al deflusso da un territorio esterno (parte dei Colli Asolani) attraverso il nodo idraulico di Castelfranco (Nordest Ingegneria, 2018<sup>16</sup>).

#### Portata e carico solido

Alla base dello studio svolto dalla Linea 1.2 c'è stata l'acquisizione in continuo di dati di portata ( $Q$ , m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) e di concentrazione di particolato sospeso (SPM, mg L<sup>-1</sup>) in una sezione del Canale Osellino (OS1) e del Fiume Dese (DE1), all'interno del sistema di foce (Fig. 4). Nelle due sezioni sono state allestite delle stazioni di misura autoregistranti, che sono state "calibrate" attraverso misure puntuali.

I valori di  $Q$  e SPM sono stati acquisiti in continuo per periodi superiori ai 12 mesi (dal 28/08/19 al 30/06/22 in OS1 e dal 27/11/20 al 30/06/20 in DE1, sebbene con alcune interruzioni) ed hanno quindi permesso di stimare i valori medi annuali di  $Q$  e di carico solido ( $L_{SPM}$ , t). Nel caso del Canale Osellino le stime hanno prodotto i seguenti valori:  $Q = 1.99 \pm 0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $L_{SPM} = 2537 \pm 208 \text{ t anno}^{-1}$ . Nel caso del Fiume Dese hanno invece prodotto i seguenti valori:  $Q = 6.75 \pm 0.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $L_{SPM} = 13308 \pm 927 \text{ t anno}^{-1}$ . Per quest'ultima stima, non è stata considerata l'incidenza di un evento di piena (13/04/21) che ha prodotto un carico solido giornaliero pari a 3193 t.

---

<sup>13</sup> Zonta R., Costa F., Collavini F., Zaggia L. (2005a). Objectives and structure of the DRAIN project: an extensive study of the delivery from the drainage basin of the Venice Lagoon (Italy). *Environ. Int.* 31, 923-928. doi: 10.1016/j.envint.2005.05.002

<sup>14</sup> Zuliani A., Zaggia L., Collavin, F. & Zonta R. (2005). Freshwater discharge from the drainage basin to the Venice Lagoon (Italy). *Environment International*, 31(7), 929-938. doi: 10.1016/j.envint.2005.05.004

<sup>15</sup> Collavini F., Bettiol C., Zaggia L., Zonta R. (2005). Pollutant loads from the drainage basin to the Venice Lagoon (Italy). *Environ Int.*, 31, 939-947. doi: 10.1016/j.envint.2005.05.003

<sup>16</sup> Nordest Ingegneria, 2018. Piano delle Acque del Comune di Castelfranco Veneto - Relazione generale, 62-71.

## Analisi delle precipitazioni

L'analisi delle precipitazioni (realizzata grazie a dati resi disponibili da ARPAV) ha evidenziato come il 2019 sia stato un anno più piovoso rispetto alla media storica degli ultimi 25 anni, mentre il biennio 2020 - 2021 sia stato leggermente al di sotto della media (Fig. 9). Nel primo semestre del 2022, invece, le piogge sono risultate decisamente inferiori ai valori passati.

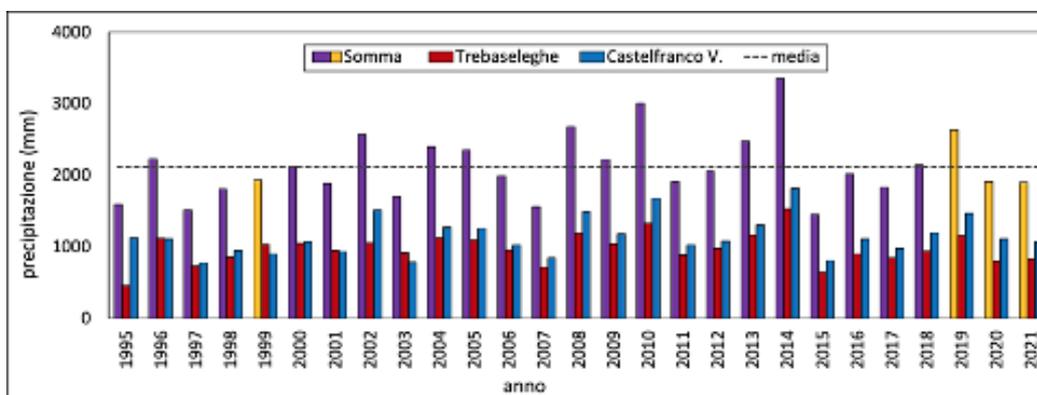


Figura 9. Sottobacino dell'Osellino. Altezza pluviometrica annuale registrata nelle stazioni di Trebaseleghe e di Castelfranco Veneto nel periodo 1995 – 2021 e somma dei due valori. La media dei valori per l'intero periodo è sovrapposta. Sono evidenziati con una differente colorazione i valori di somma degli anni 2019 – 2021 e, per confronto, il valore registrato nel 1999.

Il confronto mensile (Fig. 10) tra i volumi di pioggia caduti sul sottobacino (afflussi) e i volumi d'acqua trasferiti alla laguna dal tributario (deflussi) fornisce informazioni importanti sul comportamento del sottobacino e sugli effetti della regolazione del deflusso eventualmente operata nel sottobacino per lo sfruttamento della risorsa idrica e la protezione del territorio. La Tabella 1 riporta i valori del coefficiente di deflusso medio mensile ( $\delta_m$ ) nei due tributari per il periodo di misura e - per confronto - per l'anno 1999; tale coefficiente è dato dal rapporto fra il volume d'acqua defluito in laguna attraverso le sezioni di misura (OS1 e DE1) e il volume dell'acqua precipitata nel rispettivo sottobacino.

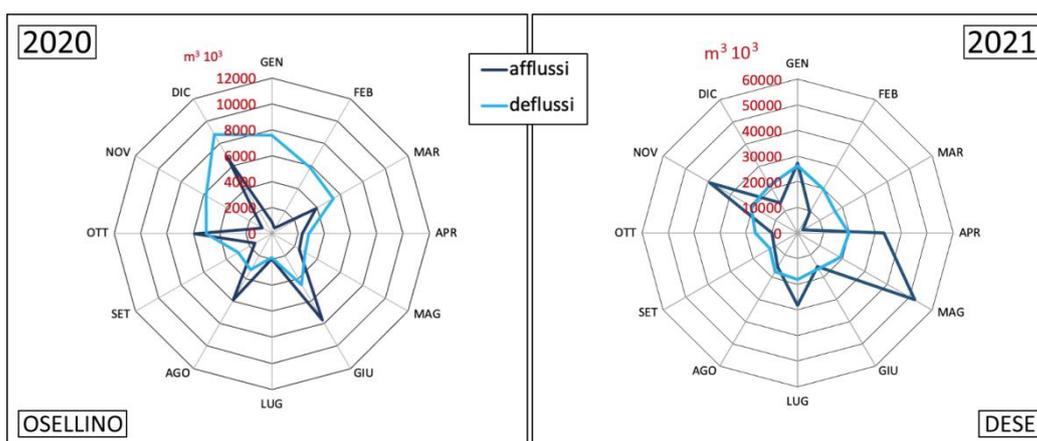


Figura 10. Confronto mensile tra afflussi e deflussi per il sottobacino dell'Osellino (2020) e del Dese (2021).

Tabella 1. Coefficienti di deflusso mensile determinati nel corso del periodo di misura, per il Canale Osellino (sopra) e per il Fiume Dese (sotto). Per confronto, sono mostrati i valori relativi al 1999. (\*) valori da agosto a novembre non conteggiati nel totale.

OSELLINO	1999			2019			2020			2021			2022		
	MESE	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$
GEN	2571	1893	1.4	-	-	-	7582	929	8.2	10049	4632	2.2	7066	1379	5.1
FEB	2217	1063	2.1	-	-	-	5840	457	12.8	6824	1437	4.7	4531	1517	3.0
MAR	2832	2932	1.0	-	-	-	5375	3881	1.4	5588	405	13.8	4682	479	9.8
APR	5230	5164	1.0	-	-	-	2819	2311	1.2	6641	4907	1.4	4135	3014	1.4
MAG	1888	3235	0.6	-	-	-	2900	2427	1.2	8703	9184	0.9	3661	2520	1.5
GIU	5116	8187	0.6	-	-	-	4560	7673	0.6	4642	2248	2.1	2412	1589	1.5
LUG	2890	4361	0.7	-	-	-	1874	1987	0.9	5102	5776	0.9	-	-	-
AGO	2741	3286	0.8	-	-	-	3247	5881	0.6	-	2527	-	-	-	-
SET	2337	2498	0.9	4324	3478	1.2	2961	1519	1.9	-	1805	-	-	-	-
OTT	5032	6770	0.7	4581	2454	1.9	4996	5883	0.8	-	1400	-	-	-	-
NOV	8989	7160	1.3	8008	10346	0.8	5801	869	6.7	-	5614	-	-	-	-
DIC	4362	2950	1.5	10858	4596	2.4	8809	6777	1.3	6128	2133	2.9	-	-	-
MEDIA	3850	4125	0.9	6943	5219	1.3	4730	3383	1.4	6710	3840	1.7	4414	1750	2.5
TOTALE	46205	49498		27770	20875		56765	40594		53678	30722 (*)		26486	10497	

DESE	1999			2019			2020			2021			2022		
	MESE	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$	$\delta$	Deflusso $m^3 \cdot 10^3$	Afflusso $m^3 \cdot 10^3$
GEN	20299	10030	2.0	-	-	-	-	-	-	26192	27168	1.0	18339	8724	2.1
FEB	16647	5470	3.0	-	-	-	-	-	-	19733	9244	2.1	15425	6981	2.2
MAR	14710	14885	1.0	-	-	-	-	-	-	16724	2302	7.3	13995	3725	3.8
APR	24906	31373	0.8	-	-	-	-	-	-	19788	33243	0.6	15880	19566	0.8
MAG	16843	11527	1.5	-	-	-	-	-	-	19137	52129	0.4	15987	14824	1.1
GIU	18399	38023	0.5	-	-	-	-	-	-	16193	15254	1.1	16175	6493	2.5
LUG	15636	29019	0.5	-	-	-	-	-	-	18218	28273	0.6	-	-	-
AGO	15218	14396	1.1	-	-	-	-	-	-	17528	15402	1.1	-	-	-
SET	14706	10750	1.4	-	-	-	-	-	-	12298	10581	1.2	-	-	-
OTT	17276	27301	0.6	-	-	-	-	-	-	16262	9817	1.7	-	-	-
NOV	34677	31343	1.1	-	-	-	-	-	-	20652	39084	0.5	-	-	-
DIC	26174	16447	1.6	-	-	-	27463	36529	0.8	21487	13490	1.6	-	-	-
MEDIA	19624	20047	1.3							18684	21332	1.6	15967	10052	2.1
TOTALE	235491	240563								224212	255987		95801	60313	

Nel 1999, si è osservato un sostanziale equilibrio tra afflussi e deflussi, con un coefficiente  $>1$  nei mesi freddi e  $<1$  in quelli più caldi. Durante il periodo di questo studio, invece, il  $\delta_m$  mostra una media elevata ed una rilevante variabilità soprattutto per l'Osellino ( $3.2 \pm 3.6$ ), con valori invernali particolarmente alti (massimi pari a 13.8 per l'Osellino e 7.3 per il Dese). Questo è l'effetto di una maggiore gestione dei deflussi nei due tributari, conseguenza soprattutto di un *Protocollo d'intesa per la gestione idraulica del nodo di Castelfranco* (D.G.R. Regione Veneto n. 845, 3 aprile 2007), che prevede l'immissione di acque dall'esterno dei sottobacini in situazioni di magra e in particolare durante i periodi irrigui, limitando al contempo il deflusso in corrispondenza di eventi di elevata precipitazione (Nordest Ingegneria, 2018).

### Eventi di piena

L'analisi degli eventi di piena è un altro tema importante dello studio del trasferimento alla laguna delle acque dolci e del particolato sospeso. È stata considerata "piena" una situazione in cui il valore di media mobile della Q (calcolata su 25 ore) eccede 1.5 volte il suo valore medio annuale (Fig. 1). Sono stati studiati gli idrogrammi di 13 e 8 eventi di piena occorsi nel periodo di studio, rispettivamente nell'Osellino e nel Dese. Inoltre, è stata valutata l'incidenza degli eventi di piena sul deflusso e sul carico solido annuale. Sul Fiume Dese, il 13 aprile 2021 si è verificato un evento di piena eccezionale, che ha prodotto un  $L_{SPM}$  giornaliero pari a 3193 t (ca. 20% del carico annuale) e che è interessante come caso estremo per il sottobacino. L'evento di piena occorso nell'Osellino, nello stesso periodo, ha comportato un  $L_{SPM}$  giornaliero pari al 4.1% del valore annuale.

### Confronto con stime pregresse

Le stime ottenute sono state confrontate con quelle ottenute per il 1999 nell'ambito del progetto DRAIN (Zonta et al., 2005a), che ha riguardato anche l'analisi delle piogge e lo studio degli eventi di piena (Zaggia et al., 2001<sup>17</sup>; Zonta et al., 2005b<sup>18</sup>, Collavini et al., 2005). La portata media dell'Osellino stimata per l'anno 1999 è stata pari a  $1.47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Zuliani et al., 2005), che rappresentava il 4% della portata dall'intero bacino (pari a  $36.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Il  $L_{\text{SPM}}$  del tributario è stato stimato pari a  $1965 \text{ t anno}^{-1}$ . La portata media del fiume Dese stimata per l'anno 1999 è stata pari a  $7.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Zuliani et al., 2005), che rappresentava il 21.1% della portata dall'intero bacino. Il  $L_{\text{SPM}}$  di questo secondo tributario è stato stimato pari a  $9428 \text{ t anno}^{-1}$ .

Nel confrontare le stime è importante considerare che nei due periodi temporali di riferimento gli afflussi totali di acque meteoriche al sottobacino sono stati sostanzialmente equivalenti (Fig. 5). Tuttavia, non è atteso che anni con afflussi sostanzialmente equivalenti producano un deflusso analogo, sia a causa di differenti distribuzioni e intensità relative delle precipitazioni, sia per la possibilità di immissione nella rete idrica di differenti volumi di acque dall'esterno del sottobacino.

Per l'Osellino, sia la  $Q$  media ( $1.99 \pm 0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) che il  $L_{\text{SPM}}$  ( $2537 \pm 208 \text{ t anno}^{-1}$ ) annuali stimati in questo studio risultano entrambi superiori ai valori stimati nel progetto DRAIN di circa il 30%; la concentrazione di SPM media annuale stimata nelle due indagini è quindi coincidente ( $40.4$  e  $42.4 \text{ mg L}^{-1}$ , rispettivamente). Anche per quanto riguarda l'incidenza degli eventi di piena sul  $L_{\text{SPM}}$ , la percentuale ottenuta in questo studio ( $45.4\%$  su base annuale e  $41.0\%$  per l'intero periodo) corrisponde sostanzialmente a quella prodotta dal progetto DRAIN ( $40.8\%$ ). La differenza fra le due stime è riconducibile alle caratteristiche degli eventi meteorologici che hanno interessato il sottobacino nei due periodi, con differenti rapporti di trasferimento delle precipitazioni all'alveo a causa dei processi di assorbimento del terreno e di evapotraspirazione. Ma soprattutto ad un differente contributo di acqua di provenienza esterna al sottobacino (in particolare attraverso il nodo idraulico di Castelfranco Veneto) e in generale alla gestione del deflusso operata dagli Enti preposti.

Per il Dese, nel confrontare le due stime è importante considerare che le sezioni di misura delle due indagini non corrispondono. Nel caso del progetto DRAIN, infatti, la sezione di misura corrispondeva alla sezione 2 di questo studio (Figura 3), ubicata a monte della sezione DE1 e soprattutto della confluenza con il canale di Santa Maria. Poiché quest'ultimo determina un prelievo netto del flusso idrico dalla sezione 2 e lo convoglia verso Est, è atteso che la  $Q$  nella sezione 2 sia maggiore di quella misurata nella sezione DE1 nell'ambito di questo studio. La stima del  $L_{\text{SPM}}$  annuale ottenuta in questo studio ( $16501 \pm 927 \text{ t anno}^{-1}$ ) è decisamente superiore ( $175\%$ ) a quella ottenuta nel progetto DRAIN, anche nel caso in cui si trascuri nel calcolo l'effetto sul trasporto dell'evento di piena del 13 aprile 2021 ( $141\%$ ). La relazione tra  $Q$  e  $L_{\text{SPM}}$  non necessariamente è attesa riprodursi in anni diversi. La quantità di materiale che in un determinato periodo viene trasferita dal sottobacino alla laguna dipende infatti da vari fattori, non tutti dipendenti dalla  $Q$ . Tuttavia, la differenza fra le due stime può dipendere dalla differente metodologia di misura che le ha prodotte. Nel caso del progetto DRAIN, la misura della concentrazione di SPM avveniva attraverso prelievi periodici di campioni d'acqua, integrati da altri prelievi effettuati in corrispondenza di alcuni eventi di piena. La strumentazione impiegata nel presente studio, invece, consente la misura in continuo del particellato nell'intera sezione di misura, consentendo una stima più accurata del carico solido rispetto al passato.

### Effetti sulle sezioni di misura della chiusura del sistema MOSE

Il 3 ottobre 2020, il sistema MOSE è entrato in funzione alle tre bocche di porto per proteggere Venezia e la laguna dalle inondazioni causate dagli eventi di *acqua alta* nel Mar Adriatico; questa data segna l'inizio di

<sup>17</sup> Zaggia L., A. Zuliani, and R. Zonta (2001). Analysis of rainfall data. In: *DRAIN project workshop "Discussion and presentation of the methods and the main results of the DRAIN project"*. Venice (Italy).

<sup>18</sup> Zonta R., Collavini F., Zaggia L., Zuliani A. (2005b). The effect of floods on the transport of suspended sediments and contaminants: a case study from the estuary of the Dese River (Venice Lagoon, Italy). *Environ Int*, 31 (7), 948-958. doi: 10.1016/j.envint.2005.05.005.

un'era di "flussi regolati" per la Laguna di Venezia. Nel periodo dal 3 Ottobre 2020 al 31 dicembre 2021 si sono verificati 36 eventi di chiusura del sistema MOSE (Provveditorato OO.PP., 2022<sup>19</sup>). Il comportamento idraulico delle sezioni OS1 e DE1 è stato osservato rispettivamente in 25 e in 15 di tali eventi.

Successivamente all'arresto della crescita del livello idrico, conseguente alla chiusura del sistema MOSE, in un transiente  $\Delta t$  nelle sezioni di misura si verifica una rapida diminuzione del livello idrico ( $\Delta m$ ) e una crescita repentina della  $Q$  ( $\Delta Q$ ) (Fig. 2). Queste tre variazioni sono state analizzate, utilizzando le registrazioni acquisite dalla strumentazione ad intervalli di 1 minuto.

Nella sezione OS1, per stabilire un confronto con il comportamento normale in situazioni di calante di marea, sono state considerate 12 situazioni di calante di marea principale in sizige e 12 in quadratura (Tabella 2). Nel transiente  $\Delta t$  osservato durante le chiusure del sistema MOSE si misura un aumento della  $Q$  che è circa 1.5 e 2 volte rispetto a quanto avviene rispettivamente in sizige e quadratura. Da osservare che il valore medio di  $\Delta Q$  pari a  $14.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  è particolarmente elevato per la sezione OS1, equivalente o superiore ai valori massimi istantanei di  $Q$  che si registrano per eventi di piena non particolarmente intensi. Tale  $\Delta Q$  avviene in un  $\Delta t$  corrispondente ad  $1/5$  di quanto si registra sia nei casi di sizige che in quadratura. Il  $\Delta m$  è rispettivamente circa  $1/2$  e circa  $2/3$  di quello mediamente osservato in un calante di sizige e di quadratura. Il breve calante di marea che si instaura nel transiente determinato dalla chiusura del sistema MOSE sulla sezione OS1 ha caratteristiche di intensità notevolmente superiori rispetto alle situazioni che si verificano abitualmente. La velocità con cui varia il livello idrico ( $\Delta \text{liv}/\Delta t$ ) nella sezione è circa 2 e 4 volte superiore rispettivamente ai casi di sizige e quadratura e produce una velocità di variazione della  $Q$  ( $\Delta Q/\Delta t$ ) 7 e 11 volte superiore.

Tabella 2. Confronto degli incrementi delle variabili tempo, livello e portata fra la media nelle 12 situazioni di sizige e di quadratura analizzate e la media nelle situazioni determinate dai 25 eventi di chiusura del sistema MOSE, nella sezione OS1.

OSELLINO	$\Delta t$ (min)	$\Delta m$ (m)	$\Delta Q$ ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	$\Delta m/\Delta t$ ( $10^4 \text{ m s}^{-1}$ )	$\Delta Q/\Delta t$ ( $10^2 \text{ m}^3 \text{s}^{-2}$ )
SIZIGE	139	0.240	10.40	0.173	7.49
QUADRATURA	160	0.154	7.52	0.096	4.70
MOSE	28	0.106	14.6	0.379	52.14
	<i>ratio</i>	<i>ratio</i>	<i>ratio</i>	<i>ratio</i>	<i>ratio</i>
MOSE/SIZIGE	20%	44%	140%	219%	696%
MOSE/QUADRATURA	18%	69%	194%	393%	1109%

$\Delta m$  e  $\Delta Q$ , che sono risultate essere indipendenti dall'intensità delle precipitazioni, sono legate da una relazione lineare significativa ( $R^2 = 0.65$ ); questa risulta notevolmente superiore ( $R^2 = 0.87$ ) considerando i soli eventi di chiusura (8 su 25) occorsi in presenza di un vento di intensità  $\geq 4$  nella scala di Beaufort (Fig. 2). La rapida crescita della  $Q$  determina generalmente un aumento più o meno importante della concentrazione di SPM nella sezione, che successivamente al transiente  $\Delta t$  ritornano generalmente (80% dei casi) ai valori precedenti alla chiusura. L'effetto sopra descritto si registra con intensità molto inferiori nella sezione DE1 rispetto a OS1, per via del maggiore ritardo sull'oscillazione di marea dovuta alla distanza dalla bocca di Porto del Lido, alla quale si aggiungono fattori morfologici delle due foci.

### Aspetti morfologici

Per effetto del trasporto solido del Canale Osellino e del contrasto al deflusso operato dai crescenti di marea, l'alveo del canale è soggetto ad un importante interrimento (Fig. 3, sinistra: I), così come tutta la zona lagunare a valle, verso Punta San Giuliano. La morfologia della foce è caratterizzata dalla presenza di una zona di accumulo laterale sinistra (A) e da una contigua depressione del fondale (D), conseguenza di un vasto intervento di escavo dei sedimenti effettuato negli anni sessanta per interrare le barene di San Giuliano per

<sup>19</sup> Provveditorato OO.PP. (2022). Interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea. Relazione gestione mobilitazione per evento del 21.04.22. pp. 20.

fini edilizi. La mappatura delle batimetrie ha mostrato che la profondità dell'alveo è ormai di poco inferiore a quella dell'area di accumulo laterale sinistra, che è stata investigata con l'impiego di trappole per la raccolta del particolato e il prelievo di carote di sedimento.

Lo strato superiore (circa 25 cm) del sedimento nella zona di accumulo (A) ha caratteristiche sostanzialmente omogenee. Questo materiale non è particolarmente contaminato da metalli pesanti (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn), tuttavia è classificabile come "C" secondo il protocollo del Ministero dell'Ambiente (8/4/93) a causa della concentrazione di Cu (media = 71.5) che eccede il limite di 50 mg kg<sup>-1</sup>.

Nel sistema di foce del fiume Dese, il confronto con misure batimetriche pregresse mostra che l'intero sistema è andato progressivamente interrandosi, sia nell'alveo principale che nei settori a più basso fondale. L'effetto di questo processo è riscontrabile anche attraverso l'osservazione di immagini satellitari. Un esempio (Fig. 2, destra) è la batimetria della sezione 2 (indicata in Fig. 4), a valle della confluenza fra il Dese e lo Zero. L'alveo del fiume è stato ricalibrato attraverso dragaggi negli anni '80, ad una superficie pari a circa 142 m<sup>2</sup> sul livello medio mare. La misura batimetrica effettuata nel 1998 mostra una riduzione della superficie del 24% (108 m<sup>2</sup>, -2 m<sup>2</sup> anno<sup>-1</sup>). Nel 2011, la superficie della sezione rimane sostanzialmente uguale (111 m<sup>2</sup>) ma è diventata molto asimmetrica, approfondita sulla sinistra e interrata sulla destra. La misura del 2020 mostra una perdita di superficie della sezione (100 m<sup>2</sup>, -10%, -1.2 m<sup>2</sup> anno<sup>-1</sup>) a scapito del lato sinistro.

Per valutare i livelli di contaminazione da metalli pesanti nei due sistemi di foce, la Fig. 11 mostra la distribuzione delle concentrazioni delle 8 specie prioritarie espressa come percentuale del valore di "ERM". ERM (*Effect Range-Median*) ed ERL (*Effect Range-Low*) sono *Sediment Guidelines* del NOAA (Long et al., 1995<sup>20</sup>). Al di sotto del valore ERL si ritiene esista una bassa probabilità che un inquinante nel sedimento possa arrecare danni tossicologici agli organismi acquatici, mentre al di sopra del valore ERM il danno è probabile.

Secondo questa classificazione, i livelli di As, Cd, Cr, Ni e Pb non destano preoccupazioni tossicologiche in entrambi i sistemi, poiché i valori medi di concentrazione sono prossimi o inferiori a ERL. Una situazione analoga si osserva nel sistema Dese per Cu e Zn; per questo tributario, l'unico valore di concentrazione relativamente elevato è quello dell'Hg (ca. 50% ERM). Nel sistema Osellino, invece, la concentrazione di Cu è di poco superiore a ERL (ca 20% ERM) ma Zn (ca 80% ERM) e soprattutto Hg (ca 110% ERM) hanno concentrazioni elevate relativamente alle *Sediment Guidelines* considerate.

Si osserva, inoltre, che queste *Sediment Guidelines* forniscono una descrizione della contaminazione dei sedimenti che differisce sostanzialmente da quella che si ottiene considerando i limiti del succitato protocollo ministeriale.

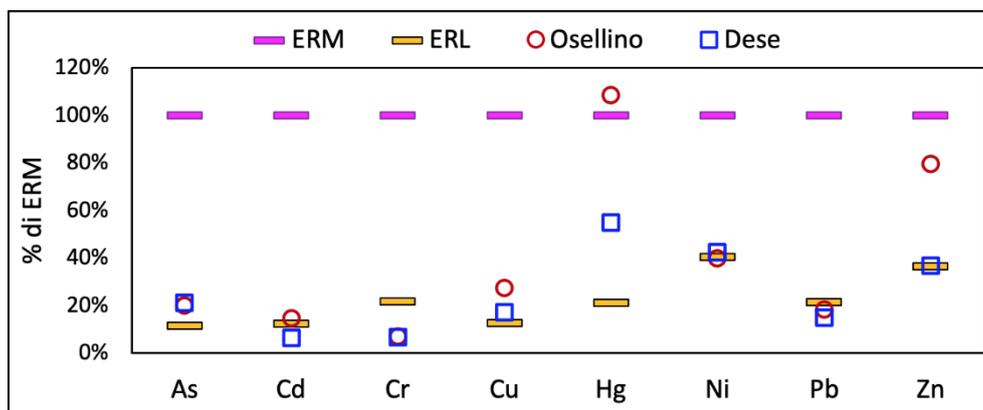


Figura 11. Valori medi di concentrazione degli 8 metalli pesanti prioritari per i campioni di sedimento analizzati nei sistemi Osellino e Dese, espressi come percentuale dell'indice ERM.

<sup>20</sup> Long E.R., MacDonald D.D., Smith S.L., Calder F.D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ. Manag.* 19, 81e97.

## 6. Obiettivi prefissati e raggiunti

Gli obiettivi della Linea 1.2 sono stati raggiunti. I processi che avvengono all'interfaccia terra-laguna (così come quelli all'interfaccia laguna-mare) influiscono fortemente sul comportamento della laguna di Venezia, quindi la loro conoscenza è essenziale per la gestione dell'intero sistema.

Il primo obiettivo è stato quello di acquisire dati per la valutazione del trasporto solido da due tributari della laguna (Fiume Dese e Canale Osellino), che sono due corsi idrici importanti del bacino scolante con caratteristiche del deflusso parzialmente naturali. In una sezione di ciascun tributario, la portata ( $Q$ ), la concentrazione di particolato (SPM) e il livello idrico sono stati acquisiti in continuo per periodi di tempo idonei alla stima della  $Q$  media e del carico di SPM ( $L_{SPM}$ ) annuale. Quest'ultimo è stato determinato con maggiore precisione rispetto al passato (Collavini et al., 2005), grazie alla possibilità della misura in continuo dei valori della SPM (previa le necessarie misure di calibrazione, che sono state effettuate). L'attività ha avuto come prodotto anche la messa a punto di questa metodologia, a partire dalla disponibilità di serie temporali di backscatter acustico registrate dalla strumentazione installata in situ. La metodologia potrebbe essere applicata alla rete flussometrica di acquisizione delle portate del Provveditorato OO.PP., per misurare il carico solido trasferito alla laguna da una vasta percentuale del bacino scolante. Sulle stesse basi di dati, sono stati descritti gli eventi di piena (inclusa una piena eccezionale occorsa sul Fiume Dese il 13 aprile 2021) e studiata, con il supporto di misure puntuali, la circolazione idraulica nei sistemi di foce. Lo studio è stato corredato da un'analisi delle precipitazioni, utile per contestualizzare il periodo di misura rispetto gli anni precedenti (dal 1995 in poi) e per la valutazione della relazione afflussi - deflussi, che consente di ricavare informazioni sul comportamento dei sottobacini scolanti e sulla gestione del loro deflusso da parte degli Enti preposti.

Un secondo obiettivo è stato quello di ottenere informazioni sulle dinamiche del trasporto e della sedimentazione all'interno dei sistemi di foce dei due tributari. Questa tipologia di informazioni è basilare per la protezione del naturale funzionamento della laguna, soprattutto per quanto attiene la perdita dei sedimenti fini e delle tipiche morfologie lagunari all'interfaccia con la terraferma. La laguna è soggetta ad un trend erosivo e il particolato veicolato dal bacino scolante costituisce un materiale potenzialmente importante per contrastare l'approfondimento dei fondali e l'impoverimento della *morfo diversità* e di habitat caratteristici. Allo stesso tempo, laddove questo materiale si deposita in eccesso nelle aree di foce, possono verificarsi situazioni di interrimento di ghebi e canali secondari, stagnazione delle acque, difficoltà per la navigazione e - più in generale - una riduzione della possibilità di utilizzo dell'ambiente lagunare all'interfaccia con la terraferma. L'attività di studio è stata basata sulla misura della batimetria in sezioni di riferimento e in settori a basso fondale, sull'uso di trappole per sedimento per la determinazione dei flussi di sedimentazione (apparente) e sull'analisi di carote di sedimento. Alcune "distorsioni" morfologiche sono state osservate in entrambi i sistemi di foce, che evidenziano la necessità di seguire nel tempo l'osservazione di questi sistemi e costituiscono l'occasione di ragionare su una pianificazione di interventi di ricalibrazione degli alvei e di risanamento di bassi fondali.

L'insieme delle informazioni acquisite - corredate da dati pregressi - costituisce un quadro di riferimento del funzionamento degli apparati di foce del Canale Osellino e del Fiume Dese, la cui acquisizione è stato l'obiettivo generale dello studio. Tale quadro può costituire una base conoscitiva utile all'osservazione di eventuali modificazioni future, introdotte nei due sistemi di foce dai cambiamenti climatici e dall'operatività del sistema MOSE. In particolare, l'effetto della chiusura delle barriere sull'idrodinamica e il trasporto solido delle due foci è stata osservata durante il periodo di studio, analizzando 25 e 15 eventi, rispettivamente per il Canale Osellino e il Fiume Dese. Successivamente all'innalzamento delle paratoie, la propagazione dell'onda di marea all'interno della laguna produce un limitato ma rapido abbassamento del livello idrico ( $\Delta m$ ). In questo transiente  $\Delta t$ , nel Canale Osellino si verifica una velocità di variazione della portata  $Q$  ( $\Delta Q/\Delta t$ ) che è indicativamente 10 volte superiore rispetto alle situazioni normali. Nel Fiume Dese, l'effetto della chiusura si registra con un maggiore ritardo, producendo  $\Delta m$  significativamente inferiori e minori effetti sulla variazione della  $Q$ .

L'insieme dei dati, delle informazioni e dei risultati acquisiti dalla Linea 1.2 supporta gli Obiettivi prioritari del Programma di ricerca "Venezia2021". Il produrre conoscenze integrate e aggiornate sui sistemi di foce dei

due tributari ricade nell'Obiettivo 1 (Quadro conoscitivo). Il dataset dei valori di portata e carico solido trasferiti dai due sottobacini alla laguna fornisce dati gestionali importanti sull'interazione bacino scolante - laguna. Inoltre, costituisce un quadro di riferimento per l'osservazione di eventuali variazioni che dovessero verificarsi in seguito alla regolazione dei flussi alle bocche di porto, anche per quanto riguarda la circolazione idraulica d'estuario. Un fenomeno interessante relativo alla chiusura del MOSE sull'idrodinamica dei due tributari è stato messo in luce e investigato già nell'ambito del progetto. Riguardo l'Obiettivo 1, la Linea 1.2 ha aggiornato la conoscenza relativa alla contaminazione del sedimento da metalli pesanti, nelle due aree investigate. La disponibilità di serie temporali di portata e carico solido, se si proseguirà ad acquisirle in futuro, può migliorare significativamente la qualità delle simulazioni dei modelli operativi (Obiettivo2: Modelli matematici). La metodologia di misura in continuo del particolato sospeso che è stata messa a punto dalla Linea 1.2 è estendibile alla rete flussometrica del Provveditorato OO.PP. Questo consentirebbe di ottenere in tempo reale i valori di deflusso e trasporto solido da una vasta percentuale della superficie del bacino scolante e di monitorare l'influenza degli eventi di piena (Obiettivo 3: Strumenti di gestione). Se opportunamente interfacciata alle tecniche di misura della torbidità da immagini satellitari, tale metodologia consentirebbe presumibilmente anche una migliore osservazione rispetto al presente della diffusione all'interno della laguna del particolato generato dal bacino.