

Così il traffico navale danneggia coste e canali

Di L. Zaggia, G.M. Scarpa, G. Manfé, G. Lorenzetti, N. Trevisan, F. Madricardo, A. Petrizzo, F. Braga - 28 Febbraio 2021



Figura 1. Una nave portacontainer in navigazione nella baia di Charleston, South Carolina, USA (fonte: Shutterstock, Daniel Wright98).

Lo studio dei fenomeni erosivi legati al traffico navale

Si tratta di problematiche particolarmente critiche per i grandi porti localizzati all'interno di sistemi confinati o semi-confinati quali gli estuari e le lagune costiere nei quali, a differenza del mare aperto, questo input di energia può localmente superare l'azione delle forzanti naturali nella modellazione dei fondali e delle coste

L'attenzione per gli impatti del traffico navale lungo le rotte di grande navigazione e nelle aree costiere è notevolmente cresciuta negli ultimi decenni. L'interesse delle ricerche scientifiche in campo internazionale è principalmente focalizzato sulle tematiche delle emissioni inquinanti nelle aree portuali (Brewer, 2020), e l'inquinamento acustico sottomarino (Erbe et al., 2019; Southall et al., 2017). Il riconoscimento dell'impatto derivante dall'immissione di energia sotto forma di moto ondoso come alterazione dell'ambiente marino da parte delle istituzioni internazionali risale a quasi quarant'anni fa (Unclos, 1982). Inizialmente questo problema riguardava la gestione morfologica delle vie d'acqua interne e gli aspetti di sicurezza della navigazione. Tuttavia è solo più recentemente che i ricercatori si sono concentrati sugli effetti ambientali del moto ondoso generato dal traffico navale nell'ambiente costiero come, ad esempio, l'azione erosiva sui fondali e le coste e la conseguente perdita di habitat pregiati (Townsend et al., 2014; Durò et al. 2020). Si tratta di problematiche particolarmente critiche per i grandi porti localizzati all'interno di sistemi confinati o semi-confinati quali gli estuari e le lagune costiere (Figura 1) nei quali, a differenza del mare aperto, questo input di energia può localmente superare l'azione delle forzanti naturali nella modellazione dei fondali e delle coste (Parnell et al., 2007; Torsvik et al.2015).

Il numero di accessi nei porti moderni raggiunge frequentemente alcune migliaia di unità all'anno e nei grandi porti internazionali le cosiddette *port calls* possono raggiungere totali annui di alcune decine di migliaia (Port of Rotterdam, 2020). Poiché per ogni accesso al porto una nave necessariamente transita due volte lungo un canale navigabile, è facile comprendere come la sollecitazione sulle sponde e sugli ecosistemi adiacenti alle vie d'acqua possa rappresentare un importante fattore di stress sulla morfologia degli ambienti attraversati.

Una nave in movimento incontra una certa resistenza al moto che può essere divisa in una componente dovuta agli effetti viscosi e una componente dovuta agli effetti di pressione. Le

interazioni sotto forma di pressione tra la carena e il fluido rilasciano, attraverso variazioni di quota della superficie libera, energia che si disperde sotto forma di onde. Secondo la teoria sviluppata da Lord Kelvin (1887-1904), in condizioni di acque profonde, cioè per profondità dell'acqua molto maggiori della lunghezza d'onda della perturbazione, il sistema di onde generato dalla carena è dato dalla sovrapposizione di due treni ondosi principali: le onde trasversali che si propagano nella direzione del moto e le onde divergenti (di prua e di poppa) che si propagano lateralmente allo scafo secondo un angolo caratteristico (circa 20°). I due pattern interagiscono dando luogo a fenomeni di interferenza.

Durante la navigazione in condizioni di acque basse, cioè con profondità confrontabili al pescaggio della nave, l'acqua al di sotto dello scafo e ai lati dello stesso (nel caso di un canale navigabile) subisce un'accelerazione. In base al principio di conservazione dell'energia, questa accelerazione determina una riduzione della pressione (livello) in prossimità della parte centrale dello scafo formando un'onda a forma di «V», detta onda di Bernoulli o onda di depressione. In un canale confinato l'ampiezza di questa perturbazione è in relazione alla velocità della nave, alla geometria della carena e al rapporto fra la massima sezione trasversale della parte immersa dello scafo e la sezione del canale. In generale, per una determinata forma della carena, più alta è la velocità e più grande è la sezione dello scafo maggiore sarà l'ampiezza dell'onda di depressione. La sua durata (è improprio definire un periodo, non trattandosi di un'oscillazione periodica) dipende invece dalla lunghezza della nave e dalla sua velocità.

Se la navigazione avviene a velocità molto più basse di quelle tenute in mare aperto, come nel caso di canali navigabili interni, lo sviluppo dei sistemi di onde divergenti risulta trascurabile rispetto alle onde di depressione che diventano invece il fenomeno dominante.

L'onda di depressione segue la nave nel suo percorso e, nel caso del transito in un canale navigabile confinato, subisce un'amplificazione per l'interazione con il fondale ai lati del canale assumendo una forma cavo-cresta asimmetrica con fenomeni di frangimento (Figura 2). Ciò che un osservatore può notare, durante il passaggio di una nave in canale di navigazione confinato da aree a basso fondale, è il rapido movimento dell'acqua verso il canale stesso con un repentino abbassamento del livello seguito da un altrettanto rapido innalzamento, sovente caratterizzato da un fronte più ripido. Per le navi più grandi e per velocità sostenute l'ampiezza di questa escursione (la differenza fra il livello imperturbato e il cavo dell'onda) può raggiungere e superare i due metri (Parnell et al., 2016). Nel caso in cui il canale navigabile sia affiancato da aree a basso fondale, la propagazione dell'onda di depressione sulle piane tidali e le aree di sponda è influenzata da ulteriori fenomeni.

Nella fase di abbassamento, il livello dell'acqua consente alla perturbazione di propagarsi con una propria velocità. Nella successiva fase di risalita del livello, la propagazione della perturbazione è invece condizionata dalla ridotta profondità e sarebbe naturalmente soggetta ad un rallentamento. Tuttavia, essa viene forzata dal moto della nave a spostarsi ad una velocità superiore dando quindi origine ad un fronte ondoso molto ripido e turbolento. Questo fenomeno, paragonabile al bang sonico per gli aerei, viene identificato con il termine inglese di bore e dà luogo ad una forte risospensione del sedimento delle aree di sponda del canale e dei bassi fondali provocando un trasporto significativo in direzione longitudinale e una forte erosione. L'azione erosiva del fenomeno è anche intensificata dall'elevata densità che viene raggiunta della sospensione di acqua e sedimento movimentata dall'onda.

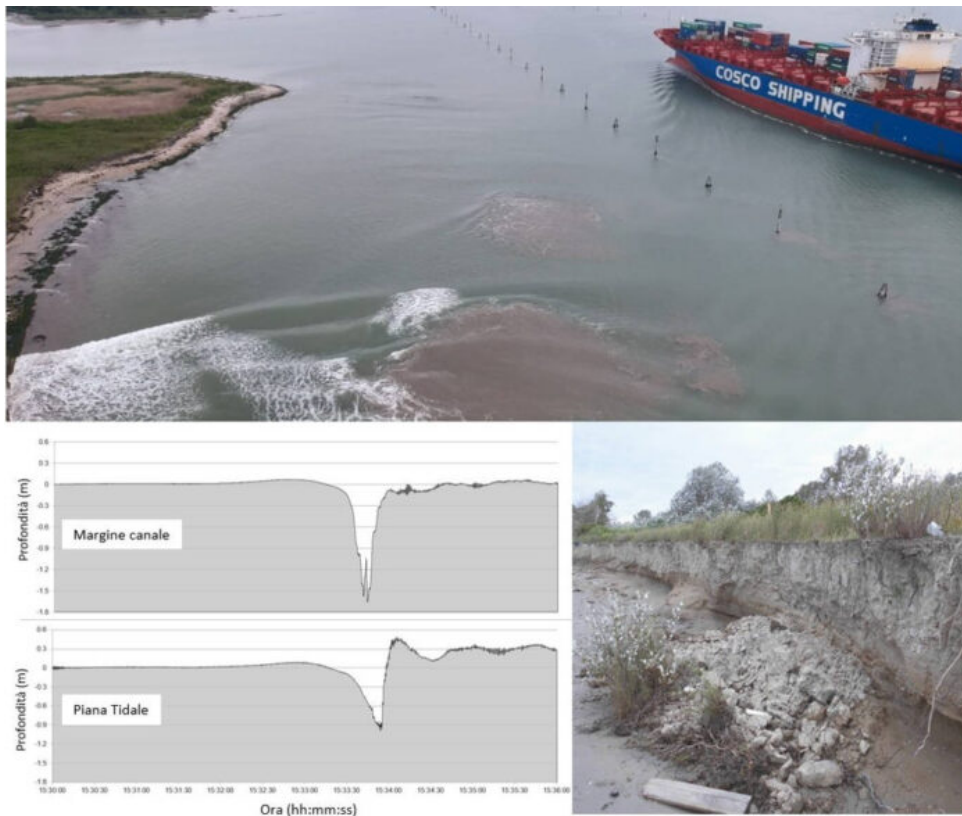


Figura 2. In alto, transito di una nave cargo nel canale Malamocco-Marghera, in laguna di Venezia, in basso a sinistra evento di perturbazione generato dal transito della nave Pessada (lunghezza 225 m, larghezza 35 m, pescaggio 7 m, velocità 8.6 nodi) in basso a destra la sponda emersa del canale e il crollo di materiale per scalzamento del terreno.

Il canale Malamocco-Marghera (MMC), che collega il mare Adriatico con il porto industriale di Venezia attraversando le aree a basso fondale nella laguna di Venezia, rappresenta un sito di particolare interesse per lo studio del moto ondoso generato dal traffico navale e degli impatti ad esso associati.

La formazione delle onde di depressione e le loro caratteristiche fisiche sono state studiate mediante indagini sperimentali condotte da un team di ricerca internazionale (Gelinas et al., 2013; Parnell et al., 2015). L'utilizzo di modelli basati sulla fluidodinamica computazionale ha permesso di simulare allo stesso tempo le perturbazioni nel canale e nel basso fondale (Figura 3) generate da una carena corrispondente ad una nave cargo reale (Trevisan, 2019).

Per quanto riguarda la propagazione delle perturbazioni generate dal transito delle navi e i conseguenti fenomeni erosivi sono stati studiati nell'ambito di diverse indagini sperimentali utilizzando reti di sensori di pressione e torbidità, strumenti per la misura delle correnti nel canale e nei bassi fondali adiacenti, campionamenti per la determinazione della concentrazione di sedimenti in sospensione, indagini batimetriche, monitoraggi delle variazioni morfologiche sul fronte di erosione delle sponde emerse (Zaggia et al., 2017; Scarpa et al., 2019).

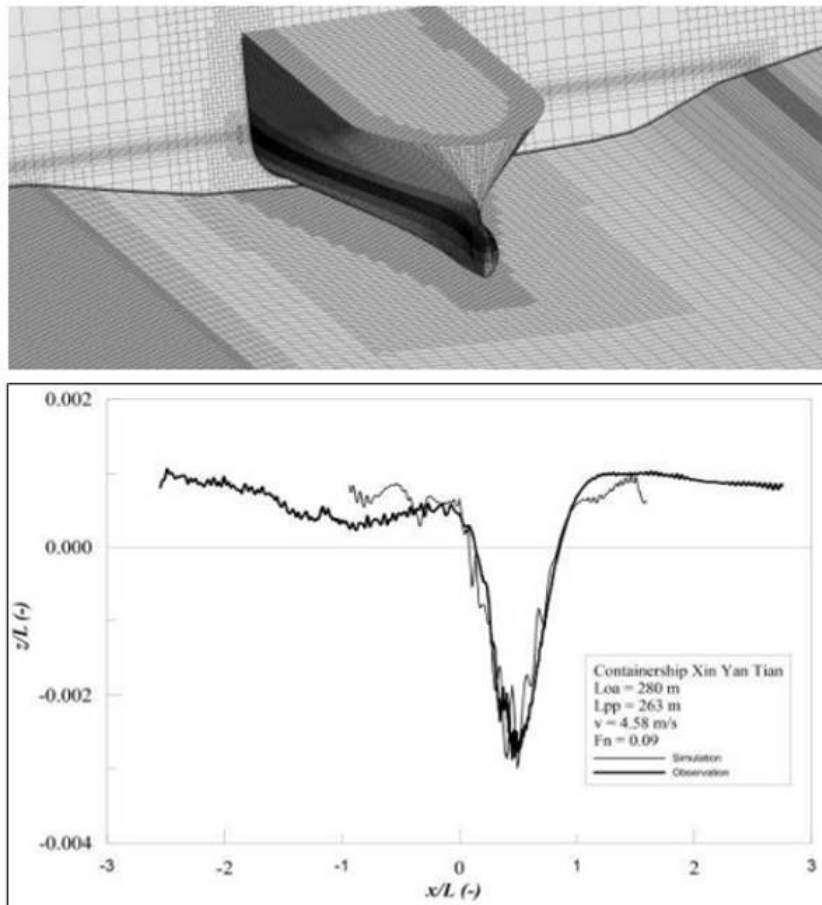
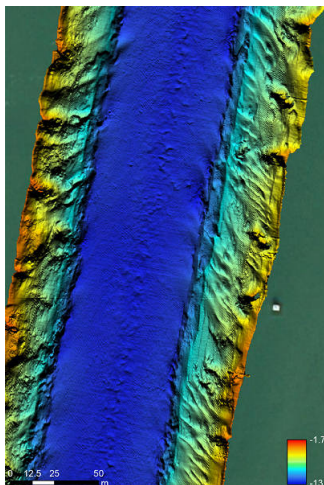


Figura 3. In alto: griglia di calcolo utilizzata per le simulazioni numeriche con la sezione del canale reale ottenuta dai dati batimetrici di un tratto del canale Malamocco-Marghera. In basso: confronto fra l'elevazione ondosa calcolata con il modello numerico e quella misurata. Da: Trevisan (2019).

I risultati delle indagini svolte hanno evidenziato processi erosivi molto rapidi sulle le aree di sponda, con arretramenti della linea di riva di alcuni metri all'anno, e sulle piane tidali e subtidali adiacenti al canale navigabile, con approfondimenti generalizzati ed estesi fino a diverse centinaia di metri di distanza. Queste trasformazioni sono la conseguenza diretta della dissipazione della perturbazione iniziale sulle sponde e delle forti correnti di richiamo dal basso fondale verso il canale navigabile che si generano durante il passaggio della depressione (Rapaglia et al., 2011; Rapaglia et al., 2015; Corila, 2016; Scarpa et al. 2019).

Gli effetti erosivi del traffico navale sono visibile anche nei fondali del canale navigabile come rivelato dalle indagini batimetriche ad alta risoluzione effettuate da Cnr-Ismar (Figura 4). Si osservano infatti strutture erosive trasversali sulle sponde del canale e tracce degli interventi di dragaggio sul fondo proprio in corrispondenza alla base del pendio al margine, dove si accumulano i materiali erosi dal bassofondo e dalle sponde (Madricardo et al. 2019).



Successivamente al transito della nave la torbidità nell'area si mantiene elevata, ben al di sopra dei valori naturali, per un lungo intervallo di tempo. Il materiale risospeso può essere quindi trasportato dalle correnti di marea determinando una perdita netta di morfologia nell'area interessata dai fenomeni (Figura 5).

Una metodologia molto promettente è stata adottata nel corso del progetto di ricerca Venezia2021, finanziato dal Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche per il Veneto, Trentino Alto Adige e Friuli Venezia Giulia. L'indagine utilizza dati di traffico marittimo, prodotti derivati da immagini da satellite, osservazioni in campo con velivoli autonomi, batimetrie delle aree sommerse di bassa profondità con sistemi automatizzati. I dati acquisiti vengono elaborati ed integrati in ambiente GIS (Geographic

Figura 4. Rilievo batimetrico ad alta risoluzione di un tratto del canale Malamocco-Marghera effettuato con ecoscandaglio multibeam. Si evidenziano le strutture erosive molto pronunciate, simili ai solchi di erosione calanchiva, sui margini del canale navigabile.

Information System) per identificare le aree interessate dai fenomeni di risospensione ed erosione. Questo tipo di approccio rende quindi possibile lo studio delle trasformazioni morfologiche in atto con una risoluzione dell'ordine di pochi cm sulle aree emerse e sulla profondità nelle aree intertidali e subtidali (Figura 6). Allo stesso tempo l'elaborazione delle informazioni derivanti dalle immagini aeree e satellitari permette di ottenere una rappresentazione sinottica su aree estese della distribuzione dei materiali messi in sospensione dal passaggio delle navi evidenziando le relazioni fra la torbidità, il trasporto dei sedimenti e l'intensità dei processi erosivi.

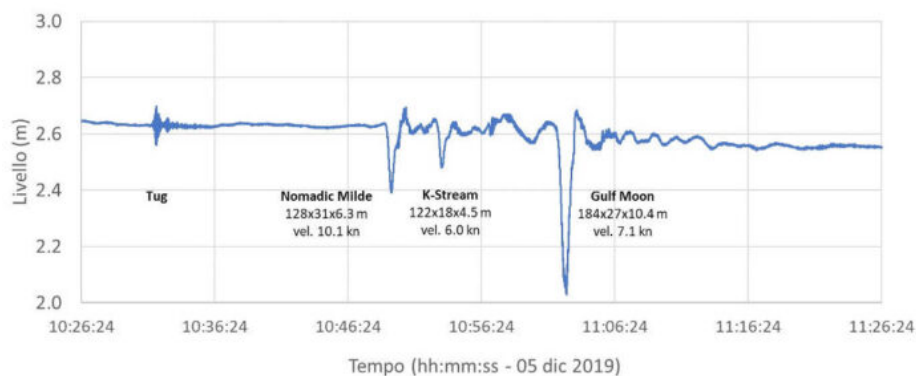
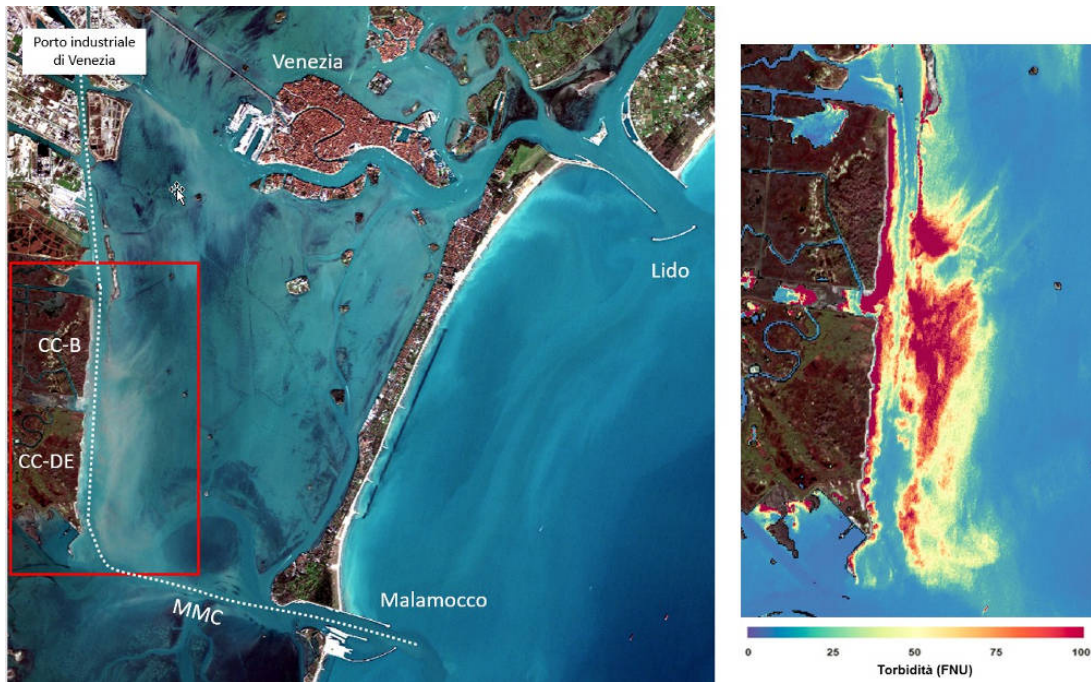


Figura 5. In alto a sinistra, immagine satellite dell'area centrale della Laguna di Venezia (Sentinel-2 ESA, 5 dicembre 2019) ripresa alcuni minuti dopo il passaggio di tre navi nel canale Malamocco-Marghera (MMC). In alto a destra, mappa di torbidità derivata dai dati dell'immagine satellite per il tratto del canale adiacente alle casse di colmata B e DE al margine ovest del canale (CC-B e CC-DE). In basso, andamento del livello idrico nell'intervallo corrispondente e dati caratteristici dei natanti (lunghezza, larghezza, pescaggio e velocità in nodi): si evidenziano le onde di depressione generate dalle tre navi e dal rimorchiatore (Tug) che le precede.

Pur trattandosi di un ambiente molto peculiare, le problematiche della navigazione nella laguna di Venezia sono simili a quelle di molti altri porti internazionali situati in ambienti confinati o sistemi di estuario. La ricerca condotta in questo contesto sin dal 2009 rappresenta quindi un modello di approccio integrato per la gestione sostenibile della navigazione e la definizione di strategie per la mitigazione degli effetti indesiderati del traffico navale esportabile e adattabile alle diverse aree geografiche.

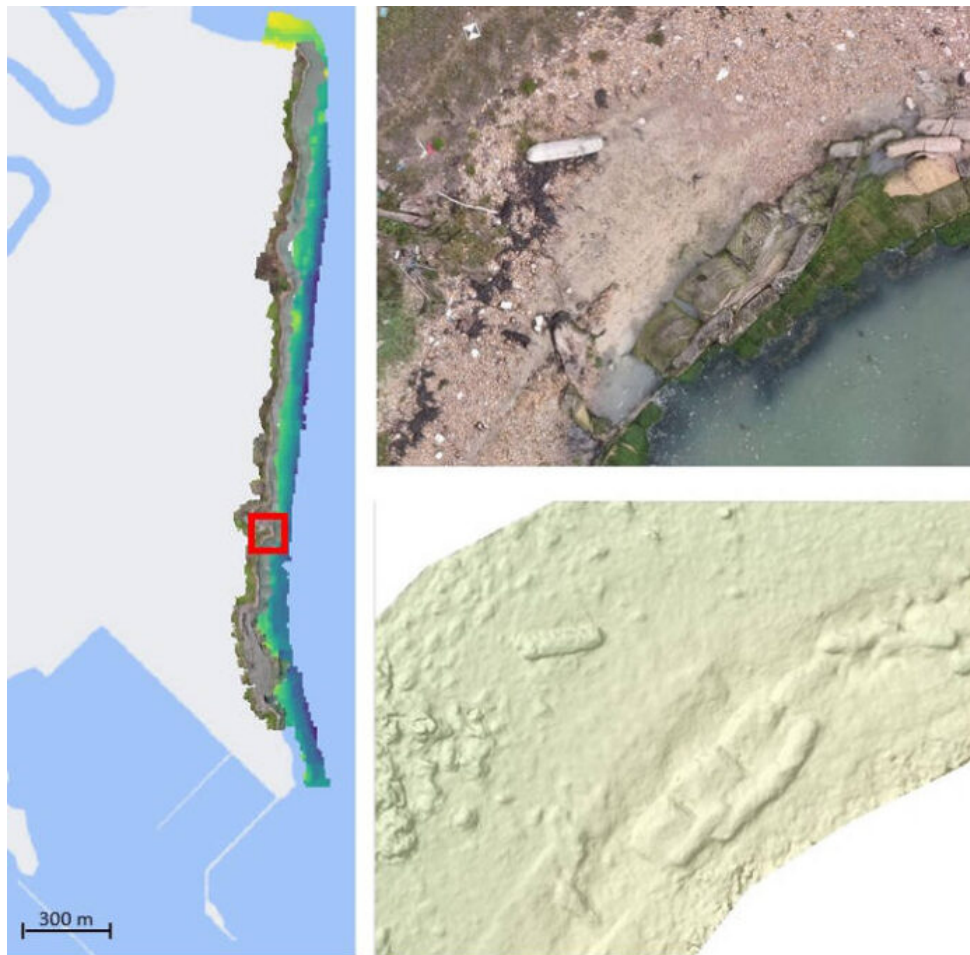


Figura 6. Esempio di elaborazione in ambiente GIS di dati batimetrici e aerofotogrammetrici. Nel pannello di sinistra è raffigurata l'intera cassa di colmata (CC-DE) nella quale sono integrati i risultati dell'analisi con UAV, che ha prodotto ortofoto e modello digitale di elevazione con i dati del rilievo batimetrico eseguito con veicolo autonomo dotato di ecoscandaglio single beam. In alto a destra dettaglio sull'ortofoto con risoluzione a terra di 1.5 cm/pixel; in basso a destra dettaglio del modello digitale di elevazione per la medesima area con risoluzione di 4 cm/pixel.

Riferimenti bibliografici

Brewer, T.L., (2020). Black Carbon and Other Air Pollutants in Italian Ports and Coastal Areas: Problems, Solutions and Implications for Policies. *Applied Sciences*, 10(23), 8554.

Corila, (2016). Stato ambientale della Laguna di Venezia ed elementi per la pianificazione sostenibile delle attività portuali: Attività 3 e 4 – Valutazione degli effetti del moto ondoso da natanti e analisi idro-ecologica. Relazione finale, Giugno 2016, p. 149.

Duró, G., Crosato, A., Kleinhans, M. G., Roelvink, D., & Uijttewaal, W. S. J., (2020). Bank erosion processes inregulated navigable rivers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, e2019JF005441.

Erbe, C., Marley, S.A., Schoeman, R.P., Smith, J.N., Trig, L.E. and Embling, C.B., (2019). The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review. *Frontiers in Marine Science*, 6, 606.

Gelinas, M., Bokuniewicz, H., Rapaglia, J., Lwiza, K.M.M., (2012). Sediment Resuspension by Ship Wakes in the Venice Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 29(1), 8–17.

Madricardo, F., Foglini, F., Campiani, E., Grande, V., Catenacci, E., Petrizzo, A., Kruss, A., Toso, C., and Trincardi, F., (2019). Assessing the human footprint on the sea-floor of coastal systems: the case of the Venice Lagoon, Italy. *Scientific Reports*, 9:6615.

Parnell, KE., Mcdonald, S.C., Burke, A.E., (2007). Shoreline effects of vessel wakes, Marlborough Sounds, New Zealand. *Journal of Coastal Research*, 50, 502–6.

Parnell, K.E., Soomere, T., Zaggia, L., Rodin, A., Lorenzetti, G., Rapaglia, J., Scarpa, G.M., (2015). Ship-induced solitary Riemann waves of depression in Venice Lagoon. *Physics Letters A*, 379(6), 555-559.

Parnell, K.E., Zaggia, L., Soomere, T., Lorenzetti, G., & Scarpa, G. M., (2016). Depression waves generated by large ships in the Venice Lagoon. *Journal of Coastal Research*, (75), 907-911.

Port of Rotterdam, (2020). <https://www.portofrotterdam.com/en/shipping/sea-shipping/other/port-call-optimisation>.

Rapaglia, J., Zaggia, L., Ricklefs, K., Gelinis, M., and Bokuniewicz, H., (2011). Characteristics of ships' depression waves and associated sediment resuspension in Venice Lagoon, Italy. *Journal of Marine Systems*, 85(1-2), 45-56.

Rapaglia, J., Zaggia, L., Parnell, K., Lorenzetti, G., & Vafeidis, A. T., (2015). Ship-wake induced sediment remobilization: Effects and proposed management strategies for the Venice Lagoon. *Ocean & Coastal Management*, 110, 1-11.

Scarpa, G.M., Zaggia, L., Manfè, G., Lorenzetti, G., Parnell, K., Soomere, T., Rapaglia, J., & Molinaroli, E., (2019). The effects of ship wakes in the Venice Lagoon and implications for the sustainability of shipping in coastal waters. *Scientific reports*, 9(1), 1-14.

Southall, B.L., Scholik-Schlomer A.R., Hatch, L., Bergmann, T., Jasny, M., Metcalf, K., Weilgart, L., Wright, A.J., (2017). Underwater Noise from Large Commercial Ships—International Collaboration for Noise Reduction. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, online. John Wiley & Sons Ltd., 1-9.

Torsvik, T., Soomere, T., Didenkulova, I., & Sheremet, A., (2015). Identification of ship wake structures by a time–frequency method. *Journal of Fluid Mechanics*, 765, 229-251.

Townsend, K., Maglio, C., Thomas, R., Thornton, D., Miller, J., Campbell, T., Lin, L., Willey, S., Wood, E., (2014). Reducing Shoaling in the Texas GIWW and Erosion of Barrier Islands Along West Galveston Bay. *Terra et Aqua*, 136, 20–29.

Trevisan, N. (2019) Observation and modelling of the ship wave pattern in a navigation channel of the Venice Lagoon. Tesi di Laurea: Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Navale, p. 143.

UNCLOS (1982). United Nations Convention on the Law of the Sea. https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf

Zaggia, L., Lorenzetti, G., Manfè, G., Scarpa, G.M., Molinaroli, E., Parnell, K.E., Rapaglia, J.P., Gionta M., and Soomere, T., (2017). Fast shoreline erosion induced by ship wakes in a coastal lagoon: Field evidence and remote sensing analysis. *PloS one*, 12(10), e0187210.

Ringraziamenti

Attività scientifica effettuata nel Programma di ricerca Venezia2021, con il contributo del Provveditorato Interregionale Opere Pubbliche per il Veneto, Trentino Alto Adige e Friuli Venezia Giulia erogato attraverso il Concessionario Consorzio Venezia Nuova e coordinata dal Corila.

*L. Zaggia*¹, *G.M. Scarpa*², *G. Manfè*², *G. Lorenzetti*², *N. Trevisan*³, *F. Madricardo*², *A. Petrizzo*², *F. Braga*²

1) *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Geoscienze e Georisorse, Via Gradenigo, 6, 35131
– Padova. l.zaggia@cnr.it*

2) *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze Marine, Castello 2737/F, 30122 – Venezia*

3) *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ingegneria del Mare, Via di Vallerano, 139, 00128
– Roma*
