



Atti del XXXVIII Convegno Nazionale  
di Idraulica e Costruzioni Idrauliche

Reggio Calabria, 4-7 settembre 2022

Ingegneria delle acque:  
cambiamenti globali e sostenibilità

A cura di:

Felice Arena, Mauro Fiorentino, Giovanni Malara

**ISBN:** 9788894379921

**Volume distribuito con licenza:**



Creative Commons 4.0 Internazionale

Attribuzione-Non commerciale-Condividi allo stesso modo

(CC-BY-NC-SA)

# BOCCA DI LIGNANO: INFLUENZA DI VENTO E MAREA SULLA BARRA DI RIFLUSSO

Nadia Busetto <sup>1\*</sup>, Sara Pascolo <sup>1</sup>, Marco Petti <sup>1</sup> & Silvia Bosa <sup>1</sup>

(1) Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Udine (Udine)

\*email: nadia.busetto@uniud.it

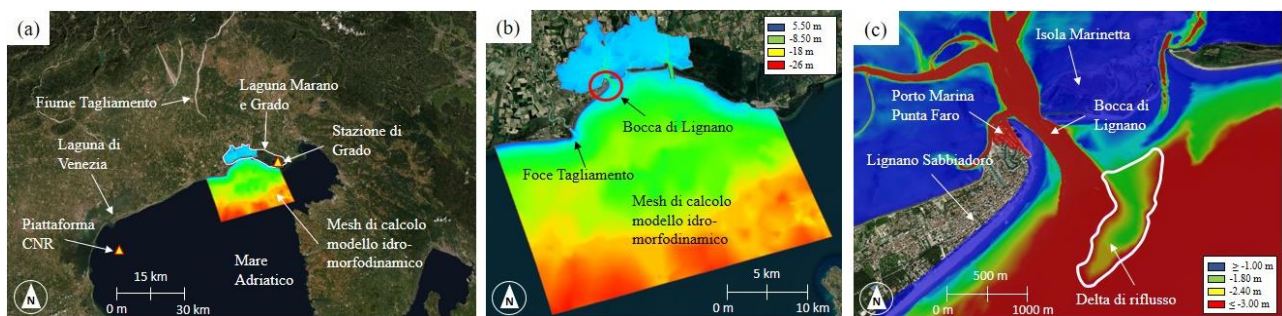
## ASPETTI CHIAVE

- Definizione dell'anno medio a partire dall'analisi degli eventi di vento e marea associati.
- Confronto tra effetti di un evento medio annuo e uno estremo in termini di intensità del vento.
- Effetto di drag da vento in laguna e conseguente variazione del prisma di marea e trasporto solido.

## 1 INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GENERALE

Le diversità nella morfologia, nelle caratteristiche idrauliche e modalità di trasporto dei sedimenti attestano la complessità dei processi che riguardano le bocche lagunari. L'ampiezza di marea, l'energia e la frequenza degli eventi di moto ondoso, l'apporto di sedimenti, provenienti anche dalle foci dei fiumi e l'interazione di tutti questi fattori, sono responsabili di una grande varietà di geometrie delle bocche e dei canali di accesso alle lagune, rendendo queste ultime dei sistemi fortemente dinamici (Byrne *et al.*, 1980; D'Alpaos *et al.*, 2010; De Swart & Zimmerman, 2009; Schwartz, 2005). Strettamente associati alle bocche lagunari sono i banchi di sabbia e i canali di marea verso terra o il mare aperto. Le correnti di marea in ingresso portano i sedimenti all'interno della laguna e li depositano nell'area in prossimità della bocca, formando i delta di flusso; al contrario, le correnti di riflusso, concorrono a formare un deposito sabbioso lato mare dalla forma in genere arcuata.

La bocca di Lignano, di cui un dettaglio in Figura 1, è una delle sei bocche della Laguna di Marano e Grado, situata nel Nord Adriatico tra le foci dei fiumi Tagliamento ad Ovest ed Isonzo ad Est. Essa è un ambiente microtidale a regime energetico misto dominato dalla marea (Schwartz, 2005): L'ampiezza media di marea risulta  $\pm 0.40$  m (Petti *et al.*, 2020), mentre l'altezza d'onda media del moto ondoso in prossimità della bocca si attesta intorno ai 0.60 m (Benatazzo *et al.*, 2012). In bocche ad energia mista la forma del delta di riflusso è il risultato dell'equilibrio relativo tra i processi di moto ondoso e marea e solitamente presenta una forma abbastanza ben sviluppata (Schwartz, 2005).



**Figura 1.** Nel pannello (a) è riportato l'inquadramento generale dell'area, il pannello (b) riporta più in dettaglio la conformazione del dominio di calcolo idro-morfodinamico, il pannello (c) mostra un ingrandimento della zona della bocca di Lignano.

In un precedente lavoro (Petti *et al.*, 2020) era stata analizzata, mediante modellazione numerica, la stabilità della bocca, interessata negli ultimi decenni da un processo di progressivo restringimento. A partire da questo studio, che aveva messo in evidenza il ruolo delle mareggiate di Bora-Levante e di Scirocco nelle principali dinamiche di trasporto solido nella fascia costiera che comprende la bocca, si propone un primo approccio di studio alla formazione della barra di riflusso. In particolare, si vuole evidenziare quali siano le condizioni idrodinamiche che ne incrementano lo sviluppo e confrontare il deposito o l'erosione in

corrispondenza del lobo terminale della barra a seguito della simulazione di un anno medio e di alcuni singoli eventi estremi di vento in termini di velocità, presi nelle due direzioni principali.

## 2 METODOLOGIA

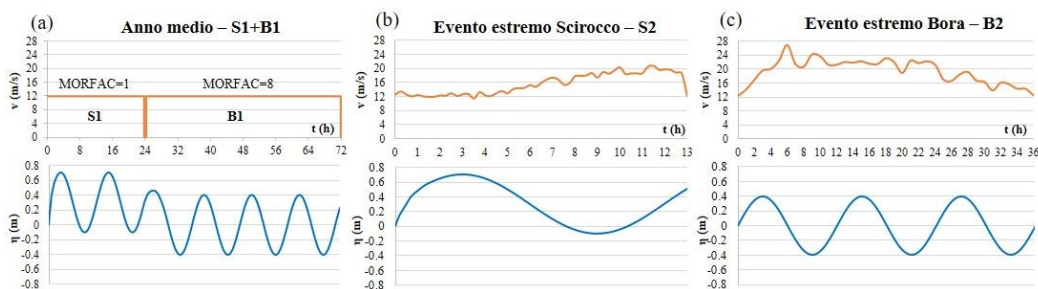
Per prima cosa, si è proceduto con la caratterizzazione di un anno medio in termini di velocità, direzione del vento e marea associata. Per determinare il clima meteo-marino medio annuo si è resa necessaria l'analisi dei dati di velocità e direzione del vento registrati dalle stazioni meteo-mareografiche significative per il sito. In particolare è stata scelta la stazione della Piattaforma Oceanografica CNR, oltre a quella ISPRA di Grado (Figura 1a), già precedentemente considerata (Petti et al., 2018, 2020). L'analisi in frequenza dei dati di velocità e direzione del vento nel periodo dal 1998 al 2017 conferma che i venti predominanti risultano essere quelli di Bora-Levante, con direzione rappresentativa di  $60^\circ$  e quelli di Scirocco, con direzione  $165^\circ$ . Tuttavia si è anche appurato che la stazione di Grado non rileva gli eventi più intensi di Bora-Levante ai fini della generazione in mare aperto, ben colti invece dalla Piattaforma e che, viceversa, sono pochi gli eventi di Scirocco registrati dalla Piattaforma rispetto alla stazione di Grado. I due insiemi di dati sono stati pertanto integrati tenendo conto della migliore rappresentatività della stazione di Grado per l'analisi degli eventi di Scirocco e della Piattaforma CNR per l'analisi degli eventi di Bora-Levante.

Per ricostruire una rappresentazione sintetica del clima medio annuo sono stati individuati e analizzati statisticamente i principali eventi verificatisi nel corso degli anni di misura. L'evento inizia al superamento di una soglia minima di velocità del vento scelta pari a 2.5 m/s e termina al suo successivo attraversamento con derivata negativa. Si è ritenuto di selezionare successivamente solo gli eventi con velocità media, calcolata sull'intera durata, superiore a 10 m/s, valore cui si associano i principali cambiamenti morfodinamici in laguna (Petti et al., 2018) e nella fascia costiera di Lignano (Petti et al., 2020). Per ciascuno di questi eventi è stata ricavata la durata, la velocità media  $v_m$  e quadratica media  $v_{rms}$ . Una volta suddivisi a seconda della direzione del vento, si è effettuata un'analisi statistica su tali grandezze per ottenere una caratterizzazione del clima medio annuo per i due regimi di vento. Successivamente sono state considerate le maree associate agli eventi individuati, ricavando il valore medio delle creste  $\eta_{crm}$  e dei cavi  $\eta_{cvm}$  utili a ricostruire il segnale di marea rappresentativo per Bora-Levante e Scirocco rispettivamente. La sintesi dei risultati è riportata in Tabella 1.

Direzione	Numero eventi	Durata totale (h)	Durata media (h)	$v_{rms}$ (m/s)	$\eta_{crm}$ (m)	$\eta_{cvm}$ (m)
Bora-Levante	82	6977	367.2	12.4	0.40	-0.40
Scirocco	16	361	22.5	11.9	0.70	-0.10

**Tabella 1.** Risultati dell'analisi statistica degli eventi di Bora-Levante e Scirocco individuati.

Sono stati poi selezionati anche due eventi estremi, rispettivamente di Scirocco e di Bora-Levante, caratterizzati dalle velocità medie massime, al fine di individuare le differenze di comportamento in termini di trasporto solido rispetto all'anno medio e valutare i diversi effetti determinati dalla durata e intensità. In Figura 2 sono riportati i grafici delle tre condizioni di vento e marea così ricavati.



**Figura 2.** Nel pannello (a) è riportata la rappresentazione dell'anno medio in termini di velocità e direzione del vento, durata e marea associata. Il pannello (b) illustra la rappresentazione di un evento estremo di Scirocco, mentre il (c) di uno estremo di Bora-Levante.

Per le simulazioni è stato impiegato un modello che accoppia un modulo idro-morfodinamico 2DH, che risolve le equazioni alle acque basse per mezzo di integrazione numerica con un metodo ai volumi finiti e un modello spettrale per la generazione e propagazione del moto ondoso. Per una trattazione completa si rimanda a *Petti et al.* (2018). La griglia regolare di calcolo per la generazione del moto ondoso è stata definita coprendo un'area con dimensioni di circa 150 km nelle direzioni nord-sud ed est-ovest, che risulta adeguata in termini di rappresentatività del moto ondoso (*Petti et al.*, 2020) e si compone di circa 300000 elementi quadrati di lato pari a 250 m. Il dominio computazionale per il modello idro-morfodinamico ricopre parte dell'area della laguna cui si aggiunge una porzione di mare antistante alla costa di Lignano, discretizzata con circa 200000 elementi quadrangolari irregolari con dimensioni variabili da 0.8 a 380 m.

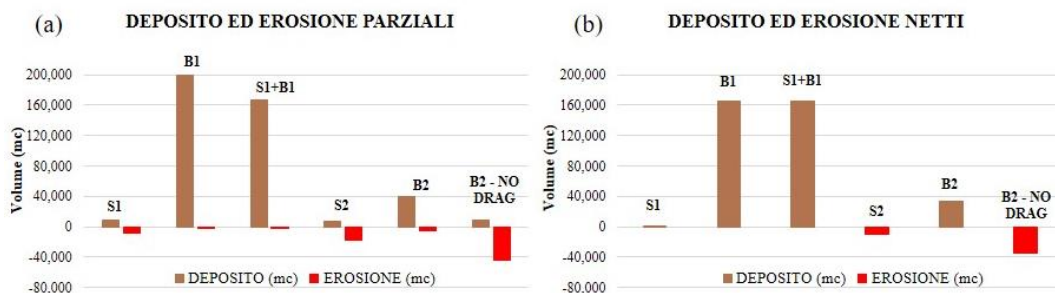
Per riprodurre l'anno medio è stato introdotto un opportuno fattore morfologico pari a 8 per la Bora-Levante, che permette di simulare solo 48 ore ed amplificare gli effetti del trasporto solido, riducendo i tempi computazionali. Infine la simulazione dell'evento estremo di Bora-Levante è stata ripetuta togliendo il contributo di drag da vento sullo specchio d'acqua interno alla laguna. Questo al fine di verificare se la differenza di livello che si determina tra un punto interno e uno in prossimità della bocca, come effetto di trascinamento del vento sulla superficie del bacino di Lignano, può essere determinante per i meccanismi di trasporto verso il delta di riflusso.

Tutti i restanti parametri del modello idro-morfodinamico e spettrale sono stati presi pari ai valori ottenuti dal processo di calibrazione del modello di *Petti et al.* (2018,2020).

### 3 ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati si concentra sul calcolo della variazione del fondo rispetto alla condizione iniziale e dei volumi di erosione e deposito in corrispondenza del lobo terminale del delta di riflusso. Sono stati dunque confrontati i valori a seguito dell'anno medio, considerando separatamente anche le componenti di Scirocco (S1) e Bora-Levante (B1) medi, e quelli al termine degli eventi estremi di Bora-Levante (B2) e Scirocco (S2) rispettivamente.

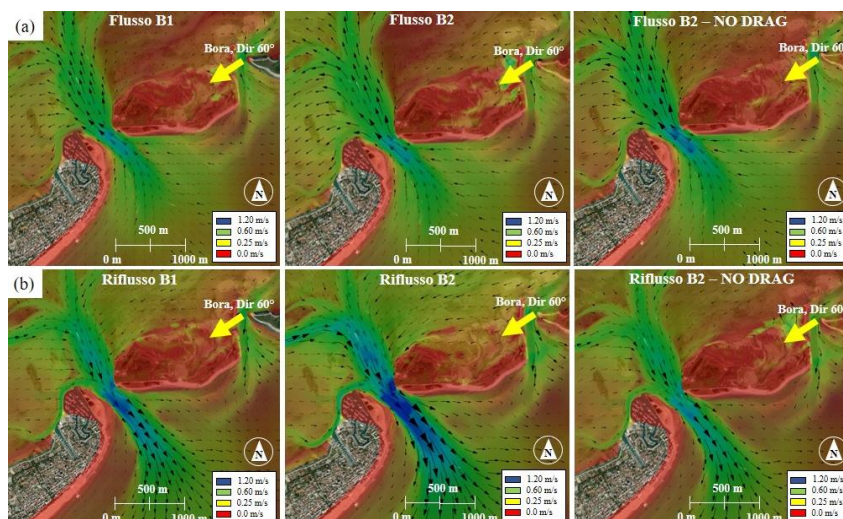
Come si vede in Figura 3, nell'arco di un anno medio gli effetti dello Scirocco S1 risultano nettamente nulli: la quasi totalità del deposito sul delta di riflusso è determinato dunque dai soli eventi di Bora-Levante, qui sintetizzati nella successione B1. Anche l'evento estremo di Bora-Levante, avente una velocità media di 19.4 m/s, genera un deposito, in entità minore rispetto al precedente ma non in termini proporzionali alla durata: si osserva infatti che, nonostante la durata dell'evento B2 sia circa un decimo rispetto a B1, il deposito netto è solo 4 volte inferiore. L'evento estremo di Scirocco S2, di durata confrontabile con S1 ma caratterizzato da una velocità media di 15.5 m/s, genera invece un'erosione netta sul delta di riflusso, in quantità comunque modeste. Questo porterebbe a concludere che le intensità del vento più alte, che seppur limitate si traducono in una maggiore energia di moto ondoso sotto costa, possono comportare dei cambiamenti anche significativi rispetto agli eventi di maggiore durata ma di intensità più contenuta.



**Figura 3.** Nel pannello (a) sono riportati i volumi di deposito ed erosione parziali sul delta di riflusso al termine delle simulazioni, mentre nel pannello (b) i volumi netti.

Tuttavia, si osserva che l'esposizione della bocca di Lignano agli eventi di Bora-Levante è piuttosto limitata, a differenza dello Scirocco e questo comporta un moto ondoso con caratteristiche contenute, anche per velocità del vento comunque elevate. L'azione del vento di Bora-Levante incide invece in maniera piuttosto

significativa sul campo di velocità in uscita dalla bocca durante le fasi di riflusso. Questo si evince dall’analisi dei risultati al termine dell’evento estremo di Bora-Levante in assenza del drag da vento in laguna, che ribalta l’esito di variazione sulla barra producendo un’erosione netta comparabile al deposito che si genera in presenza di drag. Sembrerebbe quindi che il contributo fondamentale per il deposito sulla barra non sia dovuto tanto al trasporto solido long-shore associato alle mareggiate di Bora-Levante, ma piuttosto all’effetto di incremento del livello dell’acqua nel bacino afferente alla bocca di Lignano, associato al set-up innescato dal vento. Tale incremento di livello medio determina a sua volta un maggior gradiente idraulico in fase di riflusso che si traduce in valori di velocità più alti in uscita dalla bocca, come si può vedere dai dati riportati in Figura 4 e in Tabella 2.



**Figura 4.** Nel pannello (a) sono riportati i vettori di massima velocità durante la fase di flusso per le simulazioni di Bora-Levante media, evento estremo di Bora-Levante ed evento estremo di Bora-Levante senza drag. Il pannello (b) riporta i vettori nella fase di riflusso.

Simulazione	Prisma di flusso (mc)	Prisma di riflusso (mc)	Velocità massima flusso (m/s)	Velocità massima riflusso (m/s)
Sola marea media	43,920,503	42,977,731	0.95	0.81
Bora-Levante media (B1)	27,016,231	38,400,746	0.88	0.91
Evento estremo Bora-Levante (B2)	17,873,598	45,974,295	0.70	0.99
Evento estremo Bora-Levante (B2) – NO DRAG	32,766,788	31,072,566	0.85	0.72

**Tabella 2.** Valori del prisma di marea calcolati distintamente in fase di flusso e di riflusso e delle corrispondenti velocità massime sulla bocca, per le simulazioni effettuate di sola marea media e di Bora-Levante.

I maggiori valori di velocità in uscita determinano un più alto valore del prisma di marea di riflusso e un maggior trasporto solido in uscita, con conseguente incremento del deposito sulla barra di riflusso.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Benetazzo, A., Fedele, F., Carniel, S., Ricchi, A., Bucchignani, E. & Sclavo, M. Wave climate of the Adriatic Sea: A future scenario simulation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2012, 12, 2065–2076.

Byrne, R.J., Gammisch, R.A. & Thomas, G.R. Tidal Prism-Inlet Area Relations for Small Tidal Inlets. In *Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering*, Sydney, Australia, 23–28 March 1980, Chapter 151.

D’Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M. & Rinaldo, A. On the tidal prism–channel area relations, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2010, 115, 01003.

De Swart, H., Zimmerman, J. Morphodynamics of Tidal Inlet Systems, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2009, 41, 203–229.

Petti, M., Bosa, S. & Pascolo, S. Lagoon Sediment Dynamics: A Coupled Model to Study a Medium-Term Silting of Tidal Channels, *Water*, 2018, 10, 569.

Petti, M., Bosa, S., Pascolo, S. & Uliana, E. An Integrated Approach to Study the Morphodynamics of the Lignano Tidal Inlet, *Journal of Marine Science Eng.*, 2020, 8, 77.

Schwartz, M. *Encyclopedia of Coastal Science*, 1st ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2005; Volume 1, pp. 1727-1737.