

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DI RETI A MAREA GENERATE IN LABORATORIO

L. Stefanon¹, A. Defina¹, S. Lanzoni¹, F. M. Susin¹ & L. D'Alpaos¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica, Università di Padova, via Loredan, 20 – 35131 Padova

SOMMARIO

Nella nota sono presentati i primi risultati di una serie di esperimenti di laboratorio condotti in un apposito apparato sperimentale a fondo mobile allo scopo di esaminare i processi che governano l'evoluzione dei fondali di un tipico ambiente lagunare soggetto a forzanti mareali. Sono stati osservati la crescita e lo sviluppo di una rete di canali a marea e le sue caratteristiche più rilevanti, partendo da una configurazione iniziale di fondale perfettamente orizzontale e concentrando l'attenzione sul ruolo giocato dalle forzanti mareali sullo sviluppo della configurazione dei canali. Gli esperimenti sono stati progettati con lo scopo di migliorare la conoscenza dei principali processi responsabili dell'ontogenesi e dell'evoluzione delle reti di canali a marea. Sono state anche condotte alcune analisi di confronto delle reti di canale ottenute con i risultati delle configurazioni di reti riprodotte mediante l'uso di modelli morfodinamici semplificati e completi. In particolare, sono stati analizzati l'evoluzione nel tempo delle caratteristiche morfodinamiche delle reti sviluppate e i processi idrodinamici e di trasporto dei sedimenti relativi a diverse configurazioni della rete di canali. L'evoluzione dell'area della sezione trasversale del canale, il rapporto larghezza – profondità e le lunghezze fuori rete mostrano che le configurazioni delle reti di canali a marea ottenute dagli esperimenti di laboratorio riproducono le caratteristiche più rilevanti delle reti a marea naturali.

1 INTRODUZIONE

Le reti di canali a marea esercitano un forte controllo sull'idrodinamica e sul trasporto dei sedimenti e dei nutrienti all'interno degli ambienti lagunari. La conoscenza della loro origine ed evoluzione è di importanza critica per la conservazione dei sistemi a marea.

Negli ultimi tre decenni è stata sviluppata un'ampia letteratura che descrive il comportamento dei sistemi a marea e la loro evoluzione morfodinamica (per approfondire: Allen, 2000; Friedrichs & Perry, 2001). Nonostante il loro ruolo fondamentale nel descrivere e comprendere i processi che governano l'evoluzione morfologica dei bacini a marea, solo negli ultimi anni sono stati proposti modelli matematici e numerici in grado di analizzare la morfogenesi e l'evoluzione morfodinamica a lungo termine dei canali a marea (Schuttelaars & de Swart, 2000; Lanzoni & Seminara, 2002; Fagherazzi & Furbish, 2001; Fagherazzi & Sun, 2004;

D'Alpaos, A. et al., 2005, 2007). Inoltre, sebbene lo sviluppo delle reti di canali a marea sia stato analizzato attraverso lo studio di campo di sistemi reali e modelli concettuali (Pestrong, 1965; French & Stoddart, 1992), la descrizione dei processi e dei meccanismi che presiedono il primo sviluppo delle reti a marea necessita ancora di più approfondite indagini. In particolare, non sono stati condotti tentativi di investigare tali processi sulla base di esperimenti controllati in laboratorio. Fanno eccezione, se si vuole, gli esperimenti recentemente realizzati da Tambroni et al. (2005), che hanno investigato l'evoluzione morfodinamica del fondo di un singolo diritto canale a marea chiuso da un lato e connesso all'altro lato ad un bacino rettangolare rappresentante il mare. Con lo scopo di contribuire ad una maggiore conoscenza dei principali processi fisici responsabili della ontogenesi delle reti a marea, è stata condotta una serie di esperimenti di laboratorio in un grande apparato sperimentale schematizzante un tipico ambiente lagunare soggetto a forzanti mareali. Gli esperimenti sono tutt'ora in corso di sviluppo ed i risultati finora raccolti, pur interessanti, hanno meramente carattere preliminare e necessitano di ulteriori approfondimenti.

Per meglio comprendere i risultati sperimentali ottenuti, sono stati utilizzati anche modelli idrodinamici semplificati e completi, per condurre analisi numeriche e teoriche sulle configurazioni sperimentali della rete e per comparare le caratteristiche più rilevanti delle morfologie sperimentali osservate.

L'articolo è organizzato come segue. La Sezione 2 descrive l'apparato sperimentale. La Sezione 3 descrive gli esperimenti e i relativi risultati. La Sezione 4 utilizza i risultati di modelli idrodinamici semplificati e completi per confrontare alcune caratteristiche morfometriche delle reti sintetiche osservate. Infine, la Sezione 5 delinea una serie di conclusioni preliminari e qualche nota sugli sviluppi futuri della ricerca.

2 APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale, schematicamente illustrato in Figura 1, è costituito da due bacini contigui riproducenti schematicamente il mare e la laguna.

Il bacino lagunare ha una superficie di $5.3 \times 4.0 \text{ m}^2$, mentre l'adiacente e più profondo bacino del mare ha una superficie di $1.6 \times 4.0 \text{ m}^2$. Il letto della laguna è costituito da sedimenti incoerenti per uno spessore di 30 cm. Il mare è separato dalla laguna da una barriera di pannelli in legno; la bocca della laguna (di cui si possono variare forma e larghezza) è attualmente collocata nel mezzo di questa barriera, mentre davanti alla bocca una fascia, ricoperta a sua volta di sedimenti per uno spessore di circa 20 cm, permette di riprodurre la pendenza dolce del fondo del mare (Fig. 1).

La marea è generata variando i livelli del bacino che forma il mare mediante una paratoia con bordo affilato in acciaio, oscillante verticalmente. L'acqua introdotta nel mare è per una parte continuamente sfiorante al di sopra del bordo della paratoia ed è raccolta in un serbatoio separato, dove un gruppo di pompe la reimmettono in circolo.

E' stato implementato un software per manovrare la paratoia, permettendo di riprodurre una marea sinusoidale di periodo e ampiezza fissati, oscillante attorno ad un determinato livello medio. Il software corregge continuamente il moto della paratoia sulla base di un processo di feedback, basato su di un controllo istantaneo dei livelli del mare mediante alcune sonde ad ultrasuoni.

Un pantografo, controllato da un computer, è utilizzato per il rilievo delle quote del fondo all'interno della laguna. L'apparato è composto da un sistema laser (risoluzione:

300 μm), che misura le quote del fondo, accoppiato ad una sonda ad ultrasuoni, che simultaneamente misura il livello dell'acqua ad esse associato. Conoscendo la profondità locale della corrente, è possibile correggere le misurazioni del laser dagli effetti di rifrazione indotti dalla presenza dell'acqua. Il rilievo batimetrico del fondo lagunare, pertanto, è realizzato senza fermare l'esperienza e prosciugare i sedimenti fino a scoprire la superficie, evitando così indesiderate quanto inevitabili perturbazioni della topografia del letto.

I sedimenti utilizzati nell'esperienza sono privi di coesione tra i grani, presentano una densità di 1041 kg/m^3 e una dimensione media dei grani d_{50} di 0.8 mm.

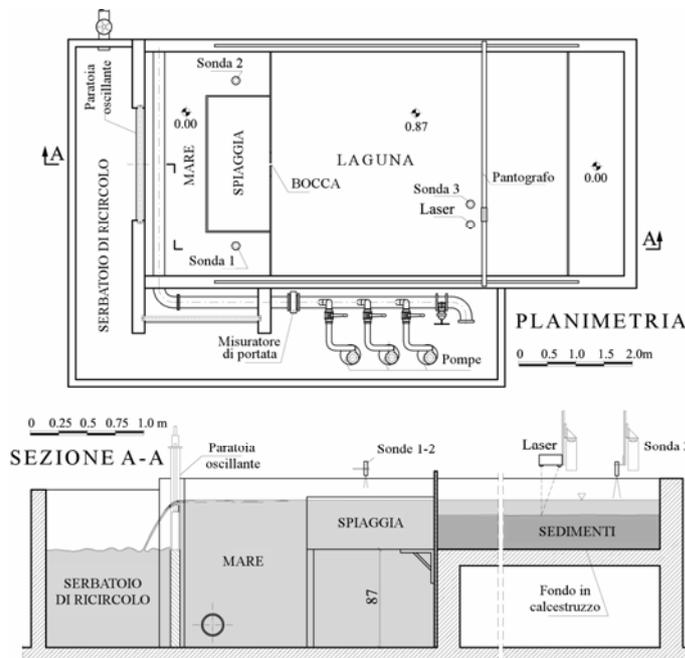


Figura 1. Schema dell'apparato sperimentale.

3 ESPERIMENTI

Gli esperimenti finora realizzati mirano principalmente a comprendere in quali condizioni si sviluppa una rete di canali: a questo fine, sono state considerate maree diverse (per esempio caratterizzate da ampiezza, periodo e livello medio diversi) e differenti forme e dimensioni della bocca a mare.

Ogni esperimento comincia agendo su una topografia del letto inizialmente piana ed orizzontale assoggettandola ad una assegnata onda di marea. E' stato osservato che una rete di canali si forma già con valori abbastanza piccoli dell'ampiezza di marea (1.0-2.0 cm) e della profondità (1.0-2.0 cm) e con un livello medio che permetta il prosciugamento del bacino a marea e lo scoprimento dei sedimenti presenti sul fondo durante la fase di riflusso. E' stato scelto un periodo di marea di 8-12 minuti, con lo scopo di evitare in corrispondenza della bocca forme vorticose di forte intensità e

garantire i caratteri di onda lunga per le oscillazioni di livello generate nel dispositivo sperimentale.

E' risultato che in presenza di ampiezze delle oscillazioni dei livelli troppo grandi, i sedimenti tendevano intensamente ad essere trasportati in sospensione, si formavano sviluppati sistemi di dune e la nascita della rete di canali risultava inibita. In ogni caso, si formava una grande erosione, ricoperta da dune, in corrispondenza della bocca. La rete di canali eventualmente prendeva origine solo dal margine di tale regione. Vale la pena osservare che il trasporto dei sedimenti del letto era attivo durante tutto l'esperimento, mentre il picco delle velocità di flusso e riflusso favorivano il trasporto in sospensione lungo i canali. Infine, in tutti gli esperimenti la laguna subiva una progressiva netta erosione, con la conseguente riduzione del livello medio del fondo.

Nel seguito della nota l'attenzione è focalizzata sui risultati di due esperimenti tipici, denominati rispettivamente come Prova 1 e Prova 2.

3.1 Prova 1

In questo capitolo è descritta brevemente l'evoluzione del letto della laguna che ha caratterizzato la Prova 1, a partire da una configurazione inizialmente piana e orizzontale.

La forzante dei livelli (marea) con ampiezza di 2 cm e periodo di 8 minuti, oscillava attorno ad un livello medio coincidente con la quota del letto dei sedimenti. Una bocca di forma rettangolare larga 0.50 m era collocata al centro del confine mare-laguna.

Come già ricordato, una grande regione erosa si è rapidamente formata davanti alla bocca. Dopo 220 cicli di marea pochi canali isolati hanno iniziato a formarsi nel margine di questa regione, incominciando a incidere le porzioni di laguna soggette a prosciugamento. Dopo 500 cicli, hanno incominciato a svilupparsi, partendo da questi canali, alcune piccole ramificazioni. Dopo 1200 cicli, si sono sviluppati quattro canali principali quasi rettilinei (Fig. 2a). Le ramificazioni di questi canali in alcuni casi diventavano instabili. Si è, infatti, osservato che alcune piccole incisioni abbandonavano il canale principale dal quale si erano originate per unirsi ad un altro canale. In alcuni casi i rami più piccoli della rete che si andava formando migravano lateralmente, formando piccole curve. Dopo 2300 cicli, i canali principali si sono allungati significativamente e a 2800 cicli tre curve pronunciate si sono sviluppate lungo uno di questi canali. Comunque, le piccole forme di fondo (principalmente dune) inizialmente coprenti l'erosione profonda antistante la bocca, si sono progressivamente estese su altre parti della laguna, tendendo a distruggere la rete di canali.

Allo scopo di far scomparire queste indesiderate forme di fondo e favorire lo sviluppo di una ben definita rete di canali, è stato leggermente ridotto il livello medio del mare (circa 0.5 cm). La Figura 2b mostra la configurazione del letto ottenuta dopo 6000 cicli, quando l'esperimento è stato fermato.

3.2 Prova 2

L'esperimento è stato caratterizzato da una forzante dei livelli (marea) con ampiezza di 2 cm, periodo di 10 minuti, oscillante attorno ad un livello medio 1.5 cm più alto dell'elevazione iniziale del fondo. La larghezza della bocca, di forma trapezoidale, variava da 0.05 m in corrispondenza del fondo della laguna (posto 0.30 m dalla quota iniziale dei sedimenti) a 0.20 m in corrispondenza della superficie dei sedimenti.

All'inizio dell'esperimento il livello medio del mare sommergeva i sedimenti

durante l'intero ciclo di marea. Rapidamente, anche in questo caso, si è formata una larga regione erosa ricoperta di dune, vicino alla bocca. L'erosione era più profonda di quanto osservato nella Prova 1, a causa dei valori più grandi raggiunti dalla velocità (e quindi dalle tensioni tangenziali) come conseguenza della maggiore profondità della bocca. Dopo 800 cicli, alcuni isolati ed instabili canali hanno cominciato a formarsi dai contorni dell'erosione alla bocca. A 1300 cicli si è ridotto il livello medio del mare per permettere il prosciugamento dei sedimenti in superficie durante la fase di riflusso. Non molto dopo, una rete a marea più definita ha incominciato a formarsi, caratterizzata da tre canali principali che si sono allungati significativamente durante i successivi cicli di marea. E' stato possibile osservare anche la formazione di alcune curve. Le piccole forme di fondo ben sviluppate, precedentemente osservate lungo i canali principali, tendevano a ridurre sensibilmente le proprie dimensioni. Inoltre, erosioni localizzate pronunciate si sono formate nelle principali giunzioni della rete di canali (Fig. 2d). In ogni caso l'evoluzione era molto lenta e solo negli ultimi 1000 cicli i canali si sono approfonditi apprezzabilmente, formando una rete più complessa, caratterizzata dalla formazione di qualche curva anche lungo i canali principali (Fig. 2c). La prova è stata interrotta dopo 7710 cicli.



Figura 2. Topografia della laguna osservata nella Prova 1 dopo: a) 1200 cicli; b) 6000 cicli; e nella Prova 2 dopo: c) 6000 cicli; d) 7710 cicli.

4 ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

Le quote del fondo acquisite durante gli esperimenti attraverso il laser e adeguatamente corrette tenendo conto degli effetti della rifrazione sono state utilizzate

per produrre le mappe topografiche del letto della laguna in istanti diversi. La Figura 3 mostra la distribuzione delle quote del fondo in quattro differenti istanti della Prova 1 e della Prova 2: l'evoluzione temporale della rete di canali emerge chiaramente.

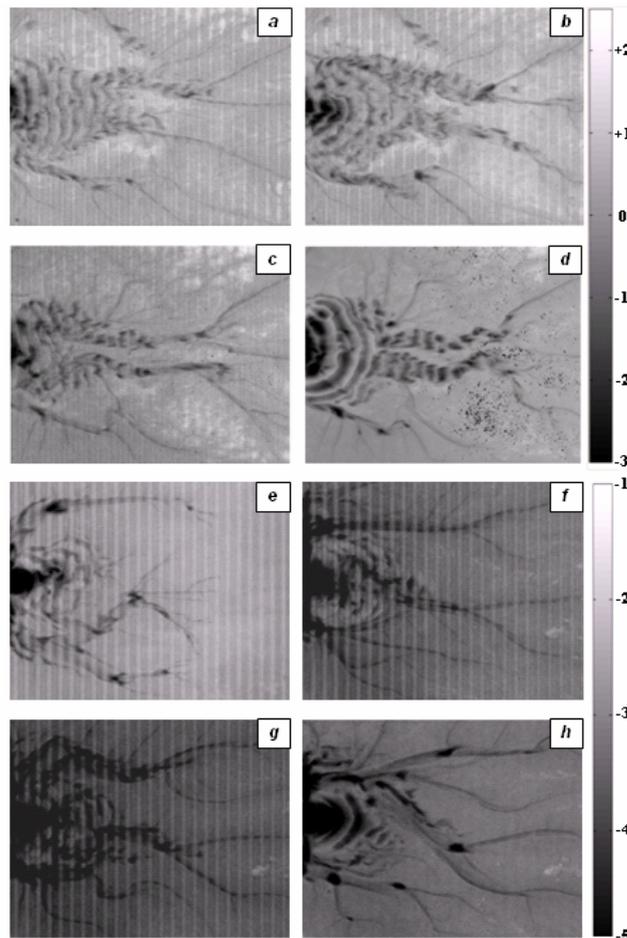


Figura 3. Distribuzione delle quote del fondo misurate all'interno della laguna nella Prova 1 dopo: a) 1650 cicli; b) 2900 cicli; c) 3910 cicli; d) 5950 cicli; nella Prova 2 dopo: e) 2200 cicli; f) 6270 cicli; g) 6845 cicli; h) 7700 cicli. Le bande verticali sono prodotte dalla variazione dei livelli di marea durante l'acquisizione della batimetria. Le quote sono state ottenute a partire da una uniforme configurazione iniziale del fondo.

Allo scopo di classificare le piccole forme di fondo, che si sono formate durante entrambi gli esperimenti, si sono utilizzate le topografie del fondo rilevate alla fine della Prova 1 e della Prova 2, realizzando alcune simulazioni numeriche a fondo fisso. Le equazioni 2D delle acque basse sono state risolte numericamente utilizzando modelli "staggered" agli elementi finiti, basati sull'approccio di Galerkin. In questi modelli le equazioni che governano la propagazione di onde lunghe in acque basse sono

modificate per poter trattare efficacemente i processi di transizione asciutto-bagnato in domini irregolari. Una descrizione dettagliata delle equazioni modificate delle acque basse, delle tecniche numeriche adottate e della validazione del modello è contenuta in *D'Alpaos & Defina (1995), Defina (2000), D'Alpaos & Defina (2006)*.

I risultati numerici, ottenuti assegnando il valore di $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ al coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler K_S indicano che nella Prova 1 il valore più alto di entrambe le velocità di flusso U ($\sim 3.7 \text{ cm/s}$) e lo sforzo tangenziale al fondo τ ($\sim 0.091 \text{ Pa}$) si verificano durante la fase di riflusso, in corrispondenza alla profonda erosione che si forma davanti alla bocca e nel primo tratto dei due canali che si sviluppano da essa. Le ramificazioni dei canali secondari rivelano per queste grandezze valori più bassi di U ($\sim 2 \text{ cm/s}$) e τ ($\sim 0.0002 \text{ Pa}$).

Un quadro simile emerge dalla simulazione della Prova 2 ma con valori più alti di entrambe le velocità ($\sim 5.8 \text{ cm/s}$) e dello sforzo tangenziale al fondo ($\sim 0.24 \text{ Pa}$) sulla parte antistante la bocca apprezzabilmente erosa e nel tratto dei due canali principali che si sviluppano partendo da questa. Viceversa, le ramificazioni dei canali secondari rivelano per la velocità massima e per lo sforzo tangenziale valori più bassi di U ($\sim 1.5 \text{ cm/s}$) e τ ($\sim 0.0015 \text{ Pa}$).

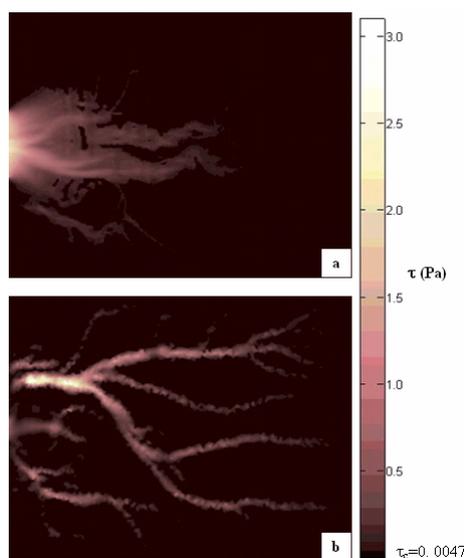


Figura 4. Distribuzione spaziale dello sforzo di Shields $\tau^* - \tau_{cr}$ calcolato: a) sulla configurazione finale della Prova 1 e b) della Prova 2. Entrambi τ^* e τ_{cr} sono stati calcolati utilizzando $d_{50}=0.8\text{mm}$, come dimensione rappresentativa dei grani dei sedimenti adottati.

Lo sforzo tangenziale al fondo risultante dai calcoli numerici è stato utilizzato per determinare lo sforzo di Shields adimensionale, τ^* :

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d} = \frac{u^{*2}}{\Delta \cdot g \cdot d} \quad (1)$$

dove: d è la dimensione rappresentativa dei grani, g è la costante di gravità, ρ e ρ_s sono rispettivamente le densità dell'acqua e dei grani, $u^* = (\tau^*/\rho)^{1/2}$ è la velocità d'attrito, v è

la viscosità cinematica dell'acqua e $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$ è la densità relativa dei sedimenti sommersi.

Le Figure 4a,b mostrano la distribuzione spaziale degli sforzi di Shields, $\tau^* - \tau_c^*$, durante la fase di riflusso della Prova 1 e della Prova 2, quando lo sforzo tangenziale al fondo raggiunge il suo massimo. Il valore critico τ_c^* per l'incipiente movimento dei sedimenti è stato valutato utilizzando la relazione analitica proposta da *Brownlie* (1981):

$$\tau_c^* = 0.22Rp^{-0.6} + 0.06 \exp(-17.77Rp^{-0.6}) \quad (2)$$

dove Rp è il numero di Reynolds della particella:

$$Rp = \frac{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot d^3}}{\nu} \quad (3)$$

In entrambe le prove emerge chiaramente che una grande porzione della laguna è interessata dal trasporto di sedimenti. Analisi ulteriori mostrano che, scegliendo un valore diverso del diametro rappresentativo dei grani (e.g., d_{90}), la percentuale della superficie lagunare interessata dal trasporto dei sedimenti non si modifica significativamente.

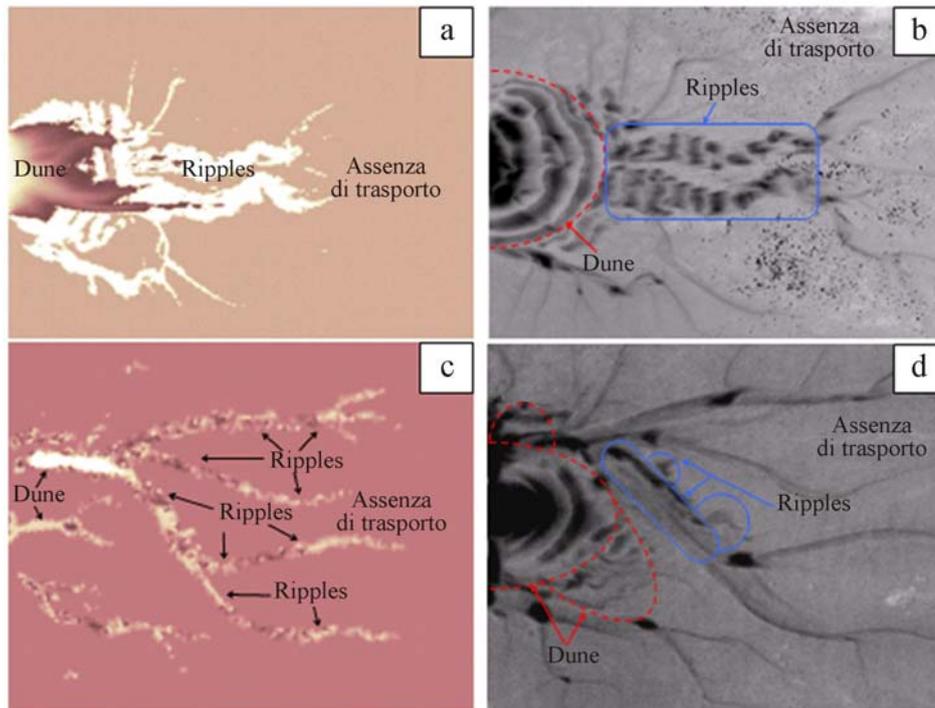


Figura 5. Distribuzioni spaziali delle forme di fondo: (a,c) ottenute attraverso il criterio di Simons & Richardson (1966) applicate ai valori calcolati di Rp e τ^* per la Prova 1 (a) e per la Prova 2 (c); (b,d) ricavate dalle osservazioni sperimentali per la Prova 1 (b) e per la Prova 2 (d).

I valori calcolati per lo sforzo di Shields τ^* e per il numero di Reynolds della

particella R_p sono stati utilizzati per determinare la porzione di laguna in cui, in accordo con il criterio proposto da *Simons & Richardson* (1966), è probabile che si sviluppino piccole forme di fondo. La Figura 5 riporta un confronto tra la distribuzione spaziale sperimentale e quella calcolata delle forme di fondo per la Prova 1 e la Prova 2. L'accordo tra i risultati calcolati e quelli osservati risulta essere più che soddisfacente.

Infatti, le dune si formano nella zona erosa antistante la bocca e nel primo tratto dei canali principali. La lunghezza d'onda delle dune ($\lambda_d \approx 20$ cm) sembra concordare con le previsioni ottenute dalle relazioni empiriche proposte da *Van Rjin* ($\lambda_d \approx 6 D$) e *Yalin* ($\lambda_d \approx 7.3 D$) (*Van Rjin*, 1984c; *Yalin*, 1977; *Yalin & Ferriera*, 2001), essendo la profondità media D nelle porzioni della laguna coperte dalle dune di circa 3 cm.

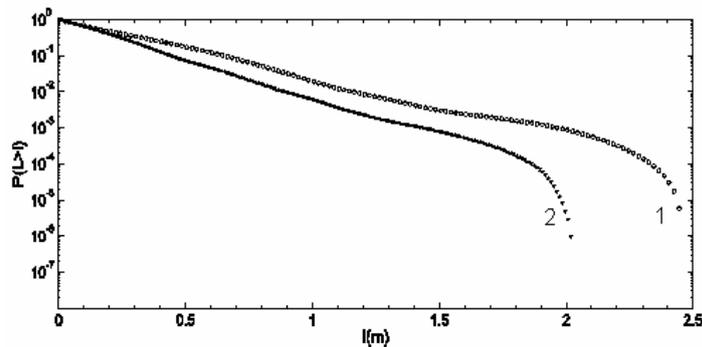


Figura 6. Distribuzione probabilistica delle lunghezze fuori rete per la configurazione finale dei canali osservata nella Prova 1 e nella Prova 2.

La configurazione finale della rete ottenuta dalla Prova 2 è caratterizzata dallo sviluppo di minori forme di fondo, eccetto per le dune ($\lambda_d \approx 7-8$ cm) ricoprenti il fondo della profonda erosione vicina alla bocca. Ripples molto piccole interessano i tratti iniziali più larghi dei canali principali.

Si è quindi condotta un'analisi morfometrica della rete sperimentale utilizzando un modello idrodinamico semplificato (*Rinaldo et al.*, 1999a, b), applicato con successo allo studio di vari ambienti a marea (*Marani et al.*, 2003). Il campo di flusso idrodinamico ottenuto attraverso questo modello semplificato rende possibile determinare il percorso del flusso non canalizzato connettendo ogni zona non canalizzata al più vicino canale a marea in modo da calcolarne la lunghezza.

Le distribuzioni di probabilità delle lunghezze fuori rete, rivelano un andamento lineare in un grafico semi-logaritmico (Fig. 6), suggerendo lo stesso tipo di decadimento esponenziale determinato da *Marani et al.* (2003) in aree diverse della laguna di Venezia.

In Figura 7 sono da ultimo riportate le due configurazioni finali risultanti dagli esperimenti per la Prova 1 e per la Prova 2, mentre nelle Figure 8 e 9 sono rappresentate alcune caratteristiche rilevanti della geometria trasversale di alcuni canali, in cui sono stati indicati con B la larghezza del canale, con D la profondità del canale (misurata lungo l'asse del canale), con $\beta=B/D$ il rapporto larghezza-profondità e con Ω l'area trasversale della sezione.

Sono anche riportate in un grafico semi-logaritmico la larghezza del canale B e le coordinate intrinseche lungo il canale s (Fig. 10).

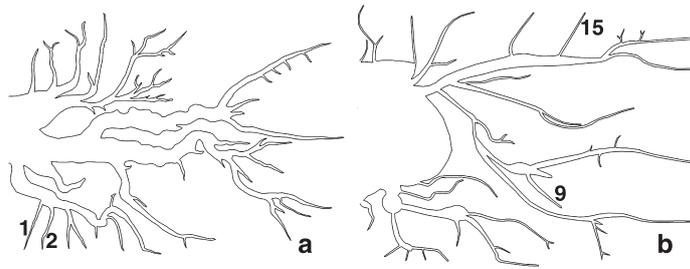


Figura 7. Digitalizzazione della configurazione finale della rete ottenuta nella Prova 1 (a) e nella Prova 2 (b). I canali denominati con 1, 2, 9 e 15 sono quelli considerati nei grafici di figura 8, 9 e 10.

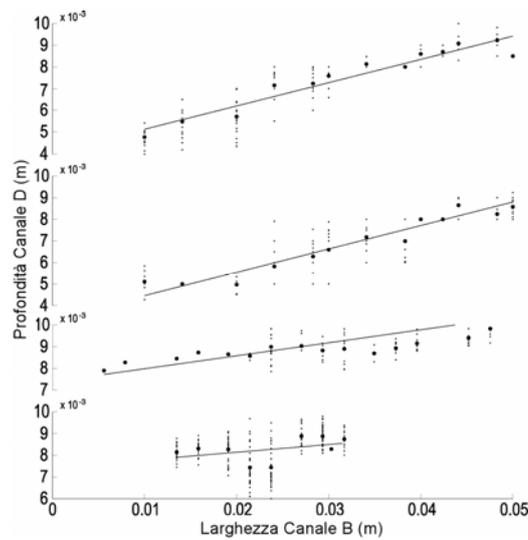


Figura 8. Profondità dei canali vs larghezza per le sezioni trasversali dei canali indicate in Fig. 7.

In entrambe le prove, B e D raggiungono valori relativamente piccoli, compresi negli intervalli di 1-2 cm e 8-10 cm rispettivamente. I risultati sintetizzati in Figura 8 suggeriscono che, per un dato canale, esiste una relazione quasi lineare tra D e B . E' stato osservato che il rapporto β , il cui valore è deducibile in Figura 9, variava tra 2, per piccoli canali, e 20, per i canali principali, con un limite superiore di 50. Questi valori concordano con i rilievi in campo ottenuti per la Laguna di Venezia (Marani *et al.*, 2002). Infine, in Figura 10, risulta accentuato l'ampliamento progressivo esponenziale verso il mare subito dai canali, che è tipico degli ambienti a marea (Lanzoni & Seminara, 1998; Marani *et al.*, 2002).

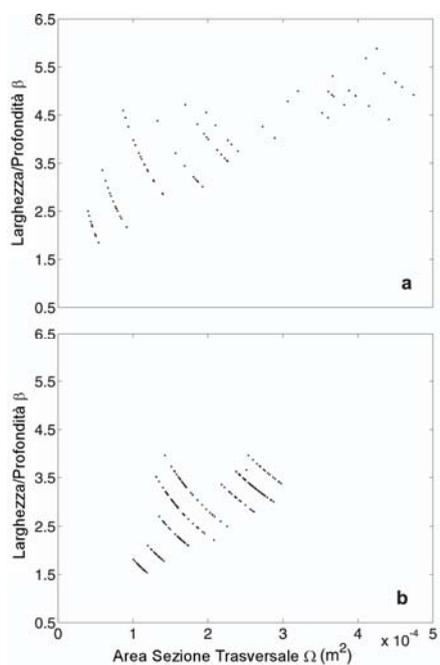


Figura 9. Confronto tra le curve rapporto β - area della sezione trasversale Ω di due canali dritti: a) canale 1 della Prova 1; b) canale 15 della Prova 2.

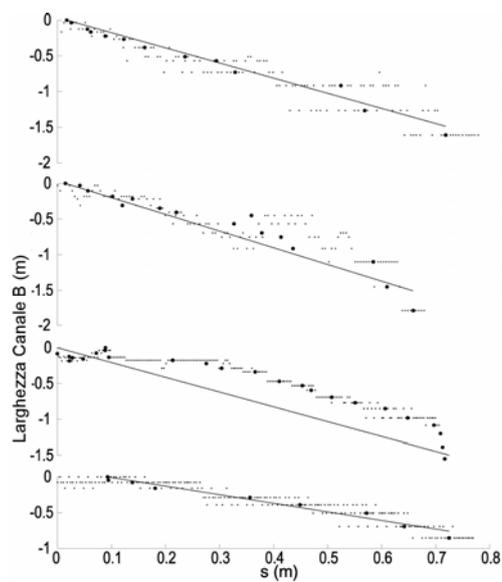


Figura 10. Logaritmo del rapporto $B(s)/B(0)$ vs la coordinata intrinseca s , per i canali indicati in Figura 7. $B(s)$ rappresenta la larghezza del canale alla coordinata s , $B(0)$ rappresenta la larghezza del canale alla bocca.

5 TRASFERIMENTO AL REALE DEI DATI SPERIMENTALI

Pur non essendo lo scopo delle indagini sperimentali condotte quello di simulare in scala ridotta la nascita e lo sviluppo di una rete di canali in una laguna, può essere egualmente di un qualche interesse derivare i parametri adimensionali che governano la similitudine meccanica della propagazione di un'onda lunga periodica in un bacino a marea a fondo mobile per valutare se e in quale misura i risultati ottenuti si possano trasferire al reale.

Il moto della fase fluida in un bacino a marea è, come è noto, governato dalle equazioni di De Saint Venant:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} + \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \rho \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 D} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} + \gamma \frac{\partial h}{\partial y} + \rho \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 D} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial(DU)}{\partial x} + \frac{\partial(DV)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

nelle quali: ρ e γ rappresentano, rispettivamente, la densità e il peso specifico dell'acqua; U e V sono le componenti della velocità mediate sulla verticale lungo le direzioni x ed y ; h è l'elevazione della superficie dell'acqua rispetto ad un assegnato piano di riferimento; D è la profondità locale dell'acqua; C è il coefficiente di conduttanza (pari al coefficiente di scabrezza secondo Chézy, normalizzato con la radice di g).

Indicate con L_x e L_y due lunghezze caratteristiche (lunghezza e larghezza del bacino) in direzione x ed y , con D_0 la profondità media iniziale del bacino, con ω la frequenza angolare dell'onda di marea, con U_0 una velocità di riferimento mediata sulla verticale e con a l'ampiezza dell'onda di marea, ed espresse con l'apice le grandezze adimensionali corrispondenti alle diverse variabili, le (4), (5) e (6) si possono riscrivere nella forma:

$$\frac{\partial U'}{\partial t'} + \frac{Fr^2}{\varepsilon S} U' \frac{\partial U'}{\partial x'} + r_d \frac{Fr^2}{\varepsilon S} V' \frac{\partial U'}{\partial y'} + \frac{1}{S} \frac{\partial h'}{\partial x'} + \frac{R}{S} \frac{U' \sqrt{U'^2 + V'^2}}{C'^2 D'} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial V'}{\partial t'} + \frac{Fr^2}{\varepsilon S} U' \frac{\partial V'}{\partial x'} + r_d \frac{Fr^2}{\varepsilon S} V' \frac{\partial V'}{\partial y'} + \frac{1}{S} \frac{\partial h'}{\partial y'} + \frac{R}{S} \frac{V' \sqrt{U'^2 + V'^2}}{C'^2 D'} = 0 \quad (8)$$

$$\varepsilon \frac{\partial h'}{\partial t'} + \frac{\partial \bar{D}'}{\partial t'} + \frac{Fr^2}{\varepsilon S} \frac{\partial(D'U')}{\partial x'} + r_d \frac{Fr^2}{\varepsilon S} \frac{\partial(D'V')}{\partial y'} = 0 \quad (9)$$

nelle quali, indicato con ε il rapporto tra l'ampiezza dell'onda lunga che si propaga nel bacino e la profondità media iniziale D_0 e con r_d il rapporto tra L_x e L_y , si sono opportunamente evidenziati i gruppi adimensionali che governano il fenomeno esaminato, aventi espressione:

$$Fr^2 = \frac{U_0^2}{gD_0} \quad (10)$$

$$S = \frac{\omega L_x U_0}{ga} \quad (11)$$

$$R = \frac{gU_0}{\omega D_0 C_0^2} S \quad (12)$$

nelle quali C_0 è un valore tipico della conduttanza caratterizzante il flusso.

Con riferimento a tali rapporti adimensionali è nota la possibilità di rispettare la similitudine di Froude e la conservazione del gruppo adimensionale S che esprime l'importanza relativa tra forze gravitazionali e inerzia locale. Non è, invece, possibile contemporaneamente garantire l'uguaglianza sul prototipo e sul modello del terzo gruppo dimensionale R . Ne consegue che l'importanza relativa delle forze dissipative rispetto a quelle rappresentative dell'inerzia locale non è riproducibile, introducendo in tal modo un effetto scala che deve essere considerato.

Con queste premesse, indicata con λ la scala di riduzione planimetrica, uguale nelle direzioni x e y , si ottengono le seguenti relazioni tra i rapporti delle grandezze geometriche e cinematiche:

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda \quad (13)$$

$$r_u = \lambda_z^{1/2} = \frac{\lambda}{r_t} \quad (14)$$

$$r_\varepsilon = \frac{r_u \cdot r_t}{\lambda} \quad (15)$$

$$r_S = \frac{S_m}{S_p} = \frac{\lambda \cdot r_u}{\lambda_z \cdot r_t} = 1 \quad (16)$$

$$r_R = \frac{R_m}{R_p} = \frac{1}{d \cdot r_C^2} = 0.337 \neq 1 \quad (17)$$

essendo λ_z la scala di riduzione geometrica in direzione verticale, r_u e r_t il rapporto di riduzione delle velocità e dei tempi, d il rapporto di distorsione tra modello e prototipo, pari a 12.73, r_C il rapporto di riduzione della conduttanza, ed avendo indicato con i pedici m e p i valori assunti dai gruppi adimensionali S ed R, rispettivamente, sul modello e sul prototipo.

Il rispetto della similitudine del trasporto solido, d'altra parte, impone la conservazione dei valori assunti dal parametro adimensionale di Shields, τ^* , e dal numero di Reynolds della particella, R^* :

$$\frac{\tau_m^*}{\tau_p^*} = \frac{r_u^2}{r_{ks}^2 \cdot \lambda_z^{1/3} \cdot r_s \cdot r_{ds}} = 1 \quad (18)$$

$$\frac{R_m^*}{R_p^*} = r_s^{3/2} \cdot r_{ds}^{1/2} = 1 \quad (19)$$

Su queste basi, nel caso specifico delle esperienze condotte, i rapporti individuati dalle equazioni (13)-(19) applicati all'apparato sperimentale predisposto conducono ad un prototipo le cui caratteristiche sono sintetizzate in Tabella 1.

	modello	prototipo	fattore di scala		
L_x (m)	5.22	3322	$\lambda_x =$	0.00157	
L_y (m)	4.00	2546	$\lambda_y =$	0.00157	
a (m)	0.02	1.00	$\lambda_z =$	0.02	
T (s)	480	43200	$r_t =$	0.012	
ρ_s (kg/m ³)	1041.42	2650			
Δ	0.04	1.65	$r_s =$	0.025	
d_{s50} (μm)	800	234	$r_{ds} =$	3.415	
C (m ^{1/2} s ⁻¹)	30.00	62.11	$r_C =$	0.483	
D_0 (m)	0.01	0.50	$\lambda_z =$	0.02	
$\varepsilon = a / D_0$	2.000	2.000	$r_\varepsilon =$	1.000	
<i>baassifondi</i>	D (m)	0.003	$\lambda_z =$	0.02	
	U (m/s)	0.004	$r_u =$	0.141	
	Fr	0.0233	0.0233	$r_u / \lambda_z^{1/2} =$	1.000
	τ^*	0.0005	0.0005	$r_u^2 / (r_C^2 r_s r_{ds}) =$	1.000
	Rp	14.42	14.42	$r_s^{1/2} r_{ds}^{3/2} =$	1.000
<i>canali</i>	D (m)	0.02	$\lambda_z =$	0.02	
	U (m/s)	0.04	$r_u =$	0.141	
	Fr	0.0927	0.0927	$r_u / (\lambda_z^{1/2}) =$	1.000
	τ^*	0.0537	0.0537	$r_u^2 / (r_C^2 r_s r_{ds}) =$	1.000
	Rp	14.42	14.42	$r_s^{1/2} r_{ds}^{3/2} =$	1.000
<i>bocca</i>	D (m)	0.03	$\lambda_z =$	0.02	
	U (m/s)	0.0300	0.2121	$r_u =$	0.141
	Fr	0.0553	0.0553	$r_u / (\lambda_z^{1/2}) =$	1.000
	τ^*	0.0302	0.0302	$r_u^2 / (r_C^2 r_s r_{ds}) =$	1.000
	Rp	14.42	14.42	$r_s^{1/2} r_{ds}^{3/2} =$	1.000

Tabella 1. Riepilogo dei calcoli effettuati sulla similitudine.

Il prototipo che emerge dai calcoli è rappresentativo di un bacino a marea di estensione pari a 2500 x 3300 m², con un fondale avente profondità media di 50 cm, costituito da sedimenti sabbiosi di diametro pari a 234 μm , nel quale si propaga un'onda di marea di ampiezza pari ad 1 m e di periodo 12 ore. Si tratta di una situazione tipica delle piccole lagune dell'Alto Adriatico, in particolare di quelle esistenti alla foce del Po, di cui è riportato un esempio in Figura 11.



Figura 11. Laguna del Basson.

I risultati degli esperimenti, pur caratterizzati da una resistenza al moto superiore a quella del prototipo ($r_R = 0.33$), possono ragionevolmente considerarsi significativi per quanto riguarda le forme morfologiche che si generano e si sviluppano nella realtà. Infatti negli ambienti a marea con le caratteristiche indicate l'importanza dei termini di attrito nelle equazioni del moto è in genere modesta e al più di un qualche rilievo solo localmente (D'Alpaos & Defina, 2007; D'Alpaos et al., 2008).

6 CONCLUSIONI

Le analisi morfometriche della rete di canali a marea generate in laboratorio oggetto del presente contributo suggeriscono una stretta analogia con le reti reali. Le distribuzioni di probabilità delle lunghezze fuori rete, così come l'intervallo di variazione del rapporto β larghezza-profondità, indicano che gli esperimenti qui descritti possono contribuire ad una migliore comprensione dei processi morfodinamici

responsabili della crescita iniziale e del conseguente sviluppo delle reti di canali all'interno di bacini a marea. Le osservazioni di laboratorio mostrano che le reti di canali si formano, partendo da un letto inizialmente piano ed orizzontale, solo per: i) valori sufficientemente piccoli della profondità; ii) un livello medio del mare che permette l'emersione del fondo durante la fase di riflusso; iii) un periodo di marea di circa 8-12 minuti. Profondità della corrente maggiori comportano una maggiore formazione di forme di fondo (ripples e dune) e sembrano introdurre fenomeni di instabilità che contrastano la formazione di canali stabili.

La velocità di crescita della rete è in genere molto lenta nelle fasi iniziali degli esperimenti. Tuttavia, non appena la rete assume una configurazione ben delineata inizia una fase di crescita relativamente rapida (con canali che si allungano in media di 1.5 – 2 cm ogni 150 cicli di marea) al termine della quale la rete a marea risulta soggetta solo a piccole variazioni. Questo comportamento concorda con l'ipotesi, usualmente adottata, nei modelli di reti a marea che ad una formazione iniziale della rete di canali relativamente rapida, segue una fase di elaborazione più lenta, caratterizzata dalla comparsa di meandri e di processi di espansione/contrazione della rete.

Gli esperimenti descritti nella presente nota costituiscono la prima di una schematica serie di esperimenti volti ad approfondire i complessi meccanismi che regolano la dinamica delle reti a marea. Ulteriori aspetti che si intende analizzare riguardano l'influenza della configurazione iniziale del fondo (piana nei presenti esperimenti) sulla struttura della rete di canali, così da tenere in conto le irregolarità casuali che in genere caratterizzano il fondo dei bacini a marea reali. Ulteriori aspetti che meritano attenzione riguardano il ruolo della coesione dei sedimenti, tipica degli ambienti lagunari, l'influenza esercitata dalle condizioni al contorno (e.g. il ruolo di una diversa collocazione della bocca della laguna) e gli effetti di eventuali immissioni esterne di sedimenti.

BIBLIOGRAFIA

- Allen, J. R. L. 2000, Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe, *Quat. Sci. Rev.* 19 (17-18), 1155-1231.
- D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M., Fagherazzi, S. & Rinaldo, A., 2005, Tidal Network ontogeny: channel initiation and early development, *J. Geophys. Res.* 110, F02001, doi:10.1029/2004JF000182.
- D'Alpaos, A., S. Lanzoni, M. Marani, & A. Rinaldo (2007), Landscape evolution in tidal embayments: Modeling the interplay of erosion, sedimentation and vegetation dynamics, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JF000537.
- D'Alpaos, L. & Defina, A. (1995), Modellazione matematica del comportamento idrodinamico delle zone di barena solcate da una rete di canali minori, *Istituto Veneto di SS.LL.AA., Rapporti e studi, Vol. XII*, 353-372.
- D'Alpaos, L. & Defina, A. (2006), Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon, *Computer & Geoscience*, doi:10.1016/j.cageo.2006.07.009.
- Defina, A. (2000), Two dimensional shallow flow equations for partially dry area, *Water Resources Research*, 36 (11), 3251-3264.
- Fagherazzi, S. & Furbish, D. J. (2001), On the shape and widening of salt-marsh creeks, *J. Geophys. Res.*, 106(C1), 991-1003.
- Fagherazzi, S. & Sun, T. (2004), A stochastic model for the formation of channel networks in tidal marshes, *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2004GL020965.

- Friedrichs, C. T. & Perry, J. E. (2001), Tidal salt marsh morphodynamics, *J. Coastal Res.*, 11(4), 1062-1074.
- Lanzoni, S. & Seminara, G. (2002), Long-term evolution and morphodynamic equilibrium of tidal channels, *J. Geophys. Res.*, 107(C1), 3001, doi:10.1029/2000JC000468.
- Marani, M., Lanzoni, S., Belluco, E., D'Alpaos, A., Defina, A., Rinaldo, A. (2003), On the drainage density of tidal networks, *Water Resources Research* 39 (2), 105-113.
- Pestrong, R. (1965), The development of drainage patterns on tidal marshes, *Stanford Univ. Publ. Geol. Sci.*, Tech. Rep. 10, 87pp.
- Schuttelaars, H. M. & de Swart, H. E. (2000), Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments, *J. Geoph. Res.*, 105, 24, 10524, 118.
- Steel, T. J., & Pye, K. (1997), The development of salt marsh tidal creek networks: evidence from the UK, *paper presented at Canadian Coastal Conference*, Can. Coastal Sci. and Eng. Assoc., Guelph, Ontario, Vol. 1, 267-280.
- Tambroni, N., Bolla Pittaluga, M. & Seminara, G. (2005), Laboratory observations of the morphodynamic evolution of tidal channels and tidal inlets, *J. Geophys. Res.*, 110, F04009, doi:10.1029/2004JF000243.
- Van Rijn, L. C. (1984a), Sediment transport. Part I: bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (11), 1613-1641.
- Van Rijn, L. C. (1984b), Sediment transport. Part II: suspended load transport, *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (11), 1613-1641.
- Van Rijn, L. C. (1984c), Sediment transport. Part III: bed forms and alluvial roughness, *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (11), 1613-1641.
- Yalin, M. S. (1977), *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press, Oxford.
- Yalin, M. S., Ferreira da Silva, A. M. (2001), *Fluvial processes*, Queen's University, Kingston, Canada.
- D'Alpaos, L. & Defina, A., Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon, *Computers & Geosciences*, 33: 476-496, doi:10.1016/j.cageo.2006.07.009, 2007.
- D'Alpaos, L., Carniello, L. & Defina, A. (2008). Mathematical modeling of tidal flow over saltmarshes and tidal flats. In *Coastal Wetlands: An Ecosystem Approach*, edited by Perillo et al.. Elsevier, in stampa.