

Contributo alla conoscenza del clima meteomarinico della Sacca di Goro: misure correntometriche e mareografiche

Paolo Ciavola¹, Marco Gonella², Umberto Tessari¹ e Andrea Zamariolo¹

¹Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara
Corso E. I d'Este, 32 - 44100 Ferrara.

²MED INGEGNERIA S.r.l., Riviera Ruzzante, 49-35123 - Padova

Riassunto

L'analisi dei dati anemologici ed ondametrici ha permesso di caratterizzare il clima meteo-marino della Sacca di Goro, dominato da eventi provenienti dal I e dal II quadrante. Misure correntometriche hanno identificato differenti regimi tidali tra la parte interna ed esterna del canale principale. Tramite misure mareografiche si sono determinati ritardi di marea lungo il canale che, dalla bocca secondaria, nella zona interna della Sacca, si dirige verso la foce del Po di Goro. Tale canale è caratterizzato da una netta separazione tra masse d'acqua dolce, di origine fluviale e acque marine entranti dalla bocca secondaria.

Introduzione

Nel seguente articolo vengono presentati i rilievi idrodinamici effettuati sulle bocche della Sacca di Goro e nella parte interna della laguna (Fig. 1) allo scopo di identificare le caratteristiche del sistema.

Le misure di corrente e livello di marea sono state effettuate mediante l'installazione di stazioni di misura a breve termine (giorni-settimane). Il clima di moto ondoso, invece, è stato caratterizzato mediante revisione di dati pregressi disponibili per l'area. Le misure anemologiche sono state ricavate dalla centralina meteorologica posta sul Lido di Volano e di proprietà della Centrale ENEL di Porto Tolle.

Caratterizzazione del clima di moto ondoso e del regime anemologico

Inquadramento climatico

L'area deltizia appartiene alla Pianura Padana che ricade nella fascia climatica temperato-fredda. Tali condizioni sono, localmente, molto attenuate dalla presenza del mare, che tende a conferire alla zona caratteri climatici più mediterranei.

Durante l'inverno la pianura padana è un bacino di aria relativamente fredda, ad alta pressione, che sospinge i venti da Ovest verso Est sulla fascia costiera adriatica. Lo sporadico spostamento verso Sud Ovest, nei mesi invernali e primaverili, di queste alte pressioni, o la loro relativa attenuazione rispetto all'aria anticiclonica russo-asiatica, può dar via libera alla Bora, che è una caratteristica peculiare di questa fascia litoranea. Nell'estate, invece, la situazione termo-barometrica si inverte, determinando venti da est (Levante) o, più frequentemente, venti di sud est (il cosiddetto Scirocco).

Nell'area deltizia la temperatura scende al di sotto di 2°C in gennaio, e supera i 23° C in luglio; le escursioni termiche medie sono generalmente inferiori ai 22° C. I valori medi di precipitazione annua, che nell'entroterra delle provincie di Ferrara e Rovigo sono compresi tra i 650 e 700 millimetri, nell'area deltizia risultano inferiori ai 600 millimetri annui. In particolare è relativamente meno fre-

quente la neve. I massimi di piovosità autunnali e primaverili, tipici del resto della pianura, qui manifestano spesso la tendenza a concentrarsi nel periodo invernale, con scarsità di precipitazioni in primavera.

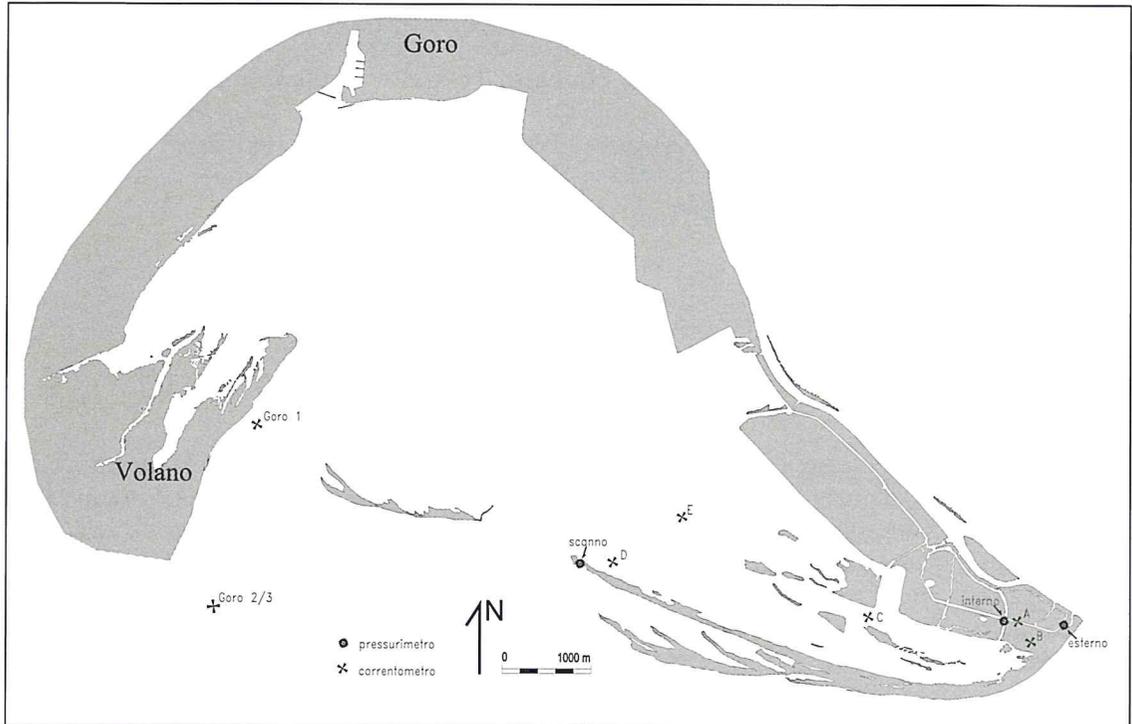


Figura 1 - Inquadramento geografico ed ubicazione delle stazioni di misura.

In tutta la Pianura Padana orientale l'umidità relativa è assai alta, scende sotto al 60% solo nei mesi di luglio e agosto, mentre è elevatissima nel periodo tra novembre e febbraio, ossia nei mesi in cui la notte è più lunga e si registra quindi, in condizioni anticicloniche, una più lunga permanenza d'aria fredda al suolo, con conseguente formazione di nebbie.

Nell'area costiera la stratificazione termica è frequentemente contrastata dal vento; d'altra parte l'umidità assoluta è maggiore. In definitiva si può ritenere che il numero annuale delle ore di nebbia sia più o meno uguale nell'entroterra e nella regione deltizia; ma, mentre nell'entroterra esse risultano concentrate soprattutto nei mesi invernali, nell'area costiera esse sono "diluite" in un periodo più lungo e si presentano soprattutto a tarda notte e al mattino.

Da tutti questi dati è possibile constatare la particolare caratterizzazione atmosferica dell'area deltizia, che può essere considerata come una vera e propria subregione climatica rispetto alla Pianura Padana.

Analisi anemologica

Nello studio sul regime anemologico nel Delta del Po ed alla foce dell'Adige pubblicato da Calderoni (1982) si analizzano i dati forniti dall'anemografo posizionato sulla sommità del faro di Punta Maistra, nel periodo che va dal 1929 al 1943, ed i dati forniti dall'anemografo posizionato sul litorale di Rosolina Mare (Rovigo, a circa 22.5 km a Nord-Ovest del faro di Pila), nel periodo compreso tra il 1974 ed il 1977.

Da questo studio, considerando il regime anemologico alla foce del Po di Pila, emerge che nell'anno medio il vento di Nord-Est (Bora) è il più frequente (155.3%), seguito dal vento di Sud-Est (Scirocco, 123.0%) e da quello di Est (Levante, 116.4%).

Nel periodo considerato, la massima velocità media viene fatta registrare da Bora (8.36 m/s), seguita da Levante (6.83 m/s), dal vento di Sud-Ovest (Libeccio, 5.77 m/s) e da quello di Sud (Ostro, 5.75 m/s). Risulta altresì che nell'anno medio il vento più frequente e più veloce è la Bora, che quindi viene considerata il vento dominante del paraggio.

In inverno la Bora è ancora il vento dominante (frequenza 52.4‰, con massima velocità stagionale 10.09 m/s); essa è seguita, come frequenza, dal Maestro (42.8‰), e, come velocità massima stagionale, da Levante (9.52 m/s).

In primavera il vento più frequente è lo Scirocco (42.7‰) seguito da Levante (37.9‰): le massime velocità stagionali vengono fatte registrare da Levante (7.45 m/s) e da Bora (7.28 m/s).

In estate il vento più frequente è Scirocco (45.4‰) seguito da Ostro (35.1‰): le massime velocità stagionali vengono fatte registrare da Libeccio (6.42 m/s) e da Bora (6.10 m/s).

In autunno il vento più frequente è la Bora (37.0‰), seguita da Scirocco (26.4‰): le massime velocità stagionali vengono fatte registrare da Bora (8.13 m/s) e da Levante (6.89 m/s).

L'Autore conclude affermando come sia molto significativo il fatto che, pur con strumenti, ubicazioni topografiche e diverse procedure di calcolo, si sia riscontrato nel paraggio un identico regime anemologico negli anni 1929÷1943 e 1974÷1977. Ciò induce a ritenere che, a partire perlomeno dal 1929, non siano intervenute significative variazioni del regime anemologico tali da comportare variazioni nel regime meteomarinario.

Idroser (1996) afferma che di grande influenza sullo stato del tempo nell'Adriatico centro-settentrionale sono le espansioni delle zone di alta pressione in prossimità della costa, per cui i venti dominanti sono quelli compresi tra Nord-Nordest ed Est (Bora), tra Est-Sudest e Sud-Sudest (Scirocco) e quelli di Nord-Ovest (Maestrale), in completo accordo con le osservazioni espone precedentemente. I dati anemologici riportati in Idroser (1996) sono quelli relativi alle distribuzioni del vento rispetto alla direzione (16 settori di traversia di 22.5°) ed intensità (espressa in nodi), riferiti alla stazione dell'Aeronautica Militare presso Marina di Ravenna.

Il periodo di osservazione considerato va dal 1968 al 1977 ed, in pratica, comprende ed amplia il secondo periodo di osservazione considerato da Calderoni (1982).

E' altresì interessante considerare i dati anemologici forniti dalla Divisione Produzione della centrale Enel di Porto Tolle relativi alla stazione di rilevamento posta a Lido di Volano. I dati, sotto forma di medie orarie, estesi al periodo Luglio 1992 – Febbraio 1997, sono stati elaborati al fine di fornire le frequenze percentuali estese al periodo annuale (Fig. 2).

Si osserva come, anche in questi ultimi anni, il regime anemologico non sia sostanzialmente cambiato, mantenendo gli stessi settori prevalenti di provenienza: dai 260° ai 280° circa, con mode presenti anche nel settore da 130° a 160°.

Dalle Figure 3, 4 e 5 emerge, inoltre, una spiccata stagionalità del clima anemologico. Nel periodo estivo i venti sono maggiormente distribuiti e non presentano picchi di velocità predominanti, fatta eccezione per il settore di sud-est (Scirocco). Nel periodo invernale i venti con maggior velocità sono tipicamente concentrati in un settore di provenienza delimitato dalla Bora (nord-est) e dallo Scirocco (sud-est).

Clima di moto ondoso

Nell'Alto Adriatico vi è una relativa abbondanza di dati di moto ondoso, per quanto tutte le fonti presentino carenze di varia natura (Idroser, 1996).

I dati di seguito esposti sono stati, in buona parte, ricavati dai piani di protezione e riqualificazione delle coste, messi a punto dalla Idroser (1994, 1996) per conto della Regione Emilia-Romagna.

Le registrazioni del moto ondoso possono provenire da tre differenti fonti: piattaforme off-shore di perforazione AGIP, osservazioni raccolte dalle navi in transito (KNMI) e misure raccolte da stazioni di Enti vari (ENEL, CRIS e Servizio Idrologico).

Nel tratto di mare in esame vi sono registrazioni dell'altezza d'onda (risoluzione di circa 30 cm) e della direzione di provenienza (risoluzione di 22.5°) provenienti dalle piattaforme AGIP Ada, Gari-

baldi A, Amelia, PCB, Annabella, Barbara C, Barbara A e Clara. Purtroppo la durata di quasi tutte le serie temporali è limitata a meno di un anno e ciò impedisce una caratterizzazione statistica significativa del clima di moto ondoso.

Unica eccezione è rappresentata dalle registrazioni (periodo 1971-1983) effettuate sulla piattaforma PCB, situata al largo di Ravenna (coordinate $44^{\circ}23'16.9''N$ e $12^{\circ}34'29.2''E$) su un fondale di 25 m.

La sua banca dati fornisce misure di intensità e direzione del vento per tutto il periodo, osservazioni di altezza d'onda con frequenza giornaliera per gli anni 1974, 1975 e 1980 (totale di 5700 dati), misurazioni di altezza e periodo dell'onda per la durata di circa un anno (registrazioni giugno 1971-maggio 1972).

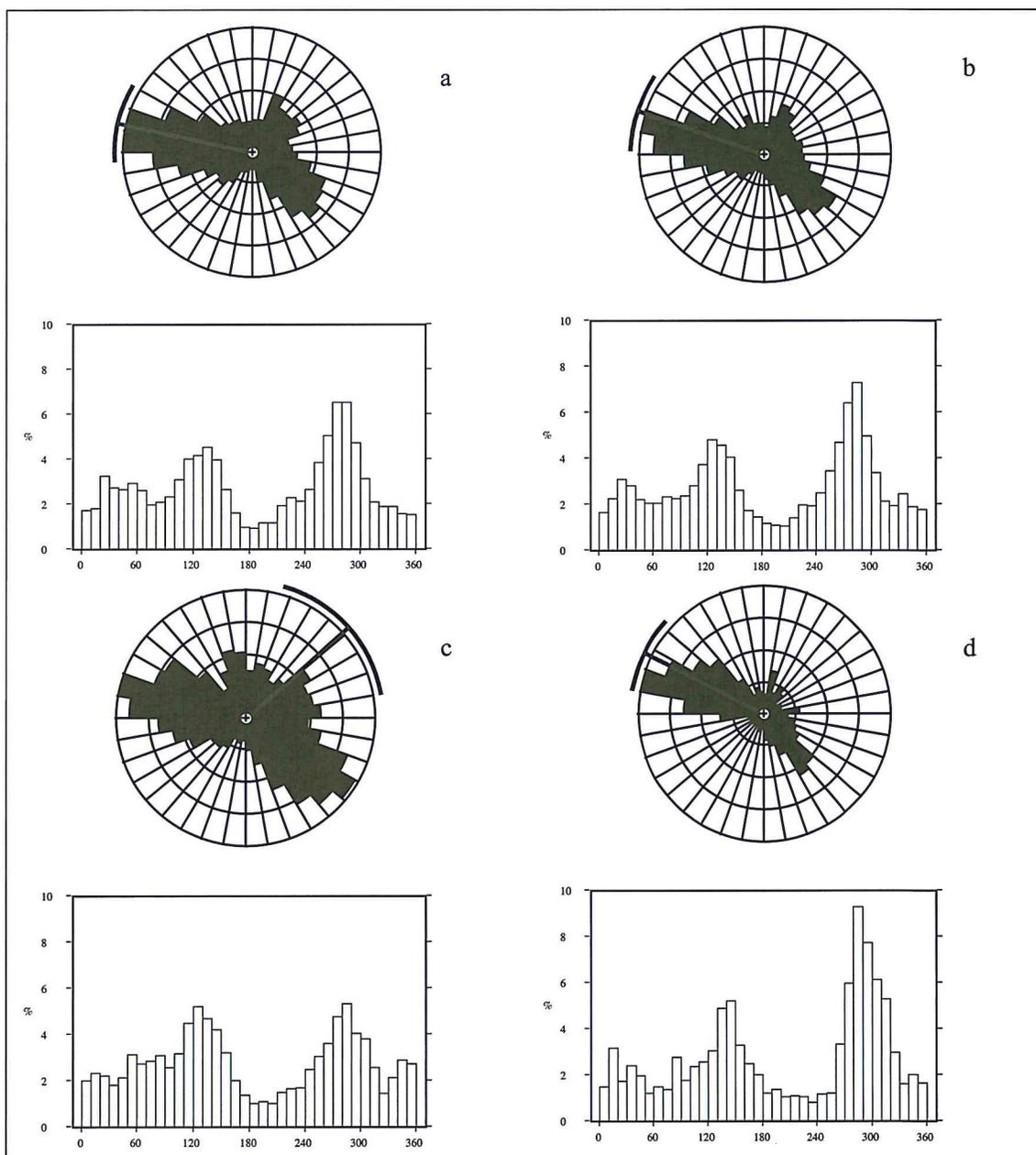


Figura 2 - Frequenze percentuali delle direzioni di provenienza dei venti per gli anni 1994 (a), 1995 (b), 1996 (c) e 1997 (d).

I dati KNMI, ricavati da osservazioni visuali svolte dalle navi in transito e raccolte dal servizio meteorologico olandese, forniscono l'altezza d'onda osservata (risoluzione di 50 cm) e la sua direzione (precisione di 10°). Le osservazioni coprono un periodo di circa 30 anni, ma sono condensate lungo le rotte di navigazione: ciò comporta una preliminare operazione di scelta ed adattamento in modo da rendere i dati non solo temporalmente ma anche spazialmente omogenei. Infine le osservazioni strumentali effettuate dall'ENEL, CRIS e Servizio Idrologico pur riferendosi alla stazione di Porto Tolle, nel delta del Po, risultano poco idonee perché non direzionali.

Idroser (1994 e 1996) suggerisce che il clima di moto ondoso più significativo per la caratterizzazione della dinamica litoranea dell'Emilia-Romagna sia quello fornito dalla piattaforma PCB. Inoltre l'ubicazione della piattaforma permette di assumere che le onde misurate si trovino, per situazioni normali, in condizioni di mare profondo, quindi non modificate da rifrazione o *shoaling*.

Se si confrontano le registrazioni del periodo 1971-80 con quelle del 1971-83 (Fig. 6), risulta evidente che nel secondo periodo vi è stata maggiore frequenza degli eventi da levante e dai settori da W-NW ed una minore degli eventi da Scirocco (SE) e da Bora (NE). Lo studio dell'Idroser (1996) conclude che questi ultimi tre anni di osservazioni siano anomali, per cui nel Piano Coste sono stati utilizzati solo quelli del periodo 1971-80.

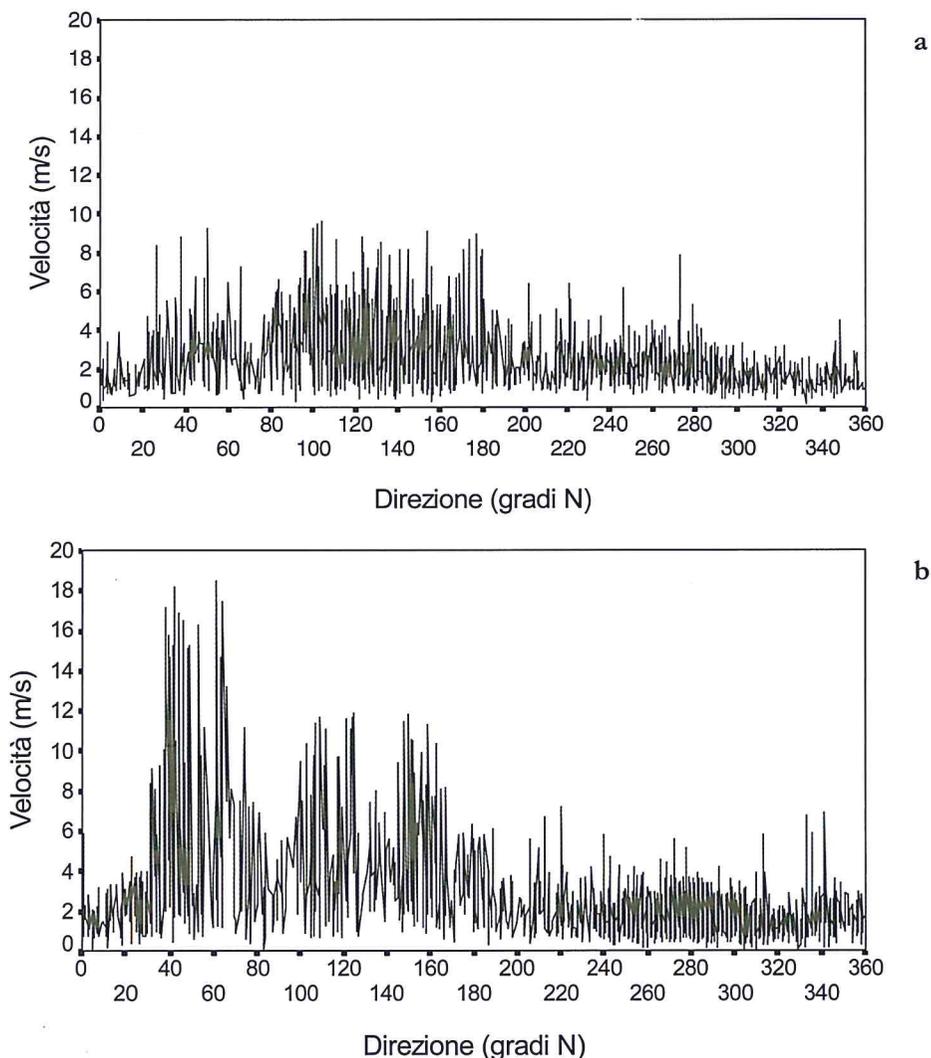


Figura 3 - Diagrammi dei venti per i periodi luglio-settembre 1992 (a) e ottobre-dicembre 1992 (b).

I dati registrati dalla piattaforma PCB possono essere utilizzati per la ricostruzione del moto ondoso nell'area della Sacca di Goro, poiché i regimi anemologici sono comparabili. Tuttavia, la particolare orientazione della linea di riva impone l'uso di opportune modifiche ai dati PCB. Ciò ha indotto l'Idroser (1996) a calcolare il moto ondoso, riferito ad un punto (Fig. 7) a sud della Sacca (coordinate 44°46'00"N e 13°18'30"E), tenendo in considerazione il fetch efficace e prevedendo l'altezza d'onda significativa per ogni direzione in funzione dell'intensità del vento.

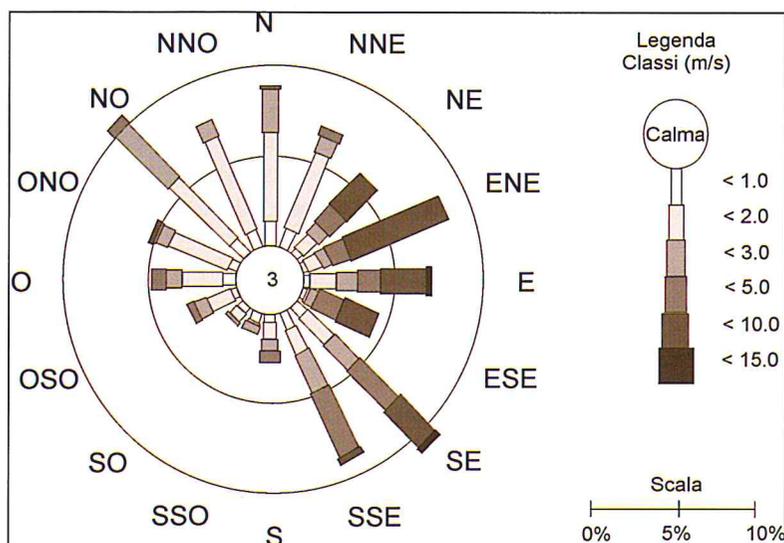


Figura 4 - Distribuzione dell'intensità e frequenza dei venti nel Ottobre 1997 (per gentile concessione ENEL PortoTolle).

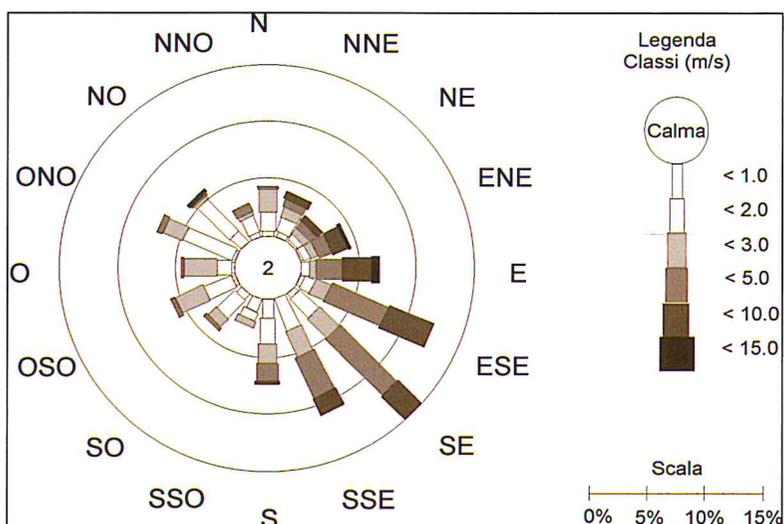


Figura 5 - Distribuzione dell'intensità e frequenza dei venti nel Maggio 1998 (per gentile concessione ENEL PortoTolle).

Come evidenziato dall'Idroser (1996) comparando i fetch efficaci del sito PCB con la Sacca di Goro, quest'ultima è relativamente protetta dai settori di Bora, risultando principalmente esposta al settore di Scirocco (Fig. 7). Risulta interessante notare come, in base alla frequenza assoluta, la moda principale abbia direzione NW (13.10 %) pur presentando fetch ristretto, mentre a quella secondaria (SE, 11.05%), dove il fetch è molto più ampio, si debba ascrivere un moto ondoso considerevole.

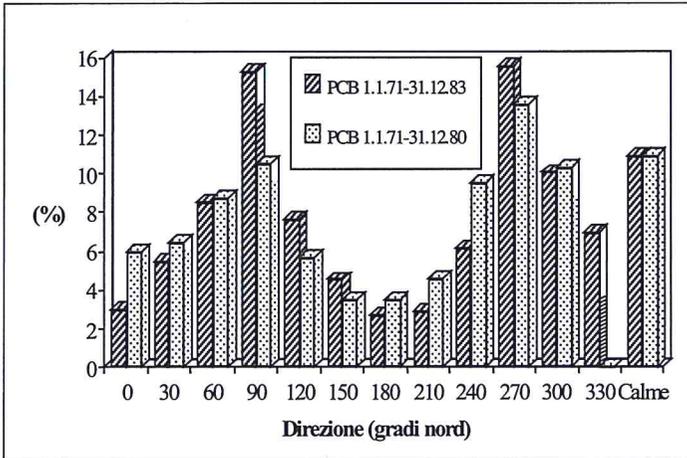


Figura 6 - Frequenza e direzione dei dati registrati dal 1/1/1971 al 31/12/1983 dalla piattaforma PCB (da Idroser, 1996).

Va però rammentato che il clima di agitazione del moto ondoso, rappresentato nella Figura 7, è stato ricavato in base alla sola distribuzione di frequenza assoluta degli eventi e quindi non rispecchia la loro magnitudine.

Per la protezione offerta dalla prominenza del delta del Po, generalmente le onde che investono la Sacca hanno altezze molto ridotte ed una provenienza compresa tra i 60° ed i 120° (75% delle frequenze), con una frequenza totale delle calme del 17.25 % . Per evidenziare la distribuzione direzionale delle altezze d'onda i dati sono stati suddivisi in quattro classi di frequenza e rappresentate tramite diagrammi (Fig. 8). Questi ultimi mettono in evidenza rispettivamente eventi a bassa energia (altezza significativa $\leq 0.5m$) che presentano una frequenza complessiva molto alta (68.05%); media energia (tra 0.5-1m e 1-1.5m) che hanno una frequenza del 12.7%; alta energia (altezza significativa $> 1.5m$) che hanno però bassa frequenza (circa il 2% del totale).

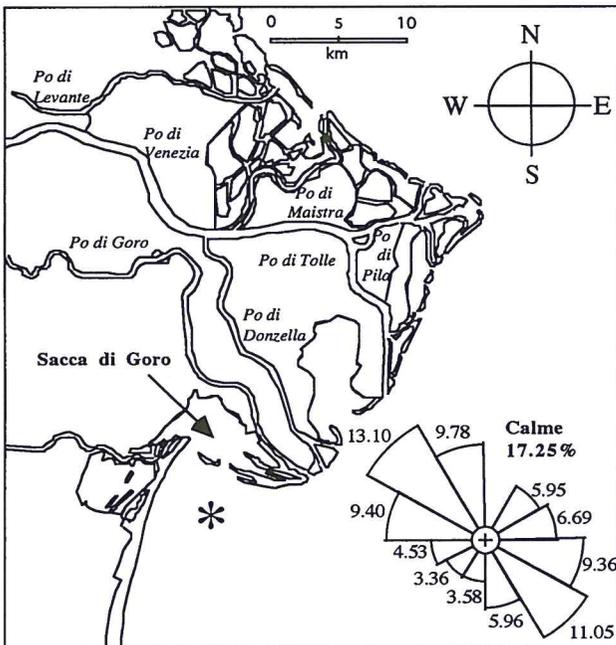


Figura 7 - Clima di agitazione del moto ondoso riferito al punto evidenziato dall'asterisco, ricostruito dalla Idroser (1996) tramite estrapolazione dei dati della piattaforma PCB (periodo 1.1.71-31.12.80).

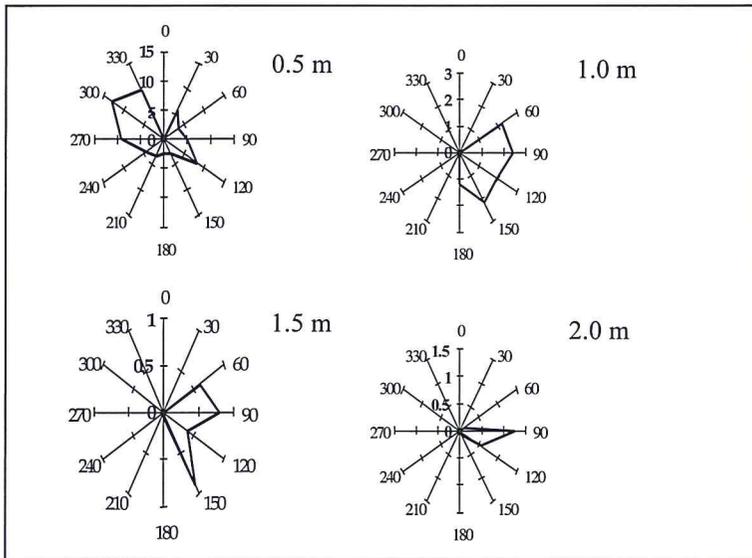


Figura 8 - Distribuzione di frequenza direzionale delle altezze d'onda a sud della Sacca di Goro (da Idroser, 1996).

Dai diagrammi si può notare come le onde a bassa energia ($H_s < 0.5$ m) presentino un ampio spettro di provenienza, con due mode poste a $120^\circ N$ e $300^\circ N$. Quest'ultimo moto ondoso, dovuto ai venti di Maestrale, non deve essere trascurato per l'alta frequenza degli eventi. Il moto ondoso a media energia ($H_s 0.5-1.5$ m) proviene esclusivamente dal settore $60^\circ-150^\circ N$ (venti di Bora, Levante e Scirocco) e presenta un fetch efficace estremamente lungo. Infine i rari eventi ad alta energia ($H_s > 1.5$ m) provengono esclusivamente dal settore $90^\circ-120^\circ N$; lo studio condotto dall'Idroser ipotizza una frequenza di 0.05% e direzione $90^\circ N$ per onde con un'altezza di 4.5m, considerate come massimo evento.

Poiché stabilire relazioni statistiche tra altezza d'onda e periodo sulla base di osservazioni visuali (clima KNMI) presenta alcune difficoltà, quest'ultime sono state confrontate con quelle provenienti dalle piattaforme AGIP (Idroser, 1994, 1996), con particolare attenzione ai dati della PCB e Annabella. Lo studio ha stabilito che il clima PCB presenta nei settori di Bora ($330^\circ-75^\circ N$) e Scirocco ($75^\circ N-165^\circ N$) onde più ripide rispetto alla piattaforma Annabella. Operativamente per definire il periodo delle onde al largo della Sacca di Goro (Fig. 9) l'indagine ha privilegiato il clima della piattaforma PCB, per mantenere una certa uniformità di analisi.

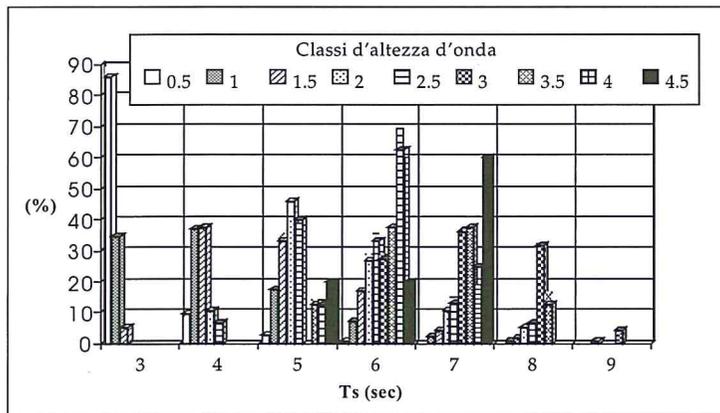


Figura 9 - Relazione tra classi di altezza d'onda significativa (in metri) e periodo significativo (in secondi) dai dati PCB 1.9.1971-31.05-1972 (da Idroser, 1994).

Dalla distribuzione direzionale delle frequenze delle altezza d'onda (dati PCB modificati da Idroser, 1996) è possibile ottenere una densità di energia totale per settore di provenienza (Fig. 10), ponderando i vari apporti energetici, in funzione della frequenza di apparizione di una determinata altezza d'onda all'interno del settore di provenienza considerato.

L'istogramma evidenzia come buona parte dell'energia del moto ondoso è collegabile ad onde con direzione tra i 60° ed i 150°N.

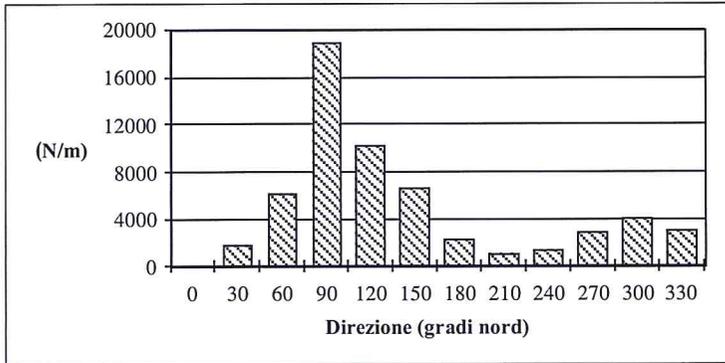


Figura 10 - Densità di energia totale per settori di traversia secondo i dati PCB modificati da Idroser (1996) riferiti alla Sacca di Goro.

Il flusso di energia rappresentato in Figura 11 è stato, invece, ottenuto utilizzando le lunghezze d'onda calcolate usando i periodi significativi modal:

$$P = E_{tot}Cn \quad [1]$$

dove E_{tot} è la quantità di energia totale (Newton/metro), C è la velocità di fase dell'onda assumendo condizioni di mare profondo ed n è il rapporto tra velocità di gruppo e velocità di fase (equivalente in mare profondo a 0.5); E_{tot} è stata calcolata secondo la notazione:

$$E_{tot} = 0.125\rho gH_s^2 \quad [2]$$

dove ρ è la densità dell'acqua marina, g è la costante gravitazionale e H_s è l'altezza d'onda; mentre C è stata calcolata tramite la relazione:

$$C = (gL/2\pi)^{1/2} \quad [3]$$

dove la lunghezza d'onda in mare profondo (L) è data da $L = 1.56T^2$, in cui T rappresenta il periodo significativo che deve essere associato ad una particolare altezza d'onda.

L'istogramma (Fig. 11) evidenzia come la maggior parte del flusso di energia provenga tra Bora e Scirocco. Tuttavia non va dimenticato che nel settore di Maestrale l'elevata frequenza del moto ondoso con $H_s \leq 0.5$ m può incidere sulla dinamica evolutiva dello Scanno, specialmente nella sua parte lagunare.

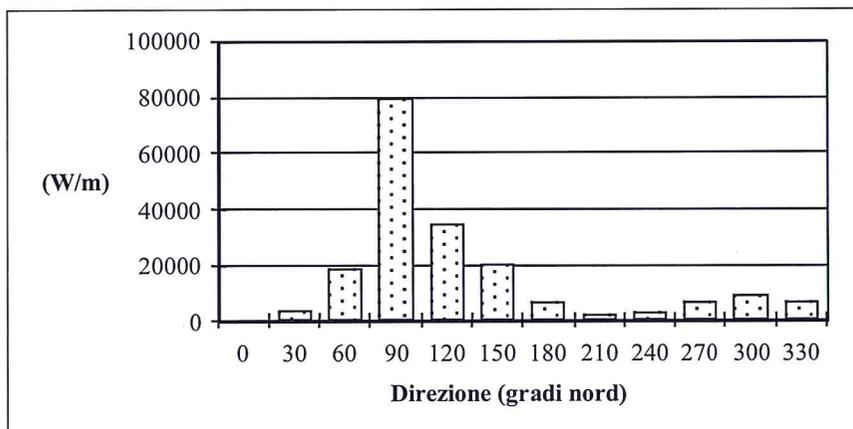


Figura 11 - Flusso di energia proveniente dai vari settori di traversia in Watt/metro di cresta d'onda.

Caratterizzazione dei flussi di marea attraverso il canale principale della Sacca

Durante i rilievi effettuati sono stati utilizzati tre correntometri ad elica costruiti dalla Sensordata (Bergen, Norvegia), modello SD-6000. Una prima campagna di misure è stata effettuata nel Maggio 1997, ubicando due strumenti nelle stazioni Goro-1 e Goro-2 (vedi Figura 1 per la loro ubicazione). Una seconda campagna di misure è stata svolta nel Maggio 1998, installando un SD-6000 nella stazione Goro-3, mentre un modello meno recente è stato installato nella stazione Goro-4. Per tutta la durata della campagna si è installato anche un trasduttore di pressione DAS TL2 per la misura del livello di marea.

Canale navigabile bocca principale lato Volano (Stazione Goro-1)

I dati relativi al regime anemologico (direzione di provenienza e velocità – espressa in m/sec – dei venti), per l'intervallo 24-26 maggio 1997 (periodo di misura di tale stazione), sono indicati in Figura 12. E' altresì indicato, in Figura 13, per lo stesso periodo, l'andamento dell'altezza d'onda significativa. Si noti che il periodo considerato nei diagrammi di Figure 12 e 13 è compreso tra il 24 maggio 1997 ed il 28 maggio 1997, in modo tale da evidenziare i regimi meteomarinari anche per la stazione Goro 2.

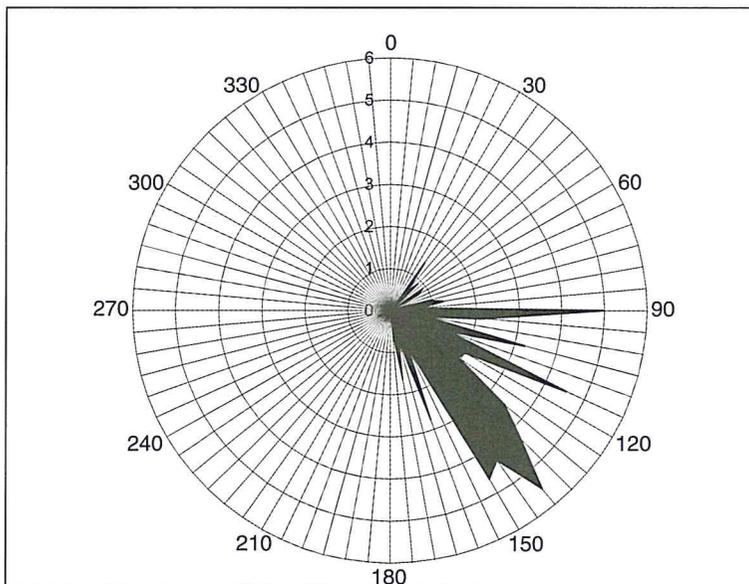


Figura 12 - Direzione di provenienza e velocità dei venti (in m/sec) registrate a Lido di Volano nel periodo 24-28 maggio 1997.

Come evidente in Figura 12, il regime anemologico per il periodo considerato è perfettamente conforme con quanto ricavato da Calderoni (1982) per la stagione primaverile. Dal confronto tra velocità dei venti ed altezze d'onda (Fig. 13) su scala temporale è stato, inoltre, possibile determinare una buona correlazione tra le due variabili. E', quindi, ragionevole ipotizzare che gli eventi d'onda con maggior altezza significativa abbiano direzione di provenienza concorde con quella dei venti che, nello stesso intervallo di tempo, denotano le maggiori velocità.

I dati di temperatura, velocità e direzione della corrente sono riassunti nella Tabella 2, per ciò che riguarda i valori minimi, massimi, medi e la deviazione standard osservati.

Le variazioni della temperatura della massa d'acqua al variare della curva di marea, registrata dal trasduttore di pressione installato sulla lanterna di fronte a Lido di Volano, sono presentate in Figura 14.

Si evidenzia come in fase di riflusso vi sia un aumento di temperatura, che poi si mantiene costante ai lati del punto di minimo della curva di marea. Ciò può essere dovuto alla diminuzione della profondità della colonna d'acqua (il sensore si trova man mano più vicino alla superficie) ed al flusso di acqua più calda dalle parti più interne della laguna.

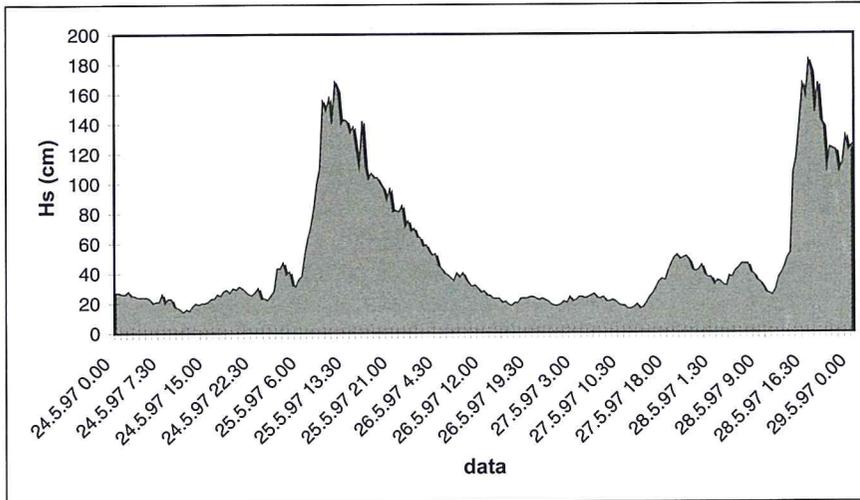


Figura 13 - Andamento dell'altezza d'onda significativa (H_s) nel periodo 24-28 maggio 1997, ricavato dai dati (non direzionali) disponibili per la piattaforma Agip PCB.

Il flusso di acqua da mare porta, invece, ad un successivo raffreddamento della massa d'acqua. Il fenomeno avviene solo durante l'armonica principale della curva di marea e non durante quella secondaria.

Tabella 2 - Dati statistici sulla serie temporale misurata dal 24 al 26 maggio 1997.

Parametro	Minimo	Massimo	Valore medio	Deviazione Standard
Temperatura (C°)	18.6	23.6	20.8	1.0
Velocità corrente (cm/sec)	0.6	42	13.3	12.5
Direzione corrente (gradi N)	2	360	145	104

Il secondo grafico in Figura 14 mette in relazione la direzione e la velocità della corrente. Esistono due mode nella distribuzione dei dati di direzione: una corrispondente ad una direzione 20°N (flusso di entrata) ed una diametralmente opposta a circa 200°N (flusso di uscita). La corrente di marea gira rapidamente, invertendo direzione e poi stabilizzandosi ai lati del massimo picco nella curva di velocità.

I valori di velocità presentano una certa simmetria tra il flusso ed riflusso, come si può osservare chiaramente in corrispondenza della bassa marea del 24 Maggio 1997 (ore 05:44). In tale occasione valori di velocità di oltre 40 cm/sec erano misurati sia in fase di flusso che di riflusso. L'analisi della componente residuale dei dati di corrente indica una direzione di 34° N, con bassa stabilità direzionale (parametro di Neumann=0.163), quindi diretta verso le parte più interne della Sacca in direzione NE. Tale indicazione comporta un afflusso netto di acqua marina lungo questa direzione, almeno nel punto di misura.

Si può concludere che da un punto di vista idraulico il canale di accesso al Porto di Goro, nel punto di installazione dello strumento, esercita un controllo abbastanza netto sulle caratteristiche di circolazione della massa d'acqua. Avendo una sezione abbastanza stretta e profonda, canalizza facilmente sia il flusso in entrata sia in uscita. Le alte velocità osservate confermano una tendenza alla sovraescavazione del canale, con approfondimento in argille sovraconsolidate, così come osservato da immersioni in loco.

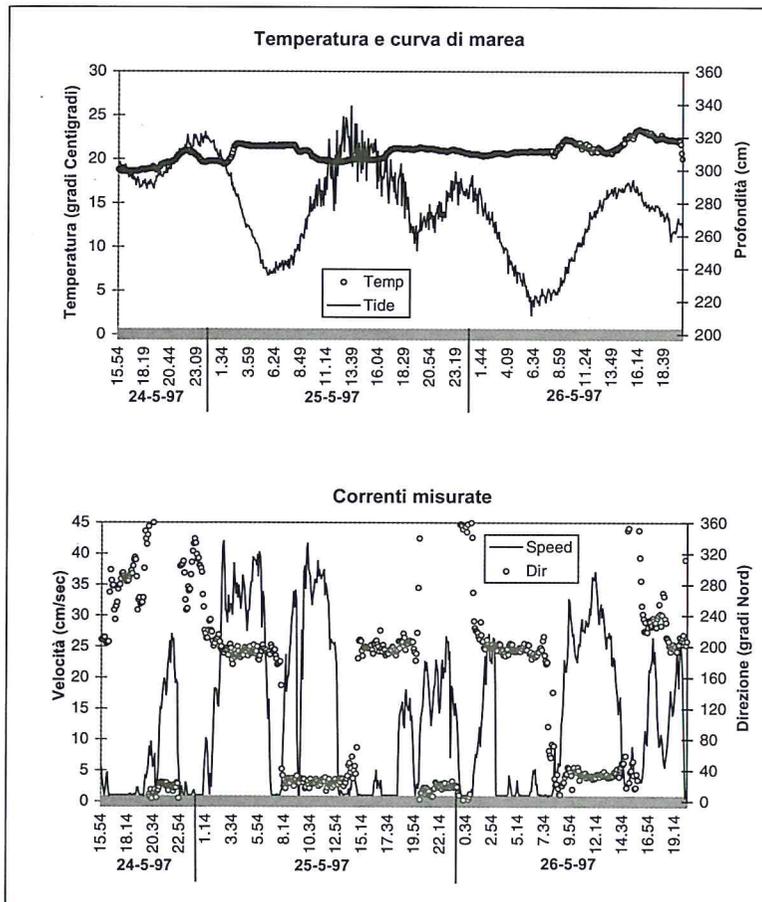


Figura 14 - Dati di temperatura e corrente misurati alla stazione Goro-1 (24-26 Maggio 1997).

Lanterna di segnalazione di fronte al Lido di Volano (stazioni Goro-2 e Goro-3)

Per il regime anemologico e l'andamento dell'altezza d'onda significativa relative alla stazione Goro-2 si confrontino le Figure 12 e 13. Anche in questo caso, verificata l'evidente relazione tra velocità del vento ed altezza d'onda significativa, si possono assumere concordi le direzioni di provenienza di venti ed onde. La Tabella 3 riassume le caratteristiche delle serie temporali di temperatura, velocità e direzione della corrente osservate nel periodo 24-28 Maggio 1997, nella stazione Goro-2.

Tabella 3 - Dati statistici sulla serie temporale misurata dal 24 al 28 maggio 1997.

Parametro	Minimo	Massimo	Valore medio	Deviazione Standard
Temperatura (C°)	18.6	22.5	20.8	0.9
Velocità corrente (cm/sec)	1.0	35.2	11.5	6.3
Direzione corrente (°N)	133	197	171	14

E' interessante osservare come dal punto di vista termico la massa d'acqua si comporta in maniera analoga alla stazione di Goro 1 (Fig. 14). Il valore medio osservato e lo scostamento da questo, espresso dalla deviazione standard della serie, sono perfettamente coincidenti.

La serie temporale delle correnti misurate si rileva invece molto diversa dalla precedente Figura 14. Innanzi tutto va fatto osservare come il correntometro non abbia mai registrato un valore inferiore ad 1 cm/sec. Nonostante sia possibile credere che nella stazione di misura non si verifichi mai una fase di stanca totale della marea, sembra lecito domandarsi perché la corrente non rallenti mai al di

sotto di un valore sempre uguale ad 1 cm/sec. Tale anomalia potrebbe essere imputabile ad una cattiva calibrazione dello strumento. Il valore massimo registrato dell'intensità della corrente è minore rispetto alla stazione precedente, per quanto la minore deviazione standard confermi una tendenza, osservabile anche nel grafico in Figura 16, a repentine variazioni di velocità. La maggiore irregolarità del grafico deriva dall'ubicazione dello strumento in una zona che risente maggiormente del moto ondoso del Mare Adriatico (esterna alla Sacca).

La dispersione direzionale dei dati di corrente è bassissima: nel grafico di Figura 15 non si osservano nette inversioni di provenienza della corrente. L'analisi della sua componente indica un valore di 172° N, quindi praticamente coincidente con la media aritmetica della serie temporale. Il vettore di corrente residuale ha inoltre una bassissima dispersione direzionale (parametro di Neumann=0.981).

Dai dati raccolti sembra che tale zona sia dominata dalla corrente di riflusso, per quanto un tale comportamento idraulico è più simile a quello teorico di una bocca d'estuario, piuttosto che a quello esterno di una bocca lagunare.

Per un'ulteriore verifica fu deciso di effettuare una nuova serie di misure nella stazione Goro-3 (21-29 Maggio 1998). A tale scopo è stato utilizzato un SD-6000 nuovo di fabbrica, per minimizzare eventuali problemi di calibrazione dovuti ad usura dello strumento.

In Figura 16 viene riportato il regime anemologico per il periodo 21-29 maggio 1998, registrato presso la centralina meteorologica posta a Lido di Volano. Per tale periodo non è possibile indicare l'andamento dell'altezza d'onda significativa a causa dell'attuale indisponibilità dei dati.

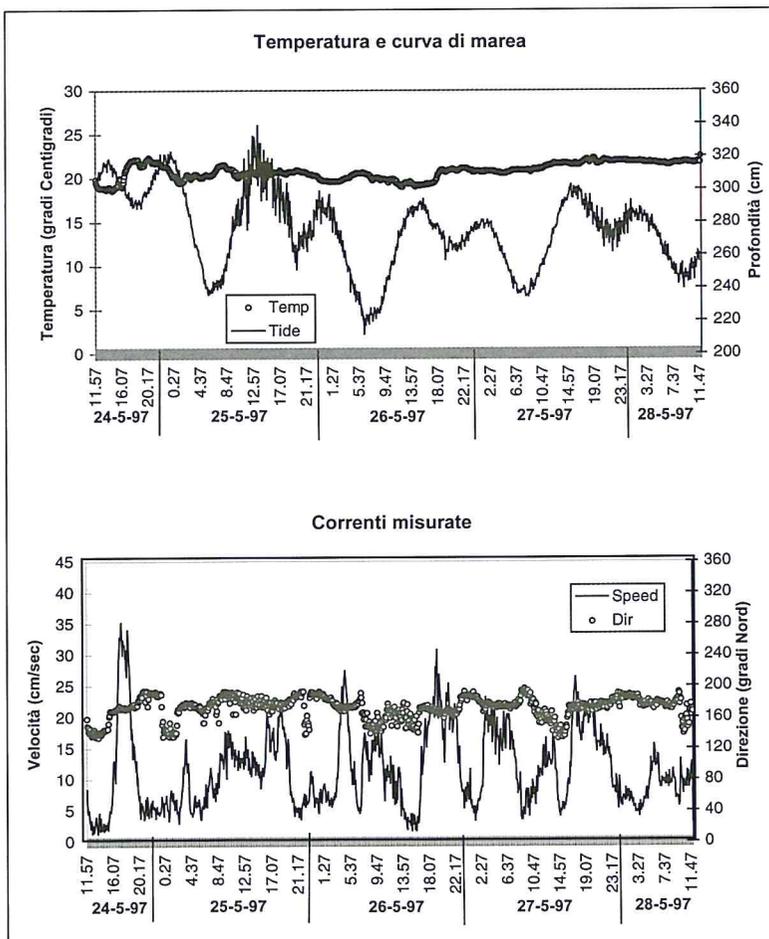


Figura 15 - Dati di temperatura e corrente misurati alla stazione Goro-2 (24-28 Maggio 1997).

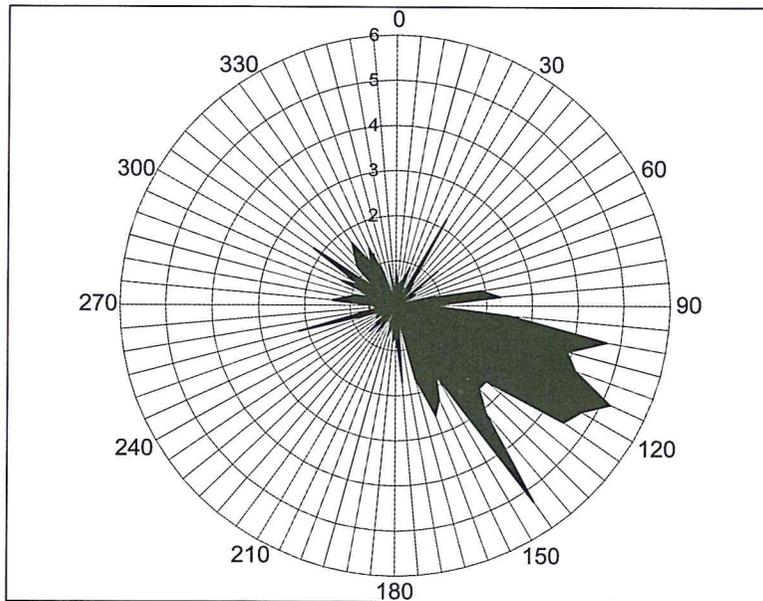


Figura 16 - Direzione di provenienza e velocità dei venti (in m/sec) registrate a Lido di Volano nel periodo 21-29 maggio 1998.

Tabella 4 - Dati statistici sulla serie temporale misurata dal 21 al 29 maggio 1998.

Parametro	Minimo	Massimo	Valore medio	Deviazione Standard
Temperatura (C°)	18.1	21.9	20.1	0.9
Velocità corrente (cm/sec)	0.4	47.2	8.4	7.1
Direzione corrente (°N)	0	360	174	100

La Tabella 4 presenta i risultati sintetici di questa campagna di misure.

Si nota immediatamente la perfetta coincidenza dei range di temperatura misurati, per quanto nella campagna dell'anno precedente i valori massimi fossero leggermente superiori, probabilmente perché le condizioni atmosferiche erano migliori e vi era stato un lungo periodo di bel tempo. Durante la campagna della stazione Goro-3 si è invece verificata una certa variabilità, con diversi giorni di cielo coperto.

I valori di velocità osservati raggiungono un picco di 47.2 cm/sec alle ore 1:03 del 24 maggio 1998, corrispondente ad una direzione di 176° N, cioè al riflusso di marea uscente in direzione Sud. Dall'esame della Figura 17 che correla il campo di velocità con la distribuzione direzionale dei dati raccolti, si vede chiaramente la presenza di due mode direzionali: una a circa 20° N, corrispondente al flusso di marea entrante, ed una localizzata a circa 180° N, corrispondente al riflusso di marea uscente. In realtà, il passaggio tra i due estremi si rivela molto graduale, e la presenza di direzioni sparse nell'arco di 360° potrebbe confermare l'influenza del moto ondoso o del vento nel generare correnti esterne alla marea stessa.

Da un esame più attento del campo di velocità si osserva inoltre che tutti i picchi della curva corrispondono alla fase di marea uscente, essendo praticamente coincidenti con il punto di bassa marea osservato dal trasduttore di pressione installato sulla lanterna. Altro fattore di rilievo è il fatto che la media aritmetica dei dati direzionali corrisponde a 174° N, praticamente uguale a quella misurata dalla stazione Goro-2. L'analisi del residuo di corrente di marea identifica una direzione di 185° N, anche questo vicino al valore calcolato per la stazione dell'anno prima, per quanto la dispersione direzionale risulta maggiore, avendo un parametro di Neumann di 0.516. Si può quindi concludere

che, indipendentemente dai problemi di calibrazione dello strumento riscontrati durante la campagna del maggio 1997, vi è coerenza tra i data sets Goro-2 e Goro-3.

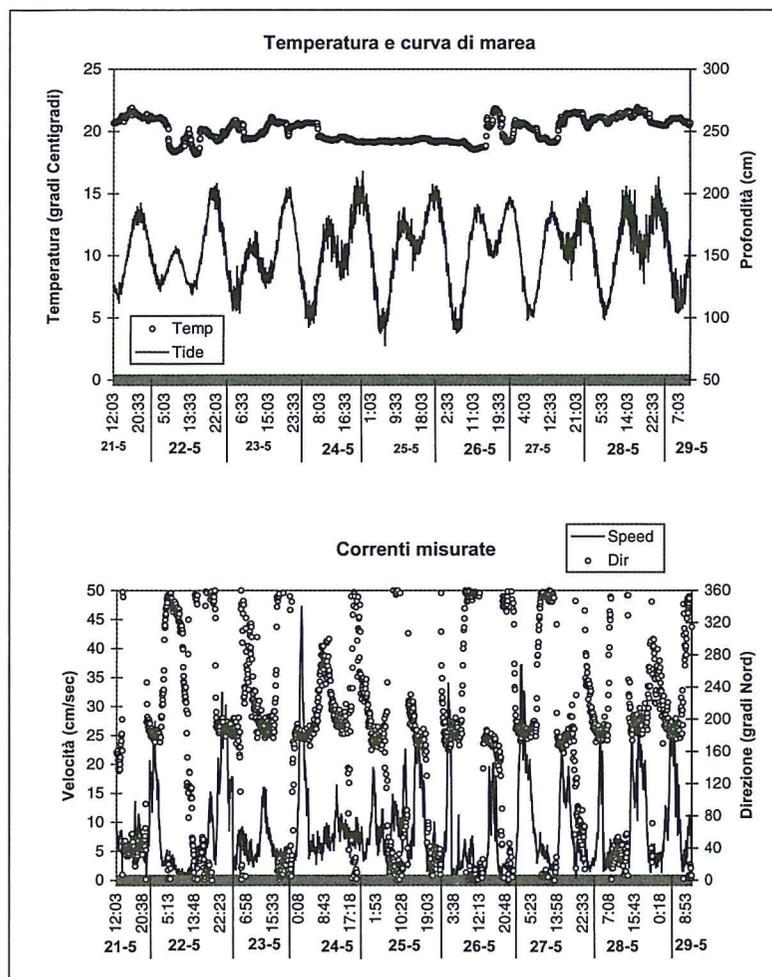


Figura 17 - Dati di temperatura e corrente misurati alla stazione Goro-3 (21-29 Maggio 1998)

La zona di mare studiato risulta dominata dal riflusso di marea, con una componente residuale diretta verso Sud. Il flusso non si può considerare 'canalizzato' come nel caso della stazione Goro-1, per quanto il fondale si presenta sabbioso e manchino forme di fondo. La posizione della stazione esposta a tutto il quadrante del moto ondoso che interessa la zona lascia intuire l'importanza del moto ondoso e di correnti generate dal vento nel determinare una circolazione secondaria alquanto variabile.

Caratterizzazione della circolazione nella parte interna della Sacca

Nell'ambito dello studio idrodinamico della circolazione nella Sacca di Goro sono state realizzate due campagne di misura sistematica dei livelli per la caratterizzazione delle oscillazioni di marea e dei ritardi tra il mare esterno e la sacca. Sono state, inoltre, effettuate misure correntometriche e delle caratteristiche delle masse d'acqua entro i canali nella parte centro-orientale della Sacca.

Le campagne sono state progettate per la misura simultanea dei dati di marea in tre punti posti nella zona di interesse: al faro della foce del Po di Goro (denominata ESTERNO), all'idrovora posta sul lembo occidentale dello scanno poco prima della bocca secondaria (denominata SCANNO) e all'interno della sacca, presso la chiavica "due luci" del sistema di fitodepurazione (denominata INTERNO).

L'ubicazione dei punti di misura è riportata in Figura 1. L'area è stata indagata con l'ausilio di quattro strumenti, analoghi fra loro, ma diversi nel funzionamento e nel tipo di grandezza misurata. Sono stati utilizzati due trasduttori di pressione DAS TL1 e TL2 (range di misura: 1 Atm) a funzionamento piezoresistivo, un pressurimetro a bubulazione (OTT Orphimedes, range di misura 1 Atm) ed un mareografo a galleggiante (OTT Thalimedes).

La prima campagna si è svolta nei mesi di Marzo e Aprile 1999. Per primo è stato posizionato un trasduttore di pressione alla chiavica posta ad ovest del Faro (Stazione ESTERNO). Quindi è stato posizionato il mareografo sull'Idrovora sullo Scanno di Goro (Stazione SCANNO). Infine si è proceduto al posizionamento del pressurimetro a bubulazione alla chiavica interna alla Sacca (Stazione INTERNO). Per ogni installazione è stato evidenziato e marcato un punto di origine, che è stato poi successivamente rilevato tramite misura GPS di precisione, in modo da conoscere il medesimo riferimento in quota per tutte e tre le stazioni. Al recupero di tutti gli strumenti è stato controllato che non fossero intercorse manomissioni, soprattutto a danno delle quote delle sonde e dei galleggianti degli strumenti, che potessero invalidare o rendere dubbi i dati registrati.

I periodi e le condizioni di misura, per intervenute problematiche di carattere tecnico e atmosferico, sono stati tali che le uniche sovrapposizioni tra due strumenti si sono avuti nel periodo dal 6 al 14 aprile (tra ESTERNO e SCANNO) e nel periodo dal 14 al 20 aprile (tra SCANNO e INTERNO).

Per ovviare ai problemi di simultaneità e di rappresentatività dei dati è stata quindi svolta un'ulteriore campagna di misura nel mese di maggio 1999, nel periodo sizigiale a cavallo della luna piena del 15 del mese, nella quale sono state realizzate, oltre alle misure mareografiche, anche misure correntometriche, da cui poter eventualmente dedurre dati di deflusso scambiato tra l'interno e l'esterno della Sacca.

La disponibilità degli strumenti è variata rispetto alla prima campagna. Sono stati utilizzati, allo scopo di ottenere misure dei livelli idrometrici, nelle stazioni ESTERNO ed INTERNO due trasduttori di pressione, mentre nella stazione SCANNO si è ubicato il pressurimetro a bubulazione.

Nel corso della medesima campagna sono stati realizzati dei profili correntometrici nelle stazioni ubicate in Figura 1 (stazioni A, B, C, D ed E) con uno strumento multisonda ANDERAA RCM 9 equipaggiato con un correntometro doppler avente come range di velocità 0-300 cm/s e di direzione 0-360°, un sensore di pressione piezoresistivo, un sensore di temperatura termoresistivo, un conduttivimetro a cella di induzione ed un sensore di torbidità (OBS).

Analisi dei dati mareografici

L'esame dei dati di marea registrati è stato rivolto principalmente alla determinazione del ritardo con cui l'onda tidale si presenta allo scanno e all'interno della sacca, rispetto al punto esterno posto alla foce del Po di Goro.

Le misure effettuate nella primavera del 1999 sono state in parte condizionate dall'interconnessione idrodinamica tra l'interno della sacca e la foce del Po di Goro a mezzo dell'area di fitodepurazione. Nella campagna di aprile, le chiaviche che regolano gli afflussi verso l'area di fitodepurazione erano state già aperte, mentre nella campagna di maggio, il nuovo canale principale che unisce la bocca secondaria alla zona del faro risultava già parzialmente realizzato.

Il primo obiettivo dell'analisi dei dati delle campagne è stato la determinazione del ritardo di marea tra la foce del Po di Goro (punto ESTERNO) e la bocca secondaria nello scanno (punto SCANNO).

L'interpretazione delle linee cotidali pubblicate con le tavole di marea e deducibili dallo sfasamento delle armoniche principali ai porti dell'Adriatico Settentrionale (Trieste, Venezia, Ravenna e Ancona), indica approssimativamente un ritardo di 20 minuti lungo l'intero scanno di Goro, cioè tra la foce del Po di Goro e la foce del Po di Volano.

L'analisi delle registrazioni di marea dell'aprile 1999 è stata quindi inizialmente compiuta sulle registrazioni simultanee dei punti ESTERNO e SCANNO. Per rendere meglio comprensibili le oscillazioni i dati grezzi sono stati filtrati con medie mobili a passo variabile (mezz'ora e un'ora) fino ad ottenere la migliore rappresentazione delle oscillazioni principali.

L'interpretazione visiva dei dati così filtrati ha portato a valutare un ritardo medio di circa mezz'ora tra il punto ESTERNO ed il punto SCANNO, come si può visibilmente dedurre dalla Figura 18, che mostra una delle onde principali misurate. Dall'analisi del grafico risulta evidente come il ritardo di marea non sia costante ma vari durante il ciclo registrato. L'onda di marea tipica misurata è una semi-diurna di una certa ampiezza. La sfasatura è massima sulla cresta e cavo principali e si riduce fino quasi alla nullità sulla cresta secondaria.

Avendo riscontrato tale tipo di comportamento si è cercato di darne una ragione quantitativa analizzando le armoniche principali delle onde registrate. Essendo note le componenti principali delle onde di marea tipiche dell'Alto Adriatico. Invece di effettuare un'analisi di Fourier completa sulle oscillazioni registrate, si è optato per l'applicazione di un codice di calcolo che applica il metodo FOS (Fast Orthogonal Search) che è un adattamento dell' "Orthogonal Search Method" sviluppato da Korenberg (1988, 1989). Il codice si chiama FREQ ed è sviluppato dalla CoDebris di Solana Beach, CA, U.S.A.

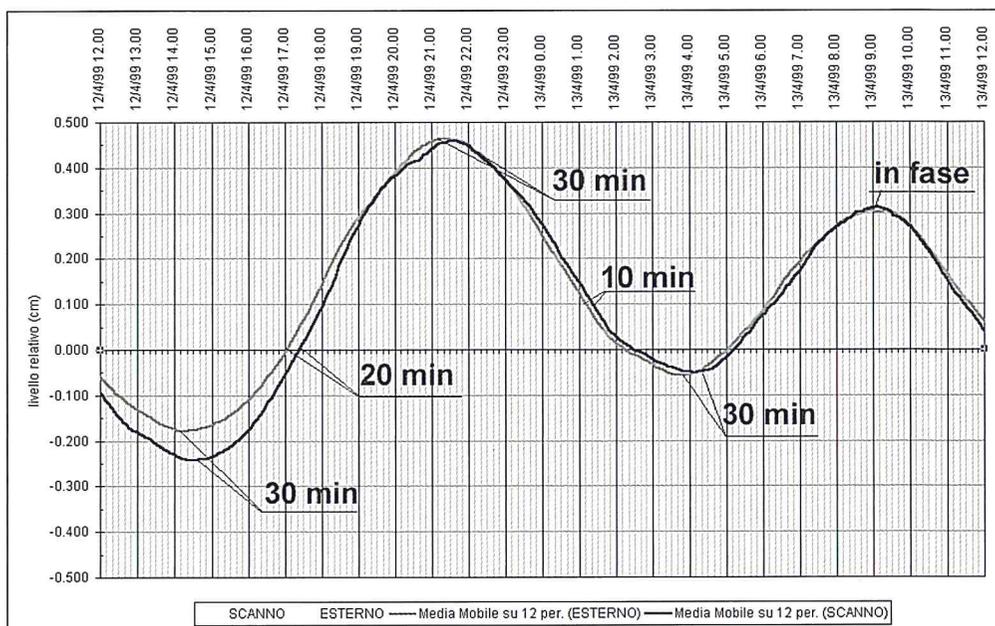


Figura 18 - Esempio di analisi visiva dei ritardi di marea tra ESTERNO e SCANNO.

Il metodo FOS verifica la qualità dell'adattamento di una serie di periodi di oscillazione "candidati" alla rappresentazione delle armoniche principali di un fenomeno oscillatorio. Per ogni periodo indicato come probabile armonica viene fornita l'entità dello sfasamento ed un valore di scarto quadratico medio che indica quanto quella particolare armonica, si adatta ai dati esaminati. Per la determinazione del ritardo di marea tra ESTERNO e SCANNO sono state confrontate le serie simultanee del periodo di registrazione 6-14 aprile 1999. L'asse del tempo è stato rappresentato in minuti a partire da uno zero comune alle due serie esaminate.

Su entrambi i campioni di misura sono state individuate le seguenti armoniche con lo stesso adattamento sulle due serie e con le fasi per ESTERNO e SCANNO riportate in tabella 5:

12.42 ore (componente M2 lunare principale semidiurna),

24.07 ore (componente P1 solare principale diurna),

12.00 ore (componente S2 solare principale semidiurna).

Lo sfasamento (in gradi ed in minuti, calcolato rispetto al periodo dell'armonica) risulta avere valore positivo in virtù della forma della trasformata di Fourier utilizzata nel codice FREQ per l'applica-

zione del metodo FOS. La funzione SENO delle equazioni ha segno positivo, mentre le armoniche indicate nelle tavole di marea pubblicate dal Servizio Mareografico risultano girare coerentemente con il verso antiorario della marea nell'Alto Adriatico.

Tabella 5 - Calcolo dello sfasamento tra ESTERNO e SCANNO per le tre armoniche principali individuate.

periodo minuti	ESTERNO		SCANNO		Δ fase °	Δ fase minuti
	Ampiezza m	fase °	Ampiezza m	fase °		
745.2	0.196	5.4	0.208	1.8	3.6	8
1444.2	0.105	326.9	0.123	316.2	10.7	42
720.0	0.112	191.1	0.112	188.7	2.4	5

I risultati ottenuti danno ragione del comportamento osservato nei dati di marea analizzati che hanno sfasature da 0 a 30 minuti, coerenti con i ritardi relativi alle armoniche individuate con il metodo FOS.

I risultati dell'analisi effettuata sono comunque da considerare con cautela in quanto i periodi di osservazione, lunghi circa una settimana, non sono sufficienti ad una definizione precisa delle componenti armoniche. L'analisi effettuata ha sicuramente individuato M2 come armonica principale, però non ha individuato la componente K1 (solilunare diurna) che è seconda per importanza (a Ravenna ha addirittura l'ampiezza maggiore). Per una corretta analisi sarebbero necessari dati simultanei per almeno un anno, periodo minimo necessario per una corretta definizione delle armoniche che costituiscono le oscillazioni di marea.

La variazione di sfasamento tra ESTERNO e SCANNO sembra comunque non avere una grossa influenza sull'andamento dei ritardi complessivi di marea tra ESTERNO e INTERNO nel caso in cui tutte le connessioni dell'area di fitodepurazione siano chiuse.

Anche se i dati di marea del punto INTERNO sono stati misurati con il mareografo a pressione, e quindi si risente maggiormente delle oscillazioni di livello di breve periodo, è stata comunque effettuata un'analisi del ritardo di marea tra SCANNO e INTERNO, filtrando opportunamente i dati con le medie mobili.

Il risultato dell'analisi nel periodo di funzionamento simultaneo dei due strumenti, dal 14 al 20 aprile 1999, mostra (pur in quadro di scarsa attendibilità del valore assoluto dei livelli misurati all'interno) un ritardo pressoché costante e pari a 30 minuti circa.

I dati delle maree misurati nella campagna di maggio 1999 (Fig. 16) risultano ancora di più difficile interpretazione, sia perché lo strumento posizionato allo scanno non ha potuto usufruire di un adeguato pozzetto di calma, sia perché tutte le aperture tra la sacca ed il Po all'altezza dell'area di fitodepurazione possono aver condizionato non poco i dati misurati.

Come riportato nella Figura 19, si nota un ritardo della marea interna di circa 1 ora rispetto alla marea esterna ed una significativa differenza di livello dovuta, questa volta, esclusivamente allo sfasamento.

Analisi dei dati correntometrici

Nel corso della campagna mareografica del mese di maggio 1999 sono state anche effettuate misure di velocità nei canali principali. Lo strumento utilizzato oltre a fornire il profilo verticale di velocità in modulo e direzione ha registrato, a mezzo di una sonda multiparametrica, anche i seguenti valori di qualità chimico-fisica dell'acqua: temperatura, conducibilità, salinità, torbidità.

Vengono presentati in Figura 20 i profili di velocità ottenuti sulle stazioni A, B, C, D ed E.

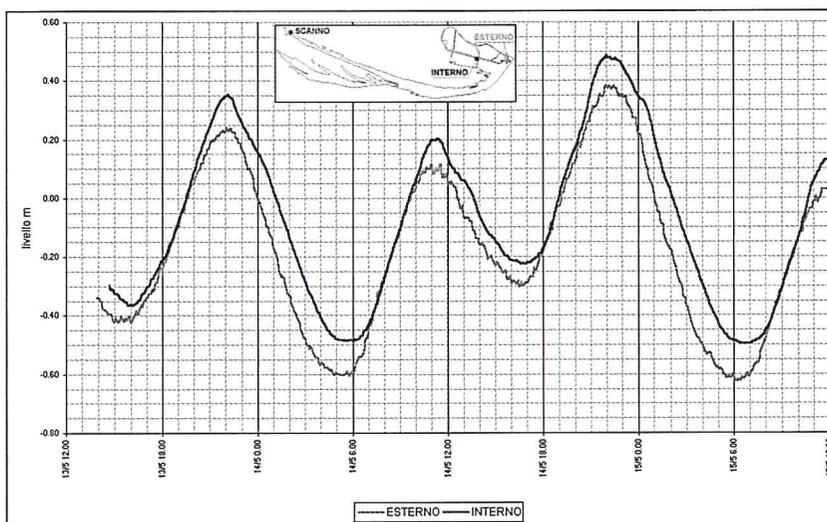


Figura 19 - Confronto tra i livelli misurati nei punti INTERNO ed ESTERNO nella campagna di maggio 1999.

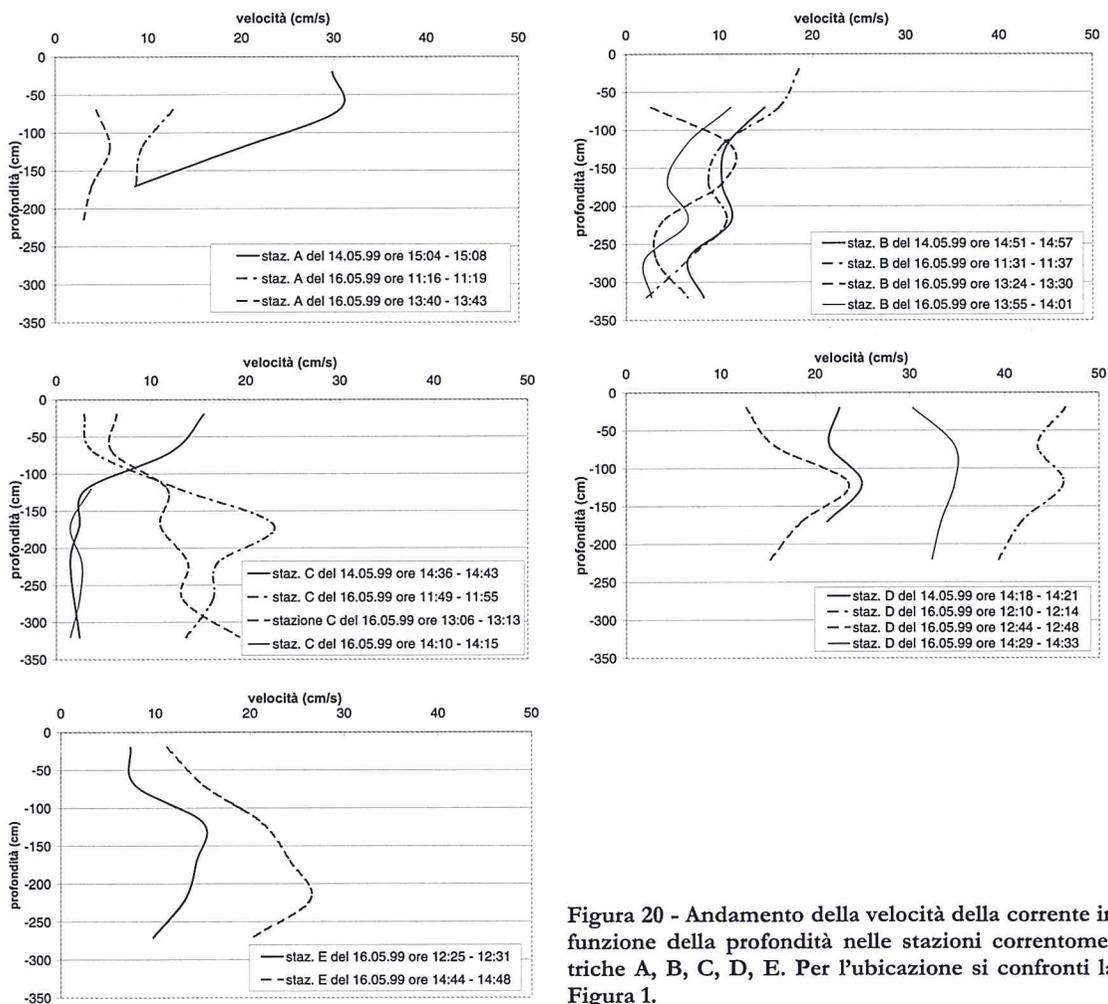


Figura 20 - Andamento della velocità della corrente in funzione della profondità nelle stazioni correntometriche A, B, C, D, E. Per l'ubicazione si confronti la Figura 1.

I cinque punti analizzati hanno tra di loro caratteristiche totalmente diverse ed individuano tre ambienti differenti:

- a) i punti delle stazioni di misura D ed E, posizionati vicino alla bocca secondaria dello scanno, sono caratterizzati da acque completamente marine; i flussi in ingresso ed uscita dalla sacca avvengono senza inversioni del profilo di velocità lungo i rami del canale;
- b) il punto misurato nel canale dell'area di fitodepurazione (punto A) è caratterizzato, in fase di crescita dell'onda di marea, totalmente da acqua dolce, di provenienza fluviale, mentre in fase di marea calante le acque presentano una maggiore salinità ma seguono pressappoco lo stesso verso di moto (subparallelo alla direzione del Po, da monte verso valle);
- c) i punti B e C, rilevati lungo il canale principale, presentano entrambi condizioni di effettiva stratificazione del flusso, con un evidente pacchetto di acqua dolce superficiale, che si muove in direzione spesso opposta a quella del pacchetto d'acqua salata sottostante.

La profondità del canale, nei punti B e C, fa sì che sugli strati più profondi si abbia una ulteriore inversione del flusso, non più dovuta alla salinità, ma probabilmente effetto della diversa temperatura tra gli strati.

Conclusioni

Il regime anemologico caratteristico del lobo meridionale del delta del Po, così come evidenziato dai dati raccolti, mostra spiccato carattere stagionale, con venti maggiormente distribuiti e privi di picchi di velocità predominanti (fatta eccezione per il settore di sud-est) nel periodo estivo e tipicamente concentrati in un settore di provenienza delimitato dalla Bora (nord-est) e dallo Scirocco (sud-est) nel periodo invernale.

L'analisi dei dati di moto ondoso disponibili per la Sacca di Goro ha identificato che la maggior parte dell'energia è distribuita nel settore di traversia compreso tra Nord-Est e Sud-Est, con altezze d'onda significativa comprese tra 0.5 ed 1 metro. I massimi eventi con altezza d'onda di 4.5 metri provengono dalla direzione 90°N.

La parte interna del canale navigabile di Goro è caratterizzata da un regime di marea senza particolare asimmetria con correnti massime in eccesso superiori ai 40 cm/s in sizige, sia in fase di flusso che di riflusso. La parte esterna alla bocca principale risulta dominata dalla corrente di riflusso con velocità, in sizige, superiori ai 45 cm/s. Tale zona risulta, inoltre, controllata dall'azione del moto ondoso data la sua esposizione. Lungo la zona interna dello Scanno il ritardo di marea tra la bocca secondaria e l'estremità orientale della laguna è dell'ordine di 30 minuti, mentre tra la zona orientale interna della laguna e la foce del Po di Goro si osserva un ritardo di circa 1 ora. La zona interna prossima alla bocca secondaria ha una massa d'acqua di caratteristiche tipicamente marine; l'estremità orientale della Sacca in fase di marea crescente è dominata da acqua dolce, mentre in fase di marea calante denota un aumento di salinità. La zona intermedia presenta stratificazione delle due masse d'acqua con versi di scorrimento opposti tra l'acqua salata, vicino al fondo, e l'acqua dolce superficiale.

Rinraziamenti

Si ringraziano A. Bertoni ed i responsabili delle Cooperative di Pesca di Goro e Gorino per il supporto tecnico fornito durante le campagne di misura, nonché la Centrale ENEL di Porto Tolle per aver gentilmente messo a disposizione i dati anemologici della centralina meteo di Lido di Volano. I dati di moto ondoso sono stati forniti dall'AGIP tramite l'Università di Bologna, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, sede distaccata di Ravenna. Si ringraziano il Dott. G. Fontolan ed il Prof. G. Gabbianelli per avere reso disponibile la strumentazione usata per le misure. Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura (responsabile U. Simeoni), ex 60% (responsabile U. Simeoni) e del fondo COFIN 98 (responsabile R. Dal Cin) del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.).

Bibliografia

- Calderoni, G. (1982) - *Regime anemologico nel Delta del Po e alla foce dell'Adige*. Annali dell'Università di Ferrara, sez. IX - Scienze Geologiche e Paleontologiche, vol. VIII, n. 4: 61-69.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola. Relazione generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp 276.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la Difesa del Mare e la Riqualificazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna. Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp 365.
- Korenberg, M. J. (1988) - *Identifying nonlinear difference equation and functional expansion representations: The fast orthogonal algorithm*. Ann. Biomed. Eng. 16:123-142.
- Korenberg, M. J. (1989) - *A robust orthogonal algorithm for system identification and time-series analysis*. Biol. Cybernetics, 60:267-276.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 30/3/2000.