

## DINAMICA MORFOLOGICA DEL LITORALE DEL DELTA DEL FIUME TAGLIAMENTO (ADRIATICO SETTENTRIONALE) IN RELAZIONE AI POSSIBILI INTERVENTI DI RIPASCIMENTO

Emiliano Gordini<sup>1</sup>, Ruggero Marocco<sup>2</sup> & Riccardo Ramella<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale OGS, Trieste.

(e-mail : egardini @ ogs.trieste.it; rramella @ ogs.trieste.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università degli Studi di Trieste.

(e-mail : marocco @ univts.it).

RIASSUNTO: Gordini E., Marocco R., Ramella R., *Dinamica morfologica del litorale del delta del fiume Tagliamento (Adriatico settentrionale) in relazione ai possibili interventi di ripascimento*. (IT ISSN 0394-3356, 2006).

L'analisi morfodinamica delle spiagge del delta del F. Tagliamento, dove insistono due delle località balneari più importanti dell'alto Adriatico, ha messo in evidenza l'esistenza di tratti di litorale soggetti ad endemica erosione, altri in progressione ed altri ancora tendenzialmente stabili. Rilievi topo-batimetrici di 66 profili perpendicolari alla spiaggia emersa, intertidale e sottomarina, eseguiti su scala annuale nel 2002-2003 (da un periodo estivo di ripascimento della spiaggia - ciclo estivo o *swale* - ad uno di erosione invernale - ciclo invernale o *storm*) e il loro confronto con le risultanze dei studi precedenti hanno permesso di definire che nell'ambito della spiaggia sottomarina le variazioni stagionali e quelle pluriennali sono minime ad eccezione dei tratti in corrispondenza delle aree di foce e di bocca lagunare. Qui si assiste ad un incremento dei fondali che beneficiano della deflessione del trasporto lungo riva a causa del pennello liquido dei flussi lagunari e fluviali. Nell'area più dinamica della spiaggia sottomarina (zona delle barre e dei truogoli), poi, le variazioni sono determinate essenzialmente da semplici traslazioni delle barre verso terra e verso mare, senza perdite o guadagni volumetrici. Diversa è invece la situazione lungo le spiagge intertidali ed emerse dove le variazioni sono sensibili e determinate a volte da cause naturali (scarsità di alimentazione lungo riva, incidenza del moto ondoso, ecc) ma anche dallo stratificarsi nel tempo di opere di difesa marittima diverse, costruite per finalità più disparate e oggi non completamente funzionanti. La situazione più drammatica è stata riscontrata nell'area fociale del Tagliamento, dove gran parte delle sponde e dei tratti di spiaggia apicali sono soggetti ad intensa erosione, mentre complessivamente, le spiagge sottomarine immediatamente adiacenti sono in progressione (con un incremento di ca. 0,085 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>). Le aree in accumulo risultano essere particolarmente localizzate al centro del fronte deltizio e al suo lato orientale, poco a SE dalla testata di un pennello di sbarramento. L'analisi a medio e lungo termine delle variazioni volumetriche in quest'area, risultanti dal confronto con rilievi precedenti (BRAMBATI 1987), eseguiti nel 1969 e nel 1985, hanno permesso di definire che dopo una prima fase di accrescimento delle spiagge intertidali ed emerse ed un approfondimento di quelle sottomarine (1969-1985) si è passati ad una situazione diametralmente opposta (1985-2002) che permane fino ad oggi. In questa condizione, data la necessità di reperire sedimenti per un urgente ripascimento delle spiagge in erosione (circa 50.000 m<sup>3</sup> anno) e di garantire il passo marittimo della foce, si ritiene che oltre alla porzione esterna dell'alveo fluviale che deve essere risagomato e approfondito (68.000 m<sup>3</sup> e 166.000 m<sup>3</sup> per raggiungere rispettivamente le profondità di 2,5 e 3,5 m ed una larghezza di 100-150 m) una parte di questo materiale (circa 90.000 m<sup>3</sup>) può essere prelevato dalle aree in accumulo rilevate da questo studio che oltre ad essere poste in vicinanza della foce, sono soggette a ricarica annuale.

ABSTRACT: Gordini E., Marocco R., Ramella R., Morphological dynamics of the littoral zone of the Tagliamento River delta (Northern Adriatic Sea) related to eventual nourishment works. (IT ISSN 0394-3356, 2006).

The morphodynamic analysis of the Tagliamento River delta beaches, where two of the most important holiday sites of the upper Adriatic Sea are located, revealed some areas undergoing endemic erosion, some of which are presently under accretion, and others that appear to be stable. Sixty-six topographic and bathymetric profiles orthogonal to the emerged, inter-tidal and submerged portions of the beaches were obtained during 2002 and 2003. Comparison to results from earlier studies showed that seasonal and multiyear variations in the submerged areas are very low, except for the zones located in correspondence to the river mouth and the tidal inlet. Here, the thickness of the sea floor sediment cover increases due to the deviation of the alongshore sediment transport as a consequence of both the tidal and fluvial outflows from the lagoon. In the most dynamic areas of the submerged beaches (bars and troughs), the sediment thickness variations are mainly represented by the outward and inward movements of the bars without net sediment volume losses or gains. A different situation has been identified in correspondence to the inter-tidal and emerged zones, where the variations are more conspicuous and are due not only to natural phenomena (limited alongshore feeding, waves etc.) but also to several coastal protection structures (constructed in the past for different purposes) that are not very effective. The worst situation has been found at the Tagliamento River mouth where most of the river levees and the apical beach areas are undergoing intense erosion. Instead, the adjacent submerged beaches are in general presently accreting (a global increase of 490.000 m<sup>3</sup>). The areas characterized by sediment accretion are mainly located in the central sector of the delta front and at its eastern side, southeast of a groin. The volumetric variations in the area have been analyzed over both short and long time-scales, and the resulting information has been confronted with those obtained from previous studies carried out in 1969 and in 1985 (BRAMBATI, 1987). This defined that, after a first accretion phase of the inter-tidal and exposed parts and of a deepening of the submerged portions of the beaches (1969-1985), a completely different regime set in (1985-2002) which appears to characterize the present situation. A sediment supply in the order of about 50.000 m<sup>3</sup>/yr is urgently necessary to replenish the eroded beaches. Sediment could be extracted from the river fan which presently has to be re-shaped and deepened for safe navigation (68.000 m<sup>3</sup> or 166.000 m<sup>3</sup> depending on whether a water depth of 2,5 m or 3,5 m is required, and a width roughly ranging from 100 m to 150 m). Part of this material (90.000 m<sup>3</sup>) could also be obtained from the accretion areas, characterized currently by annual feedings, that were identified in the present study.

Parole chiave: Dinamica costiera, Ripascimento, Delta fiume Tagliamento, Adriatico settentrionale, Italia.

Keywords: Coastal dynamics, Nourishment, Delta Tagliamento River, northern Adriatic Sea, Italy.

## 1. INTRODUZIONE

Oggi giorno diventa sempre più pressante individuare cave di prestito di sedimenti sabbiosi o ghiaiosi per cercare di porre rimedio alla ormai endemica erosione dei litorali, provocata a volte da cause naturali, ma anche e soprattutto dall'alterazione degli equilibri costieri da parte dell'uomo. In questa problematica, dettata anche da criteri d'estrema urgenza, rivestono particolare rilevanza gli studi di dinamica costiera finalizzati alla definizione delle modalità ottimali d'intervento, fermo restando la salvaguardia paesaggistica ed estetica dell'ambiente costiero. Per far ciò spesso ci si avvale della tecnica di ripascimento artificiale delle spiagge che prevede il prelievo di opportuni accumuli sabbiosi in mare, rappresentati quasi sempre dalle sabbie di piattaforma, dalle barre di foce e dei delta di bocca lagunare e, buon ultimo, da cave a terra. Esiste oggi una nutrita letteratura in merito che si rifà ai primi interventi nelle aree liguri, toscane, laziali e venete (cfr. ad esempio, CAPOBIANCO *et al.*, 1999), sino alle recenti sistemazioni costiere che ormai ricoprono gran parte del territorio nazionale con una mobilitazione di volumi di materiale per diversi milioni di m<sup>3</sup> (di cui ca. 6 milioni per i soli litorali di Pellestrina e Cavallino nel Veneto; DE GIROLAMO *et al.*, 1999). Fatte salve tutte le valutazioni sugli impatti ambientali che tali operazioni comportano, e l'annoso problema del mantenimento di questi materiali con opere di difesa "morbide" o "pesanti" o alla loro ricarica periodica, il provvigionamento di questi materiali può essere ricercato, come detto, a mare, a breve o lunga distanza dalla costa, oppure nell'ambito della fascia litorale stessa, attingendo anche a spiagge emerse in eccessivo accrescimento o ai passi marittimi che abbisognano di continue escavazioni. Va rimarcato che in questo contesto non vanno assolutamente toccati gli accumuli eolici costieri che sono stati recentemente molto compromessi a seguito delle estrazioni e sbancamenti eseguiti a scopi edilizi che hanno determinato la costruzione di agglomerati urbani a nastro sull'intera linea di costa. Le dune, che oltretutto fanno parte integrante e fissano la parte alta della spiaggia, vanno pertanto tutelate, preservate e possibilmente accresciute, non solo per il loro naturale valore paesaggistico ed ambientale, ma anche perché rimangono, a volte, l'ultimo baluardo costiero per contrapporsi alle mareggiate più violente e, a meso o macro scala temporale, alla paventata ingressione marina (prossima ventura). D'altro verso le sabbie di piattaforma dell'alto Adriatico (che si ubicano mediamente dai 13 ai 25 m di profondità) rappresentano serbatoi molto estesi, quasi sempre poco potenti e a scarso rinnovo, poiché ereditati e rielaborati dall'ingressione marina quaternaria e limitatamente toccati dalle ondate attuali. Ospitano inoltre una ricca popolazione di molluschi eduli e diffusi affioramenti rocciosi (GORDINI *et al.*, 2004) che sono una delle ricchezze più ambite dai pescatori dell'intero comparto adriatico e pertanto difficilmente utilizzabili a questi fini senza innescare conflitti sociali. Più interessanti, allora, rimangono i potenziali serbatoi sotto costa che oltre ad avere il pregio della loro vicinanza dal litorale, sono di per sé serbatoi rinnovabili in quanto ricaricati dal "nastro trasportatore litorale" e per questo, spesso scavati per mantenere officiosi i passi marittimi del retroterra. Va da sé che questi serbatoi rappresentano

almeno in casi di normale ripristino e conservazione di un litorale una delle soluzioni ideali, anche perché non modificano il complessivo bilancio volumetrico dell'unità fisiografica del paraggio. Anche questo intervento, comunque, deve essere valutato attentamente in funzione della previsione dei tempi di ricarica delle cave di prestito e della quantità-qualità del materiale prelevabile. Si rimarca che l'escavazione in queste aree comporta almeno teoricamente un duplice beneficio; la ricostruzione delle spiagge, da un lato, e la garanzia dell'accesso ai porti turistici, dall'altro, infrastrutture queste che rappresentano oggi una componente essenziale nell'offerta turistica di una località balneare.

Il presente studio intende investigare nell'ambito di un sistema complesso come quello del delta del F. Tagliamento che ospita due tra le località turistiche più rinomate dell'alto Adriatico (Lignano nel Friuli Venezia Giulia e Bibione nel Veneto), le potenzialità a breve e medio termine dell'utilizzo dei serbatoi naturali di depositi rappresentati dalla foce e dalle bocche lagunari per intervenire con ripascimenti artificiali sui tratti di litorale in forte erosione. Queste possibili strategie d'intervento saranno adottate solamente dopo la definizione delle caratteristiche morfodinamiche del paraggio e il contesto evolutivo dei fondali di spiaggia (oggetto di questo studio) e della caratterizzazione sedimentologica e chimico-ambientale dei depositi sabbiosi da utilizzare, sancita dalle leggi vigenti (legge 179 del 2003). La scelta del delta del Tagliamento come area campione per questa analisi è stata determinata in primo luogo dalla richiesta da parte delle Amministrazioni locali di inquadrare sotto questa problematica le loro zone di competenza e in secondo luogo dalla possibilità di confrontare i risultati dei rilievi morfologici attuali con le risultanze di una nutrita serie di studi precedenti (vedi soprattutto ZUNICA 1971, BRAMBATI 1987 e più recentemente, FONTOLAN 2004) che permettono una visione panoramica e uno spessore cronologico delle fenomenologie dinamico-costiere rilevate nell'arco di un anno e in condizioni deposizionali - erosive differenti (*swale - storm*).

## 2. IL DELTA DEL F. TAGLIAMENTO

L'area costiera oggetto dello studio è incentrata sulle coste basse e sabbiose del delta bilobato del Tagliamento che rappresenta uno dei sistemi fluviali più importanti dell'Italia Settentrionale. Si ubica geograficamente a cavallo della Regione Friuli Venezia Giulia (Est) e Veneto (Ovest) tra i golfi di Trieste e quello di Venezia; il suo limite meridionale viene convenzionalmente posto lungo la batimetrica 8, approssimativamente lungo una rotta parallela alla costa ad una distanza di circa 3 km da essa. Il litorale espone le sue spiagge a diversi regimi di vento e conseguentemente di moto ondoso. Il suo regime anemometrico è governato dallo spirare dei venti del I° Quadrante e soprattutto di quello di Bora (ENE, prevalentemente nella stagione invernale e autunnale). Per quanto concerne i venti meridionali, lo Scirocco, dopo la Bora, è il vento che può raggiungere le massime velocità nel paraggio; segue il Libeccio, che spira da SO, con frequenza di poco inferiore a quella dello Scirocco (essenzialmente dalla primavera all'estate). Nel periodo estivo l'area è inoltre interessata da venti settentrionali prevalentemente a carattere diurno

provenienti dal IV° Quadrante (termiche estive). Il mare regnante risulta essere quello di Bora, che risente di considerevoli rifrazioni prima di giungere sulla battigia, mentre quello dominante è di Scirocco, con in subordine il mare di Libeccio (CATANI, MAROCCO, 1976; BRAMBATI, 1987).

Le maree sono tra le più ampie del Mediterraneo. In situazione di sizigia (onde semidiurne) raggiungono un'escursione media a Trieste di 86 cm (100 cm a Venezia); in quadratura (onde diurne) un'escursione media di 22 cm (20 cm a Venezia). Casi eccezionali di Acqua Alta, hanno fatto registrare valori di 130 cm con valori estremi attorno ai 200 cm (MAROCCO, PESSINA, 2000). La circolazione media del bacino è ciclonica con corrente ascendente lungo le coste croate e discendente lungo quelle italiane.

Studi condotti sull'evoluzione recente della fascia costiera hanno dimostrato che il delta attuale del Tagliamento si è formato circa 2.000 anni fa a seguito di una diversione orientale del fiume che ha disseccato la paleolaguna di Marano. La formazione del delta non si è realizzata con una progredizione graduale, ma con rapidi accrescimenti intervallati da fasi erosive e di stabilità (MAROCCO, 1988; 1989; 1991).

Dalla cartografia storica analizzata con grande perizia da ZUNICA (1971) emerge che dal 1644 al 1868 il delta ha subito profonde modifiche, in parte determinate da fattori naturali e dal regime meteo-marino del momento e in parte dall'uomo che ha modificato profondamente il territorio con opere di bonifica, tombamenti, arginature e continue regimazioni fluviali. Per quanto attiene alla forma bialare del delta, il confronto delle carte prese in esame mette in risalto che le maggiori modificazioni si sono avute sull'ala destra del delta. Segnatamente da una conformazione tozza e convessa verso mare del litorale (situazione del 1822) si passa, in un lasso di soli 46 anni, ad una accentuata concavità, particolarmente evidente nella sua porzione centro-occidentale a testimonianza del succedersi di eventi erosivi. Si avverte anche una sensibile migrazione dell'asta terminale del fiume, con una prima e modesta rotazione verso levante, seguita, successivamente, da traslazioni verso ponente, tendenza, questa, che viene mantenuta anche attualmente. L'accrescimento della foce ha dunque mantenuto nel tempo un asse di direzione SO. Lo stesso Autore specifica, inoltre, che il massimo arretramento dell'ala deltizia si è realizzato in un brevissimo periodo dal 1822 al 1833, seguito da gradualmente avanzamenti che nel 1868 riportano il litorale alla condizione di partenza, per poi superarla nel 1903. Nello stesso intervallo temporale il rimanente tratto di litorale risulta sensibilmente più stabile, mentre fa registrare un forte incremento alla fine del secolo.

Dalle evidenze sopra esposte, considerate dovutamente le incertezze del metodo, emerge che il delta non ha avuto un ciclo evolutivo continuo nell'arco di tempo considerato, ma un'intermittenza di fasi particolarmente evidenti nell'ala destra.

L'analisi delle varie edizioni delle tavolette I.G.M. (dal 1937 al 1951) confermano gli andamenti della costa dedotti dalle carte più antiche con una maggiore dinamicità dell'ala destra rispetto a quella sinistra, dove continuano periodi di cospicuo ripascimento, intervallati da altri di intensa attività erosiva. Le diverse levate rendono particolarmente manifesto il meccanismo di

accrescimento del delta che si attua con un progressivo saldamento di scanni sabbiosi alla battigia e la migrazione delle barre sottomarine sempre verso Ovest, che vanno ad implementare quelle del *delta inlet* di Punta Baseleghe.

Anche BRAMBATI (1987), sulla base del confronto delle linee di riva riportate nei rilievi del 1891, 1978 e 1985, conferma l'evoluzione dell'ala sinistra del Tagliamento sottolineando l'accenuato sviluppo del lobo orientale della foce, in controtendenza all'erosione del tratto di litorale che si estende fino a Lignano Riviera. Più ad Est di questa località, fino alla Bocca di Lignano, risalta anche in questo caso, a livello secolare, una forte progressione della spiaggia.

Più recentemente, FONTOLAN (2004) a riguardo dell'ala occidentale del delta evidenzia, riprendendo i dati di BRAMBATI, come nel 1968 per contrastare la forte erosione che, nella parte più prossima alla foce, poneva in pericolo la struttura del faro, furono costruiti tre frangiflutti in massi che, nei mesi successivi, favorirono un discreto accumulo di sabbie (BRAMBATI, 1970). Sempre l'Autore rimarca come la tendenza evolutiva del litorale sia rappresentata da una marcata fase erosiva del settore prossimo alla foce, il cui materiale, seguendo il verso della corrente di deriva principale, subisce un trasporto prevalente verso Ovest. Una parte di esso va a depositarsi nella porzione centrale del lobo occidentale deltizio, esattamente sul fronte della parte maggiormente urbanizzata: l'altra concorre all'accrescimento verso occidentale del sistema Bocca di Porto Baseleghe. Significativa risulta anche la parziale distruzione dell'apparato dunare in corrispondenza della Lama di Revelino e di Punta Faro, anche se recentemente difeso da frangiflutti in continua risagomatura e prolungamento. Anche il fronte delle dune litorali, fissato negli anni '90 da sacchi di geotessile sovrapposti, risulta oggi fortemente compromesso, al di là delle viminate e dei sacconi di sabbia posti a loro difesa. In questa area la linea di riva ha subito un forte arretramento, con la completa scomparsa della spiaggia emersa, l'erosione del piede dell'avanduna e una perdita volumetrica stimata in 1,3 m<sup>3</sup>/m/anno (1968-88, da FONTOLAN, 2004) sui fondali marini antistanti.

Numerosi sono i lavori sedimentologici eseguiti sui fondali antistanti il delta (BRAMBATI, VENZO, 1967; CATANI *et al.*, 1978; BRAMBATI *et al.*, 1979; BRAMBATI *et al.*, 1982; BRAMBATI, 1987). In estrema sintesi, i sedimenti che contraddistinguono questo tratto di litorale sono costituiti da sabbie medio fini, unimodali e ben classate dalla battigia fino alla profondità di 2-3 m e da depositi bimodali e moderatamente classati, costituiti da sabbie fini variamente mescolate a peliti, oltre questa profondità. Quest'ultime diventano preponderanti al largo della foce e sui fondali oltre i 7 m. La dinamica del trasporto delle sabbie avviene per sospensione gradata (seguendo PASSEGA, 1964) e per saltazione secondo le metodiche di VISCHER (1969): quella delle peliti per sospensione più o meno uniforme. La dispersione dei contributi terrigeni fluviali avviene in modo diverso a seconda della granulometria: il pattern dei sedimenti sabbiosi più grossi evidenzia una movimentazione in un'area ristretta, disposta simmetricamente alla foce (con una maggiore tendenza verso Ovest), mentre quello dei sedimenti più fini palesa una dispersione a distanze maggiori approssimativamente dalle batimetri-

che 6-7 in poi. Risulta infine interessante osservare che, sempre secondo gli Autori precedenti, il trasporto della frazione fine avviene in modo predominante al largo della isobata 7 m e comunque da Est a Ovest.

Geologicamente i depositi fronte mare rappresentano la tipica sedimentazione dei prismi costieri di **H.S.T** (*Highstend System Tract*) che testimoniano il massimo livello del mare raggiunto durante l'ultima transgressione marina (MAROCCO, 1991; GORDINI *et al.* 2002).

L'intera area deltizia è stata oggetto, sin dagli anni '60, di una intensa antropizzazione a fine urbanistico - residenziale. Le abitazioni sono sviluppate soprattutto a nastro nelle strette vicinanze delle spiagge e hanno comportato lo sbancamento dei rilievi dunari. L'impetuoso sviluppo urbano ha comportato anche l'insediamento di importanti poli nautici che hanno trovato luogo nelle strette vicinanze delle bocche lagunari (di Lignano ad Est) e di Porto Baseleghe (ad Ovest). Anche l'asta terminale del Tagliamento è stata recentemente fissata dalla creazione di una marina che utilizza l'entrata del fiume come canale d'accesso. Da una stima preliminare, risulta che gli attuali posti barca direttamente collegati all'attività turistica del delta (parte veneta e parte friulana) siano superiori a circa 5.000. Non va inoltre dimenticato che all'interno d'ogni marina sono ospitati: cantieri nautici, officine, aree residenziali, spazi ricreativi, impianti sportivi, campi da tennis, piscine, bar e ristoranti, con un conseguente elevato impatto

ambientale.

In riferimento al grado di antropizzazione del litorale, in particolare durante la stagione estiva (maggio-settembre) i dati delle aziende turistiche di Lignano e Bibione, denunciano un'affluenza che da un calcolo approssimativo si aggira complessivamente sulle 8 milioni di presenze. In questo periodo le spiagge risultano quasi completamente occupate da circa 60.000 lettini, 31.000 ombrelloni che vengono tolti in periodo invernale per far posto a staccionate a difesa dalla deflazione eolica.

### 3. METODOLOGIA APPLICATA ALLA DEFINIZIONE DELLA SPIAGGIA EMERSA, INTERTIDALE E SOTTOMARINA E PROCESSING DEI DATI BATIMETRICI.

Sui 18 km circa di litorale che si estende sulle ali del delta sono stati eseguiti 66 profili topo - batimetrici (Fig. 1), con spaziatura di circa 150 - 200 m in corrispondenza della foce, mentre mediamente compresi tra 250 - 350 m nelle rimanenti aree. I profili sono stati ripetuti durante condizioni deposizionali ed erosive differenti, nello specifico, nei mesi di settembre ed ottobre 2002 e maggio e giugno 2003, al fine di evidenziare eventuali modificazioni su scala stagionale. La morfologia della spiaggia emersa e della porzione di spiaggia

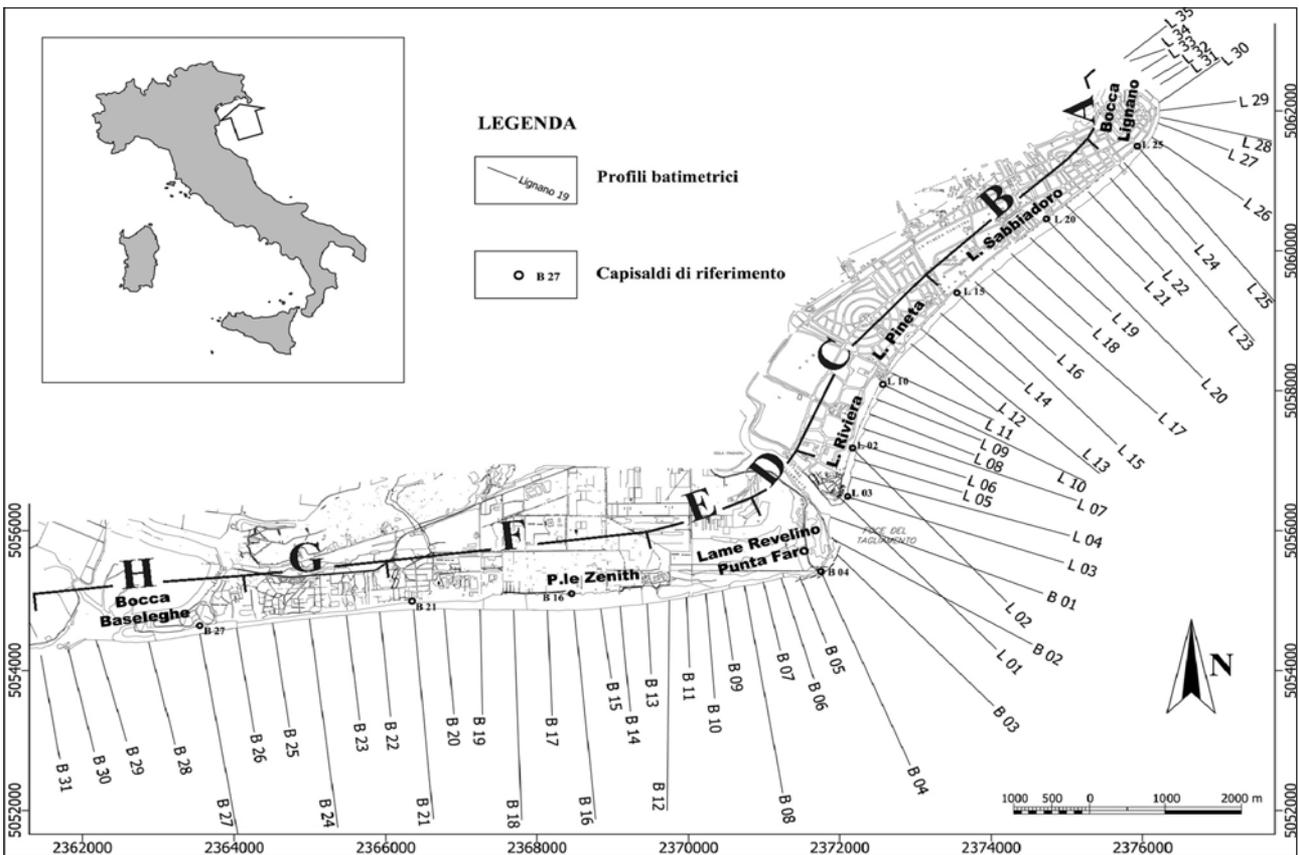


Fig. 1 - Delta del F. Tagliamento: ubicazione dei profili batimetrici, dei capisaldi di riferimento e zonazione dei tratti di spiaggia intertidale e sottomarina.

*Tagliamento River delta: location of the bathymetric profiles, fiducial points and zoning of the inter-tidal and submerged beach.*

intertidale non coperta dai rilievi batimetrici è stata determinata con metodologia *LIDAR*<sup>1</sup>. Contemporaneamente è stato eseguito anche un rilievo fotogrammetrico, condotto con camera-digitale semimetrica.

La posizione planimetrica dei transetti batimetrici è stata ottenuta con DGPS cinematico, in modalità continua.

La strumentazione installata a bordo dell'imbarcazione è stata la seguente:

- un ricevitore *Ashtech G12 Lite* dotato di decodificatore *DGPS LandStar MkIV della Thales Tracs Ltd* per la correzione differenziale in tempo reale;
- un plotter ed ecoscandaglio di navigazione *Lowrance LCX - 18C* a doppia frequenza 200/50 kHz dotato di cartografia elettronica dell'Alto Adriatico e funzione di registrazione e visualizzazione grafica dei profili;
- un ricetrasmittitore *CB 40* canali;
- un computer portatile *Compaq Presario 1200* con il compito di gestire l'acquisizione simultanea dei dati di profondità e di posizione forniti, rispettivamente, dall'ecoscandaglio e dal GPS/DGPS con una frequenza di un secondo.

L'indagine è stata eseguita in condizioni di mare calmo, assenza di vento, con marea quasi sempre prossima alla quadratura. La velocità dell'imbarcazione è stata mantenuta costante (3,5 e 4,5 nodi).

Agli ecogrammi del fondo marino sono state apportate, in fase di elaborazione (postprocessing), le seguenti correzioni (Fig.2):

1. il valore di *offset* del sensore dell'ecoscandaglio rispetto al pescaggio dell'imbarcazione;
2. taratura dello strumento per valutare le variazioni chimico fisiche della colonna d'acqua;
3. stima delle variazioni di immersione del trasduttore a seconda delle diverse velocità di navigazione;
4. ortogonalità dell'impulso acustico inviato dal trasduttore dell'ecoscandaglio rispetto al fondale marino;
5. escursione di marea astronomica-meteorica;
6. filtraggio di variazioni accidentali verticali dell'imbarcazione (onde provocate da altre imbarcazioni, ecc.).

Da verifiche eseguite in campo risulta che l'errore medio del rilievo batimetrico si aggira attorno ai +/- 7 cm.

<sup>1</sup> Il sistema *LIDAR* utilizzato è l'*ALTM3033* di proprietà della *Helica S.r.l.* e costituito da un laser operante nell'infrarosso ( $\lambda=1063$  nm) che invia impulsi di luce alla frequenza di 33 KHz. Il sistema è stato montato solidale all'elicottero *AS350B2* a sua volta dotato di una piattaforma inerziale, che dispone di compensazione per le variazioni di assetto dell'aeromobile in rollio e beccheggio oltre al posizionamento DGPS. L'indagine ha permesso di ottenere una densità media di punti al suolo superiore a 1,5 punti al m<sup>2</sup>. La camera digitale utilizzata per il rilievo fotogrammetrico è del tipo semimetrica *Rollei modello 6008* con dorso digitale *PhaseOne modello H20*. Il sistema di acquisizione digitale ha una spaziatura di pixel di 9 micrometri ed è composta da 4080 x 4076 pixel con una dinamica di 48 bit.

Le variazioni volumetriche riscontrate dalla ripetizione dei profili in periodo invernale ed estivo sono state definite utilizzando il *Software Matlab 6.5.1* della *MathWorks*. Il software ha permesso di passare dai due DEM (*Digital Elevation Model*) dei due rilievi OGS 2002 e 2003, ad una griglia a maglia quadrata che ha consentito per interpolazione lineare, il calcolo delle perdite o acquisti volumetrici dei fondali.

#### 4. BATIMETRIA E CARATTERI MORFOLOGICI DELLA SPIAGGIA

I dati batimetrici sono stati processati con programma *Surfer version 8.0 Surface mapping system della Golden Software, inc.* Le Figg. 3 e 4 fotografano l'assetto bati - morfologico del fondale della spiaggia intertidale e sottomarina nel maggio-giugno 2003. Nella carta morfo - batimetrica di Fig. 4, sono ben visibili le morfologie positive (barre, dune, ecc...) del fondo marino, quelle negative (truogoli, incisioni, ecc...), a testimonianza della specifica dinamica del moto ondoso, dei flussi fluviali e delle correnti mareali lungo i *delta inlet*.

##### 4.1 ZONAZIONE DEL LITORALE DEL DELTA DEL F. TAGLIAMENTO

Sulla base dei risultati conseguiti è possibile eseguire una zonazione delle spiagge del delta a partire dall'area centrale ed interna alla foce del Tagliamento (tratto D di Fig.1).

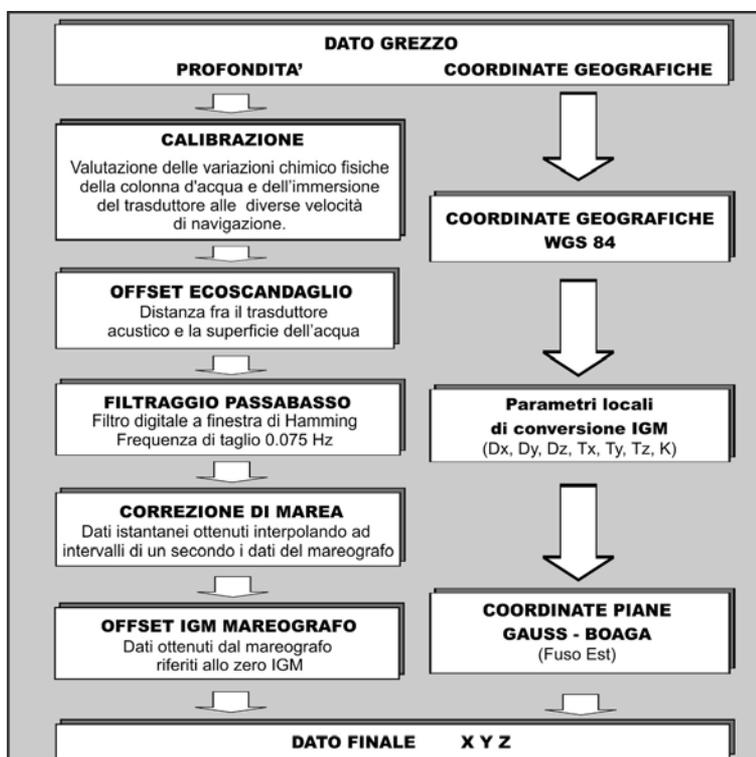


Fig. 2 - Diagramma a blocchi del *postprocessing* applicato alle registrazioni del fondo marino.

*Flow diagram of the post-processing sequence applied to the sea floor records.*

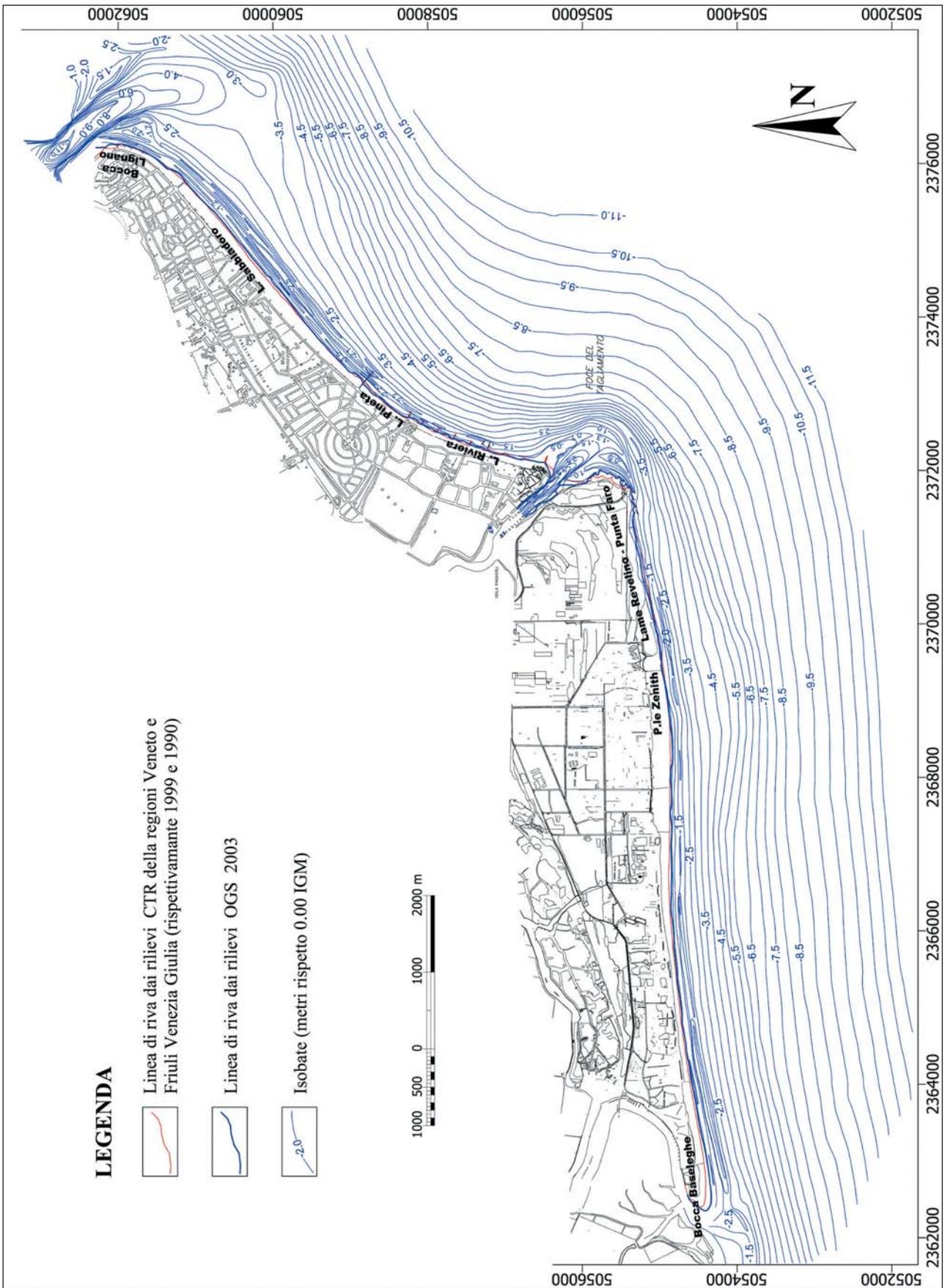


Fig. 3 - Carta batimetrica della spiaggia intertidale e sottomarina del delta del F. Tagliamento. Rilievi OGS 2003. Bathymetric map of the inter-tidal and submerged beach of the Tagliamento River delta. 2003 OGS surveys.

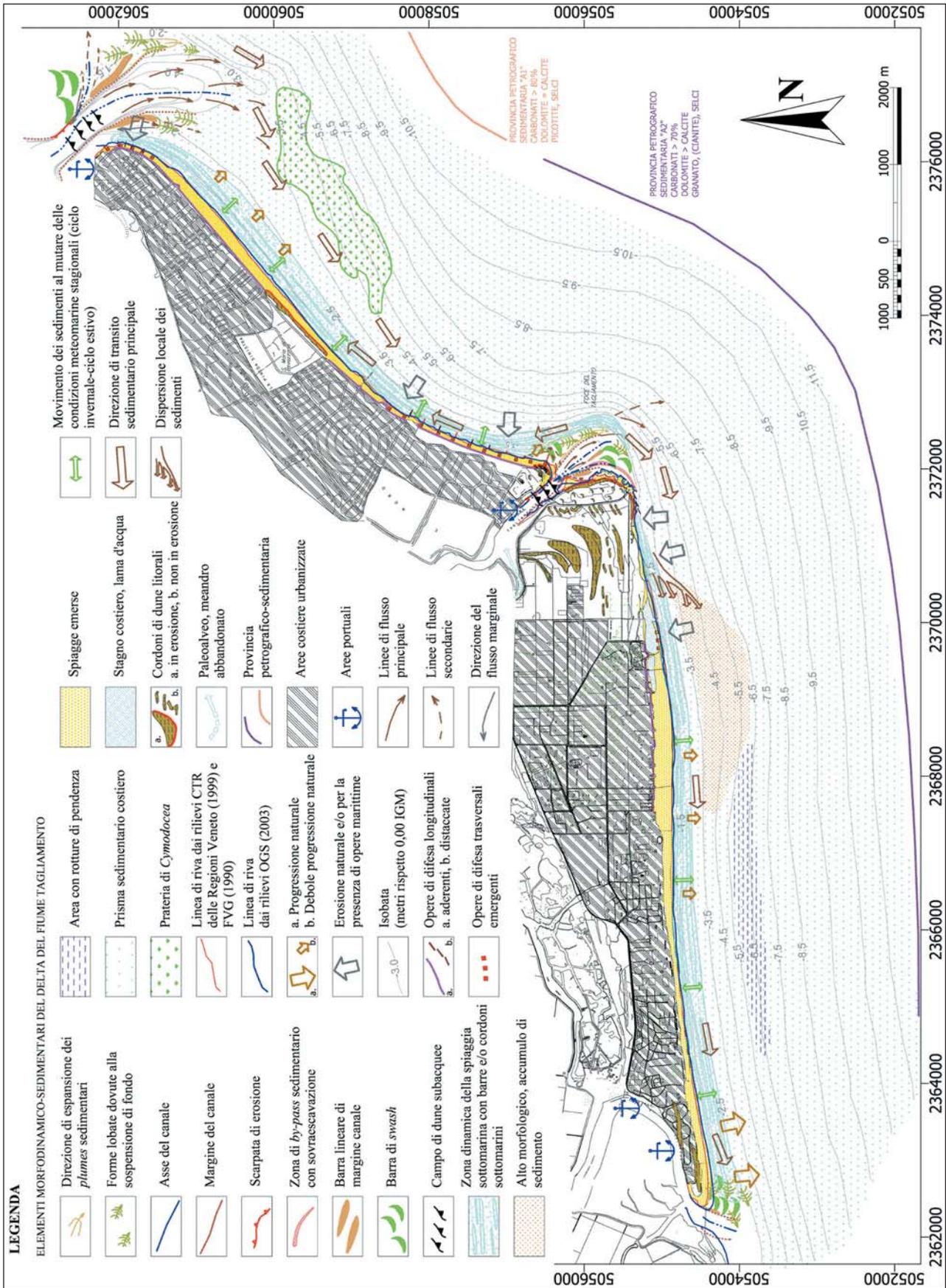


Fig. 4 - Schema morfodinamico-sedimentario del delta del F. Tagliamento e del suo litorale. Morpho-dynamic and sedimentary sketch of the Tagliamento River delta and of its littoral area.

## La foce del F. Tagliamento

### Tratto D

L'asta terminale del fiume, dopo un percorso meandriforme, si sviluppa su un breve tratto rettilineo (ampiezza di 150 m e profondità di 6 m circa) dove si è insediata la darsena "Marina Uno" e continua fino a mare, con sezione d'alveo molto simmetrica e classica barra di foce. Sul tratto centrale dell'alveo sono presenti campi di dune subacquee (*sensu*, ASHLEY *et al.*, 1990; FONTOLAN *et al.*, 2000) a profilo asimmetrico, sviluppate secondo il flusso uscente, che divengono simmetriche verso lo sbocco a mare; qui, la piana sommersa viene definita da una vasta area semicircolare, a debole pendenza (da 1,0 a 1,7 ‰) incisa dal canale di foce, in parte naturale e in parte scavato artificialmente per rendere accessibile l'ingresso al porto fluviale. Il passaggio tra la porzione interna ed esterna della foce, è contraddistinto dalla presenza di uno sviluppato *ebb-tidal delta*, che si concretizza con un imponente *water flow ramp* che dalla profondità di 6,0 m (darsena "Marina Uno") passa, ad una distanza di circa 1,3 km (verso mare), ad una profondità di 1,0 m. Il fronte deltizio s'identifica con il fitto ravvicinamento delle isobate comprese tra 1,0 e 6,0 m che determina un gradino morfologico ad elevata acclività (massimo 1,3 ‰). Questo gradino rappresenta il limite estremo delle gittate solide più grosse del Tagliamento, e dunque, i più recenti depositi riconducibili al sistema **HST**.

Nel dettaglio (Fig. 3 e Fig 5; Transetto L01-Lignano e B03-Bibione) la piana sommersa viene contrassegnata dalla presenza di numerose *bedforms*, che vanno dalle canalizzazioni marginali (1,2 m), solo in parte naturali che si sviluppano al piede delle barriere frangiflutto del Faro di Punta Tagliamento, alle barre allungate e uncinata (altezza di circa 0,2-0,5 m) oltre a numerose barre di *swash* lunate, alternate ad altre più irregolari (altezza 0,4-0,6 m), in continua evoluzione e trasformazione operata dal moto ondoso. Queste ultime morfologie attive, conferiscono al delta una componente *wave-dominated* (*sensu*, HAYES, 1980) che palesa la ridistribuzione degli apporti da parte del moto ondoso. Il canale principale è bordato da barre lineari di margine (altezza variabile da 0,5 a 0,8 m) che manifestano un maggiore sviluppo al lato occidentale. L'alveo della foce è soggetto a periodiche escavazioni per assicurare l'accesso al porto "Marina Uno. Ad esempio, nel maggio 2003 ingenti quantità di sabbia sono state prelevate al letto del canale navigabile e depositate immediatamente ad Ovest dell'area di scavo. Ciò ha comportato una modificazione della forma e dell'estensione del fronte deltizio e, nel dettaglio, ha innescato un riequilibrio del canale e la trasformazione della barra lineare di margine.

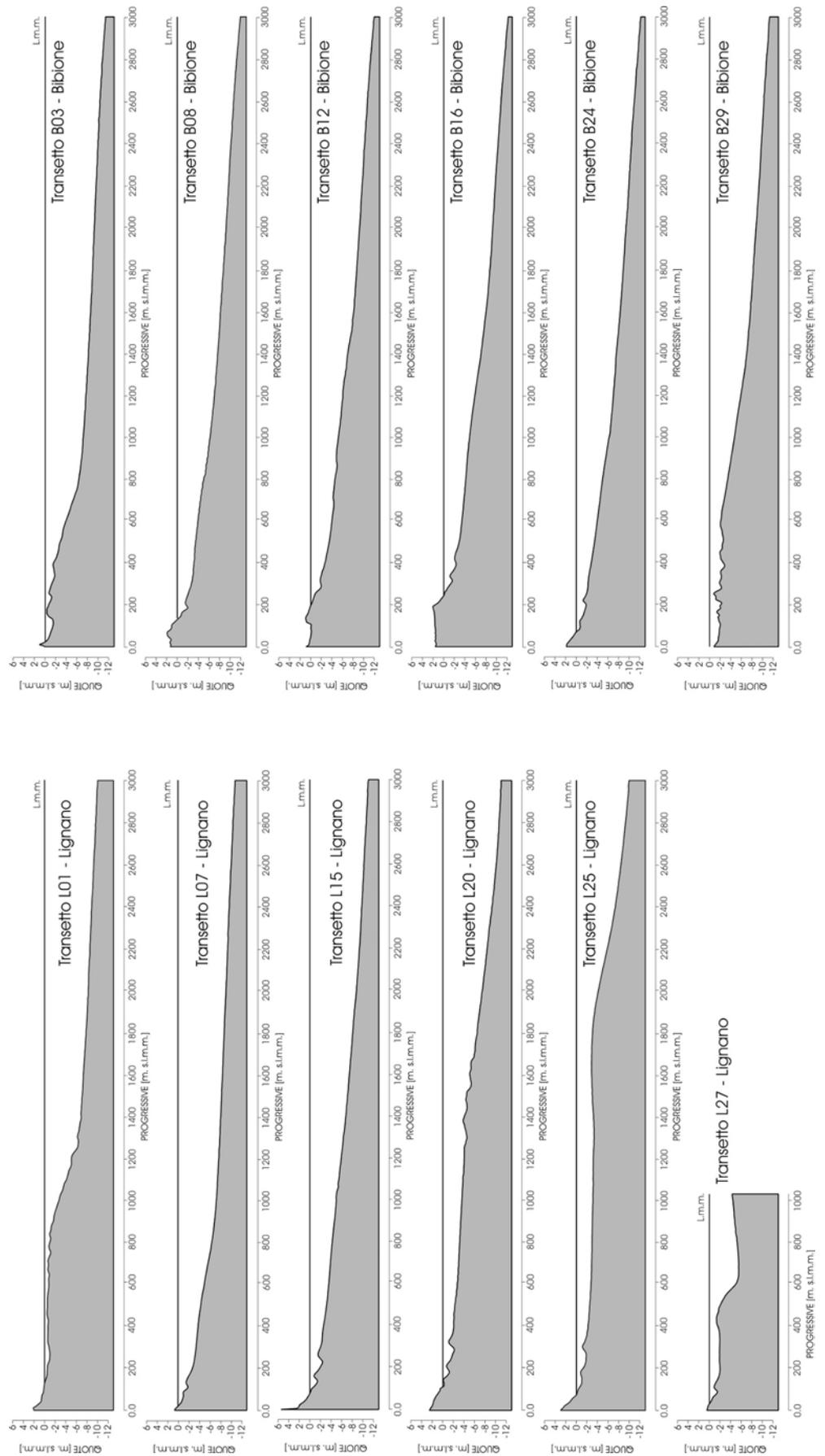
Procedendo da Ovest verso Est, la linea di costa assume un andamento sinuoso, caratterizzato dal naturale protendimento focale "sostenuto", anche, da un lungo pennello di sbarramento, realizzato nel 1963 (Fig. 5; Transetto L01-Lignano) e, accorciato, recentemente, per favorire il *by-passing* dei sedimenti e la loro naturale dispersione verso Est. La spiaggia emersa, completamente livellata nel periodo balneare-estivo, assume un'estensione di circa 100 m ed è delimitata, verso terra, da apparati dunari a forma di barcana con al fronte accumuli eolici minori che vengono zappati dalle mareggiate invernali; quella intertidale, risulta legger-

mente più estesa (ca. 120 m) con un ampio terrazzo di bassa marea (tra 1,0 e 1,5 m), con barre di *swash* (*sensu*, KING C.A.M., 1972; ASHLEY *et al.*, 1990), e campi di barre di accrescimento con orientazione Sud-Ovest (Fig. 5; Transetto L01-Lignano). La spiaggia sottomarina è contraddistinta da un brusco restringimento delle isobate poste a circa 1 km dalla foce e da una loro inflessione verso riva. Segnatamente, dopo la zona sub-orizzontale sostenuta dall'opera di difesa, segue una forte acclività del fondale (passaggio dalla isobata 1,0 a quella 6,0 m in 325 m circa) su cui si insediano forme di fondo attive (barre e cordoni sottomarini), determinate dall'interazione dell'energia di trasporto fluviale con quella litorale. Va sottolineato che il corpo sedimentario di questo prisma deltizio rappresenta un notevole serbatoio di materiale sabbioso, eventualmente sfruttabile per mirate operazioni di riequilibrio del litorale circostante. Dopo il piede del fronte deltizio il fondale declina dolcemente con valori (ca. 2,0 ‰) che rispecchiano le pendenze dei fondali limitrofi e sono caratterizzati dalla sedimentazione di materiali fini.

Al lato opposto, la sponda occidentale della foce del Tagliamento, oggetto in questi anni di un rapido arretramento, è stata progressivamente difesa con importanti opere marittime a mare (scogliere) e al piede delle dune (fascinate verticali, graticciate, tubi tipo Longard riempiti di sabbia) che hanno trasformato radicalmente l'aspetto paesaggistico del paraggio e l'idrodinamica litorale. Tutte queste opere, comunque, non hanno evitato il perdurare dei processi erosivi che esplicano la loro massima concentrazione nel tratto interno alla foce ed immediatamente ad Ovest del faro di Punta Tagliamento. Il litorale è formato da una spiaggia piatta e di modesta estensione, contraddistinta da mini tomboli collegati ai frangiflutti. Nelle aree non protette si registra una repentina regressione della battigia che ha portato ad una ulteriore diminuzione della spiaggia (< di 50 m) che ora viene delimitata verso terra dalle lame tra i vecchi cordoni dunari (Lama di Rivelino). La spiaggia intertidale e sottomarina mostrano, nell'insieme, l'assenza o quasi del terrazzo di bassa marea e un minimo sviluppo della zona dinamica a barre e truogoli. Qui la transizione dalla battigia alla spiaggia esterna avviene con un'elevata acclività, indice questo, di una profonda instabilità. Al piede delle scogliere, la spiaggia sommersa è incisa da una depressione (ampia circa 100 m e profonda 1,2 - 1,5 m), probabilmente determinata, in analogia con situazioni analoghe personalmente riscontrate, in parte da fenomeni di riflessione del moto ondoso (Fig. 5; Transetto B03-Bibione) e in parte, anche dalle correnti di fondo dei flussi marginali del fiume. Segue verso mare, una seconda ampia piana sub-orizzontale (da 0,5-1,0 m), dove sono evidenti in posizione arretrata barre intertidali seguite da cordoni sottomarini e complessi sistemi di barre di *swash*, complessivamente fino a 600-800 m dalla costa. Dal piede della barra più esterna, si passa quindi con un brusco cambiamento di pendenza ad un fondale sub-pianeggiante: in particolare, la base della fascia degradante verso le profondità maggiori, si colloca ad una distanza pari circa 1000 m (corrispondente a 5,0/6,0 m di profondità) con un valore medio di pendenza di 15,4 ‰ (confrontabile con quello riscontrato sull'analogo settore dell'area friulana). Dalla profondità di 6,0 m fino al limite dell'area indagata (circa 3000 m dalla battigia, 11,0 m), il fondale

Fig. 5 - Alcuni esempi significativi di profili topografici e batimetrici riguardanti le spiagge del delta del F. Tagliamento. Per l'ubicazione dei profili si rimanda alla Fig. 1. Le quote, in metri, sono riferite al livello medio mare (l.m.m.), mentre, le progressive, sempre espresse in metri, sono riferite ai capisaldi istituiti lungo il litorale.

*Some meaningful examples of topographic and bathymetric profiles acquired in correspondence to the beaches of the Tagliamento River delta. See fig. 1 for the profiles location. The elevation expressed in meters, are referred to the medium sea level (l.m.m.), whereas the distances (in meters) are referred to the fiducial points located along the coast.*



marino presenta andamento pressoché tabulare con minima inclinazione.

### Litorale orientale (dalla Foce del Tagliamento alla Bocca di Lignano)

#### Tratto C

Alla zona prettamente di foce segue verso Est, senza soluzione di continuità, una linea di riva ad andamento prevalentemente concavo, disarticolato dalla presenza di numerosi pennelli trasversali che interrompono con i classici denti di sega il suo sviluppo lineare. L'accumulo delle sabbie sul lato occidentale dei pennelli rende palese la prevalenza del trasporto lungo riva da Ovest verso Est. La minor influenza del trasporto regionale in senso opposto (da Est verso Ovest), sembra essere legata al forte sviluppo dell'*ebb-tidal delta* della bocca lagunare di Lignano, che trattiene gran parte dei depositi e in parte flette il movimento dei sedimenti verso il largo. Il bilancio sedimentario totale, comunque, rende palese che gli arrivi di sabbie da Ovest non compensano adeguatamente le perdite per erosione ormai croniche di questo tratto di costa. Anche la limitata estensione della spiaggia (ca. 50 m, ampiezza tra le minime dell'intero paraggio), evidenzia i regimi erosivi tuttora in atto e l'inefficacia delle opere di difesa. La spiaggia emersa è delimitata al retro da opere longitudinali - aderenti per impedire l'erosione delle aree urbanizzate retrostanti, ma che possono determinare pericolose superfici riflettenti dell'onda di mareggiata. Il settore di litorale manifesta una zona sub-orizzontale molto limitata (10-15 m circa) o quasi del tutto assente e ravvivata da una unica barra intertidale (talvolta assente), seguita verso mare da un trugolo che si posiziona grossomodo a breve distanza dalla testa dei pennelli (Fig. 5; Transetto L07-Lignano).

Più ad oriente, il fianco orientale del conoide deltizio si inflette verso costa, determinando un rapido approfondimento del fondale anche a limitata distanza dalla battigia e in particolar modo nell'area antistante le opere di difesa. La zona a barre e truogoli presenta un'estensione di circa 140 -160 m, una o al massimo due, barre sottomarine che si sviluppano su un'area a pendenza variabile da 12,7 a 16,3 ‰ (Fig. 5; Transetto L15-Lignano). Dopo la zona dinamica, il fondale presenta tre caratteristiche fasce a diversa pendenza: la prima, della barra sottomarina più esterna (ca. 200 m dalla battigia, - 3,0 m), fino a circa 500 m dalla battigia (-4,5 m), con un'acclività prossima a 4,2 ‰, una seconda, tra 500 e 900 m circa dalla riva (rispettivamente 4,5 e 5,9 m di profondità) con un'acclività superiore alla fascia precedente (7,3 ‰) e, infine, la terza fascia che si colloca ad una distanza compresa tra 900 e 1900 m circa (corrispondenti a 7,0/8,0 e 10/11 m di profondità), con un valore di pendenza minore (1,6 ‰) rispetto al tratto precedente e simile a quelli osservati al largo della fascia prodeltizia.

#### Tratto B

Da Lignano Riviera a Sabbiadoro la riva assume uno sviluppo convesso, con un'ampia spiaggia emersa (180 m) che passa ad una estesa piana di bassa marea (ca. 40-60 m) e intertidale - sottomarina (340 m). E' un tratto di spiaggia sostanzialmente in accrescimento con alle spalle (zona centrale), una duna litorale (4 a 5 m circa d'altezza), e nei tratti limitrofi opere di difesa ade-

renti in calcestruzzo. La spiaggia sottomarina manifesta una zona dinamica ampia 250 m, con due ordini di barre sottomarine e un'acclività di 9,0 ‰ circa. In questo tratto di litorale s'individuano cinque zone sottomarine a diversa acclività.

Nella presente situazione, però, i valori di pendenza sono nettamente inferiori a quelli visti precedentemente e danno al profilo della spiaggia un andamento più regolare, dove i cambiamenti di pendenza risultano meno accentuati (Fig. 5; Transetto L15-Lignano).

Proseguendo verso la Bocca di Lignano (Fig. 5; Transetto L20-Lignano) la spiaggia sottomarina fa risalire un ulteriore addolcimento del fondale: in corrispondenza della convessità della linea di riva, la fascia a barre e truogoli raggiunge la massima estensione del paraggio (ca. 320 m), mediamente con due o tre ordini di barre ed eccezionalmente quattro. I profili tipici della spiaggia sottomarina di questa zona palesano tre intervalli, ad andamento regolare, con la presenza di Fanerogame marine (*Cymodocea*), che aumentano in ampiezza, e dunque diminuiscono gradualmente la loro acclività avvicinandosi alla bocca (vedi Fig. 5; Transetto L20-Lignano). Segnatamente, le fanerogame si posizionano in una limitata area, a cavallo delle batimetriche 4,0/6,0, a largo della fascia costiera di Lignano Sabbiadoro, sulla rampa morfologica che porta al fondale più profondo.

#### Tratto A

In prossimità del canale di accesso a Lignano, la linea di riva è condizionata da una serie di interventi antropici (pennelli impermeabili ed opere di difesa aderenti) realizzati a salvaguardia dell'area urbanizzata retrostante e del suo ambito portuale. La spiaggia emersa risulta poco estesa (ca. 60 m) e fortemente antropizzata (anche con una serie di opere semifisse) per far fronte alla stagione turistica; verso mare è presente un terrazzo di bassa marea (come nel litorale precedente), ampio mediamente 40 m e fissato dall'aggetto dei pennelli. Dopo questa distanza e con una forte pendenza inizia la zona a barre e truogoli. Anche all'interno della bocca lagunare il terrazzo di bassa marea (che si sviluppa tra le profondità di 0,5 e 1,0 m) trova la sua massima estensione, fino a delimitare il canale principale del *delta inlet* (Fig. 5; Transetto L27-Lignano).

Nello specifico, il *delta inlet* di Lignano (Figg. 3 e 4) definisce un corpo sedimentario complesso che si protende di molto verso mare e che viene sostenuto da un canale principale. Questo termina, dopo un andamento quasi rettilineo, con uno sbocco verso Sud-Ovest, allineandosi alla prevalente direzione delle bocche lagunari e delle foci dell'alto Adriatico. Il canale si approfondisce progressivamente verso mare, raggiungendo la profondità massima di 11,0 m e segue un andamento sinuoso con una prima deviazione verso oriente, con conseguente erosione della sponda, difesa da una scogliera in pietra a pezzatura grossolana. Qui l'alveo assume una classica geometria asimmetrica con al centro un esteso campo di dune subacquee (di modeste dimensioni,  $h = 0,8$  m e  $L = 20$  m), disposte marginalmente rispetto alla direttrice principale di flusso. Proseguendo verso il largo, il canale mostra un'ulteriore deviazione verso Sud, Sud-Ovest con conseguente deflessione dei sedimenti sabbiosi verso le profondità maggiori e alla creazione di cordoni sottomarini

marginali, con la barra longitudinale occidentale di minor sviluppo rispetto all'opposta. Nel complesso, l'assetto della bocca lagunare, rimarca l'evidente progressione verso mare e quindi la prevalenza della componente di riflusso rispetto a quella di flusso, con una componente longitudinale (da Est ad Ovest) resa palese dalla presenza di uncinature, forme lobate, propaggini sabbiose e forme lobate allungate.

Al lato orientale del canale (dalla battigia fino a -2,5 m), si sviluppa una vasta area a *swash bars*, con forme lunate alternate ad irregolari, continuamente rielaborate dal moto ondoso.

Anche il *delta inlet* della bocca di Lignano e soprattutto gli accumuli laterali del canale principale, possono fornire materiale passibile di un utilizzo per il rifornimento artificiale delle spiagge dopo gli opportuni accertamenti sulla qualità dei depositi sanciti per legge.

### **Litorale occidentale (dalla Foce del Tagliamento a Punta Baseleghe)**

#### **Tratto E**

Proseguendo più ad Ovest la spiaggia emersa palesa la situazione evidenziata precedentemente (Tratto D) con una sottile lingua sabbiosa (50 -100 m), delimita alle spalle dalla laguna-stagno costiero di Revelino che comunica con il mare con una rotta di limitate dimensioni e profondità (20-40 m e -0,5 /-1,0 m, vedi Fig. 5; Transetti B08-Bibione e B12-Bibione). Recentemente, anche in questa zona sono stati realizzati in situazione d'emergenza tre *rubble-mound groins* al fine di contrastare il processo d'arretramento in atto. L'erosione, verificatasi sopraflutto al pennello occidentale, fa ritenere che il loro dimensionamento (spaziatura e aggetto) non sia in grado di tamponare la situazione vigente. Il carattere erosivo della spiaggia viene anche visualizzato dalla limitata estensione del terrazzo di bassa marea mostra (20-30 m) e un approfondimento costante del tratto intertidale della spiaggia fino al limite della zona a barre e truogoli (posta a 0,9 m di profondità e a 40/45 m dalla battigia). Più al largo, il fondale è caratterizzato da una minima fascia dinamica (circa 100-150 m), sostenuta da una sola barra che talvolta risulta appena accennata o assente con un unico truogolo molto accentuato. Ancora più al largo il fondale marino può essere suddiviso in tre profili tipici, corrispondenti a fasce di diversa acclività del conoide deliziosi;

- una prima fascia mossa da depressioni (da 130 m a cavallo dei 3,0 m di profondità, a circa 190 m dalla linea di riva) e zone in accumulo più estese (circa 400 m). Il passaggio fra le due aree avviene con un gradino morfologico mediamente accentuato (5,9 ‰);
- una seconda fascia, molto estesa (1600 m circa), prevalentemente sub-orizzontale;
- un tratto finale, molto acclive che non trova riscontro nell'ala sinistra del delta.

#### **Tratto F**

In questo settore del litorale si registra un graduale cambiamento del profilo di spiaggia sottomarina, con la comparsa di una zona sub-orizzontale interna, cui fa seguito la zona a barre e truogoli che si allarga progressivamente procedendo verso Punta Baseleghe (Fig. 5; Transetto B16-Bibione). Tale allargamento della zona dinamica è ben visibile in corrispondenza del Piazzale

Zenith, dove raggiunge un'ampiezza di circa 250 m e comprende due ordini di barre e altrettanti truogoli, ad andamento irregolare. Nello stesso profilo, dopo la zona dinamica, si riconosce una fascia ad andamento regolare con acclività media pari a 3,6 ‰. Ancora più ad Ovest la fascia a barre e truogoli si amplia ulteriormente, arrivando ad un'estensione massima di 250-340 m con 2-3 ordini di barre sottomarine. Estremamente significativo risulta l'andamento delle isobate nel fondale prospiciente la zona Piazzale Zenith, tra i 3,0 e i 6,0 m di profondità che circoscrivono un'area in accumulo, derivante dall'erosione del tratto di spiaggia più orientale (Fig. 4).

In controtendenza rispetto alle aree sopra descritte, la parte centrale della costa di Bibione mostra un'accentuata convessità verso mare. Il confronto delle linee di riva della CTR del Veneto (1999) e quella dei nostri rilievi (Fig. 3) evidenzia una tendenza alla progressione naturale di questo tratto di litorale con valori di avanzamento della spiaggia emersa, pari a circa 10 m. L'arenile qui raggiunge il massimo valore (200-250 m) e mostra una pendenza regolare, senza rotture determinate da morfologie naturali (berma ordinaria e di tempesta) e viene delimitato da opere di difesa longitudinali aderenti che insistono in un'area depressa che si sviluppa fino al suo limite settentrionale. Il terrazzo di bassa marea è molto esteso (60 m circa) e degrada dolcemente verso la fascia dinamica del litorale che è anch'essa abbastanza ampia (complessivamente 70-80 m). Segue un fondale molto omogeneo (Fig. 5; Transetto B16-Bibione) con una graduale diminuzione della pendenza passando dalla zona a barre e truogoli (7,6 ‰), a quella immediatamente seguente (5,4 ‰); tendenza questa, che viene confermata anche verso mare, dove dopo un modesto gradino morfologico (6,8 ‰), la spiaggia sottomarina mostra un assetto quasi sub-orizzontale con acclività pari a 2,8 ‰ (3,0 ‰ a circa 3 km dalla costa).

#### **Tratto G**

Proseguendo verso la Bocca di Baseleghe la spiaggia si assottiglia (ampiezza circa 50-70 m), senza però evidenziare processi erosivi in atto (Fig. 5; Transetto B24-Bibione). Il confronto dei rilievi 1999 con quelli 2003, confermano tuttavia la tendenza alla stabilità del litorale. La sua parte intertidale ha un'estensione di circa 70 m, con un evidente terrazzo di bassa marea delimitato da una barra (posta ad una profondità di -0,7 m).

#### **Tratto H**

In coincidenza con la freccia litorale che delimita la laguna di Baseleghe (Fig. 5; Transetto B29-Bibione) si assiste nuovamente ad un ampliamento della spiaggia emersa (circa 150 m) e alla presenza di apparati dunari di modesta elevazione (1-2 m) che si sviluppano parallelamente alla linea di riva dove sono presenti le classiche morfologie di accrescimento di una freccia litorale. La battigia si raccorda dolcemente al terrazzo di bassa marea (ampio 25 m circa) che a sua volta si congiunge dolcemente alla zona dinamica. In questa area tra le isobate 0,5 e 1,5 si riconoscono le tipiche morfologie legate al moto ondoso (piattaforma di *spit*, *sensu*, ASHLEY *et al.*, 1990, barre di *swash* e forme lobate) disposte parallelamente, con spiccata espansione verso Ovest, tanto da occludere o trascinare sempre

nella medesima direzione la bocca di Baseleghe. Questo processo al prolungamento verso occidente dell'ala destra del delta tilaventino e all'occlusione della bocca di Baseleghe è ormai noto da molto tempo (ZUNICA, 1971; CATANI *et al.*, 1978; CATANI *et al.*, 1982) e viene contrastato oggi, come in passato, attraverso la periodica escavazione del canale d'accesso al porto. Si fa presente che anche queste escavazioni possono fornire ingenti quantità di materiale per il ripascimento delle aree in erosione.

La spiaggia sommersa prossima a Punta Baseleghe mostra un carattere relativamente stabile. La sua parte verso terra è contraddistinta da un'estesa zona dinamica (250-270 m), alimentata da due ordini di barre litorali seguite dai rispettivi truogoli. Si passa, poi, quasi senza soluzione di continuità, ad un fondale prevalentemente pianeggiante, caratterizzato essenzialmente da due fasce a modesta pendenza. La prima di queste fasce si estende dalla progressiva 280 m a 1100 m dalla battigia, tra le profondità da 2 a 7 m e con una pendenza di 5,5 ‰. La seconda, con acclività pari a 2,6 ‰, si sviluppa da 1280 a 3000 m dalla battigia, tra le profondità rispettivamente di 7 e 12 m (Fig. 5; Transetto B29-Bibione). Il protendimento verso mare del delta inlet è sottolineato in modo particolare dall'andamento delle isobate da 1,5 a 2,5 m che si collocano in posizione avanzata rispetto alle aree adiacenti. Il passaggio alle profondità maggiori avviene con una superficie ad acclività pari a 6,3 ‰, che dalla progressiva 1300 m passa gradualmente verso mare ad un valore di 3,6 ‰. Anche queste parti più esterne del profilo di spiaggia non presentano morfologie particolari, mantenendo la solita superficie debolmente inclinata che si raccorda ai fondali del golfo di Venezia. Rispetto al *delta inlet* opposto (bocca di Lignano) quello di Baseleghe è meno sviluppato (sia verso terra che verso mare) a dimostrazione che i flussi di marea qui sono meno forti e, soprattutto che nel versante a mare, l'azione della dispersione marina è di molto superiore a quella determinata dai flussi di marea.

## 5. ANALISI MORFOLOGICA QUANTITATIVA DELLA SPIAGGIA

A completamento di questo studio è stata condotta una breve indagine morfologica quantitativa (*sensu*, CAROBENE, BRAMBATI, 1975; CAROBENE, 1978) al fine di definire l'estensione, le quote e le pendenze e gli elementi morfologici peculiari delle diverse porzioni della spiaggia emersa, intertidale e sottomarina. La finalità dell'analisi è stata quella di identificare su base morfologica le condizioni di stabilità o instabilità del litorale e ciò anche per individuare il dimensionamento ideale del profilo di spiaggia nei diversi settori del paraggio.

Segnatamente è stata indagata in maniera particolare la zona che si estende dalla battigia alla "zona a barre e truogoli", che già in altre ricerche si è dimostrata il termometro della situazione erosiva o di accrescimento del litorale (vedi CATANI *et al.*, 1982). A tal fine, si è appurato che i risultati migliori si ottengono dall'analisi delle relazioni che legano la distanza tra linea di battigia e il piede della barra sottomarina esterna (Lb-P) e la sua pendenza  $\alpha$  (Fig. 6). Si è accertato anche, com'era del tutto prevedibile, che sussistono relazioni di dipendenza tra ampiezza della zona sottomarina (spiaggia intertidale + zona a barre e truogoli), la sua pendenza e le condizioni d'erosione o stabilità del litorale definite attraverso osservazioni dirette e validate dal confronto con dati pregressi. Infatti, i punti che rappresentano questi parametri morfologici, calcolati per ogni sezione topo - batimetrica (sono stati utilizzati esclusivamente, anche per omogeneità, i soli dati desunti dall'ultimo rilievo, maggio-giugno 2003) mostrano una regressione lineare d'equazione  $y = -0,0022x + 1,1489$  e  $R^2 = 0,7386$ . In altri termini la pendenza della spiaggia, in condizioni d'omogeneità tessiturale dei sedimenti, è in relazione con la sua stabilità e permette di eseguire una zonizzazione delle aree in erosione da un lato e di quelle in progressione o in stabilità al lato opposto. Alla maggiore acclività e minore estensione della zona a

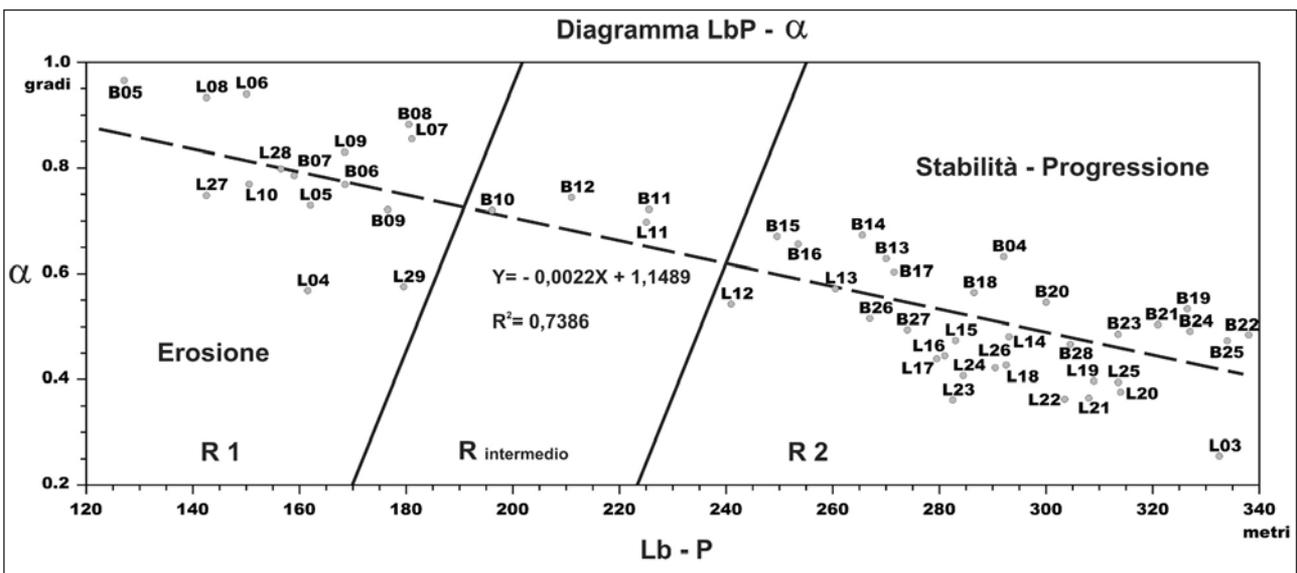


Fig. 6 - Diagramma "Distanza tra linea di battigia e piede della barra sottomarina esterna (Lb-P) e la pendenza della retta Lb-P ( $\alpha$ ).  
Diagram "Distance between the foreshore and the foot of the submerged external bar (Lb-P) and the dip of the line Lb-P (ALFA.)

barre e truogoli, corrisponde una concentrazione di punti (raggruppamento R1); viceversa in condizioni opposte (R2). Tra questi due raggruppamenti o famiglie di tratti di litorale si colloca poi, una fascia intermedia di transizione graduale tra le due. All'interno del raggruppamento R1 si ubicano:

- i tratti di spiaggia ad Ovest delle opere marittime di difesa costruite in prossimità del Faro di Punta Tagliamento (Transetti B5; B6; B7; B8 e B9). Come precedentemente osservato quest'area manifesta evidenti processi d'erosione trascorsi ed in atto, che hanno portato ad un notevole assottigliamento della spiaggia emersa, con la presenza di rotte e varchi;
- i tratti di spiaggia ad Est della foce del Tagliamento (Lignano Riviera), difesi da opere trasversali, eseguite negli anni 1966-1979, e soggetti tutt'oggi ad evidenti processi erosivi (L4; L5; L6; L7; L8; L9 e L10).
- le strette spiagge del margine occidentale della Bocca di Lignano, anch'esse caratterizzate dalla presenza di opere di difesa impermeabili (L27; L28 e L29).

Nell'ambito del raggruppamento R2:

- si ubicano i rimanenti tratti del litorale ad eccezione di quelli di raccordo dell'area del Faro e di Bibione (Transetti B 10, B 11 e B 12), e tra Lignano Riviera e Sabbiadoro (L11). Questa famiglia di punti raggruppa le aree di litorale dove sia in base ad osservazioni dirette (particolari morfologie osservate sulla spiaggia emersa ed intertidale), sia in base a confronti cartografici recenti (sovrapposizione della linea di costa definita dalle Carte Tecniche Regionali delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, 1999 -1990 e quella dei presenti rilievi di maggio-giugno 2003) presentavano caratteri di stabilità o tendenza alla progressione naturale.

Se da un lato la distinzione tra le due famiglie che raggruppano tratti di litorale deltizio ai limiti del diagramma sono evidenti, dall'altro bisogna specificare che non tutti i punti che cadono nell'area di stabilità o progressione si trovano sotto una condizione acclarata. Quest'ultimo fatto sembra essere spiegato come la tendenza di queste aree in lieve erosione a portarsi verso una relativa stabilità, oppure, all'inverso dalla condizione di stabilità relativa verso una condizione di erosione tendenziale (es. punti relativi ai Transetti L12 e L3 o nel caso del litorale di Bibione, B13 e B14).

Anche se permangono queste incertezze sull'interpretazione di un numero ristretto di dati, si può ritenere che nell'insieme il diagramma fornisce un ottimo strumento per discriminare aree tendenzialmente in erosione, da quelle stabili o in progressione naturale. Altri parametri morfologici quantitativi delle spiagge forniscono informazioni analoghe, ma questo permette di definire con una certa precisione la pendenza e la distanza che le spiagge devono raggiungere in condizioni d'equilibrio con gli agenti meteomarinari.

## 6. VARIAZIONI BATIMETRICHE E VOLUMETRICHE DEL FONDALE MARINO DAL CICLO EROSIONE INVERNALE A QUELLO DEPOSIZIONALE ESTIVO

Nell'arco annuale scandito dal periodo invernale (settembre ed ottobre 2002) a quell'estivo (maggio e

giugno 2003), sui 18 km circa di litorale si sono definiti i principali spostamenti del materasso sabbioso. I bilanci volumetrici eseguiti per ogni transetto sono riportati nelle Tabelle I e II. Preme sottolineare che l'errore stimato sul valore di profondità rilevato (+/-7 cm), può portare a sovrastimare o sottostimare i volumi calcolati e ciò soprattutto, quando le variazioni di profondità sono minime e si ripercuotono su estese superfici. Per questo motivo non si sono prese in considerazione le variazioni con valore eguale o inferiore a questo, anche se calcolate. Ne consegue che le variazioni dei fondali che assommano a valori prossimi a +/- 15-20 m<sup>3</sup>/m, devono essere considerate solamente indicative di una tendenza del litorale, non variazioni effettive.

La ripetizione dei rilievi nei due periodi ha confermato che i principali cambiamenti della spiaggia sottomarina avvengono quasi esclusivamente nella zona dinamica a barre e truogoli, con la traslazione delle barre più al largo dalla posizione estiva, durante la stagione invernale. Ma oltre a questa fascia, tipicamente soggetta a variazioni, ne sono emerse altre aree e segnatamente (Fig. 7):

- una prima ubicata sul fronte deltizio, in cui sono presenti numerose barre e cordoni litorali che si muovono verso Ovest, sospinti dalla corrente litoranea e dai mari del I Quadrante, mentre subiscono una dispersione diversa, per mari del II e III Quadrante. In questa zona e soprattutto in prossimità della foce si riscontrano locali approfondimenti dei fondali seguiti da accumuli che tendenzialmente divengono prevalenti. Questi fenomeni diventano evidenti in corrispondenza del pennello occidentale di foce (vedi Transetti L03 e L04; Tab. I), che continua a trattenere nell'area, i contributi solidi del Tagliamento, non permettendo l'alimentazione del litorale lignanese;
- una seconda area, ad Ovest di Bibione, localizza ad una distanza compresa tra 800 e 1000 m dalla costa e a profondità variabile da 5,0 a 7,0 m, dove si riscontra una modesta rottura di pendenza (acclività massima pari a 10,5 ‰) che è possibile seguire per circa 2,5 km parallelamente alla costa (ben evidente nei Transetti B19; B20; B21; B22 e B23). Qui si registra una variazione massima di spessore di circa 0,5 m, ed un deficit sedimentario valutato lungo il transetto in 67,6 m<sup>2</sup>;
- una terza, più ad Est, presente sul fondale marino antistante Bibione, che si estende da 870 a 980 m dalla costa, a cavallo della batimetrica 6. Qui il fondale è relativamente elevato e si presenta fortemente accidentato per avvallamenti e gobbosità a geometria variabile, ben visibili lungo il Transetto B11 (ma anche nei transetti dal B07 al B15). Tali asperità, distribuite sul margine occidentale dell'alto morfologico (Fig. 4), non presentano similitudini (in ampiezza e lunghezza d'onda) con le morfologie tipiche dalla zona a barre e truogoli.

Ritornando alla zona a barre e truogoli, nell'area veneta essa è maggiormente sviluppata verso Ovest (da Bocca di Baseleghe alla porzione centrale del litorale), mentre perde di estensione e viene quasi completamente sostituita da aree in erosione in prossimità della foce tilaventina. Dette aree, disposte parallelamente e/o leggermente inclinate rispetto alla linea di riva, sono particolarmente evidenti in prossimità di Pineta Punta Faro e Lame di Revelino dove si riscontrano deficit

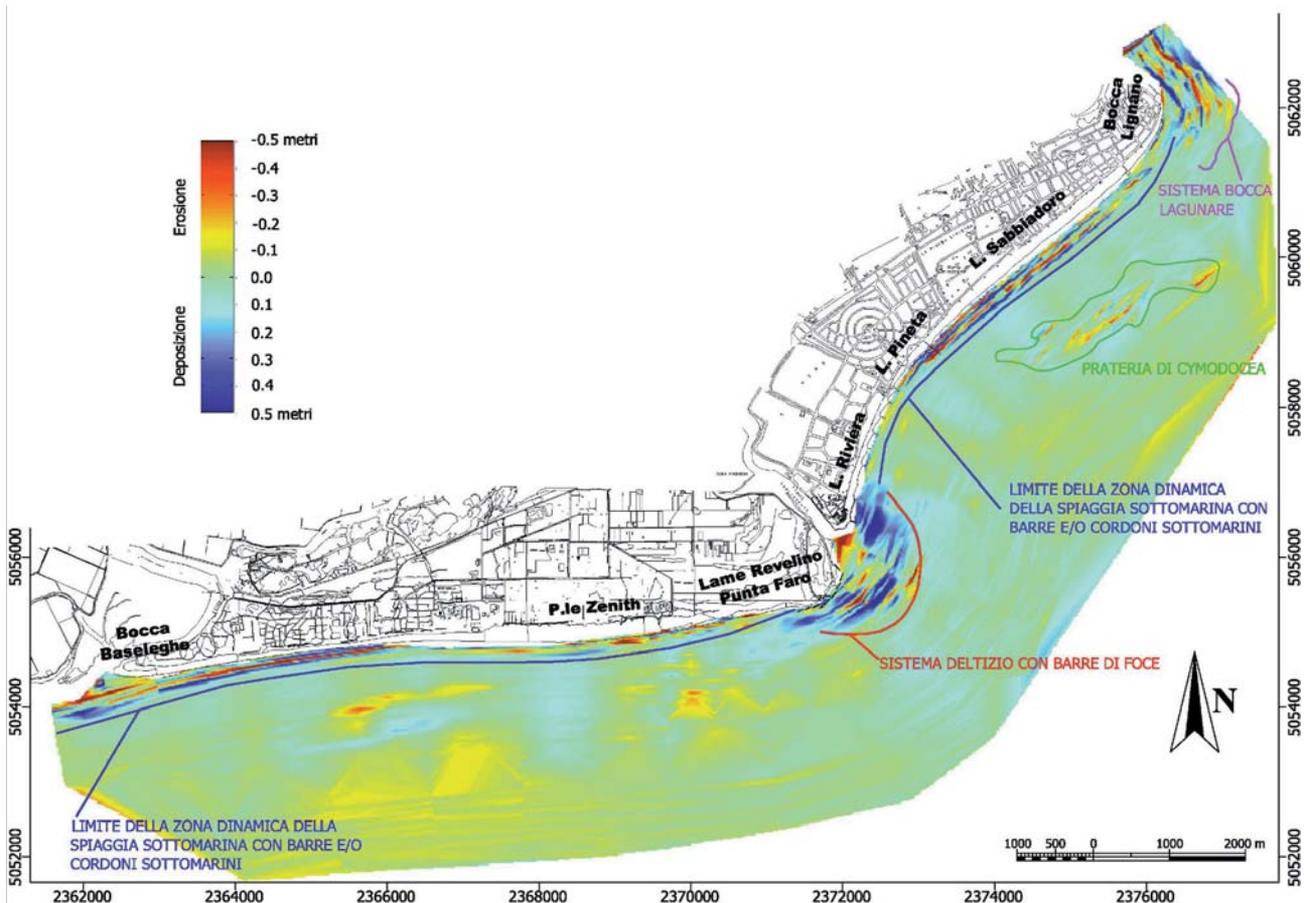


Fig. 7 - Variazione dello spessore dei sedimenti dei fondali risultante dai rilievi OGS 2002-2003.  
Variation of the sediment thickness as resulted from the 2003 OGS surveys.

sedimentari compresi tra 0,2 e 0,45 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. L'asportazione di materiale verso riva, viene tuttavia in buona parte compensata dalla deposizione al largo (0,13 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>).

Nell'area friulana la zona a barre e truogoli è molto sviluppata in corrispondenza di Lignano Sabbiaodoro e decresce fino alla quasi scomparsa verso Lignano Riviera e Pineta. Come è stato già evidenziato precedentemente, la spiaggia di Sabbiaodoro presenta, a lungo periodo, un carattere stabile tendente a periodi di progressione. Tale situazione è confermata anche a breve periodo dal confronto dei rilievi eseguiti e dalla conformazione stessa del fondale marino (terrazzo intertidale, zona a barre e truogoli, fondale sub - pianeggiante che si estende fino a 2 km dalla costa, ecc).

L'area di bocca lagunare (Bocca di Lignano), presenta accumuli sotto forma di depositi allungati parallelamente alla direzione di sviluppo del canale principale. Sulla base dei rilievi eseguiti non compaiono alcune evidenze macroscopiche di deficit o accumuli sedimentari in prossimità della bocca. Queste probabilmente potranno emergere solamente da un'analisi effettuata in più lungo periodo.

Comportamento diverso, denuncia il tratto di litorale che va da Lignano Riviera a Pineta; qui si osserva la quasi stabilità della zona, eccezion fatta, per le limitate aree d'approfondimento dei fondali (dell'ordine di 0,1 ÷ 0,2 m e quindi non significative, dati i limiti di

accuratezza dei rilievi), poste al piede dei pennelli presenti nell'area.

Nelle Tabelle I e II oltre ai bilanci volumetrici calcolati dal confronto dei rilievi OGS 2002 e 2003, viene riportata anche la tendenza evolutiva del litorale che emerge dal confronto dell'ultimo rilievo OGS 2003 con quelli del 1997 (litorale di Bibione) e della Regione Friuli Venezia Giulia (BRAMBATI, 1987 - spiagge di Lignano). In grassetto sono stati messi in evidenza i valori volumetrici che possono essere considerati meno influenzati dagli errori di misura e dunque considerati attendibili per un primo bilancio volumetrico del trasporto litorale. Nell'ultima colonna si sono riportati i confronti con le situazioni precedenti. In particolare, dai transetti eseguiti in prossimità della foce, emerge che l'apparato deltidio presenta un consistente incremento volumetrico. Questo dato è molto importante poiché questi accumuli possono essere utilizzati (dopo i controlli previsti per legge) per il ripascimento delle spiagge e, nel contempo, per liberare il passo marittimo d'accesso ai porti interni alla foce. Si è cercato pertanto di quantificare con la massima precisione possibile e nell'intervallo temporale esaminato, l'ammontare e la relativa stabilità di tale accumulo di sedimento. Per eseguire questa stima è stato utilizzato il programma *Surfer Version 8.00 Surface mapping system della Golden Software, Inc., Colorado*. Attraverso questo software è stato possibile

Tabella I - Variazioni volumetriche e tendenze evolutive dei fondali del delta del F. Tagliamento (ala orientale).  
*Volume variations and evolutive trends of Tagliamento River delta (eastern sector).*

Transetto	Deficit	Deposizione	Variazione volumetrica (m <sup>3</sup> / m) Rilievi OGS 2002-2003	Tendenza evolutiva risultante dal confronto dei profili OGS 2003 con quelli da BRAMBATI (1987)
Transetto L01		X	<b>+ 64,3</b>	Consistente ripascimento al largo Erosione sottocosta
Transetto L02		X	<b>+ 24,1</b>	Leggera tendenza al ripascimento al largo Erosione sottocosta
Transetto L03		X	<b>+ 274,7</b>	Ripascimento al largo Leggera tendenza all'erosione sottocosta
Transetto L04		X	<b>+ 197,3</b>	Ripascimento al largo Leggera tendenza all'erosione sottocosta
Transetto L05		X	<b>+ 63,9</b>	Stabile Leggero ripascimento sottocosta
Transetto L06	X		- 9,1	Stabile Leggero ripascimento sottocosta
Transetto L07		X	+ 9,3	Stabile Leggero ripascimento sottocosta
Transetto L08		X	+ 3,3	Ripascimento sottocosta Stabile con leggera tendenza all'erosione al largo
Transetto L09	X		<b>- 39,9</b>	Leggero ripascimento sottocosta Stabile con tendenza all'erosione al largo
Transetto L10	X		<b>- 18,8</b>	Stabile
Transetto L11	X		- 6,4	Stabile al largo Leggero ripascimento sottocosta
Transetto L12		X	<b>+ 57,6</b>	Stabile al largo Leggera tendenza all'erosione sottocosta
Transetto L13	X		- 7,9	Stabile Leggera tendenza all'erosione sottocosta
Transetto L14		X	<b>+ 17,3</b>	Stabile
Transetto L15		X	+ 6,6	Stabilità
Transetto L16		X	<b>+ 27,8</b>	---
Transetto L17		X	+ 7,4	---
Transetto L18		X	+ 3,1	---
Transetto L19	X		- 5,4	---
Transetto L20	X		- 1,1	---
Transetto L21		X	+ 5,4	Ripascimento sottocosta Stabilità al largo
Transetto L22		X	+ 7,5	---
Transetto L23		X	+ 14,1	---
Transetto L24	X		<b>- 18,0</b>	---
Transetto L25		X	+ 4,9	Stabilità sottocosta Leggera tendenza al ripascimento al largo
Transetto L26		X	+ 11,3	
Transetto L27		X	+ 7,9	---
Transetto L28		X	<b>+ 229,15</b>	---
Transetto L29	X		- 2,9	---
Transetto L30		X	+ 5,3	---

Tabella II - Variazioni volumetriche e tendenze evolutive dei fondali del delta del F. Tagliamento (ala occidentale).

*Volume variations and evolutive trends of Tagliamento River delta (western sector).*

Transetto	Deficit	Deposizione	Variazione volumetrica (m <sup>3</sup> / m) Rilievi OGS 2002-2003	Tendenza evolutiva risultante dal confronto dei profili OGS 2003 con quelli da ITALRILIEVI S.n.c (1997)
Transetto B01	X		- 74,3	---
Transetto B02		X	+ 156,3	---
Transetto B03		X	+ 79,9	---
Transetto B04		X	+ 74,3	Stabilità al largo Ripascimento sottocosta
Transetto B05		X	+ 82,8	Tendenza al ripascimento
Transetto B06		X	+ 100,0	Leggera tendenza all'erosione al largo Leggera tendenza all'erosione sottomiva
Transetto B07		X	+ 44,3	Erosione al largo Erosione sottocosta
Transetto B08		X	+ 11,2	Erosione al largo Erosione sottocosta
Transetto B09	X		- 3,3	Erosione al largo Erosione sottocosta
Transetto B10		X	+ 46,2	Erosione al largo Erosione sottocosta
Transetto B11	X		- 50,0	Erosione al largo Erosione sottocosta
Transetto B12		X	+ 34,6	Erosione al largo Erosione sottocosta
Transetto B13	X		- 48,6	---
Transetto B14	X		- 64,7	---
Transetto B15		X	+ 0,2	Erosione al largo Erosione sottocosta
Transetto B16		X	+ 13,3	Ripascimento sottomiva Leggera erosione al largo
Transetto B17	X		- 4,3	Ripascimento sottomiva Stabilità con tendenza al rinascimento al largo
Transetto B18	X		- 7,4	Ripascimento sottomiva Stabilità al largo
Transetto B19		X	+ 0,6	Ripascimento sottomiva Stabilità al largo
Transetto B20	X		- 14,9	Ripascimento sottomiva Stabilità al largo
Transetto B21		X	+ 45,4	Leggero ripascimento sottomiva Stabilità al largo
Transetto B22		X	+ 11,0	Leggero ripascimento sottomiva Stabilità centrale ed erosione al largo
Transetto B23	X		- 71,8	Ripascimento sottomiva Stabilità con tendenza al rinascimento al largo
Transetto B24		X	- 18,8	Ripascimento sottomiva Stabilità con tendenza all'erosione al largo
Transetto B25		X	+ 12,3	Ripascimento sottomiva Stabilità con tendenza all'erosione al largo
Transetto B26		X	+ 0,6	Ripascimento sottomiva Stabilità al largo
Transetto B27		X	+ 11,8	Ripascimento sottomiva Stabilità al largo
Transetto B28		X	+ 4,6	Ripascimento sottomiva Erosione al largo
Transetto B29		X	+ 28,4	---
Transetto B30		X	+ 22,5	Leggero ripascimento sottomiva Stabilità centrale ed erosione al largo
Transetto B31		X	+ 8,5	Ripascimento sottomiva Stabilità al largo

estrarre i due DEM (*Digital Elevation Model*), inerenti l'area deltizia per i due rilievi batimetrici OGS 2002 e 2003. Successivamente, sempre con lo stesso software, sono stati creati con il metodo *Triangular with linear interpolation*, altrettanti GRID a maglie quadrate che rappresentano la superficie reale basata sulle informazioni reali disponibili (rilievo eseguito). La differenza fra le due superfici così ottenute ha permesso di raffigurare le variazioni di spessore subita dal litorale (Fig. 8). Dal confronto emerge che in prossimità della foce, le aree soggette a variazioni dei fondali superiori all'errore stimato sono pari a  $5.809.408 \text{ m}^2$  con zone in accumulo pari a  $4.770.317 \text{ m}^2$  e altre in approfondimento pari a  $1.039.091 \text{ m}^2$ . Il volume conseguente è risultato essere pari a ca.  $570.000 \text{ m}^3$  (volume positivo), contro uno di ca.  $75.000 \text{ m}^3$  (perdite), con un bilancio positivo di ca.  $495.000 \text{ m}^3$ .

Tenendo presente che l'apporto solido complessivo (dalle ghiaie alle peliti) stimato per il Tagliamento (BRAMBATI; 1987) è di circa  $1.300.000 \text{ m}^3/\text{anno}$  e che gran parte del materiale è costituito da depositi fini (ca. 70 %) ne deriverebbe che complessivamente in un anno transitano via foce  $390.000 \text{ m}^3$  di sedimenti grossolani. Secondo i calcoli precedenti (accrescimento riscontrato di circa  $494.274 \text{ m}^3$ ), diventa palese che all'*input* fluviale si deve aggiungere anche quello del

trasporto lungo riva catturato dal pennello liquido del fiume. Sta di fatto che sabbie si accumulano nell'area di foce in lassi temporali a scala annuale. Rimane da appurare adesso se questi accumuli permangono nel tempo. Per valutare questo si sono presi in considerazione i dati pregressi, editi da BRAMBATI (1987) sulla base del confronto dei rilievi del 1969 con quelli 1985. L'Autore, stimando un valore medio su di un lungo periodo e in anni non molto vicini ad oggi, registra una situazione opposta a quella da noi riscontrata, con un deficit di  $177.875 \text{ m}^3$  di depositi distribuito su una superficie di  $1.060.000 \text{ m}^2$  (ca. 17 cm su metro quadrato).

Visti i risultati emersi operando a scala pluriennale, si sono messi a confronto i rilievi OGS 2003 con quelli ricavati dal CNR nel 1969 (riportati da BRAMBATI, 1987) e con quelli del 1985 dello stesso Autore. Si specifica che per uniformità, è stata preventivamente eseguita, con il procedimento di confronto fra GRID prima esposto (utilizzando il *Software Surfer 8*), la comparazione fra i rilievi CNR 1969 con quelli del 1985. Il raffronto eseguito con questo metodo ha mostrato un deficit sedimentario leggermente superiore rispetto a quello prospettato dall'Autore (Fig. 9 A). Anche se i valori assumono moduli leggermente diversi ( $-177.875 \text{ m}^3$  contro i  $-195.728 \text{ m}^3$ ) restano comunque confermate

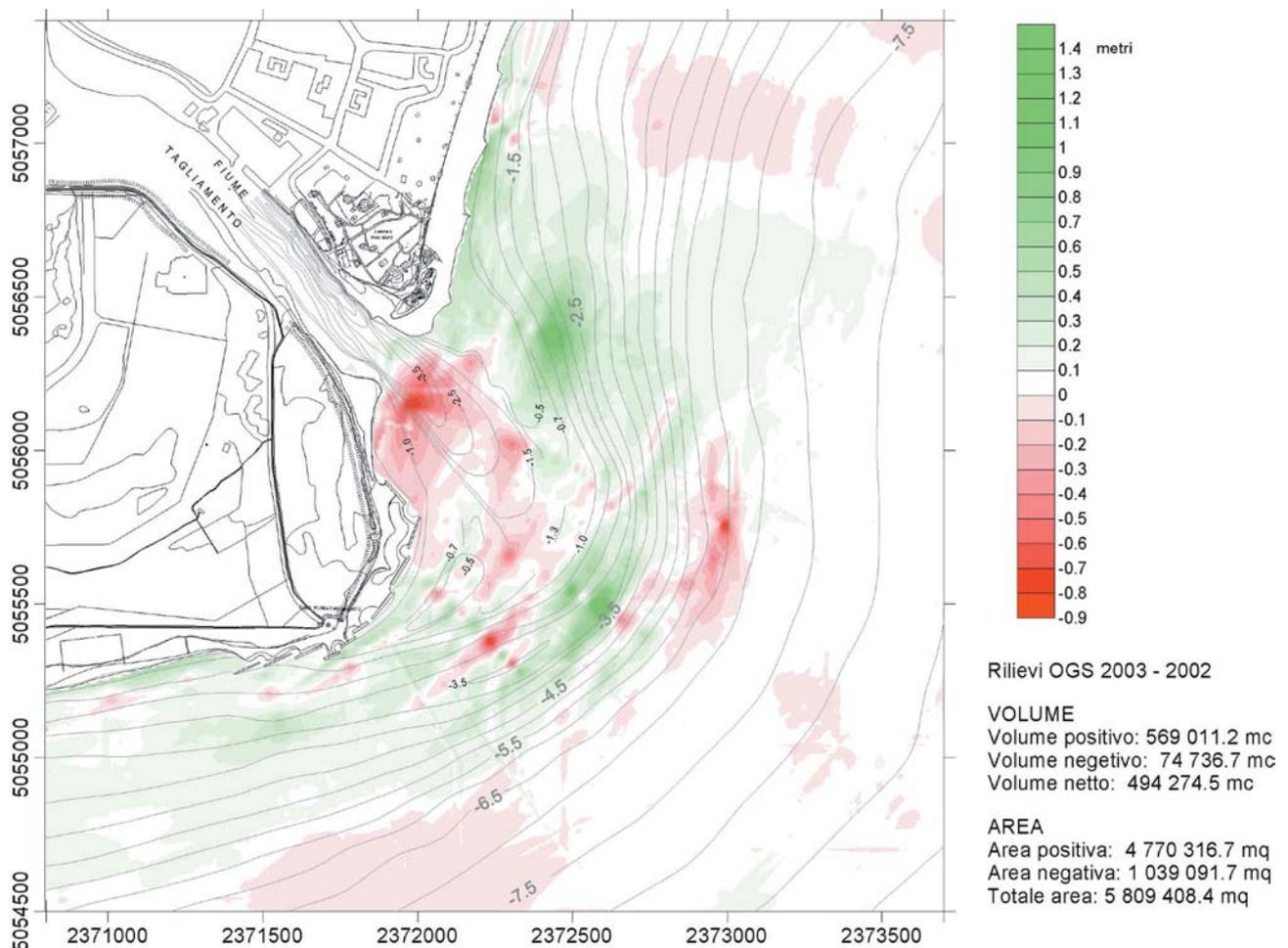


Fig. 8 - Variazioni dello spessore dei sedimenti nell'area deltizia (rilievi OGS 2002-2003) e calcolo dei volumi.

Variation of the sediment thickness in the delta area (2002-2003 OGS surveys) and volume computation.

le aree interessate dai maggiori cambiamenti (erosioni), che si manifestano sul fronte deltizio. I bassi fondali prossimi al litorale, mostrano invece un'abbondante deposizione di sabbie, valutabili in  $1,0 \div 1,5$  m di spessore nell'ala occidentale, e valori leggermente inferiori ( $0,4 \div 1,0$  m) nel lobo orientale.

Va comunque sottolineato che anche se il bilancio volumetrico netto dell'intero paraggio risulta negativo ( $195.729 \text{ m}^3$ ), le spiagge che bordano il delta manifestano processi di accumulo (non vale lo stesso, come abbiamo già osservato precedentemente, per quelle prossime al Faro di Punta Tagliamento).

Completamente diversa risulta invece essere la situazione nei 18 anni seguenti (dal 1985 al 2003 - Fig. 9 B); le aree in accumulo perdono sedimenti a favore di quelle del fronte deltizio. Nello specifico i maggiori accumuli si manifestano fra le batimetriche 3 e 5 sul *delta front* (spessore medio 1,5 m) con erosioni molto evidenti a ridosso del pennello di foce con al lato opposto, un forte arretramento della linea di costa e la creazione di un canale di sovraescavazione (spessore dei sedimenti asportati mediamente pari a 1,5 m) che si posiziona al piede delle nuove barriere frangiflutti realizzate. Il bilancio di materiale indica che le aree soggette a variazioni sono pari a ca.  $1.272.000 \text{ m}^2$ , delle quali, in accumulo  $899.000 \text{ m}^2$  e in approfondimento  $373.000 \text{ m}^2$ . Il volume conseguente è risultato essere di ca.  $619.000 \text{ m}^3$  (volume positivo), contro  $177.000 \text{ m}^3$  (perdite), con un bilancio netto positivo di ca.  $442.000 \text{ m}^3$ .

Per completare l'analisi è stato realizzato il confronto dei fondali su un intervallo temporale di 34 anni (rilievi CNR 1969 - OGS 2003; Fig. 9 C). Lo scenario emerso mostra un carattere stabile del sistema tendenzialmente volto alla progressione. Il bilancio volumetrico netto è di ca.  $242.000 \text{ m}^3$  (corrispondente ad un volume medio annuo pari a  $7100 \text{ m}^3/\text{anno}$ ), con un volume positivo di  $397.000 \text{ m}^3$  (distribuito su di una superficie di  $847.000 \text{ m}^2$ ) mentre quello negativo risulta di ca.  $155.000 \text{ m}^3$  ( $439.000 \text{ m}^2$ ). In linea generale, la distribuzione di queste aree risulta abbastanza conforme a quella evidenziate nello studio a breve termine (OGS 2002-2003) e nell'evoluzione deltizia avvenuta dopo il 1985.

In sintesi, le variazioni da noi riscontrate trovano un riscontro con le situazioni del passato: emerge dunque un incremento del materasso sedimentario sul fronte deltizio, con un predominante *input* proveniente da Est che *by-passa* il pennello di foce e importanti arretramenti in

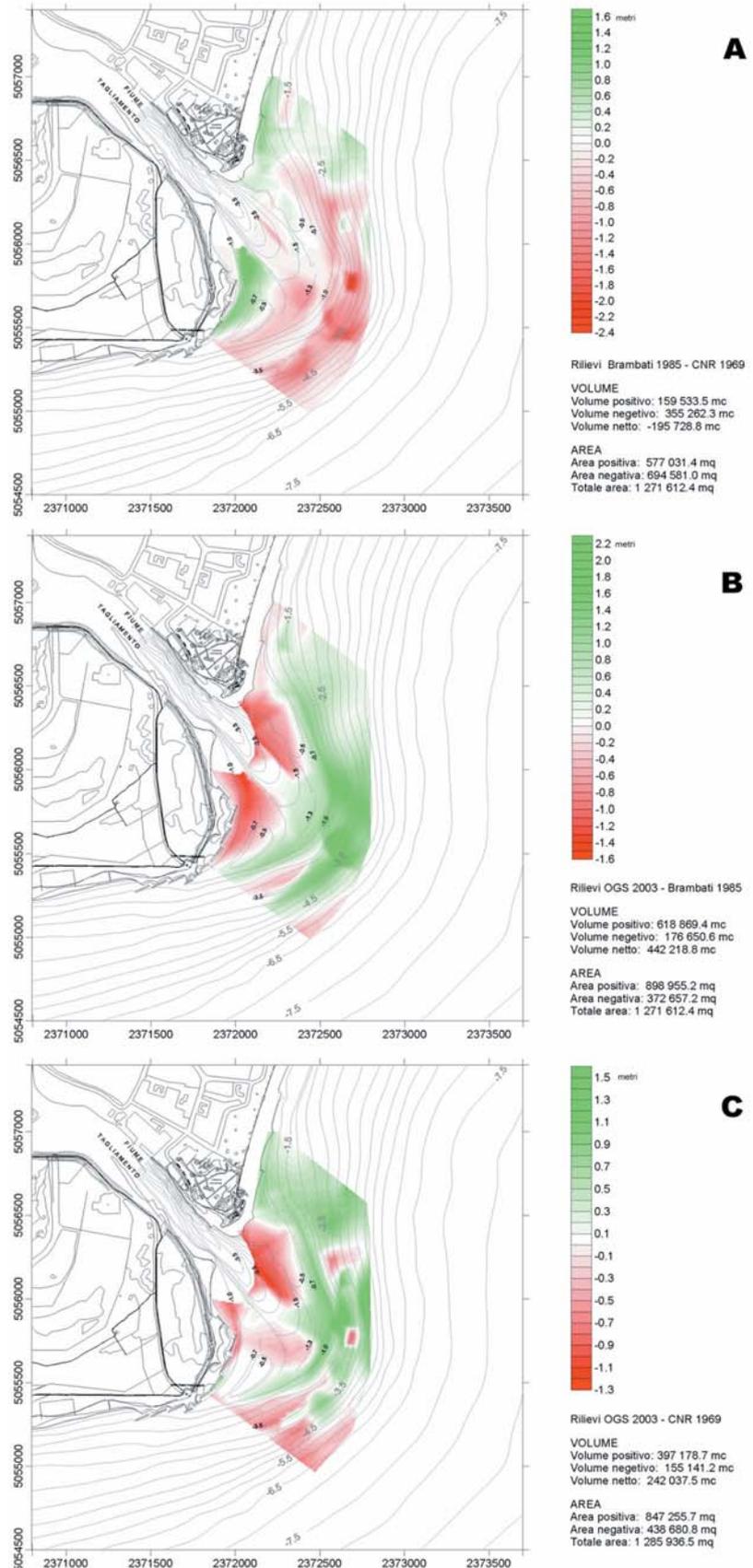


Fig. 9 - Variazioni dello spessore dei sedimenti nell'area deltizia e calcolo dei volumi; A - Situazione 1969-1985; B - Situazione 1985-2003; C - Situazione 1969-2003. *Variation of the sediment thickness in the delta area and volume computation; A-1969-1985 situation; B-1985-2003 situation; C-1969-2003 situation.*

corrispondenza dello sbocco a mare del fiume e delle aree costiere immediatamente connesse ad esso. Questo *trend* avviene attraverso periodi di scarso apporto solido (1969-1985; BRAMBATI 1987), seguito da fasi di stabilità più o meno lunghe, alternate a brevi periodi di forte apporto (2002-2003). In questo meccanismo risulta di fondamentale importanza l'azione disperdente operata dal moto ondoso e dalle correnti litoranee che ridistribuiscono in diverse settori, i nuovi sedimenti che entrano nel bilancio del litorale.

Dal confronto dei rilievi OGS 2002-2003, è possibile definire che:

- i cambiamenti maggiori della spiaggia sottomarina si riscontrano in corrispondenza della zona dinamica a barre e truogoli e sono determinati dalla traslazione delle barre sabbiose da terra verso mare;
- nel settore più profondo della spiaggia sottomarina le variazioni sono minime ad eccezione di due aree, localizzate a largo della costa veneta (ad una distanza compresa tra 800 e 1000 m dalla linea di riva e profondità variabile tra 5,0 e 7,0 m) e poste a cavallo di un gradino morfologico;
- in corrispondenza delle bocche lagunari e della foce si registrano traslazioni di sedimento trasversalmente al litorale;
- nell'area di foce del Tagliamento si sono individuate due zone in accumulo, una antistante il pennello orientale (estensione: 52.000 m<sup>2</sup>; spessore minimo: 0,2÷0,3 m; spessore massimo: 1,4 m, volume stimato: 46.000 m<sup>3</sup>) e l'altra immediatamente a fronte della foce (estensione: 62.000 m<sup>2</sup>; spessore minimo: 0,2 m; spessore massimo: 1,4 m, volume stimato: 48.000 m<sup>3</sup>);
- complessivamente, pur registrando locali perdite di fondale in corrispondenza dell'area prettamente di foce, l'area deltizia presenta un bilancio volumetrico positivo pari a ca. 494.000 m<sup>3</sup>;
- il confronto con le variazioni subite dal litorale risultanti dai rilievi precedenti (Bibione - ITALRILIEVI S.n.c., 1997; Lignano - BRAMBATI, 1987) ha permesso di valutare le tendenze evolutive delle spiagge.

## 7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I risultati ottenuti dall'analisi dei profili batimetrici della spiaggia intertidale e sottomarina, uniti alle osservazioni dirette condotte sulla spiaggia emersa e quelli più generali dedotti dalla prospezione *Lidar*, permettono di tratteggiare una prima situazione morfodinamica delle spiagge del delta tilaventino e di tracciare una sua zonizzazione in tratti di litorale soggetti a processi erosivi, aree tendenzialmente stabili o in fase di leggera progressione. Per alcuni di questi tratti, poi, è stato possibile valutare quantitativamente le variazioni registrate in un ciclo annuale (2002-2003) e, utilizzando dati pregressi, in due segmenti pluriennali (1969 - 2003 e 1985 - 2003).

Per quanto attiene alla spiaggia sottomarina emerge che, salvo rare eccezioni, questa rimane generalmente stabile nel periodo considerato salvo in corrispondenza delle bocche lagunari e alla foce del Tagliamento e di due zone dell'ala occidentale del delta. Segnatamente, incrementi e decrementi dei depositi di fondo diventano sensibili in corrispondenza

della foce del Tagliamento e delle bocche lagunari di Lignano e Porto Baseleghe. Qui i pennelli liquidi delle acque fluviali e lagunari deviano verso il largo i depositi che transitano in queste zone, incrementando così i fondali immediatamente prospicienti. Diversa è invece la situazione riscontrata al largo di Bibione (tra 3,0 e 6,0 m di profondità) dove in un'area piuttosto estesa si rinviene un accumulo di sedimenti che provengono dall'intensa erosione costiera delle spiagge immediatamente più ad Est (litorale di Bibione - Lame di Revelino e Punta Faro). La relativa stabilità di quest'accumulo negli anni di rilievo fa supporre che i depositi una volta abbandonati in quest'area dagli agenti che hanno determinato l'erosione costiera, tendano a stabilizzarsi e permanere nel tempo, non venendo più ripresi dall'azione di dispersione del moto ondoso. Ciò determina una condizione che, almeno in prima ipotesi e data la loro granulometria si prospetta ottimale per un utilizzo come cava di prestito di questi accumuli da destinare ad opportune ricariche artificiali della spiaggia di Pineta Punta Faro - Lame di Revelino, soggetta ad intensa erosione. Altri fattori che inducono a questa ipotesi di intervento è la presunta affinità granulometrica dei sedimenti che in sostanza sono quelli erosi dal litorale che si vuol ricomporre e anche la limitata distanza fra area di presa e spiaggia da risanare. E' evidente, comunque, che quest'operazione di riequilibrio del litorale, se attuata, deve essere corredata da opportune opere di ritenuta di questo materiale che viene riportato artificialmente alle condizioni iniziali.

Per quanto attiene, invece, le aree all'interno della zona a barre e truogoli e quelle intertidali, emerge che i tratti soggetti a maggiori cambiamenti sono:

- quelli contraddistinti dalla migrazione delle barre nell'ambito dell'area più dinamica della spiaggia sottomarina;
- quelli in continua erosione (o progressione) determinata da fattori naturali e/o dalle opere di difesa che si sono stratificate lungo il litorale;
- la foce del Tagliamento e le bocche lagunari.

I cambiamenti volumetrici nell'area delle barre e truogoli sono determinati quasi sempre da semplici traslazioni verso mare o verso terra delle barre e non da reali impoverimenti complessivi della zona dinamica; in altre parole le perdite corrispondono quantitativamente agli acquisti con un bilancio complessivamente in pareggio. In generale, come dimostrato da più lavori, durante il periodo estivo le barre si trovano in posizione più ravvicinata alla linea di costa e viceversa durante quello invernale.

Differente è invece la situazione nell'area della spiaggia intertidale dove erosioni e progressioni della linea di riva e dei fondali del terrazzo di bassa marea sono causate da fattori naturali a volte agevolati, indotti e altre volte, vanamente ostacolati dalle opere di difesa marina. Così nell'ala orientale del delta, nei litorali connessi alla bocca lagunare di Lignano, si delinea una leggera instabilità delle spiagge anche se difese da una serie di pennelli impermeabili ed opere aderenti. Qui le maggiori variazioni degli arenili sono condizionate dalle continue modificazioni interne della bocca lagunare (argini marginali e canali interni) che si ripercuotono sui lidi adiacenti e dall'altro, dalla deviazione verso il largo del trasporto litorale attuato dal suo pennello liquido. La porzione centrale del litorale di Lignano mostra un

carattere tipicamente stabile con fasi di progressione naturale, confermata anche a lungo termine. Il tipico profilo di spiaggia mostra un'estesa parte emersa, come anche quella intertidale che si raccorda dolcemente ad una sviluppata zona a barre e truogoli. A questa, verso mare, succede un fondale sub -pianeggiante che si unisce al protendimento sabbioso dell'*ebb - tidal* delta di Lignano. Più ad Ovest, le spiagge di Pineta - Lungomare Adriatico, manifestano anch'esse una situazione tendenzialmente stabile, con temporanee condizioni regressive determinate dalla carenza di apporti sedimentari provenienti da Est, secondo il trasporto prevalente, ma anche da Ovest, a causa dell'effetto schermante di diverse opere di difesa che impediscono l'arrivo di nuovi sedimenti dal Tagliamento. La situazione più critica, comunque, si registra in corrispondenza delle spiagge di Riviera, difese vanamente da una serie di pennelli che hanno solo in parte mitigato l'erosione in atto da tempo. In questo tratto di litorale è evidente l'assenza di nuovi arrivi di sedimenti da Ovest, come da Est e il prevalente trasporto perpendicolare alla spiaggia, in parte determinato anche da una convergenza del moto ondoso. Per tutti questi motivi questo tratto di litorale necessita, quasi obbligatoriamente, di un'alimentazione forzata, con ripascimenti di opportuni depositi prelevati in aree prossimali e il loro contenimento con idonee opere marittime. Stante questa situazione, nel dettaglio si segnala che i lunghi pennelli di sbarramento e la loro serie ravvicinata, più che una cattura dei depositi che transitano lungo riva hanno solamente prodotto una parziale stabilizzazione delle sabbie all'interno delle celle tra due pennelli contigui. Nel versante opposto, nell'ala occidentale del delta, dopo la zona prettamente di foce, si registra una situazione abbastanza simile a quella prima riscontrata: il litorale più orientale di Bibione evidenzia una sensibile instabilità che ha portato recentemente, alla realizzazione di tre pennelli permeabili al fine di fermare la situazione erosiva in atto. L'aggetto e la spaziatura di queste opere, comunque, non appaiono le più indicate date le reali caratteristiche di trasporto di questo tratto di litorale. Condizioni evolutive distinte esibiscono la parte centrale e occidentale del litorale di Bibione, contrassegnate essenzialmente da una situazione stabile volta alla progressione. Nello specifico, i caratteri peculiari del tratto centrale dell'ala deltizia (la configurazione convessa della linea di riva, l'estensione e la pendenza della spiaggia emersa, l'ampiezza della zona intertidale), confermano la stabilità della stessa e suggeriscono un carattere tendenzialmente deposizionale. Proseguendo ancora verso l'estremità del delta (Bocca di Baseleghe), la spiaggia, dopo una prima riduzione dell'ampiezza (non determinata da una regressione in quanto stabile nel tempo considerato), palesa un notevole sviluppo nella parte intertidale ed uno spiccato allungamento verso Ovest. Ciò determina una progressiva occlusione e un trascinarsi in questa direzione, della freccia litorale dell'ala occidentale del delta. Anche la spiaggia più al largo confermano questa tendenza, mostrando le tipiche *bedforms*, legate al moto ondoso, che si generano nelle zone sub - pianeggianti prossime alle bocche lagunari.

La situazione più complessa dell'intero litorale si registra alla foce del Tagliamento e alle sue sponde dove una serie di opere di difesa parallele e trasversali

realizzate alla destra a partire dal 1966, probabilmente con finalità differenti, sono state costruite al fine di contrastare la naturale evoluzione regressiva del tratto apicale del delta. Senza entrare nel merito all'attuale funzionalità di queste opere, si vuol qui sottolineare che se hanno bloccato, in parte, o generalmente rallentato i processi erosivi in atto da tempo, hanno però determinato condizioni di instabilità nelle aree immediatamente adiacenti. A ciò si aggiunga l'impatto visivo di queste costruzioni antropiche (barriere frangiflutti in massi) che contrasta con l'equilibrio delle forme naturali, tipico di una spiaggia e a maggior ragione in un delta di un fiume che viene considerato uno dei più naturali d'Europa. Nel versante opposto, il litorale viene pesantemente condizionato da pennello di foce (eseguito nel 1963) e recentemente accorciato. Complessivamente nell'area focale si assiste ad un progressivo arretramento della spiaggia emersa (parte occidentale) con messa a nudo dei depositi di lama sottostanti, alla quasi scomparsa del terrazzo di bassa marea, all'assottigliamento della zona a barre e truogoli, sostenuta da un'unica barra. Le scogliere variamente sagomate, i tubi tipo Longard, riempiti di sabbia, le continue alimentazioni artificiali della spiaggia con materiale scavato dalla foce (ca. 24.000 m<sup>3</sup> di sedimenti nel solo anno 2005, con previsioni future di ca. 50.000 m<sup>3</sup> ogni anno), hanno solo in parte tamponato l'erosione apicale del delta che, in pochi anni ha portato alla distruzione di buona parte delle splendide dune litorali. Fermo restando che questo processo di adattamento della foce alle nuove condizioni ambientali non sembra essersi concluso, e quindi che la vigente situazione può perdurare nel tempo e d'altro canto, permane la necessità di garantire il passo marittimo alla foce di questo importante fiume, si ritiene che senza risagomare e approfondire esageratamente l'alveo, con prevedibili conseguenze sulle sponde e sull'asta terminale del fiume, i materiali idonei a bilanciare l'erosione costiera possono essere ricercati negli accumuli rinvenuti nell'area a ridosso del delta. Si ricorda che complessivamente alla foce, in un anno, si registra un bilancio volumetrico positivo di ca. 490.000 m<sup>3</sup> di sedimenti di cui circa 90.000 nelle aree di accumulo individuate in questo lavoro. L'asportazione di limitati spessori (ca. 0,5 m) da questi accumuli dovrebbe essere ricompensata a breve termine dall'appurata ricarica naturale, determinata dalla dinamica evolutiva della parte frontale del delta. Il prelievo di questo materiale, comunque, deve essere inteso come una semplice integrazione di quello ricavato dalla escavazione del letto del fiume (valutato in circa 68.000 m<sup>3</sup> e 166.000 m<sup>3</sup> per raggiungere rispettivamente le profondità di 2,5 e 3,5 m ed una larghezza del canale di 100 -150 m).

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Comune di Lignano Sabbiadoro e di San Michele al Tagliamento per aver finanziato lo studio dell'OGS "Indagini meteo-oceanografiche, batimetriche, sedimentologiche e morfologiche finalizzate allo studio dei fenomeni di dinamica costiera lungo i litorali di Lignano Sabbiadoro e di Bibione" e per la loro costante partecipazione in fase di realizzazione dello stesso.

Un ringraziamento va inoltre alla Bibione Spiaggia S.r.l., nella persona del geom. G. BITTOLOBON e dei suoi

collaboratori che hanno fornito un fondamentale supporto logistico durante le fasi di acquisizione dei dati e messo a nostra disposizione tutti gli studi eseguiti in passato.

Si ringraziano inoltre il personale dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS di Trieste che, a vario titolo, ha offerto contributi utili alla stesura del presente lavoro: un caldo ringraziamento va a M. DEPONTE, R. ROMEO e N. ZANETTE (Gruppo GEA), F. DONDA (gruppo GEPA), R. NAIR (gruppo CTO) e P. PAGANINI (gruppo CARST).

Un ringraziamento profondamente sentito va all'anonimo revisore della Rivista che con i suoi puntuali, motivati e molto pertinenti suggerimenti ha migliorato di molto l'articolo inviato alla stampa.

## BIBLIOGRAFIA

- ASHLEY G. M., SYMPOSIUM CHAIRPERSON (1990) - *Classification of large-scale subaqueous bedforms: A new look at an old problem*. Jour. of Sedim. Petrol., 60, 1, 160-172.
- BRAMBATI A. (1970) - *Provenienza, trasporto e accumulo dei sedimenti recenti nelle lagune di Marano e di Grado e nei litorali tra il F. Isonzo e Tagliamento*. Mem. Soc. Geol. Ital., 9 (4), 281-329.
- BRAMBATI A. (1985) - *Morfologia del delta del f. Tagliamento e delle sue spiagge*. In "Raccontare Lignano", Benvenuto Edit.
- BRAMBATI A. (1987) - *Studio sedimentologico e marittimo-costiero dei litorali del Friuli Venezia Giulia*. Servizio Idraulica della Regione Friuli Venezia Giulia, pp. 67.
- BRAMBATI A., CATANI G., MAROCCO R. (1977) - *Indagini sedimentologiche sulla spiaggia sottomarina dell'Adriatico settentrionale tra i fiumi Brenta e Tagliamento*. Boll. Soc. Geol. It., 96, 69-86.
- BRAMBATI A., CATANI G., LENARDON G., MAROCCO R. (1982) - *Rilievi sul litorale da Monfalcone alla foce dell'Adige*. C.N.R., P.F. "Conservazione Suolo", S.P. "Dinamica dei litorali". Tipografia Nazionale.
- BRAMBATI A., VENZO G.A. (1967) - *Recent sedimentation in the Northern Adriatic Sea between Venice and Trieste*. St. Trent. Sc. Nat., Sez. A, 44(2), 479-493.
- CAPOBIANCO M., HAMM L., SILVA P. (1999) - *Interventi di ripascimento nelle coste europee: ricadute a livello italiano*. Studi Costieri, 1, 3-12.
- CAROBENE L. (1978) - *Analisi morfologica quantitativa delle spiagge dell'Alto Adriatico tra Monfalcone e Lignano*. Boll. Soc. Geol. It., 97, 131-164.
- CAROBENE L., BRAMBATI A. (1975) - *Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge*. Boll. Soc. Geol. It., 94, 479-493.
- CATANI G., LENARDON G., MAROCCO R., TUNIS G. (1982) - *Rapporto sulle ricerche morfologiche e sedimentologiche effettuate nel 1976 nella spiaggia modello di Valle Vecchia (Venezia)*. Boll. Soc. Adriat. Sc., LXVI, 73-103.
- CATANI G., MAROCCO R. (1976) - *Considerazioni sulle caratteristiche mareografiche e anemografiche a San Nicolò di Lido, Runta Tagliamento e Grado*. Quaderni della Ricerca Scientifica, 92, 21-25.
- CATANI G., MAROCCO R., BRAMBATI A., CAROBENE L. & LENARDON G. (1978) - *Indagini sulle cause dell'erosione nel tratto orientale del litorale di Valle Vecchia (Caorle, Adriatico settentrionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 19, 399-405.
- DE GIROLAMO P., CECCONI G., NOLI A., MARETTO G.P., CONTINI P., (1999) - *Monitoraggio della spiaggia di Cavallino*. Studi Costieri, 1, 13-25.
- FONTOLAN G. & SARTORI DI BORGORICCO M. (2000) - *Caratteri morfodinamici e sedimentologici della bocca lagunare di S. Andrea (Laguna di Marano)*. Estratto da: *La ricerca scientifica per Venezia* Vol. II, Tomo II, 983-991.
- FONTOLAN G. (2004) - *La fascia costiera, Capitolo 4*. XI. Estratto da: *Geomorfologia della provincia di Venezia (Note illustrative della Carta geomorfologica della provincia di Venezia)*. Esedra Edit., pp. 514.
- GORDINI E., MAROCCO R. & VIO E. (2002) - *Stratigrafia del sottosuolo della "Trezza Grande" (Golfo di Trieste, Adriatico settentrionale)*. Gortania, 24, 31-63.
- GORDINI E., CARESSA S., MAROCCO R. (2003) - *Nuova carta morfo-sedimentologica del Golfo di Trieste (da Punta Tagliamento alla foce dell'Isonzo)*. GORTANIA, 25, 5-30.
- GORDINI E., MAROCCO R., TUNIS G., RAMELLA R. (2004) - *I depositi cementati del fondale del Golfo di Trieste (Adriatico Settentrionale): Distribuzione areale, caratteri geomorfologici e indagini acustiche ad alta risoluzione*. Il Quaternario, 17 (2/2), 555-563.
- HAYES M.O. (1980) - *General morphology and sediment patterns in tidal inlets*. Sed. Geology, 26, 139-156.
- KING C.A.M. (1972) - *Beaches and coasts*, (2nd ed). Edward Arnold, London, pp. 570.
- MAROCCO R. (1988) - *Considerazioni sedimentologiche sui sondaggi S19 e S20 (Delta del F. Tagliamento)*. Gortania, 10, 101-120.
- MAROCCO R. (1989) - *Evoluzione quaternaria della laguna di Marano (Friuli - Venezia Giulia)*. Il Quaternario, 2, 125-137.
- MAROCCO R. (1991) - *Evoluzione tardopleistocenica-olocenica del delta del F. Tagliamento e delle lagune di Marano e Grado, (Golfo di Trieste)*. Il Quaternario, 4(1b), 223-232.
- MAROCCO R., PESSINA M. (2000) - *Il rischio litorale nell'area circumlagunare del Friuli - Venezia Giulia*. Gortania, 17, 5-35.
- PASSEGA R. (1964) - *Grain size representation by CM patterns as a geological tool*. Journ. Sed. Petr. 34, 830-847.
- VISCHER G. S. (1969) - *Grain size distribution and depositional processes*. Journ. Sed. Petr. 39, 1074-1106.
- RAMELLA R., VIEZZOLI D., GORDINI E., CODIGLIA R., ROMEO R., DEPONTE M. (2004) - *Indagini meteo-oceanografiche, batimetriche, sedimentologiche e morfologiche finalizzate allo studio dei fenomeni di dinamica costiera lungo i litorali di Lignano Sabbiadoro e di Bibione*. Istit. Naz. di Oceanogr. e di Geofis. Sperim. Di Trieste. Rel-28/2004 OGA - 8.
- ZUNICA M. (1971) - *Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane - Le spiagge del Veneto*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Tipografia Antoniana, Padova. pp. 141.

Ms. ricevuto il 17 gennaio 2006  
Testo definitivo ricevuto il 31 maggio 2006

Ms. received: January 17, 2006  
Final text received: May 31, 2006

