

Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna

Andrea Atzeni

Facoltà di Ingegneria. D. I. T. Idraulica. Piazza d'Armi, Cagliari. aatzeni@unica.it

Riassunto

Con l'ausilio del fattore di flusso di energia netto medio annuo, ottenuto sulla base dei rilievi ondometrici della boa di Alghero, nella costa occidentale della Sardegna sono state individuate sei unità fisiografiche ed esaminate le morfologie di alcune delle più importanti spiagge di questa costa. I casi esaminati hanno messo in evidenza l'importanza del flusso netto medio annuo nello studio della morfologia delle spiagge ad arco simmetriche e asimmetriche e nello studio della evoluzione dei cordoni litoranei.

Parole chiave: Flusso netto annuo, moto ondoso persistente, spiagge simmetriche, spiagge asimmetriche, cordoni litoranei, stabilità delle linee di riva.

Abstract

By the net mean annual energy flux factor, calculated using of waves data base recorded at the Alghero buoy, six physiographic units are identified in the west Coast of Sardinia and the morphology of many of the most important beaches of this coast are examined. The importance of the longshore energy flux factor in studying the beaches morphology is evident, both in the case of curved beaches and barrier beaches.

Keywords: *energy flux factor, persistent wave motion, curved beaches, barrier beaches, shore line stability.*

Introduzione

Con lo scopo di meglio conoscere il regime dei litorali e acquisire elementi utili per una oculata scelta degli interventi di difesa e di riequilibrio dei litorali che continuamente si rendono necessari, da alcuni decenni anche l'ingegneria costiera ha dedicato la sua attenzione alla geomorfologia. Bird (1984) definisce la geomorfologia costiera come quella disciplina che studia la forma delle coste, la loro evoluzione ed i cambiamenti in atto. I geologi hanno fatto numerose classificazioni delle coste, basandosi fondamentalmente sulla ricerca della loro genesi e sugli effetti delle ingressioni e regressioni marine, ma il primo a riconoscere il fondamentale effetto dell'azione del moto ondoso sulla evoluzione delle coste è stato Shepard (1937). In seguito sono stati messi in evidenza i differenti effetti delle onde di mare vivo e di mare morto e della loro direzione di arrivo (Davies 1958, 1964). Attualmente risulta essere un fatto ormai acquisito il concetto che la forma della costa sia il frutto dell'equilibrio dinamico dipendente dalla sua litologia e dall'azione del moto ondoso che la sollecita. Le litologie più sensibili all'azione del moto ondoso sono quelle costituite da sedimenti sciolti siano essi ciottolosi, sabbiosi o limosi. Le rive dei corsi d'acqua e delle coste occupate da sedimenti sciolti sono comunemente note con il nome di spiagge che, dal punto di vista ingegneristico, possono

essere considerate alla stregua delle strutture flessibili, naturali o artificiali. Queste strutture hanno la capacità di assorbire l'energia delle correnti fluviali o delle onde marine adattando la loro forma alla sollecitazione idrodinamica.

Se le sollecitazioni del moto ondoso si ripetono incessantemente con la stessa intensità e direzione interessando esclusivamente sedimenti sciolti, prescindendo dalla modificazione e riduzione dei granuli, la spiaggia costiera evolve verso una forma di equilibrio stabile che, una volta raggiunto, si conserva nel tempo. I regimi di moto ondoso uniforme sono una astrazione, ma in natura esistono circostanze che si avvicinano a queste condizioni. Infatti il moto ondoso è prodotto dalle tempeste di vento dovute a perturbazioni cicloniche i cui percorsi si ripetono con una certa regolarità nel corso dell'anno e, quindi, tali da generare condizioni di moto ondoso che si dirige verso le coste secondo persistenti direzioni e intensità. Questo accade spesso negli oceani le cui tempeste producono condizioni di moto ondoso, che spesso raggiunge le coste più lontane sotto forma di mare morto, la cui direzione e intensità sono costanti, ma si verifica anche nella parte del Mediterraneo ove domina il regime dei venti del quarto quadrante (Maestrale) da cui ha origine un moto ondoso di forte intensità che produce sollecitazioni persistenti sulle coste occidentali dei continenti e delle isole.

A livello planetario, si stima che il regime dei venti e le correnti marine conservino le stesse caratteristiche da 800 milioni ad un miliardo di *anni* (Meyerhoff, 1970). Però, a fronte di questa regolarità delle sollecitazioni, modificate solo localmente dalla variazione del livello dei mari, nei tempi geologici si sono avute variazioni del convogliamento dei sedimenti verso le coste da parte dei fiumi e, nell'ultimo secolo, si sono verificate riduzioni dei rifornimenti per effetto delle opere di intercettazione dei corsi d'acqua e di quelle costruite nella fascia costiera. Queste ultime, interrompendo e deviando il percorso dei sedimenti, hanno modificato localmente il loro regime e, spesso, ridotto gli apporti verso le spiagge, favorendone l'arretramento.

Nello studio degli aspetti ingegneristici della geomorfologia costiera si possono distinguere le spiagge interessate da un moto ondoso persistente perpendicolare alla loro linea di riva da quelle interessate da un moto ondoso obliquo. Le prime presentano una linea di riva simmetrica rispetto ad un asse allineato con la direzione del moto ondoso persistente e possono definirsi spiagge ad arco simmetriche. Le seconde danno luogo essenzialmente a due forme planimetriche tipiche che prendono il nome di spiagge ad arco asimmetriche e di spiagge a freccia (*barrier beaches*).

Utilizzando i dati direzionali di moto ondoso registrati, a cura del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) italiano, dalla boa della Rete Ondametrica Nazionale RON-Alghero, ancorata su un fondale di circa 85 m, nel periodo compreso tra il 1990 ed il 2000, il presente studio, dopo la ricostruzione del flusso netto di energia che interessa la costa occidentale della Sardegna, esamina la morfologia di alcune delle sue spiagge e verifica che le tre forme planimetriche a cui si è fatto cenno sono conseguenza diretta delle sollecitazioni del moto ondoso.

Il regime ondametrico della costa occidentale della Sardegna

Come risulta dal diagramma della Figura 1, il moto ondoso registrato dalla boa RON-Alghero, presenta spiccate condizioni di persistenza. Peraltro, mettendo in conto il rapporto dei fetches geografici del terzo e quarto quadrante della boa di Alghero con quelli di due punti al largo del Golfo di Oristano e dell'Isola di S. Pietro e applicando le formule di proporzionalità della lunghezza del *fetch* efficace, fornite dallo SPM 84 per il calcolo dell'altezza d'onda significativa e del periodo di picco del moto ondoso di mare vivo, con buona approssimazione, risulta che i dati registrati alla boa di Alghero rappresentano il regime di tutta la costa occidentale della Sardegna.

La Figura 1 presenta due picchi di frequenza delle osservazioni: uno attorno alla direzione di 245 °N e uno attorno a 305 °N, ma quest'ultimo è di gran lunga più alto ed ha una intensità maggiore del primo. Se ne può concludere che le coste occidentali della Sardegna sono persistentemente battute dal moto ondoso del quarto quadrante con una direzione prevalente attorno ai 305 °N.

Flusso longitudinale di energia

Il trasporto solido litoraneo potenziale è direttamente proporzionale al flusso longitudinale dell'energia del moto ondoso (Komar e Inman, 1970) calcolato in corrispondenza del punto più distante dalla riva nel quale si verificano i frangenti condizionati dal fondale. Tale flusso è dato dalla relazione:

$$P_{lbs} = \frac{\rho g H_{bs}^2}{16} C_{Gb} \text{sen } 2\alpha_b, \quad (1)$$

ove H_{bs} è l'altezza dell'onda significativa al frangente, C_{Gb} la sua celerità di gruppo e α_b la direzione rispetto alla costa.

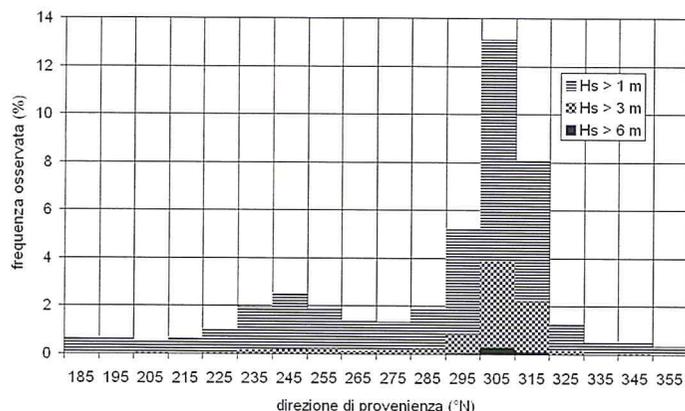


Figura 1 – Distribuzione delle frequenze delle onde osservate alla boa di Alghero in funzione della direzione.

Ricorrendo ad alcune ipotesi semplificative, che contemplano la rifrazione su un piano acclive, l'assunzione di un coefficiente di profondità (*shoaling*) costante pari a 1.07, la coincidenza al frangente della celerità di gruppo con la celerità di fase e l'adozione dello spettro JONSWAP medio, la (1) si può scrivere in funzione dei soli parametri ondometrici al largo:

$$P_{lbs} = 0.049\pi(1.07)^3 \frac{\rho g H_{0s}^2}{8} T_p \sqrt{\cos\alpha_0} \text{sen}2\alpha_0, \quad (2)$$

essendo H_{0s} l'altezza dell'onda significativa, T_p il periodo di picco e α_0 l'angolo che la direzione principale del moto ondoso forma con la normale alla spiaggia.

La semplificazione assunta è indubbiamente eccessiva se si considera l'estensione di tutta la costa occidentale della Sardegna, ma lo è molto meno se si fa riferimento a tratti di costa relativamente rettilinei e si tiene conto del fatto che, rimanendo nel campo della teoria lineare, le trasformazioni del moto ondoso sono influenzate in maniera considerevole dai fondali solo per profondità relative inferiori al 10% della lunghezza dell'onda al largo. Quanto alla scelta del coefficiente di *shoaling* pari a 1.07 si fa osservare che, sempre nell'ambito della teoria lineare del moto ondoso, esso corrisponde alla profondità relativa pari a circa il 3.5% della lunghezza dell'onda al largo e che tale profondità rappresenta con buona approssimazione il valore medio dell'altezza delle onde frangenti di mare vivo, con ripidità al largo non inferiore al 2.5%, nell'ipotesi che la ripidità limite δ_b sia data dall'espressione:

$$\delta_b = 0.14 \text{th} \left(\frac{2\pi d_b}{L_b} \right), \quad (3)$$

essendo d_b ed L_b rispettivamente la profondità e la lunghezza d'onda al frangente.

Com'è ben noto, non tutta l'energia dell'onda al largo viene trasferita a costa, parte si perde per frangimento parziale, parte per resistenza tangenziale del fondo, parte per azioni tangenziali interne al fluido e parte per l'apertura del settore che delimita la propagazione delle onde verso la costa.

In considerazione del fatto che la maggior parte dell'energia che arriva al frangente più esterno è limitata dal settore di provenienza del moto ondoso, nel presente studio si sono trascurate le perdite per frangimento, la resistenza del fondo e quella interna al fluido. Il flusso di energia longitudinale dato dalla (2), ridotto del coefficiente $e < 1$ rappresentativo della quota parte dell'energia che arriva sulla costa, assume dunque la forma:

$$P_{lbes} = 0.049\pi (1.07)^3 \frac{\rho g H_{0s}^2 e}{8} T_p \sqrt{\cos\alpha_0 \sin 2\alpha_0}. \quad (4)$$

Nell'ottica dello spettro direzionale, detta ϑ_w la direzione principale di propagazione del moto ondoso e dette ϑ_1 e ϑ_2 le direzioni che delimitano il settore di mare aperto, il coefficiente e vale:

$$e = \frac{1}{m_0} \int_0^\infty df \int_{\vartheta_1 - \vartheta_w}^{\vartheta_2 - \vartheta_w} S(f, \vartheta) d\vartheta, \quad (5)$$

essendo m_0 l'energia al largo:

$$m_0 = \int_0^\infty df \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} S(f, \vartheta) d\vartheta. \quad (6)$$

Nella (6) la direzione principale del moto ondoso è stata posta uguale a zero. Per lo spettro direzionale si è assunta l'espressione:

$$S(f, \vartheta) = S(f)G(f, \vartheta), \quad (7)$$

essendo $S(f)$ lo spettro di frequenza, per il quale si è assunta la forma di Bretschneider (1968) con una modifica dei coefficienti suggerita da Mitsuyasu (1970), e la funzione di distribuzione direzionale $G(f, \vartheta)$ per la quale si è assunta l'espressione fornita da Mitsuyasu et al. (1975):

$$G(f, \vartheta) = G_0 \cos^{2s} [(\vartheta - \vartheta_w) / 2], \quad (8)$$

essendo G_0 una costante ed s una funzione della frequenza:

$$s = \begin{cases} s_{max} (f / f_p)^5; & f \leq f_p \\ s_{max} (f / f_p)^{-2.5}; & f \geq f_p \end{cases} \quad (9)$$

Per il parametro di dispersione direzionale s_{max} che compare nella (9) è stato assunto il valore:

$$s_{max} = 10, \quad (10)$$

corrispondente alla condizione di mare di vento (mare vivo) che rappresenta lo stato di mare prevalente nelle acque del Mediterraneo.

Dato l'orientamento della linea di riva di un rilievo appartenente al periodo di osservazione del moto ondoso, applicando la (4) ad ogni dato osservato alla boa RON-Alghero, si ottiene la serie storica dei flussi, la cui somma algebrica fornisce il flusso netto di energia che interessa la costa.

Morfologia delle spiagge

Raramente le spiagge presentano una forma planimetrica rettilinea. In generale, esse hanno una linea di riva curva e lo specchio di mare che delimitano viene detto cala, baia, golfo o mare a seconda dell'estensione di mare racchiuso e a seconda del grado di insenatura, inteso questo come il rapporto tra la distanza del punto più interno dalla corda che delimita lo specchio di mare e la corda stessa.

Focalizzando l'attenzione sulle spiagge curve, si possono distinguere quelle simmetriche da quelle asimmetriche. Le prime sono caratterizzate da una forma planimetrica che presenta un asse di simmetria orizzontale perpendicolare al centro della linea di riva, ove la curvatura è minima o nulla, e le zone laterali che alle estremità, solitamente appoggiate a promontori rocciosi, hanno curvatura massima. Le seconde hanno curvatura variabile da un valore massimo, nella zona che si appoggia ad un promontorio, ad un minimo, che in condizioni di equilibrio stabile diventa nullo, all'estremità opposta.

Un terzo tipo di spiagge è rappresentato dai cordoni litoranei o spiagge a freccia che, protendendosi in mare senza appoggiarsi alla costa, delimitano uno specchio protetto dal mare aperto, da cui il nome di *barrier beaches* con il quale esse sono anche note. Talvolta il cordone si salda con la riva racchiudendo una laguna o uno stagno.

Nelle verifiche morfologiche delle spiagge asimmetriche e dei cordoni litoranei assume importanza fondamentale la direzione dell'onda persistente. Con questo termine si intende la direzione del moto ondoso generato dai venti oceanici permanenti che arrivano sulle coste dei continenti sotto forma di mare morto (*swell*). Invece, nel presente lavoro, dedicato allo studio della morfologia delle spiagge della Sardegna occidentale, per direzione dell'onda persistente si è assunta quella che produce il flusso netto di energia nullo rispetto alla direzione della spiaggia. Il calcolo del flusso è eseguito sui dati della serie storica registrata dalla boa RON-Alghero, utilizzando la (4) e considerando la parte della serie di dati la cui direzione resta compresa nel settore rivolto verso il mare aperto, come è riportato nei seguenti sottoparagrafi per i tre tipi di spiaggia.

Spiagge simmetriche

Queste spiagge sono interessate da un moto ondoso dominante diretto secondo l'asse di simmetria. Conseguentemente il regime del trasporto solido dominante è caratterizzato da un movimento dei sedimenti prevalentemente diretto verso il largo nelle fasi di mare vivo e verso riva nelle fasi di mare morto, a cominciare dalle fasi finali delle tempeste, mentre il trasporto longitudinale, in termini di flusso netto annuo, è pressoché nullo. Il continuo ripetersi di queste sollecitazioni produce l'abrasione e la selezione dei granuli la cui frazione più fina, durante la fase di mare vivo, viene trasportata in sospensione verso i fondali più profondi e, nella fase di mare morto, verso la berma della spiaggia emersa. Gradualmente, queste frazioni si disperdono verso i fondali profondi, da dove il moto ondoso non è più in grado di rimuoverle, oppure, quelle accumulate sulla berma emersa, prese in carico dai venti di mare, vengono trasportate nella retrospiaggia. Entrambi i fenomeni costituiscono la prevalente causa di perdita di sedimenti per questo tipo di spiaggia.

Esistono spiagge simmetriche ampie ed esposte direttamente a tutto il ventaglio delle direzioni del moto ondoso dominante e spiagge simmetriche i cui promontori pronunciati limitano l'incidenza del moto ondoso a un settore ridotto. Se i promontori sono alti anche il vento di mare viene incanalato perpendicolarmente alla riva rendendo particolarmente efficace il trasporto verso l'entroterra dei sedimenti più fini. Nell'immediata retrospiaggia di queste baie si possono formare campi di dune più o meno estesi a seconda del grado di esposizione e dell'apertura della spiaggia alle direzioni del moto ondoso e del vento.

Nella parte dello studio che segue, il settore dei dati di moto ondoso utilizzato per il calcolo del flusso longitudinale è quello delimitato dai promontori che separano il mare aperto dalla costa e dagli specchi di mare costiero, come è riportato nelle Figure 5, 8, 9 e 10 che riguardano alcuni esempi di spiagge simmetriche della costa occidentale sarda.

Spiagge asimmetriche

Le spiagge asimmetriche sono interessate da un moto ondoso dominante obliquo, diretto perpendicolarmente alla linea di riva solo nella zona estrema di valle, ove la sua curvatura è minima o nulla. Le trasformazioni del moto ondoso all'interno della baie asimmetriche sono di pura diffrazione nella zona a massima curvatura, di pura rifrazione, o anche soltanto di *shoaling*, nella zona a curvatura nulla e di rifrazione e diffrazione nella zona intermedia, Figura 2. In letteratura queste spiagge sono

note con diversi nomi derivanti dalla loro forma. Sono state chiamate *baie a zeta* (zeta bays: Halligan, 1906; Silvester 1960), *baie a semi-cuore* (Silvester, 1960), *baie crenulate* (crenulated bays: Ho, 1971), *spiagge a spirale* (spiral beaches: Krumbain, 1944; Le Blond 1972), *spiagge uncinata* (hooked beaches: Rea e Komar, 1975), ecc.

Le spiagge asimmetriche soggette a moto ondoso persistente tendono ad una forma stabile di equilibrio che può conservarsi per lungo tempo. Questa forma è anche riassumibile con pochi parametri geometrici. Tra le forme geometriche proposte (spirale logaritmica, parabolica, polinomiale), al momento, quella polinomiale, verificata su molti prototipi e prove su modello, risulta rispondere meglio alla forma di equilibrio stabile. La polinomiale è data dalla relazione (Hsu ed Evans, 1989):

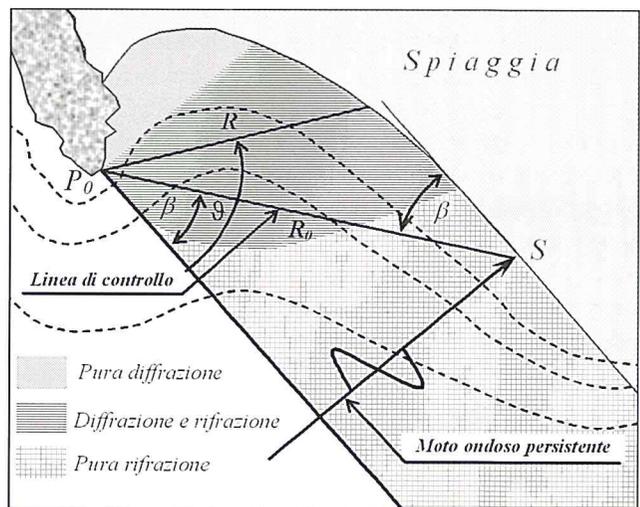
$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta} + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (11)$$

ove C_0 , C_1 e C_2 sono tre coefficienti adimensionali dipendenti da β ed R_0 è la lunghezza della *linea di controllo*. Il significato dei parametri β , θ , R e R_0 è riportato nella Figura 2.

Nel presente studio, il settore dei dati di moto ondoso utilizzato per il calcolo del flusso longitudinale è quello delimitato dalla linea di controllo e dalla tangente alla linea di riva nel punto di curvatura nulla. Nei casi in cui la direzione della linea di controllo e/o di quella della tangente alla linea di riva penetrano verso terra il settore è stato delimitato dalla costa, come riportato nelle figure 4, 6 e 7 che riguardano casi specifici di questo tipo di spiagge esaminati nel seguito.

L'applicazione della (11) è basata su una corretta assunzione del punto S (Fig. 2) sulla cui determinazione gli autori non forniscono precise indicazioni. Per sopperire a questo inconveniente è stato proposto un criterio (Gonzales e Medina, 2001) basato su un modello semiempirico che permette, noto il regime di moto ondoso ed il punto P_0 , di determinare in maniera obiettiva il punto S . Il modello è stato verificato su 26 spiagge della costa spagnola dell'Atlantico e del Mediterraneo.

Figura 2 - Definizione dei parametri di una linea di riva polinomiale di una baia in equilibrio stabile e zone di influenza della trasformazione del moto ondoso. Le delimitazioni dei tipi di trasformazione del moto ondoso sono qualitative.



Cordoni litoranei

Come risulta dall'osservazione, i cordoni litoranei sono presenti ove è abbondante la disponibilità di sedimenti ed il moto ondoso dominante ha una componente tangenziale considerevole rispetto a quella normale, con il flusso di energia netto sempre diretto nella stessa direzione. Risulta inoltre che la loro presenza è associata a brusche variazioni della direzione della linea di riva, in zone di costa bassa con bassi o bassissimi fondali. Di solito, il cordone ha origine dai punti di massima curvatura di quelle zone.

Si stima che i cordoni litoranei si siano formati a partire da meno di 6000 anni (Fairbridge, 1961), ossia da quando la crescita del livello del mare è rallentata in maniera considerevole. Inoltre, poiché essi si sviluppano per effetto del trasporto longitudinale dovuto al flusso netto di energia unidirezionale, un arresto del rifornimento di sedimenti ha come conseguenza un arresto del loro accre-

scimento. Anche la realizzazione di opere che intercettano il trasporto solido ha delle conseguenze immediate sulla loro evoluzione. Si tratta quindi di morfologie instabili che risentono immediatamente delle variazioni del regime di trasporto dei sedimenti a monte. Ma esistono situazioni limite, come si vedrà nel caso del cordone di Corru Mannu (Fig. 7), in cui il cordone è stabile e il flusso netto nullo.

Flusso netto del moto ondoso della costa occidentale della Sardegna

In generale, nella fascia costiera influenzata dal moto ondoso si accumulano considerevoli depositi di sedimenti la cui provenienza è quasi esclusivamente di origine continentale in quanto derivante dall'azione erosiva prodotta dagli eventi meteorici che hanno luogo esclusivamente sulle terre emerse e sulla costa. Da questa azione sono esclusi i fondali marini profondi, naturalmente protetti dagli spessi tiranti idrici. L'estensione della fascia litoranea, ove il moto ondoso esercita una continua azione di setacciatura, allontanando verso i fondali profondi i granuli più fini e verso riva quelli più grossolani, si spinge fino a un limite di profondità d_1 :

$$d_1 = \frac{g \overline{T_p}^2}{4\pi} \quad , \quad (12)$$

essendo $\overline{T_p}$ il periodo di picco medio degli spettri d'onda più energetici che interessano la costa. Solo i sedimenti sciolti più fini che viaggiano in sospensione si dirigono, per effetto del moto ondoso, verso i fondali più profondi del limite d_1 . Nella fascia litoranea compresa all'interno di questo limite si ha, superficialmente, la massima concentrazione di sedimenti. In generale, si stima che l'86,8% (Silvester, 1965) della superficie compresa nella fascia di cui si tratta sia ricoperta da sedimenti sciolti.

Dall'esame della serie storica registrata dalla boa RON-Alghero risulta che gli stati di mare con altezza d'onda significativa superiore a 6 m, che comprendono le massime altezze osservate lungo la costa occidentale sarda, hanno un periodo di picco medio $T_p \approx 12$ s, da cui, applicando la (12), si calcola che la fascia di piattaforma continentale influenzata dalle onde che attaccano questa costa si estenda fino alla profondità $d_1 \approx 110$ m. Dall'esame delle carte nautiche dell'Istituto Idrografico Italiano, alla scala 1:100.000, risulta che nella fascia di mare della costa occidentale sarda, compresa tra la linea di riva e la batimetrica - 100 m, i sedimenti sciolti prevalgono notevolmente rispetto alla roccia.

Ma sotto costa l'effetto del moto ondoso in grado di produrre, in maniera sensibile, il trasporto dei sedimenti si risente fino a una profondità molto inferiore al valore riportato sopra. L'ingegneria costiera distingue il trasporto solido dei sedimenti sommersi in longitudinale e trasversale rispetto alla linea di riva. Esistono due limiti di profondità che secondo il CUR (1987) sono esprimibili dalle relazioni:

$$d_1 = 1.75 H_{s,12} \quad , \quad (13)$$

$$d_i = 3.50 H_{s,12} \quad , \quad (14)$$

al di sopra dei quali i sedimenti sono soggetti rispettivamente a trasporto longitudinale e trasversale o a solo trasporto trasversale. Nelle (13) e (14) $H_{s,12}$ rappresenta l'altezza dell'onda significativa a costa che non viene superata per più di 12 ore/anno. Il tirante idrico d_i è la cosiddetta *profondità di chiusura*, al di sotto della quale il trasporto solido dovuto al moto ondoso, dal punto di vista ingegneristico, è irrilevante e ininfluenza sulla morfologia della spiaggia. Dai calcoli delle altezze delle onde $H_{s,12}$ che interessano le spiagge simmetriche esaminate, applicando la (14), risulta una profondità di chiusura compresa tra il valore massimo di - 23.0 m (spiaggia di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu, Fig. 8) e quello minimo di - 14,2 m (spiaggia di S. Nicolò, Fig. 9).

Il trasporto solido longitudinale è governato dal flusso netto di energia del moto ondoso che, come detto più sopra, può essere calcolato, noto il moto ondoso al largo, mediante la (4). Nel presente studio, per fare questo calcolo, la linea di riva è stata assimilata ad una successione di tratte rettilinee di cui è stato misurato l'orientamento. Inoltre, per ogni tratta, è stato individuato il settore di provenienza del moto ondoso e per ogni valore della serie storica è stato calcolato il flusso longitudinale. La somma algebrica dei flussi longitudinali ha fornito il flusso netto annuo e la media di questi flussi il flusso netto medio annuo. Il risultato è riportato nella Figura 3 ove, in adiacenza alla linea di costa, è indicato il verso del flusso e nel corrispondente istogramma la sua intensità media annua.

L'orientamento del flusso netto permette di delimitare le zone costiere appartenenti alla stessa *unità fisiografica*. Secondo la definizione adottata da Silvester (1962), l'unità fisiografica è rappresentata da quella tratta di fascia costiera interessata da un flusso netto unidirezionale o nullo.

Nel presente studio, per tenere conto dell'influenza che il flusso netto esercita nei confronti dell'apporto e della sottrazione di sedimenti dalle spiagge, l'unità fisiografica è stata definita come quella fascia costiera nella quale il flusso netto medio annuo è unidirezionale, nullo o convergente verso un punto della costa. Resta comunque fissato che una zona a flusso nullo costituisce l'estremità di valle di una unità fisiografica.

I confini dell'unità fisiografica sono quindi delimitati da punti ove il flusso diverge, solitamente coincidenti con promontori, oppure da zone costiere, caratterizzate da bassi fondali e ricoperte da sedimenti, ove il flusso confluisce. Seguendo rigorosamente questa definizione, lungo la costa occidentale della Sardegna si individuano nove campi di flusso netto diverso da zero. Tuttavia tre di queste delimitazioni, ossia quella dovuta al contro-flusso a Sud di Punta Scoglietti e quelle relative ai contro-flussi diretti verso Nord di Punta Gessiere e di Capo Altano (Fig. 3), per la loro limitata estensione rispetto agli estesi campi di flusso in cui sono inserite, non sono tali da condizionarne il verso dominante, ma solo di interromperlo temporaneamente. Per cui, nell'ottica del concetto di unità fisiografica introdotto sopra, appare ragionevole non tenere conto delle suddette interruzioni di flusso per la delimitazione delle unità fisiografiche. Si ritiene quindi di poter fare la suddivisione dei campi di flusso netto in unità fisiografiche e *sottounità*, con le prime che contengono le seconde.

Nella Figura 3 le unità fisiografiche della costa occidentale sarda sono indicate con un numero ordinale e le sottounità con le lettere a e b. Con questa precisazione le unità fisiografiche individuabili lungo la costa occidentale della Sardegna si riducono a sei, Figura 3:

- 1) unità fisiografica n° 1, contenente due sottounità, con flusso netto prevalente diretto verso Nord, compresa tra Capo Argentiera e Punta Scorno (Isola Asinara);
- 2) unità fisiografica n° 2, contenente due sottounità, compresa tra Capo Marargiu e Capo Argentiera, con flusso bidirezionale convergente nella Rada di Alghero;
- 3) unità fisiografica n° 3, compresa tra Capo Marargiu e Capo Sturraggia, con flusso netto convergente verso l'estremità settentrionale della spiaggia di Is Arenas del Sinis;
- 4) unità fisiografica n° 4, compresa tra Capo Sturraggia e Capo Frasca, con flusso netto diretto verso Sud;
- 5) unità fisiografica n° 5, compresa tra Capo Frasca e Buggerru, con flusso netto diretto verso Sud.
- 6) unità fisiografica n° 6, contenente due sottounità, compresa tra Buggerru e il Canale di S. Pietro, con flusso netto prevalente diretto verso Sud.

L'unità fisiografica n° 1, che non contiene vere e proprie spiagge, alimenta di sedimenti il Golfo dell'Asinara attraverso gli Stretti tra Capo Falcone e l'Isola dell'Asinara e con il superamento di Punta Scorno.

L'unità fisiografica n° 2 contiene tre spiagge di cui le prime due (Porto Ferro e Porto Conte) appartengono a zone molto riparate, assimilabili a vere e proprie trappole di sedimenti, che sono alimentate, o lo sono state in passato, da un flusso passante diretto verso Sud, mentre la terza (Rada di Alghero), ben protetta dal moto ondoso del quarto quadrante, è caratterizzata dalla convergenza dei flussi medi annui provenienti da Ovest e da Sud.

L'unità fisiografica n° 3 contiene quattro spiagge principali che saranno esaminate nel seguito: la spiaggia asimmetrica di Bosa Marina, interessata dal flusso netto passante diretto verso Sud, quella asimmetrica di Putzu Idu interessata da un flusso netto diretto verso Nord, quella asimmetrica di Sa Rocca Tunda interessata dal flusso diretto verso Est e, infine, la spiaggia di Is Arenas del Sinis interessata da un flusso netto medio annuo diretto verso Nord-Est.

L'unità fisiografica n° 4 contiene le piccole spiagge della penisola del Sinis, a Sud di Capo Sturraggia, e la vasta spiaggia asimmetrica del Golfo di Oristano che sarà esaminata nel seguito. Le spiagge della penisola del Sinis, appartenenti all'unità fisiografica n° 4, sono interessate da un intenso flusso netto diretto verso Sud che potrebbe essere sovrastimato in quanto la (4), utilizzata per il suo calcolo, non tiene conto della resistenza al moto offerta dalla vasta zona degli antistanti bassi fondali e del riparo dell'Isolotto.

L'unità fisiografica n° 5 contiene diverse spiagge di cui due saranno esaminate in dettaglio nel seguito: le spiagge simmetriche di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu e S. Nicolò.

Infine, l'unità fisiografica n° 6 a cui appartengono, tra l'altro, la spiaggia simmetrica di Funtanamare e il cordone litoraneo di Punta s'Aliga, del complesso delle spiagge del Canale di S. Pietro, che saranno esaminate nel seguito.

Spiaggia di Bosa Marina

Dalla cartografia storica IGMI risulta che fino al 1947 l'Isola Rossa, ubicata a sinistra della foce del fiume Temo, non era collegata con la terra ferma. Successivamente a tale data, con lo scopo di avviare la realizzazione di un bacino portuale, l'Isola Rossa è stata collegata alla Sardegna mediante un'opera a gettata. Da quel momento ha avuto inizio la stabilizzazione di una spiaggia asimmetrica la cui linea di riva, rilevata dalla carta IGM, 1:25.000 (1967), è riportata nella Figura 4. Questa linea, a parte le alterazioni locali prodotte dal pennello realizzato nella parte orientale della spiaggia, è interpretata bene dalla linea di equilibrio polinomiale (11) assumendo la direzione della normale alla spiaggia pari a $247^\circ N$ a cui corrisponde il flusso longitudinale netto nullo. La perpendicolare a questa direzione, che è tangente alla linea di equilibrio nella zona di minima curvatura, forma con la linea di controllo (lunga $R_0 = 800 m$) un angolo $\beta = 58^\circ$.

A cavallo degli anni '60 e '70 del secolo appena trascorso, con l'intento di completare il bacino portuale, è stata costruita un'opera di difesa a gettata, radicata all'Isola Rossa, della lunghezza di circa 200 m. La conseguente riduzione del settore di esposizione della baia dal limite di $280^\circ N$ al limite di $268^\circ N$, proteggendo la spiaggia dagli intensi attacchi ondosi del quarto quadrante, ha modificato l'assetto della linea di equilibrio ed ha favorito l'avanzamento della linea di riva che, rilevata dalla carta IGM 1:25.000 del 1992, nella Figura è evidenziata a tratto continuo. L'avanzamento della linea di riva può aver contribuito a far desistere l'amministrazione dal completamento dell'infrastruttura portuale. La nuova linea di riva non risulta coincidere con un limite di equilibrio. Quest'ultimo è stato calcolato in base alla direzione del moto ondoso che produce un flusso netto medio annuo nullo rispetto all'estremità a curvatura nulla la cui direzione è orientata per $242^\circ N$. La perpendicolare a questa direzione, che è tangente alla nuova linea di equilibrio, riportata nella Figura 4 con un tratteggio, forma con la nuova linea di controllo (lunga $R_0 = 674 m$) l'angolo $\beta = 64^\circ$. Il diagramma contenuto nella Figura riguarda il flusso netto annuo calcolato con riferimento alla direzione della normale alla spiaggia di $242^\circ N$. La somma algebrica dei flussi netti degli undici anni è nulla.

In considerazione del fatto che il flusso longitudinale che può trasportare sedimenti verso la spiaggia di Bosa Marina ha origine presso il vicino Capo Marargiu (Fig. 3) e che la portata solida del fiume Temo, dopo lo sbarramento, è limitata alla sua poco estesa e pianeggiante parte valliva, non si ritiene che il raggiungimento della linea di riva di equilibrio possa avvenire in tempi brevi. Tuttavia si può dire che la linea di riva attuale non sarà soggetta ad erosione, ma eventualmente a modeste modifiche legate alle contingenti condizioni del moto ondoso.

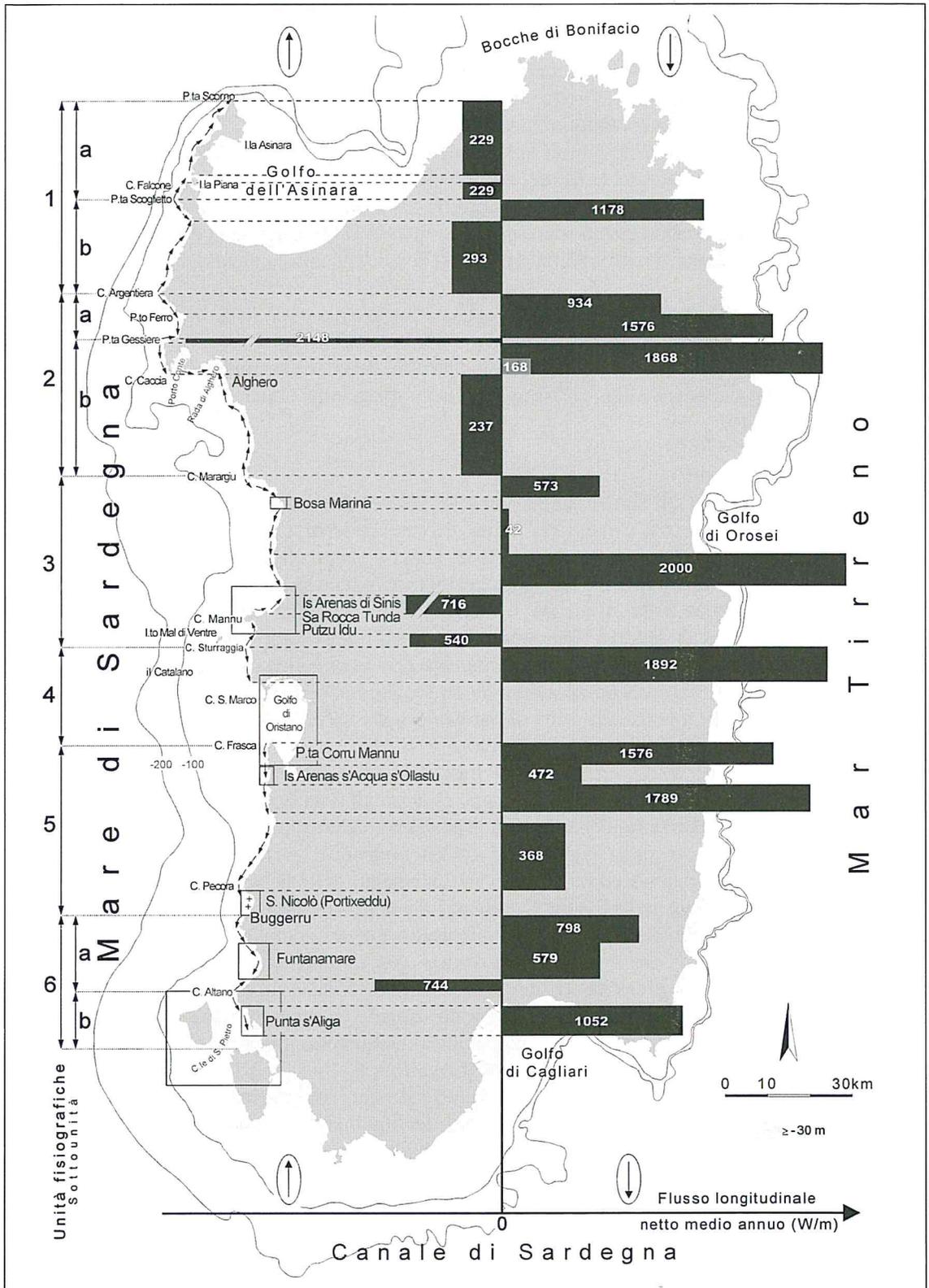


Figura 3 - Flusso netto medio annuo e unità fisiografiche della costa occidentale della Sardegna.

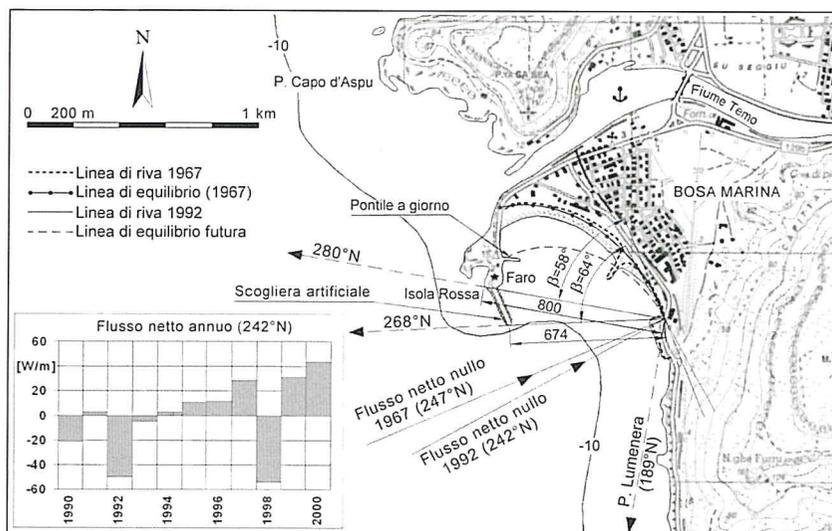


Figura 4 - Evoluzione della spiaggia asimmetrica di Bosa Marina nel breve periodo di tempo compreso tra il 1967 ed il 1992.

Spiaggia di Is Arenas del Sinis

La spiaggia di Is Arenas ha una forma simmetrica ed è molto ricca di sedimenti, sia nella parte sommersa che nella parte emersa, con la retrospiaggia ricoperta dal campo di dune più esteso della Sardegna, reso stabile da un rimboschimento realizzato nell'ultimo cinquantennio, Figura 5. La spiaggia è orientata per 315 °N ed è interessata da un flusso netto annuo diretto verso Nord-Est. L'orientamento della spiaggia, corrispondente ad un flusso netto medio annuo nullo si avrebbe per la direzione di 306 °N che si discosta dal suo reale orientamento di 9°.

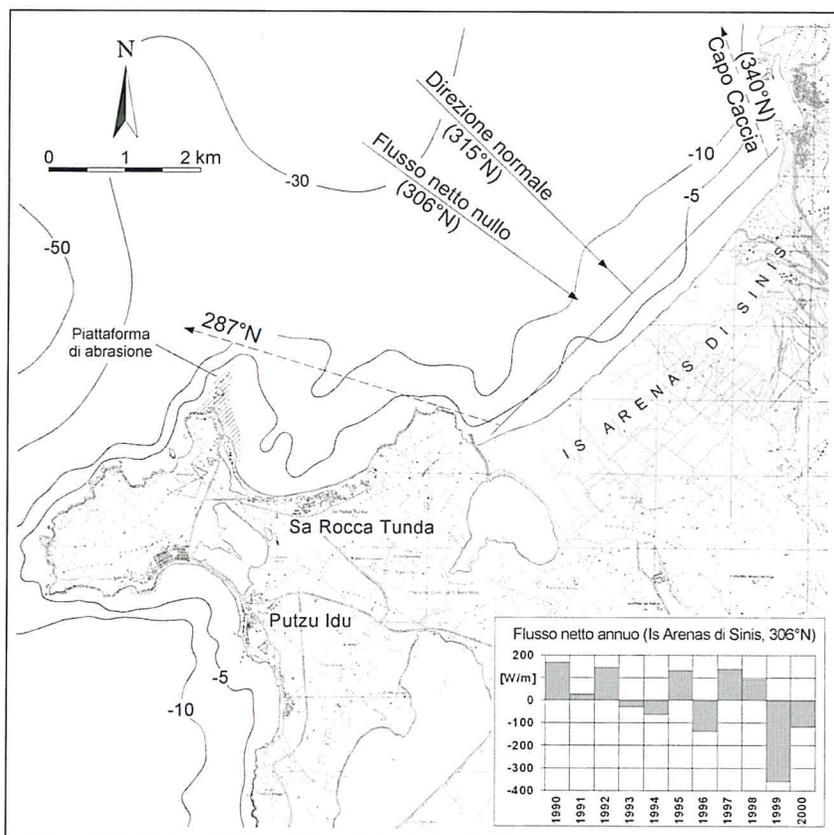


Figura 5 Spiaggia simmetrica di Is Arenas del Sinis. La condizione di flusso netto nullo non coincide perfettamente con l'orientamento della spiaggia.

Dunque, per raggiungere l'equilibrio, la spiaggia dovrebbe ruotare in senso antiorario di un uguale angolo. Tuttavia, si deve considerare che a questa condizione si oppone la deflazione eolica verso terra dei forti venti di Maestrale che riprendendo in carico i sedimenti convogliati dal flusso netto verso Nord-Est contribuisce ad impedire la rotazione della linea di riva. Si deve anche tener conto del fatto che, considerato il notevole scarto, da un anno all'altro, del flusso netto riportato nell'istogramma della Figura 5, una più estesa serie storica del moto ondoso potrebbe modificare la direzione del flusso verso una posizione più prossima alla direzione di 315°N .

Spiagge di Sa Rocca Tunda e di Putzu Idu

Le due spiagge hanno una forma asimmetrica non corrispondente ad una forma di equilibrio. Nella Figura 6 sono riportate le tracce delle linee ottenute con la polinomiale (11) assumendo i parametri che maggiormente si adattano alle due linee di riva delle spiagge, ma, a parte la scarsa sovrapposizione, le linee tracciate non rappresentano per le due spiagge condizioni di equilibrio stabile in quanto le normali alle tangenti nei punti di minima curvatura non coincidono con la direzione alla quale corrisponde il flusso netto medio annuo nullo.

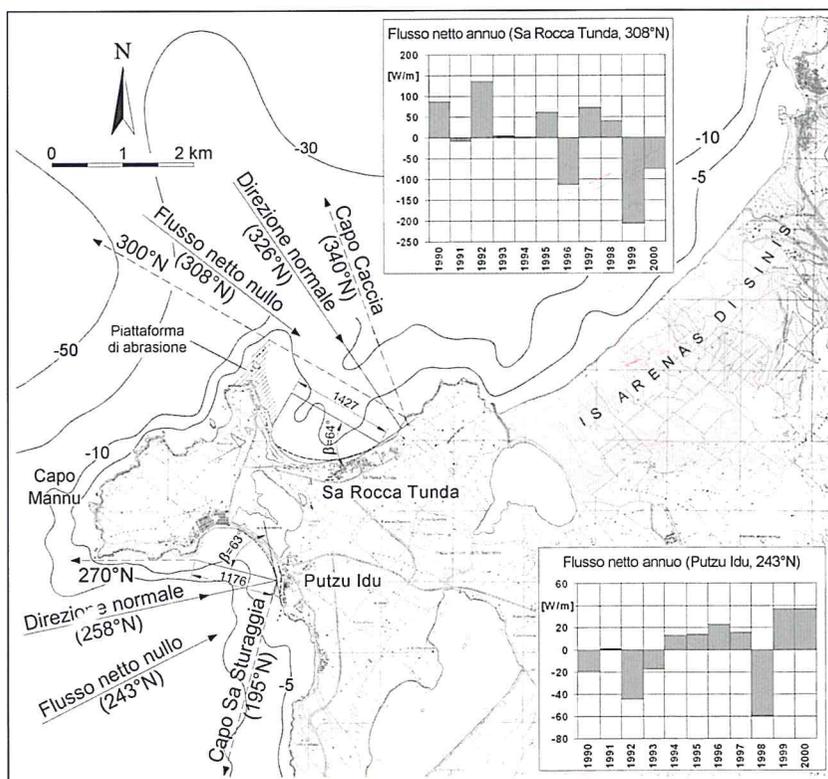


Figura 6 - Spiagge asimmetriche di Sa Rocca Tunda e Putzu Idu. Il loro stato di equilibrio non è inquadrabile mediante i criteri geometrici che definiscono le condizioni di stabilità.

Questa direzione si discosta dalla normale alla tangente nel punto di minima curvatura di 15° nel caso della spiaggia di Putzu Idu e di 18° nel caso della spiaggia di Sa Rocca Tunda. Si deve anche tener conto del fatto che la morfologia di queste spiagge è fortemente condizionata dalle zone rocciose che le comprendono la cui estensione non è di facile determinazione. Inoltre, i condizionamenti delle zone rigide influiscono sulla morfologia modificandola rispetto alla forma polinomiale della (11), che invece è valida nel caso di corpo sedimentario esteso e non condizionato da parti rigide. Le due spiagge hanno una forma asimmetrica non corrispondente ad una forma di equilibrio. Nella Figura 6 sono riportate le tracce delle linee ottenute con la polinomiale (11) assumendo i parametri che maggiormente si adattano alle

due linee di riva delle spiagge, ma, a parte la scarsa sovrapposizione, le linee tracciate non rappresentano per le due spiagge condizioni di equilibrio stabile in quanto le normali alle tangenti nei punti di minima curvatura non coincidono con la direzione alla quale corrisponde il flusso netto medio annuo nullo.

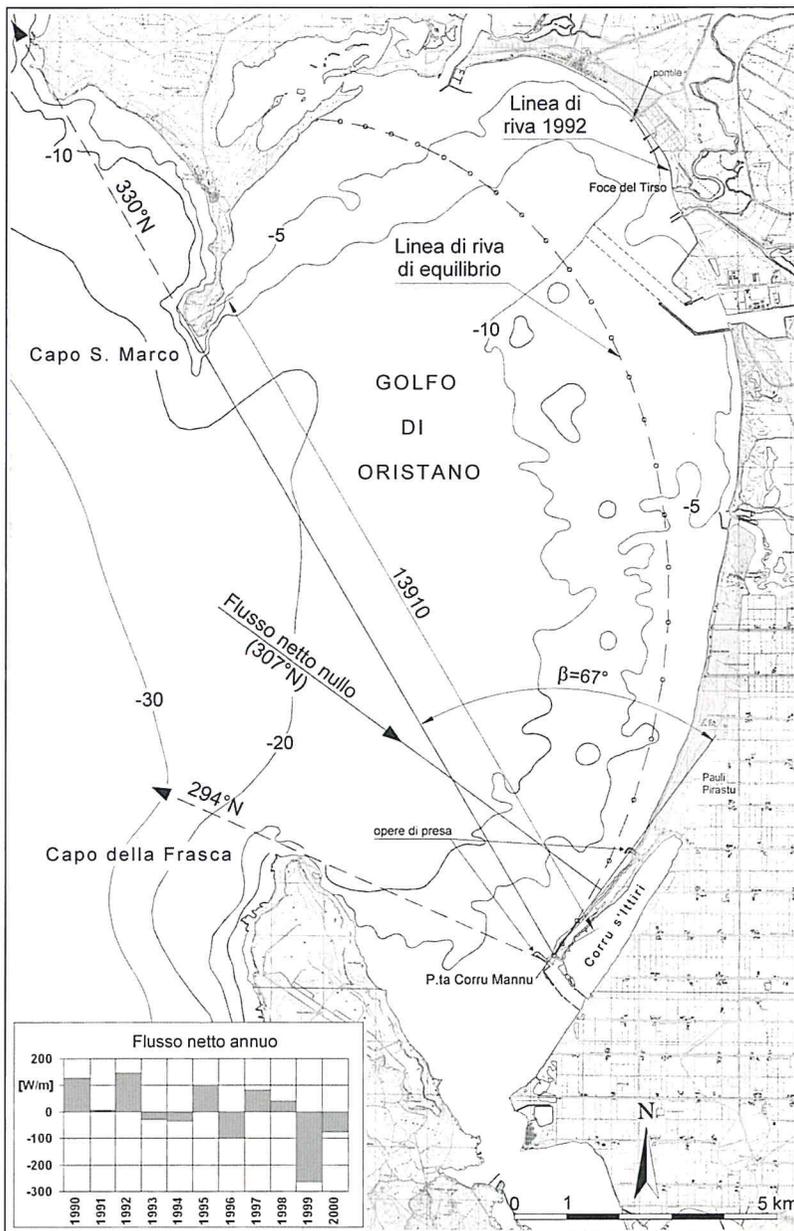


Figura 7 – Spiaggia asimmetrica del Golfo di Oristano che termina a Sud con il Cordone di Corru Mannu.

per un verso, dalla protezione offerta dai due promontori di Capo S. Marco e Capo Frasca e, per un altro, dallo scarso apporto di sedimenti da terra e da mare. Da terra, perché il trasporto solido del fiume Tirso è limitato alla sua parte pianeggiante a valle della diga di S. Chiara, che sottende un bacino di circa 2100 km², pari al 64% dell'intero bacino; da mare, perché il Golfo riceve i sedimenti di una unità fisiografica molto ridotta, la n° 4, estesa solo da Capo Sturraggia a Capo Frasca, Figura 3.

Golfo di Oristano

L'unità fisiografica n° 4 contiene la spiaggia asimmetrica del Golfo di Oristano, tra le più estese della Sardegna, lunga più di 20 km, interrotta solo dalle bocche a mare dei diversi stagni costieri, dalla foce del Tirso e dell'infrastruttura portuale. A Sud la spiaggia termina con il cordone litoraneo di Corru Mannu, lungo oltre 4 km (Fig. 7).

La spiaggia si presenta relativamente stabile pur non avendo ancora raggiunto il limite di equilibrio. Questo limite, determinato seguendo la morfologia della polinomiale (11), è riportato nella Figura 7 assumendo i limiti di settore e la lunghezza della linea di controllo ivi riportati. La normale alla tangente nell'estremità meridionale del cordone litoraneo coincide con la direzione del flusso netto medio annuo nullo, orientato per 307 °N. Il flusso netto, calcolato anno per anno, è riportato nell'istogramma della Figura. La linea di equilibrio ricade sempre in mare e nella zona Nord del Golfo si discosta dalla linea di riva fino ad un valore massimo di circa 3 km. La stabilità della linea di riva dipende,

L'esiguità del trasporto solido marino si rileva dall'andamento delle isobate - 5, - 10 e - 20 m che marciano la presenza del canyon del fiume Tirso, Fig. 7. La curvatura stretta dell'isobata - 20 sembra evidenziare che il canyon sia in fase di colmata, mentre l'ampiezza dell'ansa dell' isobata - 10 mostra che in questa zona più interna il ricoprimento del canyon da parte dei sedimenti è ancora lontano dal compiersi. Quanto all'isobata - 5 si fa notare che essa risulta centrata su una vecchia foce del Tirso, ubicata più a Nord dell'attuale, in prossimità del pontile evidenziato nella Figura 7, dunque anche questa isobata mostra che il canyon del Tirso non risulta colmato.

Cordone litoraneo di Corru Mannu

Nella zona interna e meridionale del Golfo si nota la presenza di un cordone litoraneo che prende il nome di Corru Mannu, la cui estensione è superiore a quanto rilevabile a prima vista. Infatti, esso si estende fino alla palude di Pauli Pirastu (Fig. 7) che è separata dallo stagno di Corru s'Ittiri da una strada di recente realizzazione. A differenza di quanto solitamente si osserva sui cordoni litoranei, quello di Corru Mannu non è interessato da un flusso netto unidirezionale molto angolato rispetto alla linea di riva e non mostra alcuna tendenza all'instabilità. Infatti, come si rileva dalla Figura 7, il flusso netto è addirittura nullo rispetto alla riva e i manufatti in scogliera, costruiti da circa 30 *anni* a protezione di due bocche a mare che alimentano l'omonimo stagno e quello di Corru s'Ittiri, hanno creato solo localmente piccoli spostamenti della linea di riva. È da segnalare inoltre che da più di 150 *anni* la lunghezza del cordone risulta invariata, segno dell'assenza di apporto di sedimenti.

Spiaggia di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu

Questa spiaggia appartiene alla categoria delle spiagge simmetriche che ricadono nell'unità fisiografica n° 5, il cui flusso netto è diretto verso Sud, ed è orientata per 293° N, Figura 8. Il flusso netto medio annuo nullo si ha per la direzione di 300° N, quindi la spiaggia, per raggiungere il suo limite di equilibrio, dovrebbe ruotare di 7° in senso orario.

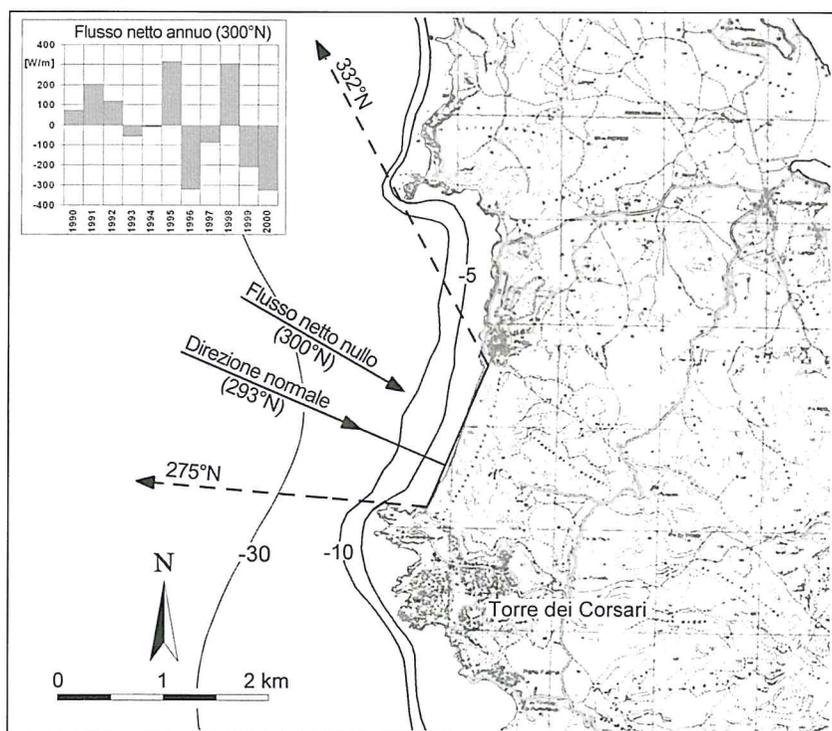


Figura 8 - Spiaggia simmetrica di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu. Il flusso netto nullo è discosto di 7° dall'orientamento della spiaggia.

L'istogramma riportato nella Figura 8 contiene la distribuzione del flusso annuo rispetto alla direzione di 300°N . Anche in questo caso la discrepanza tra orientamento della spiaggia e direzione di flusso nullo, pur misurabile, resta relativamente limitata, almeno nell'ottica con la quale devono essere letti questi tipi di fenomeni, pertanto valgono le considerazioni fatte a proposito della spiaggia di Is Arenas del Sinis. La retrospiaggia è ricoperta da un campo di dune relativamente esteso in proporzione alla dimensione della spiaggia.

Spiaggia di S. Nicolò (Portixeddu)

La spiaggia di S. Nicolò appartiene all'unità fisiografica n° 5 ed è una spiaggia simmetrica orientata secondo la direzione di 273°N , corrispondente alla condizione di flusso medio nullo. Pertanto, il suo orientamento coincide con le condizioni di equilibrio limite stabile, ma anche in questo caso sarebbe necessario disporre di una serie storica di moto ondoso più estesa per affermare con certezza questa condizione. Come mostra la Figura 9, la simmetria della spiaggia è praticamente perfetta, come pure quella delle isobate - 5 e - 10 m. Nella Figura è riportato anche l'istogramma del flusso netto annuo il cui alternarsi giustifica la simmetria riscontrata.

La retrospiaggia è ricoperta da un campo di dune, rimboschito nel recente passato, che è interrotto da una strada litoranea parallela alla spiaggia. Il frangivento creato per evitare l'insabbiamento della strada arrestando o riducendo il trasporto dei sedimenti verso terra potrebbe contribuire a far crescere la spiaggia emersa.

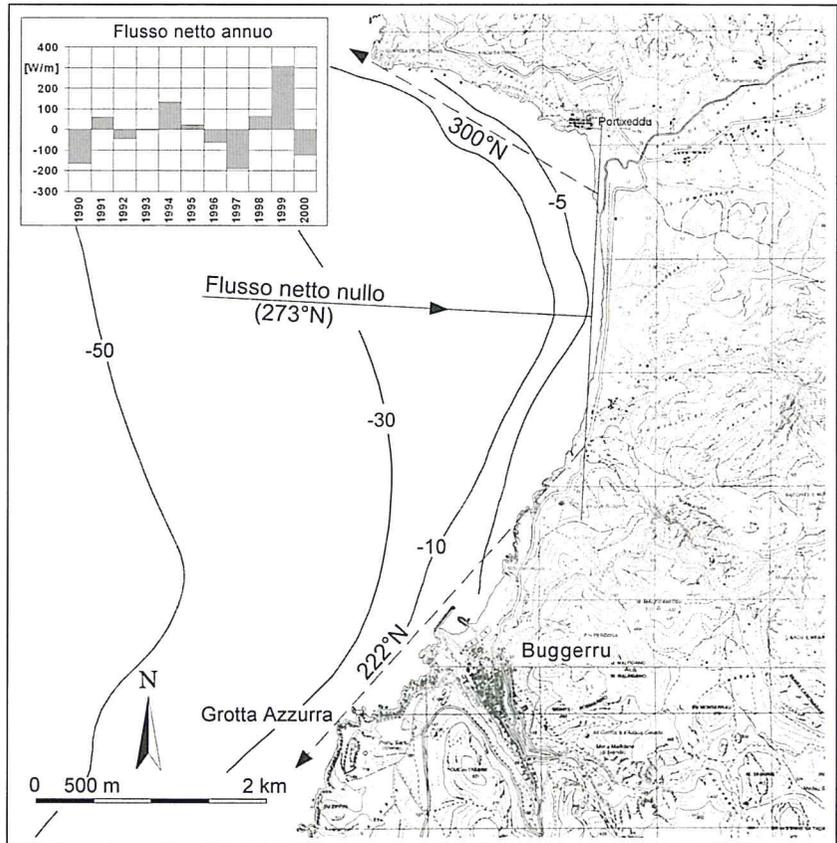


Figura 9 - Spiaggia simmetrica di S. Nicolò (Portixeddu). La simmetria è perfetta, il flusso netto nullo coincide con l'orientamento della spiaggia.

Spiaggia di Funtanamare

Anche la morfologia di questa spiaggia, riportata nella Figura 10, è simmetrica ed è orientata per 296°N . Il flusso netto nullo corrisponde però alla direzione di 303°N per cui anche in questo caso la spiaggia dovrebbe ruotare di 7° in senso orario per raggiungere la condizione di equilibrio stabile. Naturalmente, valgono le considerazioni fatte per le altre spiagge simmetriche il cui orientamento non coincide con quello corrispondente alla condizione di flusso nullo.

La spiaggia è alimentata dal flusso netto diretto verso Sud dell'unità fisiografica n° 6a. La retrospiaggia è interessata da un campo di dune, come negli altri casi delle spiagge simmetriche.

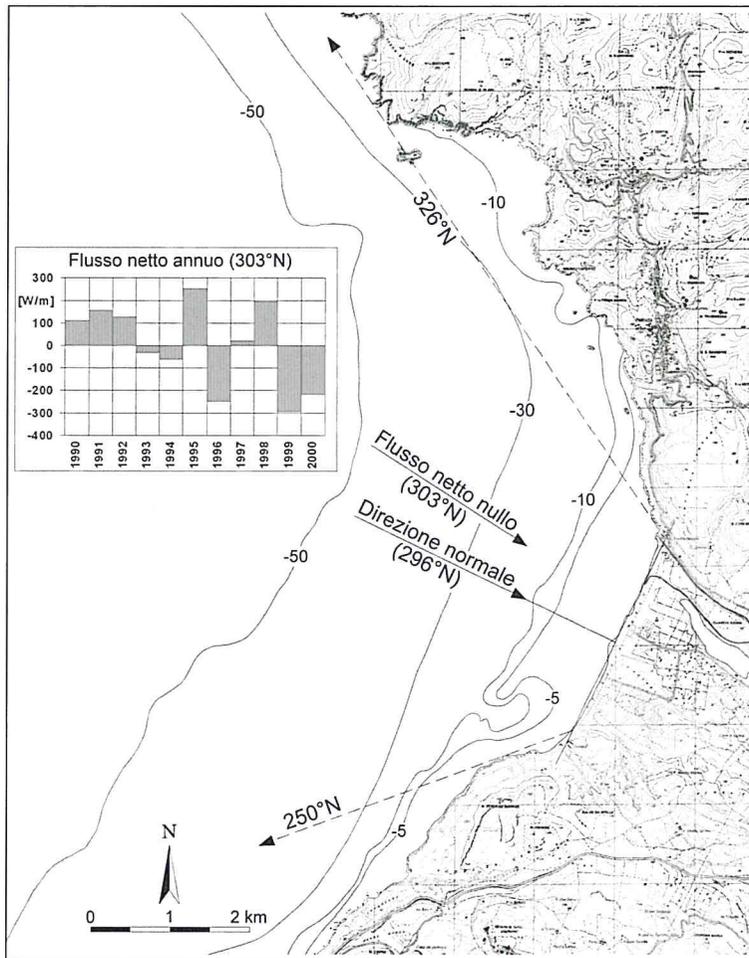
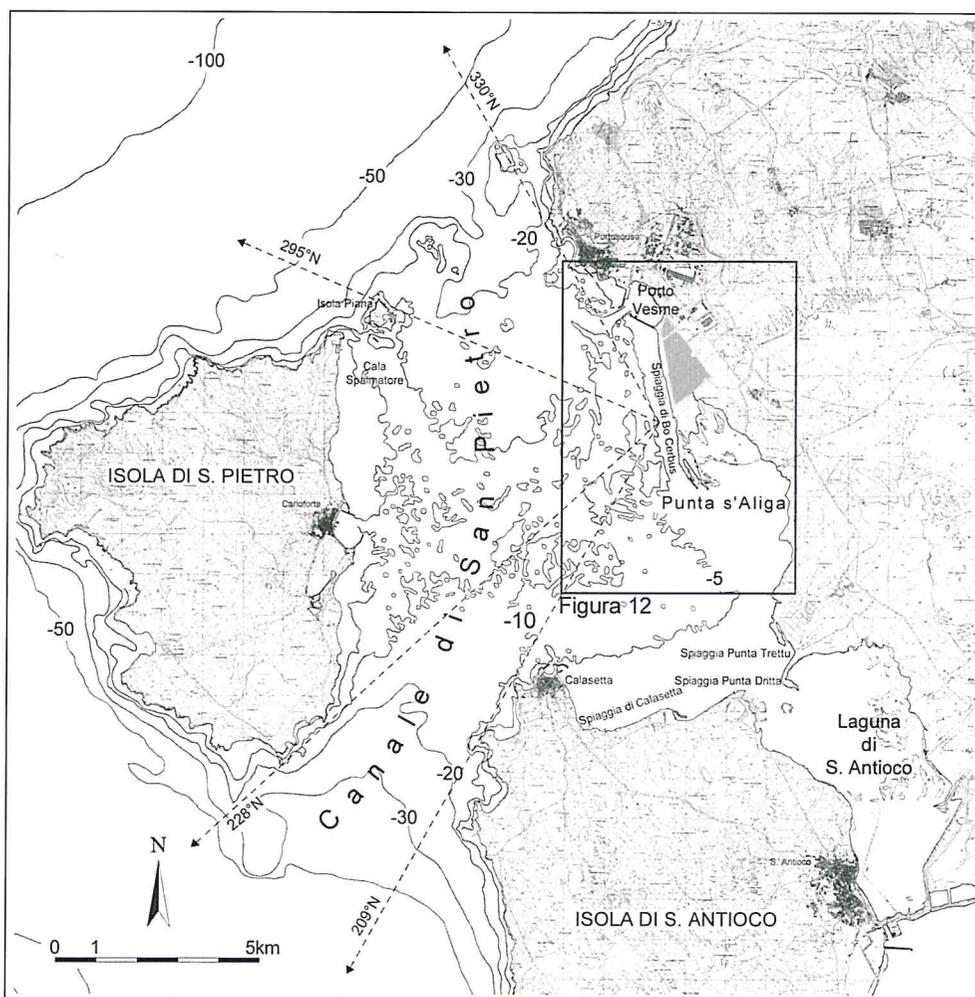


Figura 10 - Spiaggia simmetrica di Funtanamare. Il flusso netto nullo si scosta di 7° dall'orientamento della spiaggia.

Canale di S. Pietro

I fondali del Canale di S. Pietro sono ricoperti da un consistente strato di sedimenti sabbiosi e limo-sabbiosi per tutta l'estensione. I dragaggi del bacino portuale di Porto Vesme ed i sondaggi effettuati in mare fino a 25 m di profondità, a Sud di Porto Vesme, lungo la costa sarda (Fig. 11), hanno sempre rivelato la presenza di sedimenti sabbiosi, senza soluzione di continuità. Si ritiene che il Canale raccolga tutto il trasporto di sedimenti convogliati verso Sud dal flusso netto dell'unità fisiografica n° 6. Le sponde del canale sono ricoperte da spiagge interessate dal moto ondoso in maniera differente in base alla loro posizione rispetto alle due bocche del canale: la bocca Nord, esposta in un limitato settore alle agitazioni del quarto quadrante, e quella Sud, esposta all'agitazione del terzo quadrante.

A partire dalla sponda Est, a Nord si incontra la spiaggia di Bo Cerbus che termina con il cordone litoraneo di Punta s'Aliga, di cui si dirà più avanti. Essa è esposta tangenzialmente al moto ondoso del quarto quadrante (Fig. 11) e, in misura nettamente minore per intensità, a quello del terzo. Segue la spiaggia di Punta Trettu, esposta solo al moto ondoso del quarto quadrante, che termina con un cordone litoraneo rivolto verso la laguna di S. Antioco. Continuando nell'ordine, in senso orario si incontrano le spiagge di Punta Dritta e di Calasetta della costa settentrionale dell'Isola di S. Antioco le cui retrospiagge sono ricoperte da campi di dune generate dai forti venti del quarto quadrante che penetrano nel Canale in direzione assiale. Infine, la piccola spiaggia di Cala Spalmatore nell'Isola di S. Pietro, rivolta verso la Sardegna e protetta dall'agitazione del mare aperto.



Cordone litoraneo di Punta s'Aliga

Come mostra l'istogramma della Figura 12, il cordone litoraneo di Punta s'Aliga, che è un altro esempio importante di cordone litoraneo della costa occidentale sarda, è sempre interessato da un intenso flusso netto diretto verso Sud. Conseguentemente, a differenza del cordone litoraneo di Corru Mannu, esso è in fase di forte evoluzione e, chiaramente, influenzato anche dai numerosi interventi e opere realizzate a Nord della sua radice. Infatti, anche prima del 1960, quando ebbero inizio le opere di difesa di Porto Vesme, tra il 1845 ed il 1954, la punta si era allungata di circa 500 m in direzione Sud-Sud Est corrispondente ad un avanzamento medio di circa 4.5 m/anno.

Dopo la realizzazione del porto di Porto Vesme e, soprattutto, a seguito della realizzazione delle difese radenti, costruite negli anni 1976-1977 per la protezione al piede della grande cassa di deposito dei fanghi residui della lavorazione della bauxite (Fig. 12), il cordone, a conferma della instabilità di questo tipo di morfologie, ha subito una trasformazione molto più veloce allungandosi di altri 500 m nell'arco di 26 anni (≈ 19 m/anno) e ruotando in senso orario di circa 10° .

Nella evoluzione verso un nuovo equilibrio, provocato dagli interventi di cui si è detto, il cordone ha modificato considerevolmente la linea di riva assottigliandosi in prossimità dell'estremità Sud della difesa radente e allargandosi verso la punta. I sedimenti che hanno alimentato quest'ultima evoluzione sono solo in piccola parte frutto del trasporto litoraneo che arriva nel Canale dalla zona a monte di Capo Altano dell'unità fisiografica, infatti il suo ritmo di crescita nel passato era, come si è detto, di appena 4.5 m/anno. Invece la crescita di 19 m/anno è stata in gran parte alimentata dall'assotti-

gliamento del cordone a Sud della difesa radente ove, recentemente, si è formata una piccola baia il cui ampliamento verso terra è rallentato dalla presenza di una pineta nella retrospiaggia, (Fig. 13).

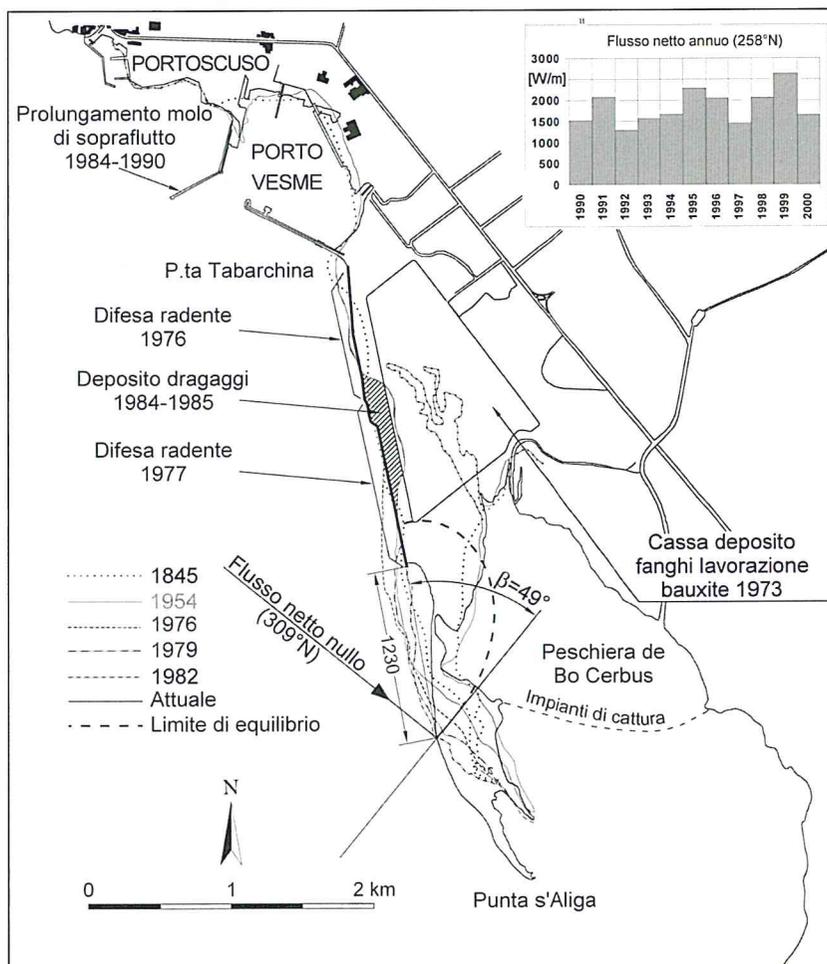


Figura 12 - La spiaggia di Bo Cerbus e il cordone litoraneo della sua estremità meridionale. La direzione di 309°N corrisponde all'orientamento della spiaggia con flusso netto nullo.

Se al posto del cordone litoraneo ci fosse stata una estesa spiaggia sabbiosa l'insenatura avrebbe potuto procedere fino a formare una baia asimmetrica la cui linea di riva al limite di equilibrio avrebbe raggiunto la forma polinomiale (11). È stato fatto un tentativo di valutare quale sarebbe potuta essere la linea di equilibrio di questa ipotetica spiaggia assumendo una linea di controllo di lunghezza $R_0 = 1230 \text{ m}$ e un angolo di attacco del moto ondoso a flusso netto nullo tale da formare l'angolo $\beta = 49^\circ$ con la linea di controllo. La lunghezza e l'orientamento della linea di controllo sono state scelte tra la testata della difesa radente e il punto attorno al quale appare avvenga la rotazione della linea di riva del cordone. Utilizzando i parametri detti sopra si è ottenuta la ipotetica linea di equilibrio che nella Figura 12 è riportata con un tratteggio.

Nella realtà, con il progredire dell'insenatura, prima che si raggiunga la condizione di equilibrio, si produrrà la rottura del cordone litoraneo che si trasformerà in un isolotto di sabbia.



Figura 13 - Baia formatasi in prossimità dell'estremità Nord del cordone di Punta s'Aliga dopo la costruzione della difesa radente di cui nella foto, a sinistra, si intravede l'estremità meridionale.

Conclusioni

Utilizzando i dati ondametrici della boa RON-Alghero è stato calcolato, anno per anno, il flusso netto del moto ondoso ed il flusso medio annuo di tutta la costa occidentale della Sardegna e sono state individuate sei unità fisiografiche.

Nelle quattro unità fisiografiche a Sud di Capo Marargiu sono state prese in esame le morfologie di alcune spiagge asimmetriche e simmetriche e di due cordoni litoranei.

Il flusso netto medio annuo che interessa le quattro spiagge simmetriche esaminate è nullo rispetto al loro orientamento, con scostamenti dalla normale inferiori ai 10° . Esse formano una morfologia a se stante, distinta da quella delle spiagge a baia asimmetrica, e il loro grado di stabilità può essere valutato verificando se la direzione del flusso netto nullo coincide con l'asse di simmetria. Nel caso della spiaggia di S. Nicolò (Fig. 9) questa condizione si verifica con precisione. Tutte le retrospiagge delle spiagge simmetriche esaminate sono ricoperte da estesi campi di dune.

Le quattro spiagge asimmetriche esaminate, come tutti questi tipi di spiaggia, sono interessate da un flusso netto obliquo che forma un angolo con la linea di controllo sempre inferiore a 80° .

Dei due cordoni litoranei esaminati, quello di Corru Mannu (Fig. 7), nel Golfo di Oristano, è particolarmente stabile, come è mostrato dalla sua lunghezza, invariata da oltre 150 *anni*, e dagli scarsi effetti subiti dalla sua linea di riva a seguito della realizzazione di due opere a gettata. La sua stabilità, che è in accordo con la condizione di flusso netto medio nullo ottenuto con il calcolo, porta a ritenere che questo cordone costituisca una singolarità di questo tipo di morfologia o, perlomeno, una situazione limite.

Il cordone litoraneo di Punta s'Aliga (Fig. 12), nel canale di S. Pietro, a differenza di quello di Corru Mannu, è interessato da un flusso netto medio molto angolato rispetto alla sua linea di riva ed è instabile, come documentano le rapide variazioni che si sono avute a seguito della realizzazione di opere rigide a monte.

Dall'esame condotto appare evidente che il flusso netto medio annuo, calcolato nella forma assai semplice della (4), può essere un valido strumento per la classificazione della morfologia delle spiagge esposte ad un regime di moto ondoso persistente e per dare un contributo alla valutazione della loro stabilità. Ad esempio, nel caso del cordone litoraneo di Punta s'Aliga, mediante il calcolo

del flusso netto medio annuo, sarebbe stato possibile prevedere le trasformazioni della spiaggia che sarebbero conseguite alla realizzazione della difesa radente.

Nel campo applicativo dell'ingegneria costiera il flusso netto medio annuo dovuto a moto ondoso persistente rappresenta un dato di base per la progettazione di opere di difesa rigide da realizzare, a protezione di spiagge in erosione, in alternativa ai pennelli e ai frangiflutti distaccati dalla riva. Infatti, noto il flusso netto, se la sua direzione non è perpendicolare alla riva, stabilita la disposizione delle opere di protezione, mediante la (11), ricorrendo anche al modello semiempirico di Gonzales e Medina (2001) che permette di individuare in maniera obbiettiva la linea di controllo, si può prevedere la forma stabile della spiaggia.

Bibliografia

- Bird E. C. F. (1984) - *Coasts: an introduction to coastal geomorphology*. 3^a ed. Australian National University Press, Canberra.
- Bretschneider C. L. (1968) - *Significant waves and wave spectrum*. Ocean Industry, Feb. 1968, pp. 40-46.
- CUR (1987). *Manual on artificial beach nourishment*. Delft Hydraulics. Report 130.
- Davies J. L. (1958) - *Wave refraction and the evolution of shoreline curves*. Geogr. Stud. 5: 1-14.
- Davies J. L. (1964) - *A morphogenetic approach to world shorelines*. Zeits. für geomorph. 8, Sup. 127-142.
- Fairbridge R. W. (1961) - *Eustatic change in sea level*. Physics and chemistry of the earth, 4: 99-185.
- Gonzales M. e Medina R. (2001). *On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches*. Coastal Engineering, 43: 209-225.
- Halligan G. H. (1906) - *Sand movement on the New South Wall coast*. Proc. Limn. Soc. N. S. W., 31: 619-640.
- Ho S. K. (1971) - *Crenulate shaped bays*. Asian Inst. Tech. Master Eng. Thesis, N° 346
- Hsu J. R. C. e Evans C. (1989) - *Parabolic bays shaped and applications*. Proc. Instn. Civil Engrs. 87: 557-570.
- Komar P. D. e Inman D. L. (1970) - *Longshore sand transport on beaches*. Journal of Geophysical Research, 75: 5914-5927.
- Krumbein W. C. (1944) - *Shore processes and beaches characteristics*. U. S. Corps. of Engineers. Beach Erosion Board. Mem. N° 3.
- Le Blond P. H. (1972) - *On the formation on spiral beaches*. Proc. 5th Inter. Conf. Coastal Eng. ASCE 2: 1331-1345.
- Meyerhoff A. A. (1970) - *Continental drift: implication of pale magnetic studies, meteorology, physical oceanography, and climatology*. Journal Geology, 78: 1-51.
- Mitsuyasu H. (1970) - *On the growth of spectrum of wind-generated waves (2) – spectral shape of wind waves at finite fetch*. Proc. Japanese Conf. Coastal Engrs., pp. 1-7.
- Mitsuyasu et al. (1975) - *Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy*. J. Physical Oceanogr., 5: 114-130
- Rea C. C. e Komar P. D. (1975) - *Computer simulation models of a hooked beaches shoreline configuration*. J. Sed. Petrology, 45: 866-872.
- Shepard F. P. (1937) - *Revised classification of marine shoreline*. Journal Geology, 45: 602-624.
- Silvester R. (1960) - *Stabilization of sedimentary coastlines*. Nature 188. Paper 4749: pp. 467-536.
- Silvester R. (1962) - *Sediment movement around the coastline of the world*. Proc. Instn. Civil Engrs.: pp. 289-315.
- Silvester R. (1965) - *Coral reefs, atolls and guyots*. Nature 207. Paper 4498: pp. 681-688.
- Silvester R. e Hsu J. R. C. (1997) - *Coastal stabilization*. World Scientific, Singapore, pp. 578.

Manoscritto ricevuto il 12/11/2003, accettato il 10/02/2004.