

XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche
Palermo, 14-17 settembre 2010

INFLUENZA DEL CLIMA ONDOSO E DELLE MAREE SULLA POSIZIONE DELLA LINEA DI RIVA: LIDO SIGNORINO (MARSALA)

G. Manno¹, C. Lo Re¹, G. Ciraolo¹, A. Maltese¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università degli Studi di Palermo, Italia, e-mail: manno@idra.unipa.it

SOMMARIO

La conoscenza della posizione della linea di riva nel tempo è indispensabile per verificare la necessità di opere di difesa e per lo sviluppo di piani di gestione costiera. Essa rappresenta l'intersezione tra la superficie marina e quella terrestre, non è un'entità geometrica fissa, ma varia continuamente a causa del moto ondoso e delle fluttuazioni del livello marino ed è in continuo movimento a causa dei fenomeni di trasporto solido. La maggior difficoltà riscontrata nelle operazioni di rilievo è la determinazione esatta della sua posizione. Risulta pertanto necessaria la comprensione delle caratteristiche del moto ondoso (conoscenza delle mareggiate), dei livelli marini e del profilo trasversale della spiaggia al momento del rilievo. Questo lavoro di ricerca ha come principale obiettivo l'analisi dell'influenza del clima ondoso e della marea sulla stima della posizione della linea di riva attraverso immagini telerilevate, inoltre viene proposta una nuova metodologia messa a punto su un caso di studio reale. La metodologia proposta ha carattere multi disciplinare, considera infatti, sia aspetti geomorfologici, sia aspetti idraulico marittimi e utilizza strumenti tipici del telerilevamento. Lo studio del clima ondoso è stato condotto a partire dalla mareggiata ordinaria fatta propagare nell'area in studio attraverso un modello di onda spettrale (SWAN: Simulating WAVes Nearshore). Inoltre si sono considerate sia le oscillazioni mareali sia la massima altezza raggiunta dall'onda sulla spiaggia emersa (run-up). Il caso in studio ha messo in evidenza gli errori prodotti nella stima della posizione della linea di riva mediante la semplice individuazione della stessa attraverso ortofoto georiferite (1994, 2000, 2006) infatti in tal modo il tracciamento della linea di riva viene eseguito considerando solamente l'interfaccia "asciutto/bagnato". Riportando sulle ortofoto lo spostamento della linea di riva determinato dal clima ondoso associato all'ordinaria mareggiata e riportando anche le massime oscillazioni mareali, si è riscontrato che durante l'intervallo temporale analizzato l'errore aggiuntivo prodotto risulterebbe superiore a 15 m, inficiando l'attendibilità di uno studio diacronico dell'evoluzione della linea di riva.

1 INTRODUZIONE

Uno dei problemi di maggiore rilevanza nello studio delle coste è l'erosione delle spiagge. È evidente che l'utilizzo della fascia costiera rappresenta uno dei fattori

strategici che coinvolge non solo gli equilibri geomorfologici, spesso profondamente alterati, ma anche quelli ecologici, estremamente sensibili ai cambiamenti.

La linea di riva è definita come l'intersezione tra la superficie libera relativa alla bassa marea e la superficie terrestre. Tale linea delimita le acque di mare aperto con le acque che provengono dalla terra ferma. La normale oscillazione della linea di riva è frutto della continua evoluzione del litorale. Quando la linea di riva, negli anni, arretra di parecchi metri, si parla di erosione costiera. Tutto ciò è legato alla dinamica costiera, ovvero agli effetti diretti ed indiretti di alcuni fenomeni fisici di carattere geomorfologico ed idraulico. L'osservazione e lo studio di tali fenomeni è strettamente legato alla individuazione della posizione della linea di riva in un preciso periodo temporale, quindi, deve essere la prima variabile da determinare.

Risulta evidente che un errato posizionamento iniziale produce errori su tutto lo studio. Un approccio rigoroso, quindi, dovrebbe tenere conto delle incertezze legate a questa operazione.

In questo lavoro si è voluto esaminare il caso in cui si dispone di riprese aeree ripetute nell'arco di alcuni anni. La linea di riva ottenuta come intersezione tra "acqua e terra" è la linea effettiva, o essa è influenzata dal clima ondoso e dalla marea esistente al momento della ripresa? Per potere rispondere a queste domande si è voluto verificare, attraverso un caso studio, quale è l'errore introdotto da una definizione della linea di riva che non tiene conto del clima ondoso e della marea.

Inoltre per determinare la zona più frequentemente bagnata dalle onde si è ritenuto opportuno valutare la "mareggiata ordinaria". Infatti è utile definire la linea di riva tenendo in considerazione che la parte della spiaggia, ricoperta dalle mareggiate più frequenti appartiene al mare piuttosto che alla terra. Quindi, a prescindere dal clima ondoso presente al momento della ripresa, si è voluto valutare la posizione della linea di riva in corrispondenza di tale mareggiata considerando la porzione di spiaggia appartenente al mare.

La metodologia di studio applicata alla spiaggia Lido Signorino (Marsala), consta delle seguenti fasi:

1. descrizione geologico-geomorfologica del sito d'interesse. Tale fase è stata necessaria per caratterizzare la spiaggia in studio e identificare la natura dei sedimenti che costituiscono la spiaggia stimare la pendenza media. I sedimenti, infatti, oltre ad essere soggetti all'azione erosiva ed al trasporto ad opera del mare, determinano la pendenza della spiaggia;
2. analisi diacronica della linea di riva effettuata attraverso l'uso di ortofoto per un periodo di tempo compreso tra il 1994 (le riprese sono state eseguite nel periodo compreso tra il 07-06-1994 e il 04-04-1995) e il 2006 (ripresa del 27-08-2005).
3. Per ogni anno è stata individuata una linea di riva;
4. studio della mareggiata ordinaria;
5. propagazione del moto ondoso;
6. stima della massima risalita dell'onda relativo alla mareggiata ordinaria;
7. influenza della marea.

2 GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA DELLA COSTA MARSALESE

La costa marsalese appartiene geologicamente alla Pianura costiera di Marsala - Mazara del Vallo (Figura 1). La piana ha direzione di allungamento NO-SE ed è

lievemente degradante verso mare (NE-SO). Il territorio è caratterizzato da lineamenti morfologici pressoché costanti e regolari, tipici delle ampie pianure costiere modellate e spianate dall'azione del mare nel periodo Quaternario.

La spiaggia in studio ricade tra Torre Tunna ($37^{\circ}45'32,26''N$, $12^{\circ}27'40,00''E$) a sud della città di Marsala e Torre Sibilliana ($37^{\circ}43'36,31''N$, $12^{\circ}28'11,23''E$). Le due torri delimitano la spiaggia ricadendo rispettivamente nei due promontori a nord e a sud di essa. Il tratto di spiaggia così delimitato si estende per circa 3 km.

La geologia dell'area in esame è rappresentata, nella sua porzione più superficiale, quasi esclusivamente dalla presenza di sedimenti costieri, di tipo calcarenitico, d'età quaternaria, modellati dalle periodiche oscillazioni eustatiche. In seguito ad una fase trasgressiva del Pleistocene medio si depose sulle Calcareniti di Marsala una placca calcarenitico-sabbiosa alla quale Ruggieri e Unti, (1974) diedero il nome di Grande Terrazzo Superiore (G.T.S.). Compresi tra il G.T.S. e un terrazzo attribuito al Versiliano (oggi sommerso), sono stati individuati sette ordini di terrazzi (D'Angelo e Vernuccio, 1996), che sono stati classificati in funzione della loro quota (dal più antico al più recente: 3 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 75 m, 100 m e G.T.S.). La loro identificazione ha tenuto conto del fatto che ciascuno di essi può essere rappresentato da un gradino morfologico, da una piattaforma di abrasione e dall'individuazione di linee di spiaggia. In tal senso si può capire come la linea di costa sia potuta variare negli ultimi periodi geologici.

La spiaggia è costituita da sabbie molto fini con rari (Torre Sibilliana) accenni di diagenesi (D'Angelo e Vernuccio, 1996). Per quanto riguarda le caratteristiche granulometriche i grani hanno dimensioni comprese fra il decimo di millimetro ed il millimetro con una prevalente presenza di grani di dimensione prossima al millimetro, comunque hanno taglia arenitica. Il sedimento può ritenersi monogranulare.



Figura 1. Ubicazione geografica del tratto di costa d'interesse con segnato il settore di traversia, il dominio di calcolo e le direzioni del moto ondoso più critiche. Tratteggiato in rosso il dominio di calcolo.

3 ANALISI DIACRONICA

Per ricostruire con precisione le variazioni lineari e areali della costa marsalese avvenute negli ultimi dodici anni, è stato realizzato un modello di analisi vettoriale su base informatizzata in ambito GIS che ha previsto l'utilizzo di ortofoto per un periodo compreso tra il 1994 e il 2006. Le ortofoto utilizzate, sono tutte nel sistema di riferimento UTM-WGS84-33N e in particolare si tratta: volo Italia 1994 in scala di grigio e risoluzione spaziale nominale, R_s , pari a 1 m, Volo IT 2000 a colori e $R_s = 1$ m ed infine il volo IT 2006 a colori e $R_s = 0,5$ m.

Per riportare e poi mettere a confronto le linee di costa di età diversa è stato utilizzato un modello di elevazione digitale della spiaggia, ottenuto attraverso un rilievo topografico svolto in situ nel mese di maggio 2010.

Si fa presente che per la disomogeneità della risoluzione spaziale delle immagini telerilevate, e talvolta per oggettive difficoltà nella corretta digitalizzazione della linea di riva, questa può essere soggetta a piccoli errori di accuratezza planimetrica. Nel caso oggetto di studio, si ritiene che il margine di errore per ogni linea di costa sia contenuta entro i 5 metri. Le immagini sono state georiferite e per ognuna di esse sono stati individuati un numero di punti di controllo, uniformemente distribuiti, mediamente compreso fra 6 e 10. Le immagini georiferite sono state usate per costruire fotomosaici estesi a tutto il litorale, oggetto di analisi, per ogni anno di ripresa aerea. Sulle immagini così ottenute è stata tracciata la corrispondente linea di riva utilizzando strumenti di vettorializzazione in ambiente GIS. Il confronto delle ortofoto ha posto in evidenza delle criticità legate alla natura stessa dei dati telerilevati ovvero agli errori di graficismo, al georiferimento stesso, e ai valori di marea e di clima ondoso presenti al momento della ripresa aerea.

Partendo da dati e osservazioni precedenti circa le dinamiche locali della linea di costa marsalese, si è effettuata una suddivisione della spiaggia in nove tratti, partendo dalla località Torre Tunna alla località Torre Sibilliana.

Per ognuno dei nove tratti sono stati misurati, lungo le sezioni trasversali, tracciate ogni 50 m, gli spostamenti della linea di riva. Ogni sezione trasversale, nell'intersecare le diverse linee di riva, ha consentito la definizione di una serie di elementi vettoriali (linee) caratterizzanti una determinata lunghezza. I valori ottenuti, identificabili in positivi e negativi, sono stati utilizzati per definire rispettivamente le variazioni minime e medie della linea di costa in ogni singolo tratto nei vari periodi analizzati.

4 STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

La dinamica costiera è governata dagli effetti diretti ed indiretti di alcuni fenomeni fisici di carattere idraulico. I cosiddetti parametri idraulico marittimi che rivestono interesse sono: le onde, le correnti e le escursioni di livello. Ma di fatto per la metodologia proposta l'analisi del moto ondoso rappresenta il punto base per uno studio di migliore dettaglio. Preliminarmente all'analisi del moto ondoso occorre eseguire un'analisi dell'esposizione geografica del tratto costiero in esame.

Nel caso in studio il settore di traversia ha un'ampiezza di 131° con onde che possono provenire dalle direzioni comprese tra 195° e 315° N. Quest'ultima direzione è stata esclusa a causa della presenza delle Isole Egadi, pertanto l'intervallo risulta essere 195° e 300° N (vedi Figura 1).

Identificato il settore di traversia, sono stati acquisiti i dati ondametrici, ricavati per il tratto di costa considerato, dalla boa di Mazara del Vallo appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (RON). La boa è ancorata a SO del porto di Mazara del Vallo e le sue coordinate sono: latitudine $37^{\circ}31'00''\text{N}$, longitudine $12^{\circ}32'00''\text{E}$ (Atlante delle onde nei mari italiani, 2006). La boa registra gli spostamenti verticali con intervallo di ± 20 m (risoluzione 1 cm con un'accuratezza del 3%) e direzioni di provenienza con intervallo di $0^{\circ}\div 360^{\circ}$ (risoluzione $1,5^{\circ}$ con un'accuratezza $0,5^{\circ}\div 2^{\circ}$).

Questa boa è l'unica presente nei pressi dell'area oggetto di indagini ed è gestita attualmente dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), i dati pertanto sono forniti dallo stesso ente. Si sono potuti acquisire i dati relativi: alle altezze d'onda significative, (H_s [m]), ai periodi d'onda di picco e medi (T_p e T_m [s]) e direzione media di provenienza del moto ondoso (D_m [$^{\circ}\text{N}$]) per un intervallo di tempo compreso tra il 01 luglio 1989 ed il 04 aprile 2008. Poiché la boa si trova in punto con esposizione ventosa diversa da quella del lato da cui entrano le onde nel dominio di calcolo, si è effettuata una trasposizione geografica, con correzione delle altezze significative, dei periodi e delle direzioni, nel punto medio del lato NO del dominio.

I dati ondametrici hanno permesso, attraverso uno studio di propagazione dell'onda da largo sotto costa, di valutare l'entità di risalita delle onde sulla spiaggia emersa consentendo una stima sulla posizione della linea di riva.

4.1 Analisi statistica dei dati ondametrici

Prima di descrivere la metodologia adottata è bene definire cosa si intende qui per mareggiata e quando questa può essere definita "ordinaria". La definizione di mareggiata adottata è quella di una successione di stati di mare durante i quali la $H_s(t)$ supera una soglia critica h_{crit} , e non scende al di sotto di tale soglia per durate di tempo superiori ad un valore Δt_{crit} prefissato. Nel Mediterraneo, il valore Δt_{crit} può essere fissato di 12 ore e la soglia h_{crit} di 1,5 m (Boccotti, 2008). Nel corso dei giorni e degli anni si verificano mareggiate più o meno importanti; in questo lavoro per mareggiata "ordinaria" si è intesa quella che viene raggiunta o superata almeno una volta nell'arco di un anno. Al fine di determinare la mareggiata ordinaria si è utilizzata una metodologia semplificata che in questa fase comunque risulta funzionale allo scopo. Per ciascun anno presente nella serie storica, sono state estratte le mareggiate. Tali mareggiate sono state successivamente raggruppate secondo le direzioni di provenienza. A tale fine si sono presi 12 intervalli di 30° a cavallo delle direzioni 15, 45, 75, 105, 135, 165, 195, 225, 255, 285, 315, 345 gradi orari rispetto al Nord [$^{\circ}\text{N}$].

Tra tutte le mareggiate verificatesi nel periodo di osservazione per ciascuna direzione bisogna identificare quella ordinaria. A tale scopo si sono raccolti i valori di picco di ciascuna mareggiata e il periodo di onda medio di ciascuna mareggiata.

Come valore ordinario è stato scelto quello che corrisponde al minimo dei valori di picco per ciascuna mareggiata, in quanto, nell'arco del periodo osservato, tale valore è stato raggiunto o superato almeno una volta l'anno.

Tra tutte le direzioni si è scelto di effettuare lo studio della linea di riva soltanto per onde provenienti dalla direzione 285° N, poiché da essa provengono le più frequenti mareggiate e le altezze di picco maggiori. Tra tutti i valori di picco di mareggiata relativi alla direzione 285° N il minimo si è verificato nel 2001 ($H = 2,18$ m), a cui è associato un periodo $T = 5,51$ s. Questi valori, così ricavati, sono serviti per applicare il modello di propagazione delle onde (SWAN).

Anni Direzioni	195° N	225° N	255° N	285° N	315° N
1989	-	-	-	3,49	-
1990	2	3,09	-	5,89	3,62
1991	-	,	2,31	6,26	2,36
1992	-	4,3	3,27	4,25	3,99
1993	-	5,15	3,27	6,87	4,01
1994	1,88	-	2,09	4,97	4,18
1995	-	-	-	6,10	3,73
1996	2,3	-	-	6,00	-
1997	-	-	-	4,43	3,66
1998	2,5	1,85	2,53	7,19	3,9
1999	-	2,45	-	2,67	6,27
2000	-	2,33	2,49	2,55	4,44
2001	-	2,26	2,88	2,18	5,15
2002	-	-	-	4,64	-
2003	-	-	-	-	-
2004	-	5,43	-	5,54	2,92
2005	3,72	5,64	2,52	6,16	-
2006	1,91	1,84	-	6,34	4,04
2007	-	-	3,8	5,14	-
2008	-	2,25	3,55	3,92	-
Min	1,88	1,85	2,09	2,18	2,36

Tabella 1. Nella tabella si riportano i picchi delle mareggiate H_s [m] più alte per ciascun anno di osservazione, le loro rispettive direzioni di propagazione ed i valori minimi della serie storica.

4.2 Il modello SWAN

SWAN è un modello d'onda di terza generazione, ed è utilizzato per ottenere stime accurate dei parametri d'onda in laghi, estuari e zone costiere note: la batimetria, il clima ondoso al contorno e le condizioni iniziali di vento. Questo modello sviluppato dal Delft University si basa sull'equazione di bilancio energetico dello spettro.

Le celerità di propagazione delle onde sono ottenute attraverso la teoria lineare come in *Whitham* (1974) e *Mei* (1983). Il modello si basa sul principio che tutte le informazioni sulla superficie del mare si possono calcolare a partire dalla varianza spettrale d'onda $E(\sigma, \theta)$ ovvero dalla distribuzione di energia del moto ondoso sulle frequenze angolari σ e sulle direzioni di propagazione θ . Il modello determina l'evoluzione delle onde attraverso la variazione dell'azione di densità $N(|\vec{x}|, t; \sigma, \theta)$ nello spazio \vec{x} , e nel tempo t . Dove con azione di densità si intende il rapporto tra la varianza spettrale e la frequenza angolare ($N = E/\sigma$). La variazione dell'azione di densità N è regolata dalla seguente equazione di bilancio (*Mei*, 1983; *Komen et al.*, 1994):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U}) \cdot N] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

Il lato sinistro è la parte cinematica dell'equazione in cui il secondo termine indica la propagazione di energia delle onde nelle due dimensioni geografiche (\vec{x}), con la celerità di gruppo $\vec{c}_g = \partial \sigma / \partial \vec{k}$ derivata dalla relazione di dispersione lineare

$\sigma^2 = g |\bar{k}| \cdot \tanh(|\bar{k}| d)$, vettore di numero d'onda, d profondità locale.

Il terzo termine rappresenta l'effetto di traslazione della frequenza angolare a causa della variazione di profondità e della presenza delle correnti. Il quarto termine rappresenta l'effetto di rifrazione indotto sempre dalla variazione di profondità e dalla presenza delle correnti. Le grandezze c_σ e c_θ sono le celerità di propagazione nello spazio spettrale (σ , θ). Il lato destro dell'equazione contiene il termine sorgente S_{tot} , che rappresenta tutti i processi fisici che generano, dissipano, o ridistribuiscono l'energia delle onde. In questo lavoro tra i termini sorgente vi è inserito anche il termine dissipativo di frangimento. È stata usata una griglia di calcolo a maglia quadrata e passo di 100 m e nelle simulazioni effettuate non si è tenuto conto dell'azione del vento. Sono state utilizzate altezze significative delle onde di ingresso pari a 2,18 m, con un periodo di 5,51 s e direzione di propagazione 285°N.

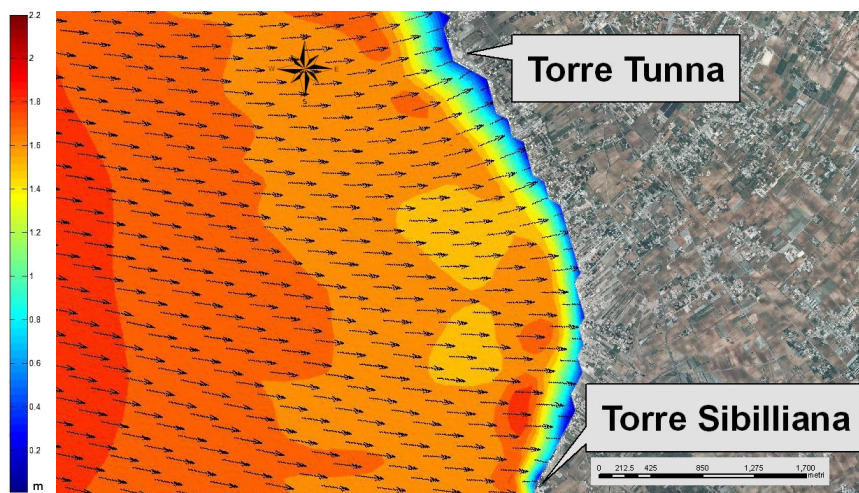


Figura 2. Il modello SWAN applicato al tratto di costa considerato. Le frecce indicano la direzione di propagazione dell'onda, mentre la scala dei colori le altezze d'onda significative [m].

I risultati di una delle simulazioni effettuate sono stati riportati nella Figura 2. Attraverso l'analisi di tali risultati si sono ricavate l'altezza significativa $H_s = 1,8$ m e il periodo $T = 4,43$ s, relativi alla batimetria -60 m. In seguito questi dati sono serviti per il calcolo del *run-up* come specificato nel seguente paragrafo.

4.3 Il calcolo della massima risalita dell'onda sulla spiaggia (*run-up*)

Una volta ricostruita la propagazione del moto ondoso al largo si vuole quantificare la massima risalita dell'onda sulla spiaggia. Il *run-up* è stato calcolato attraverso l'uso di una formula empirica proposta da *Nielsen e Hanslow*, (1991).

Questa formula è utilizzabile per spiagge naturali, sabbiose e con inclinazione $\beta_f = 1,5^\circ \div 10,8^\circ$ e diametro medio delle particelle sabbiose $d = 0,18 \div 0,8$ mm. La sua espressione è la seguente:

$$R = c \cdot L_{zwm} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

essendo: $c = 0.89$;

$$L_{zwm} = \begin{cases} 0,6(H_{orms} \cdot L_0)^{0,5} \tan \beta_f & \tan \beta_f \geq 0,1 \\ 0,05(H_{orms} \cdot L_0)^{0,5} & \tan \beta_f < 0,1 \end{cases} \quad (3)$$

In cui si è indicato con:

- L_{zwm} la scala verticale per i valori di Rayleigh del run-up (Nielsen e Hanslow, 1991);
- H_{orms} il valore quadratico medio delle altezze d'onda a largo appartenenti alla mareggiata;
- L_0 la lunghezza d'onda a largo calcolata con la nota espressione $L_0 = gT^2/2\pi$, valida su acque profonde come nel caso in esame, in cui il periodo T è stato assunto pari al valore medio registrato durante la mareggiata.

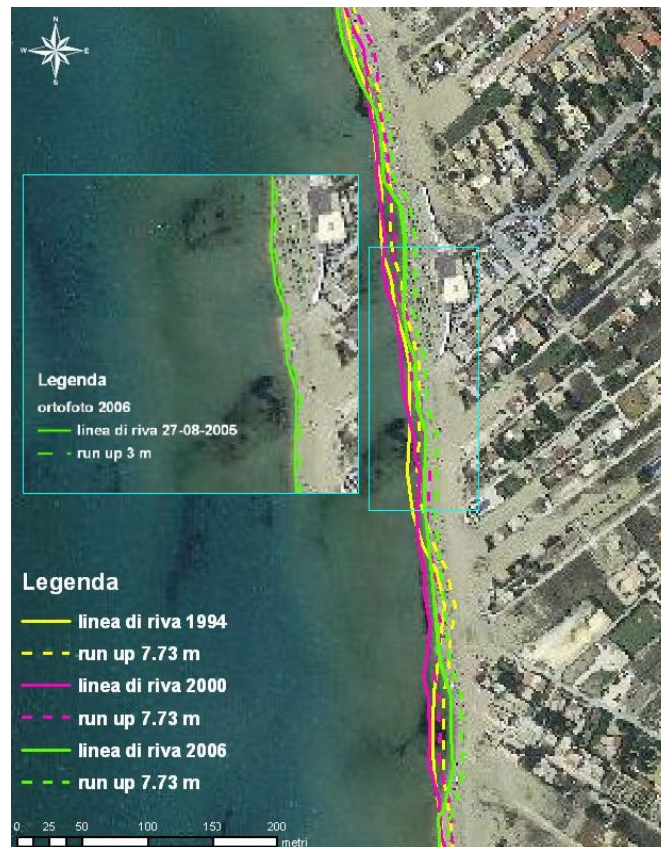


Figura 3. Linee di riva degli anni 1994, 2000 e 2006 con i *run-up* relativi alla mareggiata ordinaria (7,73 m). L'ortofoto 2006 è stata ripresa da un volo aereo in data 27-08-2005 (in questa data il *run-up* è di 3 m).

Nel caso in studio, la pendenza media della spiaggia è pari a $\tan \beta_f = 0,0359$ (Figura 4), avendo assunto $H_{orms} = 1,27$ m, la massima risalita dell'onda risulta pari a 7,73 m. Nell'analizzare il risultato ottenuto è opportuno puntualizzare che la formula adottata

fornisce un valore di *run-up* approssimato per eccesso, come peraltro riportato in letteratura e che nel futuro si prevede di utilizzare un modello di *run-up* più sofisticato.

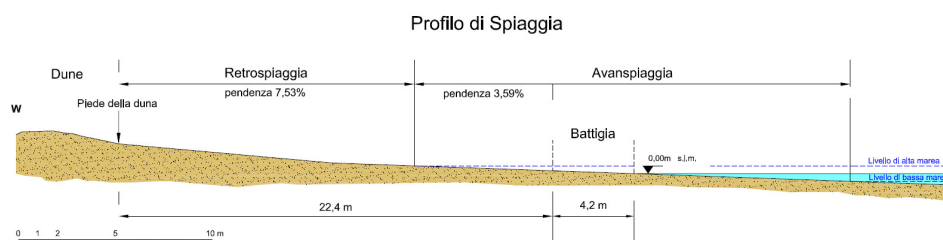


Figura 4. Profilo rappresentativo della spiaggia di Lido Signorino (Marsala). La spiaggia presenta due pendenze diverse, una riguardante l'area di retro spiaggia e una riguardante il tratto compreso tra questa e la battigia.

4.4 Le maree

Per quantificare l'effetto dovuto alle oscillazioni di marea sulla posizione della linea di riva, si è fatto riferimento ai dati registrati presso la stazione della Rete Mareografica Nazionale dell'ISPRA di Porto Empedocle, ritenuta adatta per una valutazione di massima dei livelli di marea del tratto di litorale in esame. Sono stati considerati soltanto i dati omogenei ovvero quelli relativi al decennio compreso tra il 01-1-1998 ed il 26-10-2008. Le fluttuazioni massime rilevate nel periodo di osservazione risultano dell'ordine di ± 40 cm. Tenendo conto di una pendenza media della spiaggia in prossimità della battigia di circa 3,59% (vedi Figura 4), si ottiene che l'incertezza sulla posizione della linea di costa, per effetto delle sole variazioni di marea è nella peggiore delle ipotesi, dell'ordine di ± 10 m. Se si ipotizza che al momento del rilievo cartografico o della ripresa della ortofoto la posizione della linea di costa possa essersi trovata in una delle posizioni estreme corrispondenti alla massima escursione, negativa o positiva, di marea, spostando tale linea parallelamente a se stessa di 10 m verso la terra ferma o verso il mare, si determinerebbe quale sarebbe stata invece la linea di costa nelle due ipotesi considerate.

5 CONCLUSIONI

La nuova metodologia proposta, sebbene in fase preliminare, riesce a valutare l'influenza del clima ondoso e delle maree nell'individuazione della posizione della linea di riva su immagini telerilevate. Esse sono infatti molto spesso gli unici elementi cartografici disponibili della spiaggia, e quindi gli unici elementi sui quali è possibile basare la ricostruzione storica dell'evoluzione morfologica del litorale. Alle fotografie aeree sono associate difficoltà nella determinazione della posizione della linea di riva per l'indeterminazione generata dalla scala di restituzione, per l'indeterminazione visiva del limite asciutto della spiaggia, nonché per l'indeterminazione delle caratteristiche del moto ondoso e dei livelli nel momento della ripresa aerea.

Il caso in studio ha mostrato come il moto ondoso associato alle caratteristiche mareali del sito produce un errore nel posizionamento della linea di riva dell'ordine di 15 m. Si sono in questo modo delimitate delle aree aventi come limiti sia la linea di riva ricavata dalla ortofoto, sia il *run-up* calcolato (vedi Figura 3). Tali fasce sono

strettamente legate a mareggiate ordinarie perché al verificarsi di esse sono sommerse dall'acqua. In questi termini queste aree dovrebbero essere trattate come fasce di rispetto e vincolate anche in termini di demanio marittimo. In aggiunta all'incertezza di 7,73 m prodotta dal *run-up* bisogna considerare un'eventuale incertezza derivata dalle fluttuazioni mareali che nel caso in studio possono provocare errori anche dell'ordine di ± 10 m.

I limiti della metodologia sono strettamente legati alla qualità dei dati ottenuti attraverso i rilievi in situ e alla disponibilità di dati di boa a largo. La stima del *run-up* è stata effettuata attraverso una espressione empirica, questa è sicuramente una scelta, che in assenza di alternative, fornisce un valore numerico attendibile, nel futuro per verificare i limiti legati alla stima del *run-up* si prevede il confronto con un modello idraulico con la condizione al contorno di riva.

La metodologia proposta e i risultati ottenuti evidenziano l'importanza della conoscenza del clima ondoso al momento del rilievo fotogrammetrico, infatti sulla base di tale conoscenza, è possibile effettuare una rigorosa verifica e scongiurare possibili errori grossolani nel posizionamento della linea di riva.

BIBLIOGRAFIA

- Atlante delle onde nei mari italiani, APAT, Marzo 2006
- Baldock T.E., Weir F. and Hughes M.G. Morphodynamic evolution of a coastal lagoon entrance during swash overwash, *Geomorphology* 95, Issues 3-4, 15 March 2008, pp 398-411.
- Boccotti P. Idraulica Marittima, UTET 2008.
- Coastal Engineering Manual, Engineers, U.S.A., Department of the Army, Washington, 2002
- D'Angelo U. & Vernuccio S. I terrazzi marini quaternari dell'estremità occidentale della Sicilia. Mem. Soc. Geol. It., LI, 1996, pp. 585-594.
- Komen, G.J., et alii., Dynamics and Modelling of Ocean waves. Cambridge University Press (1994), 532 pp.
- Mei, C.C. The applied dynamics of ocean surface waves., John Wiley, NY, 1983
- Neilsen, P., & D. J. Hanslow, Wave *run-up* distributions on natural beaches, *J. Coastal Res.*, 7, 1991, pp. 1139-1152.
- Ruggieri, G., Unti, M. Pliocene e Pleistocene nell'entroterra di Marsala. Bollettino Società Geologica Italiana 93, 1974, pp.723-733.
- Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger Jr A.H. Empirical parameterization of setup, swash and runup, *Coastal Engineering* 53 (7) (2006), pp. 573-588
- Tomasicchio U. Manuale di Ingegneria portuale e costiera BIOS 2001.
- Whitham, G.B., Linear and Nonlinear Waves. John Wiley and Sons Inc., New York, NY. (1974)
- Zijlema, M., 2010, Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids, *Coastal Engineering*, 57, 267-277.