

HYDRO GEO

LA RIVISTA BIMESTRALE DI TECNICA, CULTURA E SCIENZA DEL TERRITORIO

FEBBRAIO 2006



Storia della costruzione del territorio: idrovie a sistema, nella storia del territorio toscano



Rilevamento del territorio: il rilievo Lidar della costa dell'Emilia-Romagna



Rischio idraulico: tra Savio e Rubicone. Uno Studio di Fattibilità per il riassetto idraulico ed ambientale



Tecnologie ambientali: consolidamento del versante montuoso e ripristino di un tratto della sede stradale in Liguria



Speleologia: il carsismo sottomarino del canale d'Otranto





Il rilievo Lidar della costa dell'Emilia-Romagna: uno strumento per la valutazione dell'impatto delle mareggiate sulle zone costiere e per la caratterizzazione della morfodinamica delle spiagge

La fascia costiera della Regione Emilia-Romagna è fortemente a rischio di ingressione di acque marine in seguito a fenomeni di mareggiata. La vulnerabilità di tale fascia è di particolare interesse per la pianificazione territoriale in conseguenza dell'alto livello di sviluppo socio-economico dei comuni costieri e della presenza massiccia di insediamenti urbani. L'utilizzo di dati topografici ad alta risoluzione, ottenuti tramite sensore laser aerotrasportato (LIDAR), ha permesso di svolgere uno studio di vulnerabilità di una zona dunare localizzata a sud di Lido di Dante (RA). In particolare sono stati analizzati gli effetti sulle dune di due forti mareggiate avvenute tra il 24 ed il 26 Settembre 2004. In futuro l'intera fascia costiera regionale verrà sottoposta ad una valutazione di vulnerabilità, per fornire uno strumento utile alla Gestione Integrata delle Zone Costiere.

1 - Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara

2 - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

Si può affermare che il 2004 è stato un anno catastrofico per ciò che riguarda i fenomeni meteorologici a scala mondiale, a partire dal maremoto di Sumatra, sino agli uragani come Katrina che hanno flagellato le coste meridionali degli Stati Uniti. Tralasciando gli eventi di origine sismica, vale la pena di soffermarsi sul fatto che l'impatto degli eventi di mareggiata è perfettamente quantificabile e mitigabile, a condizione che si facciano delle adeguate valutazioni di rischio, in supporto a scelte politiche di Gestione Integrata della Zona Costiera (GIZC).

Nell'editoriale del volume di Novembre 2005 del Journal of Coastal Research, rivista di punta per le scienze costiere, i colleghi Pilkey e Young fanno considerazioni sull'impatto dell'uragano Katrina inteso sia come effetto socio-politico sulla gestione della linea di riva negli Stati Uniti, sia come vero e proprio impatto materiale sulle cose e sulle persone, giocando quindi

sull'equivoco generato in inglese dall'uso della parola *impact*. I mass media hanno dedicato ampio spazio alle immagini del danno alle infrastrutture ed alla popolazione, ma nessuno ha ricordato che la costa del Mississippi aveva già subito danni simili nel 1969, dopo il passaggio dell'uragano Camille. In seguito erano stati introdotti criteri costruttivi per gli edifici che potessero salvarli dall'arrivo di un altro uragano o che comunque fossero in grado di limitare al minimo i danni. Un rapido esame da foto aeree delle zone colpite da Katrina indica però che i punti maggiormente colpiti e dove si evidenzia un consistente accumulo di macerie sono gli stessi del 1969! Il fattore chiave che ha portato al grado di distruzione da tutti constatato nel caso di Katrina è stata l'altezza del sovrizzo del livello medio mare in seguito alla mareggiata (*storm surge*), che sembra aver raggiunto i 10 m. Gli autori concludono che, nonostante gli interventi di ripascimento delle spiagge volti a mitigare il fenomeno dell'erosione costiera adottati negli USA negli ultimi anni, il problema dell'inondazione delle aree retrospiaggia, in concomitanza con gli eventi di alta energia, sussiste ugualmente, generando situazioni di rischio per gli abitati e le infrastrutture ivi presenti. L'unica soluzione possibile è "la fuga", che implica la necessità di non essere nel punto dove arriverà il livello d'acqua in condizioni di mareggiata, o almeno essere consapevoli del rischio che si corre qualora un'infrastruttura sia qui localizzata. Come concludono gli autori, qui si entra nel campo delle scelte politiche, che potrebbero anche portare alla famosa ritirata dalle aree costiere, "managed retreat". Scelte di questo tipo sono già supportate da governi europei come quello del Regno Unito, sebbene per zone disabitate o agricole.

Figura 1
Schematizzazione della modalità di esecuzione del rilievo Lidar lungo la costa emiliano-romagnola





Figura 2
Esempio di ritorno multiplo lungo un profilo

Anche in zone come il nostro territorio regionale, non soggette a fenomeni catastrofici come i maremoti e gli uragani, sono sempre più frequenti gli eventi di mareggiata che causano danni al territorio e alle strutture produttive. Per questo la valutazione delle aree a rischio per eventi di tempesta costituisce una componente fondamentale nella previsione degli impatti e nella valutazione della vulnerabilità di un territorio.

Lo strumento indispensabile per le previsioni è costituito da un "modello digitale del terreno" che deve essere quanto più possibile accurato, per descrivere la complessità di un territorio fortemente antropizzato e con vaste aree a quota inferiore al livello del mare, in seguito a fenomeni di subsidenza naturale ed antropica. Questo motivo, unito alla necessità di sperimentare nuove tecniche di monitoraggio della spiaggia, sia di tipo ordinario sia straordinario, ha spinto il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli ad effettuare un rilievo della fascia costiera regionale con sensore Lidar aviotrasportato. Inoltre è stato eseguito un ulteriore rilievo di un tratto del Fiume Savio che si estende dalla foce fino a Cesena. Il lavoro è stato realizzato in collaborazione con l'Istituto Cartografico della Catalogna (ICC), proprietario del mezzo aereo e del sistema Lidar. ICC vanta una notevole esperienza nella esecuzione di questo tipo di rilievi e segue il processo integralmente, avendo anche sviluppato software specifici per il *post-processing* dei dati raccolti.

CHE COS'È IL LIDAR

Il Lidar (Light Detection and Ranging) è una tecnica di telerilevamento "attivo" per l'esecuzione di rilievi topografici ad alta risoluzione. Il rilievo viene effettuato con un mezzo aereo sul quale è installato un laserscanner composto da un trasmettitore (essenzialmente un laser), da un ricevitore (costituito da un telescopio) e da un sistema di acquisizione dati. La peculiarità del sistema è l'altissima velocità di acquisizione dei dati abbinata ad una elevata risoluzione.

La tecnologia Lidar è nata alla fine anni '70 negli Stati Uniti e, da più di 15 anni, viene utilizzata diffu-

samente con impieghi molteplici quali ad esempio il monitoraggio costiero, l'analisi del rischio, idraulico, le valutazioni ambientali (es. ricerca di siti contaminati), la gestione delle foreste (per la misura di parametri critici quali densità, altezza dei fusti ecc.), il rilievo di infrastrutture lineari (elettrorodotti; condotte), il monitoraggio delle attività estrattive.

DESCRIZIONE DELLA TECNOLOGIA

L'intero sistema per l'acquisizione dei dati Lidar è costituito dalle seguenti componenti (**Figura 1**):

a) Il distanziometro laser (laserscanner), che emette uno stretto impulso laser ad alta frequenza (25 kHz) deviato perpendicolarmente alla traiettoria da uno specchio rotante. Tale sensore registra l'intensità del segnale riflesso e la quota del terreno (calcolata sulla base della differenza di tempo intercorsa tra il segnale emesso e quello riflesso). Per il rilievo della costa emiliano-romagnola è stato utilizzato un sensore Lidar Optech ALTM 3025.

b) Il sistema di posizionamento satellitare (GPS) e il sistema inerziale di navigazione (INS), installati a bordo, per determinare la posizione (x,y) e l'orientamento del mezzo aereo in ogni istante.

c) Stazioni GPS a terra, posizionate sui vertici della rete geodetica (appositamente creata), per correggere la posizione dell'aereo in fase di post processing dei dati.

Intensità e coordinate spazio temporali del segnale in uscita sono quindi ben note, ed è perciò possibile misurare e interpretare con grande precisione il segnale riflesso.

COSA SI OTTIENE ATTRAVERSO IL RILIEVO LIDAR

Ciò che si ottiene con un rilievo Lidar è dunque una distribuzione di punti dei quali si conoscono le coordinate e la quota (XYZ) ed il valore dell'intensità riflessa (I). Analizzando i punti riflessi (vedi **Figura 2**) si osserva un ritorno multiplo del segnale e, in presenza di vegetazione (non eccessivamente densa), il

Lidar penetra al di sotto di essa generando un segnale riflesso a vari livelli della fronda e del suolo. Dalla nuvola di punti si ottengono, per elaborazioni successive, che comprendono sia un filtraggio automatico sia uno manuale, un modello digitale di superficie (in inglese DSM, Digital Surface Model) e un modello digitale del terreno (DTM, Digital Elevation Model), con una maglia dell'ordine del metro ed una precisione decimetrica (**Figura 3**).

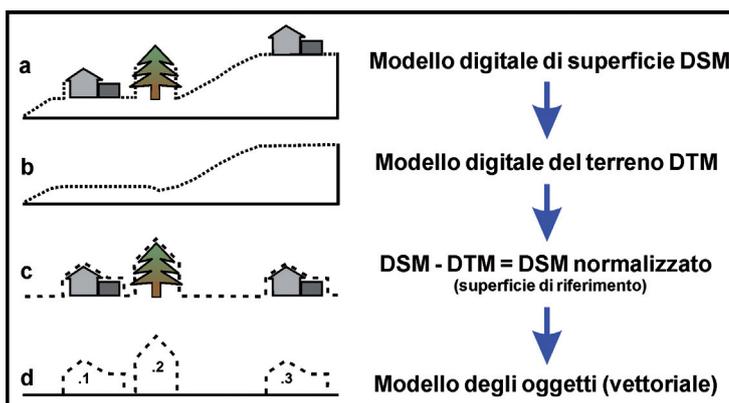
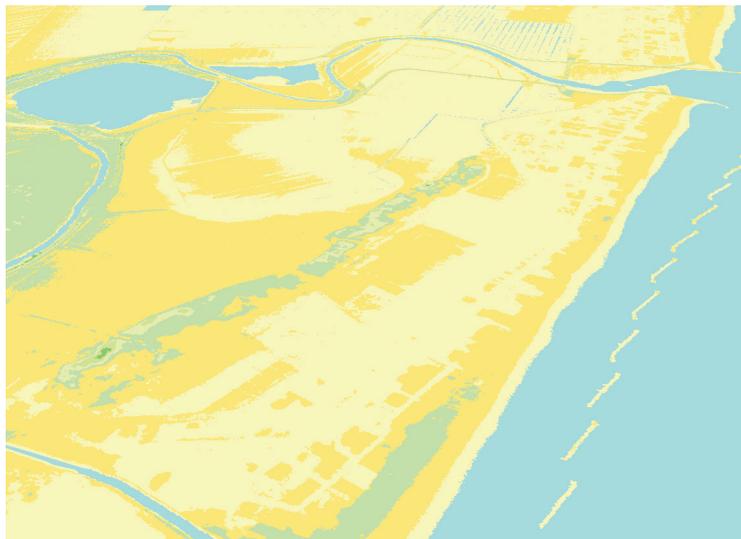


Figura 3
(a) Modello digitale di superficie DSM;
(b) Modello digitale del terreno DTM;
(c) DSM - DTM = DSM normalizzato (cioè riferito ad una superficie orizzontale);
(d) Modello degli oggetti (vettoriale)

Figura 4
Visualizzazione tridimensionale del DSM della costa a sud della foce del Fiume Savio. Sono facilmente riconoscibili elementi come edifici e copertura arborea



Figura 5
Visualizzazione tridimensionale del DTM (della stessa area di figura 5), ottenuto dalla "pulitura" del DSM da edifici e copertura arborea



Utilizzando il DSM e il DTM è possibile effettuare diverse elaborazioni quali, ad esempio, curve di livello del terreno e modelli tridimensionali di superficie. Questi ultimi hanno una particolare importanza poiché possono essere utilizzati per la localizzazione di edifici a rischio da inondazione marina o fluviale (**Figura 4**). La trasformazione del dato in DTM permette inoltre il rilievo diretto delle morfologie, delle opere di protezione e della superficie di spiaggia (**Figura 5**).

Tabella 1
Caratteristiche del rilievo Lidar

Parametri di volo	Costa	Fiume Savio
Totale in ettari	9524 ha	7666 ha
Altezza di volo	2300 m	2300 m
Velocità	222 km/h	222 km/h
Angolo di apertura laser	10°	10°
Larghezza strisciate	811 m	811 m
Distanza tra le rotte	406 m	406 m
Numero di linee volate	49	28
Densità di punti	1 per m ²	1 per m ²
Frequenza di campionamento	25 kHz	25 kHz
Ellissoide di riferimento	ETRS89	ETRS89

PIANIFICAZIONE E PROCEDURE DEI RILIEVI E ORGANIZZAZIONE LOGISTICA

Nei primi mesi del 2004 si è svolta la progettazione del piano di volo, della rete geodetica di riferimento, la fornitura della documentazione di base e la richiesta dei permessi di volo. Nel Maggio del 2004 è stata condotta una campagna GPS su 5 vertici noti (IGM 95 + RER), eseguita dall'Università di Bologna, sotto la supervisione del Prof. Barbarella (DISTART). Sempre nello stesso periodo sono state rilevate 12 aree di controllo più alcune aree test per la qualità, con sistema GPS-RTK, al fine di ricostruire le 12 'baselines' utilizzate in fase di post processing.

La Campagna Lidar 1 è stata effettuata nel Maggio 2004; è stata rilevata una parte dell'area nord della costa regionale (Sacca di Goro) ed è stato effettuato un tentativo di misura nell'area meridionale, dove i rilievi sono stati sospesi a causa della mancata copertura del segnale GPS. Nel Giugno 2004, al fine di comprendere la natura e l'estensione delle

aree d'interferenza del segnale GPS (oltre ad effettuate richieste ai vari enti competenti) sono stati condotti rilievi a terra, individuando delle zone di disturbo del segnale tra Rimini e Cattolica; nel frattempo l'ICC ha effettuato dei test strumentali di laboratorio per definire la migliore configurazione degli strumenti a bordo e per minimizzare il problema.

Tutto questo non ha permesso, tuttavia, di risolvere il problema.

La Campagna Lidar 2 si è svolta dal 27.9.04 al 01.10.04; in questa seconda fase è stata rilevata tutta la fascia costiera, fino a Rimini, (causa mancanza di segnale GPS nella parte meridionale) e il Fiume Savio dalla foce fino a Cesena.

COPERTURA DELLE AREE DI INDAGINE

L'area costiera rilevata, corrisponde ad un corridoio largo circa 800 m, a tratti più esteso, per un totale di 9524 ettari (**Figura 6**).

Verso mare il limite è stato posto in modo da comprendere tutte le strutture di difesa, considerate parte integrante del sistema costiero.

Lungo il Fiume Savio è stata rilevata una fascia di larghezza variabile, per un'estensione areale totale di 7666 ettari.



ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione dei dati Lidar, è complessa anche se in buona parte automatica e quindi di rapida esecuzione. L'intero processo di calcolo e di rettifica dei punti laser è stato preceduto da una fase di calibrazione del sistema (effettuata prima dell'inizio del rilievo). L'elaborazione dei dati si svolge in quattro fasi:

1. il calcolo della traiettoria e dell'orientazione del sensore mediante DGPS/INS;
2. la generazione di un archivio di punti XYZ;
3. la classificazione dei punti (sulla base dell'altezza, intensità della riflessione, ecc.);
4. la generazione dei modelli a partire dai punti classificati;

La correzione della quota viene effettuata analizzando DTM contigui.

Le caratteristiche strumentali e le procedure di volo adottate permettono di ottenere dati con le seguenti caratteristiche:

- a) densità dei punti: 0.5 punti/m²;
- b) precisione planimetrica: 1 m;
- c) precisione altimetrica: 0.2 m;

Questi valori sono stati migliorati grazie alla procedura di elaborazione dei dati messa a punto da ICC. In particolare la procedura di "block adjustment", che permette di migliorare sensibilmente la precisione altimetrica strumentale, fino a valori di pochi centimetri. Questo dato è confortato dai controlli di campo eseguiti con sistema DGPS a terra contestualmente ai rilievi aerei. I DTM e DSM prodotti hanno una maglia regolare di 1m x 1 m.

POTENZIALITÀ DI APPLICAZIONE IN AMBITO DI STUDI MORFOLOGICI SULLA COSTA

L'utilizzo di metodologia Lidar è ormai diventato uno standard in molti paesi europei e non. Negli USA, dal 1996, è attivo un progetto di monitoraggio sistematico della costa, per la protezione dai rischi di ingressione marina (<http://coastal.er.usgs.gov/lidar/>), che vede coinvolti il Coastal Services Center del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), la NASA e l'USGS.

L'U.S. Army Corps of Engineers utilizza inoltre tali dati abbinati a quelli batimetrici acquisiti con sistema Lidar marino shoal (<http://shoals.sam.usace.army.mil/>) per le simulazioni numeriche volte alla produzione di una cartografia dei rischi da uragano. Un'altra applicazione del Lidar batimetrico è, ad esempio, lo studio della morfodinamica dei fondali, possibile solo in presenza di condizioni di elevata trasparenza dell'acqua come sperimentato in Florida, dove hanno ottenuto una penetrazione sino a 70 m di profondità (Finkl et al., 2005).

In Regione Emilia-Romagna, il rilievo Lidar della costa ha fornito uno strato informativo nuovo, almeno per il tratto di costa fino a Rimini, unico ed essenziale per il potenziamento delle conoscenze di base finalizzate alla difesa del territorio costiero. I nuovi dati verranno utilizzati per i seguenti scopi:

1. per completare e migliorare la qualità dei prodotti cartografici in corso d'opera, quali:

- la carta morfologica dell'area costiera;
- la classificazione morfodinamica delle spiagge;
- il catalogo delle opere di difesa;

2. per effettuare simulazioni sulla propagazione delle onde di tempesta nell'area di spiaggia e retrospiaggia

3. per la produzione di una cartografia dei rischi costieri;

4. come base di confronto per qualsiasi rilievo futuro, anche realizzato con tecniche di acquisizione diverse.

Viene presentata qui di seguito una possibile applicazione dei dati Lidar per la valutazione dell'impatto delle mareggiate in corrispondenza di uno dei pochi cordoni dunari ancora esistenti nell'ambito del territorio regionale. La sperimentazione è stata condotta grazie alla collaborazione tra il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e la Coastal Processes Research Unit (<http://web.unife.it/ricerca/copru/copru.htm>) dell'Università di Ferrara (Resp. Paolo Ciavola) nell'ambito delle attività del progetto INTERREG IIIB CadSeaLand. Lo studio si è sviluppato integrando rilievi topografici sul campo ad alta risoluzione (DGPS-RTK) con i dati raccolti tramite rilievo Lidar, sulla falsariga di lavori analoghi che vengono svolti lungo le coste atlantiche degli Stati Uniti (vedi ad es. Mitasova et al., 2004 e Zang et al., 2005).

Figura 6
Piano di volo del rilievo Lidar dell'area costiera e del Fiume Savio. Base fotografica su immagine satellitare Quickbird (2003)

Figura 7
Tratto di costa da Lido di Dante a Foce Bevano (Volo CGR Parma 2004). Il riquadro in rosso evidenzia la zona oggetto delle simulazioni riportate in figura 9

LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI EROSIONE DA MAREGGIATE SULLE FASCE DUNARI: IL CASO DELLA SPIAGGIA DI LIDO DI DANTE

La morfologia della spiaggia e del cordone dunare.

La spiaggia di Lido di Dante è un tratto di costa che si estende per 3 km dall'abitato sino alla foce del Fiume Bevano (Figura 7). L'area è caratterizzata dalla presenza, nella parte nord di fronte all'abitato di Lido di Dante, di una barriera soffolta (di 770 m di lunghezza) inizialmente progettata con una larghezza di 12 m ed una cresta a -0.5 m sotto il livello medio mare (Lamberti e Zanuttigh, 2005). I rimanenti 2 km di costa sono completamente naturali con dune e una pineta retrostante.

Come dimostrato da un'analisi dello spostamento della linea di riva basata sulla fotointerpretazione in ambiente GIS (Ciavola et al., 2004), la zona soffre di un processo di arretramento della spiaggia iniziato alla fine degli anni '70 e che perdura tuttora, nonostante siano state costruite, a partire dagli anni '80, le opere di protezione costiera, approfonditamente studiate a livello di comportamento idraulico da Lamberti e Zanuttigh (2005).

L'integrazione tra rilievo Lidar e monitoraggio morfologico tramite DGPS in modalità RTK, svolto negli ultimi 3 anni, prova che le dune di Lido di Dante presentano, da nord verso sud, un'altezza variabile rispetto al livello medio del mare: 1-1.5 m nella zona immediatamente a sud delle barriere soffolte; oltre i 3 m nella zona a nord della foce del Bevano (Figura 8), con punte di 4-5 m alla foce stessa, la cui migrazione sta erodendo le dune lateralmente (Ciavola et al., 2005). La zona più a sud del tratto di costa esaminata presenta una duna ben sviluppata e morfologie sommerse (barra intertidale, barra longitudinale, ecc.), che indicano uno stato di "salute" del sistema sedimentario. Qui anche la spiaggia emersa è

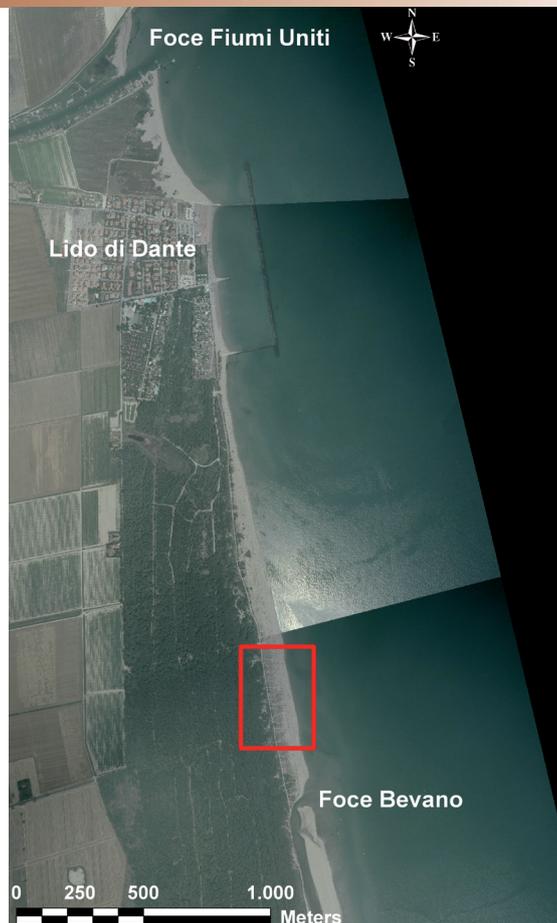
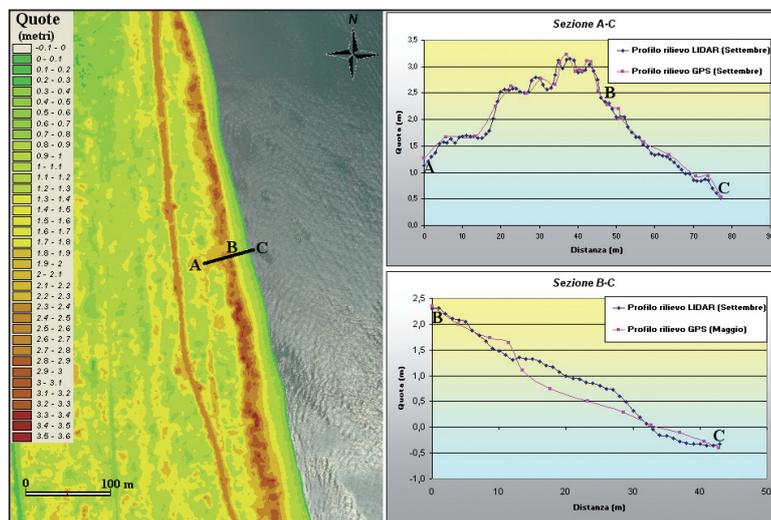


Figura 8
Modello digitale del terreno del tratto di costa a Foce Bevano, prodotto con dati Lidar (a sinistra). Sezioni topografiche: La Sezione A-C (a destra, in alto) mostra il confronto tra il dato Lidar ed il dato ottenuto con rilievo DGPS-RTK svolto contemporaneamente al volo. La Sezione B-C (in basso) rappresenta l'evoluzione della spiaggia intertidale in seguito alle mareggiate di Settembre 2004



molto ampia e le dune non vengono toccate dal mare neppure durante tempeste di forte intensità.

La vegetazione che ricopre le dune è un indice del loro stato di salute e di quanto esse siano influenzate dall'effetto delle onde e del vento.

Nella zona a nord, quella a ridosso delle barriere di protezione, la vegetazione al piede e alla cresta dunare è quasi scomparsa.

Ciò a causa dell'ingressione marina durante gli eventi di tempesta, imputabile alla diminuzione dell'ampiezza della spiaggia emersa, che risulta essere qui stretta e molto pendente.

L'evoluzione di tale elemento morfologico si ritiene sia condizionata dalla presenza della barriera frangiflutti che provoca concentrazione di energia a sud

della struttura stessa durante gli eventi di moto ondoso da Bora. La modellistica numerica prodotta da Lamberti e Zanuttigh (2005) prova chiaramente che la circolazione attorno alla barriera genera effetti di disturbo sui fondali a sud, che si presentano sovraescavati. Simulazioni svolte da tali autori indicano che in condizioni di mareggiata da Bora le correnti raggiungono massima intensità sulla terminazione meridionale della barriera, in corrispondenza del pennello che è raccordato alla struttura.

Le mareggiate del Settembre 2004

Il rilievo Lidar effettuato sulla zona il 27 settembre 2004 ha effettivamente registrato l'impatto morfologico di un periodo di mareggiate molto intense, provenienti dal settore di traversia Est-Nord-Est. I dati della boa delle Rete Ondametrica di fronte al Delta del Po (Punta della Maestra) vengono presentati e in **Tabella 2**.

Da notare che, volendo definire come soglia di mareggiata un'altezza d'onda di 1.5 m, questa è stata superata per 9 ore consecutive in ciascuno degli eventi considerati, con il primo evento che ha raggiunto un valore di onda, al largo, superiore ai 3 m.

Diventa quindi importante valutare quanto la fascia dunare sia a rischio di scalzamento al piede (*base undercutting*), di scavalco della cresta (*overtopping*) e di sfondamento con conseguente inondazione del retroduna (*blow-out* e *overwashing*). A tal fine è estremamente importante quantificare sia la forzante meteorologica (onde, maree, livelli marini anomali) sia la morfologia del cordone dunare (posizione della base delle dune, altezza della cresta, morfologia del retroduna).

L'altezza d'onda, può essere parametrizzata considerando un tempo di ritorno, e cioè una probabilità che si verifichi un determinato evento all'interno di un intervallo temporale statisticamente rappresentativo. Si può quindi provvedere a calcolare il "sovrizzo da onda", cioè la sopraelevazione del livello medio mare o *wave set-up*, corrispondente a tali eventi.

Va però ricordato che esiste anche un sovrizzo di tipo atmosferico, dovuto all'impilamento dell'acqua sottocosta da parte del vento e dalla bassa pressione atmosferica in condizioni di maltempo, la famosa "acqua alta" che rende così difficile la sopravvivenza della città di Venezia.

Periodo di ritorno	Pendenza della battigia	Altezza d'onda a largo (m)	Periodo d'onda (sec)	Quota max sovrizzo (m)
1 anno	0,05	3.5	7	2.09
10 anni	0,05	4.5	8	2.46
100 anni	0,05	6	10	3.13

In maniera analoga all'onda di mareggiata, è quindi possibile calcolare un periodo di ritorno dell'evento corrispondente, ad esempio, ad 1 anno, a 10 anni o a 100 anni. Anche qualora si proceda ad un calcolo di una probabilità "combinata" dei due eventi (marea eccezionale e mareggiata), questo fornisce solo un valore verticale di sopraelevazione, mentre sarebbe più corretto considerare una quota di massima risalita (massimo *run-up*) della lama d'acqua sulla battigia.

Data e ora (UTC)	Altezza significativa (m)	Periodo medio (sec)	Periodo di picco (sec)	Direzione media (gradi N)
24/09/2004 15.30	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
24/09/2004 18.30	3.06	5.6	7.1	86
24/09/2004 21.30	2.52	6.3	6.9	92
25/09/2004 0.30	1.78	4.4	6.5	60
25/09/2004 3.30	1.29	4	5.4	55
25/09/2004 6.30	1.23	3.9	5.7	59
25/09/2004 9.00	0.95	3.4	4.8	59
25/09/2004 12.30	0.76	3.5	4.8	67
25/09/2004 15.30	0.59	3.3	4.3	73
25/09/2004 18.30	0.46	3.2	3.9	103
25/09/2004 21.30	0.71	3.3	4.4	97
26/09/2004 0.30	1.15	3.8	5	59
26/09/2004 3.30	1.27	4	5.3	46
26/09/2004 6.30	1.18	3.9	5.3	56
26/09/2004 9.30	1.17	3.6	4.9	64
26/09/2004 12.30	0.92	3.4	4.5	68
26/09/2004 15.30	1.17	3.6	4.9	64
26/09/2004 18.30	1.54	4	5.3	64
26/09/2004 21.30	2.03	4.8	5.9	59
27/09/2004 0.30	1.93	5.5	6.3	55
27/09/2004 3.30	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Nel calcolo di tale livello va quindi considerata la pendenza della spiaggia, anche se si vogliono utilizzare delle semplici formulazioni empiriche come quella di Holman (1986). In tal senso diventa essenziale utilizzare una pendenza che sia rappresentativa di un'area sia a livello spaziale sia temporale, e cioè mediata su più rilievi topografici.

Si è provveduto quindi a calcolare il punto di massimo *run-up*, o risalita del livello del medio mare, in condizioni di sovrizzo, considerando una probabilità combinata con periodo di ritorno di 1, 10 e 100 anni ed assumendo una pendenza media di battigia del 5%, ottenuta tramite rilievi diretti e confronto con i dati Lidar. In **Tabella 3** vengono riassunti i parametri usati per i calcoli. L'altezza del sovrizzo atmosferico e le caratteristiche delle onde al largo (altezza d'onda

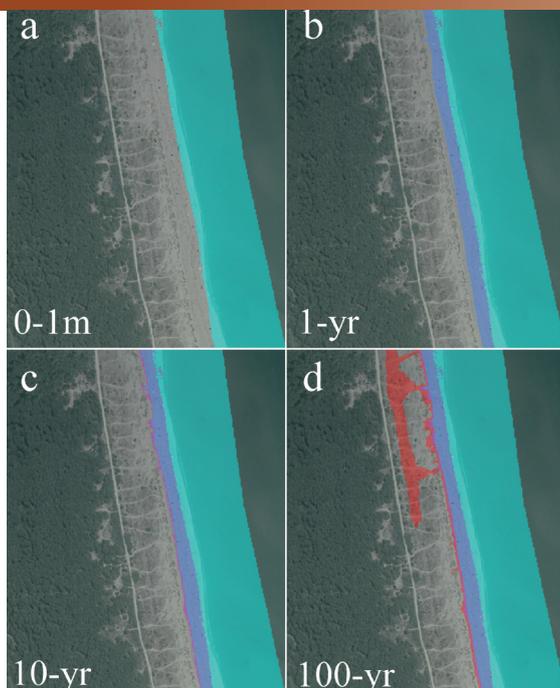
Tabella 2
Dati ondametrici registrati dalla Boa di Punta della Maestra. L'abbreviazione ND indica non-disponibilità dei dati

Tabella 3
Elevazione massima della risalita del medio mare durante l'evento di mareggiata dell'anno, del decennio e del secolo in condizioni di alta marea

significativa e periodo) sono state ricavate dalle analisi statistiche svolte nel progetto CENAS (Yu et al. 1998).

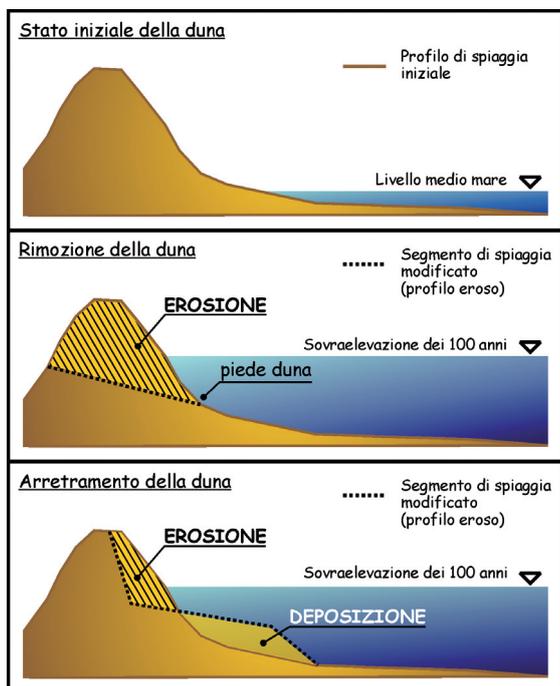
Da notare che il calcolo viene fatto assumendo che l'evento si verifichi in condizioni di alta marea sizigiale, è cioè si sono aggiunti 0.5 m al valore statico del medio mare. Si sono quindi svolte simulazioni dei livelli raggiunti durante tali eventi lungo la fascia dunare, utilizzando il DTM ottenuto tramite il rilievo Lidar.

Figura 9
Si osservano le simulazioni delle zone inondabili con: a) un sovranzo di 1 m sul livello medio mare; b) con un sovranzo di 2.09 m (periodo di ritorno di 1 anno); c) di 2.46 m (periodo di ritorno di 10 anni); d) di 3.13 m (periodo di ritorno di 100 anni)



È chiaro che tale approccio permette di valutare quali zone sono a rischio di inondazione marina utilizzando semplicemente l'elevazione sul livello di mareggiata e non considerando i gradienti di portata dei flussi marini, qualora avvenga uno sfondamento del cordone dunare o l'effetto dell'attrito da parte della vegetazione dunare nel rallentare i flussi all'interno del ventaglio di rotta o *overwash fan*. Nelle simulazioni presentate in **Figura 9a**, si vede ad esempio come una quota di massima risalita di 1 m sul livello medio mare, quindi il doppio dell'escursione di alta marea ordinaria, si limiti ad inondare la spiaggia, mentre l'evento con periodo di ritorno di 1 anno (**Figura 9b**) arriva a toccare la base delle dune. Quest'ultimo fenomeno è testimoniato anche da osservazioni sul campo. Diventa quindi importante che la base della duna sia superiore alla quota di 2 m sul medio mare, considerazione di rilievo qualora si intenda provvedere ad una ricostruzione della fascia dunare.

Figura 10
Tipologie di erosione dei cordoni dunari in funzione dello stock sedimentario riferito alla quota del sovranzo del livello medio mare con periodo di ritorno dei 100 anni (modificato da www.euroSION.org)



L'evento dei 10 anni genera in molti punti delle aperture lungo il cordone dunare, ma non riesce ad incanalarsi e ad espandersi oltre la fascia dunare stessa, scavalcandola (**Figura 9c**). Certamente la presenza di corridoi di accesso alla spiaggia e l'alterazione della cresta delle dune in seguito a camminamento, generano dei punti di debolezza. Da notare che si è scelta come zona di simulazione proprio quella immediatamente a sud di un'area dove l'accesso ai bagnanti nel periodo estivo ha generato una situazione di particolare degrado morfologico, testimoniata dalla zona pianeggiante a circa 2 m di quota subito a nord della sezione in **Figura 9**. Il fenomeno di *trampling* (camminamento) sulle dune porta alla formazione di percorsi preferenziali per il passaggio del vento e del mare durante le mareggiate, amplificando l'erosione e la rimozione della vegetazione e aumentando l'instabilità delle dune stesse (Armaroli et al., in stampa).

L'evento dei 100 anni genera, invece, un esteso sfondamento del cordone dunare, con espansione della lama d'acqua nell'area di retroduna fino a raggiungere lo stradello forestale al margine della pineta, che funge quindi da argine (**Figura 9d**). In caso di scavalco di tale confine, le conseguenze sul territorio retrostante sarebbero disastrose, poiché le quote medie sono dell'ordine di 0.5 m sul livello medio mare.

Dallo studio dei profili dei cordoni dunari ottenuti dal rilievo Lidar si sono caratterizzate le condizioni del fronte dunare, utilizzando come livello di riferimento lo stock sedimentario al di sopra della quota di sovrarelevazione del livello medio mare per l'evento di mareggiata con periodo di ritorno di 100 anni, seguendo lo schema concettuale definito nell'ambito del progetto EuroSION (**Figura 10**). La quota della cresta della duna sul livello medio mare è quindi il parametro di controllo della probabilità che si verifichi una rimozione "in toto" della duna stessa. Dall'esame dei profili Lidar e da rilievi diretti svolti durante il volo, si attesta che la duna con una quota pari a 2.5m sopra il livello medio mare non è stata in grado di assorbire le mareggiate del settembre 2004 (**Figura 11a**). Al contrario, quote vicine ai 3 m sono relativamente sicure, dato che l'erosione che si genera è del tipo "arretramento del fronte dunare" (**Figura 11b**), anche se situazioni di questo tipo non sono comunque in grado di sostenere l'impatto di eventi eccezionali.

Future applicazioni a scala regionale.

Uno dei principali problemi che stanno affrontando gli scienziati costieri è la valutazione della risposta del sistema fisico all'innalzamento del livello marino. Per fare questo devono essere quantificati gli arretramenti della linea di costa, la perdita dei volumi di spiaggia e di territorio costiero, che, per la Regione

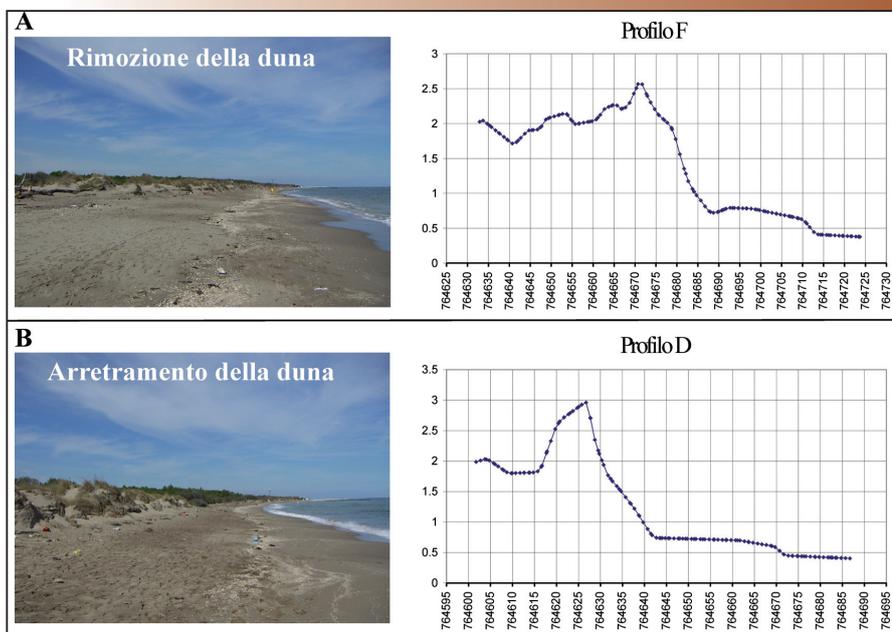


Figura 11
 Tipologie di erosione
 dei cordoni dunari
 osservate in seguito
 alle mareggiate del
 24-26 settembre
 2004

Emilia-Romagna, costituiscono una risorsa inestimabile. Le politiche di gestione integrata della fascia costiera devono considerare non solo i danni alle persone ed alle infrastrutture ma anche la perdita di ecosistemi ad alto valore naturalistico. È bene sottolineare che ciò che deve essere valutato è l'innalzamento 'relativo' del livello del mare, che tiene conto della presenza di fattori locali come la subsidenza. Se si considera, ad esempio, la zona oggetto dello studio (tratto tra Lido Adriano e Lido di Dante), tale fattore è rilevante. Una recente compilazione di tutti i dati riguardanti la subsidenza ha infatti dimostrato che il tasso di abbassamento del suolo è di circa 1.5 cm l'anno (Teatini et al., 2005). Attualmente gli autori stanno estendendo l'analisi modellistica qui presentata a tutto il territorio costiero, poichè i dati Lidar sono utilizzabili per la quantificazione delle massime soglie di *run-up*, cioè di risalita istantanea del livello marino, in condizioni di mareggiata calcolata su scala probabilistica. Successivamente si affronterà una seconda tematica finalizzata alla sovrapposizione tra tali livelli e un previsto innal-

zamento locale del livello medio mare. I due studi confluiranno nello sviluppo di un Indice di Vulnerabilità Costiera (IVC), valutando il valore economico, naturalistico e sociale delle zone a rischio.

Ringraziamenti.

Il volo Lidar sulle coste della Regione Emilia-Romagna è stato reso possibile dalla perseveranza e lungimiranza del Dott. Raffaele Pignone, responsabile presso il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, che ha sviluppato negli anni una profonda sinergia con l'Istituto Cartografico della Catalogna.

Si ringraziano vari componenti dello staff di ambedue le istituzioni per l'appoggio logistico e nell'analisi e processamento dati. Si ringraziano inoltre Yann Balouin (BRGM, Francia) e Simone Caleffi (COPRU, Università di Ferrara) per il supporto nel calcolo delle caratteristiche di moto ondoso. Le attività erano finanziate dal progetto Interreg-III CadSeaLand e dai fondi ex-60% dell'Università di Ferrara (resp. P. Ciavola). ■

BIBLIOGRAFIA

- ARMAROLI, C., BALOUIN, Y., CIAVOLA, P. & CAPATTI, D. (in stampa). *Nearshore bars as a natural protection of beaches, field evidences from Lido di Dante beach, Adriatic Sea*. Atti di: ICCCM'05 Conference, Algarve, Portogallo
- CIAVOLA, P., GATTI, M., ARMAROLI, C. & BALOUIN, Y. (2004). *Valutazione della variazione della linea di riva nell'area di Lido di Dante (RA) tramite GIS e monitoraggio con DGPS cinematico*. Atti dei Convegni dei Lincei, 205, 113-121
- CIAVOLA, P., BILLI, P., ARMAROLI, C., PRECISO, E., SALEMI, E. & BALOUIN, Y. (2005). *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. *Geologia Tecnica ed Ambientale*, 2005/1, 41-57
- FINKL, C.W., BENEDET, L. & ANDREWS, J.L. (2005). *Interpretation of seabed geomorphology based on spatial analysis of high-density airborne laser bathymetry*. *Journal of Coastal Research*, 21, 3, 501-514
- HOLMAN, R. A. (1986). *Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach*. *Coastal Engineering*, 9, 527-544
- LAMBERTI, A. & ZANUTTIGH, B. (2005). *An integrated approach to beach management in Lido di Dante, Italy*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62, 441-451
- PILKEY, O.H. & YOUNG, R.S. (2005). *Will hurricane Katrina impact shoreline management? Here's why it should*. *Journal of Coastal Research*, 21, 6, iii-ix
- YU, C.S., DECOUTTERE, C., & BERLAMONT, J. (1998). *Storm surge simulations in the Adriatic Sea*, CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, The Netherlands, 207-232
- ZHANG, K., WHITMAN, D., LEATHERMAN, S. & ROBERTSON, W. (2005). *Quantification of beach changes caused by Hurricane Floyd along Florida's Atlantic coast using airborne laser surveys*. *Journal of Coastal Research*, 21(1), 123-134