

Studio geomorfologico delle dune costiere di Marina di Cecina (Toscana) con rilievi Lidar da aereo

Deborah Bresci, Sara Carli, Enzo Pranzini e Lorenzo Rossi

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze. E-mail: epranzini@unifi.it

Riassunto

Nel Gennaio 2004 è stato effettuato un volo sulla fascia costiera di Marina di Cecina (Toscana) durante il quale sono stati acquisiti dati Lidar, immagini multispettrali con un CASI e foto a colori con camera metrica. Un rilievo topografico eseguito con una Stazione totale lungo 11 transetti ortogonali a costa ha consentito di valutare l'accuratezza dei dati altimetrici ottenuti con il Lidar. I dati CASI sono stati utilizzati per estrarre profili di NDVI e valutare come la vegetazione influisce sull'accuratezza del dato altimetrico Lidar.

Il confronto con una carta geomorfologia realizzata con metodi tradizionali (rilievi di campagna e fotointerpretazione) nel 1996 ha messo in evidenza le grandi potenzialità dei rilievi Lidar per lo studio geomorfologico in aree densamente coperte da vegetazione. Il modello digitale del terreno (DTM) ottenuto con risoluzione di 1 m ha permesso di tracciare l'andamento di numerosi cordoni dunari e di studiare i loro rapporti geometrici fino a portare all'identificazione di due fasi erosive storiche nel delta del Fiume Cecina. L'identificazione di numerosi *blow-outs* su la gran parte dei cordoni, spiegabile con periodo di intenso disboscamento, ha messo in evidenza come sia stata importante l'attività antropica nell'evoluzione morfologica di questa parte della costa toscana.

Parole chiave: dune costiere, delta, LIDAR, DTM, NDVI, *blow-outs*.

Abstract

The study of dune evolution is of major relevance for the management of the coastal zone, as it constitutes an interface environment under both terrestrial and marine influence. Traditional survey technologies used in coastal evolution studies, such as airborne photograph, usually pose limitations and cannot be applied to the study of dune morphodynamics due to the dense vegetation cover that can be present in these environments. LIDAR (Light Detection And Ranging) is a new airborne technology producing altimetric data that can be used in the generation of a Digital Terrain Model (DTM) of high accuracy even in the presence of dense vegetation. Although LIDAR has been widely used on coastal evolution studies, few have applied this technology to investigate dune morphology. In order to assess the validity, applicability and accuracy of LIDAR-born data in the study of coastal dune evolution, an aerial survey was performed in January 2004 over a stretch of coast at Marina di Cecina (Tuscany). In addition to LIDAR altimetric data, multispectral images and airborne colour photographs were acquired during the same survey, and topographic surveys were performed along 11 transects using Total Station. The NDVI image produced with the use of multispectral data allowed to evaluate the influence of vegetation on the accuracy of altimetric data, whereas comparison of the DTM generated to a 1996 geomorphological map of the area (produced using traditional methods such as field work and photointerpretation) provided an indication of the potential of LIDAR surveys in studying the geomorphology of densely vegetated areas. The 1 meter resolution DTM produced allowed to identify several dune alignments and to study their geometric relationships, leading to the identification of two erosional phases in the historical evolution of the River Cecina delta. Several blow-outs were also identified in most of the dunes as related to a period of intense deforestation in the past, demonstrating the importance of human impact on the morphological evolution of this part of the Tuscany coast.

Keywords: coastal dunes, deltas, LIDAR, DTM, NDVI, *blow-outs*.

Premessa

Lo studio della morfologia delle dune si pone come un momento fondamentale nella gestione integrata della fascia costiera in quanto esse costituiscono l'interfaccia fra la zona in cui sono prevalenti i processi costieri e quella in cui agiscono i fattori continentali (Pranzini e Simeoni, 2005).

L'analisi morfologica delle dune consente di ricostruire le fasi di formazione di questi depositi, eventuali episodi di intenso rimodellamento caratterizzati spesso dalla formazione di *blow-outs*, e fenomeni di incisione lineare dovuti all'apertura di percorsi di accesso al mare.

La realizzazione di una carta altimetrica delle aree dunari comporta un notevole impegno sul terreno, dato che queste sono spesso coperte dalla vegetazione che rende vana l'utilizzazione delle foto aeree. D'altra parte il rilievo topografico diretto non sempre può avvalersi del GPS, poiché sotto agli alberi il segnale non viene ricevuto. Non vi è quindi che ricorrere ai tradizionali rilievi celerimerici, estremamente costosi se si intende ottenere una maglia di punti sufficientemente densa da consentire la descrizione delle morfologie più minute.

Recentemente si sono resi disponibili sistemi di rilievo LIDAR (*Light Detection And Ranging*) aviotrasportati che consentono la produzione di Modelli Digitali del Terreno (DTM) di grande accuratezza anche in aree con densa copertura vegetale. Sebbene siano state effettuate numerose applicazioni di queste metodologie in ambiente costiero (Irish e White 1998; Krabill et al., 2000; Stockdon et al., 2002; Haxel e Holman, 2004), anche con indagini svolte in aree con estesi depositi eolici (Woolard e Colby, 2002), non è nota l'accuratezza dei dati altimetrici acquisiti sotto alla vegetazione in aree con elevata variabilità altimetrica quali sono le dune costiere.

Lo scopo di questa ricerca è quello di analizzare la validità dei rilievi LIDAR per la ricostruzione della morfologia dei depositi eolici costieri, valutandone l'accuratezza in aree con densa copertura vegetale e le possibili applicazioni nella gestione integrata della costa.

A tal fine queste tecniche sono state applicate allo studio delle dune che orlano la costa di Marina di Cecina (Fig. 1), fra Punta del Tesorino, a nord, e la foce del Fosso Le Basse, a sud, dove in precedenza uno degli autori aveva realizzato una carta geomorfologica basata sulla fotointerpretazione e su controlli in campagna effettuati senza rilievo topografico di precisione (Pranzini, 1996). Mentre il confronto fra i due prodotti consente di valutare l'efficacia dei rilievi LIDAR, questi ultimi aiutano a delineare l'evoluzione subita negli ultimi secoli dai cordoni sabbiosi litoranei lungo questo tratto della costa toscana.

L'area di studio

Fatta eccezione per l'abitato di Marina di Cecina, sviluppatosi lungo il litorale a sud della foce, la fascia costiera presenta una limitata antropizzazione, con alcuni stabilimenti balneari sul lato settentrionale e una pineta completamente libera da edifici in quello meridionale. Entrambi i settori costituiscono la Riserva Naturale dei "Tomboli di Cecina", caratterizzata da una pineta di pino marittimo e domestico, con una elevata frequenza di leccio, mentre sul lato esterno compare il ginepro comune e il coccolone; in molti tratti si ha un denso sottobosco con le tipiche essenze della macchia mediterranea (Figg. 2 ÷ 5).

La pineta fu creata nel 1839, per iniziativa di Leopoldo II di Lorena Granduca di Toscana, col duplice scopo di proteggere le colture interne dalla salsedine e dai venti marini e di produrre pinoli.

La *Carta geomorfologica della fascia costiera del Comune di Cecina*

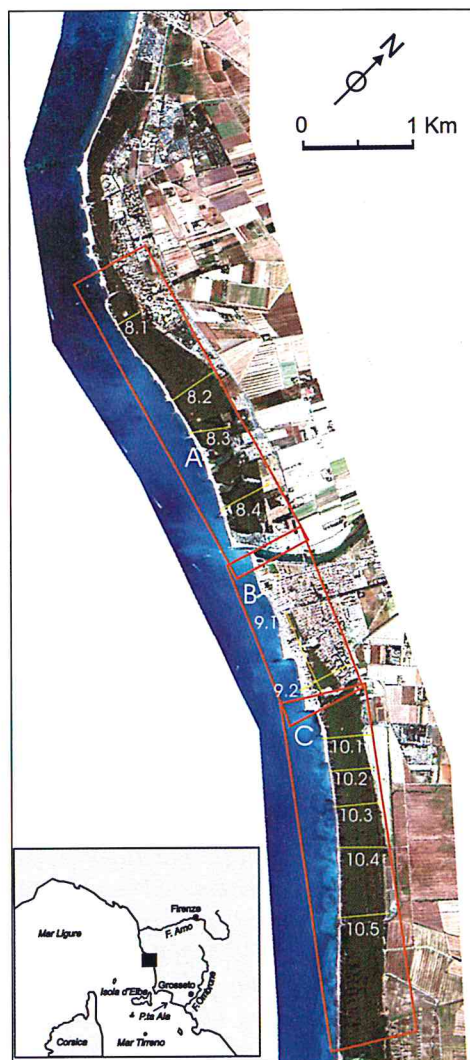


Figura 1 – Immagine QuickBird del Settembre 2004; litorale di Marina di Cecina con indicate le tre zone di acquisizione dei dati LIDAR e la posizione dei profili topografici. Bande 1 (Blu), 2 (Verde) e 3 (Rosso).

(Pranzini, 1996) indica la presenza di depositi eolici in una striscia di ampiezza compresa i 550 m a nord e i 450 m a sud. La continuità delle dune è interrotta in modo evidente solamente dal corso del Fiume Cecina, che sfocia in mare nella parte centro-settentrionale del territorio qui studiato.

Altre interruzioni minori dei cordoni dunari sono presenti a nord della foce del Cecina, in località Le Gorette, toponimo che indica appunto tre aree depresse sulla cui origine non è mai stata fatta chiarezza. E' difficile pensare che possano corrispondere a vecchie "rotte" del Cecina, perché questo avrebbe dovuto scorrere anche parallelamente ad essa, percorrendo in alcuni tratti i bassi interdunari. E' più probabile che siano stati creati artificialmente per favorire il deflusso dalle aree umide retrostanti. Il taglio deve essere stato prodotto fra il XVIII e il XIX secolo, quando, in questa parte della Maremma toscana, fu condotta una intensa opera di bonifica. Il taglio più settentrionale ha davanti a sé un cordone dunare che dovrebbe essersi quindi formato fra il XIX e il XX secolo: questo, più a sud, è stato asportato dall'erosione costiera e non è possibile sapere se chiudesse o meno anche i due varchi meridionali, che oggi si aprono direttamente sulla spiaggia.

A sud della foce, al limite meridionale dell'abitato di Marina di Cecina, vi è un'altra interruzione in corrispondenza del Fosso della Cecinella, un corso d'acqua minore che drena le parte meridionale della pianura di Cecina; anche in questo caso è molto probabile che l'incisione sia stata creata all'epoca delle bonifiche. Il Fosso le Basse, che limita a sud l'area di studio, taglia le dune con alveo assai stretto e con un percorso rettilineo ed ortogonale alla costa, essendo uno dei canali di scolo delle acque della pianura tracciato artificialmente in occasione della bonifica.



Figura 2 - Settore A: il basso cordone che si stende fra le due dune maggiori, la più interna delle quali compare sul lato destro della foto.



Figura 3 - Settore A: dune a monticelli nel tratto mediano del settore.



Figura 4 - Settore C: la densa vegetazione dell'estremità meridionale.



Figura 5 - Settore C: le dune mediane spesso prive di sottobosco.

I depositi eolici, infatti, separano dal mare una pianura alluvionale posta a quote estremamente basse nella quale erano presenti, fino alla metà del Settecento, ampie aree palustri (Barsanti e Rombai, 1986). In realtà la fotointerpretazione aveva consentito di identificare alcuni cordoni sabbiosi anche sotto ai depositi alluvionali, che, in questo caso, risultano maggiormente drenati e quindi di tonalità più chiara. I cordoni sabbiosi di questo tratto di litorale sono stati distinti in dune a prevalente andamento lineare, dune a monticelli e *beach ridges*. La discriminazione non è semplice e vi possono essere molte forme intermedie:

- le dune a prevalente andamento lineare mostrano una notevole continuità ed è possibile seguirle, anche dopo occasionali interruzioni, per svariate centinaia di metri o, talvolta, per tutto il territorio studiato;
- le dune a monticelli (traduzione del termine inglese *hummocky*) sono costituite da piccoli rilievi, nei quali è più difficile identificare un allineamento e derivano dallo smembramento di antiche dune longitudinali quale conseguenza del disboscamento e con la formazione di *blow-outs*;
- come *beach ridges* sono stati classificati quei cordoni che mostrano una continuità simile a quella delle dune longitudinali, ma che si sviluppano ad altezze minori e presentano una cresta a quote relativamente costanti, tali da fare pensare che nella loro formazione abbia giocato un ruolo maggiore il *run-up* che non il trasporto eolico.

Nella *Carta geomorfologica della fascia costiera del Comune di Cecina* (Pranzini, 1996) vennero indicate anche alcune aree potenzialmente soggette a deflazione concentrata, ove è possibile la formazione di *blow-outs*.

Complessivamente furono riconosciuti 12 cordoni nel settore posto a nord della foce del Fiume Cecina e 10 in quello posto a sud. La discontinuità creata dalla foce del Cecina, e ancor più dall'abitato che ha obliterato (se non spianato) gran parte delle morfologie naturali, non consente di collegare i cordoni settentrionali con quelli meridionali. In corrispondenza della foce del fiume, laddove l'erosione costiera è stata più forte, la fascia dunare risulta ristretta ed alcuni cordoni vengono troncati dalla linea di riva.

Una datazione assoluta di questi cordoni non è mai stata effettuata, ma la presenza di reperti risalenti al periodo romano sulla duna più interna nel tratto settentrionale, collegabili all'attività di una fornace, e la presenza di torri di guardia del XVIII secolo sul limite esterno della penultima duna poco fuori dall'area studiata (Forti di Bibbona e di Castagneto), consente di affermare che l'intero sistema si è formato negli ultimi 2000 anni. La duna più esterna, quella successiva al XVIII sec., non è più presente nel tratto studiato a causa dell'erosione che, dal 1938 ad oggi, ha determinato un arretramento della linea di riva di circa 50 m nelle zone esterne e di ben 120 nel tratto posto immediatamente a sud delle difese costiere che proteggono l'abitato di Cecina Mare (Fig. 6).

La foce del Cecina, stabilizzata da un pennello in sponda destra, ha visto l'arretramento della barra di foce che si attacca sul lato sinistro di quasi 200 m. L'erosione ha interessato anche la spiaggia in cui è posto il Forte di Bibbona, circa 5 km a sud del Fosso Le Basse, con un arretramento di circa 20 m, ma l'edificio settecentesco dista ancora 100 m dalla linea di riva.



Figura 6 - Erosione della duna a sud di Marina di Cecina.

Materiali e metodi

Il LIDAR è una metodologia di rilievo basata sulla scansione del territorio per mezzo di un telemetro Laser (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*), che determina la direzione in cui è posto un riflettore e la distanza fra questo e il punto di emissione.

Per applicazioni territoriali la strumentazione viene posta su piattaforme aeree in modo da poter acquisire dati su ampie superfici e con il minimo di copertura prospettica.

Per il nostro studio è stato effettuato un volo con aereo Partenavia P68¹ sul quale era installato un altimetro LIDAR ALTM (*Airborne Laser Terrain Mapping*), che opera ad una lunghezza d'onda di 1.047 mm. Sulla stessa piattaforma era posta una camera digitale metrica ed una sensore multispettrale CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*).

Il volo, effettuato il 24 gennaio 2004, è avvenuto ad una quota di 1800 m dalla quale lo strumento ha operato con un angolo di scansione di 20°, rilevando così strisce di territorio ampie 800 m, con un fascio di 1 cm e un'accuratezza in quota di 15 cm.

La zona, divisa in tre settori (Fig. 1), è stata oggetto di due sorvoli consecutivi con sovrapposizione quasi totale, al fine di raffittire il numero di punti acquisiti, in modo tale da ottenere una densità media di circa 3 punti per metro quadro.

Un test effettuato con la stessa strumentazione nell'ambito del Progetto Beachmed sulla zona campione del delta dell'Arno (Beachmed, 2004) ha mostrato che le quote rilevate sulla spiaggia (quindi senza vegetazione) in tre diversi sorvoli non differiscono di più di 10 cm, un valore accettabile per la ricostruzione delle morfologie della fascia costiera.

I dati, provenienti dal sistema inerziale POS (*Position and Orientation System*) e dalla stazione DGPS (*Differential Global Positioning System*) di bordo, vengono elaborati per fornire l'orientamento esterno del sensore.

La procedura di elaborazione dei dati ALTM è articolata nelle seguenti fasi principali:

- correzione differenziale dei dati GPS al fine di ottenere la traiettoria dell'aeromobile;
- elaborazione dei segnali di ritorno acquisiti dal sensore con rimozione dei punti relativi a brusche variazioni di quota (*outliers*) dovuti a falsi ritorni misurati dal sensore Laser;
- estrazione dei *first-pulses* per la realizzazione del DEM (*Digital Elevation Model*) che, nelle aree vegetate, descrive il top della *canopy*;
- estrazione dei *last-pulses*, ossia gli ultimi ritorni del segnale che hanno effettuato un percorso più lungo e che quindi probabilmente hanno raggiunto il suolo;
- attribuzione dei *last-pulses* alle classi Suolo, Vegetazione ed Edifici (eventualmente altro) grazie ad un classificatore al quale viene fornito preliminarmente il tipo di morfologia prevalente dell'area, unitamente alla stima della densità (bassa, media o alta) della vegetazione da rimuovere²;
- estrazione dei soli punti identificati come Suolo;
- ricampionamento e interpolazione di questi punti per la generazione di un Grid di 1 m x 1 m, risoluzione che Woolard e Colby (2002) valutano ottimale per questo tipo di dati anche ai fini del calcolo del bilancio sedimentario dei sistemi dunari.

I dati sono stati quindi elaborati con il software ENVI per creare carte altimetriche a isolivelli e modelli 3D (Fig. 7). Un apposito software sviluppato in ambiente AutoCAD ha consentito inoltre di estrarre profili altimetrici su sezioni ortogonali e parallele alla costa.

Nel Gennaio 2005 sono stati rilevati 11 profili topografici al suolo con una stazione totale Geotronics 600, per uno sviluppo lineare complessivo di 5500 m, al fine di valutare l'accuratezza dei dati telerilevati. Ogni profilo è stato georiferito su una coppia punti rilevati con GPS geodetico modello Leica system 530, in modalità statico-rapida, con sessione di durata 30 minuti da un punto situato a San Vincenzo (circa 20 km a sud) ed appartenente alla rete IGM95. Questo per riferire i dati allo stesso sistema utilizzato con il rilievo LIDAR e quindi per operare i confronti.

Dal sensore multispettrale CASI, in fase di acquisizione, sono state selezionate 8 bande delle 220 disponibili, corrispondenti ad un range di valori che vanno da 0.4655 mm a 0.8059 mm (centri di banda). Sono state quindi prodotte immagini di NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index = NIR-R/NIR+R*) utilizzando la Banda 3 (0.6760 mm) per il Rosso (R) e la Banda 8 (0.8059 mm) per l'Infrarosso vicino (NIR).

¹ Il rilievo e la prima elaborazione sono stati effettuati dalla Soc. Aquater su incarico del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze nell'ambito del Progetto Beachmed (Commissione Europea, VI Programma Quadro).

² Il codice di calcolo utilizzato nelle elaborazioni è coperto da segreto industriale e non è stato possibile avere informazioni più dettagliate sui criteri con cui esso opera.

Valutazione dell'accuratezza dei dati

L'estrazione degli impulsi associati alla vegetazione, al suolo e agli edifici si basa sul riconoscimento automatico di queste tipologie sulla base delle variazioni di quota registrate fra ciascun punto ed i punti limitrofi.

Se però la vegetazione è molto densa e con una *canopy* estremamente regolare vi sono maggiori probabilità che questa non sia riconosciuta come tale (Okagawa, 2001).

In ogni caso, quando la vegetazione diventa impenetrabile, anche se essa venisse riconosciuta grazie alle brusche variazioni di quota della sua *canopy*, non si avrebbe l'acquisizione di punti associabili al suolo; in questi casi la *Grid* viene ricostruita per interpolazione fra i punti più vicini.

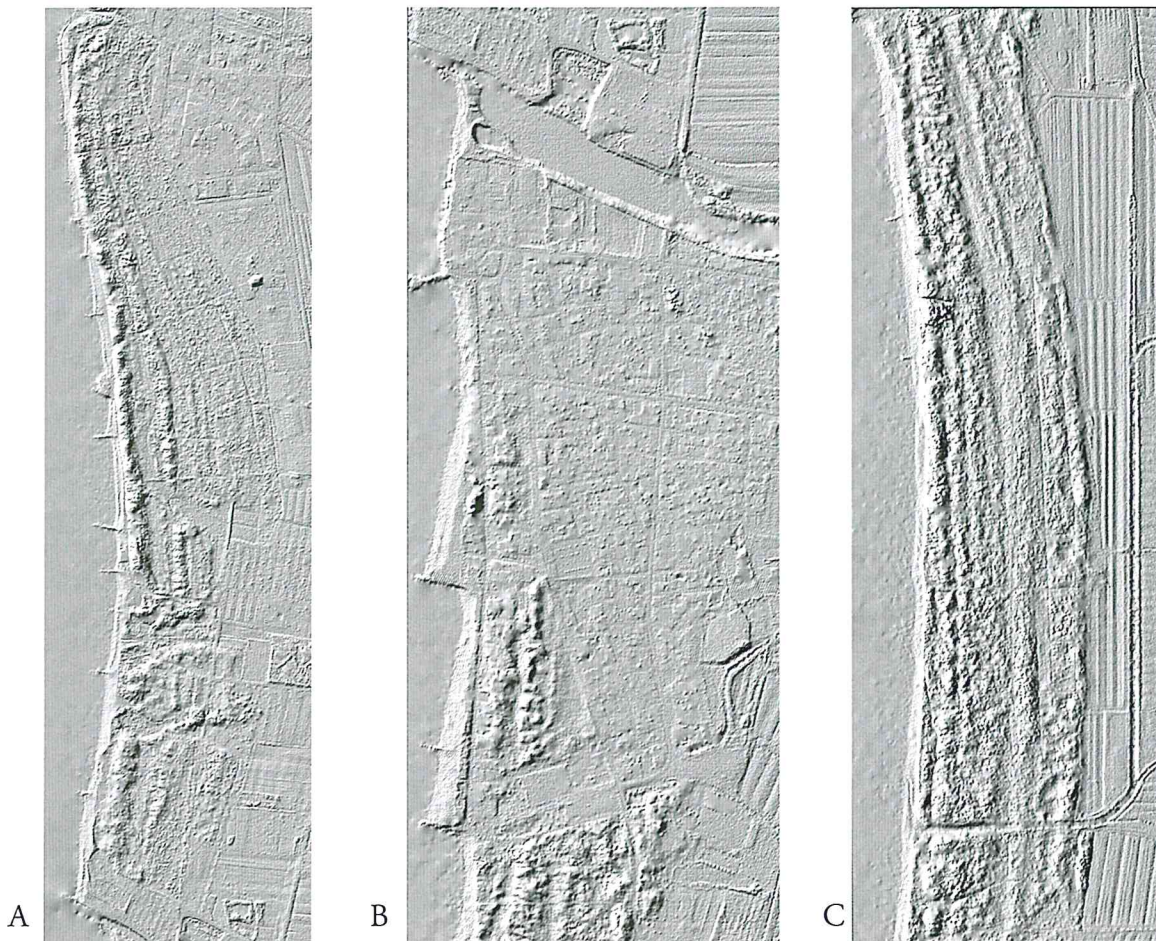


Figura 7 - Shaded relief delle tre strisciate acquisite lungo il litorale di Marina di Cecina; vedi Figura 1 per l'ubicazione delle strisciate. (Scala 1:14.000 circa).

In Figura 8 (alto) viene rappresentata la nuvola di punti corrispondenti ai *last-pulses* acquisiti nel tratto di litorale posto a sud della foce del Fiume Cecina (in corrispondenza del profilo topografico 10.3 di Fig. 1) mentre in basso vi sono i punti filtrati dal software che ha escluso quelli riconosciuti come vegetazione.

Si può osservare come nell'immagine superiore vi sia una elevata densità di punti (fino a 4 per m²), mentre in quella inferiore vi sono ampie fasce completamente vuote, dove la generazione del Grid con maglia 1 m x 1 m richiederà numerose interpolazioni. Ciò avviene spesso negli avvallamenti fra i cordoni dunari, dove l'umidità del suolo consente lo sviluppo di un fitto sottobosco. È evidente quindi che il Grid ottenuto dall'interpolazione dei dati originali risulta meno preciso proprio in corrispondenza di queste zone.

Il mancato riconoscimento della vegetazione porta sempre ad attribuire ad un punto quote più elevate di quelle del suolo, anche se valori eccessivi vengono poi riconosciuti come *outliers* ed eliminati. La mancanza di punti prodotta dal riconoscimento della vegetazione, al contrario, può portare all'attribuzione di quote maggiori o minori

di quelle reali in funzione delle quote dei punti adiacenti. E' per questo che in aree coperte da densa vegetazione possiamo avere errori in quota sia positivi che negativi.

In Figura 9 è riportato il confronto fra un profilo topografico rilevato con la Stazione Totale, che in questo studio costituisce la "verità al suolo", e le quote dei punti filtrati accettando solo quelli che ricadono entro una circonferenza di raggio 50 cm e centro nei punti di verità.

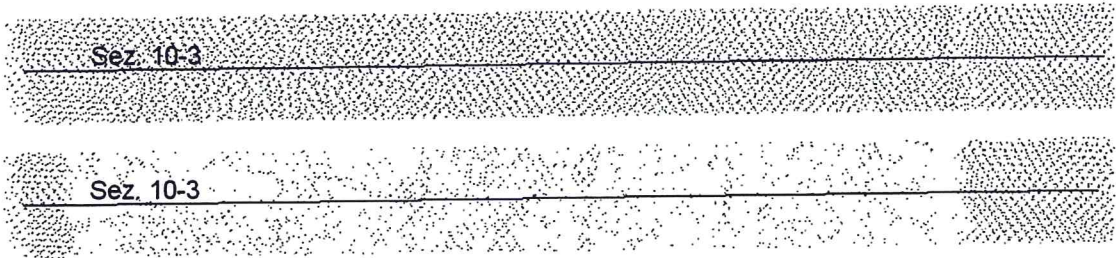


Figura 8 - Sezione 10.3: nuvola dei punti corrispondenti ai *last-pulses* (sopra) e la stessa dopo la filtratura che toglie i punti riconosciuti come vegetazione (sotto).

Le differenze di quota rilevate con i due metodi su questo profilo appaiono in Figura 9: sulla diagonale cadono i punti per i quali le due quote sono uguali, mentre sotto e sopra ad essa vi sono i punti in cui il LIDAR ha sovrastimato o sottostimato la quota. Come si vede le differenze sono assai contenute, con uno scostamento medio che in valore assoluto risulta essere pari a 0.173 m (N = 51; Deviazione standard = 0.115). L'errore risulta equamente distribuito fra sovra- e sottostime, tanto che la media reale è prossima a zero (+0.024 m). Analizzando la totalità dei punti di verità al suolo si ha uno scostamento medio in valore assoluto ancora minore (Media 0.176 m; N = 613; Deviazione standard = 0.171), anche in questo caso con una modesta sovrastima della quota da parte del Grid (+0.049 m).

Gli scostamenti massimi fra quote LIDAR e quote Stazione Totale si sono registrati in un tratto del Profilo 8.3, rappresentato in Figura 10: qui vi è una buona corrispondenza nelle aree prive di copertura vegetale (Zona 1, strada) ed in quelle sottostanti la vegetazione ad alto fusto (Zona 3), mentre lo scostamento raggiunge 1.34 m fra le prime due dune (Zona 2), dove più fitto è il sottobosco che, evidentemente, non è stato riconosciuto come vegetazione. Dove questa viene riconosciuta si genera una mancanza di punti ed il Grid è frutto di interpolazione fra punti distanti: in presenza di forti pendenze il profilo che si genera tende a sottostimare le quote maggiori e sovrastimare quelle minori (Zona 4 in Fig. 11).

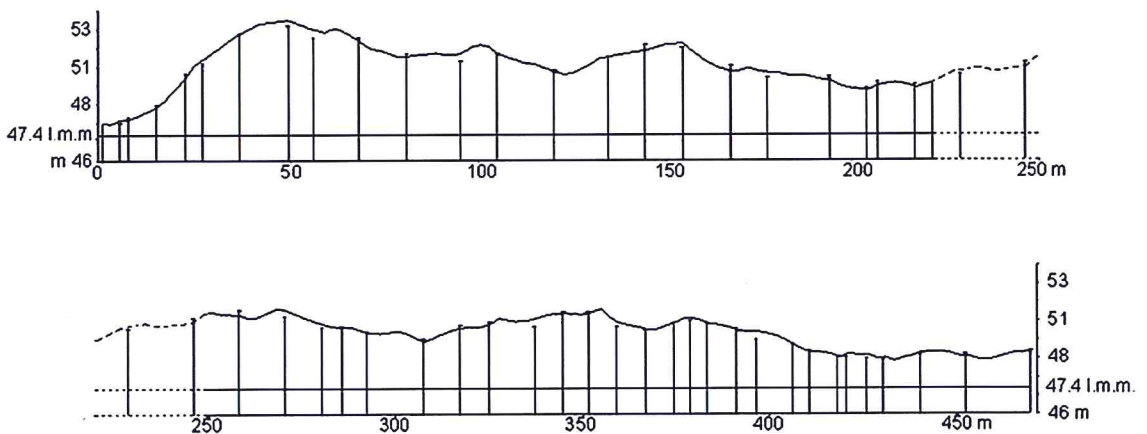


Figura 9 - Profilo 10.3 estratto dai dati LIDAR filtrati. Le aste verticali forniscono la quota dei punti di controllo rilevati con la Stazione Totale. Le quote sono riferite all'ellissoide che, localmente, è 47.4 m più basso del livello del mare.

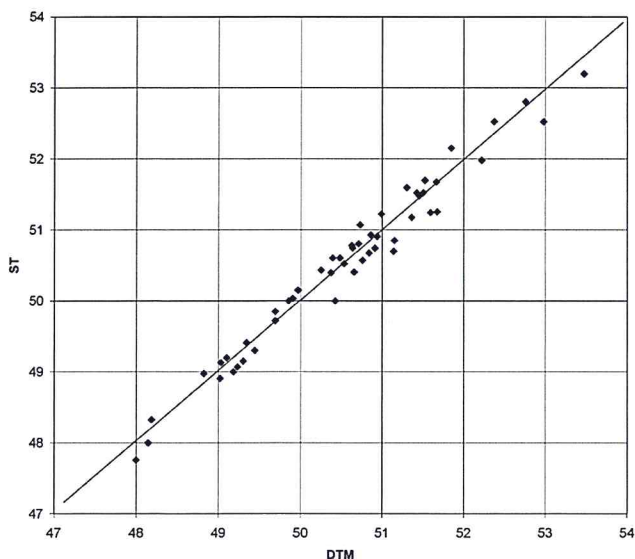


Figura 10 - Diagramma bivariato delle quote rilevate con il LIDAR e quelle ottenute con la Stazione Totale (Profilo 10.3).

che, essendo coltivate a grano, al momento del rilievo (Gennaio) avevano una scarsa copertura vegetale. Nella zona corrispondente alla pineta (omogenea nel profilo considerato), i valori dell'NDVI risultano piuttosto costanti e compresi in genere fra 0.5 e 0.7, ad indicare una copertura vegetale densa e ben distribuita, dovuta in parte anche al sottobosco. Confrontando le differenze fra la quota dei punti Grid e quella dei corrispondenti punti rilevati con la Stazione Totale con i valori di NDVI delle rispettive celle, si osserva che le discordanze sono minori dove la vegetazione è meno densa, ma che dove essa è più densa si possono avere valori sia positivi che negativi, a conferma di quanto detto in precedenza.

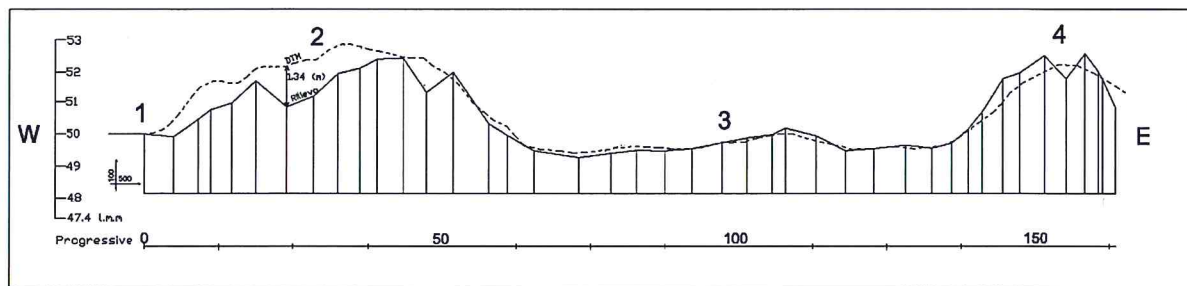


Figura 11 - Confronto fra un profilo topografico (N. 8.3) estratto dal Grid prodotto con i dati LIDAR e quello rilevato a terra con la Stazione Totale. E' in questa sezione che si sono registrati gli scostamenti massimi fra i due metodi utilizzati (esagerazione verticale 1:5; quote ellissoidiche). I numeri in neretto si riferiscono alla Zone di cui si parla nel testo.

Si può comunque affermare che il Modello Digitale del Terreno prodotto con il LIDAR aerotrasportato ha un'accuratezza sufficiente per consentire uno studio geomorfologico di dettaglio del sistema dunare. Ciò è sorprendente se si considera che tutta la fascia costiera, ad eccezione dell'abitato di Marina di Cecina, presenta una copertura boschiva completa, come appare dai valori delle immagini dell'NDVI, seppure costituita in prevalenza da pini la cui chioma è limitata ad uno strato di modesto spessore. Le potenzialità dei rilievi LIDAR appaiono evidenti dal confronto fra il DTM e la fotoaerea ripresa nel medesimo istante: mentre il primo permette un'accurata mappatura di numerosi cordoni dunari, la seconda non consente neppure l'identificazione di queste morfologie (Fig. 14).

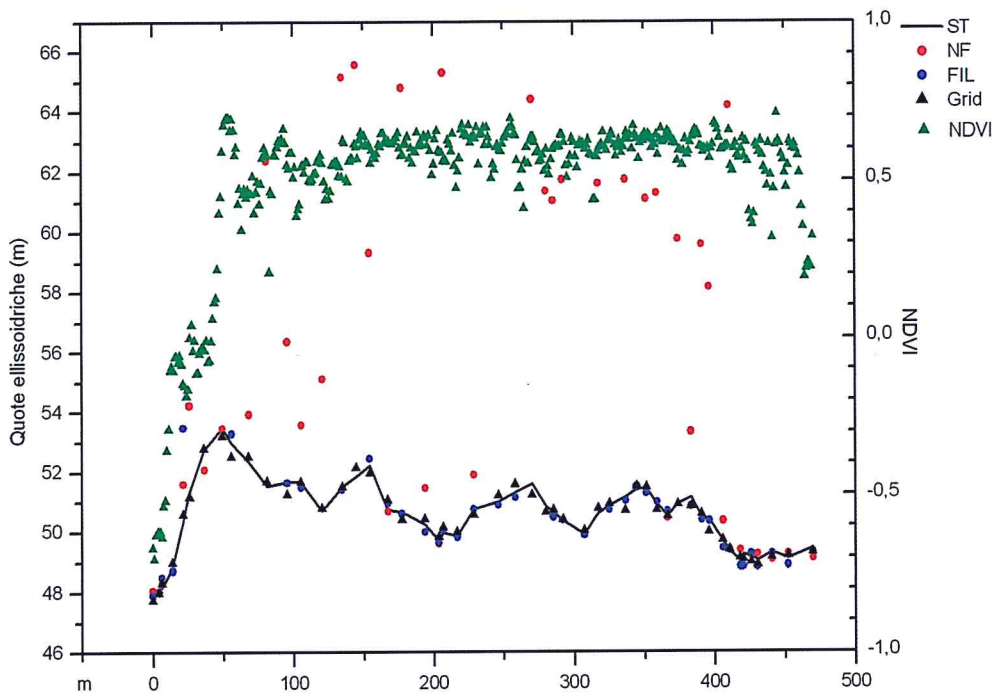


Figura 12 - Profilo topografico rilevato con la Stazione Totale lungo la Sezione 10.3. Vengono riportati anche i punti relativi ai *last-pulses* riconosciuti come vegetazione (NF), quelli identificati come suolo (FIL), e quelli che costituiscono il Grid. Con riferimento all'asse di destra sono riportati anche i valori dell'Indice di Vegetazione (NDVI) ricavato sullo stesso profilo dai dati CASI.

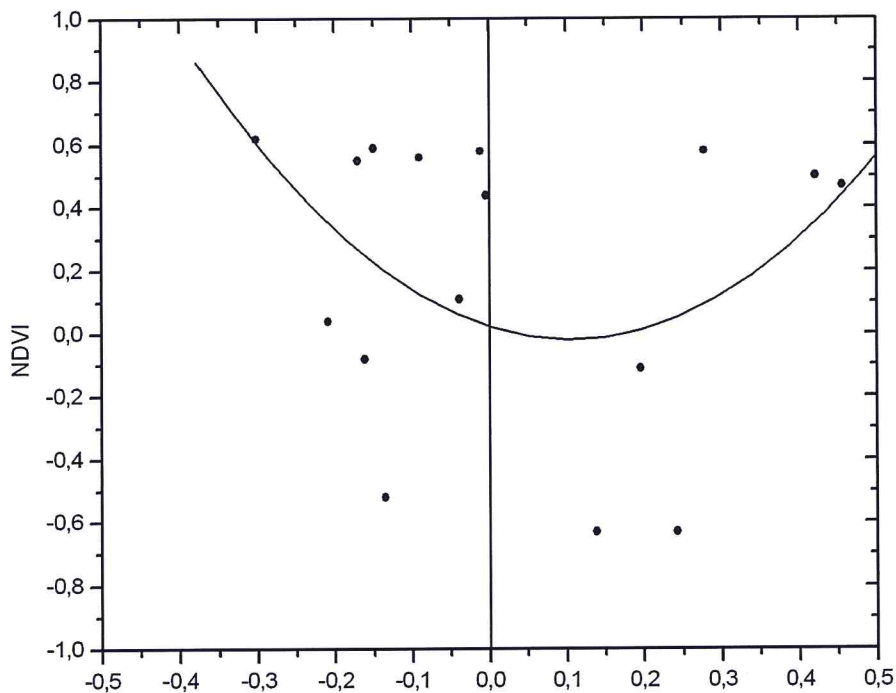


Figura 13 - Distribuzione dei valori di differenza fra DTM e ST in relazione al corrispettivo valore di NDVI nel Profilo 10.3.

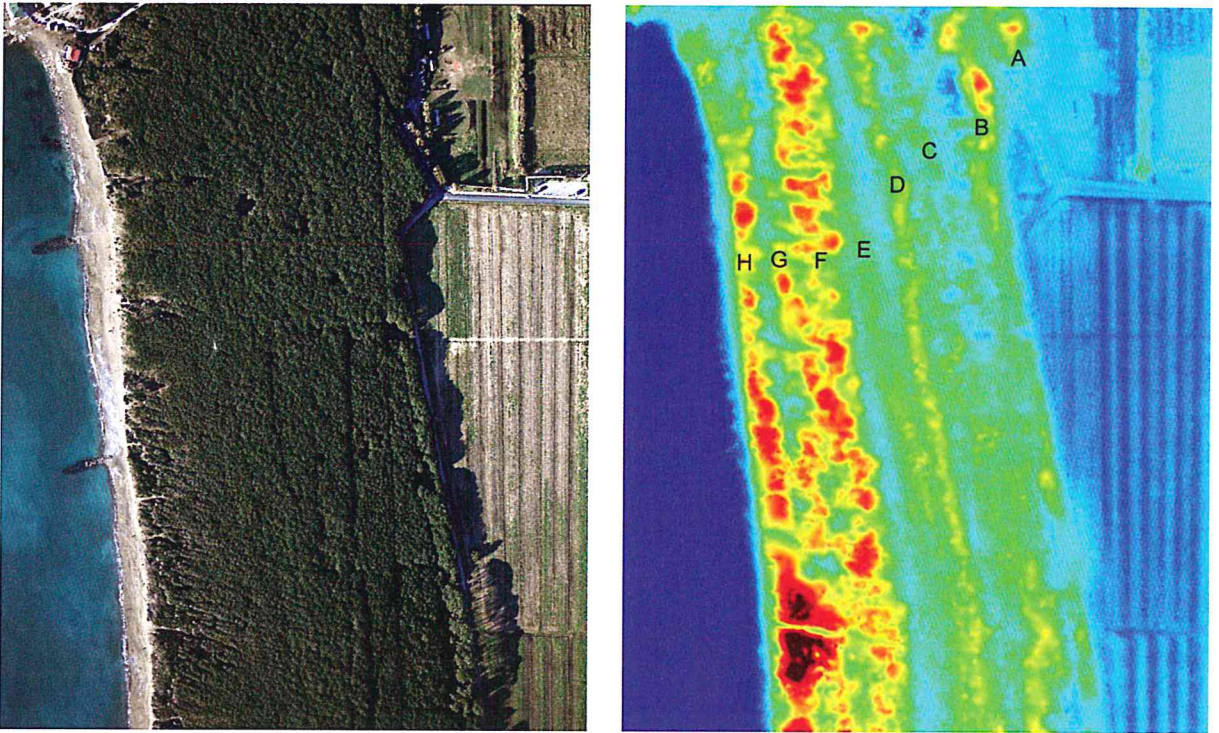


Figura 14 - Foto aerea del tratto di litorale posto a sud di Marina di Cecina (a sinistra) e DTM della stessa zona prodotto con i dati LIDAR (a destra).

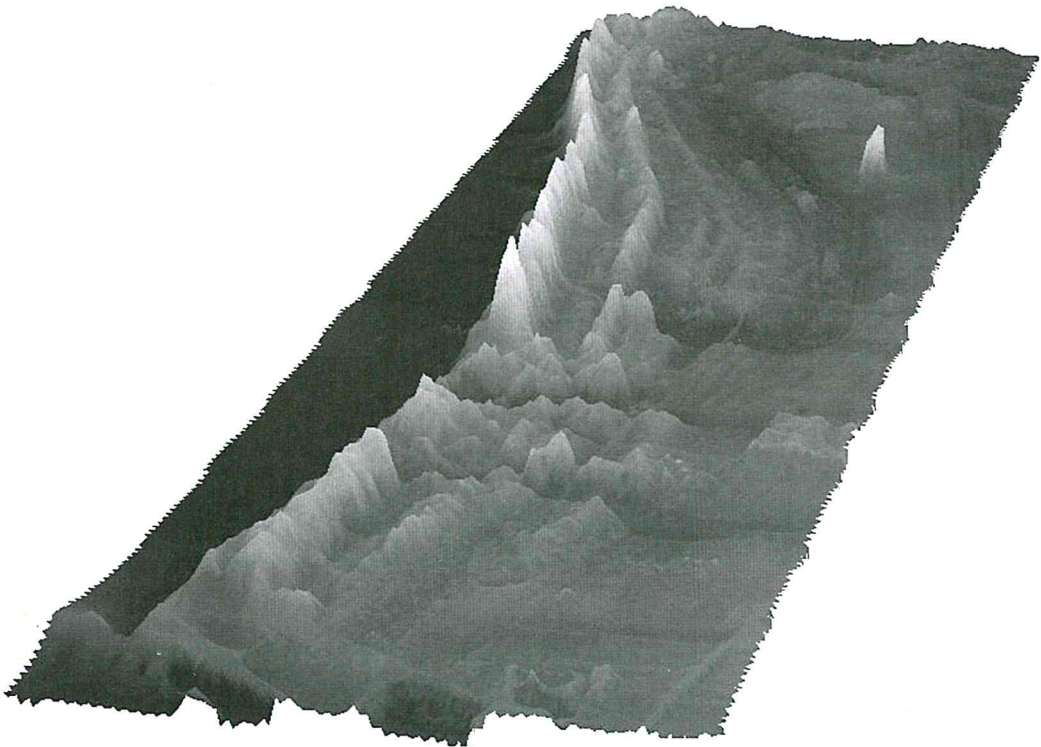


Figura 15 - Modello Digitale del Terreno della fascia costiera posta a nord della foce del Fiume Cecina (Zona A in Fig. 1). La forte esagerazione verticale (1:100) consente l'identificazione dei bassi cordoni posti all'interno nella parte settentrionale dell'immagine, associabili più a *beach ridges* che non a vere e proprie dune.

Analisi del DTM

Il Modello Digitale del Terreno delle dune del litorale di Marina di Cecina consente di riconoscere le morfologie precedentemente identificate e ne permette anche una migliore descrizione e discriminazione.

Nel tratto settentrionale (Fig. 15) si riconoscono 9 cordoni dunari, più o meno continui, che possono raggiungere anche la quota di circa 6 m. Laddove si è persa la loro continuità, ed essi sono stati trasformati in dune a monticelli, come era stato precedentemente indicato (Pranzini, 1996), e il DTM consente di ricostruire l'allineamento della duna longitudinale da cui si sono sviluppate, ma solo in pochi casi si identificano i lobi del materiale spostato dal vento.

Ben evidenti sono i solchi corrispondenti agli attraversamenti pedonali, conseguenza del fatto che il numero limitato degli accessi concentra i visitatori su pochi percorsi.

Nella zona de Le Gorette sono evidenti i varchi che attraversano il sistema dunare per quasi tutta la sua larghezza e che si collegano alle aree depresse retrostanti, residuo delle paludi bonificate fra il XVIII e il XIX secolo. Dove questi tracciati attraversano i bassi interdunari si notano degli argini che, molto probabilmente, sono costituiti dal materiale di risulta dall'incisione dei canali. Tutto ciò avvalorava l'ipotesi che questi varchi sono stati creati artificialmente.

L'accuratezza del dato altimetrico consente di identificare anche i bassi cordoni presenti al limite delle zone agricole, come quello che ospitava la fornace romana e che è stato in parte spianato in anni recentissimi.

Nell'abitato di Marina di Cecina le dune sono state spianate quasi ovunque, fatta eccezione per il tratto meridionale, dove sono evidenti tre allineamenti. Il filtro che elimina vegetazione ed edifici è stato efficace e qui il Grid è stato generato con molte interpolazioni che rendono il DTM assai poco rugoso (Fig. 7).

Nel settore meridionale (Fig. 16) si riconoscono 8 allineamenti ben definiti ed altri cordoni meno regolari e di quota ridotta. Di particolare interesse è un piccolo cordone intermedio (E in Fig. 16) che, verso nord, viene decapitato (Kukavcic e Pranzini, 2003) dalla più interna di una coppia di dune longitudinali di notevole sviluppo: il piccolo cordone, poco più che un *beach ridge*, disegna una costa che doveva essere assai prominente alla foce del fiume e quindi associabile ad un periodo di intenso input fluviale. I cordoni successivi sono meno prominenti ma assai più imponenti, quali quelli che si sviluppano in periodi di lenta crescita di una spiaggia che comunque riceve una costante alimentazione. Una fase erosiva separa questi due periodi che, nel modello concettuale di Psuty (1992), sono riferibili a condizioni diverse del budget della duna e di quello della spiaggia.

Durante la fase erosiva è stato tagliato l'apice delta del Fiume Cecina al quale il piccolo cordone si raccordava. E' quanto avvenuto anche nel secolo scorso, quando il più esterno dei cordoni dunari, ora presente solo all'estremità meridionale dell'area studiata, è stato asportato dall'erosione che affligge tutt'ora questa costa.

Anche il cordone C (in Fig. 16) risulta convergere con il successivo D a delinare, seppure in modo meno evidente, una fase erosiva ancor più antica di quella sopra citata.

Tracce di rimodellamento delle dune da parte del vento si ritrovano, in questa parte del litorale, nella fusione dei due cordoni maggiori e in numerosi *blow-outs* presenti in essi, ma anche nei più piccoli cordoni interni. Purtroppo non si hanno al momento elementi per datare questi processi ed associarli eventualmente a periodi di forte disboscamento, quale quello conseguente alla liberalizzazione del taglio dei boschi attuata in Toscana nel '700 dai Lorena e ritenuta responsabile, oltre che dell'aumento dell'input fluviale in tutta la regione (Pranzini, 2001), anche della rimobilizzazione delle dune in un tratto di litorale posto poco più a sud di quello qui studiato (Mazzanti et al., 1980). Considerando che la pineta è stata impiantata nella prima metà dell'800, è probabile che il rimodellamento eolico abbia agito anche in questo periodo.

Anche in questa parte del sistema dunare si riconoscono alcuni percorsi che collegano la strada che corre sul margine interno della pineta al mare. Su questi allineamenti, all'incisione dei cordoni fa riscontro la deposizione della sabbia nel tratto interdunare dove si viene a costituire di un rilevato: si tratta in pratica di *blow-outs* consecutivi.

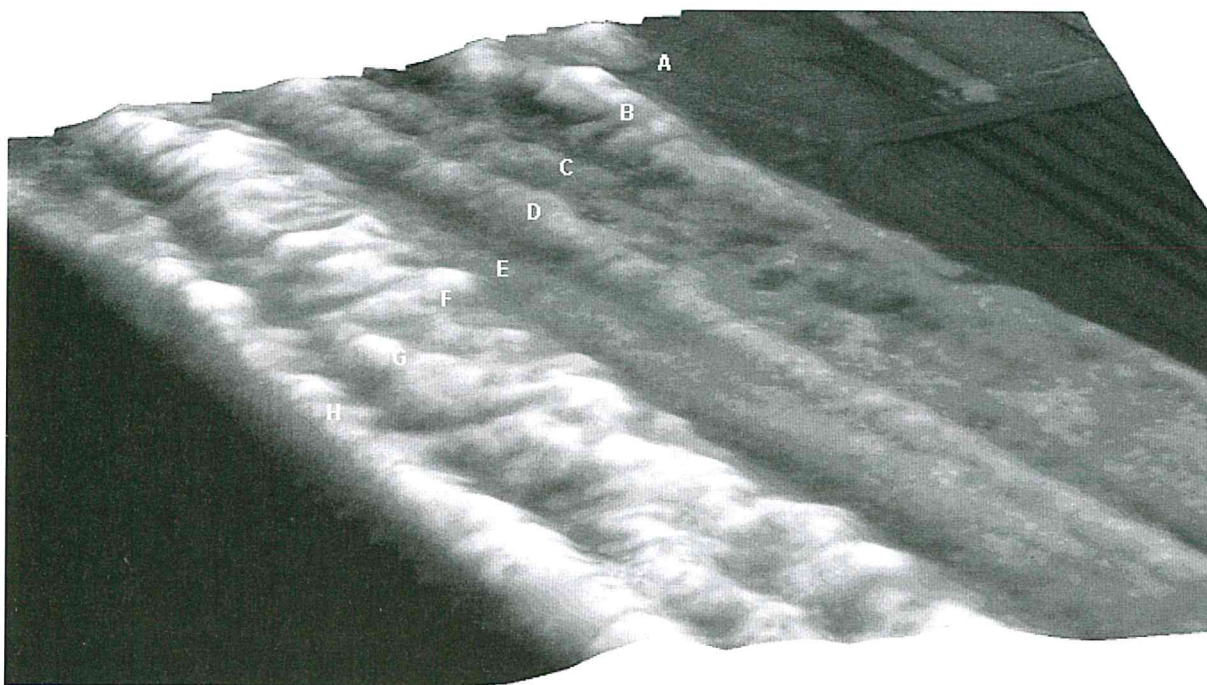


Figura 16 - Modello tridimensionale del terreno della parte settentrionale del settore C. Si nota il basso cordone sabbioso E “decapitato” da quello più esterno F e segno di una fase erosiva della costa. Simile andamento lo si rileva nel cordone più interno C che viene intersecato dal D.

Conclusioni

I dati ALTM consentono la generazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM) di buona precisione anche in aree con una copertura vegetale piuttosto densa. Laddove il segnale (*last-pulse*) non riesce a raggiungere il suolo il filtro vegetazionale è spesso capace di rimuovere il punto, ma il Grid che si genera viene qui interpolato, creando punti che possono stare sia sopra che sotto la superficie topografica reale.

L'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito una fedele ricostruzione del sistema dunare di Marina di Cecina, sulla quale è stato possibile riconoscere numerosi elementi d'interesse. Primi fra tutti due cordoni decapitati da cordoni successivi che identificano due fasi erosive nel processo di formazione del delta del Fiume Cecina. Nella zona de Le Gorette è stato possibile ritrovare tracce dell'intervento che l'uomo ha fatto per aprire dei varchi in modo da favorire il deflusso dalle zone depresse retrostanti, riconoscendo quindi che queste incisioni non sono da attribuire a tagli operati dal fiume.

I numerosi *blow-outs* identificati sui vari cordoni hanno messo in evidenza quanto l'attività antropica abbia influito sull'evoluzione morfologica di quest'area; attività che oggi è limitata all'attraversamento del sistema dunare per raggiungere la spiaggia. Anche questa, comunque, lascia tracce evidenti sulla morfologia delle dune.

Il DTM generato con i dati LIDAR e le indicazioni tratte dalla sua lettura costituiscono un materiale importante per impostare un corretto piano di gestione di questa fascia costiera, piano difficilmente impostabile con i dati cartografici prodotti con i tradizionali sistemi di rilievo.

Ringraziamenti

Lo studio è stato condotto nell'ambito del Progetto di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN) *I depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna*, utilizzando anche dati acquisiti con il Progetto Beachmed (INTERREG III B).

Si ringrazia l'Ing. Tonino Tarsi, dell'Aquater S.p.A., per le informazioni sull'ALTM fornite con estrema disponibilità e cortesia.

Bibliografia

- Barsanti D. e Rombai L. (1986) - *La "Guerra delle acque" in Toscana. Storia delle bonifiche dai Medici alla Riforma Agraria*. Edizioni Medicea, Firenze. 170 pp.
- Beachmed (2004) - *3° Quaderno tecnico*. Commissione Europea, Dir. Generale alle Politiche Regionali e alla Coesione. Programma operativo INTERREG III B, Misura 4.3: Protezione e valorizzazione del patrimonio naturale e culturale, gestione della biodiversità, dei territori e dei paesaggi. Spazio del Mediterraneo Occidentale. 278 pp.
- Haxel J.H. e Holman R.A. (2004) - *The sediment response of a dissipative beach to variations in wave climate*. *Marine geology*, 206: 73-99.
- Irish J.L e White T.E. (1998) - *Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry*. *Coastal engineering*, 35: 47-71.
- Krabill W.B., Wright C., Swift R., Frederick E., Manizade S., Yungel J., Martin C.F., Sonntag J., Duffy M, Hulslander W. e Brock J. (2000) - *Airborne laser mapping of Assateague National Seashore Beach*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66: 65-71.
- Kukavacic M. e Pranzini E. (2003) - *Beach ridges and dunes of the Arno River delta*. Medcoast Conference, Ravenna, Ottobre 2003, pp. 1413-1424.
- Mazzanti R., Pranzini E. e Taccini S. (1980) - *Studi di geomorfologia costiera: VII - Variazioni della linea di riva dal Pleistocene medio-superiore ad oggi, caratteristiche sedimentologiche e stato delle associazioni vegetali del litorale di San Vincenzo (Toscana)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 99: 341-364.
- Okagawa M. (2001) - *Algorithm of multiple filter to extract DSM from LIDAR data*. ESRI User Conference. Pap. 986., 12 pp. http://gis.esri.com/library/userconf/proc01_professional/papers/pap986/p986.htm.
- Pranzini E. e Simeoni U. (2005) - *Morfologia delle dune costiere*. In *Le dune costiere in Italia*, a cura di U. Macchia, E. Pranzini e P.E. Tomei, Felici Editore, Pisa. Pp. 93-113.
- Pranzini E. (1996) - *Carta geomorfologica della fascia costiera del Comune di Cecina*. ARCA, Firenze.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. *Geomorphology*, 1-2: 125-132.
- Psuty N.P. (1992) - *Spatial variation in coastal foredune development*. In *Coastal dunes: Geomorphology, Ecology and Management*. A cura di R.W.G. Carter, T.G.F. Curtis e M.J. Sheehy-Skeffington. Balkema, Rotterdam. Pp.3-13
- Stockdon H.F., Sallenger A.H., List J.H. e Holman R.A. (2002) - *Estimation of shore position and change using Airborne Topographic Lidar data*. *Journ. Coastal Research*, 3: 502-513.
- Woolard J.W. e Colby J.D. (2000) - *Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LIDAR: Cape Hatteras, North Carolina*. *Geomorphology*, 48: 269-287.

Manoscritto ricevuto il 19/07/2005; accettato il 20/10/2005.