



ATTI
DELLA
SOCIETÀ TOSCANA
DI
SCIENZE NATURALI

MEMORIE • SERIE A • VOLUME CXXVI • ANNO 2019



Edizioni ETS

INDICE - CONTENTS

<p>P. FULIGNATI, P. MARIANELLI, A. SBRANA – Quantitative SEM-EDS analysis of reference silicate mineral and glass samples. <i>Analisi quantitative SEM-EDS di campioni di riferimento di vetri e minerali silicatici.</i></p>	<p>pag. 5</p>
<p>G. GALLELLO, J. BERNABEU, A. DIEZ-CASTILLO, P. ESCRIBA, A. PASTOR, M. LEZZERINI, S. CHENERY, M.E. HODSON, D. STUMP – Developing REE parameters for soil and sediment profile analysis to identify Neolithic anthropogenic signatures at Serpis Valley (Spain). <i>Sviluppo di parametri REE per l'analisi del profilo del suolo e dei sedimenti per identificare le firme antropogeniche neolitiche nella valle del Serpis (Spagna).</i></p>	<p>» 13</p>
<p>D. MAURO, C. BIAGIONI, M. PASERO, H. SKOGBY – Crystal-chemistry of sulfates from the Apuan Alps (Tuscany, Italy). III. Mg-rich sulfate assemblages from the Fornovolasco mining complex. <i>Cristallochimica dei solfati delle Alpi Apuane (Toscana, Italia). III. Associazioni a solfati ricchi in Mg dal complesso minerario di Fornovolasco.</i></p>	<p>» 33</p>
<p>P. ORLANDI, M. D'ORAZIO – Cinnabar and other high-density minerals from stream sediments of Monti Pisani (Pisa and Lucca provinces, Tuscany). <i>Cinabro ed altri minerali ad elevata densità negli "stream sediments" dei Monti Pisani (Province di Lucca e Pisa, Toscana).</i></p>	<p>» 45</p>
<p>M. BACCI, S. CORSI, L. LOMBARDI, M. GIUNTI – Gli interventi di ripristino morfologico ed ecologico del sistema dunale del Golfo di Follonica (Toscana, Italia): tecniche utilizzate e risultati del monitoraggio. <i>Morphological and ecological activities to restore the dune system at the Follonica Gulf (Tuscany, Italy): techniques used and monitoring results.</i></p>	<p>» 57</p>
<p>D. MAGALDI – Interglacial Pleistocene paleosols supporting old roads in central Tuscany. <i>Paleosuoli del Pleistocene interglaciale a supporto di antiche strade nella Toscana centrale.</i></p>	<p>» 67</p>
<p>V. SPADINI – Pliocene scleractinians from Estepona (Malaga, Spain). <i>Sclerattiniari pliocenici di Estepona (Malaga, Spagna).</i></p>	<p>» 75</p>
<p>R. GIANNECCHINI, M. AMBROSIO, A. DEL SORDO, M.T. FAGIOLI, A. SARTELLI, Y. GALANTI – Hydrogeological numerical modeling of the southeastern portion of the Lucca Plain (Tuscany, Italy), stressed by groundwater exploitation. <i>Modello idrogeologico numerico del settore sud-orientale della Piana di Lucca (Toscana, Italia) caratterizzato da sfruttamento intensivo delle risorse idriche.</i></p>	<p>» 95</p>
<p>W. LANDINI – In memoria di Marco Tongiorgi (1934-2019). <i>In memory of Marco Tongiorgi (1934-2019).</i></p>	<p>» 111</p>
<p>Processi Verbali della Società Toscana di Scienza Naturale residente in Pisa. Anno 2019 - http://www.stsn.it</p>	<p>» 121</p>

MAURIZIO BACCI ⁽¹⁾, STEFANO CORSI ⁽¹⁾, LEONARDO LOMBARDI ⁽²⁾, MICHELE GIUNTI ⁽²⁾

GLI INTERVENTI DI RIPRISTINO MORFOLOGICO ED ECOLOGICO DEL SISTEMA DUNALE DEL GOLFO DI FOLLONICA (TOSCANA, ITALIA): TECNICHE UTILIZZATE E RISULTATI DEL MONITORAGGIO

Riassunto - M. BACCI, S. CORSI, L. LOMBARDI, M. GIUNTI. *Gli interventi di ripristino morfologico ed ecologico del sistema dunale del Golfo di Follonica (Toscana, Italia): tecniche utilizzate e risultati del monitoraggio.*

In considerazione delle importanti funzioni ecosistemiche, paesagistiche e di difesa costiera svolte dai sistemi dunali, nell'ambito del *Programma di interventi prioritari di recupero e riequilibrio del litorale della Regione Toscana*, tra il 2010 e il 2015 sotto il coordinamento della Provincia di Livorno, sono stati progettati e realizzati estesi interventi di riqualificazione morfologica ed ecologica del sistema dunale interno al Parco costiero della Sterpaia (Comune di Piombino, LI). In particolare, sono state ideate e realizzate nuove tecniche per la difesa e la ricostruzione dunale basate sull'ingegneria naturalistica, con utilizzo esclusivo di materiali naturali (legno, bioreti, specie vegetali, materiali inerti), associate a interventi di razionalizzazione degli accessi per la fruizione, al controllo/eradicazione di specie vegetali aliene e all'impianto di specie vegetali autoctone. Il monitoraggio, effettuato per 2 anni dalla conclusione dei lavori su diverse componenti (legname, reti, vegetazione, morfologia, fruizione), ha dimostrato l'efficacia delle scelte attuate, sul piano sia naturalistico che ingegneristico, e indirizzato gli Enti preposti verso un'adeguata gestione del sistema duna-arenile e la conservazione degli importanti servizi ecosistemici ad esso legati.

Parole chiave - dune, erosione costiera, ecosistemi dunali, riqualificazione ambientale, ingegneria naturalistica, monitoraggio ambientale

Abstract - M. BACCI, S. CORSI, L. LOMBARDI, M. GIUNTI. *Morphological and ecological activities to restore the dune system at the Follonica Gulf (Tuscany, Italy): techniques used and monitoring results.*

In the timespan between 2010 and 2015 interventions aimed at the morphologic and ecologic redevelopment of the dune system of Sterpaia, within the Golfo di Follonica (Tuscany, Italy), have been designed and realized. Project and construction were under the control of the Provincia di Livorno, within a broader intervention for the recovery of the coast established by the Regione Toscana in order to protect dune ecosystems, so important both for naturalistic and economic reasons. Innovative techniques to protect and redevelop the dune system have been conceived and applied according to the modern concepts of naturalistic engineering. Only natural materials have been used (such as wood, vegetation species, inert materials), along with beach access rationalization, eradication of alien species and implant of autochthonous species. The interventions have been monitored during the last 4 years following a number of indicators (wood, fences, vegetation, morphology, fruition). The results showed the efficiency of the interventions both on the environmental and the technical level, pointing out a potential adequate dune system management that may be supportive for decision makers.

Key words - dunes, coastal erosion, littoral ecosystems, environmental redevelopment, naturalistic engineering, environmental monitoring, Tuscany

INQUADRAMENTO DEL SITO E DELLE PROBLEMATICHE

Gli ambienti dunali e retrodunali della Toscana ospitano ecosistemi di grande valore, la cui conservazione costituisce un obiettivo prioritario riconosciuto dai recenti strumenti, approvati nel 2015, di Piano paesaggistico regionale e di Strategia regionale per la biodiversità (Lombardi *et al.*, 2016). Offrono inoltre servizi ecosistemici di ingente valore economico: creazione di paesaggi di grande interesse turistico, tutela delle falde acquifere costiere e ostacolo all'intrusione del cuneo salino, mitigazione degli effetti delle mareggiate e dell'erosione costiera su aree urbane e agricole costiere, etc. Negli ultimi decenni la maggior parte dei sistemi dunali in Italia è stato fortemente alterato a causa di numerosi fattori antropici quali, tra i più significativi, la realizzazione di infrastrutture portuali, l'artificializzazione delle coste e dei fiumi, l'elevato carico turistico estivo, la diffusione di specie vegetali aliene e i fenomeni di inquinamento delle acque (Macchia *et al.*, 2005; Bertoni & Sarti, 2011; Fenu *et al.*, 2012; Ciccarelli, 2014; Corbau *et al.*, 2015). Assieme ai cambiamenti climatici, tali fattori hanno comportato la modifica delle dinamiche costiere dei sedimenti, fenomeni di erosione costiera, abbassamento delle falde freatiche con ingresso del cuneo salino, alterazioni ecologiche e frammentazione degli habitat. In questo contesto divengono prioritari, assieme a condivise politiche di gestione e utilizzo sostenibile delle zone costiere, interventi di riqualificazione morfologica ed ecologica dei sistemi dunali (Martínez *et al.*, 2013; Bartolini *et al.*, 2018).

Le tecniche comunemente utilizzate per la conservazione degli arenili consistono in interventi di difesa a mare, tendenzialmente rigidi (*sensu* French, 2001) e basati sul controllo dell'erosione e della sedimentazione, talvolta uniti a progetti di ripascimento (Cam-

⁽¹⁾ IRIS sas, via Volterrana 179, 50020 Cerbaia, Firenze, Italia

⁽²⁾ NEMO srl, Piazza M. D'Azeglio 11, 50121 Firenze, Italia

Corresponding author: Maurizio Bacci (bacci@irisambiente.it)

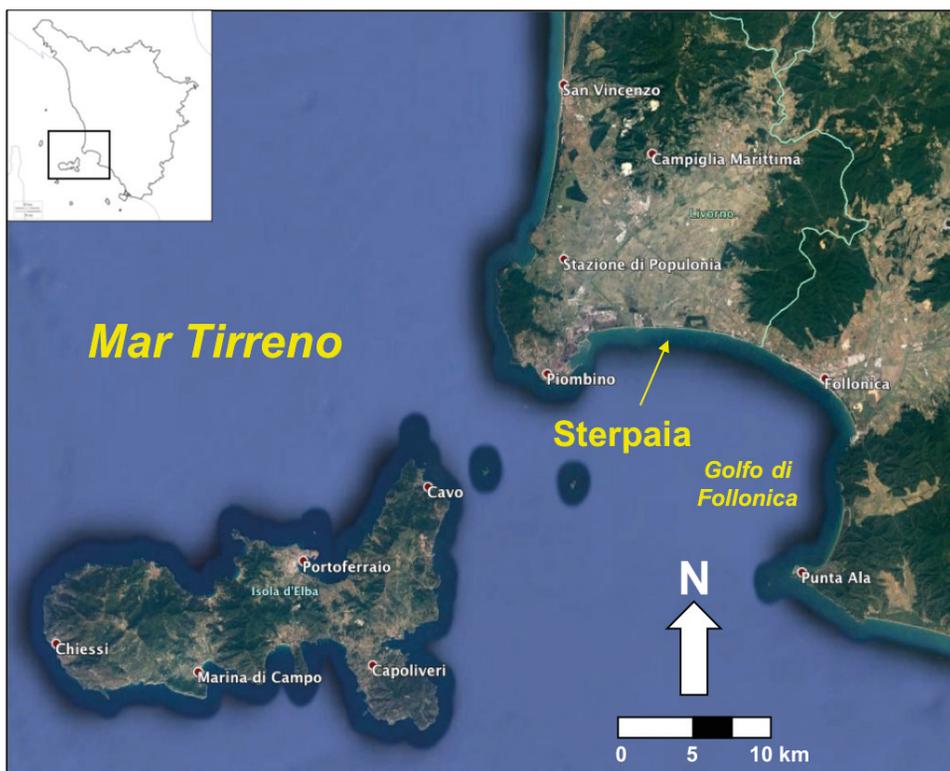


Figura 1. Mappa dell'area di studio, situata all'interno del Golfo di Follonica, in Toscana meridionale.

Figura 2. Ricostruzione del sistema dunale interrotto ad opera delle mareggiate in località Mortelliccio. a) situazione al 2011; b) situazione alla fine dell'intervento (2013) e c) nella primavera 2015.



melli *et al.*, 2006; Nordstrom *et al.*, 2008; Cipriani *et al.*, 2013; Ellis & Cappiotti, 2013). Tali tecniche in alcuni contesti hanno mostrato una buona efficacia, ma in altre zone sono risultate inefficaci (Pranzini, 2018).

Inoltre, l'applicazione di tecniche tradizionali può risultare appropriata in contesti fortemente degradati o artificiali, ma risulta spesso critica dal punto di vista ecosistemico e paesaggistico in aree caratterizzate da elevati livelli di naturalità, nell'ambito di aree protette costiere o in zone interne a beni paesaggistici (Lithgow *et al.*, 2013; Alquini *et al.*, 2016; Ciccarelli *et al.*, 2017; Bezzi *et al.*, 2018).

Nell'ambito dei territori costieri dunali, notevoli progressi nello studio del trasporto eolico di sabbia sono stati compiuti grazie all'utilizzo di sensori di tipo acustico (Poortinga *et al.*, 2012), piezoelettrico (Udo, 2009; Raygosa-Barahona *et al.*, 2016) e per mez-

zo di acquisizione in real-time dei dati (Pozzebon *et al.*, 2018). All'utilizzo di queste nuove tecnologie di rilevamento si associano però progetti di riqualificazione non altrettanto innovativi, risultando spesso basati principalmente sulla facilitazione dei processi di deposito del materiale sabbioso mediante *sand-fencing*, frangivento e tecniche similari (Kaczkowski *et al.*, 2018; Nordstrom *et al.*, 2018). In siti caratterizzati da basso apporto sabbioso e marcata erosione marina tali metodi non sono sufficienti, e pertanto devono essere adottate misure differenti, tali da contenere l'azione erosiva facilitando il recupero della morfologia naturale.

È il caso della costa della Sterpaia, area protetta comunale (Piombino) situata all'interno del Golfo di Follonica in Provincia di Livorno (Fig. 1), ove sono state ideate e realizzate nuove tecniche per la difesa e la ricostruzione dunale mediante l'utilizzo esclusivo



Figura 3. Morfologia dunale naturalmente ricostruita a monte del cordone antedunale in bioreti, associato alla realizzazione di celle di impianto di specie erbacee psammofile e di accessi attrezzati.



Figura 4. Esempio di protezione/formazione dell'anteduna con bioreti in fibra di cocco: a) fase costruttiva; b) fase di completamento dell'intervento; c) alcuni mesi dopo l'intervento.

di materiali naturali (legno, bioreti, specie vegetali, materiali inerti), associate a interventi di razionalizzazione degli accessi per la fruizione, al controllo/eradiazione di specie vegetali aliene e all'impianto di specie vegetali autoctone. Pur in presenza di un sistema dunale fortemente ridotto e alterato (Fig. 2), l'area costiera di Sterpaia ospita ancora importanti habitat e specie vegetali e animali dei sistemi dunali, boschi costieri planiziali e relittuali aree umide retrodunali. In tale area, agli elevati valori naturalistici e paesaggistici si associano forti elementi di criticità legati alla ridotta disponibilità di sedimenti costieri, alla presenza di infrastrutture costiere perpendicolari alla linea di costa, all'erosione del fronte dunale per eventi meteomarinari e per fenomeni di calpestio e sentieramento, alla presenza di specie aliene e, in generale, ad un forte disturbo legato al carico turistico e alla non sempre idonea attività di pulizia dell'arenile.

Il progetto fa parte degli interventi prioritari di recupero e riequilibrio del litorale approvato dalla Regione Toscana con Del.C.R. 47/2003. Dopo una fase di progettazione, curata dagli scriventi tra il 2009 e il 2010, nel periodo ottobre 2012-giugno 2014 sono stati realizzati gli interventi di riqualificazione morfologica ed ecologica sotto l'egida della Provincia di Livorno, Ente attuatore.

GLI INTERVENTI

Gli interventi realizzati sono stati finalizzati a un complessivo recupero morfologico e naturalistico del sistema dunale di Sterpaia, esteso su circa 8 km e interessato da numerosi elementi di pressione antropica (Bartoletti *et al.*, 2010; Lombardi *et al.*, 2011).

Il progetto ha risposto alle numerose problematiche ambientali attraverso diversificati interventi di ingegneria naturalistica e mediante la condivisione degli obiettivi di conservazione con i diversi attori sociali presenti. Fin dalle prime fasi di redazione del progetto preliminare è stato organizzato un processo di partecipazione che ha visto coinvolti soggetti pubblici e privati: Provincia di Livorno, Comune di Piombino, Parchi Val di Cornia, ASIU (Azienda Servizi Igienici Urbani di Piombino), Consorzio Balneare Costa Est, concessionari degli stabilimenti balneari e servizi di Sterpaia, associazioni ambientaliste e culturali locali e cittadini. Durante tutte le fasi di progettazione sono stati organizzati momenti seminari, riunioni di approfondimento e sopralluoghi in campo, questi ultimi finalizzati a consentire una migliore comprensione delle problematiche e delle soluzioni individuate. Relativamente agli interventi sono state progettate e realizzate azioni differenziate in considerazione delle condizioni geomorfologiche ed ecologiche locali. All'aumentare del grado di alterazione e minaccia sono stati associati interventi più importanti:

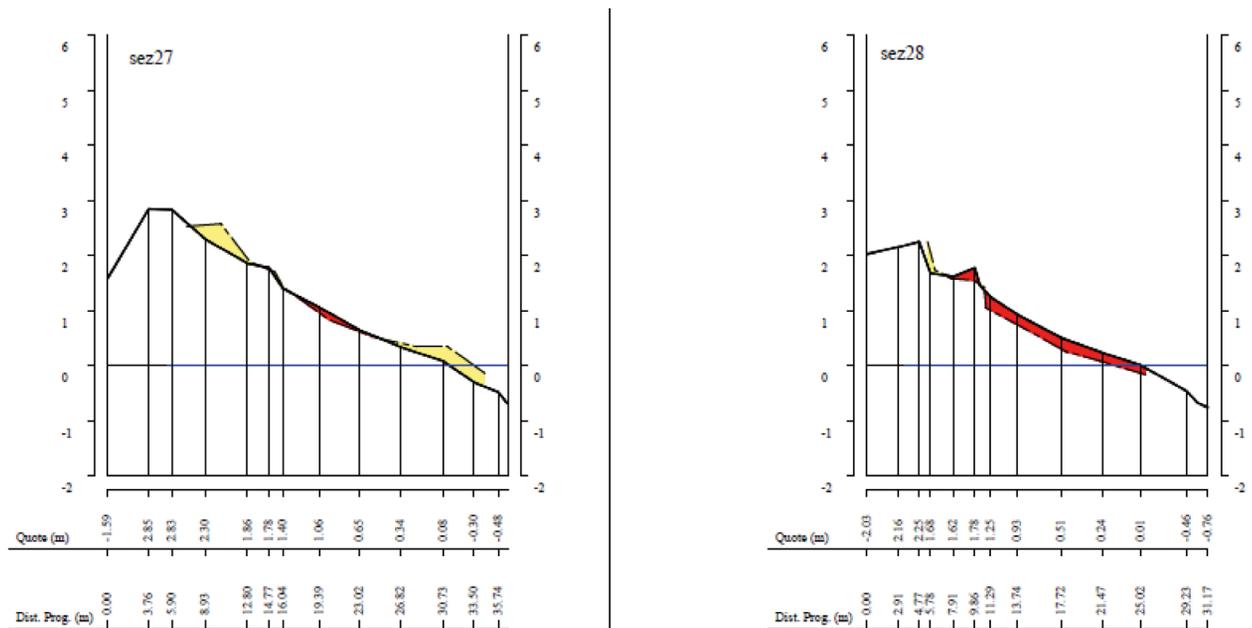


Figura 5. L'intero tratto è stato oggetto di rilievi specifici sulle opere e di rilievi topografici eseguiti in anni successivi per raffronto. I primi hanno permesso di evidenziare i benefici locali delle opere in termini di sedimentazione (in chiaro la porzione in accrezione, in scuro la porzione in erosione). I rilievi topografici hanno permesso di valutare gli effetti morfologici a livello di intero arenile, arrivando a stimare un incremento dei volumi depositati di alcune migliaia di metri cubi. Per quanto la dinamica debba essere inquadrata in un periodo di tempo più ampio che consideri anche altri fattori, si può ipotizzare che le opere portino un beneficio, per quanto contenuto, anche a scala globale.



Figura 6. Comportamento dell'opera rispetto alle mareggiate: a) l'azione marina tende ad abbassare il livello dell'arenile al piede dell'opera. La presenza di legname di dimensione maggiore riduce il rischio di svuotamento dell'opera; b) durante le mareggiate la catasta determina un effetto significativo di riduzione dell'azione marina sull'ambito dunale. Si ritiene che anche in alcuni tratti danneggiati, a causa di eventi eccezionali non prevedibili, l'opera abbia comunque preservato la duna da maggiori danni; c) nella maggior parte dei casi dove la catasta non risulta divelta dal mare si rileva deposizione di materiale sabbioso.

dal "non intervento" alla semplice delimitazione con corda delle aree dunali, da elementi di consolidamento puntuale (quali viminate e palizzate) poco complessi alle cataste di legname e ramaglia legate e collocate sul fronte dunale in erosione fino alla realizzazione di cordoni antedunali con biorete (Fig. 3) e biofiltro in fibra di cocco (Fig. 4) con biofiltro a biogabbioni e bioterre rinforzate, quest'ultimo come intervento più estremo per la ricostituzione di un tratto dunale demolito dalle mareggiate.

Il principio base delle opere di ingegneria naturalistica concepite (in esclusiva, poiché sono state ideate

e applicate per la prima volta a questo caso specifico) sono: l'assorbimento delle energie (azioni erosive) e l'integrazione delle opere con le componenti ecosistemiche e paesaggistiche locali. Tali interventi sono stati affiancati dalla razionalizzazione delle strutture per la fruizione turistica, dalla piantagione di migliaia di esemplari di specie erbacee, arbustive e arboree autoctone, dalla eliminazione delle cenosi vegetali aliene e da attività di informazione. Ciò con l'obiettivo di una rifunzionalizzazione complessiva degli ecosistemi dunali e di un recupero di efficienza dei diversi servizi ecosistemici offerti da questi ambienti.

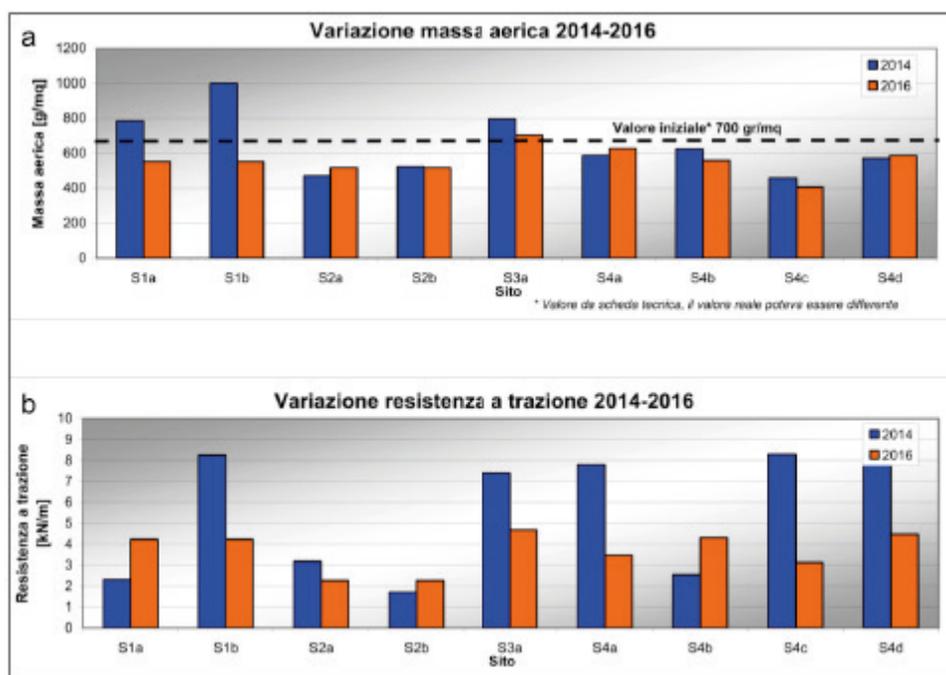


Figura 7. Variazione delle caratteristiche della biorete in fibra di cocco utilizzata per la protezione del fronte duna tra il 2014 e il 2016, ovvero a due e quattro anni dalla posa in opera. I grafici rappresentano per diversi punti di campionamento e prova il valore di due parametri, ovvero a) massa aerea (g/m^2) e b) resistenza a trazione (kN/m). I materiali conservano ancora, a circa 42 mesi (oltre 3 anni e mezzo) dalla loro installazione, residue e significative caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione e diminuzione della massa molto contenute.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Dalla primavera 2014, data di completamento delle opere, gli interventi realizzati sono stati soggetti a forti pressioni ambientali dovute ad eventi meteorologici intensi e imprevedibili e a flussi turistici sempre intensi nella stagione estiva. Per questo motivo la Provincia di Livorno ha incaricato le società IRIS sas e NEMO srl di eseguire il monitoraggio post-intervento finalizzato a valutare l'efficacia delle opere e per verificare la necessità di eventuali aggiustamenti, se necessari, anche nell'ottica di una loro replica in altri contesti simili. Un'adeguata verifica presuppone il controllo dello stato di qualità degli interventi in periodi significativi, in modo da valutarne l'efficacia, la risposta a condizioni di stress e a fattori sia interni che esterni agli interventi stessi (degrado fisiologico dei materiali, fenomeni atmosferici e biologici, pressione antropica, etc.). Ciò permette anche di rispondere a specifici obblighi normativi e contrattuali di garanzia sulle opere realizzate e di verifica della corretta attuazione del Piano di Manutenzione, ai sensi del DPR 207/2010.

L'attività di monitoraggio, realizzata nel periodo primavera/estate 2014-primavera 2016, ha valutato le dinamiche nella morfologia dunale, la durabilità del materiale impiegato nelle opere, l'evoluzione sponta-

nea della vegetazione nelle aree interessate dalle opere e lungo i sentieramenti chiusi, il successo degli interventi di eradicazione delle specie vegetali aliene e dei numerosi impianti di specie vegetali autoctone erbacee, arbustive ed arboree. L'approccio metodologico al monitoraggio adottato si è basato sui seguenti criteri, in accordo con le risultanze emerse da lavori scientifici in contesti simili (Vallés *et al.*, 2011; Bertoni *et al.*, 2014; Ciccarelli *et al.*, 2017):

- definizione di indicatori rappresentativi facilmente misurabili e confrontabili;
- suddivisione degli elementi da monitorare in relazione alle tipologie di interventi e agli ambiti fisico-ambientali;
- confronto della situazione *ante-* e *post-operam*;
- ripetizione delle indagini dopo potenziali cambiamenti sostanziali (in particolare: a seguito di mareggiate intense, di periodi prolungati di siccità, durante e subito dopo la stagione balneare);
- ripetizione delle indagini floristico/vegetazionali in aree di campionamento fisse;
- monitoraggio di tutte le celle di impianto arbustive ed erbacee;
- creazione di un archivio fotografico quale testimonianza dell'evoluzione delle opere e delle aree di impianto nelle diverse stagioni;
- monitoraggio socio-economico.

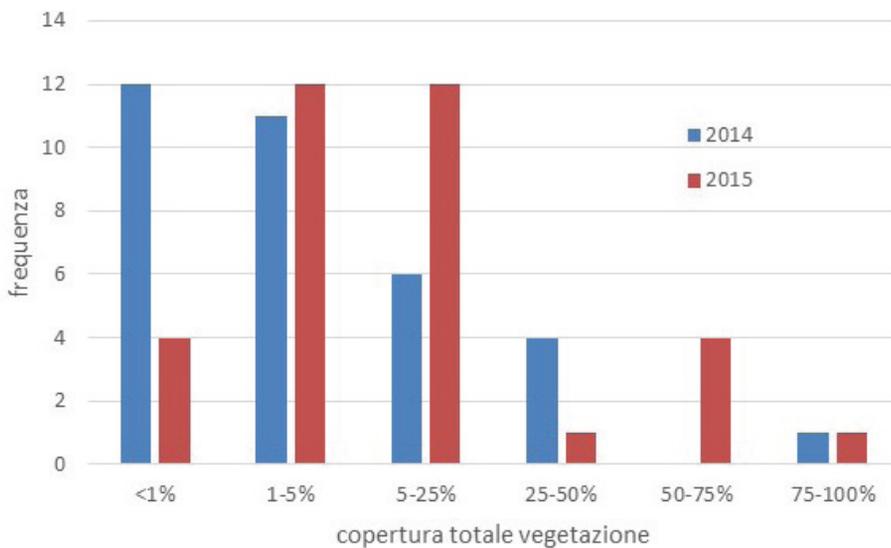


Figura 8. Frequenze delle coperture nelle 34 celle permanenti nei 2 anni di monitoraggio rispetto alle opere realizzate.

I macroindicatori considerati sono i seguenti, con indicati i corrispondenti metodi di misura:

1. evoluzione morfologica del profilo dunale – rilievi topografici;
2. stato di conservazione ed efficienza delle opere di ingegneria naturalistica – verifica dei materiali;
3. efficacia delle opere rispetto agli obiettivi di difesa e riqualificazione – analisi morfo-ecologica;
4. efficacia interventi di controllo della pressione antropica – stato di conservazione delle opere e rilievi floristico/vegetazionali;
5. efficacia degli interventi di eradicazione di specie vegetali aliene – rilievi floristici;
6. grado di sviluppo della vegetazione di impianto – grado di sopravvivenza, di copertura e di crescita delle specie vegetali d'impianto;
7. percentuale di gradimento da parte degli stakeholders intervistati.

Il monitoraggio ha evidenziato una buona efficacia degli interventi realizzati in termini di riqualificazione sia morfologica che ecologica, ma anche la necessità di una continua e periodica manutenzione delle opere. L'analisi dello sviluppo morfologico mediante sovrapposizione dei rilievi ha evidenziato un incremento dei volumi di sabbia nel tratto investigato (Fig. 5), per quanto contenuto e differenziato tra le varie sezioni. La dinamica dell'arenile dipende da molti fattori esterni all'intervento (mareggiate, apporti da mare, fruizione turistica, apporto eolico, etc.), per cui dovrebbe essere analizzato in un arco temporale maggiore. In generale questi primi risultati mostrano che le opere non hanno prodotto fenomeni di erosione e possono portare un contributo positivo, per quanto contenuto, alla deposizione della sabbia.

Anche l'osservazione dell'opera nel tempo, e specificamente durante le mareggiate, ha permesso di evidenziare come le opere abbiano favorito un rapido accumulo del

materiale sabbioso nei tratti non interessati dagli eventi ad alta energia, mentre in quelli interessati da forti mareggiate abbiano comunque limitato i danni da erosione determinati dall'azione marina, anche nei casi in cui l'opera è stata danneggiata (Fig. 6). Nelle cataste di legname dove era presente materiale di diametro maggiore almeno sulla parte frontale, l'azione marina ha prodotto effetti più contenuti rispetto alla catasta composta da ramaglia di media-piccola pezzatura. Le prove sulla biorete in fibra di cocco dei cordoni antedunali, dove è stato utilizzato questo materiale, hanno evidenziato un degrado delle caratteristiche meccaniche e fisiche del materiale mediamente in linea o migliore di quanto ipotizzabile, con evidenti variabilità a seconda dell'esposizione specifica agli agenti atmosferici (sole, aerosol marino e mareggiate). Tale materiale, infatti, è naturalmente biodegradabile e pertanto in un ambiente aggressivo come quello marino, per di più soggetto a forte azione antropica, il degrado può risultare molto rapido.

La massa del materiale, anche dopo 42 mesi dalla posa in opera, presentava valori prossimi a quelli iniziali e tendenzialmente invariati tra le due campagne di misura (Fig. 7a). Più marcata, ma in linea con quanto atteso, la riduzione di resistenza a trazione, che, anche all'interno di una spiccata variabilità, mantiene comunque valori residui significativi e in generale ancora adeguati alle basse sollecitazioni statiche che deve sopportare (Fig. 7b). Lo stato di conservazione del materiale dipende in larga misura dall'esposizione o meno al sole e all'azione marina diretta del materiale. I valori maggiori sono quindi da attribuire a migliori condizioni di protezione e pertanto l'utilizzo di questi materiali dovrebbe preferibilmente essere accoppiato a sistemi di copertura (e.g., vegetazione viva o morta, sabbia, etc.) o alla sovrapposizione di ulteriori strati di biorete o biofiltro "sacrificali". Per quanto riguarda la vegetazione, la campagna di monitoraggio ha evidenziato una dinamica di ricol-



Figura 9. Cella erbacea E32, località tra Carbonifera e Corniaccia. Anno 2014 (sx) e anno 2015 (dx). Elevato grado di sopravvivenza con colonizzazione al 2014 da parte di *Euphorbia peplus*, *Salsola kali*, *Sonchus maritimus*. Nella stagione 2015 (a dx) elevato sviluppo dei cespi di *Ammophila arenaria* e di *Eryngium maritimum* e della copertura complessiva.

nizzazione delle nuove superfici dunali ad opera di specie e formazioni vegetali psammofile. Nei sentieri chiusi sono in corso significativi processi di aumento della copertura e di chiusura della vegetazione (da un minimo del 3% di incremento ad un massimo del 30%). In particolare, tra il 2014 e il 2015 la copertura della vegetazione nei sentieri chiusi è quasi raddoppiata passando dal 12,3% ad un 22,8%, con la significativa presenza di specie vegetali tipiche quali *Elymus farctus*, *Anthemis maritima*, *Pancratium maritimum*, *Silene colorata*, *Sporobolus virginicus*, *Centaurea sphaerocephala*, *Medicago littoralis*, *Medicago maritima* ed *Eryngium maritimum*, tutte specie di alto valore ecologico presenti in gran parte dei siti rilevati.

Anche le analisi floristico/vegetazionali dei 34 plot permanenti realizzati a monte degli interventi hanno evidenziato dinamiche positive, con processi di ricolonizzazione più rapidi e coperture maggiori nelle aree retrostanti le opere più strutturate ed in grado di incidere maggiormente sul recupero della morfologia dunale, quali la catasta, il cordone antedunale o il biogabbione, arrivando non di rado anche a coperture della vegetazione maggiori del 25%. Le opere meno strutturate, quali la semplice corda di delimitazione o la palizzata, presentano invece valori di copertura della vegetazione inferiore (quasi sempre minori del 5%), ma ospitano comunque specie vegetali psammofile delle dune mobili e di anteduna.

L'istogramma mostrato in Fig. 8 visualizza la distribuzione delle frequenze complessive delle classi di copertura nei 2 anni di monitoraggio, da cui si evidenzia un graduale aumento della densità media della vegetazione. I rilievi della vegetazione realizzati nel 2014 e nel 2015 all'interno delle 25 celle permanenti (1x1 m) di controllo delle specie aliene hanno evidenziato il notevole successo degli interventi di controllo/eliminazione di *Carpobrotus* sp. In particolare, la specie alie-

na, partendo da una presenza diffusa con coperture prossime al 100% (l'84% dei siti rilevati presentavano in *ante-operam* una copertura di classe 5) è risultata assente in tutte le 25 celle permanenti nel 2014 e presente solo in una cella nel 2015, con classe di copertura di valore "r" (un solo esemplare). A marzo e maggio 2016 la specie è risultata totalmente assente dai plot di monitoraggio. Così come nelle altre aree di rilevamento, anche le celle d'impianto erbacee e arbustive hanno evidenziato i processi di recupero spontaneo della flora e della vegetazione dunale e una buona sopravvivenza degli esemplari piantati (Fig. 9).

Per una descrizione più dettagliata dei risultati del monitoraggio floristico-vegetazionale relativi agli interventi realizzati si veda Tondini *et al.* (2018) e Lazzaro *et al.* (2019).

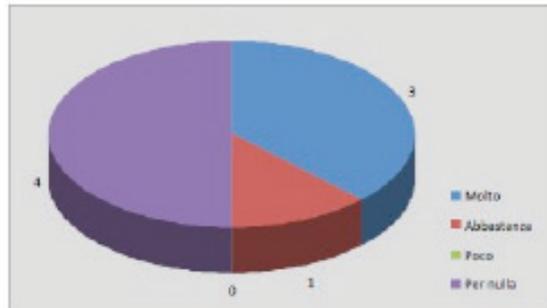
Nell'ambito del progetto di monitoraggio è stata effettuata anche una verifica sul grado di apprezzamento delle opere da parte di importanti stakeholders: i concessionari degli stabilimenti balneari presenti nella costa di sterpaia. La campagna di interviste mirate ha evidenziato un grado di apprezzamento quasi sempre elevato (e.g., Fig. 10), a dimostrazione del positivo coinvolgimento della comunità e degli operatori locali fin dalle prime fasi del progetto.

Il 29 e 30 novembre 2018 la costa della Sterpaia è stata interessata da eccezionali eventi meteorici con forti venti e mareggiate che hanno fortemente danneggiato gli interventi realizzati, grazie ai quali, tuttavia, si è verificata una riduzione dei danni. Successivamente a tali eventi il Comune di Piombino, tramite finanziamenti regionali, ha provveduto alla progettazione e realizzazione di interventi di sistemazione e ricostituzione delle opere di ingegneria naturalistica; tali interventi, già in parte realizzati, si dovranno confrontare con i nuovi scenari meteoroclimatici locali legati al tema, attualissimo, dei cambiamenti climatici.

4. Hai gradito gli interventi realizzati dalla Provincia per la difesa e riqualificazione dunale?

Gestori

Molto	3
Abbastanza	1
Poco	0
Per nulla	4
	8



Bagnini

Molto	1
Abbastanza	3
Poco	0
Per nulla	1
	5

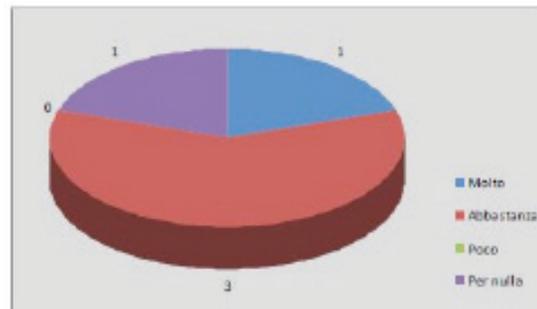


Figura 10. Il riscontro a una delle domande rivolte agli operatori balneari.

CONCLUSIONI

Il monitoraggio ha evidenziato il buon successo ingegneristico ed ecosistemico degli interventi, con una resistenza significativa anche a seguito di eventi meteo medio-elevati, e l'efficacia di azioni tutela e riqualificazione multiple e sinergiche. L'insieme degli interventi ingegneristici di recupero della morfologia dunale, di valorizzazione delle componenti floristiche e vegetazionali locali, di razionalizzazione dei carichi turistici, di informazioni e condivisione con gli attori locali e i fruitori dell'area, hanno portato ad un positivo risultato sia dal punto di vista ingegneristico e di difesa della linea di costa, sia sotto l'aspetto ecosistemico e paesaggistico. Per il mantenimento e il miglioramento dei risultati raggiunti risulterà fondamentale nei prossimi anni una continua azione di monitoraggio e di manutenzione delle opere realizzate.

RINGRAZIAMENTI

Il presente manoscritto appartiene ad una serie di contributi presentati al 3° Forum Internazionale sul Mare e sulle Coste organizzato a Forte dei Marmi (LU) tra il 13 e il 15 ottobre 2016.

BIBLIOGRAFIA

ALQUINI F., BERTONI D., SARTI G., 2016. Extreme erosion of a dune crest within a short timespan (January-September 2016): The recent case in the Migliarino - San Rossore - Massaciuc-

coli Regional Park (Tuscany, Italy). *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie Serie A* 123: 5-16.

BARTOLETTI E., BINI A., LOMBARDI L., GIUNTI M., BACCI M., CORSI S., 2010. Gli ambienti dunali della costa di Sterpaia Comune di Piombino (LI): interventi di riqualificazione degli habitat, controllo delle specie esotiche e razionalizzazione del carico turistico. Atti del Convegno "La ricostituzione delle dune costiere: un orizzonte possibile?" Bologna, 2 dicembre 2009. *Studi Costieri* 17: 197-213.

BARTOLINI S., MECOCCHI A., POZZEBON A., ZOPPETTI C., BERTONI D., SARTI G., CAITI A., COSTANZI R., CATANI F., CIAMPALINI A., MORETTI S., 2018. Augmented Virtuality for Coastal Management: a holistic use of in situ and remote sensing for large scale definition of coastal dynamics. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7: 92.

BERTONI D., BIAGIONI C., SARTI G., CICCARELLI D., RUOCCO M., 2014. The role of sediment grain-size, mineralogy, and beach morphology on plant communities of two Mediterranean coastal dune systems. *Italian Journal of Geosciences* 133: 271-281.

BERTONI D., SARTI G., 2011. Grain size characterization of modern and ancient dunes within a dune field along the Pisan coast (Tuscany, Italy). *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie Serie A* 116: 11-16.

BEZZI A., PILLON S., MARTINUCCI D., FONTOLAN G., 2018. Inventory and conservation assessment for the management of coastal dunes, Veneto coasts, Italy. *Journal of Coastal Conservation* 22: 503-518.

BRAUN-BLANQUET J., 1932. Plant sociology. The study of plant communities. McGraw-Hill Book Co., New York, USA, 439 pp.

CAMMELLI C., JACKSON N.L., NORDSTROM K.F., PRANZINI E., 2006. Assessment of a gravel nourishment project fronting a seawall at Marina di Pisa, Italy. *Journal of Coastal Research* SI 39: 770-775.

- CICCARELLI D., 2014. Mediterranean coastal sand dune vegetation: Influence of natural and anthropogenic factors. *Environmental Management* 54: 194-204.
- CICCARELLI D., PINNA M.S., ALQUINI F., COGONI D., RUOCCO M., BACCHETTA G., SARTI G., FENU G., 2017. Development of a coastal dune vulnerability index for Mediterranean ecosystems: A useful tool for coastal managers? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 187: 84-95.
- CIPRIANI L.E., PRANZINI E., VITALE G., WETZEL L., 2013. Adaptation to beach erosion at Maremma Regional Park (Tuscany, Italy). *Geo-Eco-Marina* 19: 65-75.
- CORBAU C., SIMEONI U., MELCHIORRE M., RODELLA I., UTIZI K., 2015. Regional variability of coastal dunes observed along the Emilia-Romagna littoral, Italy. *Aeolian Research* 18: 169-183.
- ELLIS J.T., CAPPIETTI L., 2013. Storm-Driven Hydrodynamic and Sedimentological Impacts to an Engineered Coast. *Journal of Coastal Research* SI 65: 1461-1466.
- FENU G., COGONI D., FERRARA C., PINNA M.S., BACCHETTA G., 2012. Relationships between coastal sand dune properties and plant community distribution: The case of Is Arenas (Sardinia). *Plant Biosystems* 146: 586-602.
- FRENCH, P.W., 2001. Coastal Defences: Processes, Problems and Solutions. Routledge, London, UK, 366 pp.
- KACZKOWSKI H.L., KANA T.W., TRAYNUM S.B., VISSER R., 2018. Beach-fill equilibration and dune growth at two large-scale nourishment sites. *Ocean Dynamics* 68: 1191-1206.
- LAZZARO L., TONDINI E., LOMBARDI L., GIUNTI M. 2019. The eradication of *Carpobrotus* sp. in the sand-dune ecosystem at Sterpaia (Italy, Tuscany): indications from a successful experience. *Biologia*, ISSN 0006-3088. DOI 10.2478/s11756-019-00391-z
- LITHGOW D., MARTÍNEZ M.L., GALLEGU-FERNÁNDEZ J.B., HESP P.A., FLORES P., GACHUZ S., RODRÍGUEZ-REVELO N., JIMÉNEZ-OROCIO O., MENDOZA-GONZÁLEZ G., ÁLVAREZ-MOLINA L.L., 2013. Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology* 199: 214-224.
- LOMBARDI L., GIUNTI M., BACCI M., BARTOLETTI E., BINI A., MORI E., 2011. Ripristino della funzionalità ecologica dei sistemi dunali: l'esperienza della costa di Sterpaia nel Comune di Piombino (LI). Atti Terzo Simposio: "Il Monitoraggio costiero mediterraneo, problematiche e tecniche di misura". Livorno, giugno 2010: 179-185.
- LOMBARDI L., GIUNTI M., CASTELLI C., 2016. Un approccio "paesaggistico" alla tutela della biodiversità in Toscana: dalla Strategia regionale per la biodiversità alla Rete ecologica regionale. *RÉTICULA* n.11/2016, Rivista ISPRA.
- MACCHIA U., PRANZINI E., TOMEI P.E., 2005. La duna costiera in Italia. La natura, il paesaggio. Felici Editore, Pisa, Italia, 200 pp.
- MARTÍNEZ M.L., GALLEGU-FERNÁNDEZ J.B., HESP P.A., 2013. Restoration of Coastal Dunes. Springer, Berlin, Germany, 347 pp.
- NORDSTROM K.F., LIANG B., GARILAO E.S., JACKSON N.L., 2018. Topography, vegetation cover and below ground biomass of spatially constrained and unconstrained foredunes in New Jersey, USA. *Ocean & Coastal Management* 156: 117-126.
- NORDSTROM K.F., PRANZINI E., JACKSON N.L., COLI M., 2008. The marble beaches of Tuscany. *Geographical Review* 98: 280-300.
- POORTINGA A., VAN RHEENEN H., ELLIS J.T., SHERMAN D.J., 2012. Measuring aeolian sand transport using acoustic sensors. *Aeolian Research* 16: 143-151.
- POZZEBON A., CAPPPELLI I., MECOCCHI A., BERTONI D., SARTI G., ALQUINI F., 2018. A wireless sensor network for the real-time remote measurement of aeolian sand transport on sandy beaches and dunes. *Sensors* 18: 820.
- PRANZINI E., 2018. Shore protection in Italy: From hard to soft engineering... and back. *Ocean & Coastal Management* 156: 43-57.
- RAYGOSA-BARAHONA R., RUIZ-MARTINEZ G., MARINO-TAPIA I., HEYSER-OJEDA E., 2016. Design and initial testing of a piezoelectric sensor to quantify aeolian sand transport. *Aeolian Research* 22: 127-134.
- TONDINI E., LOMBARDI L., GIUNTI M., BEDINI G. 2018. Plant cover dynamics after morphological and ecological redevelopment of the dune system of the Sterpaia beach (Piombino, LI). Atti Seventh International Symposium: "Monitoring of Mediterranean coastal areas: problems and measurement techniques". Livorno (Italy) June 19-20-21/2018 Edited by Fabrizio Benincasa, Firenze University Press: 317-324.
- UDO K., 2009. New method for estimation of aeolian sand transport rate using ceramic sand flux sensor (UD-101). *Sensors* 9: 9058-9072.
- VALLÉS S.M., GALLEGU-FERNÁNDEZ J.B., DELLAFIORÉ C.M., 2011. Dune vulnerability in relation to tourism pressure in Central Gulf of Cádiz (SW Spain), a case study. *Journal of Coastal Research* 27: 243-251.

(ms. pres. 3 marzo 2018; ult. bozze 11 ottobre 2018)

Edizioni ETS

Palazzo Roncioni - Lungarno Mediceo, 16, I-56127 Pisa

info@edizioniets.com - www.edizioniets.com

Finito di stampare nel mese di dicembre 2019