

Gestione circolare del materiale spiaggiato mediante soil washing: recupero di sabbia, biomassa e rifiuti nelle coste mediterranee

Ezio Esposito¹ e Fabio Carmignani¹

¹ Gruppo Esposito, Via Sforzatica, 31, 24040 Lallio (BG)

Email: ezio.esposito@gruppoesposito.it, fabio.carmignani@gruppoesposito.it

Riassunto

Il materiale spiaggiato rappresenta, lungo molte coste mediterranee, una matrice complessa costituita da biomassa vegetale marina (prevalentemente *Posidonia oceanica*), sabbia, sedimenti minerali e rifiuti. La gestione non corretta può accentuare la perdita di sedimento utile, incrementare la frammentazione delle plastiche, generare criticità igienico-sanitarie legate ai processi di decomposizione e compromettere la fruizione turistica delle spiagge. Questo contributo descrive un modello industriale di gestione circolare basato sulla tecnologia di separazione e lavaggio (soil washing) sviluppata dal Gruppo Esposito e operativa presso l'impianto Ecocentro Sardegna (Quartu Sant'Elena) dal 2019. Il processo integra vagliatura, disaggregazione e lavaggio della matrice, separazione delle frazioni (sabbia, biomassa, rifiuti), ricircolo delle acque e supporto energetico da fotovoltaico. I risultati di esercizio indicano recuperi di sabbia dell'ordine del 55–61% in peso, con caratteristiche idonee al ripristino morfologico degli arenili e/o a impieghi come aggregato riciclato; la biomassa, depurata da rifiuti e microplastiche, è avviabile a compostaggio e, più recentemente, a filiere di prodotto (Posidonia Garden). La discussione, supportata da casi studio in Sardegna e dal progetto Marevivo “Rispetta il tuo capitale”, evidenzia come l'adozione di tecnologie industriali mature consenta di trasformare una criticità gestionale in risorsa, riducendo l'impatto ambientale e migliorando il benessere socio-economico dei territori costieri.

Parole chiave: Biomasse vegetali spiaggiate, soil washing, erosione costiera, trattamento industriale, economia circolare, *Posidonia oceanica*

Abstract

*Beached material along Mediterranean shores is a heterogeneous mixture of seagrass biomass (mainly *Posidonia oceanica*), entrained mineral sand and anthropogenic litter. If managed with conventional mechanical practices only, it may lead to net loss of sediment, enhanced plastic fragmentation and sanitary issues related to anaerobic degradation, ultimately affecting beach usability.*

This paper presents an industrial circular-management model based on the separation and soil-washing technology developed by Gruppo Esposito and implemented since 2019 at the Ecocentro Sardegna plant (Quartu Sant'Elena, Italy). The integrated process includes pre-screening, matrix disaggregation and washing, separation of sand/organic/litter/fines streams, wash-water

treatment and recirculation, and photovoltaic energy support. Operational data show sand recovery rates in the range of 55–61% by weight, producing a cleaned mineral fraction suitable for beach morphodynamic restoration and/or for use as recycled aggregate, while the washed organic fraction can be diverted to composting and, more recently, to value-added products (Posidonia Garden). Case studies from Sardinia and the Marevivo project “Rispetta il tuo capitale” are discussed to frame technical outcomes, recovery potential and decision criteria for site-specific coastal management.

Keywords: Beached waste, soil washing, coastal erosion, industrial processing, circular economy, *Posidonia oceanica*

1. Introduzione

Posidonia oceanica (L.) Delile è una fanerogama marina endemica del Mar Mediterraneo, riconosciuta come habitat prioritario ai sensi della Direttiva 92/43/CEE (Direttiva Habitat). Le praterie di *Posidonia oceanica* rappresentano uno degli ecosistemi più rilevanti del Mediterraneo per biodiversità, produzione primaria e servizi ecosistemici, contribuendo inoltre alla protezione delle coste e alla stabilizzazione dei sedimenti (Duarte, 2002; Orth et al., 2006; Boudouresque et al., 2016). Le praterie sommerse svolgono un ruolo fondamentale nella stabilizzazione dei fondali, nella produzione primaria, nel sequestro del carbonio (“blue carbon”) e nel mantenimento della biodiversità marina. Il naturale ciclo biologico della pianta comporta il distacco stagionale delle foglie senescenti che vengono trasportate verso la costa e si accumulano lungo la battigia formando le cosiddette banquette. Tuttavia, il materiale comunemente definito “posidonia spiaggiata” non è costituito esclusivamente da biomassa vegetale. Esso rappresenta una matrice eterogenea composta da foglie, rizomi e fibre lignocellulosiche, sedimenti sabbiosi inglobati e una componente variabile di rifiuti antropici quali plastiche, vetro, metalli, tessuti e mozziconi di sigaretta (Fig. 1).



Figura 1. Composizione tipica del materiale spiaggiato lungo le coste mediterranee: matrice eterogenea costituita da sedimento sabbioso, biomassa vegetale di *Posidonia oceanica* e rifiuti antropici.

Le banquette costituiscono elementi naturali del sistema spiaggia–duna e possono contribuire alla conservazione del sedimento e alla dissipazione dell'energia delle onde. La loro efficacia dipende tuttavia dalle caratteristiche morfologiche dei siti e dalle modalità di gestione adottate (Pergent et al., 2012; Campagne et al., 2015; Vacchi et al., 2017). In termini gestionali, le pratiche di rimozione meccanica non selettiva possono comportare perdite di sedimento utile e incremento della componente fine, mentre la conservazione integrale in situ può risultare non compatibile con specifiche condizioni morfodinamiche o con requisiti igienico-sanitari e di fruizione.

Dati di monitoraggio prodotti da ARPA e Legambiente indicano che, in specifici contesti costieri, la componente antropica può raggiungere valori dell'ordine di 1–3 kg/m² di arenile, alterando significativamente la qualità ambientale, paesaggistica e la fruibilità delle spiagge. Tale composizione configura il materiale come rifiuto spiaggiato composito, la cui gestione richiede soluzioni tecnologiche dedicate e pienamente compatibili con il quadro normativo ambientale. A scala europea, i risultati del progetto POSBEMED (2018) mostrano che oltre l'83% delle amministrazioni costiere rimuove annualmente le banquette. Parallelamente, studi sulla percezione turistica nel nord della Sardegna indicano che la qualità del mare e la pulizia delle spiagge rappresentano il principale fattore di scelta turistica (GNRAC, 2017).

2. Metodologia

2.1 Dinamica delle banquette e concetto di “muro elastico”

I depositi di foglie e rizomi di *Posidonia oceanica* intrappolano sedimenti sabbiosi e possono contribuire alla stabilizzazione della spiaggia, riducendo localmente l'energia ondosa e favorendo la tutela dall'erosione costiera e il ripristino dunale. Le banquette sono depositi superficiali generalmente localizzati sopra il livello medio del mare; tuttavia, in alcuni contesti, i processi idrodinamici più energetici si concentrano in prossimità del punto di battuta dell'onda. Sebbene la letteratura riconosca alle banquette di *Posidonia oceanica* un generale ruolo protettivo nei confronti dell'erosione costiera, osservazioni di campo condotte in differenti contesti mediterranei evidenziano comportamenti morfodinamici più complessi e fortemente sito-specifici. In presenza di spiagge riflettenti, mareggiate energetiche e bilancio sedimentario deficitario, l'accumulo può comportarsi come una struttura parzialmente riflettente o “muro elastico”, dissipando solo parte dell'energia incidente e favorendo la concentrazione di moti turbolenti e vorticosi al piede della banquette. Tali condizioni possono determinare fenomeni di erosione localizzata (“toe scour”), con escavo del sedimento al piede dell'accumulo e successiva dispersione verso la zona sommersa (Fig. 2).



Figura 2. Schema concettuale delle interazioni onda-banquette-sedimenti: escavo al piede della banquette, possibile crollo franoso e aumento locale della profondità del fondale antistante.

Dinamiche analoghe sono state descritte negli studi relativi alle spiagge riflettenti e ai processi della swash zone, nei quali l'interazione tra run-up, backwash e riflessione del moto ondoso può amplificare fenomeni erosivi localizzati e instabilità sedimentaria (Stringari & Power, 2019). Alcuni studi recenti sulle banquette mediterranee evidenziano inoltre come il comportamento geomorfologico degli accumuli di *Posidonia oceanica* dipenda fortemente dalla geometria della spiaggia, dalla configurazione meteomarina e dal bilancio sedimentario locale (Cantasano, 2021; Trogu et al., 2023). Pertanto, pur riconoscendo l'importante funzione ecologica e protettiva delle banquette, il loro effetto morfodinamico deve essere valutato caso per caso mediante approcci sito-specifici e ulteriori approfondimenti sperimentali. Ne consegue che non esiste una metodologia di intervento precostituita: ogni spiaggia richiede analisi sito-specifiche basate sul bilancio sedimentario, sulla dinamica degli eventi meteomari e sulla geometria degli accumuli di materiale spiaggiato.

2.2 Rischi igienico-ambientali e plastica frammentata

La decomposizione anaerobica del materiale spiaggiato può generare emissioni di gas quali metano (CH_4), protossido di azoto (N_2O) e idrogeno solforato (H_2S), quest'ultimo potenzialmente dannoso per la salute umana in funzione della concentrazione, della durata dell'esposizione e delle condizioni microclimatiche. Tali fenomeni risultano particolarmente critici in contesti urbani e turistici caratterizzati da accumuli persistenti. La componente plastica presente nel materiale spiaggiato è inoltre soggetta a processi di frammentazione secondaria, dovuti non solo a fattori naturali ma anche alla frequente movimentazione del materiale accumulato e alla sua redistribuzione stagionale a fine stagione balneare, con incremento della dispersione nella matrice sabbiosa dell'arenile. La sola vagliatura meccanica delle banquette durante le operazioni di spostamento o redistribuzione stagionale non consente l'effettiva intercettazione delle microplastiche, in quanto queste risultano spesso fisicamente intrappolate e "avvolte" nella matrice fibrosa della *Posidonia oceanica*. L'intercettazione di tali frazioni plastiche risulta invece possibile attraverso l'applicazione della tecnologia di lavaggio, definita soil washing, che consente la disaggregazione della matrice organica e la separazione efficace delle microplastiche dalla biomassa vegetale. Le tecniche di soil washing si basano sulla separazione fisica delle diverse componenti presenti in matrici eterogenee e sono ampiamente utilizzate nel trattamento di terreni contaminati e materiali complessi, consentendo il recupero di frazioni riutilizzabili e la riduzione dei quantitativi destinati a smaltimento (Khan et al., 2004; Dermont et al., 2008). Numerosi studi internazionali hanno approfondito il ruolo geomorfologico delle banquette, i processi di soil washing applicati a matrici contaminate e le potenzialità di recupero delle biomasse marine nel contesto mediterraneo, con applicazioni che includono fertilizzanti, ripristino dunale, bioedilizia, arredo balneare e materiali bio-based (De Falco et al., 2008; Simeone et al., 2013; Innocenti et al., 2020).

3. Metodologia e tecnologia di trattamento del materiale spiaggiato

Dal 2019 è operativo a Quartu Sant'Elena (Sardegna) l'impianto industriale Ecocentro Sardegna, di proprietà del Gruppo Esposito, realizzato per il trattamento integrato del materiale spiaggiato (EER 20 03 99 e assimilabili, secondo le autorizzazioni vigenti). L'impianto è caratterizzato da una linea di lavaggio tipo soil washing sviluppata e adattata alle specifiche caratteristiche merceologiche del rifiuto spiaggiato, basata su una tecnologia brevettata e certificata EPD (Environmental Product Declaration – Dichiarazione Ambientale di Prodotto). Il modello gestionale è orientato a massimizzare il recupero di materia (sabbia e frazione organica) riducendo le quantità avviate a smaltimento. L'impianto è pienamente operativo, non sperimentale, ed è stato riconosciuto a livello nazionale con il Premio del Presidente della Repubblica per l'Economia Circolare conferito nel 2023.

Il conferimento del materiale avviene mediante modalità operative flessibili che consentono anche interventi micro-invasivi, grazie all'impiego di mezzi adeguati alle dimensioni e alla sensibilità ambientale delle aree da trattare (Fig. 3).



Figura 3. Mezzi mini-invasivi impiegati per la raccolta della frazione superficiale del materiale spiaggiato.

3.1 Il processo industriale si articola nelle seguenti fasi (Fig. 4):

- arrivo e conferimento del materiale;
- prima vagliatura per la separazione delle frazioni grossolane e dei rifiuti voluminosi;
- lavaggio mediante tecnologia di soil washing;
- separazione della frazione organica, della frazione inorganica e dei rifiuti antropici;
- trattamento e ricircolo delle acque di lavaggio tramite impianto dedicato;
- supporto energetico tramite impianto fotovoltaico.

L'impianto Ecocentro Sardegna adotta una configurazione a flusso continuo finalizzata alla separazione selettiva delle componenti presenti nel materiale spiaggiato. Il ciclo operativo prevede una fase iniziale di vagliatura primaria, necessaria per omogeneizzare la matrice in ingresso e rimuovere le componenti estranee di maggiori dimensioni, seguita da una linea di soil washing basata su separazioni granulometriche e densimetriche. La sequenza impiantistica consente di distinguere tre principali flussi in uscita: la frazione sabbiosa recuperata, la biomassa vegetale derivante da *Posidonia* oceanica e la componente residuale costituita da rifiuti antropici e frazioni fini. Il sistema integra inoltre sezioni dedicate alla disidratazione e alla gestione delle acque di processo, con ricircolo interno finalizzato alla riduzione dei consumi idrici. Dal punto di vista funzionale, il layout impiantistico è stato sviluppato per operare su matrici ad elevata eterogeneità merceologica e forte variabilità stagionale, tipiche degli accumuli costieri mediterranei.

La modularità della linea consente inoltre di adattare il trattamento alle differenti caratteristiche granulometriche e organiche del materiale conferito, ottimizzando le operazioni di separazione e recupero delle diverse frazioni trattate. I campionamenti delle matrici in ingresso e uscita sono stati effettuati mediante prelievi rappresentativi sulle diverse frazioni merceologiche, con quantificazione ponderale dei materiali recuperati e valutazione della presenza di microplastiche mediante separazione granulometrica e analisi visiva delle frazioni flottanti.

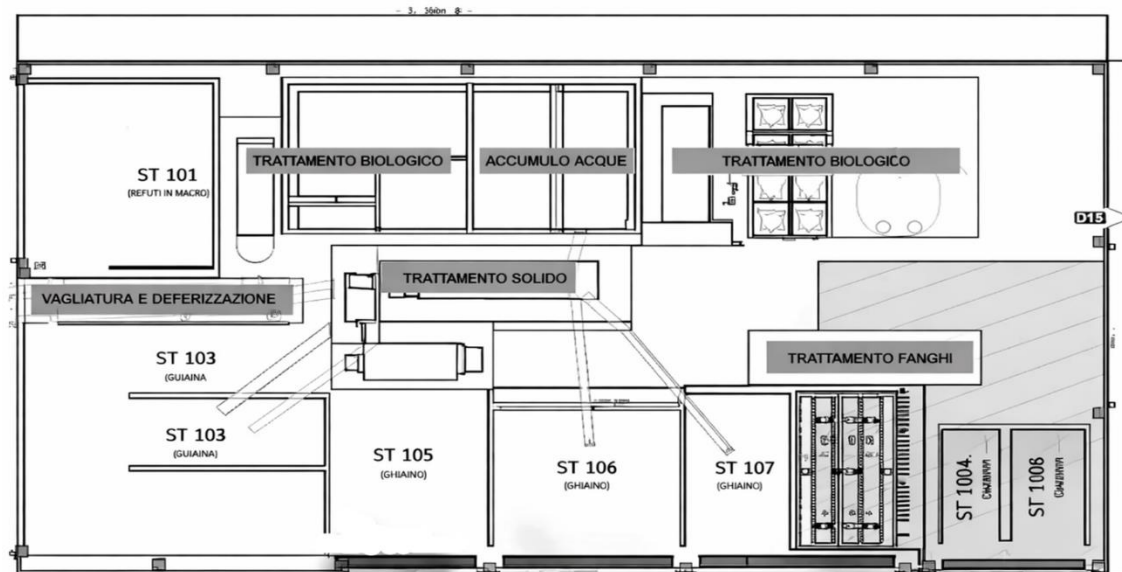


Figura 4. Vista generale dell'impianto Ecocentro Sardegna destinato al trattamento industriale del materiale spiaggiato.

La capacità operativa è pari a circa 11 tonnellate/ora di materiale trattato. In Sardegna, l'impianto ha gestito migliaia di tonnellate di materiale spiaggiato, restituendo circa 7000 tonn di sabbia agli arenili di origine, con interventi effettuati in contesti quali Alghero, Orosei, Palau e Costa Smeralda con recupero del sedimento originariamente presente nel materiale spiaggiato e conseguente riduzione delle perdite di sabbia associate alle operazioni di pulizia degli arenili. I consumi idrici risultano ridotti grazie al sistema di ricircolo delle acque di processo, mentre i fanghi derivanti dal trattamento vengono gestiti secondo le disposizioni autorizzative vigenti. La frazione organica separata, costituita prevalentemente da biomassa di *Posidonia oceanica* opportunamente lavata e vagliata dai rifiuti antropici e dalle microplastiche, risulta idonea al conferimento in impianti di compostaggio come rifiuto organico, in coerenza con i principi dell'economia circolare e della riduzione del conferimento in discarica.

Tabella 1. Bilancio di massa del trattamento del materiale spiaggiato presso l'impianto Ecocentro Sardegna.

Frazione	Percentuale in peso (%)
Sabbia lavata recuperata	55–61
Frazione organica (<i>Posidonia oceanica</i>)	25~34
Fango	4,6–5
Rifiuti antropici	6~10

Valori medi indicativi riferiti ai primi anni di esercizio dell'impianto.

3.2 Qualità e destinazione della sabbia recuperata

La sabbia in uscita dal processo è sottoposta a controlli e qualificazione per garantirne l'idoneità al recupero: in particolare, sono previsti verifiche di conformità al test di cessione (D.M. 5 febbraio 1998 e s.m.i.), rispondenza alle norme tecniche UNI/EN applicabili agli aggregati e redazione della

dichiarazione di prestazione (DoP) ai sensi del Regolamento (UE) 305/2011. Il sistema di gestione dell'impianto è inoltre supportato da certificazioni di processo (ISO 9001; ISO 14001). Le possibili destinazioni comprendono l'utilizzo come aggregato per calcestruzzi, conglomerati bituminosi, malte e opere di ingegneria civile, nonché il riposizionamento sulla spiaggia di origine. La sabbia restituita all'arenile non configura una nuova movimentazione estrattiva, ma un intervento di conservazione e ripristino del sedimento originariamente presente nella matrice spiaggiata, contribuendo alla riduzione delle perdite sedimentarie associate alle operazioni di gestione delle biomasse vegetali.

4. Risultati

I principali risultati sono riportati in Tabella 1, mentre gli esiti operativi sono illustrati in Figura 5, che descrive la situazione della spiaggia urbana prima e dopo l'intervento di rimozione, trattamento e ripascimento con sabbia recuperata dall'impianto del Gruppo Esposito.

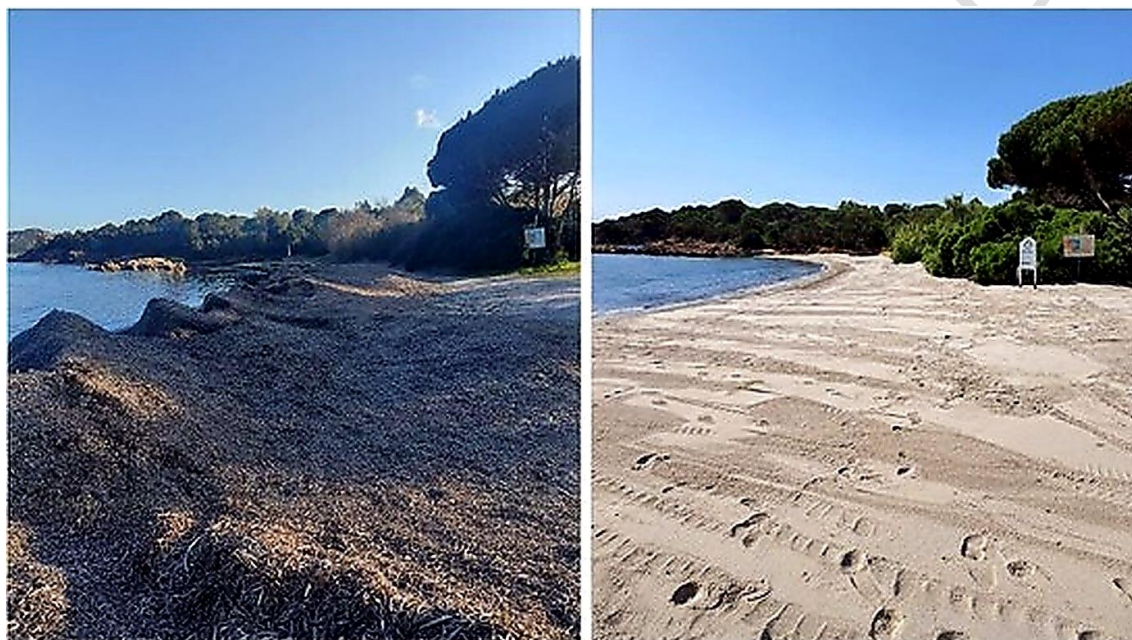


Figura 5 - Risultati del trattamento del materiale spiaggiato: separazione della frazione sabbiosa e restituzione del sedimento pulito all'arenile.

5. Uso della *Posidonia oceanica* nel ciclo dei rifiuti organici

La *Posidonia oceanica*, opportunamente lavata per la rimozione della frazione sabbiosa e vagliata per l'eliminazione dei rifiuti antropici e delle microplastiche, può essere conferita a impianti di compostaggio come rifiuto organico, in coerenza con i principi dell'economia circolare e della riduzione del conferimento in discarica. Secondo le stime del Consorzio Italiano Compostatori (CIC), nel 2022 la raccolta differenziata della frazione organica ha consentito la produzione di circa 1,9 milioni di tonnellate di compost. Tale processo ha contribuito all'immagazzinamento nel suolo di circa 410.000 tonnellate di carbonio organico e al risparmio di circa 5,6 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente all'anno rispetto allo smaltimento in discarica. La valorizzazione della frazione organica ha inoltre permesso la produzione di circa 409 milioni di m³ di biogas, con una resa energetica complessiva pari a 411 GWh di energia elettrica, 169 GWh di energia termica e 167 milioni di Nm³ di biometano, evidenziando il contributo del compostaggio sia alla mitigazione climatica sia alla transizione energetica. In questo quadro, l'avvio a compostaggio della biomassa di *Posidonia oceanica* trattata rappresenta una soluzione ambientalmente sostenibile e tecnicamente matura, capace di in-

tegrare la gestione dei materiali spiaggiati all'interno di una filiera di recupero di materia ed energia, con benefici ambientali, climatici ed economici misurabili.

6. Caso studio: Alghero

Nel Comune di Alghero, 4,627 km di spiagge (circa il 32%) presentano *Posidonia oceanica* spiaggiata; 3,713 km (circa il 26% del totale e oltre l'80% delle spiagge con Posidonia) sono interessati da interventi di asportazione del materiale spiaggiato. Nel periodo compreso tra il 2020 e il 2023, grazie all'applicazione della tecnologia di lavaggio del materiale spiaggiato sulle spiagge del Comune di Alghero, sono stati complessivamente intercettati ed eliminati frammenti di plastiche e microplastiche per una quantità stimata pari a circa 22 tonnellate*. Sebbene basata su una stima conservativa, tale quantità evidenzia il potenziale contributo del trattamento del materiale spiaggiato alla riduzione dell'accumulo di microplastiche negli ecosistemi costieri. L'esperienza maturata nei siti costieri della Sardegna evidenzia il potenziale delle tecnologie di separazione e recupero applicate al materiale spiaggiato anche in contesti territoriali più ampi. Una possibile estensione del modello a scala regionale potrebbe contribuire alla riduzione dei quantitativi destinati a smaltimento, al recupero di quote significative di sedimento sabbioso e al miglioramento dell'intercettazione dei rifiuti plastici presenti nelle biomasse vegetali spiaggiate. Nello specifico su circa 100 km di costa sabbiosa (28% delle spiagge), il trattamento di circa 75.000 tonnellate/anno consentirebbe il recupero di circa 37.000 tonnellate/anno di sabbia. Tali valutazioni richiedono tuttavia specifiche verifiche operative e monitoraggi continuativi.

*La stima è basata sull'ipotesi di un peso medio minimo del singolo frammento pari a 0,0025 g, corrispondente a microplastiche di dimensione inferiore a 5 mm. Tale valore implica un contenuto in plastica pari ad almeno 3,75 g di frammenti di plastiche e microplastiche per kg di biomassa di Posidonia trattata. Il calcolo considera un'incidenza media della Posidonia pari al 45% del peso totale del materiale spiaggiato trattato nel periodo 2020–2023. Il valore di riferimento per il peso minimo dei frammenti è tratto da University of Newcastle (Australia) e WWF, 2019.

7. Benefici geomorfologici

L'applicazione di tecnologie industriali di trattamento del materiale spiaggiato consente di ridurre le perdite di sedimento durante le operazioni di pulizia degli arenili, migliorando la gestione delle biomasse vegetali spiaggiate nei contesti costieri maggiormente antropizzati. Il recupero della frazione sabbiosa mediante soil washing permette infatti di separare il sedimento dalla matrice organica e dai rifiuti antropici, evitando che quantità significative di sabbia vengano conferite in discarica insieme alla biomassa vegetale. Tale approccio non deve essere interpretato come un intervento diretto di contrasto all'erosione costiera, bensì come una misura di conservazione del sedimento originariamente presente nel sistema spiaggia–duna, coerente con le strategie di gestione sostenibile degli arenili mediterranei (Vacchi et al., 2017). Dal punto di vista geomorfologico, il principale beneficio non consiste nell'apporto artificiale di nuovo sedimento alle spiagge, bensì nella conservazione del sedimento originario già presente nell'arenile. La tecnologia descritta consente quindi di minimizzare le perdite di sabbia associate alle tradizionali operazioni di rimozione meccanica delle banquette, mantenendo più stabile il bilancio sedimentario locale. Le operazioni di separazione e lavaggio consentono inoltre una significativa riduzione della dispersione di rifiuti plastici e microplastiche nella matrice sabbiosa, limitando i processi di frammentazione secondaria dovuti alla movimentazione meccanica del materiale spiaggiato. In questo senso, il trattamento industriale contribuisce al miglioramento della qualità ambientale dell'arenile e alla riduzione delle criticità ambientali legate alla presenza di rifiuti marini.

8. Benefici socio-economici

L'analisi costi-benefici sviluppata nell'ambito del progetto “Rispetta il tuo capitale” (Università Bocconi – GREEN & DISTAV) ha evidenziato come la gestione industriale del materiale spiaggiato

to possa generare benefici ambientali, economici e sociali superiori ai costi sostenuti per il trattamento. Lo studio ha stimato un tasso di rendimento sociale pari al 14,2%, valore nettamente superiore alla soglia del 3,5% generalmente adottata nelle valutazioni pubbliche di sostenibilità degli investimenti.

I benefici socio-economici derivano principalmente da:

- riduzione dei quantitativi avviati a discarica;
- recupero di sabbia riutilizzabile per il ripristino morfologico degli arenili;
- miglioramento della qualità paesaggistica e della fruibilità turistica delle spiagge;
- riduzione della presenza di rifiuti plastici e microplastiche;
- valorizzazione della biomassa vegetale attraverso compostaggio e filiere di recupero di materia.

Secondo le elaborazioni del Gruppo Esposito, lungo le coste italiane si accumulano annualmente circa 575.000 tonnellate di materiale spiaggiato. L'applicazione diffusa di tecnologie di separazione e lavaggio consentirebbe di recuperare quote significative di sedimento sabbioso che, diversamente, verrebbero smaltite insieme alla biomassa vegetale. La disponibilità di impianti dedicati permette inoltre di ottimizzare le operazioni di pulizia degli arenili dalle biomasse vegetali spiaggiate, migliorando l'intercettazione dei rifiuti plastici presenti nella matrice organica e minimizzando le perdite di sabbia durante le attività di raccolta e gestione del materiale. L'approccio adottato risulta coerente con i principi della gestione integrata delle biomasse vegetali costiere e della valorizzazione delle risorse naturali attraverso filiere di recupero di materia, come evidenziato in diversi studi dedicati ai servizi ecosistemici associati agli ecosistemi a *Posidonia oceanica* (Campagne et al., 2015).

9. Limiti dello studio

I risultati presentati derivano prevalentemente da dati operativi raccolti presso impianti attivi nel territorio regionale sardo e da attività sperimentali condotte in specifici contesti costieri mediterranei. Sebbene tali dati forniscano indicazioni utili sulle prestazioni tecniche del processo, ulteriori attività di monitoraggio indipendente e confronti multi-sito risultano necessari per verificare la trasferibilità del modello in differenti condizioni geomorfologiche e climatiche. La quantificazione delle microplastiche rappresenta inoltre una stima conservativa basata sui dati di processo e su parametri derivati dalla letteratura scientifica. Futuri approfondimenti analitici consentiranno di caratterizzare con maggiore dettaglio la composizione polimerica delle particelle intercettate e di valutare l'efficienza di rimozione per le diverse classi dimensionali.

10. Conclusioni

Le banquette di *Posidonia oceanica* svolgono un ruolo costiero non univoco: in condizioni di bilancio sedimentario positivo e moto ondoso moderato possono contribuire alla dissipazione dell'energia e alla protezione dell'arenile; in configurazioni riflettenti e su spiagge in deficit sedimentario possono invece favorire scavo localizzato al piede dell'accumulo e perdita di sedimento ("muro elastico"). Ne consegue la necessità di decisioni sito-specifiche basate su analisi morfodinamiche, composizione del materiale e obiettivi di gestione (ISPRA, 2018). Tale interpretazione necessita tuttavia di ulteriori approfondimenti sperimentali e validazioni bibliografiche in ambito internazionale. I risultati ottenuti sono coerenti con le indicazioni della letteratura internazionale che promuove approcci integrati alla gestione delle biomasse di *Posidonia oceanica*, orientati alla conservazione degli ecosistemi costieri, alla valorizzazione delle risorse naturali e alla riduzione del conferimento in discarica secondo i principi dell'economia circolare. (Pergent et al., 2012; Boudouresque et al., 2016). L'esperienza maturata nei siti costieri della Sardegna dimostra la fattibilità operativa del modello in differenti contesti ambientali e conferma il potenziale del trattamento industriale del materiale spiaggiato quale strumento di supporto alle strategie di gestione sostenibile delle coste mediterranee. I dati di esercizio confermano recuperi di sabbia tipicamente compresi tra 55 e 60% in peso, con riduzione sostanziale del conferimento in discarica e con la possibilità di restituire agli arenili

una quota significativa del sedimento originariamente presente nel materiale spiaggiato. In Sardegna, tra il 2021 e dicembre 2025, le attività hanno permesso la restituzione di circa 7.600 t di sabbia ($\approx 5.300 \text{ m}^3$); assumendo uno spessore medio di riporto di 0,10 m, tale volume corrisponde a $\sim 53.000 \text{ m}^2$ di spiaggia ricalibrata e pulita, con potenziali benefici per la conservazione del sedimento costiero e per la fruizione turistica degli arenili. L'esperienza maturata in Sardegna, con interventi condotti in contesti quali Alghero, Orosei, Palau e Costa Smeralda, dimostra la flessibilità operativa del modello, che consente interventi anche micro-invasivi e adattabili alle specificità ambientali dei litorali. Dal punto di vista della valorizzazione, la biomassa lavata e depurata da rifiuti e microplastiche può essere avviata a compostaggio e a filiere di prodotto. Il progetto Marevivo "Rispetta il tuo capitale" ha dimostrato la fattibilità di protocolli che separano la posidonia dalla sabbia e la trasformano in compost, riducendo costi ambientali ed economici dell'intervento evidenziando un tasso di rendimento sociale pari al 14,2% e confermando le ricadute positive dell'intervento in termini di benessere sociale complessivo. (Marevivo, 2020; Marevivo, 2021). Su questa linea si colloca Posidonia Garden, che valorizza la biomassa trattata come ammendante/terriccio organico in un modello di economia circolare territoriale (Gruppo Esposito, 2025). In prospettiva, l'iter progettuale/realizzativo può essere ulteriormente rafforzato tramite: standardizzazione di piani di monitoraggio pre- e post-intervento (granulometria, contaminanti, microplastiche); criteri decisionali condivisi con gli enti gestori per la scelta tra conservazione in situ, spostamento stagionale e rimozione selettiva con recupero. Nel complesso, la tecnologia proposta consente di trasformare il materiale spiaggiato da criticità a risorsa, integrando tutela ambientale, conservazione del sedimento costiero e benefici socio-economici. Un approccio tecnologico, circolare e scientificamente fondato capace di fornire agli enti locali uno strumento efficace, normativamente coerente e adattabile alle specificità delle coste mediterranee. Permangono tuttavia rilevanti criticità normative e autorizzative che possono ostacolare la diffusione su larga scala del modello proposto. In particolare, per la biomassa derivante da Posidonia oceanica non risulta ancora definito un quadro nazionale organico di End of Waste che disciplini in maniera chiara le possibili filiere di recupero e riutilizzo al di fuori dell'impiego come ammendante in agricoltura. Tale assenza limita attualmente lo sviluppo di applicazioni alternative ad elevato valore aggiunto, quali materiali bio-based, substrati tecnici, bioedilizia, arredo costiero, ripristino ambientale e processi di recupero energetico. L'elaborazione di specifici criteri normativi nazionali per la cessazione della qualifica di rifiuto rappresenterebbe pertanto uno strumento strategico per favorire la diffusione di filiere industriali circolari dedicate alle biomasse vegetali spiaggiate.

Bibliografia

- ARPA Toscana, 2016. Emissioni di idrogeno solforato da accumuli di biomassa organica: valutazioni ambientali e sanitarie. Report tecnico, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, Firenze.
- ARPA Toscana, 2025. Rifiuti spiaggiati lungo il litorale toscano. Dati di monitoraggio Strategia Marina (2015-2024). Report tecnico, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, Firenze.
- ARPAE Emilia-Romagna, 2025. Microplastiche: origine, processi di frammentazione e dinamiche ambientali. Report tecnico, Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna, Bologna.
- Bianchi T.S., 2011. The role of soil washing technologies in sediment and waste recovery. Waste Management.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L., 2016. Protection and Conservation of Posidonia oceanica Meadows. RAMOGE and RAC/SPA, Tunis. 202 pp.

- Campagne C.S., Salles J.M., Boissery P., Deter J., 2015. The seagrass *Posidonia oceanica*: ecosystem services identification and economic evaluation of goods and benefits. *Marine Pollution Bulletin*, 97: 391-400.
- Cantasano N., 2021. Deposition dynamics of *Posidonia oceanica* “banquettes” on Calabrian sandy beaches (Southern Italy). *Coasts*, 1(1): 25-30.
- De Falco G., Simeone S., Baroli M., 2008. Management of beach-cast *Posidonia oceanica* seagrass on the island of Sardinia (Italy, Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, 24(4C): 69-75.
- Dermont G., Bergeron M., Mercier G., Richer-Laflèche M., 2008. Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1): 1-31.
- Direttiva 92/43/CEE, 1992. Direttiva del Consiglio del 21 maggio 1992 relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche. *Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee*, L206: 7-50.
- Duarte C.M., 2002. The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation*, 29(2): 192-206.
- GNRAC, 2017. Studi tecnico-scientifici sulla dinamica costiera e sulla gestione degli accumuli di *Posidonia oceanica*. Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero.
- Gruppo Esposito, 2025. Documentazione tecnica dell'impianto Ecocentro Sardegna e dati sperimentali di esercizio. Documentazione tecnica aziendale interna non pubblicata.
- Innocenti F., Pranzini E., Anfuso G., 2020. Management of beached seagrass in Mediterranean coastal environments. *Ocean & Coastal Management*.
- ISPRA, 2018. Linee guida per la gestione dei materiali naturali spiaggiati e la valutazione degli impatti ambientali. Manuali e Linee Guida ISPRA, Roma.
- ISPRA, 2025. Rifiuti marini spiaggiati. Indicatori ambientali della Strategia Marina. Rapporto tecnico, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- Khan F.I., Husain T., Hejazi R., 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, 71(2): 95-122.
- Legambiente, 2022. Beach Litter 2022. Indagine sui rifiuti presenti sulle spiagge italiane. Legambiente Onlus, Roma.
- Marevivo, 2020. Rispetta il tuo capitale. Progetto di valorizzazione della *Posidonia oceanica*. Marevivo, Roma.
- Marevivo, 2021. Recupero della *Posidonia oceanica* e servizi ecosistemici costieri. Marevivo, Roma.
- Orth R.J., Carruthers T.J.B., Dennison W.C., Duarte C.M., Fourqurean J.W., Heck K.L. Jr., Hughes A.R., Kendrick G.A., Kenworthy W.J., Olyarnik S., Short F.T., Waycott M., Williams S.L., 2006. A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56(12): 987-996.
- Parker L., 2020. La pulizia delle spiagge non elimina del tutto i rifiuti di plastica. *National Geographic*, 11 maggio 2020.
- Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Sem-

- roud R., Serrano O., Verlaque M., 2012. Mediterranean seagrass meadows: resilience and contribution to climate change mitigation. Atti del 5th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation, Portorož, Slovenia.
- POSBEMED, 2018. Gestione sostenibile delle banquette di Posidonia oceanica nel Mediterraneo. Documentazione tecnica del progetto europeo POSBEMED.
- Regione Autonoma della Sardegna, 2020. Legge regionale 21 febbraio 2020, n. 1 - Legge di stabilità regionale 2020. Bollettino Ufficiale della Regione Autonoma della Sardegna.
- Simeone S., De Muro S., De Falco G., 2013. Seagrass berm deposition on a Mediterranean embayed beach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 135: 171-181.
- SNPA, 2020. Spiaggia pulita? Solo se contiene meno di 20 rifiuti ogni 100 metri. Rapporto SNPA, Roma.
- Stringari C.E., Power H.E., 2020. Quantifying bore-bore capture on natural beaches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(6): e2019JC015689.
- Trogu D., Simeone S., Ruju A., Porta M., Ibba A., De Muro S., 2023. A four-year video monitoring analysis of the Posidonia oceanica banquette dynamic: a case study from an urban microtidal Mediterranean beach (Poetto Beach, Southern Sardinia, Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12): 2376.
- Università Bocconi - GREEN & DISTAV, 2019. Rispetta il tuo capitale. Valutazione economica dei servizi ecosistemici costieri. Rapporto di ricerca.
- Vacchi M., De Falco G., Simeone S., Montefalcone M., Morri C., Ferrari M., Bianchi C.N., 2017. Biogeomorphological effects of Posidonia oceanica banquettes on coastal dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 194: 72-84.
- World Health Organization, 2003. Hydrogen sulfide: human health aspects. Concise International Chemical Assessment Document 53. WHO Press, Geneva.

Ricevuto il 17/04/2026; accettato il 22/06/2026