

Approcci innovativi e di intelligenza artificiale per l'analisi del “*Marine and Beach Litter*”: stato dell'arte degli studi condotti lungo le coste pugliesi

¹Sozio Angelo, ^{1,2}Rizzo Angela, ³Aucelli Pietro P. C., ¹La Salandra Marco, ⁴Martella Rocco, ^{1,2}Mastronuzzi Giuseppe, ^{1,2}Scardino Giovanni, ³Scarrica Vincenzo M., ³Staiano Antonino, ^{1,2}Scicchitano Giovanni

¹Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari, Italia

²Centro Interdipartimentale per la Dinamica Costiera, Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari, Italia

³Dipartimento di Scienze e Tecnologia, Università degli Studi di Napoli “Parthenope”, Napoli, Italia

⁴Istituto Statale “A. Righi” Taranto, Italia

angelo.sozio@uniba.it; angela.rizzo@uniba.it

Riassunto

La continua diffusione di sostanze inquinanti e rifiuti nell'ambiente marino-costiero è divenuta una delle maggiori problematiche che interessano il bacino del Mediterraneo, soprattutto considerando il continuo aumento della concentrazione di polimeri artificiali nelle matrici ambientali (acqua, sedimento) e nella catena trofica. In questo lavoro vengono presentate le attività svolte per la caratterizzazione geo-ambientale di alcuni siti costieri del versante adriatico pugliese (in particolare il sito di Torre Guaceto) ed i progressi raggiunti nel monitoraggio del *Marine Litter* tramite un approccio di *citizen science*. Le procedure di analisi volte all'individuazione di rifiuti spiaggiati (*Beach Litter* - BL) sono basate sia su rilievi diretti *in situ* sia su analisi di riconoscimento automatico da immagini fotogrammetriche acquisite tramite SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto). I risultati ottenuti hanno evidenziato che la percentuale più alta di elementi di BL con dimensione > di 2.5 cm è rappresentata da polimeri artificiali (>80%). Per monitorare la distribuzione dei rifiuti in mare (*Marine Litter* - ML), è stata sviluppata l'applicazione “nauticAttiva” per dispositivi cellulari utilizzando la piattaforma iNaturalist (dominio di *National Geographic*), attraverso la quale è stato poi sviluppato un *geodatabase* dedicato. L'applicazione permette di raccogliere fotografie georeferenziate e di classificare gli oggetti individuati usando un approccio di *citizen science*, in quanto tutti gli utenti che installano sul proprio dispositivo mobile l'applicazione possono fornire osservazioni sui rifiuti presenti nell'ambiente marino. Le analisi ad oggi effettuate favoriscono l'identificazione e la valutazione della distribuzione spaziale del *Marine e Beach Litter*, fornendo un valido strumento per il monitoraggio di aree estese e per la pianificazione di interventi di gestione delle aree costiere.

Parole chiave: ambiente costiero, rilievo aerofotogrammetrico, rifiuti antropici, identificazione automatica, monitoraggio ambientale, *citizen science*.

Abstract

The continuous spread of pollutants and waste materials in marine and coastal environment has become one of the major issues affecting the Mediterranean basin, especially considering the continuous increase in the concentration of polymers in environmental matrices (water, sediment) and in the trophic chain. In this paper, activities performed for the geo-environmental characterization of some coastal sites along the Adriatic coast of the Apulia region (Southern Italy and Torre Guaceto site in detail) are presented. The procedures aimed at the detection of beach litter (BL) include both direct in situ surveys and automatic recognition analysis on photogrammetric images acquired by UASs (Unmanned Aerial Systems). The results obtained for a beach sector sited in the Marine Protected Area/Natural Reserve of Torre Guaceto (Brindisi) showed that the highest percentage of BL elements with size > 2.5 cm was represented by artificial polymers (>80%). Furthermore, to assess the distribution of litter in the sea (marine litter - ML), the “nauticAttiva” application for mobile devices was implemented with the exploitation of the iNaturalist platform (National Geographic domain). The application allows the collection of georeferenced

photographs and the classification of identified objects using a citizen science approach, where any user can provide observations of litter items on the sea surface. To date, from the reported analyses, a suitable system is outlined for the identification and spatial distribution of marine and beach litter, also providing a valuable tool for the investigation of large areas in a perspective of integrated coastal management.

Keywords: *coastal environment, aero-photogrammetric survey, anthropogenic waste, automatic identification, environmental assessment, citizen science.*

Introduzione

Negli ultimi decenni, la quantità di rifiuti presenti lungo le coste a scala globale è fortemente aumentata e gli effetti negativi che ne derivano sono stati ampiamente documentati a livello nazionale ed internazionale. La presenza di rifiuti in ambiente marino-costiero impatta negativamente su ecosistemi, salute umana, economia e società. Piani di gestione intergovernativi per lo sviluppo sostenibile sia in seno alle Nazioni Unite (UNEP) che a livello europeo (OSPAR) si propongono di regolamentare la gestione di tali elementi inquinanti tracciando delle linee guida per il loro monitoraggio. I termini *Marine Litter* (ML) e *Beach Litter* (BL) indicano tutti i materiali solidi fabbricati e/o elaborati da attività antropica e in seguito deposti, abbandonati o persi in ambiente marino-costiero e ivi presenti in maniera persistente (OSPAR, 2010; UNEP, 2021). Tentare di gestire un flusso così alto di rifiuti verso le aree costiere significa soprattutto conoscerne le aree sorgenti e i processi che mobilitano tali elementi. Infatti, i meccanismi che trasportano i rifiuti solidi dall'entroterra verso la fascia costiera possono essere di varia natura. Il centro di comunicazione ambientale *GRID-Arendal*, partner UNEP, ha individuato numerose sorgenti di *litter* collocate sia sulla terraferma sia in ambiente marino (<https://www.grida.no/resources/6922>). Fra questi, vi sono gli impianti fognari di centri urbani e industrie i quali, a seguito di forti piogge ed eventi estremi possono eccedere la loro capacità di gestione delle acque reflue e far defluire i rifiuti direttamente verso i bacini d'acqua senza che vengano trattati. Inoltre, le discariche situate in vicinanza delle aree costiere o fluviali rappresentano probabili sorgenti di ML e BL. A seguire, vi sono rifiuti provenienti dalle reti stradali dei centri urbani che raggiungono fiumi e mari grazie al dilavamento superficiale operato dalle acque meteoriche. Inoltre, in ambiente costiero possono essere riscontrati oggetti provenienti da impianti di lavoro e produzione situati in ambiente forestale, agricolo, edile e di estrazione (miniere, cave). Fra le principali fonti di rifiuti in ambiente marino, *GRID-Arendal* individua le attività legate al commercio marittimo, alla navigazione nonché alle attività di balneazione lungo le spiagge. Da notare che anche gli stessi animali e organismi marini possono assumere il ruolo di agenti trasportatori passivi ingerendo la componente di *litter* costituita dai frammenti con diametro inferiore a 5 mm (*microlitter*) o mobilitando col loro corpo rifiuti anche più grandi. Inoltre, fonti di *litter* secondarie all'interno dello stesso ambiente costiero possono formarsi a seguito di un elevato accumulo di BL o ML proveniente da fonti esterne. Ad esempio, Andriolo et al., (2022) individuano una porzione del sistema dunale lungo un settore di costa atlantica portoghese assimilabile del tutto ad un *reservoir* di BL mentre Piazzolla et al., (2020) individuano un'elevata componente di microplastiche nei sedimenti del fondo marino lungo un'area costiera del Lazio, nel Tirreno settentrionale. Al fine di far riferimento ad una scala uniforme per i vari enti che si occupano del monitoraggio e dell'acquisizione dei dati sul campo, gli elementi di ML e BL sono classificati sulla base della loro dimensione (GESAMP, 2019; Tab. 1). Tale classificazione influenza anche le metodologie da utilizzare per le attività da effettuare, dato che elementi di diverse dimensioni richiedono strumenti differenti per essere campionati ed analizzati.

In Italia, Legambiente realizza annualmente campagne di monitoraggio su numerose spiagge e, secondo i risultati dell'indagine condotta nel 2023 (Fig. 1a), i materiali più abbondanti risultano essere i polimeri artificiali (72,5%). Ciò è in accordo anche con le statistiche a livello europeo rese disponibili dal *Joint Research Centre* (JRC, 2017), il quale per l'anno 2016 ha registrato un'elevata percentuale (84%) di polimeri artificiali sulle coste europee (Fig. 1b). Tali criticità confermano sempre più il bisogno di contrastare l'incremento preoccupante del ML e BL e la comunità scientifica si è dimostrata particolarmente sensibile a questa tematica. Infatti, negli ultimi 10 anni il numero di pubblicazioni scientifiche in cui compaiono i termini "*Marine Litter*" e "*Beach Litter*" è nettamente aumentato, soprattutto in paesi europei (Cesarano et al., 2021). Le numerose problematiche legate alla sempre più elevata abbondanza di ML e BL lungo

le coste italiane ed internazionali (Rangel-Buitrago et al., 2019; Asensio-Montesinos et al., 2020; Bao et al., 2018; Rizzo et al., 2021) hanno portato allo sviluppo e al miglioramento delle metodologie e delle tecniche di monitoraggio costiero sfruttando approcci sempre più innovativi e all'avanguardia. Una delle metodologie più innovative per questa tipologia di monitoraggio costiero si basa sulla realizzazione di rilievi aerofotogrammetrici associati alla capacità di elaborazione di algoritmi di *Machine Learning* per il riconoscimento automatico di BL su immagini ad alta definizione (Andriolo et al., 2020; Gonçalves et al., 2022, Scarrica et al., 2022). Difatti, un censimento visivo *in situ* richiede un elevato dispendio di energie e tempo da parte degli operatori e i risultati possono essere caratterizzati da una più o meno elevata soggettività (Gonçalves et al., 2020). Di conseguenza, negli ultimi anni sono stati valutati sistemi di monitoraggio alternativi per migliorare ed integrare i tradizionali approcci visivi, sfruttando l'uso di immagini acquisite tramite SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) che vengono poi analizzate automaticamente con tecniche di *Machine Learning* (Bao et al., 2018; Bak et al., 2019). Diversi studi hanno mostrato che algoritmi di *Machine Learning* lavorano particolarmente bene nell'ambito del monitoraggio ambientale da immagini acquisite in remoto, quali *Random Forest* (RF), *Support Vector Machines* (SVM) e *K-Nearest Neighbours* (KNN) (Hastie et al., 2009).

Tabella 1. Categorie dimensionali proposte per la classificazione degli elementi di *Marine e Beach Litter*, assumendo una forma quasi sferica dell'elemento e considerando il lato lungo (GESAMP, 2019; *GESAMP: *Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*; **MSFD: *Marine Strategy Framework Directive*; *NOWPAP: *Northwest Pacific Action Plan*)**

Categorie	Dimensione relativa	Intervalli dei valori	Unità di misura	Riferimenti
Mega	Molto grande	> 1 m	Metri	GESAMP*
Macro	Grande	25 – 1000 mm	Metri; centimetri; millimetri	MSFD**
Meso	Media	5 – 25 mm	Centimetri; millimetri	MSFD
Micro	Piccola	< 5 mm	Millimetri; micron	NOWPAP***; MSFD
Nano	Estremamente piccola	< 1 µm	Nanometri	-

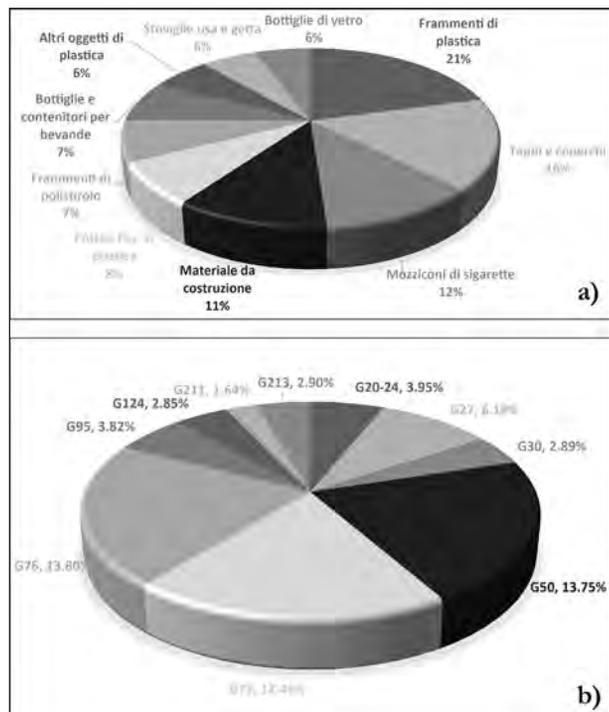


Figura 1. Grafici a torta che illustrano le 10 categorie di BL e ML più abbondanti rilevate a seguito delle campagne di monitoraggio condotte da a) Legambiente lungo le coste italiane nell'anno 2023 e b) dal JRC su spiagge europee nell'anno 2016. Le sigle delle categorie di BL sono riferite alle linee guida europee definite in Vlachogianni et al., 2017.

In questo studio si riporta lo stato dell'arte e i risultati raggiunti nell'ambito dei progetti di ricerca "*Marine & Beach litter monitoring in Apulia*" (POC PUGLIA FESRT-FSE 2014/2020), finanziato dalla Regione Puglia tramite il programma RiPARTI (*assegni di Ricerca per riPARTire con le imprese*), e del progetto RETURN, finanziato tramite fondi PNRR, i quali mirano alla messa a punto di un protocollo per la valutazione della distribuzione e della classificazione dei rifiuti spiaggiati, utile per lo sviluppo di programmi di monitoraggio ambientale ad alte prestazioni, secondo i requisiti internazionali e nazionali. Nello specifico, in questo lavoro sono illustrati gli studi in corso e i risultati preliminari derivanti dalle analisi condotte lungo un settore di spiaggia all'interno dell'Area Marina Protetta (MPA) di Torre Guaceto (BR). In particolare, seguendo le linee guida europee (Vlachogianni, 2017; Fleet et al., 2021), sono state svolte campagne di acquisizione dati *in situ* mirate al conteggio manuale dei rifiuti presenti in spiaggia. In concomitanza sono stati effettuati voli con rilievi aero-fotogrammetrici lungo il tratto costiero indagato, così da poter poi analizzare le immagini ad alta risoluzione tramite un algoritmo di *Machine Learning* ed ottenere, come risultato finale, una classificazione automatica dei rifiuti spiaggiati. Tale approccio permetterà, inoltre, di avere una stima preliminare della distribuzione e abbondanza del BL in un determinato settore di spiaggia facilitando le attività di monitoraggio *in-situ*. Inoltre, sono riportati i progressi delle attività di monitoraggio della ML effettuato in collaborazione con la Lega Navale Italiana. Tra le idee più innovative proposte in questo contesto di soluzioni alla minaccia posta dal ML e BL vi sono metodi di monitoraggio di rifiuti che possono essere affrontati attraverso approcci di *citizen science*, in questo caso integrati con i telefoni cellulari (Mastronuzzi, 2023; Scardino et al., 2022). D'altra parte, la disponibilità di telefoni cellulari è da considerarsi ubiquitaria all'interno della società e, di conseguenza, tali strumenti ormai di uso quotidiano possono essere integrati con applicazioni *web mobile*, come l'app "nauticAttiva" proposta in questo studio, che consentano di raccogliere molti dati per applicazioni scientifiche relative ad aree estese e in un breve intervallo temporale. I dati ottenuti dalle attività in corso permetteranno di comprendere meglio la complessità legata alla mobilità e distribuzione dei rifiuti su scala di bacino, fornendo una visione completa della problematica rappresentata dai rifiuti in ambiente marino-costiero. Difatti, la conformazione semi-chiusa del Mar Mediterraneo rende molto complicata la mobilitazione dei rifiuti, i quali possono raggiungere le coste trasportati da fiumi, vento e ruscellamento superficiale (Campanale et al., 2020; Guerranti et al., 2020; Khan et al., 2020). Questo pone una necessità particolare di comprendere le dinamiche interne al bacino del Mediterraneo di modo da ponderare e meglio pianificare futuri interventi di monitoraggio, gestione e bonifica lì dove vengono individuate aree a maggior rischio di inquinamento da ML e BL.

Area di studio

In questo lavoro sono illustrati i risultati derivanti dalle varie analisi finora condotte in un settore di spiaggia che ricade all'interno dell'Area Marina Protetta (AMP) di Torre Guaceto, situata a circa 15 km a nord della città di Brindisi (Fig. 2a). L'AMP è stata istituita nel 1991 con un decreto del Ministero dell'Ambiente. Il tratto di linea di costa adriatica ricadente nell'area copre circa 8 km ed ha un'estensione areale di quasi 3.000 ettari, comprendente sia zone terrestri che marine, suddivisa in tre aree con diversi livelli di interdizione e protezione: zona A (più alto livello di protezione), zona B e zona C. Inoltre, il sito è incluso sia nel catasto dei geositi della Regione Puglia (CGP0249 - "L'area umida di Torre Guaceto"; Mastronuzzi et al., 2013) sia nella rete ecologica Natura 2000 come Area a Protezione Speciale (SPA - IT9140008 "Torre Guaceto") e Sito di Interesse Comunitario (SCI - IT9140005 "Torre Guaceto e Macchia San Giovanni"). Essendo l'area di studio inserita all'interno di un'AMP, le operazioni di pulizia programmate sono molto limitate così come la fruizione ricreativa da parte di bagnanti. Di conseguenza, la distribuzione e abbondanza di rifiuti risulta essere legata maggiormente a processi di trasporto e mobilitazione naturali. Inoltre, quest'area è attraversata dal Canale Reale, un torrente lungo 48 km che separa l'altopiano murgiano dalla pianura di Taranto-Brindisi (Mastronuzzi et al, 2011, 2018). Il settore di spiaggia considerato per le analisi si trova in prossimità della foce del Canale Reale (Fig. 2b), un canale dalla portata molto limitata, regimato artificialmente nel suo tratto finale. Tale corso d'acqua è considerato fra le principali vie preferenziali attraverso le quali i rifiuti possono raggiungere le spiagge nell'AMP, soprattutto in seguito al verificarsi di eventi meteo-marini estremi.

Il progetto "nauticAttiva" prevede la condivisione di fotografie acquisite tramite cellulare in ambiente ma-

rino, per cui l'area entro la quale è possibile monitorare la distribuzione di rifiuti in mare è data idealmente dalle capacità di navigazione e mobilità in mare degli utenti. Si rimanda al paragrafo "Risultati" per visionare l'areale coperto dai dati raccolti al momento della stesura del presente lavoro (litorale ionico e adriatico della

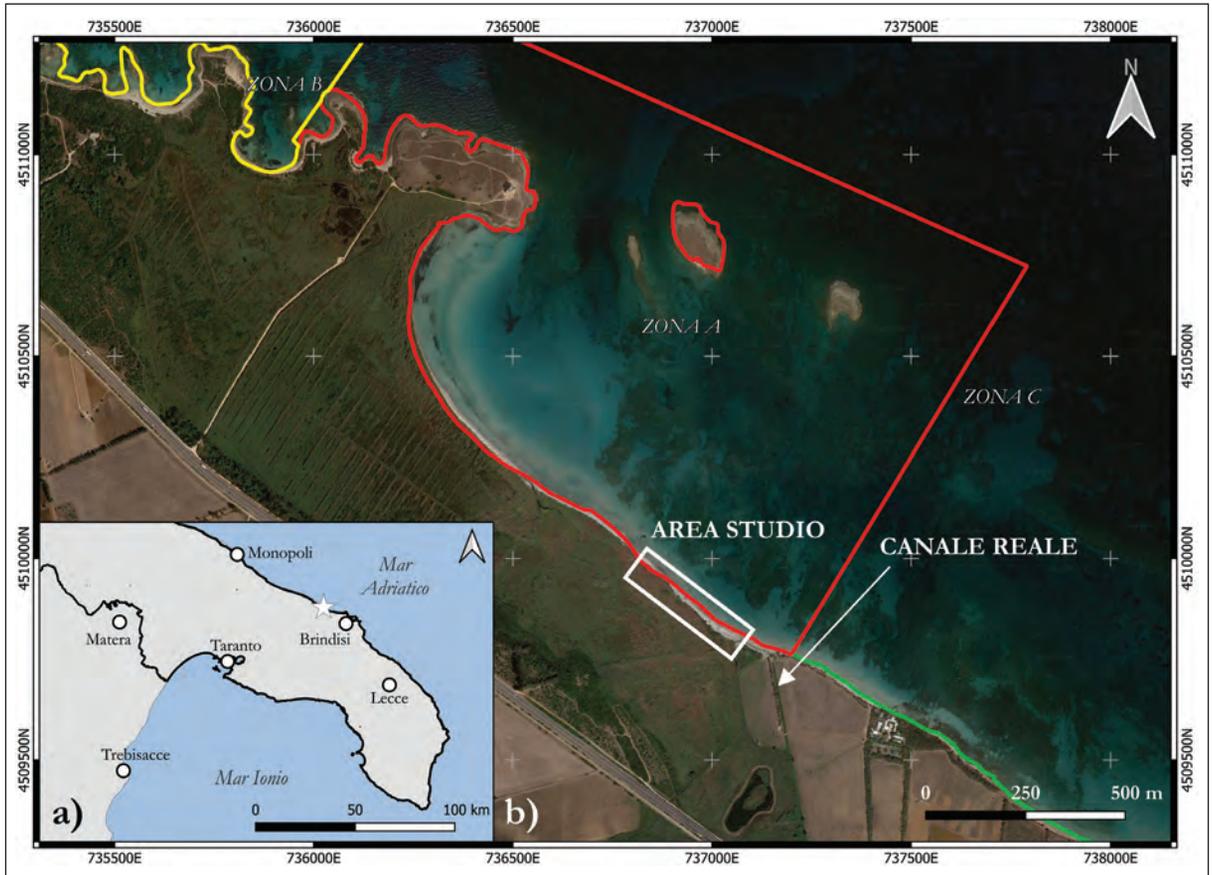


Figura 2. Ubicazione dell'AMP di Torre Guaceto lungo la costa adriatica pugliese. a) L'area di Torre Guaceto è indicata dalla stella bianca; b) il rettangolo bianco identifica il settore di spiaggia analizzato nel maggio 2023. Sono riportati anche i limiti delle zone dell'AMP a diverso grado di interdizione.

Puglia, Stretto di Messina, costa meridionale della Sardegna).

Metodologia

L'analisi del *BL* è stata condotta seguendo due approcci metodologici differenti: il monitoraggio diretto sul campo, basato sul conteggio dei rifiuti *in-situ*, e il monitoraggio indiretto da ortofoto ottenute dal post-processing di immagini fotogrammetriche acquisite tramite SAPR. Quest'ultima metodologia ha previsto, inoltre, l'elaborazione dei dati raccolti da parte di un algoritmo di *Machine Learning* preposto al riconoscimento automatico dei rifiuti spiaggiati. Quest'ultimo è stato addestrato su immagini precedentemente acquisite tramite SAPR in aree costiere differenti dall'area test descritta in questo lavoro. Immagini ad alta risoluzione provenienti da Leirosa (Portogallo), Capitolo (Monopoli, Bari) e Valdelagrana (Cadice, Spagna) hanno fornito un *dataset* relativamente robusto sul quale addestrare gli algoritmi di *Machine Learning* utilizzati per il riconoscimento automatico, mentre il settore di spiaggia ubicato all'interno dell'AMP di Torre Guaceto (BR) è stato utilizzato per testare le capacità di riconoscimento degli algoritmi. La figura 3 riporta uno schema riassuntivo delle tecniche adottate per il progetto di ricerca presentato in questo lavoro. Il monitoraggio diretto in campo ed il riconoscimento automatico sono stati eseguiti all'interno di tre sub-aree delimitate da box rettangolari aventi come vertici i GCP (*Ground Control Point*) usati per la georeferenziazione dell'ortomosaico (Fig. 8), di modo da avere uniformità dell'area indagata per entrambe le metodologie

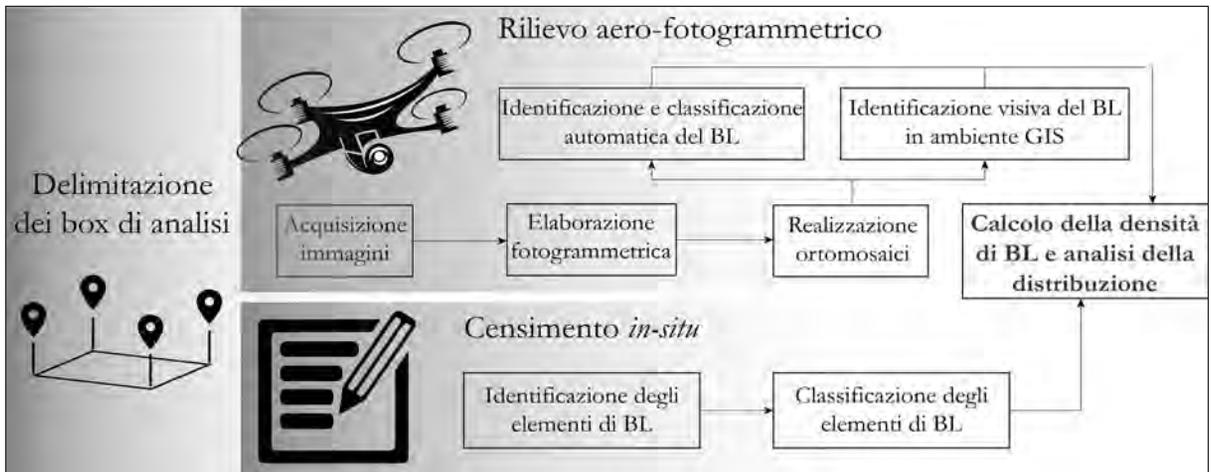


Figura 3. Schema riassuntivo degli approcci metodologici utilizzati per l'analisi del BL.

nel calcolo delle densità di BL.

Durante le campagne di conteggio in-situ tutti gli elementi riconosciuti come BL di dimensioni superiori a 2.5 cm (appartenenti quindi alla categoria "macro litter") sono stati identificati, fotografati e classificati secondo le linee guida per il monitoraggio dei rifiuti marini nei mari europei, sviluppate dall'Unione Europea (Galgani et al., 2013). Dai dati raccolti è stato possibile ricavare una prima stima della densità di rifiuti, calcolata come numero di oggetti raccolti nell'area di campionamento (area di ogni box) ed espressa, quindi, come elementi/m². Il rilievo aero-fotogrammetrico è stato eseguito utilizzando un drone multirottore "DJI Inspire 2" equipaggiato con fotocamera DJI Zennuse X5S (sensore 4/3" CMOS da 20.8 MP e risoluzione delle immagini di 5280 × 3956 pixel) di proprietà del Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università di Bari. Le missioni di volo sono state pianificate con delle rotte a griglia perpendicolari alla linea di riva, con la fotocamera orientata perpendicolarmente al suolo (-90°) ed una quota di volo di 15 m AGL (*Above Ground Level*) dal punto di decollo. La frequenza di scatto e la velocità di volo sono state settate di modo da ottenere una sovrapposizione frontale e laterale delle immagini rispettivamente dell'80% e del 65%. La georeferenziazione delle immagini acquisite dal SAPR è stata ottenuta grazie alla messa in posto di GCP (*Ground Control Point*) le cui coordinate sono state misurate tramite un ricevitore GNSS (*Global Navigation Satellite System*) in modalità RTK (*Real Time Kynematic*). La post-elaborazione delle immagini, condotta sfruttando un *software* basato sul principio di *Structure from Motion* (SfM; Ulmann S., 1976), ha seguito una procedura rigorosa (Fig. 4) per l'ottenimento, come prodotto finale, di un ortomosaico georeferenziato in scala RGB dell'area di studio. Successivamente, attraverso l'utilizzo del *software* QGIS (v 3.28), l'area di studio è stata analizzata mappando tutti gli elementi di BL riconoscibili. A tal fine, è stato creato un database dedicato integrato in uno *shapefile* di punti in cui ogni elemento è stato identificato con un punto inserito manualmente dall'operatore al centro dell'elemento stesso. Inoltre, nel *database* è stata inserita una breve descrizione

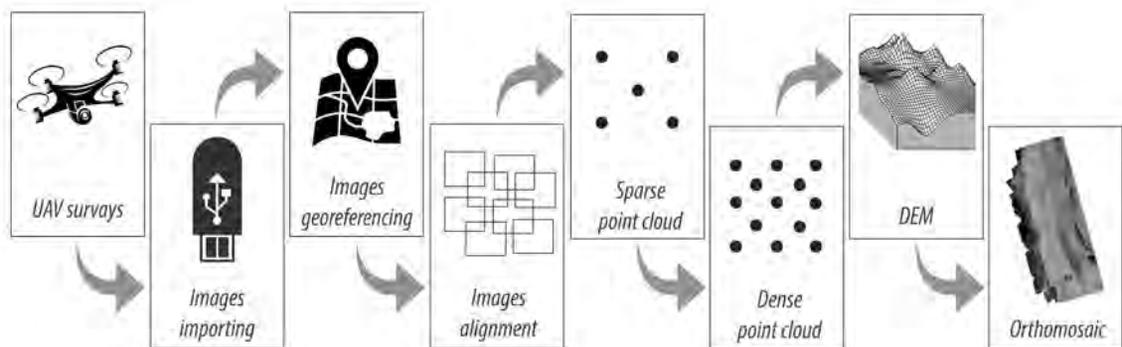


Figura 4. Schema riassuntivo della post-elaborazione fotogrammetrica delle immagini acquisite da SAPR per l'ottenimento di un ortomosaico del settore di spiaggia interessato.

di ogni oggetto e classificato sulla base del *J-code* proposto dalla Commissione Europea (Fleet et al., 2021). In accordo con questa classificazione, sono state identificate le seguenti categorie di *litter*:

- Polimeri artificiali/plastica
- Indumenti/tessuti
- Vetri/ceramica
- Metalli
- Carta/cartone
- Legni processati
- Gomma

Nel momento in cui non è stato possibile assegnare una specifica classe ad un oggetto, è stata attribuita la categoria “altro/non specificato”.

L'ortomosaico ricavato dall'elaborazione fotogrammetrica è stato utilizzato anche per il riconoscimento automatico di rifiuti tramite un approccio di *Machine Learning*. In particolare, è stato utilizzato un algoritmo di *computer vision* basato su una Rete Neurale Convolutionale, il Mask-RCNN (*Mask Region-Based Convolutional Neural Network*) (He et al., 2017; Scarrica et al., 2022), il quale esegue la segmentazione ad istanza di oggetti su immagini tramite un'architettura della rete organizzata in due fasi (Fig. 5): durante la prima fase avviene la generazione di *ROI* (regioni di interesse) in corrispondenza degli oggetti riconosciuti nell'immagine di input, mentre, una seconda fase prevede la segmentazione degli stessi tramite la generazione di una maschera e di una *bounding box* con successiva classificazione degli elementi assegnando loro un'etichetta

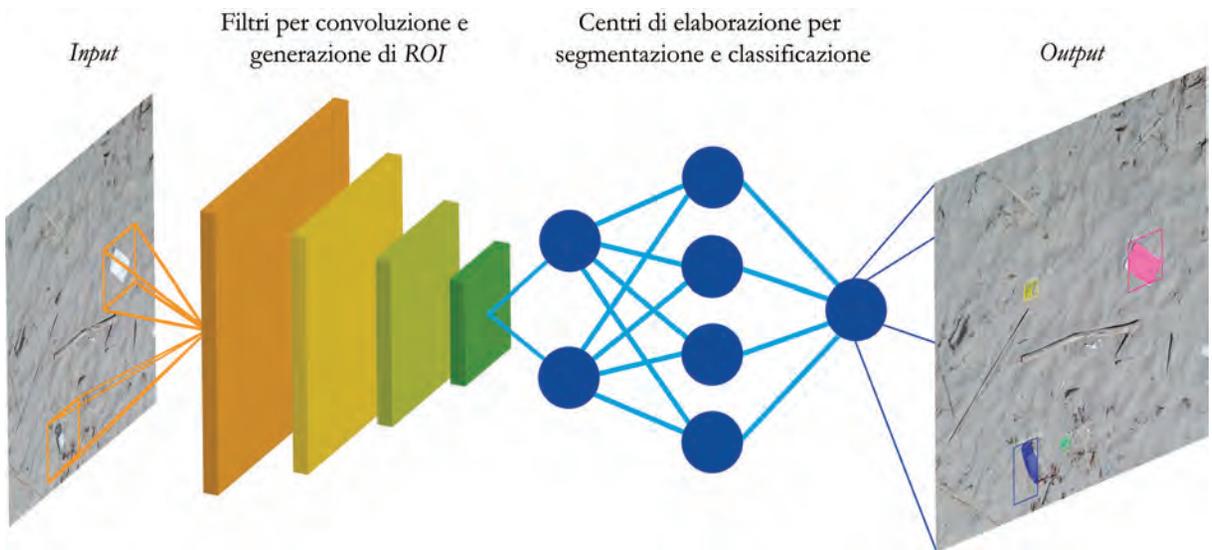


Figura 5. Illustrazione semplificata dell'algoritmo di Machine Learning basato su Mask-RCNN utilizzato per il riconoscimento automatico del BL su ortomosaici.

(*label*, corrispondente alla categoria dell'oggetto).

L'algoritmo richiede una fase di addestramento (*training*) preliminare durante la quale vengono inserite come *input* immagini con gli oggetti da riconoscere e classificare secondo delle categorie (*labels*) indicate dall'operatore. Per questo motivo, l'ortomosaico è stato suddiviso in ritagli più piccoli, di dimensione 1000x1000 *pixel*, per essere meglio gestiti dall'algoritmo, sui quali sono state eseguite le operazioni di digitalizzazione e classificazione manuale degli oggetti. Questi saranno poi successivamente riconosciuti e classificati dall'algoritmo Mask-RCNN in maniera automatica durante la fase di test. In questo modo è stato creato un *dataset* di immagini da utilizzare sia nella fase di addestramento che nella fase di test dell'algoritmo, in rapporto di circa 9:1. Sono state scelte tre classi per la classificazione automatica: 1- “Bottiglia”, 2- “Legno lavorato”, 3- “Altro”. Tali categorie sono state definite considerando la forma delle tipologie di rifiuti spiaggiati più comuni e riprendendo le linee guida europee. Per meglio valutare l'accuratezza

ratezza del Mask-RCNN è stato condotto un test di confronto analizzando lo stesso *dataset* di immagini con differenti algoritmi disponibili all'interno del *plugin* del *software* QGIS, *Orfeo ToolBox* (<https://www.orneo-toolbox.org>), una libreria che racchiude tecniche di *remote sensing* per l'elaborazione di immagini satellitari. L'algoritmo scelto per la segmentazione è stato *Meanshift* (Cheng Y., 1995) mentre come classificatore è stato utilizzato l'algoritmo *Support Vector Machine* (SVM; Cortes C. & Vapnik V., 1995). L'accuratezza di entrambi gli algoritmi di classificazione, Mask-RCNN e SVM, è stata valutata e quantificata tramite il *Mean Average Precision using Intersection over Union* (mAP@IoU), approccio già utilizzato in precedenti applicazioni (Scarrica et al., 2022). Questo parametro è definito come la media delle aree sottese ad ogni curva di *precision accuracy* e *user accuracy* (*recall*), ed esprime il grado di sovrapposizione fra l'insieme degli elementi di *ground truth* e quello degli elementi predetti dall'algoritmo (Everingham et al., 2010). I valori sono compresi fra 0 (nessuna sovrapposizione) and 1 (sovrapposizione totale). Con il termine *ground truth* si identificano quelle maschere corrispondenti effettivamente agli oggetti da classificare e che vengono utilizzate come punto di riferimento dall'algoritmo per la discriminazione delle varie classi. Per quanto riguarda il monitoraggio dei rifiuti sulla superficie del mare, è stata sviluppata un'applicazione installabile su dispositivi cellulari che consente di fotografare oggetti di ML e fornisce agli amministratori dell'app informazioni di dettaglio sulla tipologia di rifiuto e la sua posizione. Lo sviluppo dell'app "nauticAttiva" rientra tra le attività di un accordo istituito fra l'Università di Bari Aldo Moro (Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali e Dipartimento di Bioscienze, Biotecnologie e Ambiente) e la Lega Navale Italiana. Il progetto è basato su un approccio di *citizen science*, in quanto l'app è scaricabile gratuitamente da chiunque sia interessato a fornire un contributo alla ricerca scientifica ed è installabile su qualsiasi dispositivo cellulare che sia dotato di connessione alla rete e provvisto di ricevitore GNSS. L'app è stata implementata sulla piattaforma "*iNaturalist*" messa a disposizione da *National Geographic* (<https://www.inaturalist.org/>). La modalità di utilizzo dell'app risulta essere molto semplice (Fig. 6) in quanto, previa registrazione tramite *account*, è possibile scattare fotografie georeferenziate dell'oggetto una volta attivato il ricevitore GNSS integrato all'interno del dispositivo mobile. È possibile, inoltre, inserire anche una breve descrizione dell'oggetto fotografato indicando, ad esempio, le dimensioni e il colore dello stesso. Una volta scattate, le fotografie vengono inviate in tempo reale (nel momento in cui c'è copertura di rete) ad un server ubicato presso UNIBA, che gestisce il *database*. Questo verrà analizzato dai responsabili scientifici del progetto che forniranno un'identificazione e classificazione dei vari elementi di ML riconosciuti rendendo così possibili valutazioni preliminari circa la distribuzione del ML in ambiente marino-costiero.

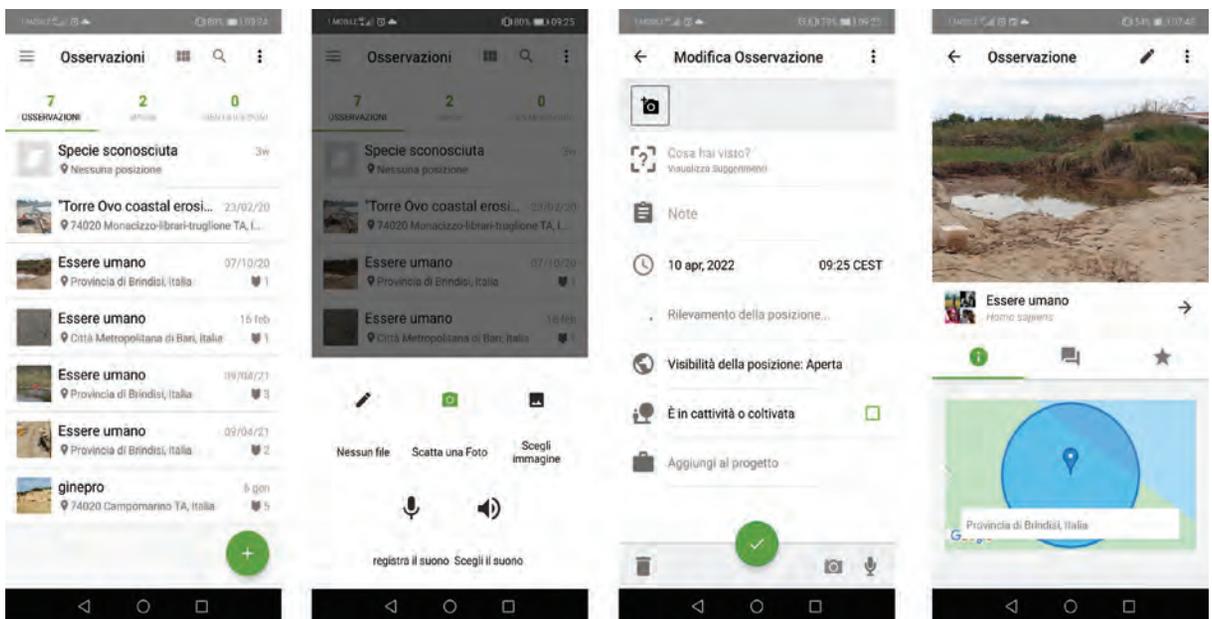


Figura 6. Schermate relative alla modalità di uso dell'app "nauticAttiva" così come si mostrano su un dispositivo cellulare.

Risultati

In questa sezione sono illustrati i risultati ottenuti durante la campagna di acquisizione dati condotta nel maggio 2023 nell'area studio di Torre Guaceto per il monitoraggio della BL e i risultati derivanti dall'utilizzo dell'app "nauticAttiva".

Le analisi condotte *in situ*, mirate al conteggio degli elementi di BL più grandi di 2,5 cm e catalogati utilizzando i codici forniti dal manuale per il monitoraggio stilato dalla Commissione Europea (Fleet et al., 2021), hanno permesso di valutare l'abbondanza delle categorie più rappresentate presenti nell'area di indagine. Una prima valutazione statistica dei risultati ottenuti è riportata in Figura 7.

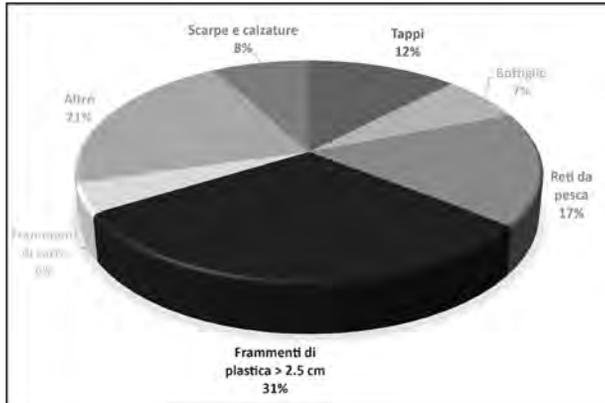


Figura 7. Abbondanze delle categorie di BL ottenute dal conteggio in situ all'interno dei tre box individuati nel settore di spiaggia analizzato.

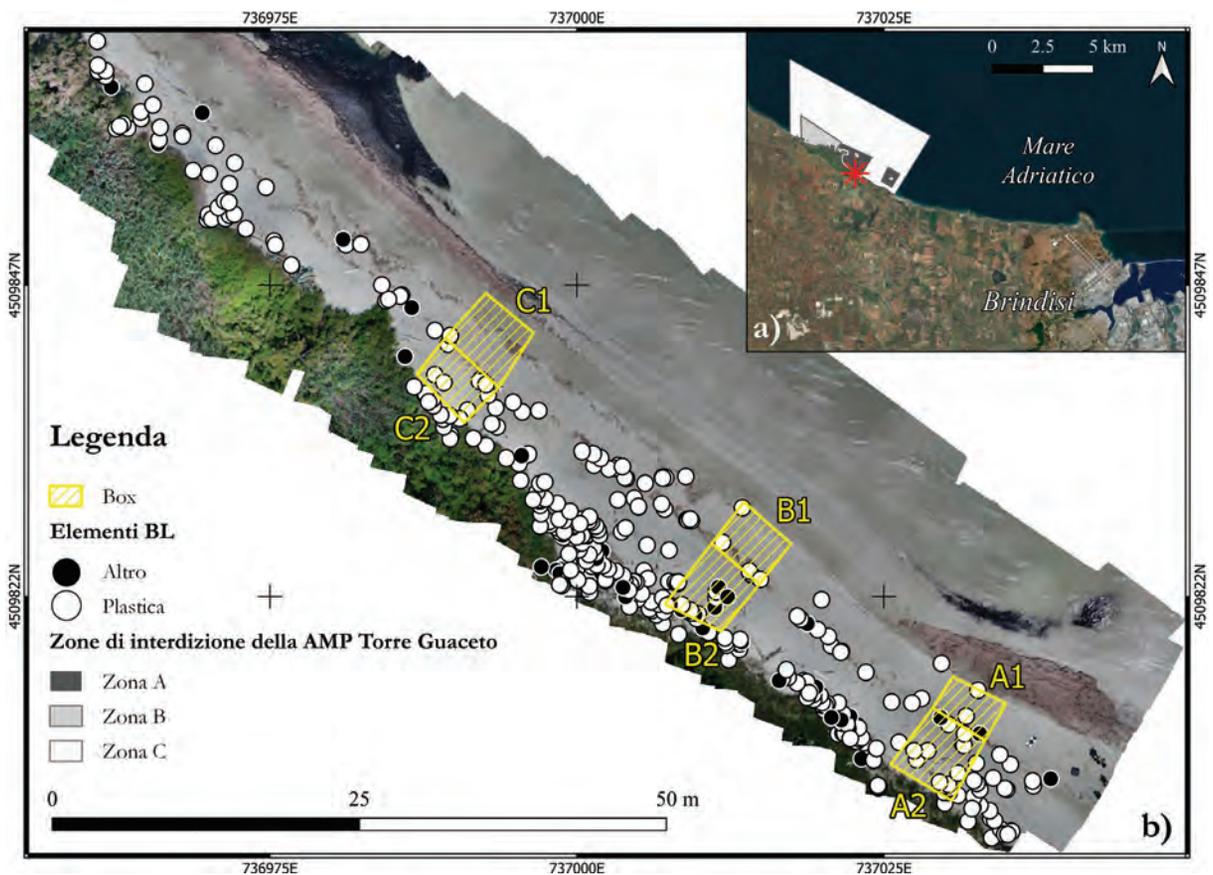


Figura 8. a) Ubicazione dell'area di studio all'interno dell'Are Marina Protetta di Torre Guaceto, indicata dalla stella rossa b) ortomosaico dell'area di studio derivante dal *post-processing* del rilievo aero-fotogrammetrico con gli elementi di BL identificati manualmente. Sono riportati anche i box entro i quali è stato effettuato sia il censimento *in situ* e sia l'analisi tramite *Machine Learning*.

Dai risultati si evince che la tipologia di elementi di BL più abbondanti sono i frammenti di polimeri artificiali (plastica e polistirolo) più grandi di 2,5 cm (J79-J80-J82-J124; 32%) seguiti dalle reti da pesca (J53-J54-J58; 21%) e dai tappi e anelli in plastica di bottiglie per bevande (J21-J23-J24; 14%). La densità calcolata considerando l'area totale coperta nei box entro i quali è stato effettuato il conteggio è di: 1,5 elementi/m² per il box A (A1+A2), 0,9 elementi /m² per il box B (B1+B2) e 0,47 elementi /m² per il box C (C1+C2) (Fig. 8). Tali risultati sono in accordo con i dati raccolti in precedenti lavori condotti lungo la stessa fascia costiera (Rizzo et al., 2021; Scarrica et al., 2022).

L'ortomosaico ottenuto come risultato dell'elaborazione delle immagini fotogrammetriche ha un valore di GSD (*Ground Sampling Distance*) pari a 2,1 mm/pixel; ad ogni pixel del raster è associato un valore RGB che va da 0 a 255 per ogni banda spettrale ed è stato esportato in formato *GeoTiff* per essere gestibile all'interno del *software* QGIS. Una volta importato all'interno del *software*, due operatori hanno condotto manualmente l'operazione di individuazione e marcatura degli oggetti di BL riconosciuti su un'area di 1300 m². La totalità degli elementi individuati e classificati è di 382, dei quali gli oggetti in plastica rappresentano circa l'88% (Fig. 8). Anche in questo caso, i risultati sono in accordo con i lavori precedentemente condotti nell'area, seppur su settori di spiaggia differenti (Rizzo et al., 2021; Scarrica et al., 2022).

Gli algoritmi di riconoscimento automatico sono stati testati utilizzando un *dataset* comune di immagini per la fase di addestramento e testati entrambi su medesime immagini di test per avere un confronto visivo immediato delle performance di riconoscimento e classificazione a parità di condizioni ambientali (stesso sfondo sabbioso e texture del sedimento) e di illuminazione. La Tabella 2 riporta i valori di accuratezza delle performance degli algoritmi utilizzati per il riconoscimento automatico, espressa col parametro mAP. La prestazione dell'algoritmo basato su Mask-RCNN (0.178) risulta essere due ordini di grandezza superiore rispetto a quella calcolata per SVM (0.005) per quanto riguarda la classificazione degli oggetti riconosciuti sull'immagine.

Tabella 2. Risultati in termini di accuratezza relativi alle prestazioni dei due algoritmi di *Machine Learning* a confronto.

Algoritmi utilizzati	N° Classi	mAP@IoU=0.1
Mask-RCNN	3	0.178
SVM	3	0.005

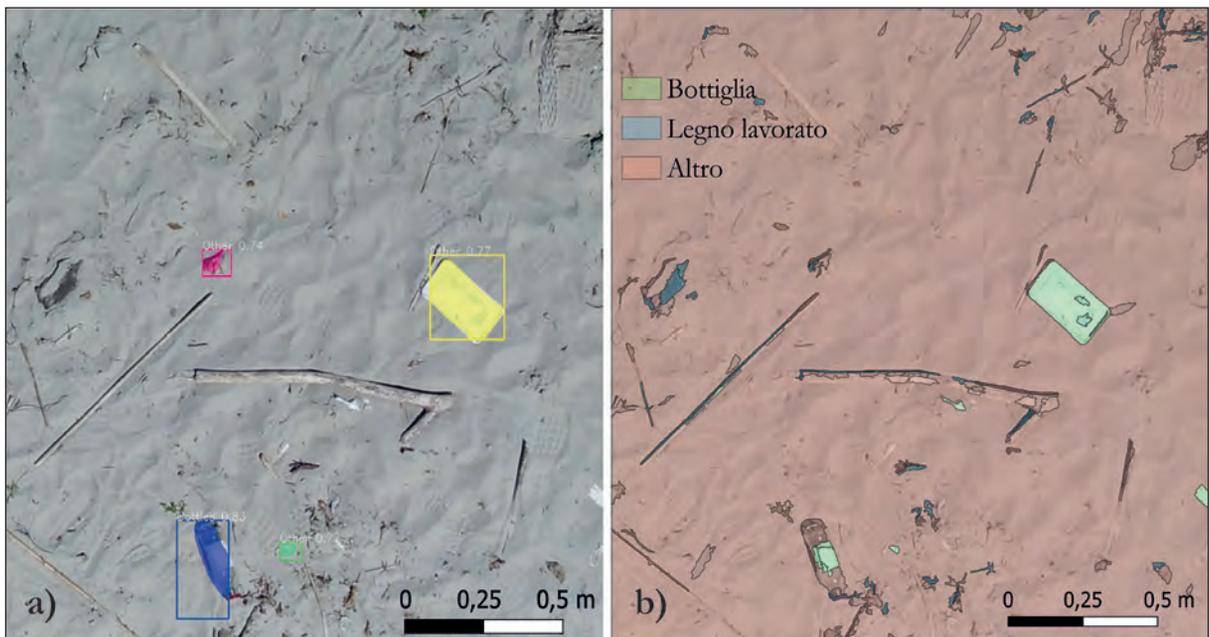


Figura 9. Esempio di segmentazione e classificazione su un ritaglio dell'ortomosaico di lato 1000x1000 pixel eseguito utilizzando a) algoritmo basato su Mask-RCNN e b) SVM.

Questo risultato ha avuto un riscontro visivo anche nelle immagini di output esportate, due delle quali sono riportate a confronto nella Figura 9. La Figura 9a mostra come l'algoritmo basato su Mask-RCNN genera singole maschere in corrispondenza degli oggetti identificati mentre *Meanshift* (Fig. 9b) tende a generare un numero elevato di poligoni frammentati in fase di segmentazione, andando a considerare anche il *background* (superficie sabbiosa) alla stregua di un oggetto (in questo caso specifico etichettato da SVM con l'etichetta "Other").

Il numero di immagini raccolto finora tramite l'app "nauticAttiva" ha permesso una prima stima della tipologia di ML presenti in ambiente marino ed, in particolare, nell'area oggetto di studio che va dalle coste pugliesi fino alla Sardegna meridionale, passando per lo Stretto di Messina (Fig. 3). In base alla qualità delle fotografie è stato assegnato un determinato peso espresso tramite tre gradi di affidabilità: alto (in cui i polimeri artificiali sono chiaramente osservabili), medio (in cui i polimeri artificiali possono essere confusi con altri detriti) e basso (in cui si osservano materiali di diversa origine poco riconoscibili). Le foto così raccolte sulla piattaforma iNaturalist hanno costituito un database dal quale è stato possibile identificare detriti di polimeri artificiali maggiori di 5 mm e classificarli secondo le categorie di rifiuti presenti all'interno delle guide ufficiali pubblicate dall'Unione Europea (Galgani et al. 2013; Fleet et al., 2021). Inoltre, le coordinate GNSS associate ad ogni foto hanno permesso di visualizzare, una volta importate le posizioni in un software GIS (*Geographic Information System*), la distribuzione del ML in differenti aree del Mediterraneo (Fig. 10). La descrizione dell'app "nauticAttiva" è stata pubblicata in un articolo in cui vengono riportati i risultati preliminari del monitoraggio (Scardino et al., 2022) e qui indicati in Figura 10 per quanto riguarda la costa adriatica pugliese. Dalla valutazione della densità di ML si evince un'abbondanza dei polimeri artificiali

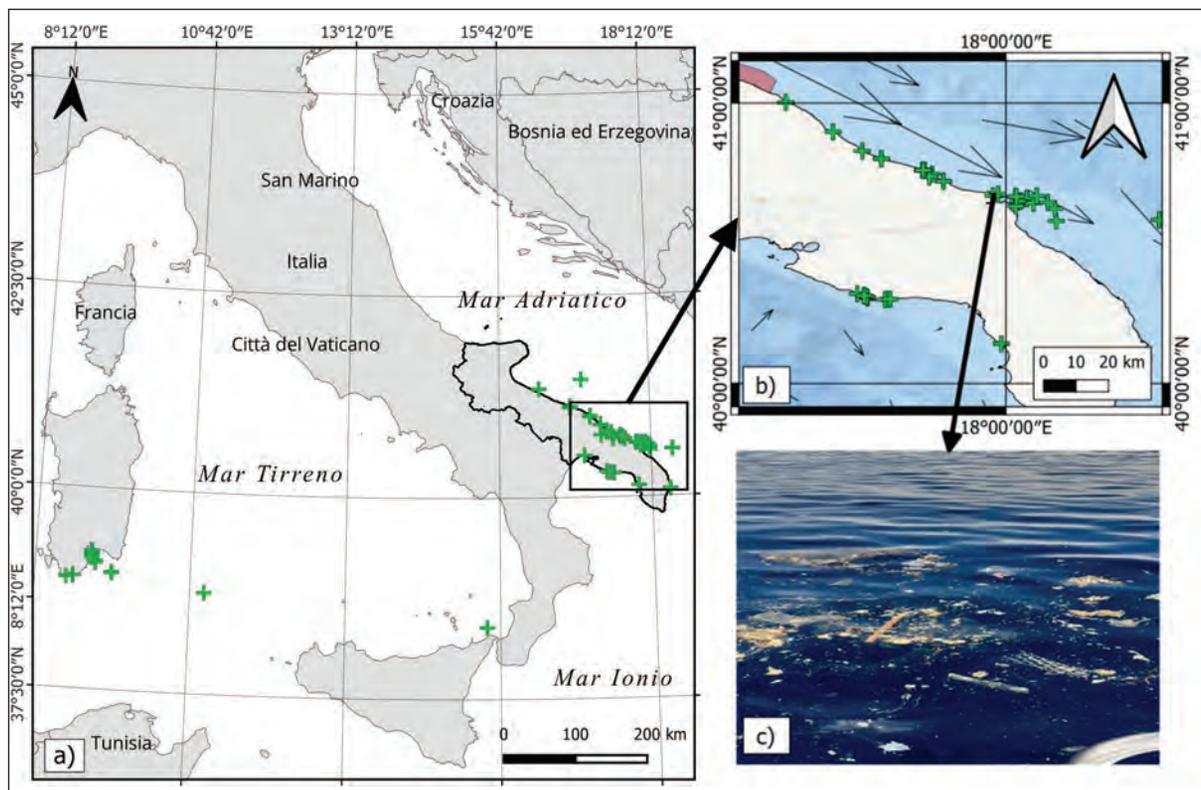


Figura 10. Prime stime di distribuzione di ML ottenute utilizzando all'app "nauticAttiva" all'interno del bacino del Mediterraneo. a) Aree interessate dal monitoraggio tramite l'app. Le croci verdi indicano i punti in cui sono state acquisite le fotografie; b) dettaglio del tratto di costa pugliese; c) esempio di rifiuti galleggianti fotografati tramite l'app "nauticAttiva" (modificata da Scardino et al., 2022).

come bottiglie, polistirolo e frammenti di reti. Lo studio riporta che l'84% della plastica identificata era materiale galleggiante e i polimeri artificiali più abbondanti identificati col progetto "nauticAttiva" sono associati ad attività ricreative collocate direttamente lungo la fascia costiera (tappi di bottiglie e bottiglie per

bevande). I secondi polimeri più abbondanti sono risultati essere reti, frammenti di reti e boe, elementi legati, quindi, ad attività che si svolgono direttamente in ambiente marino. Scardino et al., (2022) evidenziano, inoltre, come l'interazione fra questi oggetti e le correnti marine risulta essere articolata. Difatti, l'accumulo e la dimensione di tali rifiuti sono fortemente influenzati dalle correnti lungo costa (*longshore drift* e *crossshore current*), come riportano le osservazioni in Sardegna meridionale. Inoltre, considerando la natura semi-chiusa del bacino del Mediterraneo rispetto alla più estesa circolazione oceanica, la distribuzione del *ML* risente maggiormente delle correnti che agiscono su più livelli all'interno della colonna d'acqua (superficie, medie profondità e correnti di profondità) in quanto sono assenti *gyre* dal diametro dell'ordine dei chilometri che permettono la formazione di aree stabili. A complicare maggiormente il pattern di distribuzione vi sono le *contour current* e le correnti a gravità che favoriscono la deposizione del *ML* all'interno del sedimento che caratterizza il fondale marino.

Discussione e conclusioni

I risultati preliminari riportati in questo studio costituiscono un punto di riferimento sia per ulteriori sviluppi nello studio e nel monitoraggio costiero che per future pianificazioni di interventi per la gestione delle aree costiere regionali. In particolare, dai risultati mostrati si evince la necessità di un miglioramento della performance di riconoscimento automatico dell'algoritmo Mask-RCNN. Per quest'ultimo raggiungere valori più elevati di accuratezza potrebbe essere più facile dato che esso necessiterebbe sostanzialmente di un maggior numero di poligoni etichettati su immagini SAPR nella fase di addestramento. A tal proposito è in corso la messa a punto di un protocollo di volo da adottare nel caso in cui il rilievo aerofotogrammetrico sia finalizzato alla elaborazione delle immagini da parte di un algoritmo di *Machine Learning* per il riconoscimento automatico. In base a tale protocollo, un valore GSD almeno di 4 mm/px e mai superiore ad 1 cm/pixel risulterebbe adatto per una prestazione ottimale durante le fasi di addestramento e test di Mask-RCNN, oltre che a fornire informazioni circa le caratteristiche tecniche riguardo il settaggio del SAPR e l'ambiente tidale in cui ricade l'area da sorvolare. Per esempio, fra le caratteristiche tecniche indicate vi è un'altezza di volo del SAPR di massimo 20 m proprio per permettere il riconoscimento e l'etichettatura delle diverse categorie di oggetti BL presenti nelle ortofoto. Inoltre, la possibilità di ottenere dei risultati già georeferenziati permetterebbe di eseguire una prima valutazione della distribuzione degli elementi di BL lungo il profilo di spiaggia ed eventualmente mettere in evidenza punti di accumulo, senza necessariamente la messa in atto di campagne periodiche di valutazione sul campo. Ciò risulta molto utile per i vari interventi di manutenzione e monitoraggio, nonché nella pianificazione spaziale e temporale di interventi di gestione dell'area costiera. Al contrario, il metodo *Meanshift/SVM* si rivela essere troppo limitato dall'analisi statistica spettrale dei pixel. Infatti, questa tipologia di algoritmi associa pixel aventi valori delle bande spettrali (RGB) simili ed eventualmente le loro prestazioni potrebbero cambiare utilizzando immagini con più di tre bande spettrali, anche per controbilanciare la mancanza di informazioni data dalla forma dei poligoni di addestramento. Un altro limite di *Meanshift* emerso dall'analisi condotta è legato alle zone d'ombra delle immagini, in particolare alle ombre proiettate dagli oggetti e prodotte dall'inclinazione della luce solare. Questo ha pesanti conseguenze nel processo di segmentazione, soprattutto per quanto riguarda la sovrastima degli oggetti identificati, perché il poligono risultante viene delineato considerando anche l'ombra dell'oggetto o, in certi casi, l'ombra viene vista dall'algoritmo come un elemento a sé stante. Inoltre, una ulteriore prossima implementazione delle funzionalità del Mask-RCNN, sarà volta ad ottenere anche la posizione georeferenziata degli oggetti riconosciuti e classificati in ogni immagine di input. Tale implementazione permetterà l'esportazione di file .txt per ogni immagine analizzata contenenti informazioni circa la classe di appartenenza dell'oggetto identificato e le sue coordinate XY secondo il sistema di riferimento dell'immagine di input. La conoscenza della posizione degli elementi BL all'interno dell'area studio porterà ad una prima stima della loro distribuzione lungo il profilo di spiaggia ed alla individuazione di eventuali punti di accumulo. Queste fasi preliminari risultano essere cruciali per l'efficienza degli interventi di gestione messi in atto al fine di rimuovere i rifiuti dalla zona interessata e all'individuazione di aree che possono essere considerate come "sorgenti" di *litter*. Infine, l'approccio multidisciplinare presentato in questo lavoro propone di rendere più efficienti le procedure di analisi del BL in ambiente costiero.

L'app "nauticAttiva" si è rivelata essere uno strumento alla portata di tutti per il monitoraggio dell'ambiente marino includendo anche le componenti biologiche che ne fanno parte. Infatti, l'app può essere sfruttata per

il monitoraggio di organismi marini, quali cetacei e tartarughe marine che molto spesso subiscono in maniera diretta gli effetti negativi della presenza di elementi inquinanti. Il database generato dall'utilizzo dell'app "nauticAttiva" risulta essere adatto per l'identificazione e la classificazione del ML e BL avente dimensioni (lato lungo) maggiori di 5 mm (meso, macro e mega *litter*; Tab. 1). Per un riconoscimento ottimale degli oggetti fotografati si suggerisce di acquisire le immagini ad una distanza massima di 5 m. I limiti di questo primo approccio di *citizen science* emersi dallo studio (Scardino et al., 2022) sono l'affidabilità del dataset la quale risulta strettamente connessa alla qualità delle fotografie scattate, le tempistiche legate all'operazione di selezione delle stesse e valutazione della densità del ML e, infine, l'errore legato alla posizione fornita dal ricevitore GNSS integrato del dispositivo.

Le informazioni apportate da questo studio possono essere utilizzate per identificare strategie di gestione pianificate su misura per le aree analizzate al fine di eliminare, o almeno ridurre, i rifiuti dalla loro fonte. Per quanto riguarda la fascia costiera, le azioni di gestione devono concentrarsi sul controllo della produzione di rifiuti in corrispondenza della stessa e sulla riduzione della generazione di rifiuti derivanti da attività antropiche concentrate nelle vicinanze della zona costiera. Inoltre, le operazioni di pulizia locale dovrebbero essere effettuate dopo eventi meteo-marini intensi che amplificano l'apporto di rifiuti, come nel caso di mareggiate, piogge estreme e inondazioni fluviali. Invece, focalizzandosi sull'ambiente marino, l'app "nauticAttiva" costituisce uno strumento altamente versatile ed efficiente per migliorare la conoscenza della distribuzione del ML.

Ringraziamenti

Le attività di ricerca sono finanziate da Regione Puglia, nell'ambito del programma RiPARTI (assegni di Ricerca per riPARTire con le Imprese) POC PUGLIA FESRT-FSE 2014/2020 - "*Marine & Beach litter monitoring in Apulia*"), responsabile scientifico: dott.ssa Angela Rizzo. Le attività ad esso associate sono state condotte nell'ambito dell'Accordo di Ricerca tra il Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ed il Dipartimento di Scienze e Tecnologie dell'Università di Napoli Parthenope. Le attività di campo sono finanziate anche dalla Convenzione di Ricerca stipulata tra il Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro e l'Area Marina Protetta di Torre Guaceto, responsabile scientifico: prof. G. Scicchitano. Inoltre, le attività di ricerca rientrano tra le attività del progetto "RETURN" finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4, Componente 2, Investimento 1.3-D.D. 1243 2/8/2022-Unione Europea NextGenerationEU (n. PE00000005, CUP: B53C22004020002). Gli autori ringraziano, inoltre, l'Environmental Surveys s.r.l, partner industriale del progetto RiPARTI, per la strumentazione e il supporto tecnico; lo staff del Consorzio di Gestione di Torre Guaceto e del centro Velico Torre Guaceto per il supporto logistico fornito durante le attività di campo; i prof. Luca Dimuccio, Rui Ferreira e Giorgio Anfuso per l'esecuzione dei rilievi aero-fotogrammetrici nei siti del Portogallo e della Spagna. Infine, le attività inerenti al progetto "nauticAttiva" sono condotte nell'ambito dell'Accordo tra l'Università di Bari Aldo Moro e la Lega Navale Italiana.

Bibliografia

- Addamo A. M., Laroche P., Hanke G., 2017. *Top Marine Beach Litter Items in Europe. A review and synthesis based on beach litter data*. Joint Research Centre, Technical Report. MSFD Technical Group on Marine Litter. doi:10.2760/496717.
- Andriolo U., Gonçalves G., 2022. *Is coastal erosion a source of marine litter pollution? Evidence of coastal dunes being a reservoir of plastics*. Marine Pollution Bulletin, 174: 113307.
- Andriolo U., Gonçalves G., Bessa F., Sobral P., 2020. *Mapping marine litter on coastal dunes with unmanned aerial systems: A showcase on the Atlantic Coast*. Science of the Total Environment, 736: 139632.
- Asensio-Montesinos F., Anfuso G., Oliva Ramirez M., Smolka R., Garcia Sanabria J., Fernandez Enrriquez A., Arenas P., Macias Bedoya A., 1999. *Beach litter composition and distribution on the Atlantic coast of Cadiz (SW Spain)*. Regional Studies in Marine Science, 34: 101050.
- Bak S.H., Hwang D.H., Kim H.M., Yoon H.L., 2019. *Detection and monitoring of beach litter using uav image and deep neural network*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42: 55-58.

- Bao Z., Sha J., Li X., Hanchiso T., Shifaw E., 2018. *Monitoring of beach litter by automatic interpretation of unmanned aerial vehicle images using the segmentation threshold method*. Marine Pollution Bulletin, 137: 388-398.
- Campanale C., Stock F., Massarelli C., Kochleus C., Bagnuolo G., Reifferscheid G., Uricchio V.F., 2020. *Microplastics and their possible sources: the example of ofanto river in Southeast Italy*. Environmental Pollution, 258: 113284.
- Cesarano C., Aulicino G., Cerrano C., Ponti M., Puce S., 2021. *Scientific knowledge on marine beach litter: a bibliometric analysis*. Marine Pollution Bulletin 173, 113102.
- Cheng Y., 1995. *Mean shift, mode seeking, and clustering*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 17(8): pp.790–799.
- Cortes C., Vapnik V., 1995. *Support-vector networks*. Machine learning, 20: 273–297
- European Union, 2013. *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas*. EU. Ispra.
- Everingham M., Van Gool L., Williams C. K., Winn J., Zisserman A., 2010. *The pascal visual object classes (voc) challenge*. International journal of computer vision, 88: 303–338
- Fleet D., Vlachogianni T., & Hanke G., 2021. *A joint list of litter categories for marine macrolitter monitoring*. EUR, 30348: 52. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-21445-8, doi:10.2760/127473.
- Galgani F., Hanke G., Werner S., Oosterbaan L., Nilsson P., Fleet D., Kinsey S., Van Franeker J., Vlachogianni T., Scoullou M., Mira Veiga J., Palatinus A., Matiddi M., Maes T., Korpinen S., Budziak A., Leslie H., Gago J., Liebezeit G., 2013. *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas*. European Commission, Joint Research Centre. In: MSFD Technical Subgroup on Marine Litter (TSG-ML). EUR 26113.
- GESAMP, 2019. *Guidelines on the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean*. In: Kershaw, P.J., Turra, A., Galgani, F. (Eds.), (IMO/ FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/ UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP, 99: 10.
- Gonçalves G., Andriolo U., Gonçalves L., Sobral P., Bessa F., 2020. *Quantifying marine macro litter abundance on a sandy beach using unmanned aerial systems and objectoriented machine learning methods*. Remote Sensing, 12 (16): 2599.
- Gonçalves G., Andriolo U., Gonçalves L.M.S., Sobral P., Bessa F., 2022. *Beach litter survey by drones: Mini-review and discussion of a potential standardization*. Environmental Pollution, 315: 120370.
- Guerranti C., Perra G., Martellini T., Giari L., Cincinelli A., 2020. *Knowledge about microplastic in Mediterranean Tributary River ecosystems: lack of data and research needs on such a crucial marine pollution source*. Journal of Marine Science and Engineering, 8: 216.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., 2009. *The Elements of Statistical Learning – Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd Ed. Springer, 423-438, 463-470, 587-601.
- He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R., 2017. *Mask R-CNN*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 42 (2): 386–397.
- Khan F.R., Shashoua Y., Crawford A., Drury A., Sheppard K., Stewart K., Sculthorp T., 2020. *The plastic Nile[®]: first evidence of microplastic contamination in fish from the Nile River (Cairo, Egypt)*. Toxics, 8 (2): 22.
- Mastronuzzi G., 2023. *iNaturalist-NauticaAttiva. La citizen science al servizio dello studio della distribuzione delle plastiche nell'ambiente marino e costiero*. Lega Navale-Periodico della Lega Navale Italiana dal 1897, maggio-giugno 2023: 22-23.
- Mastronuzzi G., Caputo R., Di Bucci D., Fracassi U., Iurilli V., Milella M., Sanso P. S. G., 2011. *Middle-late pleistocene evolution of the adriatic coastline of Southern Apulia (Italy) in: response to relative sea-level changes*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 1: 207–221.
- Mastronuzzi G., Milella M., Piscitell P., Simone O., Quarta G., Scarano T., Calcagnile L., Spada I., 2018. *Landscape analysis in torre guaceto area (Brindisi) aimed at the reconstruction of the late Holocene Sea level curve*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 41: 65–79.
- Mastronuzzi G., Valletta S., Damiani A., Fiore A., Francescangeli R., Giandonato P. B., Iurilli V., Sabato L., 2013. *Geositi della Puglia*. ISBN 9788890671685.
- Natura 2000 Networking Programme. www.natura.org.

- OSPAR, 2010. *Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area*. Edition 1.0: 1–16.
- Piazzolla D., Cafaro V., de Lucia G., Mancini E., Scanu S., Bonamano S., Piermattei V., Vianello A., Ventura G., Marcelli M., 2020. *Microplastic pollution in coastal sediments of the northern Tyrrhenian Sea, Italy: microplastics and fly-ash occurrence and distribution*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 241: 106819.
- Rangel-Buitrago N., Velez Mendoza A., Gracia C. A., Mantilla-Barbosa E., Arana V. A., Trilleras J., Arroyo-Olarte H., 2019. *Litter impacts on cleanliness and environmental status of Atlantico department beaches, Colombian Caribbean coast*. *Ocean and Coastal Management*, 104835.
- Rizzo A., Rangel-Buitrago N., Impedovo A., Mastronuzzi G., Scardino G., Scicchitano G., 2021. *A rapid assessment of litter magnitudes and impacts along the Torre Guaceto marine protected area (Brindisi, Italy)*. *Marine Pollution Bulletin*, 173: 112987.
- Scardino G., Martella R., Mastronuzzi G., Rizzo A., Borracesi Q., Musolino F., Romanelli N., Zarccone S., Cipriano G., Retucci A., 2022. *The nauticAttiva project: A mobile phone-based tool for the citizen science plastic monitoring in the marine and coastal environment*. *Marine Pollution Bulletin*, 185(2): 114282.
- Scarrica V. M., Aucelli P. P. C., Cagnazzo C., Casolaro A., Fiore P., La Salandra M., Rizzo A., Scardino G., Scicchitano G., Staiano A., 2022. *A novel beach litter analysis system based on UAV images and Convolutional Neural Networks*. *Ecological Informatics*, 72: 101875.
- Ulmann S., 1976. *The interpretation of structure from motion*. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, A- I. MEMO, 476.
- United Nations Environment Programme - UNEP, 2021. *From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>.
- Vlachogianni T., 2017. *Methodology for monitoring marine litter on beaches*. In: *Macro-Debris (>2.5cm)*. *DeFishGear*: 1–16.

Ricevuto il 26/10/2023, accettato il 13/02/2024