

## MAPPATURA MULTITEMPORALE DELLE FANEROGAME MARINE E MONITORAGGIO DELLE PRATERIE E DELLE BANQUETTES DI POSIDONIA PER LA CONSERVAZIONE DEL BLUE CARBON: IL PROGETTO *POSEIDON*

Giulia Ceccherelli<sup>1</sup>, Edward Borgogno<sup>2</sup>, Filiberto Chiabrando<sup>2</sup>, Erica Forti<sup>3</sup>, Francesca Gallitto<sup>3</sup>, Nives Grasso<sup>3</sup>, Andrea Maria Lingua<sup>3</sup>, Valeria Longhi<sup>4</sup>, Stefania Manca<sup>3</sup>, Paolo Maschio<sup>3</sup>, Francesca Matrone<sup>3</sup>, Fabio Menna<sup>1</sup>, Erica Nocerino<sup>5</sup>, Sabrina Rossi<sup>3</sup>, Massimiliano Scalici<sup>6</sup>, Silvia Secco<sup>6</sup>, Beatrice Tanduo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Chimica e Farmacia, Università di Sassari – ([cecche\\_fmenna@uniss.it](mailto:cecche_fmenna@uniss.it))

<sup>2</sup>DAD, Politecnico di Torino - ([edward.borgogno](mailto:edward.borgogno@polito.it), [filiberto.chiabrando](mailto:filiberto.chiabrando@polito.it), [beatrice.tanduo](mailto:beatrice.tanduo@polito.it))

<sup>3</sup>DIATI, Politecnico di Torino - ([erica.forti](mailto:erica.forti@polito.it), [francesca.gallitto](mailto:francesca.gallitto@polito.it), [nives.grasso](mailto:nives.grasso@polito.it), [andrea.lingua](mailto:andrea.lingua@polito.it), [stefania.manca](mailto:stefania.manca@polito.it), [paolo.maschio](mailto:paolo.maschio@polito.it), [francesca.matrone](mailto:francesca.matrone@polito.it), [sabrina.rossi](mailto:sabrina.rossi@polito.it))

<sup>4</sup>DIST, Politecnico di Torino – ([valeria.longhi@polito.it](mailto:valeria.longhi@polito.it))

<sup>5</sup>Dipartimento di Scienze Umanistiche e Sociali, Università di Sassari - ([enocerino@uniss.it](mailto:enocerino@uniss.it))

<sup>6</sup>Dipartimento di Scienze, Università degli Studi Roma Tre - ([massimiliano.scalici](mailto:massimiliano.scalici@uniroma3.it), [silvia.secco](mailto:silvia.secco@uniroma3.it))

C'è una crescente preoccupazione per la conservazione degli ecosistemi sub-tidali, minacciati dai cambiamenti climatici, eventi estremi e disturbi antropogenici. Le praterie di Posidonia oceanica (PO), specie endemica del Mediterraneo, svolgono un ruolo cruciale nella protezione costiera e nella stabilizzazione dei fondali. Queste praterie sono un indicatore chiave per il monitoraggio ambientale e per studi sui cambiamenti climatici. Il progetto POSEIDON, finanziato dal PNRR (Piano Nazionale di Recupero e Resilienza), mira a sviluppare nuove tecnologie di mappatura e monitoraggio ad altissima risoluzione per la conservazione della PO e delle sue praterie. Tecniche avanzate come ecoscandagli multi-raggio, sonar, droni e sensori satellitari multi/iperspettrali (ad esempio Sentinel-2 MSI) sono attualmente utilizzate per monitorare lo stato di salute delle praterie. Recenti applicazioni includono la fotogrammetria e l'uso di veicoli subacquei autonomi (AUV) per creare modelli 3D ad altissima risoluzione. L'imaging iperspettrale è stato impiegato per la classificazione degli habitat, ma resta da esplorare la correlazione con altri indicatori ecologici. Questi sistemi hanno permesso di mappare la distribuzione delle praterie di PO in Europa, ma manca ancora un'integrazione con le analisi degli altri elementi degli habitat mediterranei. Il progetto POSEIDON si propone di integrare l'analisi della PO con quelle delle banquettes, degli invertebrati superficiali e della fauna ittica per ottenere un quadro più completo, sviluppando nuove tecniche di campionamento e monitoraggio.

### Introduzione

L'oceano copre circa il 70% della superficie terrestre, ma solo il 29,4% dei fondali marini è stato mappato fino al 2023 [1]. La mappatura della Posidonia oceanica (PO) è

cruciale per comprendere gli habitat marini e gli effetti del cambiamento climatico. La PO è una fanerogama marina a crescita lenta endemica del Mediterraneo, che offre benefici ecologici, come il sequestro del carbonio e la prevenzione dell'erosione. Questa fanerogama è fondamentale durante tutto il suo ciclo vitale, infatti, quando le foglie sono morte, formano delle banquettes sulle spiagge, proteggendole dall'erosione e supportando la biodiversità. L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha sviluppato una metodologia per monitorare la salute della PO in Italia, ma manca una normativa per le banquettes. La metodologia dell'ISPRA, per monitorare la PO, prevede la raccolta di fasci dalla prateria e la stima visiva dei parametri. Tuttavia, queste pratiche possono essere dannose e imprecise. Il progetto POSEIDON mira a migliorare il monitoraggio utilizzando dati ad altissima risoluzione (UHR) e oltre (BUHR), permettendo stime più accurate e dettagliate dei parametri ecologici.

### **Obiettivi e Azioni**

Il progetto POSEIDON, finanziato dal PNRR, si propone di sviluppare strumenti e metodologie innovative per la conservazione e il monitoraggio degli ecosistemi marini, in particolare delle praterie di Posidonia oceanica (PO), specie endemica del Mediterraneo e habitat protetto ai sensi della Direttiva Habitat (92/43/CEE). Il progetto si articola in quattro obiettivi principali: rafforzare l'attuazione delle direttive europee in materia ambientale, migliorare l'efficacia del monitoraggio degli ecosistemi marini, sviluppare buone pratiche riproducibili e sensibilizzare il pubblico sull'importanza degli habitat marini. Per raggiungere questi obiettivi, POSEIDON mira a implementare nuove tecnologie di mappatura ad altissima risoluzione (UHR), integrando sensori multispettrali e iperspettrali, piattaforme autonome come droni e veicoli subacquei (AUV), e algoritmi di apprendimento automatico. Questo approccio consentirà di monitorare con precisione lo stato di salute delle praterie di PO, identificando indicatori chiave a livello individuale, di popolazione e di comunità, e facilitando la pianificazione costiera e la valutazione ambientale. L'utilizzo di sensori avanzati permetterà inoltre di acquisire dati dettagliati in tempo reale su profondità significative, supportando la gestione sostenibile degli habitat marini.

Un aspetto centrale del progetto è lo sviluppo di una solida infrastruttura di dati spaziali (SDI), che raccoglierà e analizzerà le informazioni provenienti dalle attività di monitoraggio, promuovendo la collaborazione e la condivisione di dati tra ricercatori, responsabili politici e utenti del mare. Attraverso strumenti come un sistema webGIS [2] e la POSEIDON Web App, il progetto garantirà un accesso facilitato ai dati, promuovendo la sensibilizzazione e l'educazione del pubblico, incluse scuole, comunità locali e turisti.

POSEIDON, infine, si impegna a creare un modello ecologico concettuale (CEM) per comprendere meglio le dinamiche degli ecosistemi di PO e fornire indicazioni per strategie di conservazione e gestione efficaci.

### **Stato dell'arte**

La Posidonia Oceanica (PO) è considerata un indicatore biologico della qualità delle acque secondo la Water Framework Directive dell'Unione Europea (WFD, 2000/60/CE), essendo utilizzata per valutare lo stato ecologico dei corpi idrici costieri

[3]. Nonostante i suoi numerosi benefici per gli ecosistemi, la PO è a rischio e in declino [4], spingendo a intensificare gli sforzi di ripristino negli ultimi decenni per preservare i servizi ecosistemici associati.

Negli ultimi decenni, diverse tecniche hanno supportato la mappatura delle fanerogame [5], come ecoscandaglio, sonar a scansione laterale, laser e sensori multispettrali. I sensori satellitari multispettrali, come Sentinel-2 e PRISMA, hanno monitorato con successo lo stress della Posidonia oceanica grazie a immagini ad alta risoluzione [6]. Recentemente, la fotogrammetria subacquea è sempre più utilizzata per monitorare la PO e valutare i progetti di restauro, offrendo misurazioni più precise rispetto ad altre tecniche. Questo approccio integra il posizionamento GNSS-RTK, misure di profondità e veicoli subacquei autonomi (AUV) per creare mappe ad alta risoluzione e modelli 3D. L'imaging iperspettrale è stato impiegato per la mappatura degli habitat [7], ma la correlazione con altri indicatori e l'uso di tecniche di apprendimento automatico [8] sono ancora in fase iniziale nel contesto subacqueo.

L'analisi delle immagini basata sugli oggetti (OBIA) è utilizzata per contare i frammenti di Posidonia oceanica (PO) trapiantati e stimare la copertura del fondale. Le mappe digitali ottenute permettono di analizzare l'altezza media dei frammenti e la variazione della rugosità del fondale. [9] ha discusso l'uso di ortomosaici fotogrammetrici subacquei, dati batimetrici acustici e immagini satellitari multispettrali per mappare le praterie di PO in Europa [4]. Tuttavia, manca ancora l'integrazione con le banquettes e l'analisi degli invertebrati e dell'ittiofauna di profondità. È necessario sviluppare nuove tecniche di campionamento e monitoraggio per migliorare i metodi tradizionali.

### **Aree di studio**

La ricerca sarà condotta in diverse aree marine protette (AMP) della Sardegna, un'isola italiana nel Mar Mediterraneo. In particolare, POSEIDON si concentra su:

- l'AMP Capo Testa Punta Falcone, che comprende circa 5.000 ettari di mare aperto, situato all'estremo nord della Sardegna;
- l'AMP Capo Carbonara che comprende circa 14.360 ettari, nella parte sud-orientale della Sardegna;
- l'AMP Tavolara e Punta Coda Cavallo, nel nord-est della Sardegna;
- l'area portuale di Porto Torres;
- la penisola di Culuccia, a circa 12 km dall'AMP Capo Testa Punta Falcone.

In particolare, si segnala che sia l'area di studio di Porto Torres che l'AMP Capo Carbonara presentano alcune aree di reimpianto di PO, fondamentali per gli obiettivi del progetto. Infine, la penisola di Culuccia è stata scelta come banco di prova.

### **Metodologia**

Il flusso di lavoro di POSEIDON segue diverse fasi. La mappatura delle PO sarà effettuata a diverse scale, dall'analisi satellitare a BUHR, tenendo conto anche dello stato di salute della PO: degradato, morto o ripristinato.

**Scala satellitare:** Alla scala satellitare, l'obiettivo, attraverso l'analisi multi-temporale della PO, è quello di valutare la sua tendenza a causa del cambiamento del clima.

In particolare, la finestra temporale analizzata parte dal 2000 ad oggi (2024). Per ogni anno viene analizzata una sola acquisizione, questo perché la crescita della pianta

risulta essere molto lenta [10], mentre il periodo scelto è quello estivo, essendo il momento in cui le foglie sono più lunghe [11]. I satelliti utilizzati sono Landsat 5, Landsat 8, Sentinel-2 e PRISMA, a cui viene applicata la correzione del colore dell'acqua (WCC) secondo il metodo di Lyzenga [12], che corregge gli effetti della colonna d'acqua calcolando un indice invariante di profondità (DII) basato sul rapporto tra due bande spettrali, con coefficienti di attenuazione simili. Di conseguenza, l'indice invariante di profondità (DII) viene calcolato come segue (1):

$$DII = \ln(R_i) - k_i/k_j \ln(R_j) \quad (1)$$

Dove  $R_i$  and  $R_j$  rappresentano la riflettanza delle bande  $i$  e  $j$  e il rapporto  $k_i/k_j$  rappresentano i coefficienti di attenuazione tra le due bande.

**Risoluzione ultra-alta (UHR):** Diversi strumenti sono utilizzati per la scala UHR (Tab. 1). I droni, come il DJI Mavic 3M e il Matrice 300 RTK UAV, mappano le banquettes, che proteggono le spiagge dall'erosione e ospitano comunità ricche di specie endemiche. Il progetto POSEIDON utilizza tecniche fotogrammetriche per stimare il volume e lo stato di salute delle banquettes, in continua evoluzione, combinando dati su moto ondoso, temperatura e macroinvertebrati presenti sulle banquettes.

Per la mappatura UHR delle praterie di PO, si utilizzano il BlueROV2 della BlueRobotics, con una telecamera RGB per mappare aree profonde fino a 100 metri, e l'USV (Manufacturer di MSHeli Srl) con ecoscandaglio multibeam WASSP S3 con risoluzione di 2 cm, capace di tracciare il fondale marino fino a 350 metri di profondità e georeferenziata da un doppio sistema GNSS-RTK.

**Tab. 1.** Elenco degli strumenti utilizzati per la scala UHR.

	Nome e specifiche
	<b>DJI Mavic 3M</b> RGB 20 Mpix, Multispec 5 MPix, Bands: Verde (G): $560 \pm 16$ nm; Rosso (R): $650 \pm 16$ nm; Red Edge (RE): $730 \pm 16$ nm; Near-InfraRed (NIR): $860 \text{ nm} \pm 26$ nm. Weight 951g. <b>Maximum detectable depth &lt; 5 m</b>
	<b>Uncrewed Surface Vessel (USV) POLITO design</b> MSHeli Srl. Solid print. GNSS RTK. Multibeam WASSP S3. Transceiver type IP66 DRX-32 Coverage $120^\circ$ with 224 beams. Weight 40 kg. <b>Maximum detectable depth 350 m</b>
	<b>BlueROV2 from BlueRobotics</b> Underwater GPS G2, Waterlinked. Weight 11 kg. <b>Maximum detectable depth 100 m</b>

**Oltre l'altissima risoluzione (BUHR):** con la BUHR l'obiettivo è quello di raggiungere la scala sub- centimetrica. Tutti gli strumenti in queste fasi sono utilizzati da subacquei

qualificati, che conducono le telecamere a una distanza dell'ordine delle decine di centimetri dalla PO (Tab. 2).

Il primo strumento coinvolto a questa scala è la Rikola Hyperspectral Imager, con il quale mappiamo per la prima volta la PO a livello iperspettrale. Attraverso questo strumento, l'obiettivo è quello di supportare e affinare le fasi di monitoraggio di ISPRA. La camera è dotata di uno scafandro e due lampade alogene per poter illuminare l'intero spettro, progettati ad hoc. L'altro strumento è un sistema per stereofotogrammetria costituito da un telaio tubolare con due maniglie su cui sono fissate due Sony ILX-LR1 con una risoluzione di 61 MP, e due luci led. Il terzo strumento è una camera subacquea, l'Olympus TG-6 da 12 Mpixel.

**Tab. 2.** Elenco degli strumenti utilizzati per la scala BUHR.

	Nome e specifiche
	<b>Rikola Hyperspectral Imager by Senop</b> Spectral range 500-900 nm. Spectral resolution 1 nm. Pixel size 5.5x5.5 $\mu\text{m}$ , 1010x1010 pixels. 720 g
	<b>Sony ILX-LR1</b> Sensor CMOS Exmor R Full Frame, 61 Mpix. 243 g
	<b>Olympus TG-6</b> Compact, Autofocus with contrast detection, x4 optical zoom, focal length 4.5-18.0 mm, 4000x3000 pixels

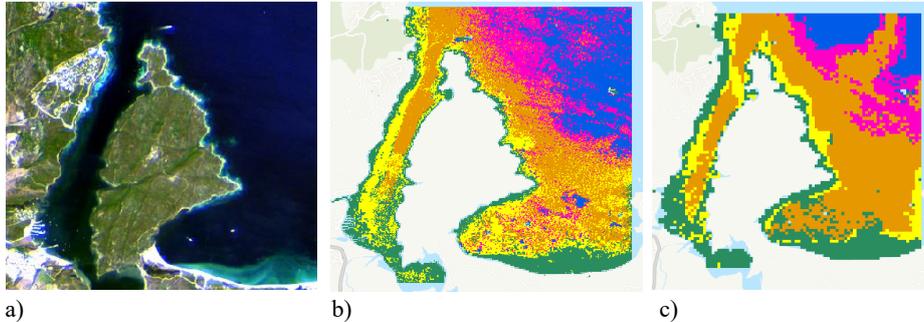
Un'ulteriore applicazione dello studio a scala BUHR è quella di assistere la fase di monitoraggio della fauna. Attualmente, la misurazione viene effettuata da un sommozzatore, che conta visivamente i pesci all'interno di un'area nota, chiamata transetto, con misure di 50m×4m. Con l'aiuto delle misurazioni su scala BUHR, questo conteggio può essere automatizzato attraverso l'intelligenza artificiale.

#### **Risultati preliminari – scala satellitare**

È stato effettuato un primo test nell'AMP Capo Carbonara relativo alla scala satellitare e alla mappatura automatica PO. Sono state utilizzate le bande RGB di Sentinel-2 acquisite il 24-12-2023 ed è stato applicato il metodo di Lyzenga [12], scegliendo come bande il Blu e il Verde. I primi risultati evidenziano che la PO sul fondale è visibile, soprattutto il limite superiore, mentre quello inferiore rimane indefinito.

Un secondo test è stato condotto sull'Isola di Culuccia, utilizzando dati batimetrici del 2015 e un'immagine di Sentinel-2 del 12 settembre 2015. Dopo il pre-processamento con la piattaforma SNAP, che include il ricampionamento e la correzione dell'abbagliamento solare (sun glint), si è applicato il metodo di Lyzenga per correggere l'influenza della profondità variabile sul fondale marino. Le aree di terra sono state mascherate, ottimizzando così le prestazioni del classificatore. L'analisi ha coinvolto due classificatori di apprendimento automatico: SVM (Support Vector Machine) e RT (Random Trees), utilizzando come classi di riferimento: Posidonia degradata, Posidonia su matte-sabbia, Posidonia su roccia, Mare Profondo, Mare Poco profondo. È stato impiegato sia

un approccio ibrido (segmentazione e classificazione pixel-based) sia il singolo approccio pixel-based, con risultati migliori per l'approccio ibrido.



**Fig. 1.** a) Isola di Culuccia (Sentinel-2, 2015), b) RT classificazione (pixel based), c) RT classificazione (approccio ibrido).

I valori di Kappa indicano che l'approccio ibrido ha ottenuto una migliore accuratezza (0.95 per RT e 0.90 per SVM) rispetto al pixel-based (0.65 per RT e 0.58 per SVM), con RT leggermente superiore a SVM (Fig.1).

Inoltre, sono state testate diverse architetture di deep learning (UNet, DeepVLab,...). L'ottimizzazione del learning rate ha migliorato la stabilità del modello, ma i risultati ottenuti non soddisfano ancora pienamente gli obiettivi, con difficoltà nel riconoscere tutte le classi. Le tecniche di data augmentation e l'utilizzo di ottimizzatori adattivi, come Adam, hanno aiutato, ma i modelli non hanno ancora raggiunto gli obiettivi desiderati, mostrando difficoltà nel riconoscere tutte le classi. Il prossimo passo sarà includere nel dataset nuovi indici mirati a rilevare la presenza di piante sottomarine e integrare i dati provenienti dalle prossime campagne di rilievo, come immagini subacquee della bicamera, dati da drone e dati batimetrici.

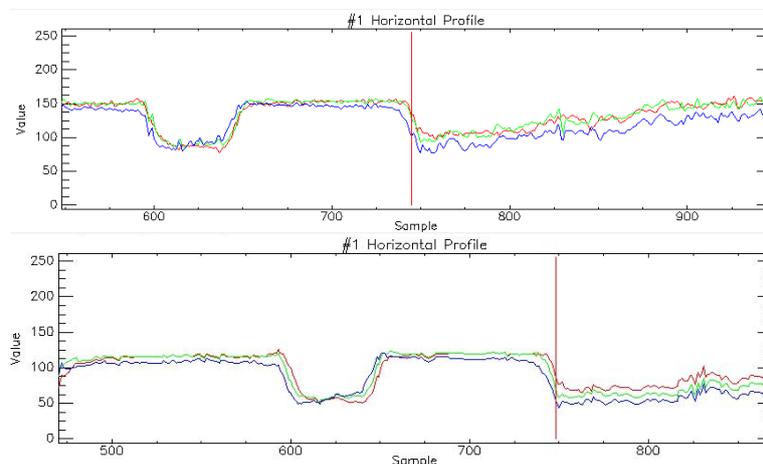
### Risultati preliminari – scala BUHR

A giugno scorso, durante la prima campagna di raccolta dati a Culuccia, sono stati raccolti dati di fotogrammetria aerea tramite drone e testati strumenti subacquei. I dati sono ancora in fase di elaborazione. In questo paragrafo sono mostrati i primi risultati ottenuti con la fotocamera Olympus TG-6 utilizzata al largo della costa ovest di Culuccia, a circa 10 metri di profondità. Per elaborare il dataset, sono stati utilizzati due approcci: calibrazione diretta sulle immagini originali e calibrazione separata per ciascun canale RGB. La calibrazione è stata eseguita con i software Matlab e Metashape (Fig.2). Con il software Matlab, sono state utilizzate solo 13 immagini su 155, scartando le altre per somiglianza o mancanza di messa a fuoco. La calibrazione è stata eseguita con il tool "Camera calibration" usando una scacchiera di 10 cm. Lo stesso procedimento è stato applicato alle immagini divise nei canali RGB, analizzando ogni canale separatamente. Il colore con l'errore minore è risultato essere il verde, mentre quello con l'errore maggiore è il blu. Per determinare il miglior approccio per ridurre le distorsioni, sono stati creati due profili colore (Fig.3). Dal secondo profilo, si osserva una maggiore

sovrapposizione dei canali RGB, indicando che l'analisi separata dei canali RGB offre una migliore calibrazione geometrica.



**Fig.2.** A sinistra la scacchiera utilizzata per l'analisi con Matlab, a destra i marker codificati usati per l'analisi con Metashape.



**Fig.3.** In alto: Metodo Matlab, approccio 1. Profilo colore del dato originale calibrato. In basso: Metodo Matlab, approccio 2. Profilo colore del dato calibrato separatamente su ciascun canale R, G, B.

Per l'analisi con Metashape, sono state utilizzate 70 immagini su 155, supportate da marker decodificati per l'allineamento. L'errore medio ottenuto è stato di 8 mm. Lo stesso procedimento è stato applicato alle immagini divise nei canali RGB, analizzando ogni canale separatamente. Il numero di immagini allineate varia per ogni canale. I marker sono stati riconosciuti automaticamente, con il verde che ha mostrato i migliori risultati e il blu i peggiori, con un errore medio di 9 mm per ciascun canale. Tuttavia, riunificando i canali RGB, essi sono risultati traslati, a causa della grande differenza dei valori dei punti principali calcolati durante la calibrazione. Ciò ha reso questi risultati non confrontabili con l'analisi precedente.

In conclusione, l'analisi su Matlab è molto soddisfacente per quanto riguarda l'approccio di separazione dei tre canali RGB, però è necessario importare dati "puliti". L'elaborazione con Metashape risulta essere più semplice ed efficace per quanto riguarda i dati originali, mentre la divisione nei canali non è soddisfacente.

### Conclusioni

Le praterie di Posidonia oceanica nel Mediterraneo, che immagazzinano più CO<sub>2</sub> delle foreste, sono cruciali per l'ecosistema marino ma vulnerabili al riscaldamento globale. Il progetto POSEIDON, con un approccio multidisciplinare tra geomática, biologia ed ecologia, mira a migliorare la comprensione dell'evoluzione della Posidonia, monitorando la sua salute e distribuzione. Grazie a dati multi/iperspettrali e multitemporali, contribuirà allo sviluppo di nuove metodologie e tecnologie per la mappatura degli habitat sottomarini, supportando anche gli sforzi globali per la conservazione degli ambienti marini.

### Ringraziamenti

Poseidon è un progetto di ricerca dell'iniziativa di rilevanza nazionale italiana "Italia Domani - Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza" (PNRR) finanziato dalla Commissione Europea - Next Generation EU.

### Riferimenti

1. Seabed 2030 project, 2023. <https://seabed2030.org/our-mission/>. Last visited 30 March 2024.
2. <https://experience.arcgis.com/experience/885c55973d964314a50d5fb57b64e835/>
3. Montefalcone, M., 2009. Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: a review. *Ecol. Indic.* 9, 595-604.
4. Telesca, L. et al., 2015. Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Scientific reports*, 5(1).
5. Pasqualini, V. et al., 2001. Integration of aerial remote sensing, photogrammetry, and GIS technologies in seagrass mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(1), pp.99-105.
6. Borfecchia, F. et al., 2021. Satellite Multi/Hyper Spectral HR Sensors for Mapping the *Posidonia oceanica* in South Mediterranean Islands. *Sustainability*, 13(24).
7. Foglini, F. et al., 2019. Application of hyperspectral imaging to underwater habitat mapping, Southern Adriatic Sea. *Sensors*, 19(10).
8. He, J. et al., 2022. Fully-covered bathymetry of clear tufa lakes using UAV-acquired overlapping images and neural networks. *Journal of Hydrology*, p.128666
9. Rende, S.F. et al., 2020. Ultra-high-resolution mapping of *Posidonia oceanica* (L.) [...]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), p.647.
10. Marbà, Nuria, et al., 1996. "Growth and population dynamics of *Posidonia oceanica* on the Spanish Mediterranean coast: elucidating seagrass decline." *Marine Ecology Progress Series* 137: 203-213.
11. Bay, Daniel, 1984. "A field study of the growth dynamics and productivity of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in Calvi Bay, Corsica." *Aquatic Botany* 20.1-2 43-64.
12. Lyzenga, D. R., 1981. "Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data," *Int. J. Remote Sens.* 2(1), 71-82.