

eCognition Developer e CATALYST per il processamento di immagini Pleiades NEO nella mappatura della Posidonia oceanica

Di Valerio Baiocchi, Alessandro Bosman, Flavia Cianfanelli, Chiara Magurano

Studio presentato al convegno 2025 IEEE INTERNATIONAL
WORKSHOP ON Metrology for AeroSpace di Napoli

Sysdeco Italia

Immagini Pleiades Neo per la mappatura della Posidonia oceanica di

Valerio Baiocchi, Flavia Cianfanelli, Chiara Magurano
DICEA
Sapienza Università di Roma Roma, Italia

Alessandro Bosman
IGAG CNR
Roma, Italia

Abstract— La *Posidonia oceanica* è una pianta endemica del Mediterraneo, la cui presenza dipende da numerosi fattori naturali e antropici, che ne determinano la distribuzione irregolare in tutto il bacino. Ciò rende necessario studiare le condizioni che favoriscono o limitano la proliferazione di *P. oceanica* e adottare strumenti e metodi di mappatura precisi per monitorarne lo stato di salute. I dati ottenuti da tecniche di telerilevamento richiedono un'elaborazione per preparare le immagini per eventuali analisi. Il processo di ortorettificazione è un passaggio fondamentale in questa fase di pre-elaborazione delle immagini. In questo lavoro, è stata testata l'applicazione di metodi di classificazione sia Object-Based Analysis che Pixel-Based Recognition al fine di isolare le aree contenenti *Posidonia oceanica* nell'immagine. L'obiettivo era valutare alcuni dei metodi di mappatura più idonei a fornire dati accurati e ripetibili utili per la conservazione delle praterie di *Posidonia* e la protezione dell'ecosistema mediterraneo. I risultati del lavoro sperimentale sui metodi di ortorettificazione ed estrazione di *Posidonia oceanica* sono presentati per un'area specifica della Sardegna (Italia).

Keywords—Pleiades-Neo, *Posidonia Oceanica*, Sardinia, Orthorectification, object oriented, pixel based

I. INTRODUZIONE

Posidonia oceanica (Linnaeus) Delile (d'ora in poi *P. oceanica*) è una pianta marina con fiori endemica del Mar Mediterraneo. Come pianta con fiori, è in grado di fotosintesi e possiede un sistema di radici, foglie e frutti. *P. oceanica* svolge un ruolo cruciale negli ecosistemi costieri e la regressione delle sue praterie ha gravi conseguenze sia per l'ambiente che per le attività umane. Pertanto, è essenziale studiarne la biologia, l'ecologia, la distribuzione geografica, nonché le minacce a cui è esposta e l'importanza della sua conservazione.

Contrariamente a quanto potrebbe suggerire il nome, le praterie di *P. oceanica* si trovano lungo le coste del Mar Mediterraneo, estendendosi dallo Stretto di Gibilterra alle coste della Turchia e dalle coste settentrionali dell'Africa all'Adriatico, occupando la piattaforma continentale da acque poco profonde fino a profondità di 40-50 metri [1]. La sua presenza in queste acque è tutt'altro che uniforme. Le praterie si sviluppano in condizioni ambientali specifiche caratterizzate da elevata trasparenza dell'acqua, livelli di salinità stabili e una profondità che consente una buona penetrazione della luce. L'impatto delle attività umane, come l'inquinamento, lo sviluppo urbano e il traffico marittimo, ha contribuito a una significativa riduzione e frammentazione di queste praterie, compromettendone la capacità di rigenerarsi e prosperare in determinate aree [2][3].

Dal punto di vista ecologico, il loro ruolo si estende ben oltre la mera fornitura di habitat; contribuiscono attivamente anche alla qualità dell'acqua assorbendo i nutrienti. Tuttavia, la loro caratteristica più significativa, che ha suscitato particolare interesse negli ultimi anni, è la loro funzione di serbatoi di carbonio blu, immagazzinando anidride carbonica nei sedimenti e riducendo così le concentrazioni di gas serra

nell'atmosfera, mitigando gli effetti del cambiamento climatico [4]. Inoltre, le praterie di *P. oceanica* proteggono le coste dall'erosione causata dall'azione delle onde. [5].

L'influenza delle attività umane sugli ecosistemi marini è un tema centrale per comprendere le minacce a cui è esposta questa specie. Le praterie di *P. oceanica* si estendono lungo tutte le coste del Mediterraneo, coprendo circa il 2% della superficie sommersa [6]. In Italia, si trovano sia nel Mar Tirreno che in quello Adriatico, circondando le isole di Sicilia e Sardegna. Negli ultimi 50 anni, la popolazione di *P. oceanica* è diminuita del 34%. Nel settore nord-occidentale del Mediterraneo, che comprende la Liguria, la perdita raggiunge il 56% [7]. L'habitat di *P. oceanica* si estende da 0,5 a 40 metri nelle zone sublitorali del Mediterraneo. In acque altamente oligotrofiche, può raggiungere profondità fino a 50 metri, creando praterie estese e produttive. La temperatura ottimale per la crescita di *P. oceanica* è di circa 20 °C. Temperature dell'acqua più elevate, soprattutto durante le ondate di calore marine, possono portare a una diminuzione dei livelli di ossigeno disciolto, con un impatto negativo sulla salute delle praterie [8].

Alla luce di quanto sopra esposto, è evidente che il monitoraggio delle praterie di *P. oceanica* e lo sviluppo di diverse strategie per migliorarne l'efficienza sono oggetto di un acceso dibattito scientifico. Gli strumenti tipicamente impiegati per la mappatura delle praterie sottomarine sono diversi e includono tecnologie consolidate come la fotografia aerea, il sonar a scansione laterale e gli ecoscandagli multifascio. Negli ultimi anni, una mappatura efficace si basa sempre più su tecnologie ottiche, tra cui il telerilevamento satellitare, aereo e con droni (UAV) [9]. Queste metodologie sono spesso integrate con tecniche laser, come il LiDAR (Light Detection and Ranging), per arricchire i dati disponibili con componenti batimetriche. In questo studio, le tecniche di telerilevamento sono state applicate specificamente per mappare le praterie di *P. oceanica*, valutarne lo stato di salute e analizzarne i cambiamenti nel tempo. Dopo l'acquisizione dei dati, è necessaria l'elaborazione geometrica e tematica per mappare accuratamente le caratteristiche ambientali [10]. L'approccio all'elaborazione dei dati varia a seconda dello strumento utilizzato e del tipo di dati forniti dai diversi fornitori, che possono scegliere di rilasciare i dati con diversi livelli di accuratezza [11,12, 13 e 14].

Ad esempio, nello studio di [15], i dati raccolti provenivano dai rilievi satellitari Sentinel-1 e Sentinel-2 condotti sulle isole Baleari e Malta nel 2021. Al contrario, questo studio utilizza due immagini Pleiades-Neo della costa orientale dell'isola italiana della Sardegna. Inizialmente, sono state impiegate diverse tecniche per l'ortorettificazione utilizzando il modello Rational Polynomial Coefficient (RPC), incorporando Ground Control Point (GCP) e Check Point (CP) per valutare separatamente precisione e accuratezza.

In questo caso, l'ortorettificazione dell'immagine satellitare riguarda principalmente la porzione sommersa dell'immagine, presentando due sfide principali: la mancanza di GCP disponibili e la difficoltà di eseguire correzioni geometriche a causa degli effetti combinati di profondità dell'acqua e rifrazione. Infine, presentiamo i risultati preliminari di tentativi di classificazione per le praterie di P. oceanica utilizzando sia tecniche basate su pixel che orientate agli oggetti.

II. MATERIALI E METODI

Questo studio prevede l'ortorettificazione e la classificazione di immagini satellitari acquisite dalla costellazione Pleiades-Neo. Le due immagini utilizzate sono porzioni di acquisizioni grezze, acquisite il 27/11/2021 alle 10:15 GMT e il 02/01/2022 alle 10:33 GMT. La costellazione Pleiades-Neo segue un'orbita eliosincrona, garantendo che i satelliti passino sopra la stessa posizione alla stessa ora ogni giorno. Ciò garantisce livelli di illuminazione costanti per le immagini acquisite sulla stessa area.

Come costellazione di osservazione terrestre, Pleiades-Neo opera in un'orbita terrestre bassa a un'altitudine di 620 km, consentendo un'altissima risoluzione spaziale nominale (30 cm per la banda pancromatica e 1,2 m per le altre bande spettrali). Inoltre, la sua orbita quasi polare consente ai satelliti di coprire parzialmente i poli e di attraversare quasi tutte le latitudini terrestri, raggiungendo una copertura quasi globale. Ogni satellite completa un'orbita attorno alla Terra in soli 97,2 minuti, con un breve tempo di rivisitazione che gli consente di passare sullo stesso punto sulla superficie terrestre due volte al giorno. Il ciclo di ripetizione è di 26 giorni, il che significa che il satellite rivisiterà la stessa area con la stessa geometria di osservazione dopo questo periodo. La larghezza di swath del satellite, ovvero la larghezza di acquisizione trasversale alla traccia, è di 14 km. Lanciati nel 2021, i satelliti della costellazione hanno una durata di vita prevista di 10 anni.

Le Pleiades-Neo operano su più bande spettrali:

- Pancromatico (450–800 nm)
- Deep blue (400–450 nm)
- Blu (450–520 nm)
- Verde (530–590 nm)
- Rosso (620–690 nm)
- Red edge (700–750 nm)
- Infrarosso vicino (770–880 nm)

Le due acquisizioni qui presentate si concentrano su un tratto della costa settentrionale della Sardegna, nello specifico sulla parte più orientale della provincia di Sassari, tra Golfo Aranci e Capo Ceraso.

A supporto dei dati satellitari, sono stati ottenuti ulteriori set di dati dal sito web ufficiale Geo della Regione Sardegna. Tra questi, un Modello Digitale del Terreno (DTM) con risoluzione di 1 m derivato da dati LiDAR (dove ogni pixel misura 1 m in entrambe le direzioni) e una Carta Tecnica Regionale (CTR) in scala 1:2000, tratta dal database geografico dei centri urbani e delle aree abitate della Sardegna (DBG_TCU).

Per quanto riguarda la componente batimetrica, non essendo disponibile un modello batimetrico ad alta risoluzione attraverso piattaforme open source, le curve di livello sono state ricavate da una carta nautica fornita dall'Istituto Idrografico Italiano (IIM).

Le immagini sono state inizialmente importate in QGIS (v. 3.28) per estrarre le coordinate di circa un centinaio di punti, che sono stati successivamente utilizzati come GCP e CP per il processo di ortorettificazione, eseguito poi in PCI CATALYST (v. 2223.0.0). Le prime immagini ad essere ortorettificate sono state quelle pancromatiche. Successivamente, le immagini multispettrali sono state ortorettificate dopo essere state sottoposte a un processo di pansharpening, utilizzando gli stessi GCP e CP utilizzati per le immagini pancromatiche. Il processo di pansharpening è stato eseguito utilizzando il modulo dedicato fornito dal software PCI CATALYST.

Per le immagini multispettrali senza pansharpening, è stata eseguita una conversione delle coordinate dell'immagine per consentire l'uso degli stessi GCP e CP.

III. RISULTATI E DISCUSSIONE

I processi precedentemente descritti hanno prodotto un totale di 12 immagini satellitari ortorettificate. Per ciascuno dei due anni (2021 e 2022), le immagini multispettrali, pancromatiche e pansharpened sono state ortorettificate con e senza correzione batimetrica.

Per valutare l'accuratezza delle immagini, è essenziale analizzare i valori ottenuti per i punti di controllo (CP). Il processo di ortorettificazione ha impiegato circa 80 GCP e 20 CP. Gli errori dei CP (in media compresi tra 30 e 40 cm) sono superiori a quelli dei punti di controllo a terra (25-30 cm), come tipicamente osservato. Questa discrepanza deriva dal fatto che l'immagine è vincolata dai GCP, mentre i CP fungono da punti di convalida indipendenti (Tabella 1).

I CP sono stati selezionati casualmente all'interno dell'immagine (Fig. 1) e non contribuiscono direttamente alla stima del modello di correzione.

Considerando che le immagini pancromatiche hanno una risoluzione spaziale di 30 cm, gli errori ottenuti rientrano in un intervallo accettabile, in quanto prossimi a questo valore sia per le immagini pancromatiche che per quelle multispettrali. È interessante notare che, come osservato in esperimenti precedenti, nelle immagini delle Pleiades-Neo ortorettificate utilizzando modelli RPC, i residui di elevazione sui GCP sono inferiori ai residui planimetrici. Questo comportamento può essere attribuito alla variazione di elevazione relativamente contenuta nell'area di studio.

2021 Multispectral Image (ground units)			
	X RMS	Y RMS	Z RMS
GCP	0.268	0.242	0.097
CP	0.363	0.463	0.184

2022 Multispectral Image (ground units)			
	X RMS	Y RMS	Z RMS
GCP	0.24	0.277	0.13
CP	0.335	0.462	0.179

2021 Pansharpened Image (ground units)			
	X RMS	Y RMS	Z RMS
GCP	0.272	0.245	0.098
CP	0.362	0.462	0.184

2022 Pansharpened Image (ground units)			
	X RMS	Y RMS	Z RMS
GCP	0.244	0.281	0.132
CP	0.335	0.461	0.179

Tabella 1. Errori residui totali espressi in unità di suolo per le immagini multispettrali e pansharpened.

Esiste una nota differenza sistematica tra i residui nelle direzioni Nord ed Est. In particolare, la precisione della coordinata X (Est) è maggiore di quella della coordinata Y (Nord).

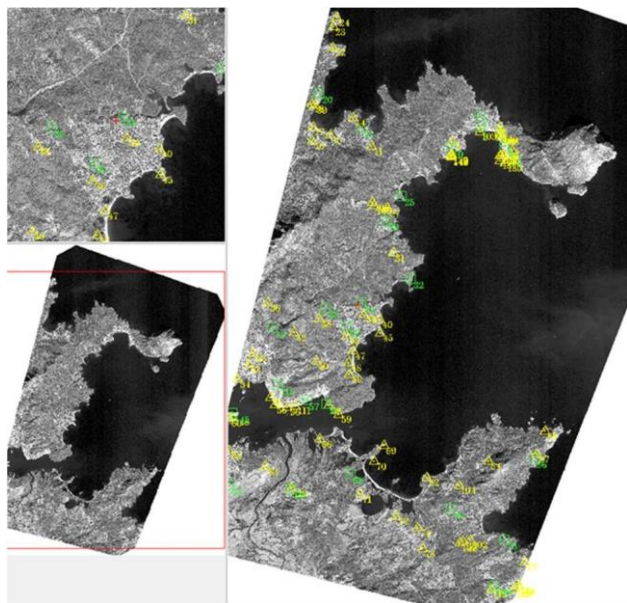


Fig. 1. Panchromatic image of 2021. Ground Control Points are shown in yellow, and Check Points in green

Ciò è dovuto alla modalità di acquisizione pushbroom del satellite, in cui il sensore cattura un'intera fascia di terreno in un'unica istanza lungo la direzione ortogonale al moto del satellite. La coordinata Est viene quindi acquisita perpendicolarmente alla traiettoria del satellite, rendendola più stabile grazie alla sua natura geometricamente "rigida", meno soggetta a variazioni temporali. Al contrario, la coordinata Nord è influenzata dal movimento del satellite lungo la sua orbita, nonché dalla stabilità della piattaforma e dei suoi sistemi di navigazione durante l'acquisizione. Poiché l'immagine viene progressivamente costruita con il movimento del satellite, piccole instabilità durante il volo o la registrazione dei dati possono introdurre maggiori

incertezze in questa direzione [16]. In quest'ultimo caso, in termini di accuratezza dell'ortorettificazione, attualmente non è possibile valutarne rigorosamente l'effetto, poiché i punti di controllo a terra (GCP) e i punti di controllo (CP) utilizzati per l'ortorettificazione sono stati misurati a terra, mentre non sono disponibili punti di controllo misurati con precisione sul fondale marino. Tuttavia, l'effetto della batimetria può essere osservato con una differenza nella forma e nella posizione del fondale marino e, di conseguenza, anche nelle praterie di *P. oceanica*. Ciò dimostra come l'effetto della profondità del fondale marino non possa essere trascurato (Fig. 2).



Fig. 2. Immagine pansharpened ortorettificata del 2021 senza correzione batimetrica (in alto) e con correzione batimetrica (in basso). L'effetto dell'utilizzo della batimetria sposta e modifica la forma del fondale marino.

In seguito all'applicazione di algoritmi basati su pixel e orientati agli oggetti, è stato possibile misurare l'area di copertura totale delle praterie di *P. oceanica*. Solo l'immagine multispettrale ortorettificata del 2021 è stata importata in eCognition Developer (v. 10.4) per esplorare il potenziale di classificazione delle immagini. Dopo aver inizialmente mascherato l'area terrestre, la classificazione è stata eseguita sulla porzione marina dell'immagine. È stato applicato un

approccio di classificazione basato su pixel, distinguendo tra *P. oceanica* e acque libere utilizzando l'indice MCARI, come utilizzato in [17]. È interessante notare che, sebbene i valori dell'indice MCARI fossero negativi sott'acqua, rientravano costantemente in un intervallo distinto (tra -4 e -7) in cui *P. oceanica* poteva essere identificata, come confermato dall'ispezione visiva. La classificazione basata sugli oggetti è stata eseguita segmentando l'area marina utilizzando parametri specifici di forma (0,1), compattezza (0,4) e scala (5) che hanno consentito al software di delineare le unità seguendo da vicino i contorni naturali delle praterie di *P. oceanica* sul fondale marino. Successivamente le unità segmentate sono state classificate come acqua o *P. oceanica* in base ai loro valori MCARI.

Il software eCognition Developer ha poi fornito l'area di copertura della prateria in pixel, richiedendo una conversione in metri quadrati in base alla risoluzione spaziale delle immagini utilizzate (1.2 m).

I calcoli dell'area hanno rivelato una differenza significativa (1,4 km²) tra i valori ottenuti utilizzando gli algoritmi basati sui pixel (fig. 3) e quelli basati sugli oggetti (fig. 4) nell'immagine multispettrale senza correzione batimetrica.

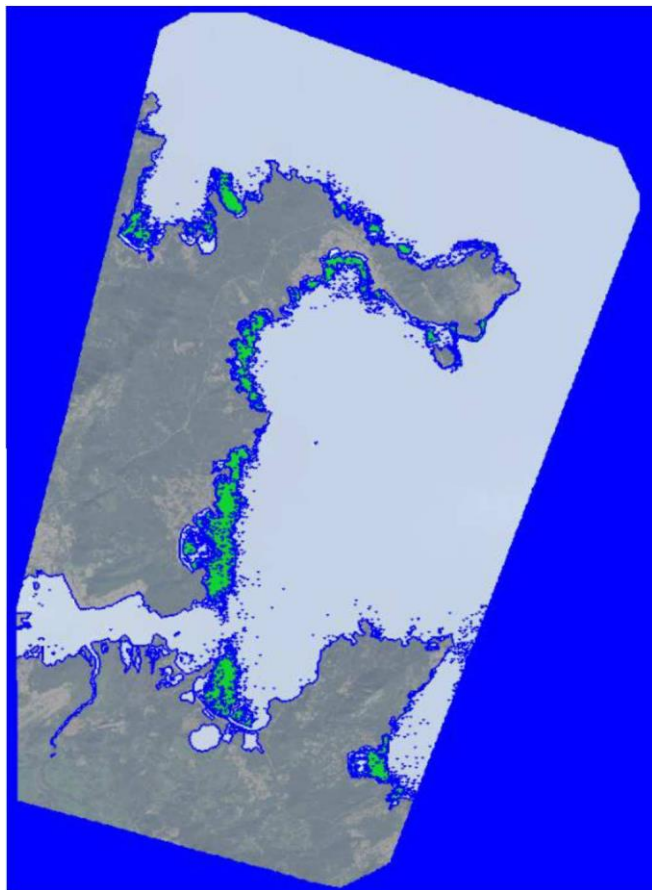


Fig. 3. Risultato della classificazione basata sui pixel dell'immagine multispettrale del 2021 con correzione batimetrica. In grigio scuro la terraferma, in grigio chiaro il mare, in verde la *P. oceanica*.

Questa discrepanza può essere in parte attribuita alle differenze nel processo di segmentazione della superficie marina tra i due algoritmi, poiché utilizzavano parametri di scala diversi. In particolare, classificando la stessa immagine con correzione batimetrica, questa differenza si è notevolmente ridotta (0,2 km²).

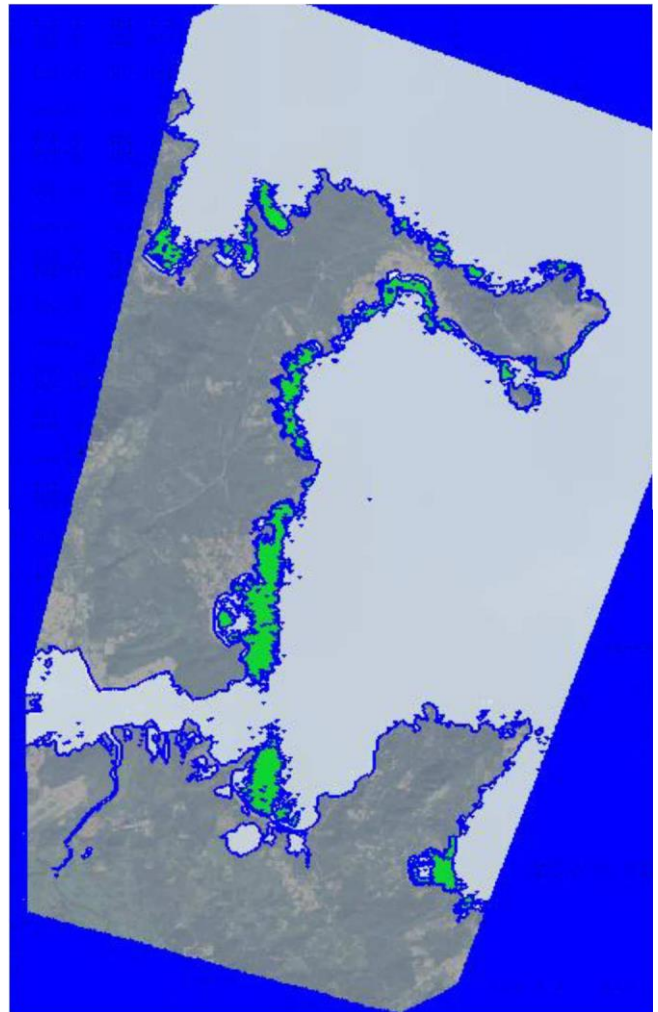


Fig. 4. Risultato della classificazione basata sugli oggetti dell'immagine multispettrale del 2021 con correzione batimetrica. In grigio scuro la terraferma, in grigio chiaro il mare, in verde la *P. oceanica*.

CONCLUSIONI

Questo studio evidenzia il potenziale delle immagini satellitari ad alta risoluzione e degli strumenti di classificazione per la mappatura delle praterie di *P. oceanica*. Sebbene l'assenza di punti di controllo marini rimanga una sfida, l'applicazione della correzione batimetrica ha migliorato l'accuratezza geometrica complessiva e ha portato a risultati più coerenti tra la classificazione basata su pixel e quella basata su oggetti. Tuttavia, questa dovrebbe essere considerata una valutazione preliminare e sono necessari ulteriori test su diverse aree per comprendere appieno le cause e il significato di questi risultati.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Airbus DS, Sysdeco S.r.l. e il Dott. Fabrizio Filiberti per la loro assistenza e la generosa fornitura delle immagini Pleiades-NEO © Airbus DS (acquisite negli anni 2021, 2022) utilizzate in questo studio.

RIFERIMENTI

- [1] A. Coccozza di Montanara, F. Semprucci, F. Rendina, G. F. Russo, R. Sandulli, "Re-discovering macerating Posidonia oceanica bottoms: Characterization of meiofaunal community inhabiting a peculiar Mediterranean habitat," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 309, 108956, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108956>
- [2] L. Telesca, A. Belluscio, A. Criscoli, G. Ardizzone, E. T. Apostolaki, S., Frascetti, M. Gristina, L. Knittweis, C. S. Martin, G. Pergent, A. Alagna, F. Badalamenti, G. Garofalo, V. Gerakaris, M. Louise Pace, C. Pergent-Martini, M. Salomidi, "Seagrass meadows (Posidonia oceanica) distribution and trajectories of change," *Scientific Reports*, 5, 1–14, 2015, <https://doi.org/10.1038/srep12505>
- [3] F. Blanco-Murillo, S. Jimenez-Gutierrez, J. Martínez-Vidal, J. E. Guillén, J. L. Sánchez-Lizaso, "Spatiotemporal Trends Observed in 20 Years of Posidonia oceanica Monitoring along the Alicante Coast, Spain," *Water* (Switzerland), 14(3), 1–11, 2022 <https://doi.org/10.3390/w14030274>
- [4] S. M. Trevathan-Tackett, J. Kelleway, P. I. Macreadie, J. Beardall, P. Ralph, and A. Bellgrove, "Comparison of marine macrophytes for their contributions to blue carbon sequestration," 96: 3043–3057, 2015 <https://doi.org/10.1890/15-0149.1>
- [5] D. Trogu, S. Simeone, A. Ruju, M. Porta, A. Ibbi, S. DeMuro, "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), 2023, <https://doi.org/10.3390/jmse11122376>
- [6] "Posidonia oceanica e pesca professionale", AGCI Agrital, Settore Agro Ittico Alimentare Programmazione Piano Nazionale Pesca 2019. https://www.agciagricital.it/wp-content/uploads/2019/10/Posidonia-e-pesca_compressed.pdf last visited: 02 May 2025
- [7] C. Robello, S. Acunto, L. M. Leone, I. Mancini, A. Oprandi, M. Montefalcone "Large-Scale Re-Implantation Efforts for Posidonia oceanica Restoration in the Ligurian Sea: Progress and Challenges," *Diversity*, 16, 226, 2024, <https://doi.org/10.3390/d16040226>
- [8] A. A. Peru, F. Susana, A.M.L. Carlos, E. H. Iris, "Water column oxygenation by Posidonia oceanica seagrass meadows in coastal areas: A modelling approach," *Science of The Total Environment*, Volume 942, 173805, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173805>
- [9] D. Ventura, A. Bonifazi, M. F. Gravina, A. Belluscio, G. Ardizzone "Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and Object-Based Image Analysis (OBIA)," *Remote Sensing*, 10(9), 1–23, 2018, <https://doi.org/10.3390/rs10091331>
- [10] V. Baiocchi, F. Zottele, D. Dominici, "Remote sensing of urban microclimate change in L'Aquila city (Italy) after post-earthquake depopulation in an open source GIS environment," *Sensors* (Switzerland), Volume 17, Issue 219, Article number 404, 2017, <https://doi.org/10.3390/s17020404>
- [11] V. Baiocchi, F. Cianfanelli, E. Nocerino, "Satellite Images and Bathymetric LiDAR for Mapping Seagrass Meadows: An Overview" In *Earth Observation: Current Challenges and Opportunities for Environmental Monitoring; AIT Series. Trends in Earth Observation; Associazione Italiana di Telerilevamento: Firenze, Italy*, Volume 3, pp. 87–92, 2024
- [12] C. Coccozza, A. Parente, C. Zaccone, C. Mininni, P. Santamaria, P.; T. Miano, "Comparative management of offshore posidonia residues: Composting vs. energy recovery" *Waste Manag.*, 31, pp. 78–84, 2011
- [13] C. Parente, E. Alcaras, f. g. Figliomeni, "Coastline Automatic Extraction from Medium-Resolution Satellite Images Using Principal Component Analysis (PCA)-Based Approach," *Remote Sens.*, 16, 1817, 2024, <https://doi.org/10.3390/rs16101817>
- [14] G. Ceccherelli, F. Chiabrando, F. Gallitto, A. Lingua, A., V. Longhi, P. Maschio, F. Matrone, F. Menna, E. Nocerino, M. Scalici, et al., "Multitemporal Seagrass Mapping and Monitoring of Posidonia Meadows and Banquettes for Blue Carbon Conservation: The Poseidon Project," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 48, 65–71, 2024.
- [15] M. Chowdhury, A. Martínez-Sansigre, M. Mole, E. Alonso-Peleato, N.o Basos, J. M. Blanco, M. Ramirez-Nicolas, I. Caballero, I., de la Calle Perez, "AI-driven remote sensing enhances Mediterranean seagrass monitoring and conservation to combat climate change and anthropogenic impacts," *Scientific Reports*. 14, 2024 <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59091-7>
- [16] C. B. Khan, K. T. Goetz, H. C. Cubaynes, C. Robinson, E. Murnane, T. Aldrich, M. Sackett, P. J. Clarke, M. A. LaRue, T. White, K. Leonard, A. Ortiz, J. M. Lavista Ferres, "Biologist's Guide to the Galaxy: Leveraging Artificial Intelligence and Very High-Resolution Satellite Imagery to Monitor Marine Mammals from Space," *J. Mar. Sci. Eng.* 11, 595, 2023, <https://doi.org/10.3390/jmse11030595>
- [17] S. Mohanty, P. K. Srivastava, P. C. Pandey, P. Singh, S. Srivastava, "Wetland species mapping using advanced technological measurement," *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2024, <https://doi.org/10.1002/aqc.70018>