Monitoraggio della linea di costa della spiaggia del Poetto (Sardegna) con dati satellitari pubblici: evoluzione pre e post ripascimento

Enrica Vecchi[1][0000-0002-6524-9216] e Giuseppina Vacca[2][0000-0001-8161-7667]

[1,2] Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DiCAAR), Università di Cagliari

Abstract. Lo studio analizza l'evoluzione della linea di costa del Poetto mediante immagini Landsat (1984–2026) e Sentinel-2 (2015–2026), elaborate con CoastSat. L'analisi delle posizioni medie annuali lungo 161 transetti evidenzia un persistente arretramento del settore sud-occidentale dopo il ripascimento del 2002, riconosciuto da entrambe le missioni. Le acquisizioni del 2002 consentono inoltre di distinguere le configurazioni medie precedenti e successive all'intervento.

Parole chiave: Linea di costa, Monitoraggio costiero, Poetto.

1 Introduzione

Le variazioni della posizione della linea di costa costituiscono un indicatore dell'evoluzione dei litorali sabbiosi e il loro monitoraggio rappresenta uno strumento fondamentale per individuare fenomeni di erosione e avanzamento, quantificarne l'entità e analizzarne la distribuzione spaziale e temporale [1,2,3].

La crescente disponibilità di immagini satellitari multispettrali gratuite ha ampliato le possibilità di monitoraggio, consentendo di ricostruire l'evoluzione della linea di costa su scale temporali pluridecennali. In particolare, gli archivi Landsat e Sentinel-2 permettono di ottenere osservazioni ad elevata frequenza temporale, mentre alcune procedure automatizzate, come il toolbox open-source CoastSat, consentono di estrarre sistematicamente la posizione della linea di costa da un elevato numero di immagini [4,5]. L'analisi di serie temporali può essere condotta mediante indicatori quali il Net Shoreline Movement (NSM) e il Linear Regression Rate (LRR) utili a quantificare le variazioni ed evidenziarne la variabilità spaziale [3,6]. Le posizioni ricavate dalle immagini satellitari possono tuttavia essere influenzate dalle caratteristiche e dalla risoluzione dei dati, dalle condizioni meteomarine al momento dell'acquisizione e dalle procedure di estrazione, rendendo necessarie opportune verifiche di qualità [7,8].

In questo contesto, la spiaggia del Poetto, nel Golfo di Cagliari, costituisce un caso di studio particolarmente significativo, sia per le trasformazioni antropiche che hanno interessato il litorale negli anni sia per l'intervento di ripascimento realizzato nel settore sud-occidentale nel 2002. Studi precedenti hanno evidenziato una marcata variabilità spaziale nell'evoluzione della linea di costa, con una tendenza all'arretramento

particolarmente evidente nel settore sud-occidentale nella fase successiva al ripascimento [9,10].

Il presente lavoro analizza l'evoluzione della linea di costa del Poetto attraverso le serie satellitari Landsat (1984–2026) e Sentinel-2 (2015–2026), elaborate mediante algoritmo CoastSat. L'obiettivo è ricostruire l'evoluzione pluridecennale del litorale e analizzarne la variabilità spaziale lungo quattro settori della spiaggia, con particolare riferimento alle fasi precedente e successiva al ripascimento del 2002. Rispetto agli studi precedenti basati su ortofoto acquisite in anni specifici, l'impiego di archivi satellitari consente di disporre di osservazioni più frequenti, che possono essere successivamente aggregate su base annuale. Questo approccio permette di verificare se le tendenze evolutive già individuate attraverso osservazioni discontinue siano riconoscibili anche in serie temporali a maggiore frequenza di acquisizione. Il confronto tra Landsat e Sentinel-2 nel periodo comune 2015–2026 consente inoltre di valutare la coerenza dei pattern spaziali e delle tendenze ottenuti dalle due serie satellitari.

2 Area di Studio

La spiaggia del Poetto, situata nel Golfo di Cagliari, lungo la costa meridionale della Sardegna, si estende per circa 8 km da Margine Rosso, nel comune di Quartu Sant'Elena, fino al porto di Marina Piccola (**Fig. 1**). La spiaggia è caratterizzata da un regime microtidale e da una dinamica costiera prevalentemente influenzata dal moto ondoso. Le principali fonti di sedimento comprendono l'erosione del promontorio di Capo Sant'Elia e l'apporto di materiale derivante dalle praterie di Posidonia oceanica presenti al largo [11]. Nel corso dell'ultimo secolo, lo sviluppo urbano e la conseguente realizzazione di strade, edifici, strutture portuali e infrastrutture ricreative hanno modificato in maniera significativa la morfologia della spiaggia, contribuendo alla frammentazione del sistema dunale. In particolare, la naturale dinamica del trasporto sedimentario è stata modificata dalla costruzione del porto di Marina Piccola, intorno al 1960, che insieme, ad altre infrastrutture turistiche, pontili e chioschi, ha contribuito alla progressiva erosione del sistema spiaggia [10]. Per contrastare tali fenomeni erosivi, nel 2002 è stato realizzato un intervento di ripascimento che ha interessato circa 2 km del settore sud-occidentale della spiaggia, tra il porticciolo di Marina Piccola e lo stabilimento balneare D'Aquila, con l'apporto di circa 370.000 m³ di sabbia (**Fig. 1**) [12]. Il materiale utilizzato per il ripascimento è stato dragato da un deposito sedimentario situato al largo e, rispetto alla sabbia originaria, presentava una colorazione più scura e una granulometria leggermente maggiore [13].

Nel presente studio, il ripascimento del 2002 è stato assunto come riferimento temporale per distinguere le fasi precedente e successiva all'intervento. Per analizzare la variabilità spaziale dell'evoluzione della linea di costa, la spiaggia è stata suddivisa in quattro settori (P1–P4), definiti approssimativamente sulla base dei settori individuati in [10] (**Fig. 1**).

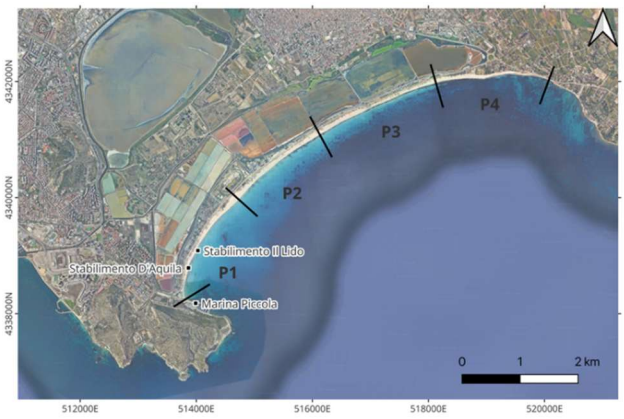

Fig. 1. Inquadramento della spiaggia del Poetto, a Cagliari, con indicazione dei principali stabilimenti balneari nel tratto interessato dal ripascimento e dei quattro settori (P1–P4) utilizzati per le analisi. Le coordinate del reticolo sono espresse nel sistema ETRF2000-UTM zona 32N (EPSG: 6707).

3 Materiali e Metodi

3.1 Dati satellitari ed estrazione delle linee di costa

Le linee di costa utilizzate per l'analisi dell'evoluzione del Poetto sono state estratte automaticamente da immagini satellitari multispettrali mediante il toolbox open-source CoastSat [4]. Il dataset Landsat comprende immagini acquisite dai satelliti Landsat 5, 7, 8 e 9 e copre il periodo 1984–2026, mentre la serie Sentinel-2 si estende dal 2015 al 2026. Per entrambe le missioni, il periodo di osservazione termina il 17 giugno 2026. Le due serie sono state elaborate separatamente e le linee di costa ottenute sono state esportate nel sistema di riferimento ETRF2000/UTM zona 32N (EPSG:6707).

Nelle immagini Landsat 8 e Landsat 9, alcune porzioni di spiaggia, strutture portuali e zone d'acqua sono state erroneamente classificate come aree nuvolose. Per ridurre tali anomalie è stato modificato l'elemento strutturante utilizzato nella procedura di mascheramento all'interno dello script, aumentandone la dimensione. Tale modifica ha consentito di ridurre sensibilmente le classificazioni errate, sebbene siano rimaste alcune anomalie in corrispondenza delle superfici d'acqua.

Il successivo controllo di qualità ha inoltre comportato l'esclusione di 79 immagini Landsat acquisite tra il 1988 e il 1990 a causa di problemi di georeferenziazione. Al termine della procedura sono state ottenute 1405 linee di costa dalla serie Landsat e 409 dalla serie Sentinel-2.

3.2 Elaborazione e analisi delle variazioni della linea di costa

L'analisi delle variazioni della linea di costa è stata condotta mediante un approccio basato su transetti ortogonali all'orientamento della spiaggia. A partire da una baseline di riferimento, sono stati generati mediante uno script Python 161 transetti, distanziati di 50 m e distribuiti lungo i quattro settori P1–P4, escludendo le aree interessate dalla

presenza di strutture. Per ciascuna linea di costa estratta con CoastSat, la posizione è stata determinata attraverso l'intersezione con i transetti e rappresentata, per ciascuno di essi, dalla relativa distanza di intersezione. È stato inoltre applicato l'algoritmo di despiking di Coastsat che rimuove outlier causati da identificazioni errate. Considerata l'elevata frequenza temporale delle osservazioni satellitari e lo scopo finale delle analisi, le linee di costa estratte sono state aggregate su base annuale. Per ciascun anno e per ogni transetto è stata calcolata la posizione media della linea di costa sulla base delle intersezioni valide, mantenendo separate le serie Landsat e Sentinel-2.

Le linee di costa annuali così ottenute sono state sottoposte a un controllo visivo in QGIS, che ha consentito di individuare ulteriori anomalie; i dati corrispondenti sono stati esclusi e le medie annuali sono state ricalcolate.

Per quantificare l'evoluzione della linea di costa, lungo ciascun transetto sono stati calcolati quattro indicatori comunemente utilizzati nelle analisi multitemporali e implementati nel software DSAS (Digital Shoreline Analysis System) [14]:

- NSM (Net Shoreline Movement): differenza, espressa in metri, tra la posizione più recente e quella più antica della linea di costa;
- EPR (End Point Rate): tasso medio annuo di variazione, calcolato come rapporto tra l'NSM e l'intervallo temporale compreso tra la prima e l'ultima osservazione, espresso in m/anno;
- SCE (Shoreline Change Envelope): distanza, espressa in metri, tra la posizione più arretrata e quella più avanzata della linea di costa, indipendentemente dal loro ordine cronologico;
- LRR (Linear Regression Rate): tasso di variazione ottenuto dal coefficiente angolare della regressione lineare ai minimi quadrati della posizione della linea di costa in funzione del tempo, espresso in m/anno.

Il calcolo è stato eseguito mediante una procedura sviluppata in Python, con successiva gestione e analisi dei risultati in ambiente QGIS. Per come sono stati definiti i transetti, valori positivi di NSM, EPR e LRR indicano uno spostamento della linea di costa verso mare, corrispondente a una tendenza all'avanzamento, mentre valori negativi indicano uno spostamento verso terra, associato a una tendenza all'erosione. L'indicatore SCE rappresenta invece l'ampiezza complessiva delle posizioni osservate e non fornisce indicazioni sulla direzione della variazione.

Per valutare l'evoluzione della linea di costa nelle fasi precedente e successiva al ripascimento del 2002, la serie Landsat è stata analizzata suddivisa nei periodi 1984–2002 e 2002–2026; gli indicatori sono stati inoltre calcolati sull'intero intervallo 1984–2026. La serie Sentinel-2, disponibile esclusivamente per il periodo post-ripascimento, è stata analizzata per l'intervallo 2015–2026. Per consentire un confronto diretto tra le due missioni satellitari, anche i dati Landsat sono stati analizzati separatamente sul periodo comune 2015–2026. I valori medi, minimi e massimi degli indicatori sono stati infine sintetizzati per ciascuno dei quattro settori P1–P4. Per il 2002, dai dati Landsat sono state ricavate due medie distinte: dal 01/01 al 08/03 per la fase pre e dal 25/03 al 31/12 per la fase post, escludendo le acquisizioni intermedie relative al periodo dei lavori. Nell'analisi completa è stata invece mantenuta la media annuale del 2002.

Tutti gli indicatori descritti sono stati calcolati per ciascun transetto e per i diversi intervalli temporali considerati, utilizzando gli anni interi come riferimento temporale

delle posizioni medie. Nei risultati sono riportati i valori aggregati per settore (P1–P4) e, per ciascuna analisi, gli indicatori più rappresentativi delle tendenze osservate. Si precisa che, per entrambe le serie, la posizione media del 2026 è riferita alle sole acquisizioni disponibili fino al 17 giugno e rappresenta pertanto una media annuale parziale.

4 Risultati

L'analisi della serie Landsat evidenzia una marcata variabilità spaziale e temporale lungo la spiaggia. Nel periodo pre-ripascimento, P1 e P3 presentano arretramenti netti medi di circa 5 e 3 m, accompagnati da LRR medi di circa −0,2 m/anno, indicativi di tendenze negative di entità contenuta. P2 mostra un avanzamento netto medio di circa 2 m e una tendenza lineare positiva di 0,2 m/anno. P4 presenta l'avanzamento medio più marcato, sia nel confronto tra gli estremi temporali (NSM=+8 m), sia nella tendenza complessiva (LRR=+0,5 m/anno) (**Fig. 2a**).

Dopo il ripascimento, P1 si distingue dal resto della spiaggia per un marcato arretramento (**Fig. 2b**). La posizione finale è mediamente circa 46 m più arretrata rispetto a quella post-intervento del 2002, mentre la tendenza lineare è pari a −1,6 m/anno. P2, P3 e P4 mostrano invece avanzamenti netti medi tra i 7 e i 12 m e LRR medi rispettivamente di 0,4, 0,2 e 0,6 m/anno. P1 presenta anche la maggiore escursione media della linea di costa (SCE), pari a circa 52 m. Questo valore riguarda esclusivamente l'evoluzione successiva all'intervento e non comprende la variazione tra le condizioni pre e post ripascimento.

Il confronto sull'intero periodo 1984–2026 restituisce un quadro differente: in tutti i settori, la posizione finale risulta mediamente più avanzata di quella iniziale, con NSM medi di 7, 14, 5e 21 m in P1–P4. Gli EPR medi variano da 0,1 a 0,5 m/anno; anche gli LRR medi indicano tendenze lineari positive, ma in P3 la tendenza è prossima allo zero (0,02 m/anno), mentre in P1, P2 e P4 raggiunge valori rispettivamente pari a 0,3, 0,5 e 0,4 m/anno. L'avanzamento netto sul lungo periodo coesiste quindi, in P1, con l'arretramento successivo al ripascimento. Questo settore presenta inoltre la maggiore escursione complessiva delle posizioni, mediamente pari a circa 58 m.

Nel periodo 2015–2026, Sentinel-2 individua un arretramento netto medio di circa 17 m in P1, con EPR e LRR medi entrambi di circa −1,5 m/anno. Le tendenze lineari sono negative in tutti i transetti del settore, che presenta anche la maggiore escursione media delle posizioni (SCE=19 m). P2 e P3 mostrano arretramenti netti medi di 6 e 2 m, accompagnati da LRR medi di −0,5 e −0,3 m/anno. P4 presenta invece un avanzamento netto medio di circa 3 m, con EPR di 0,3 m/anno e una tendenza lineare debolmente positiva (LRR=0,07 m/anno).

Limitando anche Landsat al periodo 2015–2026, entrambi i dataset confermano il maggiore arretramento medio di P1 (**Fig. 2c**). Landsat restituisce un NSM medio di −9 m e un LRR di circa −1,1 m/anno, rispetto a −17 m e −1,5 m/anno di Sentinel-2. In P2 e P3, Landsat mostra avanzamenti netti medi di circa 3 e 7 m e LRR positivi di 0,1 e 0,3 m/anno, mentre Sentinel-2 indica arretramento, con LRR medi rispettivamente di −0,5 e −0,3 m/anno. In P4, entrambe le serie mostrano avanzamento, ma l'LRR medio

è maggiore per Landsat (0,6 contro 0,07 m/anno). Gli SCE medi sono invece molto simili in P2 e P3 nelle due serie: circa 8-9 m circa 9 in P3.

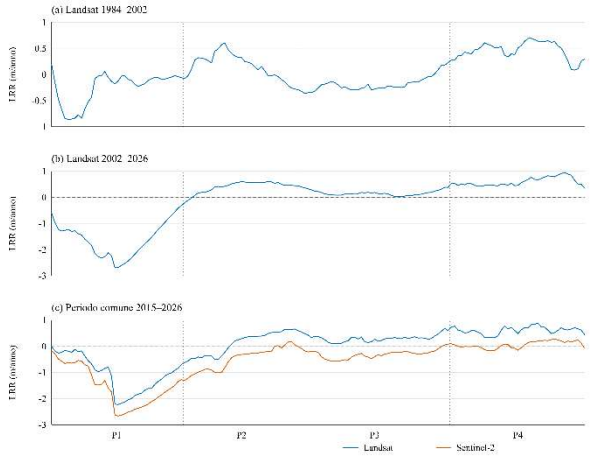

Fig. 2. Distribuzione dell'LRR nei settori P1–P4: (a) Landsat nel periodo pre-ripascimento; (b) Landsat nel periodo post-ripascimento; (c) confronto tra Landsat e Sentinel-2 nel periodo comune. Valori positivi indicano avanzamento, valori negativi arretramento.

La disponibilità di diverse acquisizioni Landsat nel corso del 2002 ha consentito di distinguere le configurazioni medie della linea di costa 2002 precedenti e successive al ripascimento. Lungo i 40 transetti del settore P1, il confronto ha evidenziato un avanzamento medio di circa 58 m, con spostamenti prevalentemente compresi tra 22 e 87 m (10°–90° percentile).

5 Discussione e Conclusioni

Il confronto nel periodo comune 2015–2026 ha evidenziato un andamento spaziale delle tendenze molto simile nelle due serie, entrambe caratterizzate dal maggiore arretramento medio in P1. Nel periodo comune 2015–2026, le LRR ottenute da Landsat sono sistematicamente superiori a quelle di Sentinel-2, con una differenza media di circa 0,6 m/anno. Questo scostamento determina tendenze medie di segno opposto nei settori P2 e P3, senza modificare sostanzialmente la distribuzione spaziale dei massimi e dei minimi. La concordanza riguarda quindi soprattutto il pattern spaziale delle variazioni, mentre l'entità e, nei settori con tendenze più deboli, il segno dei tassi dipendono dalla serie utilizzata. Le differenze tra le serie possono risentire della risoluzione spaziale e delle caratteristiche spettrali dei sensori, oltre che della diversa distribuzione temporale delle acquisizioni utilizzabili. Tuttavia, la maggiore risoluzione di Sentinel-2 non implica necessariamente una maggiore accuratezza nella determinazione della posizione della linea di costa [15]. Anche la presenza di nubi e le procedure di cloud masking possono influenzare l'estrazione della linea di costa. Inoltre, l'aggregazione annuale può attenuare le oscillazioni di breve periodo, ma non

elimina eventuali errori sistematici associati all'estrazione delle linee di costa [7,8]. Una distribuzione stagionale non uniforme delle acquisizioni può inoltre influenzare le posizioni medie annuali [2]. Il contributo di questi fattori non è stato quantificato separatamente nel presente lavoro.

L'arretramento del settore P1 nel periodo post-ripascimento è coerente con quanto osservato da Biondo et al. (2020) [10] mediante l'analisi di ortofoto nel periodo 2003-2016. La concordanza con la serie Landsat riguarda anche le tendenze medie positive di P2 e P4, mentre in P3 si osservano tendenze di segno opposto, ma di entità contenuta. Usai et al. (2025) [9], attraverso l'analisi DSAS di linee digitalizzate da ortofoto del periodo 1954–2022, documentano l'avanzamento associato al ripascimento e il successivo arretramento nella porzione sud-occidentale del Poetto. Le differenti finestre temporali, dovute principalmente alla disponibilità di ortofoto per anni specifici, limitano il confronto quantitativo diretto tra gli studi. Nel complesso, le serie satellitari aggiornate al 2026 restituiscono per P1 una tendenza all'arretramento coerente con quella descritta negli studi precedenti.

L'utilizzo dei dati satellitari ha consentito di ricostruire due distinte linee di costa medie per il 2002, offrendo un dettaglio temporale non disponibile nelle ortofoto pubbliche considerate. L'avanzamento medio di 58 m in P1 non è quantificabile attraverso la sola analisi post-intervento, che assume come riferimento una configurazione già ampliata dal ripascimento. Il successivo arretramento netto medio di circa 46 m fino al 2026 va quindi interpretato rispetto a questa condizione iniziale. Inoltre, in P1 l'LRR è positivo sull'intera serie 1984–2026 (+0,3 m/anno), ma negativo nel periodo 2002–2026 (−1,6 m/anno), evidenziando l'importanza di distinguere le fasi dell'evoluzione. La media post-ripascimento del 2002 comprende anche i mesi successivi ai lavori e non ne isola l'effetto immediato.

La copertura parziale del 2026 richiede cautela nell'interpretazione dei risultati recenti. Ricalcolando l'LRR sul periodo 2015–2025, P1 mantiene il maggiore arretramento medio in entrambe le serie: il tasso passa da −1,1 a −1,2 m/anno per Landsat e da −1,5 a −1,6 m/anno per Sentinel-2. Negli altri settori il segno delle tendenze medie rimane invariato, tranne in P4 per Sentinel-2, dove l'LRR passa da +0,07 a −0,2 m/anno. La sensibilità alla scelta dell'estremo temporale riguarda quindi anche l'interpretazione delle tendenze più deboli. Tale verifica non consente tuttavia di distinguere l'effetto del campionamento stagionale da un'effettiva variazione della spiaggia nel 2026.

La serie Landsat ha consentito di ricostruire l'evoluzione pluridecennale della linea di costa del Poetto nelle fasi precedente e successiva al ripascimento e il confronto con Sentinel-2 ha permesso di valutare la coerenza delle tendenze nel periodo recente. La frequenza delle acquisizioni satellitari integra il dettaglio spaziale delle ortofoto e permette di approfondire passaggi temporali, come la variazione pre/post ripascimento del 2002. Le tendenze di minore entità devono tuttavia essere interpretate con cautela, perché sensibili al periodo considerato e potenzialmente influenzate dalla distribuzione stagionale delle acquisizioni. Le linee di costa medie annuali e gli indicatori della loro evoluzione costituiscono dati di interesse pubblico, potenzialmente integrabili nei portali cartografici regionali a supporto del monitoraggio e della gestione costiera.

Riferimenti bibliografici

1. Virdis, S.G.P., Oggiano, G., Disperati, L.: A Geomatics Approach to Multitemporal Shoreline Analysis in Western Mediterranean: The Case of Platamona-Maritza Beach (Northwest Sardinia, Italy). Journal of Coastal Research 28(3), 624–640 (2012).
2. Meli, M., Vecchi, E., Romagnoli, C.: Shoreline evolution in a low-lying coastal region under anthropogenic influence. Marine Geology 492, 107679 (2026).
3. Anim, M., Aninakwah, I., Addison-Akotoye, E.: Coastal erosion dynamics along the central coastline of Ghana (2000–2024): a DSAS-based assessment of ecosystem service implications and coastal management. Frontiers in Marine Science 13, 1871973 (2026).
4. Vos, K., Splinter, K.D., Harley, M.D., Simmons, J.A., Turner, I.L.: CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. Environmental Modelling & Software 122, 104528 (2019).
5. Theron, D., Theron, A.K.: Monitoring and Analysis of South African Shoreline Dynamics Using Satellite Imagery. Estuaries and Coasts 49, 30 (2026).
6. Rastgou, S., Etemadi, H., Abbasi, E., Amoonia, H.: Three decades of shoreline dynamics in the northern Persian Gulf: A multi-estuary assessment using Landsat, MNDWI, and DSAS metrics. Regional Studies in Marine Science 101, 105231 (2026).
7. Brown, S., O'Dea, A., Conery, I., Brodie, K.: Assessing shorelines extracted from satellite imagery using coincident terrestrial lidar linescans. Coastal Engineering 199, 104718 (2025).
8. Mikkelsen, A.B., Nicolow, J.C., Murray, K.D., Vitousek, S., Moskvichev, R.U., Anderson, T.R., Fletcher, C.H.: Resolving uncertainty in satellite-derived shorelines of a reef-lined beach using high spatiotemporal resolution topographic surveys. Scientific Reports 16, 24043 (2026).
9. Usai, A., Trogu, D., Porta, M., Demuro, S., Simeone, S.: 70 Years of Shoreline Changes in Southern Sardinia (Italy): Retreat and Accretion on 79 Mediterranean Microtidal Beaches. Water 17(17), 2517 (2025).
10. Biondo, M., Buosi, C., Trogu, D., Mansfield, H., Vacchi, M., Ibba, A., Porta, M., Ruju, A., De Muro, S.: Natural vs. Anthropic Influence on the Multidecadal Shoreline Changes of Mediterranean Urban Beaches: Lessons from the Gulf of Cagliari (Sardinia). Water 12(12), 3578 (2020).
11. De Muro, S., Porta, M., Pusceddu, N., Frongia, P., Passarella, M., Ruju, A., Buosi, C., Ibba, A.: Geomorphological processes of a Mediterranean urbanized beach (Sardinia, Gulf of Cagliari). Journal of Maps 14, 114–122 (2018).
12. ISPRA: *Annuario dei dati ambientali 2017*. Capitolo 9, Idrosfera, p. 158. ISPRA, Roma (2018).
13. Provincia di Cagliari: *Il Poetto: una spiaggia, una storia*. Provincia di Cagliari, Cagliari (2002).
14. Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S.: Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091, 104 pp. U.S. Geological Survey, Reston (2021).
15. Vos, K., Splinter, K.D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E.C., Luijendijk, A.P., Calkoen, F., Almeida, L.P., Pais, D., Klein, A.H.F., Mao, Y., Harris, D., Castelle, B., Buscombe, D., Vitousek, S.: Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. Communications Earth & Environment 4, 345 (2023).