

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea Magistrale in Fisica del Sistema Terra

Dinamiche di accumulo delle plastiche galleggianti al largo del delta del Po

Relatore:

Prof. Nadia Pinardi

Correlatori:

Giovanni Coppini

Inês Peres Rodrigues Mateus

Presentata da:

Brugali Fabio

Sessione II
Anno accademico 2025-2026

Desidero ringraziare i docenti che mi hanno accompagnato in questo percorso, condividendo con disponibilità conoscenze, competenze ed esperienza scientifica.

Ringrazio:

Natale Alberto Carassi

Maria Alina Berardinelli e Massimo Nespoli

Alberto Armigliato

Giorgio Spada

Mirko degli Esposti

Angelo Carbone e Fabio Ferrari

Samuele Sanna

Luca Clissa e Claudia Sala

Gastone Castellani, Daniele Remondini e Nico Curti

Salvatore Pascale e Paolo Ruggeri

Tiziano Maestri e Federico Porcù

...e Nadia Pinardi per il tempo prezioso che mi ha dedicato, e per la fiducia con cui ha sostenuto il mio lavoro.

SOMMARIO

L'inquinamento da materiale plastico galleggiante rappresenta una pressione crescente sugli ambienti marini costieri, soprattutto nelle aree in cui apporti fluviali, circolazione superficiale e morfologia costiera possono favorire il trasporto e la concentrazione dei detriti. Il delta del Po costituisce un contesto particolarmente significativo, poiché immette nel Mare Adriatico settentrionale acqua dolce, sedimenti e materiale particellato, generando un pennacchio fluviale superficiale (plume) dinamico e riconoscibile da satellite.

Questa tesi analizza, mediante immagini multispettrali Sentinel-2, la possibilità di individuare anomalie radiometriche superficiali compatibili con la presenza di materiale galleggiante, potenzialmente comprendente anche detriti plastici. Lo studio si concentra sull'area marina antistante il delta del Po nei periodi aprile–maggio e agosto–settembre 2025. Le scene sono state sottoposte a una procedura di pre-analisi finalizzata a rendere confrontabili le immagini, limitare l'analisi al dominio marino e ridurre l'influenza delle aree costiere.

Le anomalie sono state individuate mediante “l'indice dei detriti galleggianti” (FDI), sensibile agli incrementi di riflettanza nel vicino infrarosso rispetto allo sfondo acquatico. Poiché valori elevati dell'indice possono essere prodotti anche da diversi fattori confondenti della scena, come torbidità, materiale organico, o condizioni radiometriche non ideali locali, l'FDI non è stato interpretato come prova diretta della presenza di plastica, ma è stato invece utilizzato come indicatore preliminare, integrato con soglie progressive, valutazione della distribuzione dei valori FDI, controllo RGB e valutazione spaziale e contestuale dei segnali.

Il confronto tra le scene mostra che la risposta dell'FDI è fortemente condizionata dalla configurazione del plume del Po. Nelle scene caratterizzate da plume esteso o radiometricamente attivo, la soglia FDI maggiore di zero risulta poco discriminante, mentre i segnali più significativi si collocano nella parte alta della distribuzione positiva. I candidati più coerenti tendono a disporsi lungo i margini del plume e nelle fasce di transizione tra acque fluviali torbide e acque marine più esterne, suggerendo un possibile legame con strutture dinamiche superficiali favorevoli al trasporto e all'allineamento del materiale galleggiante.

I risultati non consentono di attribuire con certezza le anomalie osservate alla presenza di plastica, ma mostrano che l'integrazione tra Sentinel-2, FDI e analisi contestuale può fornire un metodo operativo utile per selezionare candidati compatibili con possibili accumuli superficiali. In un ambiente complesso come quello del delta del Po, l'identificazione dei segnali più significativi richiede quindi un approccio prudente e multicriterio, capace di distinguere le anomalie più coerenti dalle risposte diffuse associate al plume e ad altri elementi confondenti.

ABSTRACT

Pollution from floating plastic debris is placing increasing pressure on coastal marine environments, particularly in areas where river inflows, surface circulation and coastal morphology can facilitate the transport and concentration of debris. The Po delta is a particularly relevant setting for this type of analysis, as it discharges freshwater, sediments and particulate matter into the northern Adriatic Sea, generating a dynamic surface plume that is often clearly visible from satellite. The interaction between river and marine waters can also produce fronts, transition zones and convergence areas, which may favor the temporary accumulation of floating debris.

This thesis analyses the possibility of identifying surface radiometric anomalies consistent with the presence of floating material using Sentinel-2 multispectral imagery. The study focuses on the marine area off the Po delta during the periods April–May and August–September 2025. The images underwent a pre-processing procedure designed to ensure comparability between the different scenes, limit the analysis to the marine domain and reduce the influence of the more ambiguous coastal areas. The anomalies were identified using the Floating Debris Index (FDI), an index sensitive to increases in near-infrared reflectance relative to the aquatic background. As high values of the index can also be caused by suspended sediments, scum, organic matter, shallow waters or sub-optimal radiometric conditions, the FDI was not interpreted as direct evidence of the presence of plastic. Instead, it was used as a preliminary indicator, supplemented by progressive thresholds, evaluation of the distribution of FDI values, RGB checks, and spatial evaluation of the signals.

A comparison of the scenes shows that the FDI response is strongly influenced by the configuration of the Po River plume. In scenes characterized by an extensive or radiometrically active plume, the simple threshold $FDI > 0$ proves to be of limited discriminatory power, whilst the most significant signals are found in the upper part of the positive distribution. The most consistent candidates tend to be located along the edges of the plume and in the transition zones between turbid river waters and the more outer marine waters, suggesting a possible link with dynamic surface structures that favor the transport and alignment of floating material.

The results do not allow the observed anomalies to be attributed with certainty to the presence of plastic, but they show that the integration of Sentinel-2, the Floating Debris Index and contextual analysis can provide a useful operational method for selecting sites consistent with possible surface accumulations. In a complex environment such as the Po delta, identifying the most significant signals therefore requires a cautious, multi-criteria approach capable of distinguishing the most consistent anomalies from the diffuse responses associated with the plume and other confounding elements in the scene.

INDICE

Introduzione.....	1
1.1 IL PROBLEMA DEL RIFIUTO PLASTICO GALLEGGIANTE	1
1.1.1 Trasporto e accumulo dei rifiuti plastici negli ambienti costieri	1
1.1.2 Il contesto del Mare Adriatico e del Delta del Po	2
1.2 L'AREA DI STUDIO	3
1.3 DINAMICHE DI TRASPORTO DEI MATERIALI GALLEGGIANTI	5
1.3.1 Circolazione superficiale	6
1.3.2 Fronti del plume e zone di convergenza.....	8
1.4 TELERILEVAMENTO DEL MATERIALE GALLEGGIANTE.....	10
1.4.1 Il programma Copernicus e Sentinel-2	11
1.4.1 Utilizzo di Sentinel-2 nel presente studio.....	12
Dati e metodi.....	13
2.1 PRE-ELABORAZIONE IN PIATTAFORMA APPLICATIVA SENTINEL (SNAP).....	16
2.1.1 Mascheramento dell'acqua	17
2.1.2 Esclusione delle superfici emerse e fascia costiera.....	18
2.2 CALCOLO DELL' INDICE DEI DETRITI GALLEGGIANTI (FDI)	19
2.3 PROCEDURA INDIVIDUAZIONE E SCELTA CANDIDATI	21
2.3.1 Verifica preliminare scena tramite visualizzazione RGB.....	22
2.3.2 Criteri di Individuazione delle anomalie.....	22
2.3.3 Esclusione degli elementi confondenti.....	24
2.3.4 Classificazione operativa per selezione dei candidati.....	25
Analisi e discussione	26
3.1 ANALISI PRELIMINARE RGB E SELEZIONE SCENE RAPPRESENTATIVE.....	27
3.1.1 Analisi stagionale dei meccanismi di accumulo	31
3.2 SCENE RAPPRESENTATIVE	33
3.2.1 SCENA DEL 22 APRILE 2025	33
3.2.2 SCENA DEL 14 MAGGIO 2025.....	38
3.2.3 SCENA DEL 12 AGOSTO 2025	43
3.2.4 SCENA DEL 06 SETTEMBRE 2025	48
Conclusioni e future ricerche	53

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1 Produzione cumulativa in milioni di tonnellate, utilizzo e destino finale delle plastiche prodotte tra il 1950 e il 2015	1
Fig. 1.2 Processi naturali che influenzano la distribuzione e il destino della plastica nell'ambiente marino	2
Fig. 1.3 Schema delle principali sorgenti e dei principali processi di trasporto e accumulo dei rifiuti plastici	3
Fig. 1.4 Inquadramento geografico dell'area di studio.....	4
Fig. 1.5 Schema semplificato della circolazione superficiale nell'Adriatico	6
Fig. 1.6 Plume sedimentario del Po nel Mare Adriatico	9
Fig. 1.7 Confronto delle curve di riflettanza da telerilevamento.....	10
Fig. 1.8 Bande spettrali del sensore MSI della missione Sentinel-2	11
Fig. 2.1 Scene Sentinel-2 L2A acquisite sul tile T32TQQ.....	13
Fig. 2.2 Caratteristiche spettrali e spaziali delle bande Sentinel-2/MSI.....	14
Fig. 2.3 Schema indicativo della procedura operativa di individuazione e selezione dei candidati.....	15
Fig. 2.4 Definizione della regione di interesse mediante ritaglio spaziale della scena Sentinel-2	16
Fig. 2.5 Bande e layer Sentinel-2 utilizzati nelle diverse fasi dell'analisi.....	17
Fig. 2.6 Risultato dell'applicazione della maschera dell'acqua sulla scena Sentinel-2.....	18
Fig. 2.7 Effetto del mascheramento delle superfici emerse e area costiera sul ritaglio.....	19
Fig. 2.8 Formulazione dell'FDI e bande Sentinel-2/MSI utilizzate	20
Fig. 2.9 Criteri interpretativi dei valori dell'FDI.....	21
Fig. 2.10 Definizione operativa delle soglie candidate per l'analisi della distribuzione FDI	23
Fig. 2.11 Elementi confondenti nella selezione dei candidati	24
Fig. 2.12 Classi operative utilizzate nella selezione dei candidati	25
Fig. 3.1 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di APRILE 2025	27
Fig. 3.2 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di MAGGIO 2025	28
Fig. 3.3 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di AGOSTO 2025	29
Fig. 3.4 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di SETTEMBRE 2025	30
Tavola 1.a Analisi della scena Sentinel-2 del 22 aprile 2025: distribuzione FDI e soglie operative	33
Tavola 1.b Analisi della scena Sentinel-2 del 22 aprile 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati	35
Tavola 1.c Analisi della scena Sentinel-2 del 22 aprile 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati.....	36
Fig. 3.5 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 22 aprile 2025	37
Tavola 2.a Analisi della scena Sentinel-2 del 14 maggio 2025: distribuzione FDI e soglie operative.....	38
Tavola 2.b Analisi della scena Sentinel-2 del 14 maggio 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati	40
Tavola 2.c Analisi della scena Sentinel-2 del 14 maggio 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati	41

Fig. 3.6 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 14 maggio 2025.....	42
Tavola 3.a Analisi della scena Sentinel-2 del 12 agosto 2025: distribuzione FDI e soglie operative	43
Tavola 3.b Analisi della scena Sentinel-2 del 12 agosto 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati	45
Tavola 3.c Analisi della scena Sentinel-2 del 12 agosto 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati.....	46
Fig. 3.7 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 12 agosto 2025	47
Tavola 4.a Analisi della scena Sentinel-2 del 06 settembre 2025: distribuzione FDI e soglie operative	48
Tavola 4.b Analisi della scena Sentinel-2 del 06 settembre 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati	50
Tavola 4.c Analisi della scena Sentinel-2 del 06 settembre 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati.....	51
Fig. 3.8 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 06 settembre 2025	52

Molte sono le volte che l'onda fugge il luogo della sua creazione, e l'acqua non si muove dal sito a similitudine dell'onda fatta in maggio nelle biade dal corso dei venti, che si vede correre l'onda per le campagne, e le biade non si muovono dal loro sito.

Leonardo da Vinci (Solmi, 1976, p.59)

Capitolo 1

Introduzione

1.1 IL PROBLEMA DEL RIFIUTO PLASTICO GALLEGGIANTE

L'inquinamento da plastica è una delle principali pressioni antropiche sugli ecosistemi terrestri e marini. La diffusione di questo materiale è legata alla sua leggerezza, resistenza e basso costo, che ne hanno favorito un impiego crescente, soprattutto in prodotti monouso e imballaggi. Secondo Geyer et al. (2017), tra il 1950 e il 2015 sono state prodotte circa 8300 milioni di tonnellate di plastica vergine, generando circa 6300

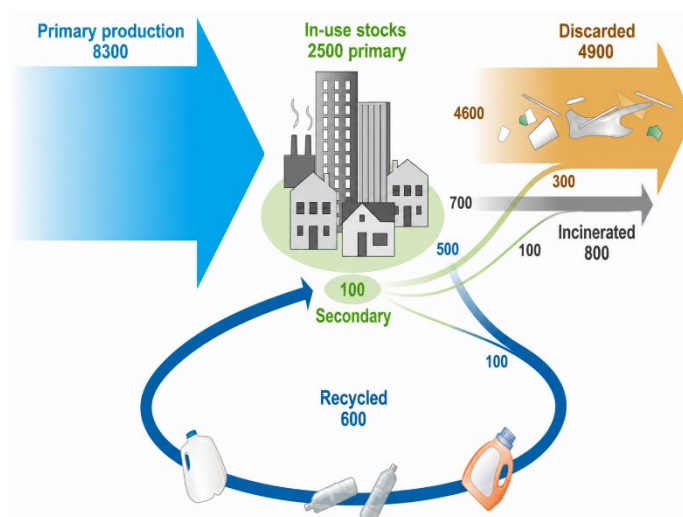


Fig. 1.1 Produzione cumulativa in milioni di tonnellate, utilizzo e destino finale delle plastiche prodotte tra il 1950 e il 2015, con distinzione tra quota ancora in uso, riciclo, incenerimento e accumulo in discarica o nell'ambiente. @Geyer et al. (2017).

milioni di tonnellate di rifiuti plastici; solo il 9% è stato riciclato, mentre la parte restante è stata incenerita, accumulata in discarica o dispersa nell'ambiente (Fig. 1.1). Borrelle et al. (2020) stimano inoltre che nel 2016 siano entrate negli ambienti acquatici globali tra 19 e 23 milioni di tonnellate di rifiuti plastici. In ambiente marino si distinguono generalmente microplastiche e

macroplastiche: il presente lavoro si concentra su queste ultime, cioè sui manufatti galleggianti superficiali potenzialmente trasportati dalle correnti e rilevabili indirettamente tramite osservazioni satellitari.

1.1.1 Trasporto e accumulo dei rifiuti plastici negli ambienti costieri

Gran parte della plastica presente in mare proviene da sorgenti terrestri (Fig. 1.2). I

fiumi rappresentano il principale collegamento tra bacini idrografici antropizzati ed ecosistemi marini, trasportando verso la costa rifiuti dispersi nell'ambiente. Meijer et al. (2021) stimano che oltre 1000 fiumi siano responsabili dell'80% delle emissioni fluviali globali di plastica, con un flusso complessivo compreso tra 0,8 e 2,7 milioni di tonnellate all'anno. Una volta raggiunto il mare, il destino della plastica dipende da correnti, vento, moto ondoso e caratteristiche del materiale.

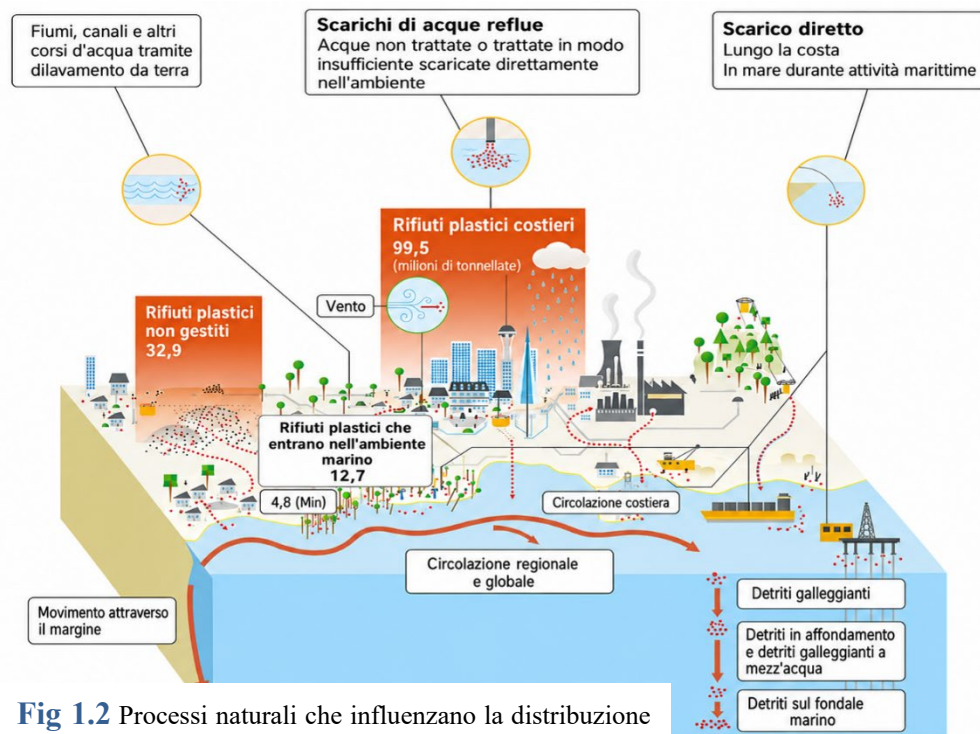


Fig 1.2 Processi naturali che influenzano la distribuzione e il destino della plastica nell'ambiente marino, tra cui trasporto superficiale, frammentazione, affondamento e interazione con correnti e moto ondoso. @GRID-Arendal / UNEP

Le aree costiere rappresentano zone di accumulo particolarmente rilevanti: Onink et al. (2021) evidenziano che almeno il 77% della plastica galleggiante introdotta da sorgenti terrestri rimane spiaggiata o confinata nelle zone costiere entro i primi cinque anni. In questo quadro, delta, estuari e plume fluviali assumono un ruolo importante perché fronti e convergenze superficiali possono favorire l'accumulo temporaneo di materiale galleggiante.

1.1.2 Il contesto del Mare Adriatico e del Delta del Po

Il Mare Adriatico rappresenta un'area particolarmente significativa per lo studio dei rifiuti plastici galleggianti, grazie alla sua natura semi-chiusa, agli apporti fluviali e

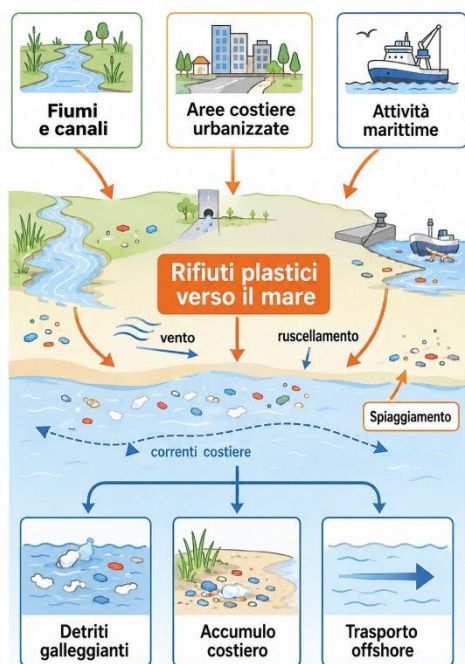


Fig. 1.3 Schema delle principali sorgenti e dei principali processi di trasporto e accumulo dei rifiuti plastici verso l'ambiente marino costiero. @Liubartseva et al. (2016)

all'elevata pressione antropica lungo le coste. Secondo Liubartseva et al. (2016), circa il 40% degli input di plastica nel bacino deriva dai fiumi, un ulteriore 40% dalle popolazioni costiere e il restante 20% dalle attività di navigazione (Fig. 1.3). Nel settore settentrionale emerge il Delta del Po, indicato come uno dei principali punti di accumulo dei detriti galleggianti nell'Adriatico, con flussi costieri simulati dell'ordine di $70 \text{ kg km}^{-1} \text{ giorno}^{-1}$ e valori più elevati nel periodo estivo. Il Po convoglia verso il mare acqua, sedimenti e potenziali rifiuti plastici provenienti da un bacino densamente popolato e fortemente antropizzato. Atwood et al. (2019) mostrano che le particelle plastiche emesse dal fiume

tendono ad accumularsi rapidamente nelle aree costiere adiacenti al delta, seguendo la dinamica del plume fluviale. Per queste ragioni il Delta del Po costituisce un caso di studio adatto all'applicazione di tecniche satellitari per l'individuazione di possibili materiali plastici galleggianti.

1.2 L'AREA DI STUDIO

L'area di studio è localizzata nel Mare Adriatico settentrionale, in prossimità del delta del Po, uno dei principali sistemi deltizi del bacino mediterraneo per apporto di acqua dolce, sedimenti sospesi e materiale particellato (Boldrin et al., 2005). Il settore analizzato comprende la fascia marina antistante le principali bocche del Po e l'area costiera immediatamente adiacente (Fig. 1.4), dove l'interazione tra deflusso fluviale e acque marine genera condizioni fisiche e ottiche molto variabili.

L'analisi è stata concentrata su scene Sentinel-2 acquisite nei mesi di aprile–maggio e agosto–settembre 2025, per confrontare configurazioni stagionali differenti del sistema delta del Po–Nord Adriatico. Il Nord Adriatico è caratterizzato da bassi fondali, limitata profondità media e forte influenza degli apporti fluviali. In questo contesto, il Po rappresenta una sorgente dominante di acqua dolce e sedimenti, contribuendo alla

formazione di un plume superficiale spesso riconoscibile nelle immagini satellitari per la diversa torbidità rispetto alle acque marine più esterne.

SSS



Fig. 1.4 Inquadramento geografico dell'area di studio, con localizzazione del Mare Adriatico settentrionale, del Delta del Po e del settore offshore analizzato. @Elaborazione grafica su base cartografica satellitare.

La presenza del plume rende l'area particolarmente adatta all'analisi da remoto, ma introduce anche una maggiore complessità interpretativa: sedimenti sospesi, materiale organico e variazioni di torbidità possono modificare la risposta radiometrica della superficie marina. Studi satellitari recenti mostrano infatti che la distribuzione della torbidità e del materiale sospeso nel prodelta del Po è fortemente influenzata dalla portata fluviale e dalle condizioni meteo-marine (Brando et al., 2015; Braga et al., 2017; Vona et al., 2025).

Dal punto di vista oceanografico, l'area rientra nel sistema di circolazione dell'Adriatico, dominato da una circolazione generale ciclonica e dalla corrente costiera occidentale diretta prevalentemente verso sud lungo il margine italiano (Zavatarelli e Pinardi, 2003). In prossimità del delta del Po, questa circolazione

interagisce con morfologia costiera, bassi fondali, vento e apporti fluviali, rendendo il settore favorevole allo studio delle relazioni tra plume, dinamica costiera e possibile concentrazione di materiale galleggiante superficiale.

1.3 DINAMICHE DI TRASPORTO DEI MATERIALI GALLEGGIANTI

Il materiale galleggiante presente in ambiente marino, sia di origine naturale sia antropica, non si distribuisce in modo casuale sulla superficie del mare, ma tende a essere trasportato, disperso o concentrato in funzione della dinamica superficiale. Correnti, vento, moto ondoso, gradienti di densità, fronti e zone di convergenza controllano infatti il movimento dei corpi galleggianti e possono determinare la formazione di aree preferenziali di accumulo. Nel caso delle plastiche galleggianti, questi processi risultano particolarmente importanti perché la plastica, avendo spesso densità inferiore o prossima a quella dell'acqua marina, può permanere nello strato superficiale ed essere trasportata per tempi più o meno lunghi dalle correnti e dalle forzanti atmosferiche (van Sebille et al., 2020).

In ambiente costiero, la dinamica del materiale galleggiante è ancora più complessa rispetto al mare aperto. La presenza della costa, dei bassi fondali, delle foci fluviali, dei plume torbidi, delle correnti litoranee e delle variazioni del vento genera infatti un sistema fortemente variabile nello spazio e nel tempo. Le aree prossime alle foci fluviali rappresentano zone particolarmente sensibili, poiché i fiumi possono agire sia come sorgenti di materiale verso il mare, sia come elementi capaci di modificare la circolazione locale attraverso l'immissione di acque dolci, sedimenti sospesi e materiale particellato.

Nel caso del delta del Po, l'interazione tra apporti fluviali e Mare Adriatico settentrionale crea un contesto fisico e radiometrico molto dinamico. Il plume del Po introduce in mare acque a bassa salinità e spesso caratterizzate da elevata torbidità, generando gradienti superficiali rispetto all'acqua marina circostante. Tali gradienti possono essere associati a fronti di salinità, densità e torbidità, lungo i quali il materiale galleggiante può essere trasportato, allineato o temporaneamente concentrato. Questa dinamica è rilevante per l'interpretazione delle anomalie osservate da satellite, poiché un segnale radiometrico compatibile con materiale galleggiante assume maggiore plausibilità quando si colloca in prossimità di strutture fisiche capaci di favorire accumulo superficiale.

Nel presente lavoro, quindi, la distribuzione dei candidati individuati tramite FDI non viene interpretata esclusivamente sulla base del valore radiometrico, ma anche in relazione al contesto dinamico della scena. In particolare, la posizione delle anomalie rispetto alla circolazione superficiale, ai margini del plume e alle zone di transizione tra acque fluviali torbide e acque marine più esterne costituisce un elemento centrale per distinguere segnali potenzialmente coerenti da risposte diffuse o ambigue della superficie marina.

1.3.1 Circolazione superficiale

La circolazione superficiale rappresenta uno dei principali fattori che regolano il comportamento dei materiali galleggianti in ambiente marino, influenzandone il trasporto, la dispersione e l'eventuale accumulo in specifiche aree. I detriti presenti sulla superficie del mare, comprese le plastiche galleggianti, sono infatti soggetti all'azione

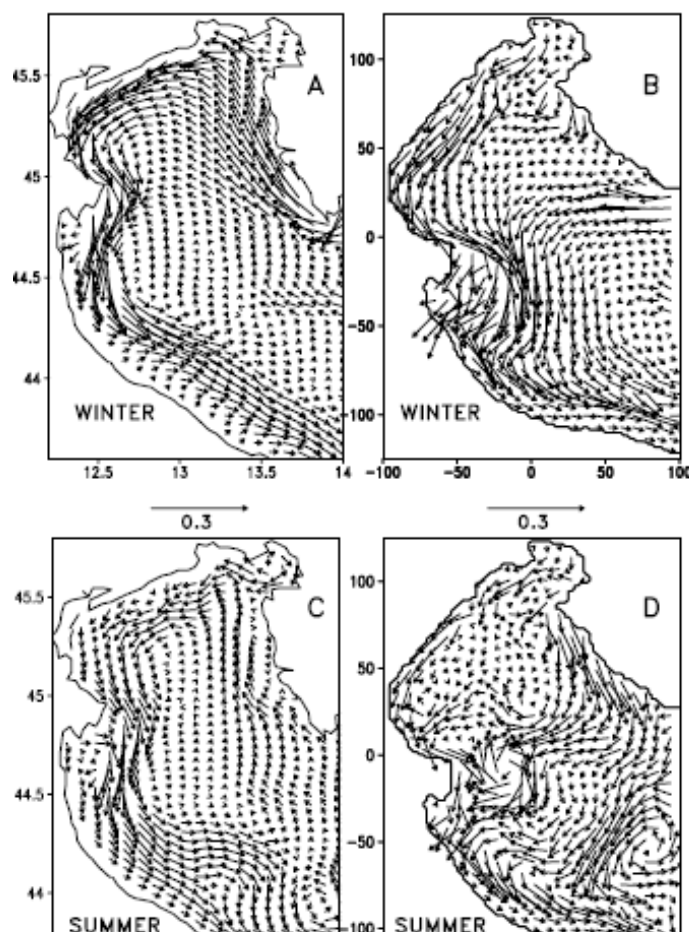


Fig. 1.5 Schema semplificato della circolazione superficiale nell'Adriatico. Figure di sinistra modello intero Adriatico; Figure di destra dettaglio Nord Adriatico. @Zavattarelli e Pinardi (2003)

combinata delle correnti marine, del vento, del moto ondoso e delle caratteristiche geomorfologiche della costa. In ambiente costiero tali processi risultano particolarmente complessi, poiché le correnti interagiscono continuamente con la batimetria, con la morfologia della linea di costa, con gli apporti fluviali e con la variabilità delle condizioni meteorologiche.

Il Mare Adriatico costituisce un bacino semi-chiuso caratterizzato da una forma allungata lungo l'asse nord-ovest/sud-est e collegato al Mediterraneo attraverso lo

Stretto di Otranto. Numerosi studi hanno evidenziato come la sua circolazione generale sia dominata da un sistema a carattere ciclonico (antiorario), nel quale le acque tendono a muoversi verso sud lungo la costa italiana e verso nord lungo quella balcanica. In questo contesto, la Corrente costiera occidentale dell'Adriatico (WACC) assume un ruolo particolarmente importante, poiché rappresenta il principale meccanismo di trasporto lungo il margine occidentale del bacino. Tale corrente contribuisce alla redistribuzione delle acque provenienti dai fiumi, dei sedimenti sospesi e di eventuali materiali galleggianti, favorendone il trasferimento dal Nord Adriatico verso le aree più meridionali (Fig.1.5). La variabilità stagionale della circolazione adriatica è un elemento importante per interpretare la distribuzione del materiale galleggiante. Gli studi classici sulla circolazione dell'Adriatico mostrano infatti che il sistema non è stazionario, ma presenta differenze stagionali legate alla struttura baroclina, al vento, agli scambi attraverso lo Stretto di Otranto e agli apporti fluviali (Artegiani et al., 1997a; Artegiani et al., 1997b; Zavatarelli et al., 2002). Nel settore occidentale, la corrente costiera adriatica rappresenta quindi un meccanismo di trasporto rilevante, ma la sua efficacia nel disperdere o concentrare materiale superficiale dipende dalle condizioni stagionali e dalla configurazione locale del plume del Po (Zavatarelli & Pinardi, 2003). Nel settore settentrionale dell'Adriatico, la dinamica superficiale è fortemente influenzata sia dalla limitata profondità del bacino sia dagli apporti di acqua dolce provenienti dai principali corsi d'acqua. Tra questi, il Po rappresenta la sorgente fluviale dominante e immette in mare grandi quantità di acqua caratterizzata da salinità inferiore rispetto a quella marina. L'ingresso di queste masse d'acqua genera gradienti di salinità e densità che possono modificare la circolazione locale e favorire la propagazione superficiale del plume fluviale. Le simulazioni numeriche e gli studi dedicati alla dinamica adriatica mostrano come gli apporti fluviali lungo la costa occidentale contribuiscano alla formazione di una fascia costiera a bassa salinità, separata dalle acque più esterne da un marcato gradiente trasversale. Inoltre, durante il periodo estivo, la riduzione dell'intensità dei venti può favorire una maggiore estensione verso il largo delle acque influenzate dal Po, ampliando l'area interessata dagli effetti del plume (Zavatarelli e Pinardi, 2003).

È importante sottolineare che la circolazione superficiale non si manifesta come un sistema uniforme e costante nel tempo. Al contrario, la presenza di meandri, ricircoli, deviazioni del flusso e zone a velocità ridotta determina una notevole variabilità spaziale. Tali strutture si sviluppano frequentemente in prossimità dei margini del

plume fluviale o nelle aree di contatto tra masse d'acqua con caratteristiche differenti. Dal punto di vista del trasporto dei materiali galleggianti, queste configurazioni possono avere effetti opposti: in alcuni casi favoriscono la dispersione e l'allontanamento del materiale, mentre in altri possono creare condizioni favorevoli alla sua concentrazione temporanea, soprattutto nelle zone in cui le correnti convergono o rallentano.

Nel delta del Po, la distribuzione dei materiali presenti in superficie è quindi il risultato dell'interazione tra diversi fattori fisici. Gli apporti fluviali introducono acqua dolce, sedimenti e materiale particellato; la corrente costiera occidentale tende a trasportare parte di questi elementi verso sud; il vento può modificare la forma e la posizione del plume, confinandolo lungo la costa oppure favorendone l'espansione verso il largo; infine, il moto ondoso e la deriva superficiale contribuiscono alla redistribuzione del materiale e ai processi di spiaggiamento. L'insieme di queste forzanti genera un sistema altamente dinamico, nel quale i percorsi e le aree di accumulo dei materiali galleggianti possono variare sensibilmente nel tempo.

1.3.2 Fronti del plume e zone di convergenza

I fronti oceanografici possono essere descritti come aree di passaggio tra masse d'acqua che presentano caratteristiche fisiche differenti, ad esempio in termini di temperatura, salinità, densità, torbidità o quantità di materiale sospeso. In ambiente costiero tali strutture si formano frequentemente in seguito all'interazione tra acque fluviali e marine, ma possono essere influenzate anche da fattori quali il vento, le correnti, le maree, i processi di stratificazione della colonna d'acqua e la morfologia del fondale. Dal punto di vista dinamico, i fronti assumono particolare interesse perché rappresentano zone in cui le proprietà dell'acqua cambiano rapidamente nello spazio e dove possono instaurarsi processi di convergenza superficiale. Questi meccanismi tendono a influenzare il trasporto dei materiali galleggianti, favorendone talvolta l'allineamento o la concentrazione lungo le strutture frontali.

Nel caso dei plume fluviali, il fronte coincide generalmente con la zona di contatto tra le acque provenienti dal fiume e quelle marine circostanti. Poiché l'acqua dolce possiede una densità inferiore rispetto all'acqua salata, il plume del Po può essere interpretato come un plume prevalentemente ipopcnale, cioè una massa d'acqua fluviale che si propaga negli strati superficiali al di sopra delle acque marine più dense.

L'interazione tra queste due masse genera gradienti di salinità, densità e torbidità che definiscono la struttura del plume e dei suoi margini (Fig.1.6). Nel delta del Po questo processo è particolarmente evidente, poiché il fiume rappresenta una delle principali sorgenti di acqua dolce e sedimenti del Nord Adriatico. L'elevata presenza di materiale sospeso rende spesso il plume distinguibile nelle immagini satellitari ottiche come una porzione di mare caratterizzata da una torbidità maggiore rispetto alle aree circostanti.

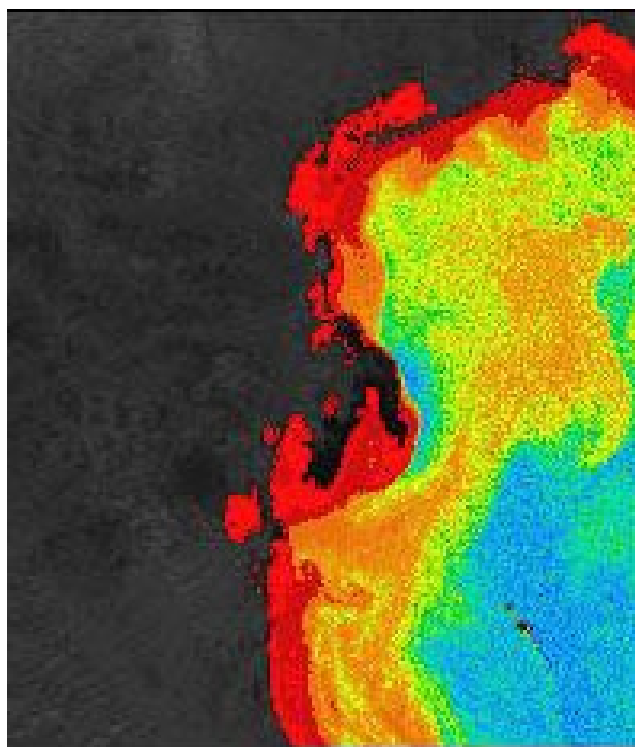


Fig. 1.6 Plume sedimentario del Po nel Mare Adriatico. Il contrasto cromatico mette in risalto la transizione tra le acque fluviali torbide e le acque marine circostanti. @NASA Earthdata.

Gli studi dedicati a questo sistema hanno inoltre evidenziato come la configurazione del plume vari considerevolmente nel tempo, in risposta sia alle variazioni della portata fluviale e del carico sedimentario sia alle condizioni fisiche del bacino ricevente, quali stratificazione, mescolamento, vento e circolazione costiera (Eleveld, 2001). Da ciò deriva che il plume del Po non può essere considerato una struttura fissa, ma un elemento altamente dinamico, la cui forma e distribuzione spaziale dipendono dall'interazione tra fattori fluviali, oceanografici e meteorologici.

Durante la stagione estiva, la maggiore stratificazione della colonna d'acqua e condizioni di vento più debole possono favorire la permanenza delle acque fluviali negli strati superficiali e una maggiore espansione del plume verso il largo. Al contrario, condizioni di vento più intenso e maggiore rimescolamento verticale, anche in occasione di eventi di Bora, possono confinare o destrutturare il plume, modificando rapidamente la posizione dei fronti, delle zone di transizione e delle eventuali aree di convergenza (Eleveld, 2001; Kourafalou, 1999; Marini et al., 2008). Di conseguenza, anche le possibili zone di accumulo del materiale galleggiante possono variare tra primavera, estate e inizio autunno.

1.4 TELERILEVAMENTO DEL MATERIALE GALLEGGIANTE

Il telerilevamento satellitare rappresenta uno strumento particolarmente utile per il monitoraggio del materiale galleggiante superficiale, poiché consente di osservare ampie porzioni di superficie marina con acquisizioni ripetute nel tempo. Nel contesto marino, l'interesse principale non riguarda l'identificazione diretta e certa della composizione del materiale osservato, ma il riconoscimento di anomalie radiometriche superficiali rispetto all'acqua circostante, potenzialmente associate alla presenza di materiale galleggiante naturale o antropico (Topouzelis et al., 2019). Il principio fisico alla base di questo approccio deriva dal diverso comportamento spettrale dell'acqua e dei materiali presenti in superficie (Fig.1.7). L'acqua tende ad assorbire fortemente la radiazione nelle bande del vicino infrarosso e dell'infrarosso a onde corte, mostrando in queste regioni dello spettro valori di riflettanza generalmente bassi. La presenza di elementi galleggianti può invece produrre un incremento locale della riflettanza, generando un segnale anomalo rispetto allo sfondo marino (Biermann et al., 2020; Kikaki et al., 2022).

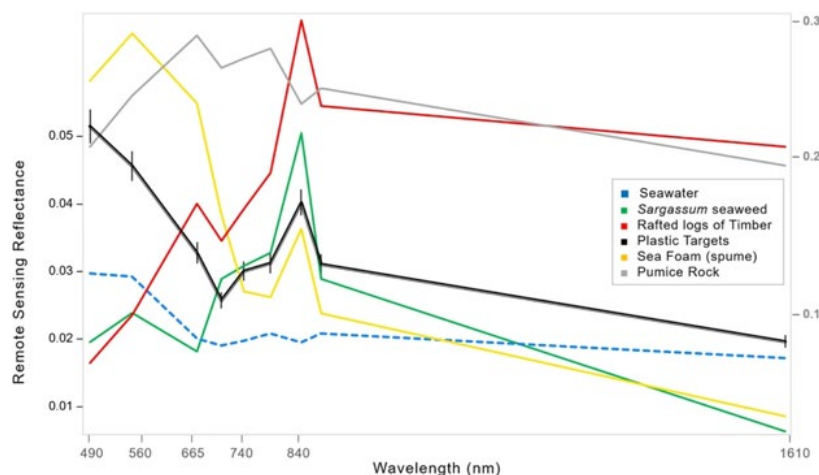


Fig. 1.7 Confronto delle curve di riflettanza da telerilevamento di acqua marina e di diversi materiali galleggianti, considerate tra il visibile, il vicino infrarosso e l'infrarosso a onde corte. La diversa risposta spettrale dei materiali rispetto all'acqua evidenzia il principio alla base dell'individuazione radiometrica dei detriti galleggianti. @Biermann et al. (2020)

1.4.1 Il programma Copernicus e Sentinel-2

Copernicus è il programma europeo di osservazione della Terra che integra dati satellitari, misure in situ e servizi ambientali ad accesso aperto. Nel presente lavoro il programma è rilevante soprattutto perché rende disponibili le immagini Sentinel-2, utilizzate per osservare aree costiere e superfici acquatiche con acquisizioni ripetute nel tempo. Sentinel-2 è una missione ottica multispettrale equipaggiata con il sensore MSI, in grado di acquisire 13 bande spettrali distribuite tra visibile, red-edge, vicino infrarosso e infrarosso a onde corte. Le bande presentano risoluzioni spaziali di 10, 20 e 60 m, con una larghezza di acquisizione di circa 290 km (Drusch et al., 2012; ESA, 2024). Questa combinazione di copertura, dettaglio spaziale e informazione spettrale rende Sentinel-2 particolarmente adatto al monitoraggio delle aree costiere e all'analisi di variazioni radiometriche della superficie marina, approfondite nel presente studio tramite composizioni RGB e indici spettrali (Fig. 1.8).

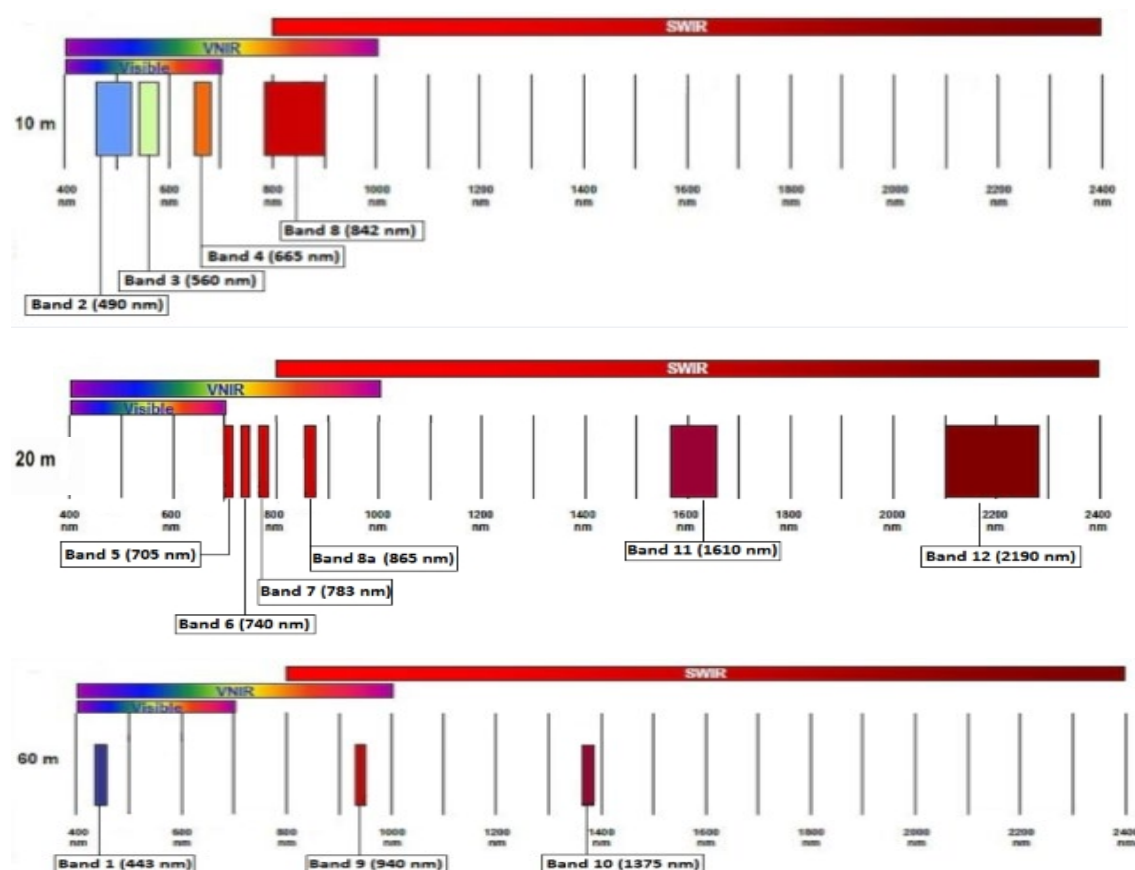


Fig. 1.8 Bande spettrali del sensore MSI della missione Sentinel-2, suddivise in base alla risoluzione spaziale. Lo schema mostra le bande a 10 m, 20 m e 60 m e la loro collocazione spettrale nominale nelle regioni del visibile, del vicino infrarosso e dell'infrarosso a onde corte. I valori riportati in nm sono da intendersi come riferimenti indicativi della missione. @ESA/Copernicus Sentinel-2.

1.4.1 Utilizzo di Sentinel-2 nel presente studio

Nel presente studio Sentinel-2 viene utilizzato come sorgente principale di dati ottici multispettrali per l'analisi delle aree marine e costiere prospicienti il delta del Po. L'interesse per questa missione deriva dalla combinazione tra risoluzione spaziale, ampiezza di acquisizione e disponibilità di bande spettrali distribuite tra il visibile, il vicino infrarosso e l'infrarosso a onde corte. Tali caratteristiche consentono di osservare, all'interno della stessa scena, sia il contesto ottico generale sia variazioni radiometriche più localizzate, potenzialmente associate alla presenza di materiale galleggiante o ad altri elementi superficiali come la plastica diversi dall'acqua circostante (Drusch et al., 2012; Biermann et al., 2020).

Le bande del visibile, in particolare B2 (blu), B3 (verde) e B4 (rosso), sono utilizzate per interpretare la scena dal punto di vista qualitativo, permettendo di riconoscere la distribuzione del plume fluviale, la torbidità dell'acqua, eventuali coperture nuvolose e condizioni di riflessione superficiale che possono influenzare l'analisi. La banda B8, corrispondente al vicino infrarosso (NIR), assume invece un ruolo centrale perché l'acqua marina tende ad assorbire fortemente in questa regione dello spettro, mostrando valori di riflettanza generalmente bassi; di conseguenza, incrementi locali del segnale in questa banda possono indicare la presenza di materiali superficiali.

Capitolo 2

Dati e metodi

Nel presente lavoro sono state utilizzate immagini multispettrali Sentinel-2, Livello-2A per individuare anomalie radiometriche determinate dalla presenza di materiale galleggiante superficiale potenzialmente compatibile con la presenza di plastica, nell'area marina antistante il delta del Po.

Rif.	Data scena	Ora acquisizione	Satellite/sensore	Tile	Copertura nuvolosa
A04	04/04/2025	10:00:29	Sentinel-2B / MSI	T32TQQ	max 5%
A11	11/04/2025	10:00:41	Sentinel-2A / MSI	T32TQQ	max 5%
A22	22/04/2025	10:10:51	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
A29	29/04/2025	10:00:51	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
M01	01/05/2025	10:00:41	Sentinel-2A / MSI	T32TQQ	max 5%
M02	02/05/2025	10:10:41	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
M12	12/05/2025	10:06:11	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
M14	14/05/2025	10:00:29	Sentinel-2B / MSI	T32TQQ	max 5%
M19	19/05/2025	10:00:41	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
M31	31/05/2025	10:00:51	Sentinel-2A / MSI	T32TQQ	max 5%
AG05	05/08/2025	10:05:59	Sentinel-2B / MSI	T32TQQ	max 5%
AG07	07/08/2025	10:00:41	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
AG09	09/08/2025	10:00:41	Sentinel-2A / MSI	T32TQQ	max 5%
AG12	12/08/2025	10:00:29	Sentinel-2B / MSI	T32TQQ	max 5%
AG15	15/08/2025	10:05:59	Sentinel-2B / MSI	T32TQQ	max 5%
S04	04/09/2025	10:05:49	Sentinel-2B / MSI	T32TQQ	max 5%
S06	06/09/2025	10:00:41	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
S11	11/09/2025	10:00:29	Sentinel-2B / MSI	T32TQQ	max 5%
S16	16/09/2025	10:00:41	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%
S18	18/09/2025	10:00:41	Sentinel-2A / MSI	T32TQQ	max 5%
S29	29/09/2025	10:10:01	Sentinel-2C / MSI	T32TQQ	max 5%

Fig. 2.1 Scene Sentinel-2 L2A acquisite sul tile T32TQQ e considerate per la selezione delle immagini idonee all'analisi.

La scelta di Sentinel-2 è legata alla disponibilità di bande nel visibile, nel red-edge, nel vicino infrarosso e nell'infrarosso a onde corte, oltre che a una risoluzione spaziale adeguata (10 m) per applicazioni costiere e marine (Drusch et al., 2012; ESA, 2024). Le scene considerate, acquisite sul tile T32TQQ nei periodi aprile–maggio e agosto–settembre 2025, sono riportate in Fig. 2.1 e sono state selezionate per rappresentare configurazioni stagionali differenti del sistema delta del Po–Nord Adriatico.

La scelta dei prodotti di Livello-2A è stata motivata dalla necessità di lavorare con valori di riflettanza di superficie già sottoposti a correzione atmosferica, quindi più adatti al calcolo di indici spettrali e al confronto radiometrico tra bande diverse (Louis et al., 2016; ESA, 2024).

Le bande utilizzate nell'analisi sono sintetizzate in Fig. 2.2. Le bande B4 (rosso), B3 (verde) e B2 (blu) sono state impiegate per le composizioni RGB di supporto all'interpretazione visiva. Per il calcolo del FDI sono state invece utilizzate le bande B4 (rosso), B6 (red-edge 2), B8 (NIR) e B11 (SWIR1), secondo l'approccio proposto da Biermann et al. (2020). In particolare, la banda B8 (NIR) rappresenta il riferimento principale per evidenziare anomalie positive rispetto allo sfondo acquatico.

BAND PER FDI					
MSI Band n°	Description	S-2A centre λ (nm)	S-2B centre λ (nm)	S-2C centre λ (nm)	Spatial resolution m
B4	Red	664.6	664.9	665.5	10
B6	Red Edge 2	740.5	739.1	741.1	20
B8	NIR	832.8	842.9	834.6	10
B11	SWIR	1613.7	1610.4	1612	20
BAND PER RGB					
MSI Band n°	Description	S-2A centre λ (nm)	S-2B centre λ (nm)	S-2C centre λ (nm)	Spatial resolution m
B2	Blue	492.7	492.3	492.9	10
B3	Green	558.8	559.3	560.6	10
B4	Red	664.6	664.9	665.5	10

Fig. 2.2 Caratteristiche spettrali e spaziali delle bande Sentinel-2/MSI considerate nell'analisi. La sezione superiore riporta le bande utilizzate per il calcolo del FDI, mentre la sezione inferiore indica le bande impiegate per la composizione RGB di supporto all'interpretazione visiva delle scene.

La selezione delle immagini ha privilegiato scene con condizioni favorevoli all'osservazione della superficie marina, in particolare copertura nuvolosa limitata,

ridotta foschia atmosferica, assenza di glint solare marcato e buona leggibilità del plume del Po. Questi aspetti sono rilevanti perché condizioni atmosferiche, radiometriche o meteomarine non ideali possono alterare il segnale e rendere più incerta l'interpretazione delle anomalie superficiali (Topouzelis et al., 2019; Biermann et al., 2020; Kikaki et al., 2022). Il flusso metodologico adottato, sintetizzato in Fig. 2.3, comprende la pre-elaborazione nella Sentinel Application Platform (SNAP), il mascheramento del dominio marino, il calcolo dell'FDI e la successiva selezione dei candidati sulla base di criteri radiometrici, spaziali e contestuali.

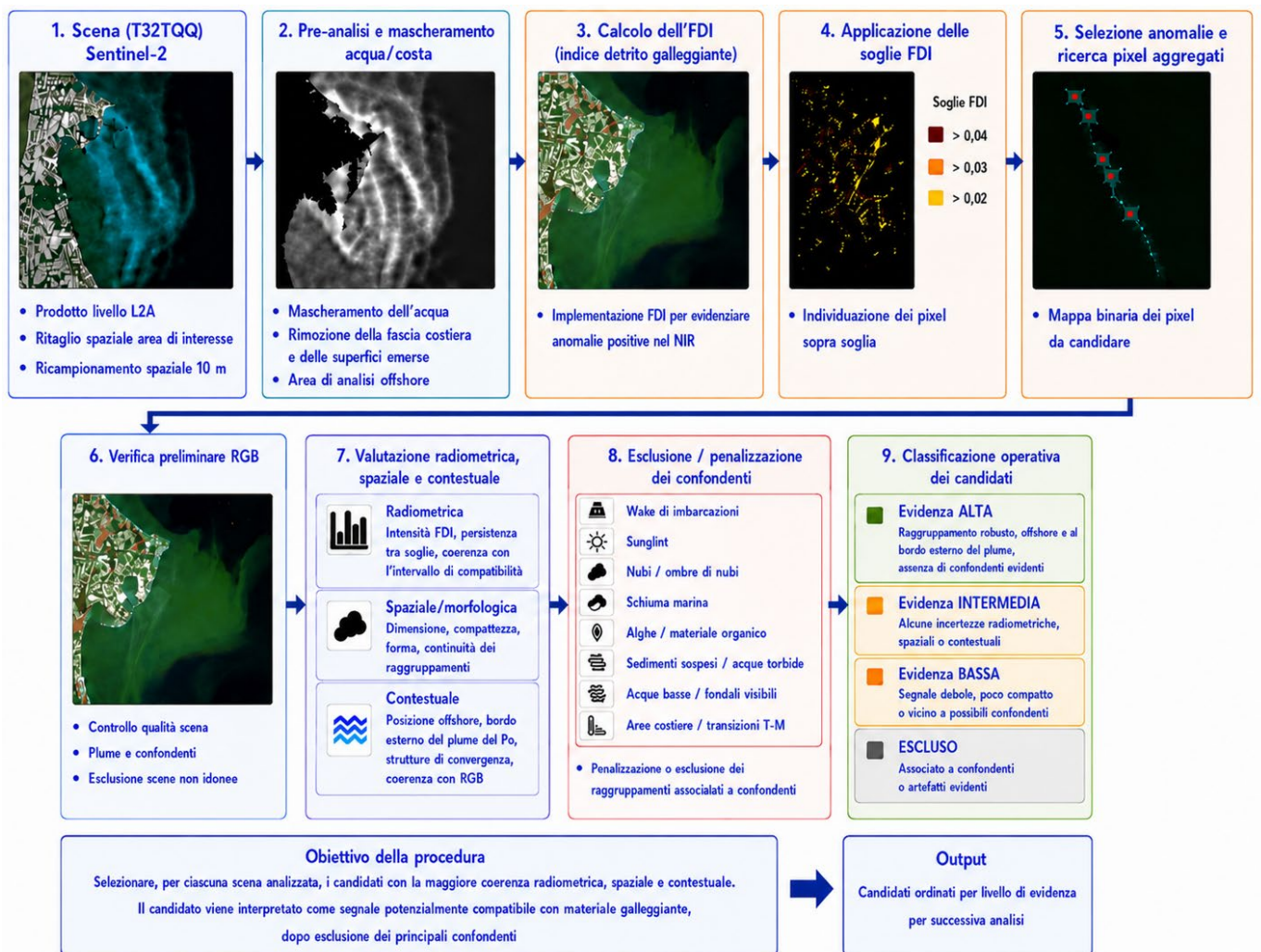


Fig. 2.3 Schema indicativo della procedura operativa di individuazione e selezione dei candidati. Il flusso sintetizza la metodologia adottata: dalle scene Sentinel-2, alla pre-analisi fino alla classificazione finale dei segnali potenzialmente compatibili con materiale galleggiante.

2.1 PRE-ELABORAZIONE IN PIATTAFORMA APPLICATIVA SENTINEL (SNAP)

La pre-elaborazione dei dati Sentinel-2 è stata svolta nella piattaforma applicativa Sentinel (Sentinel Application Platform - SNAP), software sviluppato dall'ESA per la visualizzazione, preparazione e l'elaborazione dei prodotti Sentinel. Questa fase ha avuto lo scopo di preparare i prodotti satellitari in modo coerente, così da renderli utilizzabili nelle successive operazioni di mascheramento, calcolo degli indici radiometrici e selezione dei candidati (ESA SNAP, 2026). L'utilizzo di prodotti Level-2A in SNAP già corretti atmosfericamente ha permesso di lavorare direttamente con riflettanze di superficie, riducendo la necessità di ulteriori passaggi di correzione prima del calcolo degli indici (Louis et al., 2016; ESA, 2024). Dopo l'apertura del prodotto, è stato eseguito un ritaglio spaziale sull'area di studio (Fig.2.4), corrispondente alla porzione del Mare Adriatico settentrionale interessata dall'analisi. Il ritaglio consente di ridurre la dimensione del prodotto, eliminando le aree non pertinenti e rendendo più efficiente il processamento.

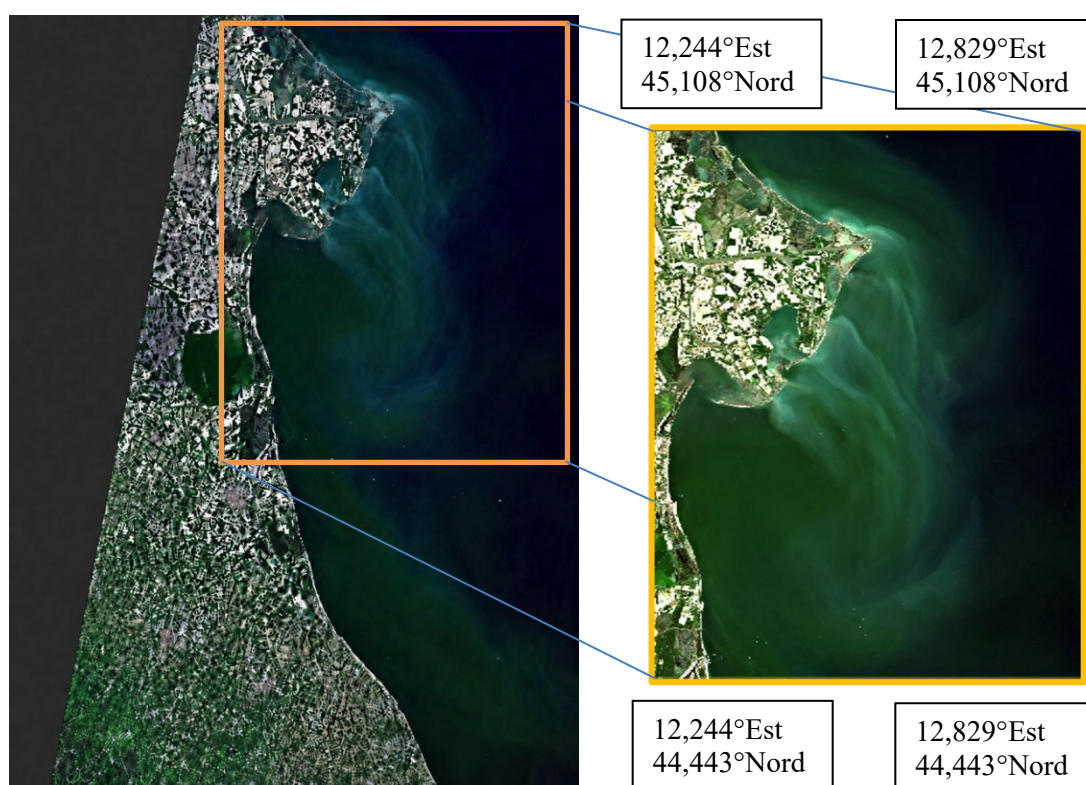


Fig. 2.4 Definizione della regione di interesse mediante ritaglio spaziale della scena Sentinel-2. La scena completa è riportata a sinistra; l'immagine a destra mostra l'area ritagliata utilizzata nelle elaborazioni successive, delimitata dalle coordinate geografiche dei vertici.

Dopo il ritaglio, le bande necessarie sono state ricampionate alla risoluzione spaziale di 10 m (Fig. 2.5). Questo passaggio è necessario perché le bande utilizzate non hanno

Banda / layer	Regione spettrale o funzione	Risoluzione originale	Risoluzione dopo resampling	Utilizzo nel workflow
B2	Blue	10 m	10 m	RGB / controllo visivo
B3	Green	10 m	10 m	RGB / controllo visivo
B4	Red	10 m	10 m	RGB / controllo visivo
B8	NIR	10 m	10 m	Calcolo FDI
B6	Red-edge	20 m	10 m	Baseline FDI
B11	SWIR	20 m	10 m	Baseline FDI
SCL	Scene Classification Layer	20 m	10 m	Mascheramento acqua

Fig. 2.5 Bande e piani Sentinel-2 utilizzati nelle diverse fasi dell'analisi. Sono riportate la funzione spettrale, la risoluzione originale, la risoluzione dopo ricampionamento e l'impiego operativo di ciascuna banda.

tutte la stessa risoluzione originaria: B2, B3, B4 e B8 sono disponibili a 10 m, mentre B6, B11 e la maschera SCL sono disponibili a 20 m (Drusch et al., 2012; ESA, 2024). Il ricampionamento consente quindi di lavorare su una griglia comune e di combinare pixel per pixel le bande impiegate nel calcolo dell'FDI e nelle maschere successive. Parallelamente alla preparazione delle bande per l'analisi quantitativa, è stata predisposta una composizione RGB in colori naturali mediante

le bande B4 (red), B3 (green) e B2 (blue), utilizzata come strumento di controllo qualitativo della scena; questo controllo anche di tipo visivo rappresenta un passaggio

importante nelle applicazioni di remote sensing dedicate ai detriti marini galleggianti, poiché molte classi confondenti possono produrre risposte spettrali simili a quelle dei materiali target (Topouzelis et al., 2019; Biermann et al., 2020; Kikaki et al., 2022).

2.1.1 Mascheramento dell'acqua

Il primo livello di mascheramento dell'acqua è stato realizzato utilizzando un "piano di classificazione della scena" (Scene Classification Layer - SCL) dei prodotti Sentinel-2, Livello-2A. La SCL è un piano generato durante il processamento dei prodotti verso il Livello-2A che assegna a ciascun pixel una classe interpretativa, tra cui acqua, vegetazione, suolo nudo, nubi e ombre di nubi (ESA, 2021; Louis et al., 2016). Nel presente lavoro è stata selezionata la classe 6, corrispondente ai pixel classificati come acqua, in modo da limitare l'analisi radiometrica al dominio marino (Fig. 2.6). È importante precisare che la SCL non è stata interpretata come una mappa tematica di copertura del suolo, ma come un filtro preliminare da integrare con controlli spaziali e visivi. In un'area complessa come il delta del Po, la classificazione automatica può risultare meno stabile in presenza di plume torbidi, bassi fondali, transizioni acqua-

terra e pixel misti (ESA, 2021; Kikaki et al., 2022). Per questo motivo, i plume fluviali non sono stati eliminati automaticamente: essi rappresentano strutture fisiche rilevanti per il trasporto e la possibile concentrazione di materiale galleggiante, e sono stati quindi mantenuti quando coerenti con il contesto della scena.

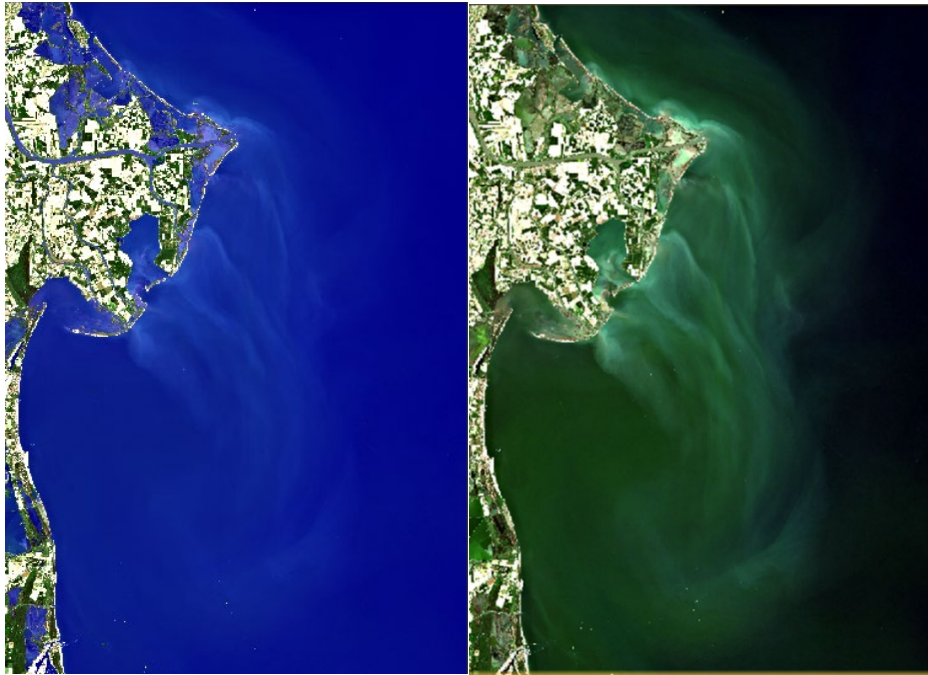


Fig. 2.6 Risultato dell'applicazione della maschera dell'acqua sulla scena Sentinel-2. Il pannello di sinistra evidenzia i pixel mantenuti dopo il mascheramento, limitando l'analisi alle sole superfici acquatiche; il pannello di destra mostra la corrispondente composizione RGB, senza il mascheramento.

2.1.2 Esclusione delle superfici emerse e fascia costiera

Dopo il mascheramento preliminare tramite SCL, è stato applicato un ulteriore filtro, geometrico, di esclusione delle superfici emerse e della fascia costiera (Fig. 2.7). Questo passaggio è distinto dal mascheramento classificativo della SCL: mentre la SCL seleziona i pixel in base a una classe derivata dal processamento del prodotto, l'esclusione costiera agisce sulla base della posizione rispetto alla linea di costa. La distinzione è importante perché, in prossimità della costa, possono comparire pixel misti o segnali radiometrici difficili da interpretare, influenzati da terraferma, spiagge, vegetazione costiera, sedimenti emersi, bassi fondali o strutture antropiche. Poiché l'FDI è sensibile ad anomalie positive nel vicino infrarosso, questi elementi possono produrre falsi positivi non associati a materiale galleggiante (Biermann et al., 2020;

Kikaki et al., 2022). Nel presente lavoro è stato adottato un buffer costiero di 30 pixel. Considerando la griglia a 10 m ottenuta dopo il ricampionamento, tale buffer corrisponde a circa 300 m. Questa scelta rappresenta un compromesso tra la necessità di ridurre l'influenza dei pixel costieri più ambigui e quella di non eliminare porzioni marine potenzialmente rilevanti in prossimità del plume del Po.

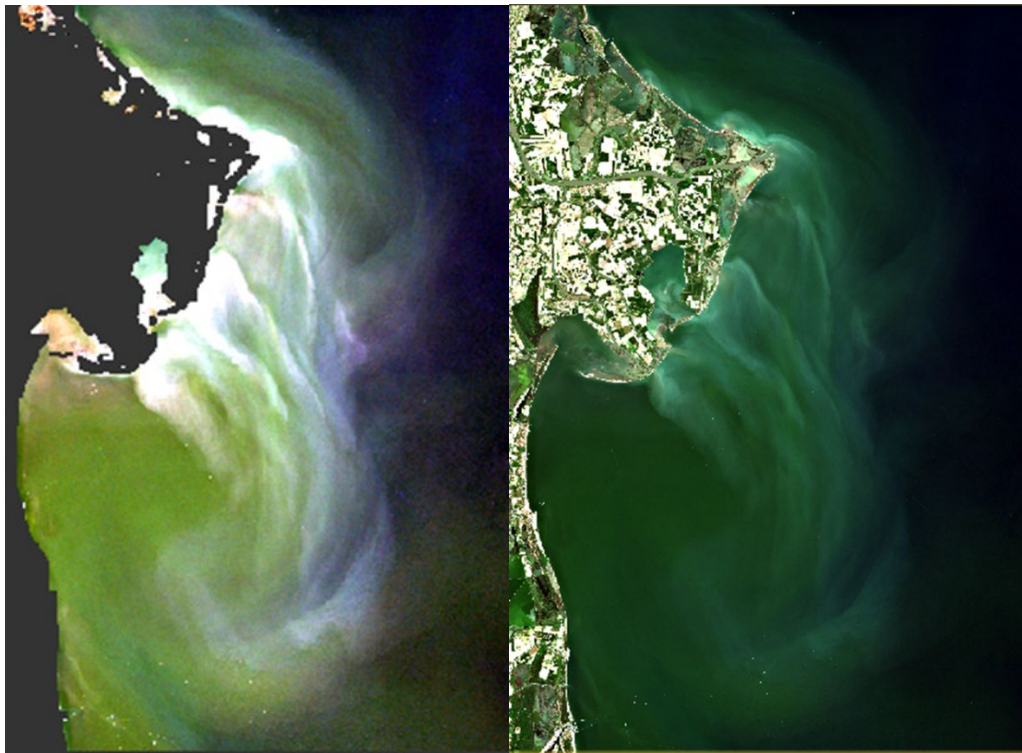


Fig. 2.7 Effetto del mascheramento delle superfici emerse e area costiera sul ritaglio. Il pannello di sinistra mostra la scena dopo l'esclusione delle aree terrestri e della fascia costiera. Il pannello di destra riporta la corrispondente composizione RGB senza mascheramento, utilizzata come riferimento visivo per il controllo dell'area esclusa.

2.2 CALCOLO DELL' INDICE DEI DETRITI GALLEGGIANTI (FDI)

L'indice dei detriti galleggianti (Floating Debris Index – FDI) è un indice spettrale utilizzato per evidenziare anomalie positive nel vicino infrarosso potenzialmente associate alla presenza di materiale galleggiante sulla superficie marina. L'indice è stato introdotto da Biermann et al. (2020) per il rilevamento, tramite dati ottici Sentinel-2, di patch superficiali di plastica e di altri materiali galleggianti. Il principio fisico dell'FDI è legato al diverso comportamento radiometrico dell'acqua e dei materiali presenti sulla superficie.

1. Formula generale										
$FDI = B8 - [B6 + (B11 - B6) \cdot \alpha]$ $\alpha = \left(\frac{\lambda_{B8} - \lambda_{B4}}{\lambda_{B11} - \lambda_{B4}} \right) \cdot 10$ dove B6 = RE2, B8 = NIR, B11 = SWIR1, e λ_{B4}, λ_{B8} e λ_{B11} rappresentano le lunghezze d'onda centrali delle rispettive bande.										
2. Calcolo di α										
<table><thead><tr><th>Sentinel-2A</th><th>Sentinel-2B</th><th>Sentinel-2C</th></tr></thead><tbody><tr><td>$\alpha_{S2A} = \left(\frac{832.8 - 664.6}{1613.7 - 664.6} \right) \cdot 10$</td><td>$\alpha_{S2B} = \left(\frac{832.9 - 664.9}{1610.4 - 664.9} \right) \cdot 10$</td><td>$\alpha_{S2C} = \left(\frac{834.6 - 665.5}{1612.0 - 665.5} \right) \cdot 10$</td></tr><tr><td>$\alpha_{S2A} = \left(\frac{168.2}{949.1} \right) \cdot 10 = 1.7722$</td><td>$\alpha_{S2B} = \left(\frac{168.0}{945.5} \right) \cdot 10 = 1.7768$</td><td>$\alpha_{S2C} = \left(\frac{169.1}{946.5} \right) \cdot 10 = 1.7866$</td></tr></tbody></table>	Sentinel-2A	Sentinel-2B	Sentinel-2C	$\alpha_{S2A} = \left(\frac{832.8 - 664.6}{1613.7 - 664.6} \right) \cdot 10$	$\alpha_{S2B} = \left(\frac{832.9 - 664.9}{1610.4 - 664.9} \right) \cdot 10$	$\alpha_{S2C} = \left(\frac{834.6 - 665.5}{1612.0 - 665.5} \right) \cdot 10$	$\alpha_{S2A} = \left(\frac{168.2}{949.1} \right) \cdot 10 = 1.7722$	$\alpha_{S2B} = \left(\frac{168.0}{945.5} \right) \cdot 10 = 1.7768$	$\alpha_{S2C} = \left(\frac{169.1}{946.5} \right) \cdot 10 = 1.7866$	
Sentinel-2A	Sentinel-2B	Sentinel-2C								
$\alpha_{S2A} = \left(\frac{832.8 - 664.6}{1613.7 - 664.6} \right) \cdot 10$	$\alpha_{S2B} = \left(\frac{832.9 - 664.9}{1610.4 - 664.9} \right) \cdot 10$	$\alpha_{S2C} = \left(\frac{834.6 - 665.5}{1612.0 - 665.5} \right) \cdot 10$								
$\alpha_{S2A} = \left(\frac{168.2}{949.1} \right) \cdot 10 = 1.7722$	$\alpha_{S2B} = \left(\frac{168.0}{945.5} \right) \cdot 10 = 1.7768$	$\alpha_{S2C} = \left(\frac{169.1}{946.5} \right) \cdot 10 = 1.7866$								
3. Forme finali dell'FDI										
$FDI_{S2A} = B8 - [B6 + (B11 - B6) \cdot 1.7722]$										
$FDI_{S2B} = B8 - [B6 + (B11 - B6) \cdot 1.7768]$										
$FDI_{S2C} = B8 - [B6 + (B11 - B6) \cdot 1.7866]$										

MSI Band n°	Description	S-2A centre λ (nm)	S-2B centre λ (nm)	S-2C centre λ (nm)	Spatial resolution m
B 1	C.Aerosol	442.7	442.2	444.2	60
B 2	Blue	492.7	492.3	489	10
B 3	Green	559.8	558.9	560.0	10
B 4	Red	664.6	664.9	665.5	10
B 5	Red Edge 1	704.1	703.8	707.1	20
B 6	Red Edge 2	740.5	739.1	741.1	20
B 7	Red Edge 3	782.8	779.7	784.7	20
B 8	NIR	832.8	832.9	834.6	10
B 8 a	N.NIR	864.7	864	865.6	20
B 9	W.vapour	945.1	943.2	947.2	60
B 10	SWIR/C	1373.5	1376.9	1372.2	60
B 11	SWIR1	1613.7	1610.4	1612	20
B 12	SWIR2	2202.4	2185.7	2191.3	20

Fig. 2.8 Formulazione dell'FDI e bande Sentinel-2/MSI utilizzate. A sinistra sono riportati il calcolo del coefficiente α e le forme finali dell'indice per Sentinel-2A, Sentinel-2B e Sentinel-2C; a destra sono sintetizzate le caratteristiche spettrali e spaziali delle bande MSI con in evidenza quelle utilizzate.

L'acqua assorbe fortemente la radiazione nel vicino infrarosso e nell'infrarosso a onde corte; di conseguenza, in assenza di oggetti o materiali superficiali, la riflettanza in queste bande tende a essere bassa. Per contro, la presenza di elevate concentrazioni di materiale sospeso modifica le proprietà ottiche dell'acqua e, di conseguenza, la riflettanza osservata nelle diverse bande spettrali. Questo aspetto assume particolare rilevanza nell'interpretazione dell'FDI, poiché valori elevati dell'indice non costituiscono di per sé una prova della presenza di plastica galleggiante. Segnali analoghi possono essere generati anche da sedimenti superficiali, schiume, materiale organico, macroalghe, bassi fondali o effetti di glint solare.

L'FDI misura quindi quanto la riflettanza osservata nella banda B8 (NIR) si discosta da una baseline spettrale stimata a partire da bande poste a lunghezze d'onda inferiori e superiori, includendo nel presente lavoro le bande B4, B6 e B11 (SWIR1), secondo la formulazione riportata in Fig. 2.8. Nel presente lavoro, l'indice è stato implementato seguendo la formulazione proposta da Biermann et al. (2020), utilizzando le bande Sentinel-2 necessarie.

Vista la letteratura, nel presente studio i pixel con FDI positivo o sopra soglia sono stati interpretati come possibili anomalie superficiali indicanti detriti marini galleggianti compatibili con la presenza di plastica, e non come identificazioni certe di plastica. L'FDI è stato quindi utilizzato come indicatore preliminare di anomalia radiometrica, mentre la selezione finale dei candidati è stata effettuata solo attraverso una valutazione integrata, combinando il valore dell'indice radiometrico con la persistenza rispetto a soglie progressive, la coerenza spaziale, la morfologia del candidato e il contesto fisico della scena.

Condizione osservata	Lettura radiometrica	Ruolo nell'analisi
$FDI \approx 0$	Il valore di B8 è coerente con la baseline NIR stimata.	Nessuna anomalia NIR significativa.
$FDI > 0$	Il valore di B8 supera il valore atteso dalla baseline.	Possibile anomalia superficiale.
$FDI < 0$	Il valore di B8 è inferiore al valore atteso dalla baseline.	Pixel escluso dalla selezione dei candidati.

Fig. 2.9 Criteri interpretativi dei valori dell'FDI. Sono riportate le principali condizioni radiometriche associate a valori nulli, positivi e negativi dell'indice e il loro utilizzo nella selezione dei candidati.

2.3 PROCEDURA DI INDIVIDUAZIONE E SCELTA CANDIDATI

Dopo il calcolo dell'FDI e l'applicazione delle maschere, l'analisi è stata finalizzata all'individuazione, per ciascuna scena Sentinel-2, di candidati potenzialmente compatibili con la presenza di materiale galleggiante superficiale. La procedura non è stata orientata a censire tutti i pixel sopra soglia, ma a selezionare in modo conservativo i segnali più coerenti dal punto di vista radiometrico, spaziale, morfologico e contestuale. La ricerca dei candidati è stata concentrata sulle aree marine meno influenzate da terraferma, bassi fondali e transizioni costa-mare, con particolare attenzione ai margini del plume del Po. In queste zone, la transizione tra acque torbide costiere e acque marine più esterne può favorire gradienti superficiali, fronti o strutture di convergenza potenzialmente rilevanti per l'accumulo di materiale galleggiante. Studi precedenti mostrano che aggregazioni di macroplastiche e altri detriti galleggianti possono essere rilevate tramite dati ottici Sentinel-2, ma evidenziano anche la necessità

di distinguere tali segnali da materiali naturali o fenomeni superficiali con risposta spettrale simile, come macroalghe, schiume, sedimenti sospesi, scie di imbarcazioni e condizioni radiometriche non ideali (Topouzelis et al., 2019; Biermann et al., 2020; Kikaki et al., 2022). Per questo motivo, l'FDI è stato utilizzato come indicatore preliminare, integrato con soglie progressive, aggregazione spaziale, morfologia del segnale, posizione rispetto al contesto oceanografico e presenza di eventuali elementi confondenti.

2.3.1 Verifica preliminare scena tramite visualizzazione RGB

Prima dell'analisi quantitativa, le scene Sentinel-2 disponibili sono state sottoposte a verifica preliminare mediante composizione RGB in colori naturali. Questo passaggio ha permesso di valutare la qualità visiva e radiometrica delle immagini e di individuare condizioni sfavorevoli all'interpretazione dell'FDI, come copertura nuvolosa significativa, ombre di nubi, foschia atmosferica marcata, glint solare evidente o scarsa leggibilità della superficie marina.

Sono state considerate meno idonee anche le scene in cui il plume del Po risultava assente o troppo debole rispetto al mare circostante, poiché in tali condizioni è più difficile interpretare la distribuzione delle anomalie rispetto a una struttura fisica riconoscibile. Dopo questa verifica, sono state analizzate le scene idonee e, per ciascun mese, è stata selezionata una scena rappresentativa da discutere nel dettaglio nel Capitolo 3.

2.3.2 Criteri di Individuazione delle anomalie

a) Criterio Radiometrico

Le soglie radiometriche dell'FDI sono state valutate a partire dalla distribuzione dei valori calcolati sui pixel d'acqua. Poiché l'FDI non dispone di una soglia univoca per identificare la plastica galleggiante, l'attenzione è stata posta sulla coda positiva dell'indice, interpretata come dominio dei pixel con eccesso di riflettanza nel B8/NIR rispetto alla baseline stimata. Le soglie operative sono state quindi lette in relazione alla distribuzione interna di ciascuna scena, scegliendo una adeguata soglia di ingresso, soglie progressive e percentili come supporto alla selezione dei candidati (vedi Fig. 2.10).

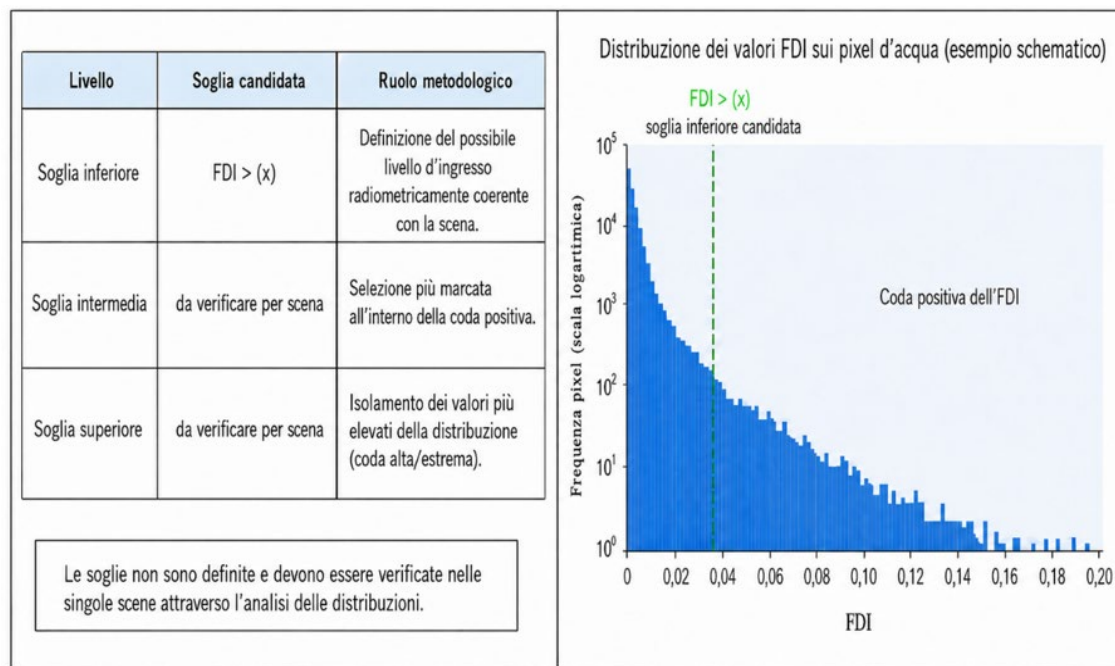


Fig. 2.10 Definizione operativa delle soglie candidate per l'analisi della distribuzione FDI. Il pannello sinistro sintetizza il significato metodologico dei diversi livelli di soglia, mentre il pannello destro rappresenta schematicamente la distribuzione dei valori FDI sui pixel d'acqua e l'eventuale soglia inferiore.

Le statistiche riportate nelle successive Tavole 1.a–4.a sono state calcolate in ambiente Python a partire dai dati raster FDI esportati in formato GeoTIFF. Dopo l'esclusione dei valori NoData e dei pixel non validi, sono stati ricavati i principali descrittori utili della distribuzione dell'indice, tra cui percentili e percentuale di pixel sopra le soglie operative. Le elaborazioni sono state svolte utilizzando principalmente le librerie Rasterio, NumPy, Pandas e Matplotlib.

b) Criterio spaziale

I pixel sopra soglia non sono stati interpretati singolarmente come evidenza diretta di materiale plastico. Un singolo pixel anomalo può infatti derivare da rumore radiometrico, errori residui di mascheramento, condizioni locali della superficie marina o piccoli artefatti. La selezione è stata quindi impostata sul passaggio dal pixel anomalo al raggruppamento spazialmente coerente e persistente, in linea con gli studi Sentinel-2 sui detriti marini galleggianti, generalmente orientati al riconoscimento di patch o aggregazioni superficiali (Topouzelis et al., 2019; Biermann et al., 2020).

c) Criterio Morfologico

La forma dei raggruppamenti è stata valutata con cautela. Configurazioni compatte o moderatamente allungate possono essere compatibili con accumuli superficiali o piccole zone di convergenza; al contrario, strutture molto sottili, fortemente lineari o chiaramente associate a scie di imbarcazioni sono state considerate meno attendibili. La morfologia è stata quindi utilizzata come criterio di plausibilità ed esclusione, non come prova della presenza di plastica.

2.3.3 Esclusione degli elementi confondenti

Una fase essenziale della procedura è stata l'esclusione, o la forte penalizzazione, dei raggruppamenti associabili a elementi confondenti. Il rilevamento ottico di materiale galleggiante è infatti sensibile a numerosi fenomeni, come quelli elencati nella figura 2.11, che possono generare anomalie spettrali simili a quelle attese per detriti o macroplastiche.

Elemento confondente	Motivo della criticità
Wake di imbarcazioni	possono produrre strutture lineari e anomalie superficiali
Sunglint	aumenta artificialmente la riflettanza osservata
Nubi sottili o nubi basse	alterano il segnale radiometrico
Ombre di nubi	modificano localmente la risposta spettrale
Schiuma marina	può produrre anomalie chiare in superficie
Alghe o materiale organico naturale	possono avere risposta spettrale simile al debris
Sedimenti sospesi	alterano fortemente il segnale nelle acque costiere
Acque basse o fondali visibili	introducono contaminazione dal fondo
Aree costiere	aumentano il rischio di pixel misti terra-mare
Transizioni terra-mare non rimosse	possono generare falsi positivi lungo la costa

Fig. 2.11 Elementi confondenti nella selezione dei candidati. Sono riportati i principali fattori che possono alterare il segnale radiometrico o produrre anomalie superficiali non attribuibili a materiale galleggiante.

2.3.4 Classificazione operativa per selezione dei candidati

Sulla base dei criteri descritti nei paragrafi precedenti, i raggruppamenti di pixel individuati in ciascuna scena sono stati valutati attraverso una procedura qualitativa di selezione operativa. Tale procedura non rappresenta una classificazione supervisionata del materiale osservato, né consente di attribuire automaticamente i pixel sopra soglia alla presenza di plastica. L'obiettivo è stato invece quello di ordinare e valutare i diversi segnali radiometrici individuati dall'FDI, selezionando solo i candidati più coerenti dal punto di vista radiometrico, spaziale e contestuale con l'esclusione di eventuali elementi confondenti.

La selezione non è stata quindi finalizzata a censire tutti i pixel o tutti i cluster sopra soglia, ma a individuare, per ciascuna scena, le anomalie più significative e meno ambigue. Un raggruppamento è stato considerato candidato solo quando presentava una combinazione sufficientemente solida dei criteri sopracitati (Fig.2.12).

Classe operativa	Caratteristiche principali	Ruolo nella selezione
Candidato ad evidenza alta	FDI elevato, nucleo persistente, cluster coerente, posizione offshore o lungo il bordo esterno del plume, assenza di confondenti evidenti.	Prioritario nella selezione dei candidati.
Candidato ad evidenza intermedia	FDI positivo, cluster riconoscibile, ma con qualche incertezza contestuale o morfologica.	Considerabile in assenza di candidati a evidenza alta.
Candidato ad evidenza bassa	Anomalia poco compatta, presente solo a soglia bassa, vicina alla costa o associata a possibili confondenti.	Non prioritario nella selezione.
Escluso	Segnale associabile a costa, wake, glint, nubi, fondali bassi, torbidità elevata o artefatti evidenti.	Escluso dall'analisi interpretativa.

Fig. 2.12 Classi operative utilizzate nella selezione dei candidati. Sono riportati i criteri principali adottati per distinguere i candidati più coerenti da quelli incerti o da escludere.

Capitolo 3

Analisi e discussione

Questo capitolo presenta e discute le scene Sentinel-2 selezionate per valutare la distribuzione delle anomalie radiometriche individuate nell'area antistante il delta del Po. L'attenzione non è rivolta alla sola presenza di valori FDI positivi, ma alla loro interpretazione nel contesto fisico della scena, con particolare riferimento alla configurazione del plume, ai suoi margini e alla circolazione superficiale.

Prima dell'analisi di dettaglio, le scene disponibili sono state esaminate mese per mese mediante composizioni RGB, al fine di ottenere un quadro visivo complessivo dell'evoluzione del plume del Po e delle principali condizioni osservabili nelle diverse date. Questa lettura preliminare consente di contestualizzare le scene selezionate e di distinguere, all'interno di ciascun mese, le situazioni più rappresentative o maggiormente idonee alla successiva analisi.

Le scene rappresentative sono poi presentate attraverso schede organizzate in tavole successive. Ogni scheda deve essere letta come un percorso interpretativo unitario: prima viene mostrato il comportamento generale dell'FDI e delle soglie, quindi la localizzazione dei candidati, infine il dettaglio dei valori e delle coordinate associate. In questo modo, per ciascuna scena, la valutazione dei candidati si basa sulla lettura congiunta degli elementi radiometrici, spaziali e contestuali. La relazione con la circolazione superficiale viene infine utilizzata come supporto dinamico all'interpretazione dei segnali individuati.

Prima dell'analisi delle singole scene rappresentative, viene inoltre proposta una lettura stagionale sintetica, utile a collegare le differenze osservate tra i mesi analizzati con la variabilità del plume, della circolazione superficiale e delle possibili condizioni di accumulo del materiale galleggiante.

3.1 ANALISI PRELIMINARE RGB E SELEZIONE SCENE RAPPRESENTATIVE

MESE DI APRILE

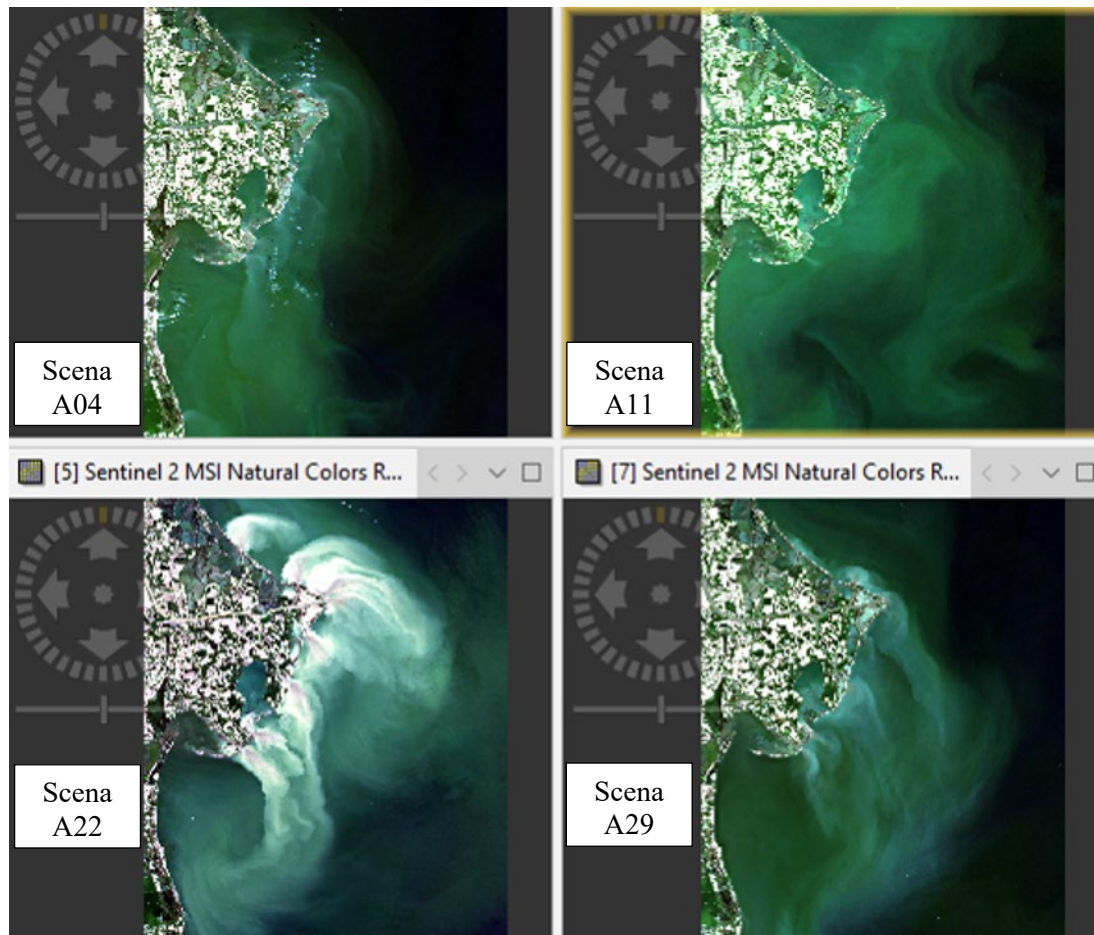


Fig. 3.1 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di APRILE 2025. Le quattro composizioni RGB consentono di confrontare l'estensione e la configurazione del plume del Po nelle diverse date disponibili, fornendo il contesto visivo per la selezione della scena rappresentativa da analizzare nel dettaglio.

Tutte le scene del mese di aprile sono state analizzate e la scena A22 sarà utilizzata in seguito come rappresentativa. Si denota come nelle prime decadi abbiamo un plume (Scene A04 e A11) diffuso, all'inizio sospinto verso sud/sud-ovest, probabilmente a causa delle correnti, ma poi più esteso verso il mare aperto. Nelle seconde decadi (Scene A22 e A29), sembra prevalere una dinamica diversa, legata prevalentemente a un aumento della portata d'acqua del Po, con plume meno diffuso, sempre però sospinto nella stessa direzione.

MESE DI MAGGIO

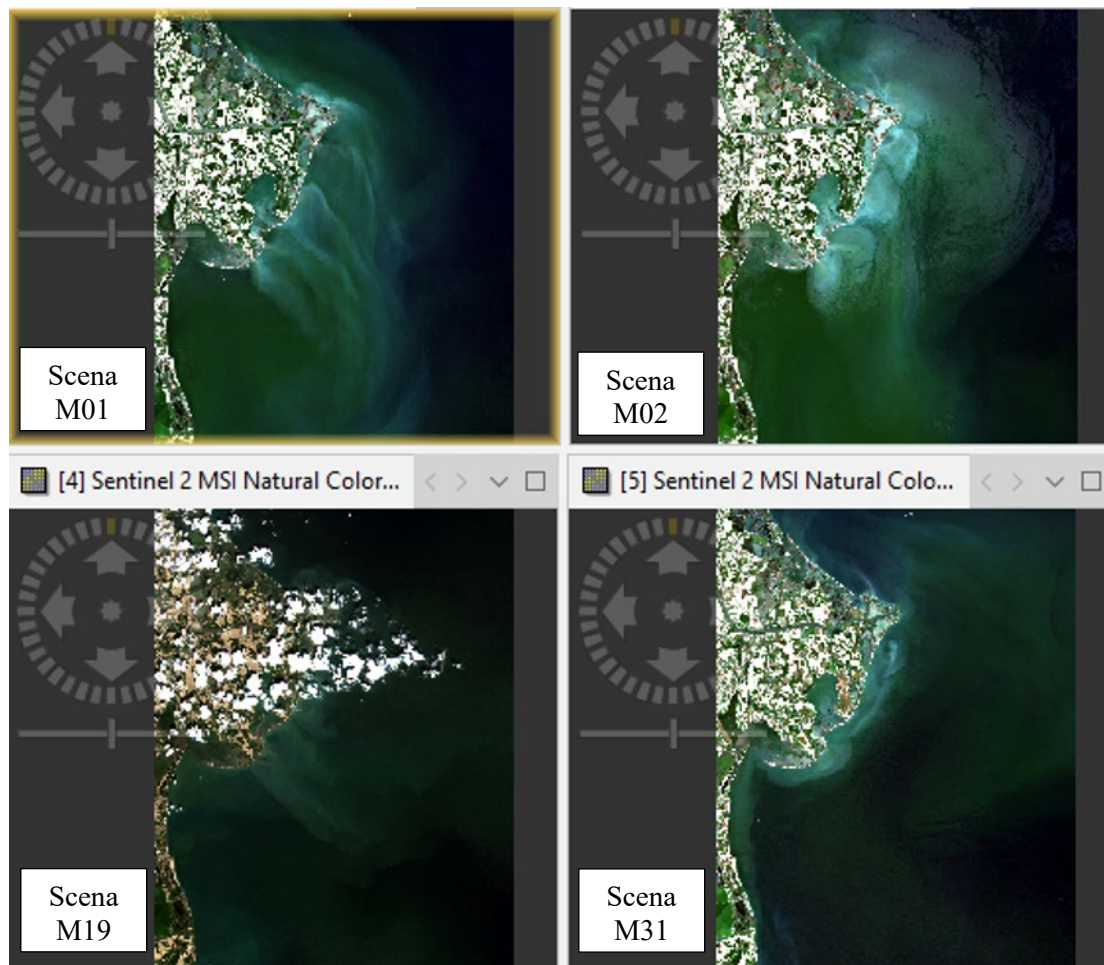


Fig. 3.2 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di MAGGIO 2025. Le quattro composizioni RGB consentono di confrontare l'estensione e la configurazione del plume del Po nelle diverse date disponibili, fornendo il contesto visivo per la selezione della scena rappresentativa da analizzare nel dettaglio.

Non è presente la scena M12, dunque non analizzata perché affetta da anomalie radiometriche. La scena M01 e M02 (lievemente disturbata dal punto di vista radiometrico), con la M14, che vedremo dopo come scena rappresentativa, proseguono con il trend iniziato nelle scene di fine aprile, con un plume poco diffuso, governato in modo prevalente dalle dinamiche della portata del fiume (trend in calo). Andando verso l'ultima decade del mese, nelle scene M19 (lievemente nuvolosa) ed M31, il plume è poco diffuso e presente solo lungo la fascia costiera.

MESE DI AGOSTO

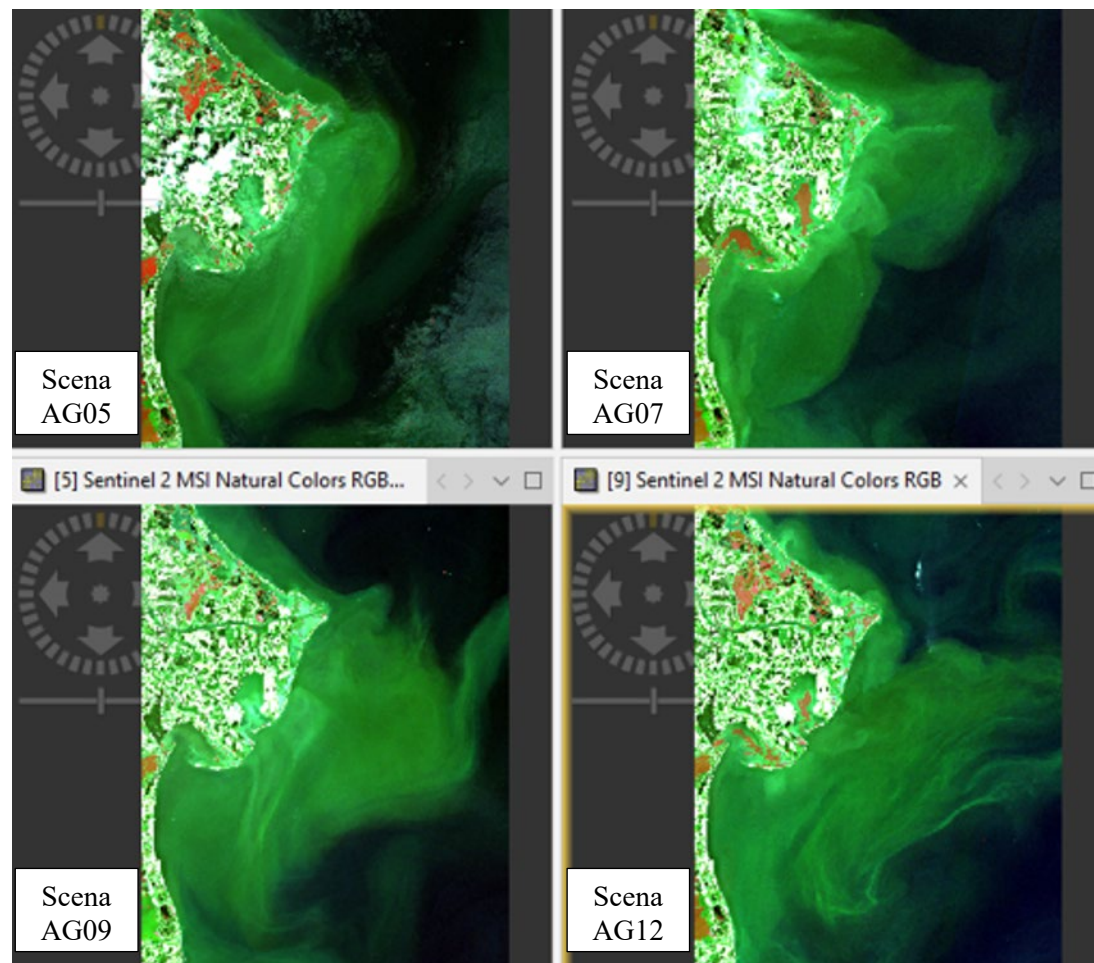


Fig. 3.3 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di AGOSTO 2025. Le quattro composizioni RGB consentono di confrontare l'estensione e la configurazione del plume del Po nelle diverse date disponibili, fornendo il contesto visivo per la selezione della scena rappresentativa da analizzare nel dettaglio.

Non è presente la scena M15 per problemi radiometrici, dunque non è stata analizzata. Il mese di agosto, probabilmente caratterizzato da condizioni meteorologiche stabili, presenta un trend di ampia diffusione del plume verso il mare aperto in tutte le scene: AG05, AG07, AG09 ed AG12 (che rivedremo più avanti come scena rappresentativa), coprendo progressivamente gran parte dell'area off-shore a causa, probabilmente, di una dinamica debole delle correnti; anche la dinamica del fiume è probabilmente non turbolenta e stabile. Per meglio enfatizzare il trend si è accentuato il colore verde nelle immagini.

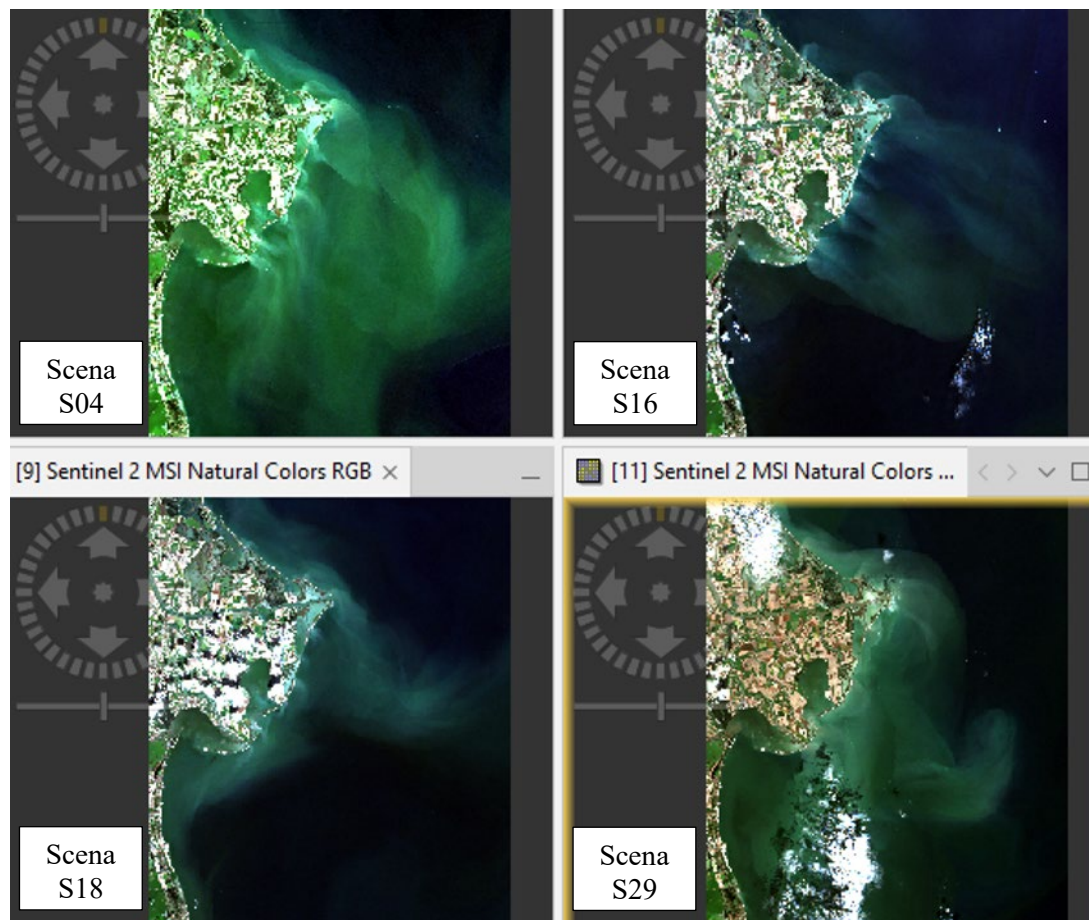


Fig. 3.4 Confronto RGB preliminare delle scene Sentinel-2 acquisite nel mese di SETTEMBRE 2025. Le quattro composizioni RGB consentono di confrontare l'estensione e la configurazione del plume del Po nelle diverse date disponibili, fornendo il contesto visivo per la selezione della scena rappresentativa da analizzare nel dettaglio.

La scena S11 è radiometricamente compromessa, dunque non analizzata. La scena S04 presenta ancora un plume diffuso, ma la dinamica del fiume è cambiata: lo si nota dalle bocche delle foci del Po, dinamicamente più attive; la scena S06, che vedremo solo più avanti come scena rappresentativa, mantiene la stessa dinamica alle foci, ma il plume è ormai ridotto verso la costa. Analoga valutazione si può fare per la scena S16, mentre la S18 e la S29 (parzialmente disturbata da nuvole) presentano una dinamica fluviale ridimensionata e una leggerissima diffusione del plume.

3.1.1 Analisi stagionale dei meccanismi di accumulo

Le scene analizzate nei mesi di aprile, maggio, agosto e settembre permettono di osservare configurazioni differenti del sistema Po–Nord Adriatico. Tali differenze non sono interpretabili esclusivamente come variazioni del segnale radiometrico superficiale, ma riflettono anche la variabilità stagionale della circolazione superficiale, della stratificazione della colonna d'acqua e della morfologia del plume fluviale. La circolazione dell'Adriatico presenta infatti una marcata variabilità stagionale, legata all'interazione tra vento, scambi di massa, apporti fluviali e struttura termalina della colonna d'acqua, fattori che modulano e favoriscono il contributo baroclinico alla circolazione (Artegiani et al., 1997a; Artegiani et al., 1997b; Zavatarelli et al., 2002). In questo contesto, il plume del Po rappresenta un elemento dinamico fondamentale, poiché contribuisce a strutturare localmente la circolazione superficiale e genera gradienti di salinità, densità e torbidità lungo il margine tra acque fluviali e acque marine più esterne (Kourafalou, 1999; Marini et al., 2008) (Fig. 3.1–3.4).

Nei mesi primaverili, rappresentati dalle scene di aprile e maggio, il plume può risentire maggiormente della variabilità della portata fluviale e delle condizioni meteorologiche, generando strutture superficiali più dinamiche e meno stabili. In queste condizioni, la distribuzione del materiale galleggiante può essere influenzata sia dal trasporto lungo la corrente costiera occidentale, sia da zone locali di rallentamento, ricircolo o convergenza in prossimità dei margini del plume. La valutazione delle scene primaverili deve quindi considerare non solo il valore radiometrico dell'FDI, ma anche la posizione delle anomalie rispetto alla struttura del plume e alla circolazione superficiale.

La scena di agosto rappresenta invece una configurazione potenzialmente diversa. In condizioni estive, la maggiore stratificazione della colonna d'acqua e la possibile riduzione del rimescolamento verticale possono favorire la permanenza delle acque fluviali negli strati superficiali e una maggiore estensione del plume verso il largo. Questo comportamento può contribuire a una risposta FDI positiva più diffusa, rendendo meno discriminante la semplice soglia $FDI > 0$. In tale situazione, l'interpretazione dei candidati deve basarsi soprattutto sulla loro posizione rispetto ai margini del plume e alle zone di transizione, più che sul solo valore positivo dell'indice. La scena di settembre può essere interpretata come una fase di transizione rispetto alla configurazione estiva. Il progressivo cambiamento delle condizioni atmosferiche e

della circolazione superficiale può ridurre o riorganizzare l'estensione del plume, rendendo più definiti alcuni margini e più localizzate le anomalie radiometriche. In questo caso, una minore diffusione del segnale FDI positivo può favorire una lettura più selettiva dei candidati, soprattutto quando questi si collocano in prossimità di aree di transizione tra acque fluviali torbide e acque marine più esterne.

Questa lettura stagionale non ha lo scopo di attribuire direttamente le anomalie osservate alla presenza di plastica, ma di fornire il quadro oceanografico entro cui interpretare i candidati individuati nelle singole scene. I fronti del plume, le zone di convergenza, i ricircoli locali e i margini tra masse d'acqua differenti rappresentano infatti strutture potenzialmente favorevoli all'allineamento o alla concentrazione temporanea di materiale galleggiante (Le et al., 2024). Per questo motivo, nelle analisi successive, i candidati FDI vengono valutati non come segnali isolati, ma in relazione alla configurazione stagionale del plume e della circolazione superficiale.

3.2 SCENE RAPPRESENTATIVE

3.2.1 SCENA DEL 22 APRILE 2025

Prodotto: S2C_MSIL2A_20250422T101051_N0511_R022_T32TQQ_20250422T155915.SAFE

DATI E SOGLIE

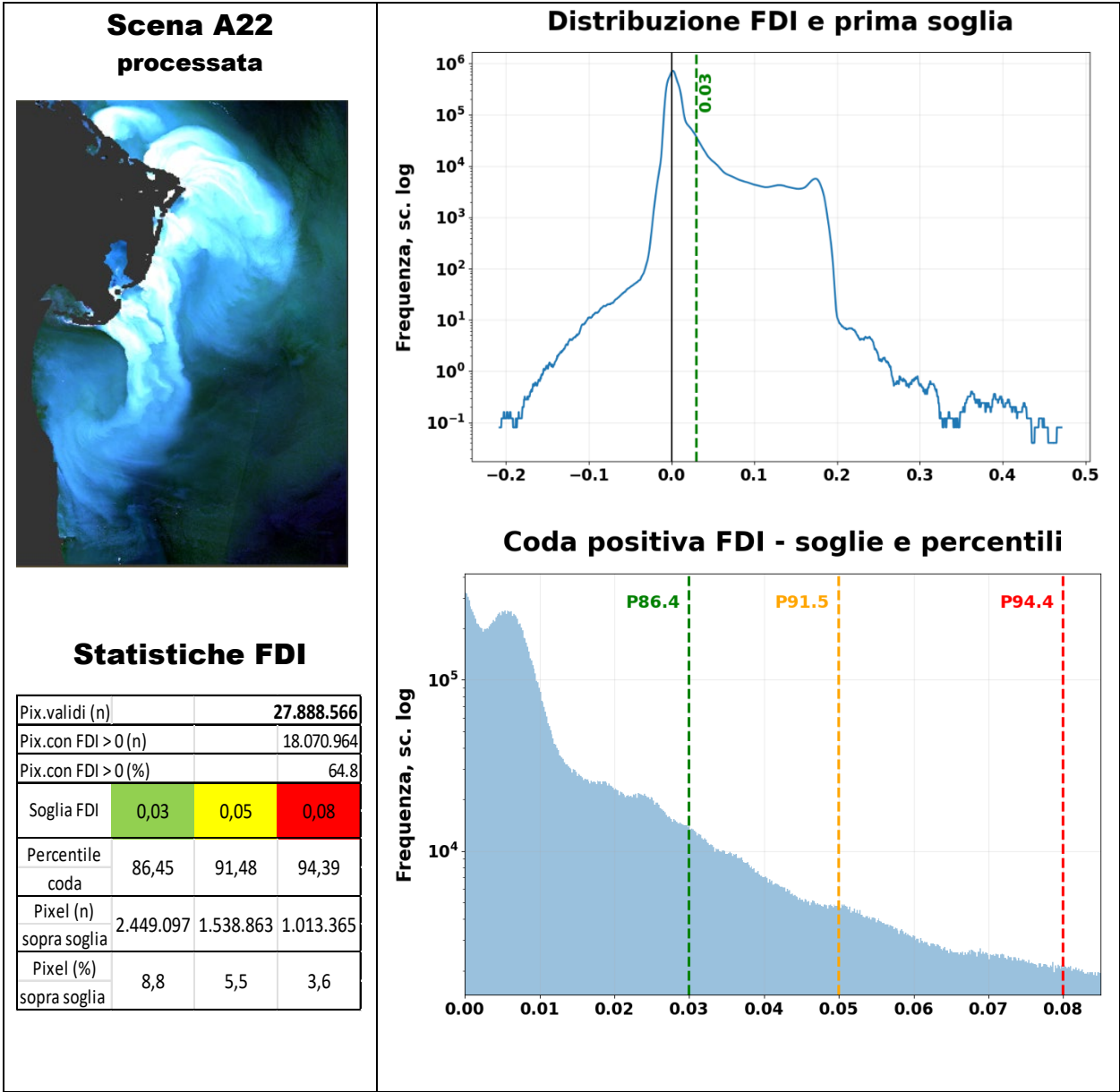
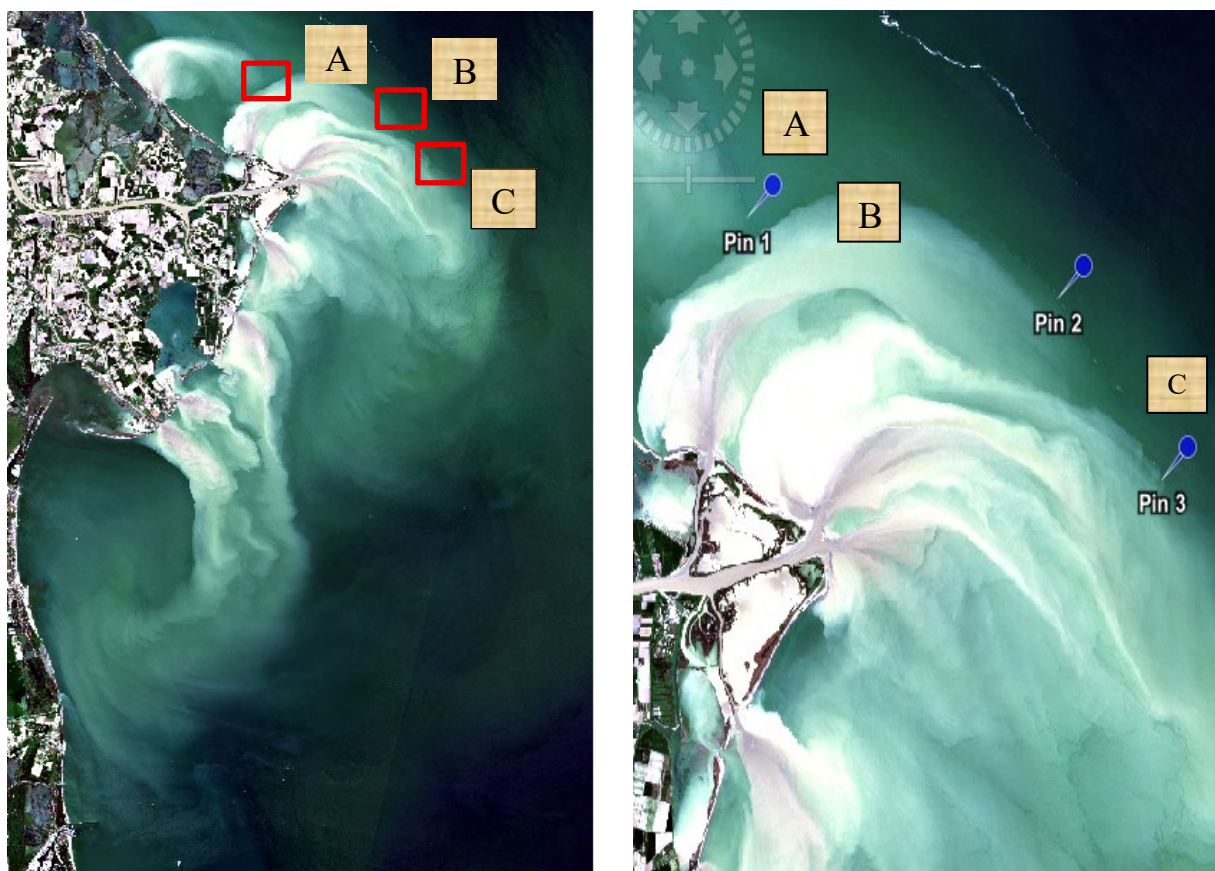


Tavola 1.a Analisi della scena Sentinel-2 del 22 aprile 2025: distribuzione FDI e soglie operative. La tavola mostra la composizione RGB della scena, la distribuzione dei valori FDI, la coda positiva della distribuzione e le soglie candidate utilizzate per l'individuazione dei pixel sopra soglia.

L'analisi dei dati conseguenti all'applicazione del FDI, presentano una risposta positiva abbastanza estesa: circa il **65,87%** dei pixel validi assume valori superiori a zero. Questo dato indica che una parte rilevante della superficie marina ha una risposta radiometrica positiva, ma non implica automaticamente la presenza diffusa di materiale galleggiante. È più corretto interpretarlo come effetto della forte influenza della plume, che può aumentare il segnale FDI attraverso torbidità, sedimenti sospesi, materiale organico e discontinuità superficiali.

Le soglie considerate, pari a **0,03**, **0,05** e **0,08**, corrispondono rispettivamente ai percentili **86,45**, **91,48** e **94,39** della distribuzione positiva. La soglia più bassa seleziona circa l'**8,8%** dei pixel validi, mentre la soglia più alta riduce la selezione al **3,6%**. Questo andamento mostra che la scena contiene una coda positiva ben sviluppata, ma non esclusivamente estrema: la soglia **0,03** può quindi essere considerata una soglia di ingresso utile, mentre le soglie più alte permettono di isolare progressivamente le anomalie più intense.

ANOMALIE RADIOMETRICHE COMPATIBILI CON PRESENZA DI
MATERIALE PLASTICO GALLEGGIANTE



ESTRATTI ZONE SELEZIONATE

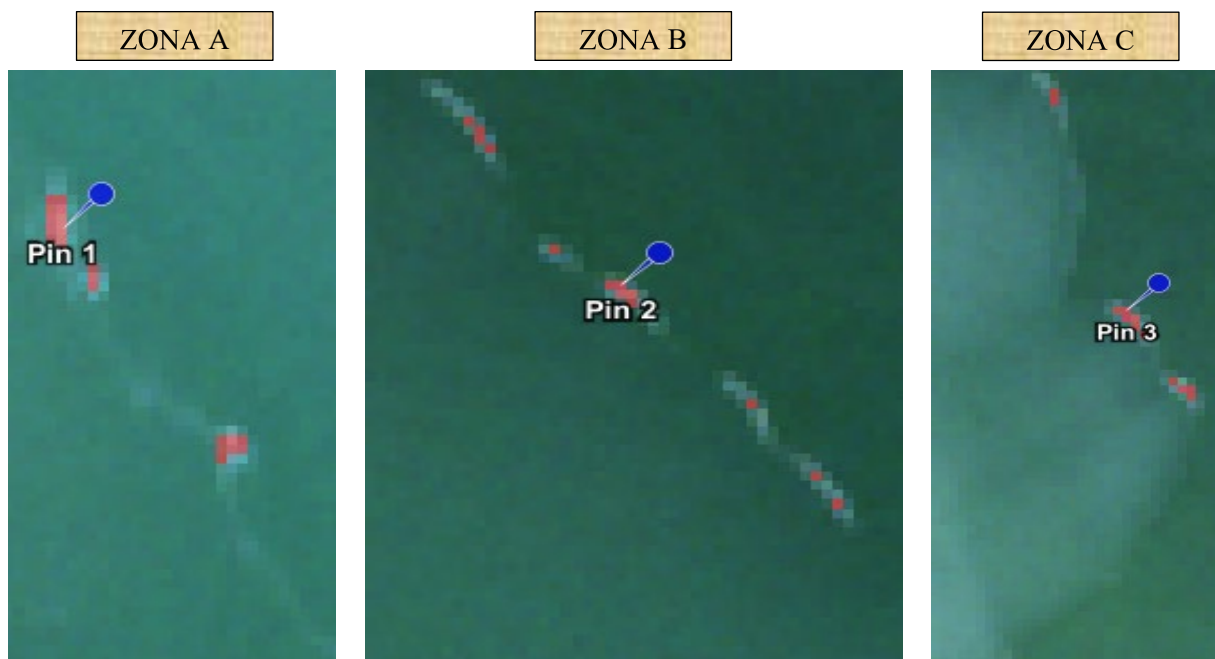


Tavola 1.b Analisi della scena Sentinel-2 del 22 aprile 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati. Sono riportati i candidati individuati nella scena e i relativi ingrandimenti, utilizzati per valutare la coerenza spaziale, e posizione del segnale

COORDINATE E VALORI RADIOMETRICI DEI CANDIDATI SELEZIONATI

ZONA A

	Longitude	12°31'29" E	degree
	Latitude	45°02'50" N	degree
	Map-X	777565.0	m
	Map-Y	4994235.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-04-22	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:10:51:0...	HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.12380	dl
	fdiC	0.09098	
	PIN 1 candidato ad alta coerenza		

ZONA B

	Longitude	12°31'35" E	degree
	Latitude	45°02'42" N	degree
	Map-X	777725.0	m
	Map-Y	4994015.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-04-22	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:10:51:0...	HH:MM:SS:mm.
	☐ Bands		
	B4	0.11720	dl
	fdiC	0.08014	
	PIN 2 candidato ad alta coerenza		

ZONA C

	Longitude	12°41'36" E	degree
	Latitude	44°58'53" N	degree
	Map-X	791195.0	m
	Map-Y	4987515.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-04-22	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:10:51:0...	HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.07800	dl
	fdiC	0.05372	
	PIN 3 candidato a intermedia coerenza		

Tavola 1.c Analisi della scena Sentinel-2 del 22 aprile 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati. La tavola riporta la posizione dei candidati individuati e i principali valori radiometrici associati, utili alla valutazione comparativa dei segnali selezionati.

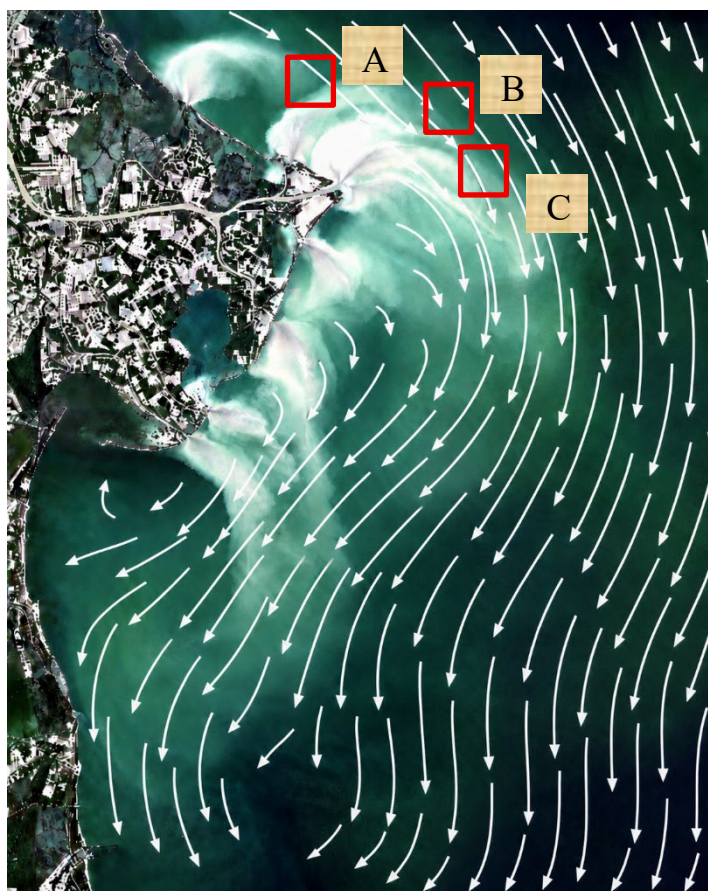


Fig. 3.5 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 22 aprile 2025. La figura mostra la posizione dei candidati rispetto al campo di circolazione superficiale, utilizzato come supporto interpretativo per valutare la possibile coerenza dinamica dei segnali individuati. Le correnti superficiali a risoluzione giornaliera sono state ricavate dal prodotto Mediterranean Sea Physics Analysis and Forecast del Copernicus Marine Service (CMS), con una risoluzione orizzontale di $1/24^\circ$ (circa 4 km). @Coppini et al. (2023)

La sovrapposizione tra circolazione superficiale e anomalie radiometriche mostra che i candidati selezionati si dispongono prevalentemente lungo il margine esterno del plume del Po. Le linee di corrente seguono in parte l'andamento del fronte, suggerendo un possibile trasporto superficiale del materiale lungo la fascia di separazione tra acque fluviali torbide e acque marine più esterne. Questa configurazione è coerente con la dinamica dei fronti di plume (Le et al. 2024) che possono favorire convergenza e accumulo temporaneo di materiale galleggiante.

3.2.2 SCENA DEL 14 MAGGIO 2025

Prodotto: S2B_MSIL2A_20250514T100029_N0511_R122_T32TQQ_20250514T124311.SAFE

DATI E SOGLIE

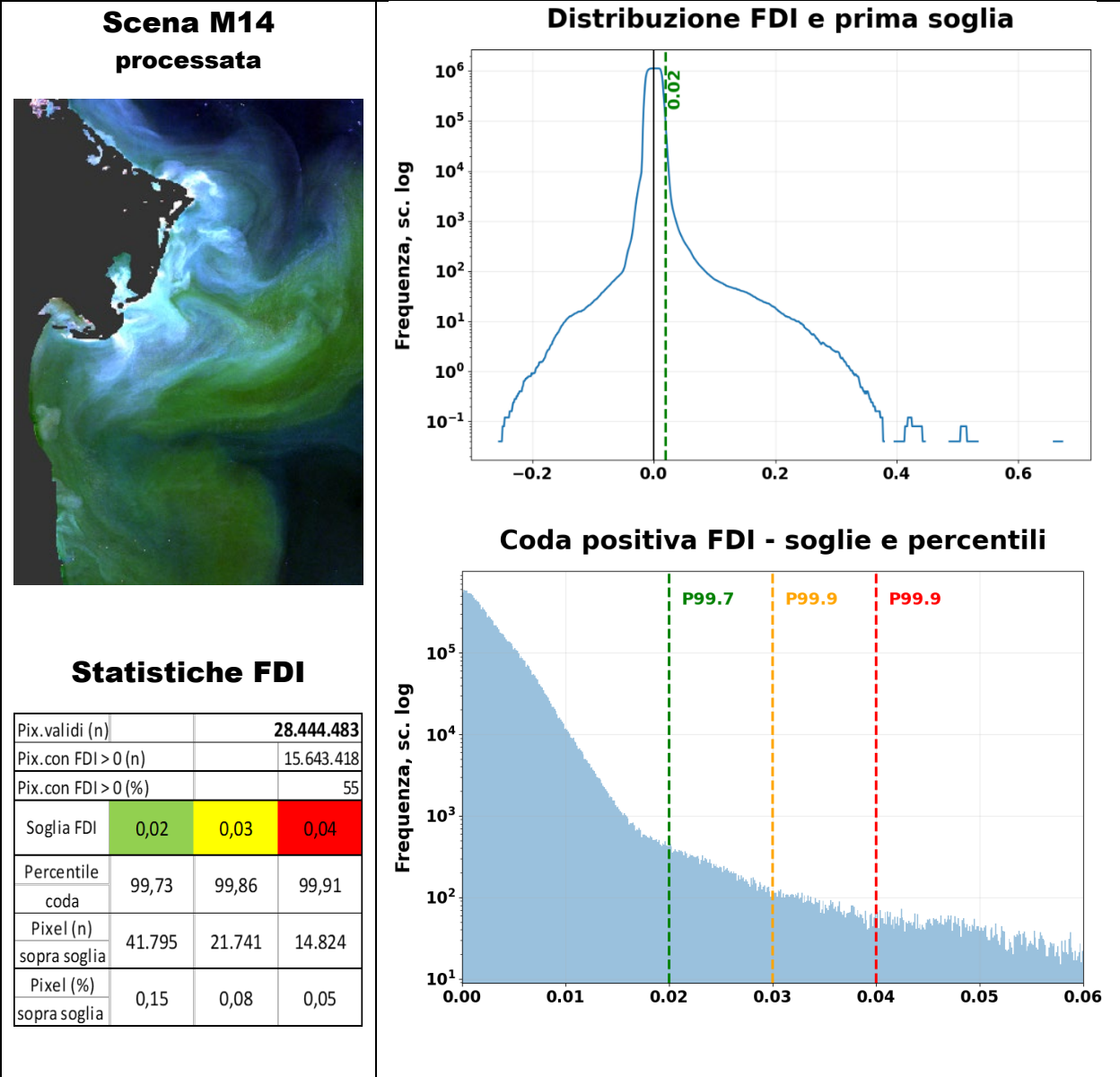
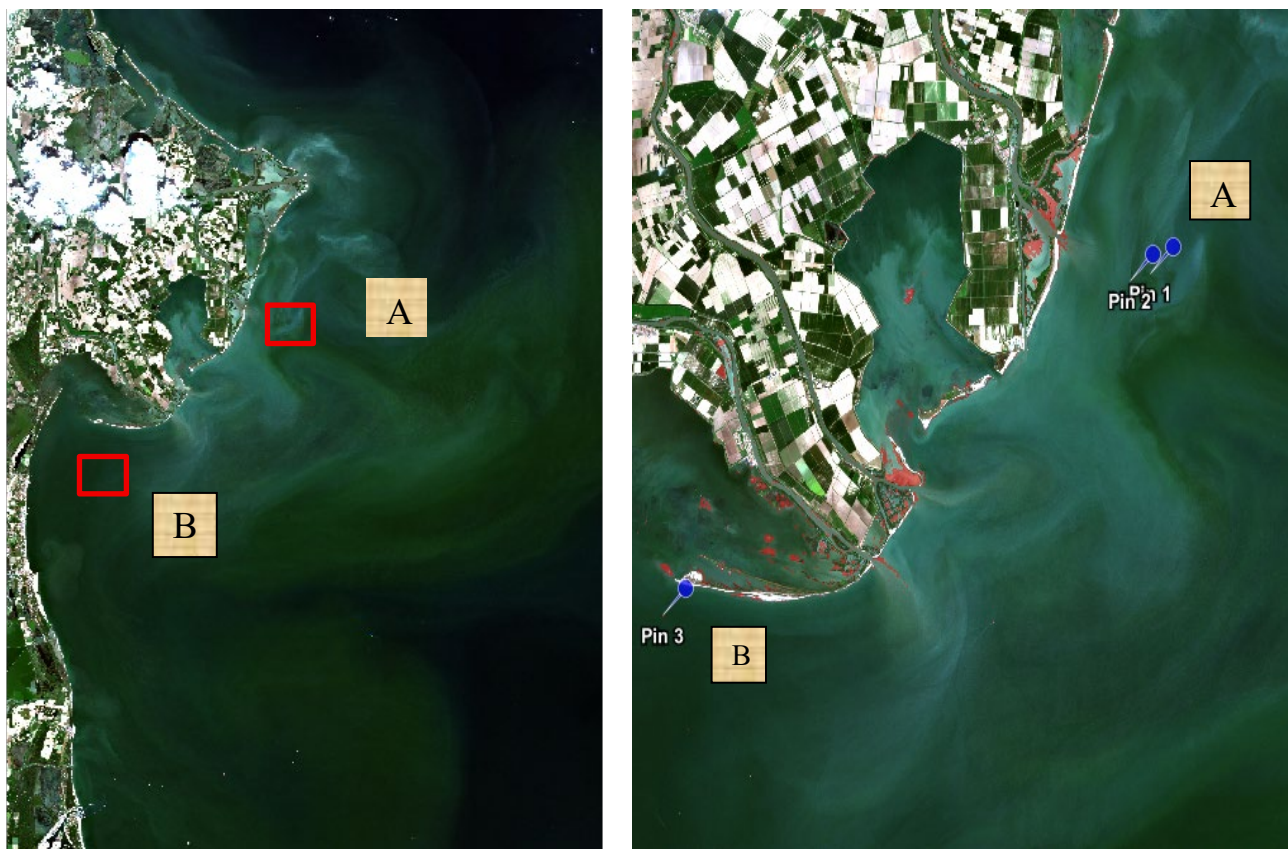


Tavola 2.a Analisi della scena Sentinel-2 del 14 maggio 2025: distribuzione FDI e soglie operative. La tavola mostra la composizione RGB della scena, la distribuzione dei valori FDI, la coda positiva della distribuzione e le soglie candidate utilizzate per l’individuazione dei pixel sopra soglia.

I dati analizzati dopo l'applicazione di FDI indicano che circa il **55%** dei pixel validi presenta valori superiori a zero. La percentuale è quindi inferiore rispetto alla scena del 22 aprile e molto inferiore rispetto a quella che vedremo per il 12 agosto. Questo suggerisce che il segnale positivo è presente in una parte consistente della scena, ma non domina completamente l'intera area marina. Tuttavia, osservando le soglie operative, emerge un elemento importante: i valori **0,02**, **0,03** e **0,04** corrispondono già a percentili molto elevati, rispettivamente **99,78**, **99,86** e **99,91**.

Questo significa che, anche se oltre metà della scena ha FDI positivo, i valori più intensi sono molto rari. Infatti, le soglie selezionano soltanto lo **0,15%**, lo **0,08%** e lo **0,05%** dei pixel validi. La distribuzione è quindi caratterizzata da una positività moderata abbastanza diffusa, ma da una coda estrema molto ridotta. In questa scena, la selezione dei candidati deve essere particolarmente prudente, perché le anomalie sopra soglia sono poche e devono essere valutate soprattutto in base alla loro coerenza spaziale e alla posizione rispetto alla plume.

ANOMALIE RADIOMETRICHE COMPATIBILI CON PRESENZA DI
MATERIALE PLASTICO GALLEGGIANTE



ESTRATTI ZONE SELEZIONATE

ZONA A

ZONA B

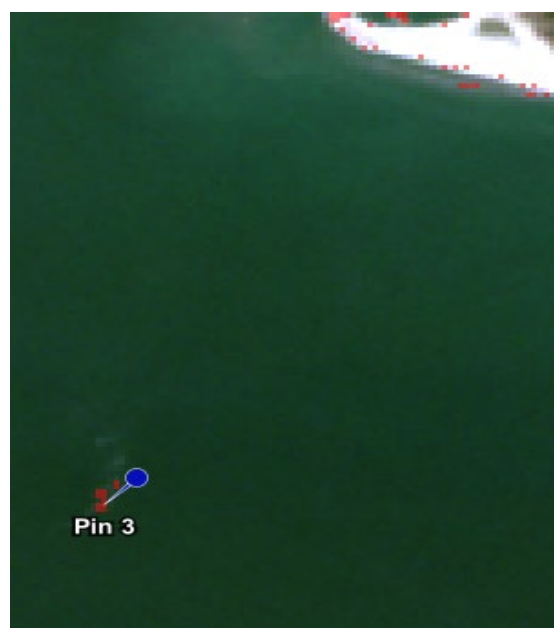
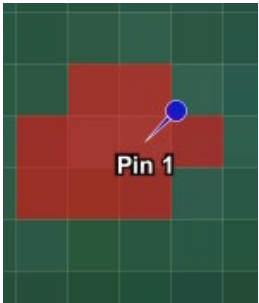
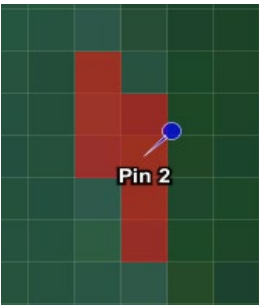


Tavola 2.b Analisi della scena Sentinel-2 del 14 maggio 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati. Sono riportati i candidati individuati nella scena e i relativi ingrandimenti, utilizzati per valutare la coerenza spaziale, e la posizione del segnale.

COORDINATE E VALORI RADIOMETRICI DEI CANDIDATI SELEZIONATI

ZONA A

	Longitude	12°31'08" E	degree
	Latitude	44°51'41" N	degree
	Map-X	778005.0	m
	Map-Y	4973575.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-05-14	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:00:29:024	AM HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.05570	dl
	fdiB	0.03749	
	Longitude	12°30'36" E	degree
	Latitude	44°51'35" N	degree
	Map-X	777325.0	m
	Map-Y	4973355.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-05-14	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:00:29:024	AM HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.04240	dl
	fdiB	0.02791	
			PIN 1 candidato ad alta coerenza
			PIN 2 candidato a intermedia coerenza

ZONA B

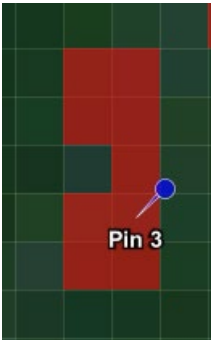
	Longitude	12°18'36" E	degree
	Latitude	44°46'52" N	degree
	Map-X	761875.0	m
	Map-Y	4963965.0	m
	☐ Time		
	Date		YYYY-MM-DD
	Time (UTC)		HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.03250	dl
	fdiB	0.03096	
			PIN 3 candidato a intermedia coerenza

Tavola 2.c Analisi della scena Sentinel-2 del 14 maggio 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati. La tavola riporta la posizione dei candidati individuati e i principali valori radiometrici associati, utili alla valutazione comparativa dei segnali selezionati.

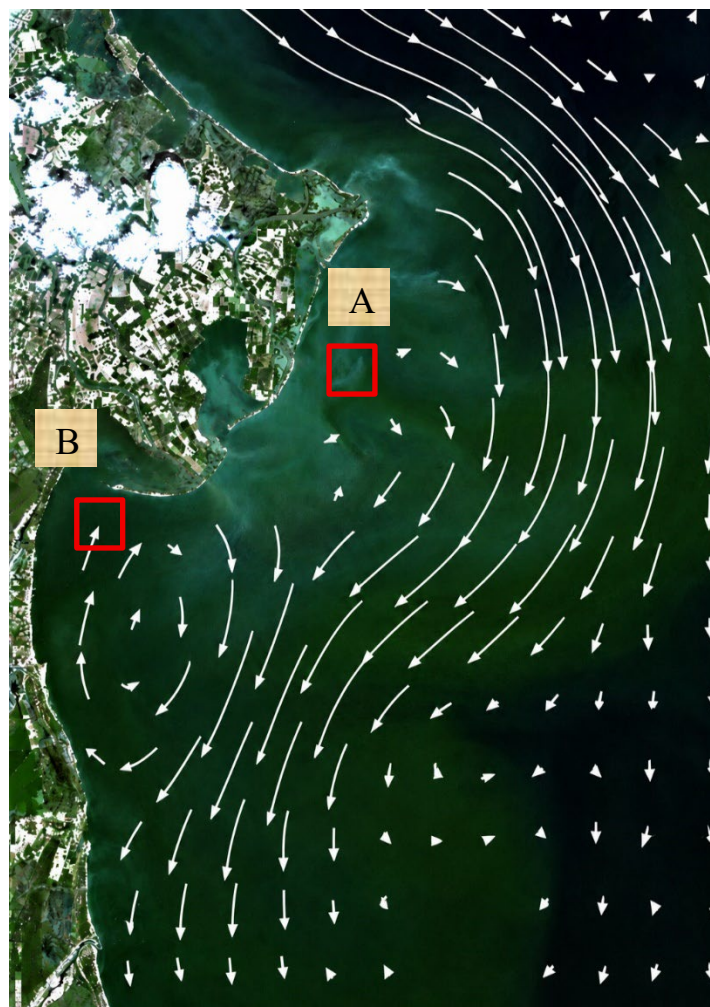


Fig. 3.6 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 14 maggio 2025. La figura mostra la posizione dei candidati rispetto al campo di circolazione superficiale, utilizzato come supporto interpretativo per valutare la possibile coerenza dinamica dei segnali individuati. Le correnti superficiali a risoluzione giornaliera sono state ricavate dal prodotto Mediterranean Sea Physics Analysis and Forecast del Copernicus Marine Service (CMS), con una risoluzione orizzontale di $1/24^\circ$ (circa 4 km). @Coppini et al. (2023)

La posizione delle anomalie nelle zone A e B appare coerente con il ricircolo superficiale osservato al largo della costa, poiché esse si collocano in prossimità di un'area in cui la circolazione curva, rallenta o cambia direzione. In un campo così, il materiale galleggiante non viene solo trasportato via, ma può essere temporaneamente trattenuto, stirato lungo il bordo del plume o accumulato nelle zone di convergenza e taglio. Tale configurazione può aver favorito la permanenza e la concentrazione locale di materiale galleggiante lungo i margini del plume, contribuendo alla formazione di segnali radiometrici localizzati.

3.2.3 SCENA DEL 12 AGOSTO 2025

Prodotto: S2B_MSIL2A_20250812T100029_N0511_R122_T32TQQ_20250812T135806.SAFE

DATI E SOGLIE

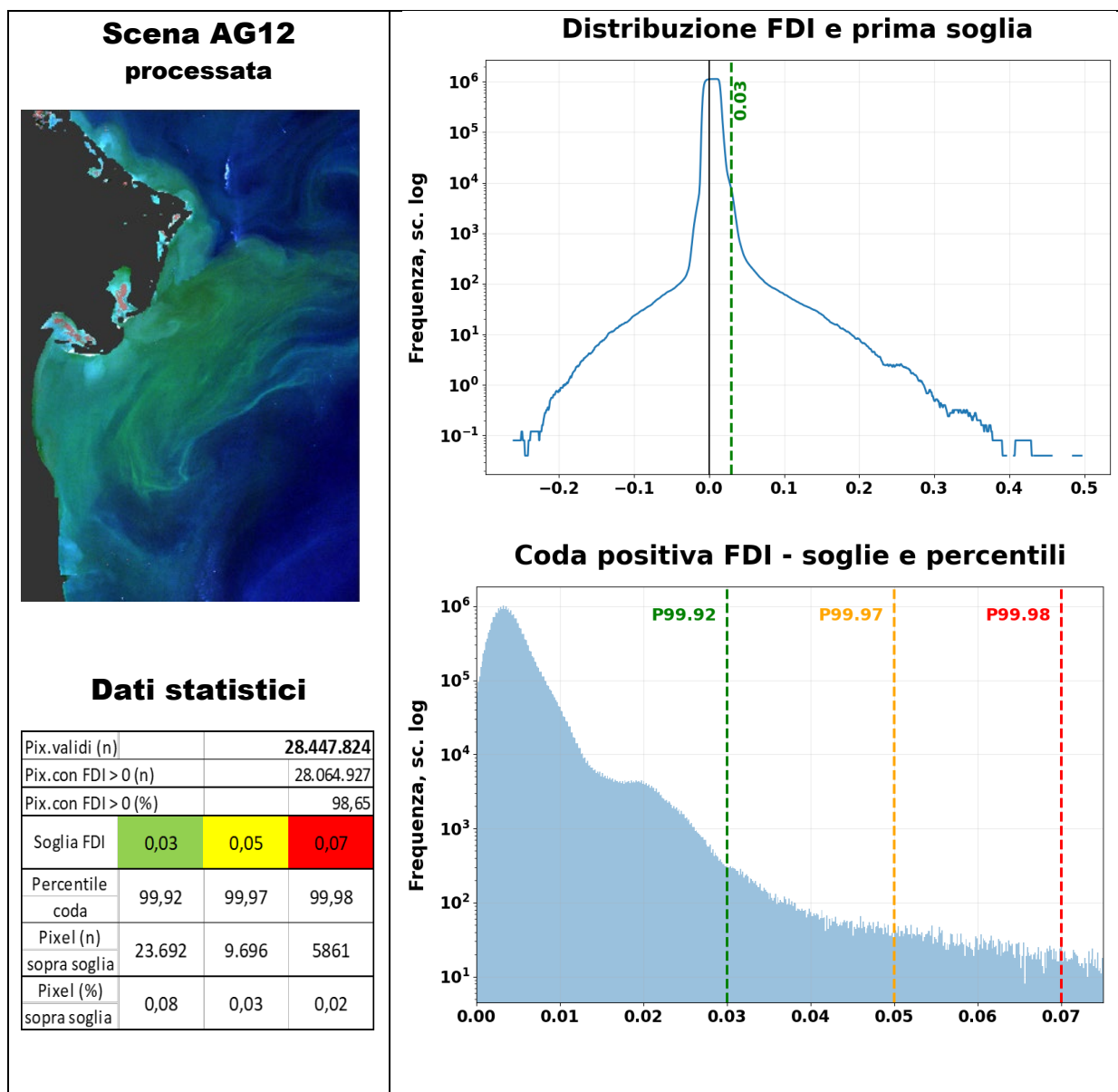
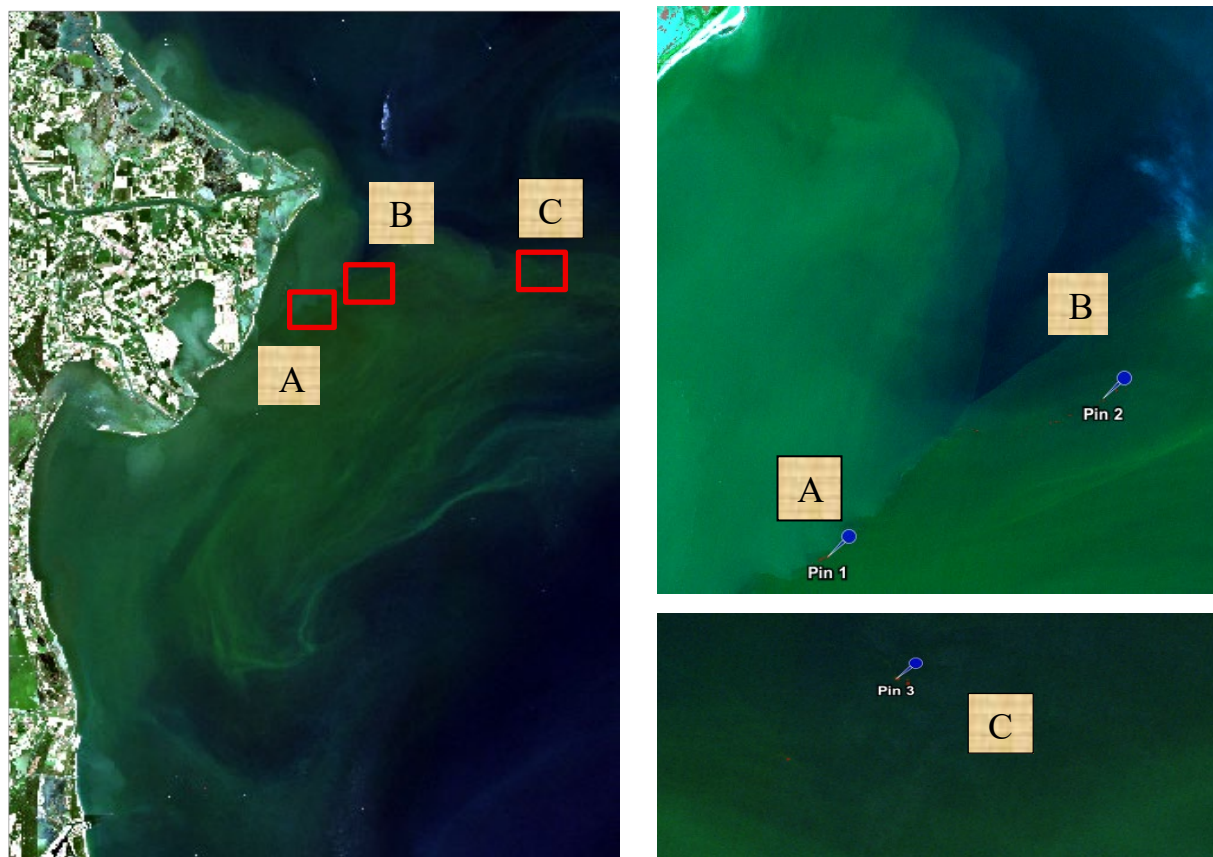


Tavola 3.a Analisi della scena Sentinel-2 del 12 agosto 2025: distribuzione FDI e soglie operative. La tavola mostra la composizione RGB della scena, la distribuzione dei valori FDI, la coda positiva della distribuzione e le soglie candidate utilizzate per l'individuazione dei pixel sopra soglia.

Il dato più evidente è la percentuale estremamente elevata di pixel con **FDI > 0**, pari al **98,65%** dei pixel validi. Questo valore non deve essere interpretato come indicazione di presenza diffusa di plastica, ma come segnale di uno spostamento generale della distribuzione FDI verso valori positivi. In altre parole, in questa scena lo zero perde gran parte della sua capacità discriminante, perché quasi tutta la superficie marina supera tale valore.

Le soglie operative utilizzate, pari a **0,03**, **0,05** e **0,07**, corrispondono infatti a percentili estremamente alti: **99,92**, **99,97** e **99,98**. Nonostante quasi tutta la scena abbia FDI positivo, solo una frazione minima dei pixel supera queste soglie: rispettivamente **0,08%**, **0,03%** e **0,02%** dei pixel validi. Questo indica che la scena è caratterizzata da una positività di fondo molto diffusa, ma da pochissime anomalie realmente intense. dal punto di vista interpretativo, la grande estensione del plume rappresenta probabilmente il principale fattore che contribuisce a questo comportamento

ANOMALIE RADIOMETRICHE COMPATIBILI CON PRESENZA DI
MATERIALE PLASTICO GALLEGGIANTE



ESTRATTI ZONE SELEZIONATE

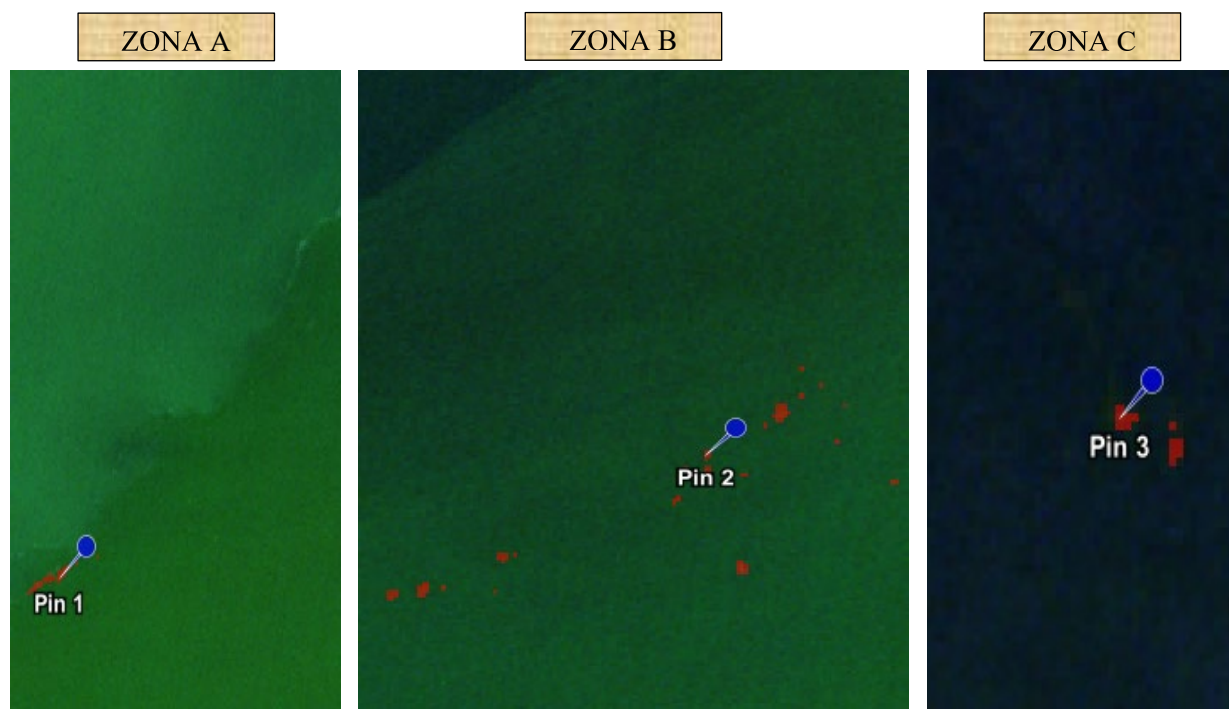


Tavola 3.b Analisi della scena Sentinel-2 del 12 agosto 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati. Sono riportati i candidati individuati nella scena e i relativi ingrandimenti, utilizzati per valutare la coerenza spaziale, e posizione del segnale.

COORDINATE E VALORI RADIOMETRICI DEI CANDIDATI SELEZIONATI

ZONA A

	Longitude	12°33'49" E degree	PIN 1 candidato ad alta coerenza
	Latitude	44°53'02" N degree	
	Map-X	781425.0 m	
	Map-Y	4976245.0 m	
	☐ Time		
	Date	2025-08-12 YYYY-MM-DD	
	Time (UTC)	10:00:29:024 AM HH:MM:SS:mm	
	☐ Bands		
	B4	0.02340 dl	
	fdiB	0.08395	

ZONA B

	Longitude	12°37'02" E degree	PIN 2 candidato ad alta coerenza
	Latitude	44°54'17" N degree	
	Map-X	785565.0 m	
	Map-Y	4978725.0 m	
	☐ Time		
	Date	2025-08-12 YYYY-MM-DD	
	Time (UTC)	10:00:29:024 AM HH:MM:SS:mm	
	☐ Bands		
	B4	0.01960 dl	
	fdiB	0.07177	

ZONA C

	Longitude	12°47' E degree	PIN 3 candidato ad intermedia coerenza
	Latitude	44°54'47" N degree	
	Map-X	798645.0 m	
	Map-Y	4980255.0 m	
	☐ Time		
	Date	2025-08-12 YYYY-MM-DD	
	Time (UTC)	10:00:29:024 AM HH:MM:SS:mm	
	☐ Bands		
	B4	0.01850 dl	
	fdiB	0.06233	

Tavola 3.c Analisi della scena Sentinel-2 del 12 agosto 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati. La tavola riporta la posizione dei candidati individuati e i principali valori radiometrici associati, utili alla valutazione comparativa dei segnali selezionati.

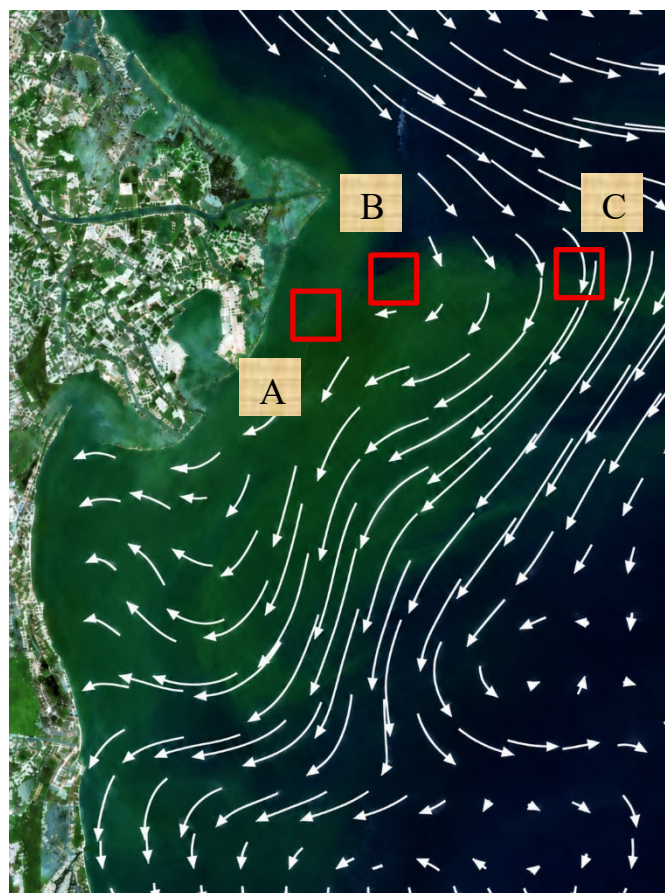


Fig. 3.7 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 12 agosto 2025. La figura mostra la posizione dei candidati rispetto al campo di circolazione superficiale, utilizzato come supporto interpretativo per valutare la possibile coerenza dinamica dei segnali individuati. Le correnti superficiali a risoluzione giornaliera sono state ricavate dal prodotto Mediterranean Sea Physics Analysis and Forecast del Copernicus Marine Service (CMS), con una risoluzione orizzontale di $1/24^\circ$ (circa 4 km). @Coppini et al. (2023)

La posizione delle anomalie nelle zone A e B appare coerente con il ricircolo superficiale osservato al largo della costa, poiché esse si collocano in prossimità di un'area in cui la circolazione curva, rallenta o cambia direzione. Le anomalie A, B e C non risultano distribuite in modo casuale, ma si collocano lungo fasce di transizione tra acque influenzate dal plume e acque marine più esterne. In particolare, B e C appaiono coerenti con un possibile trasporto e stiramento del materiale galleggiante lungo il fronte del plume, mentre A, più interno e prossimo alla componente torbida, mantiene una maggiore incertezza interpretativa. La circolazione superficiale sembra quindi contribuire all'organizzazione spaziale delle anomalie, favorendo la concentrazione temporanea di materiale lungo il bordo del plume.

3.2.4 SCENA DEL 06 SETTEMBRE 2025

Prodotto: S2C_MSIL2A_20250906T100041_N0511_R122_T32TQQ_20250906T153714.SAFE

DATI E SOGLIE

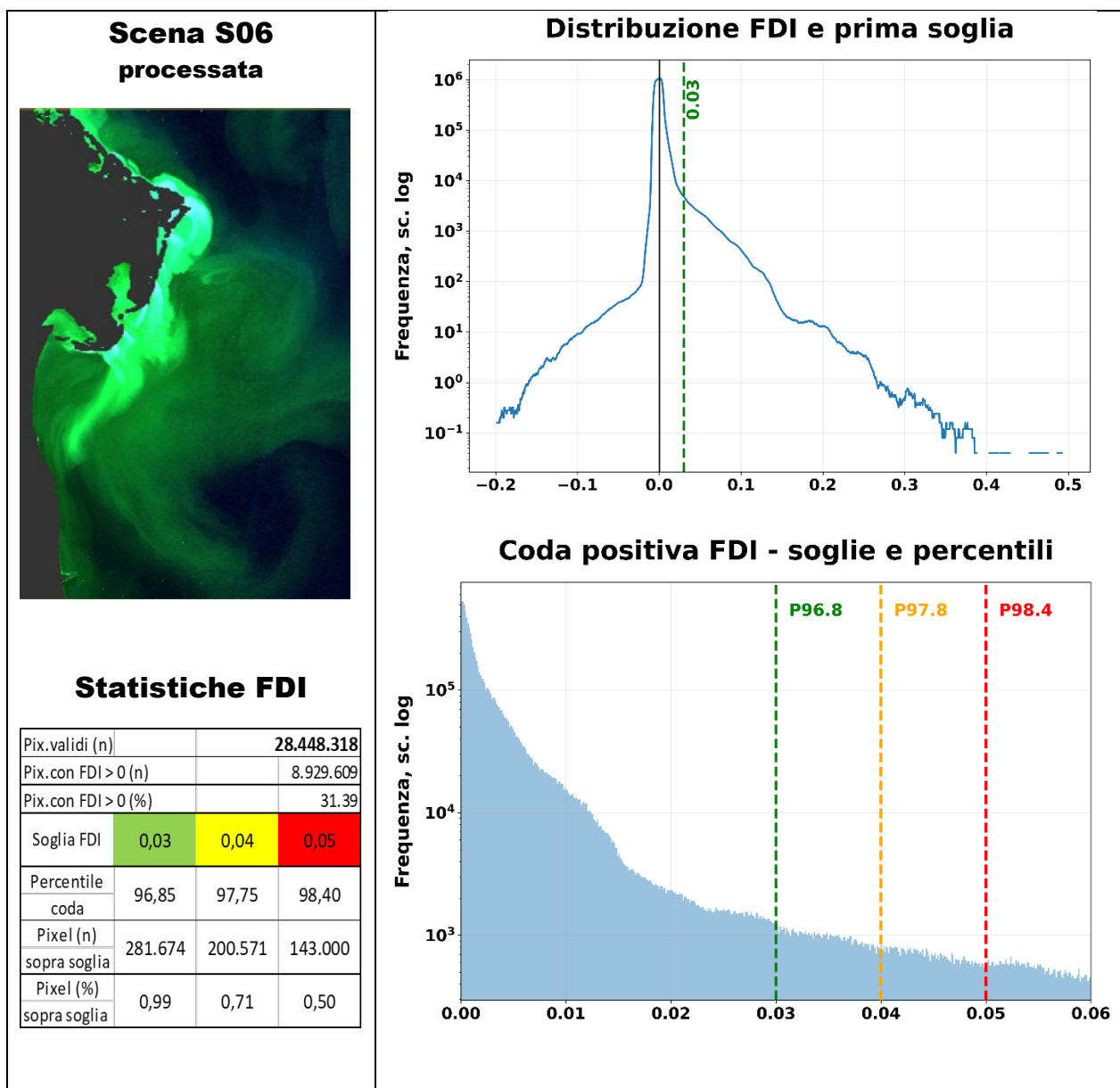
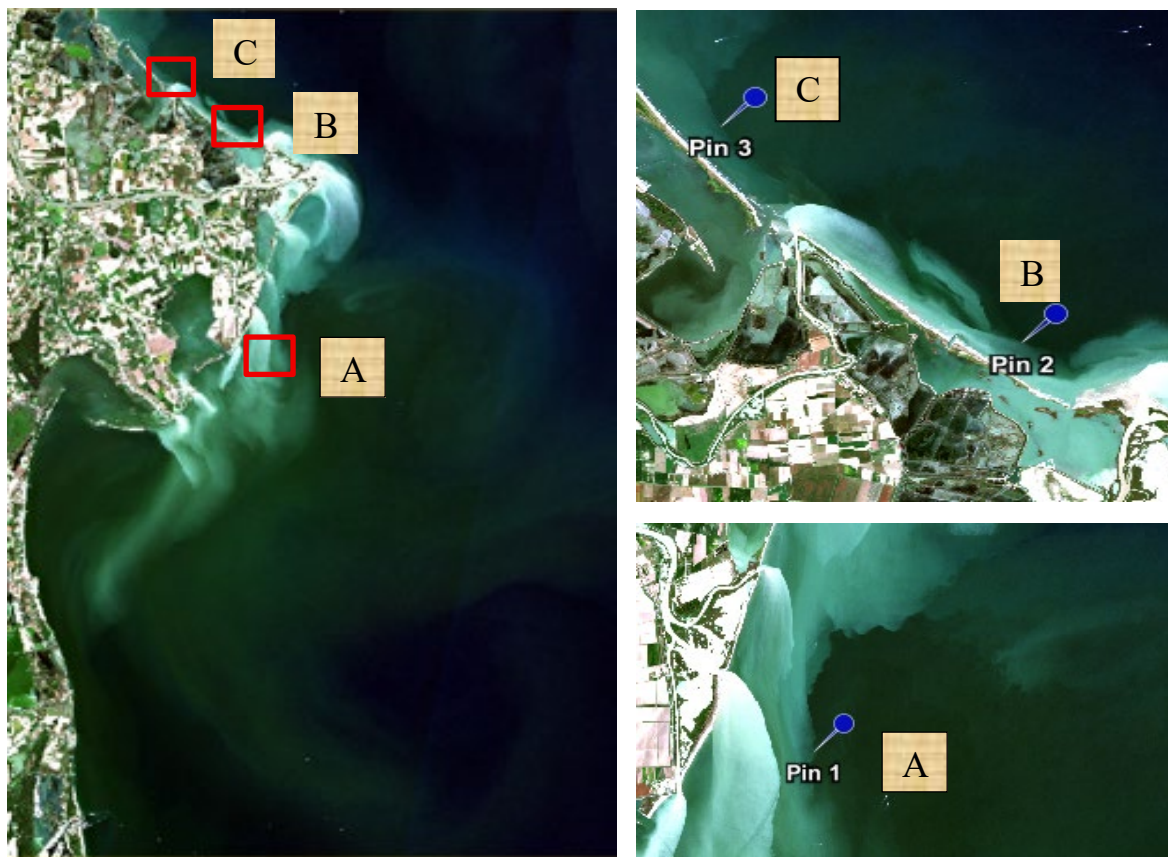


Tavola 4.a Analisi della scena Sentinel-2 del 06 settembre 2025: distribuzione FDI e soglie operative. La tavola mostra la composizione RGB della scena, la distribuzione dei valori FDI, la coda positiva della distribuzione e le soglie candidate utilizzate per l'individuazione dei pixel sopra soglia.

I dati estrapolati dopo l'applicazione del FDI indicano che la percentuale di pixel con valori positivi è pari a circa **31,60%**, quindi nettamente inferiore rispetto alle scene di aprile, maggio e soprattutto di agosto. Questo significa che il segnale positivo non domina la scena, ma è più localizzato. In questo caso lo zero torna ad avere una maggiore utilità interpretativa, perché separa meglio le aree con risposta radiometrica positiva da quelle con valori nulli o negativi.

Le soglie considerate, pari a **0,03**, **0,04** e **0,05**, corrispondono ai percentili **96,85**, **97,75** e **98,40**. Questi valori indicano che la sogliatura seleziona la parte alta della distribuzione positiva, ma non in modo estremo come nella scena del 12 agosto. Le percentuali di pixel sopra soglia sono circa **0,99%**, **0,71%** e **0,50%** dei pixel validi: valori ridotti, ma sufficientemente consistenti da permettere una selezione più leggibile delle anomalie. Nel complesso, la scena è favorevole per l'analisi perché presenta una plume più contenuta e una risposta FDI più selettiva. La minore estensione del segnale positivo riduce il rischio di interpretare come anomalie aree troppo ampie di fondo radiometrico alterato

ANOMALIE RADIOMETRICHE COMPATIBILI CON PRESENZA DI
MATERIALE PLASTICO GALLEGGIANTE



ESTRATTI ZONE SELEZIONATE

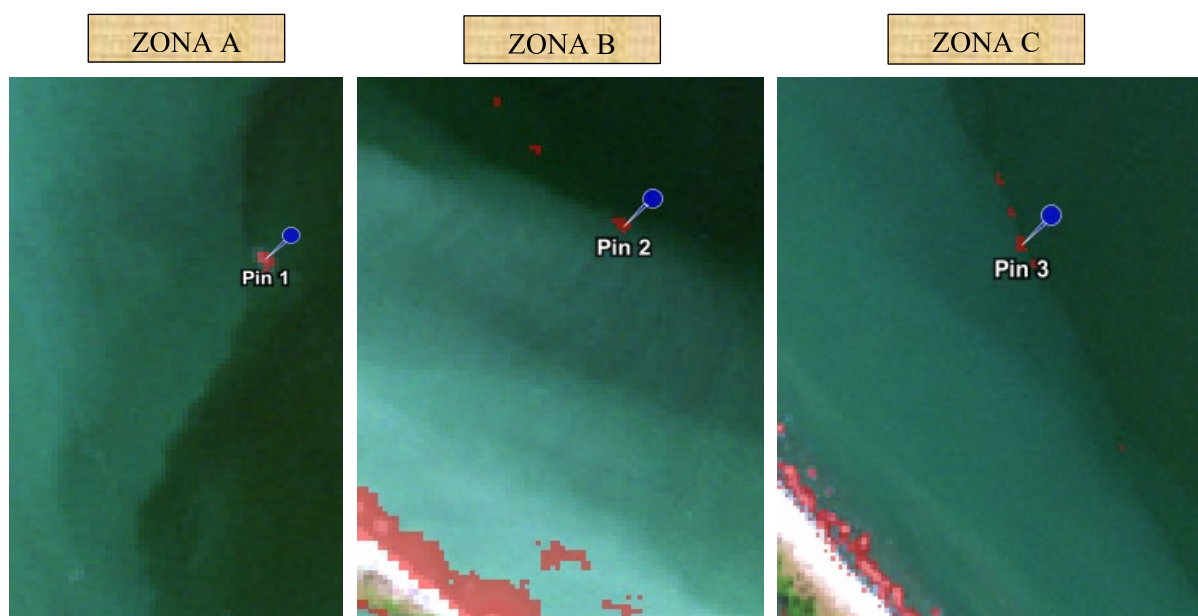


Tavola 4.b Analisi della scena Sentinel-2 del 06 settembre 2025: localizzazione e valutazione spaziale dei candidati. Sono riportati i candidati individuati nella scena e i relativi ingrandimenti, utilizzati per valutare la coerenza spaziale, e la posizione del segnale.

COORDINATE E VALORI RADIOMETRICI DEI CANDIDATI SELEZIONATI

ZONA A

	Longitude	12°30'35" E	degree
	Latitude	44°51'08" N	degree
	Map-X	777325.0	m
	Map-Y	4972535.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-09-06	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:00:41:025 AM	HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.05450	dl
	fdiC	0.04927	
PIN 1 candidato ad intermedia coerenza			

ZONA B

	Longitude	12°28'22" E	degree
	Latitude	45°00'29" N	degree
	Map-X	773665.0	m
	Map-Y	4989705.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-09-06	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:00:41:025 AM	HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.01520	dl
	fdiC	0.04279	
PIN 2 candidato ad alta coerenza			

ZONA C

	Longitude	12°23'26" E	degree
	Latitude	45°03'41" N	degree
	Map-X	766935.0	m
	Map-Y	4995375.0	m
	☐ Time		
	Date	2025-09-06	YYYY-MM-DD
	Time (UTC)	10:00:41:025 AM	HH:MM:SS:mm
	☐ Bands		
	B4	0.01590	dl
	fdiC	0.05458	
PIN 3 candidato ad intermedia coerenza			

Tavola 4.c Analisi della scena Sentinel-2 del 06 settembre 2025: coordinate e valori radiometrici dei candidati selezionati. La tavola riporta la posizione dei candidati individuati e i principali valori radiometrici associati, utili alla valutazione comparativa dei segnali selezionati.

RELAZIONE TRA CANDIDATI E CIRCOLAZIONE SUPERFICIALE

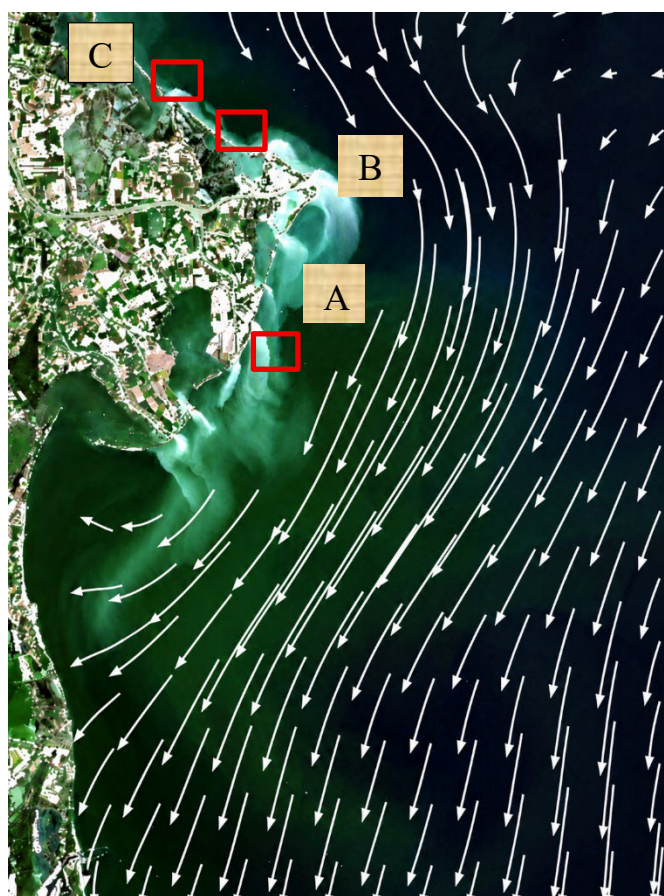


Fig. 3.8 Relazione tra candidati selezionati e circolazione superficiale nella scena del 06 settembre 2025. La figura mostra la posizione dei candidati rispetto al campo di circolazione superficiale, utilizzato come supporto interpretativo per valutare la possibile coerenza dinamica dei segnali individuati. Le correnti superficiali a risoluzione giornaliera sono state ricavate dal prodotto Mediterranean Sea Physics Analysis and Forecast del Copernicus Marine Service (CMS), con una risoluzione orizzontale di $1/24^\circ$ (circa 4 km). @Coppini et al. (2023)

Nella scena analizzata (S06), la sovrapposizione tra circolazione superficiale e anomalie radiometriche evidenzia una relazione spaziale coerente tra i candidati selezionati e il margine del plume del Po. Le anomalie A, B e C non sono distribuite nel corpo centrale più omogeneo del plume, ma si collocano lungo fasce di transizione tra acque fluviali torbide e acque marine più esterne. La circolazione superficiale mostra un andamento prevalentemente parallelo e curvilineo rispetto al bordo del plume, suggerendo un possibile ruolo nel trasporto e nell'allineamento del materiale galleggiante lungo la struttura frontale. In questo contesto, la circolazione costituisce un supporto dinamico alla loro interpretazione come candidati coerenti con possibili accumuli superficiali lungo il bordo del plume.

Capitolo 4

Conclusioni e future ricerche

Dall'analisi delle scene Sentinel-2 emerge che la risposta dell'FDI è fortemente condizionata dalla configurazione del plume del Po. Nelle scene in cui il plume risulta più esteso o radiometricamente attivo, la percentuale di pixel con FDI positivo aumenta sensibilmente; tuttavia, questo comportamento non può essere interpretato come indicazione diretta di una maggiore presenza di plastica galleggiante. Poiché l'FDI misura un'anomalia della banda NIR rispetto a una baseline spettrale costruita con altre bande, la presenza di torbidità, sedimenti sospesi e materiale particellato può modificare il fondo radiometrico della scena e ridurre la capacità discriminante della semplice soglia $FDI > 0$. Per questo motivo, nelle scene analizzate, l'indice è risultato utile soprattutto quando interpretato attraverso soglie progressive, definite in relazione alla distribuzione dei valori FDI della singola scena e controllo contestuale tramite RGB e struttura del plume (Figg. 3.1–3.4; Tavole 1.a–4. a).

Le estese aree sopra soglia osservate in prossimità delle bocche del Po sono quindi interpretabili con cautela, poiché possono essere associate alla risposta ottica delle acque torbide e del materiale sospeso del plume fluviale. Questa interpretazione è coerente con gli studi sul prodelta del Po, che evidenziano il ruolo della portata fluviale e delle condizioni meteo-marine nel modulare torbidità e materiale sospeso superficiale (Brando et al., 2015; Braga et al., 2017; Vona et al., 2025). Di conseguenza, i segnali più significativi non sono stati ricercati nelle aree di risposta FDI diffusa, ma nella parte alta della distribuzione positiva, dove le anomalie risultano più localizzate, spazialmente coerenti e meno direttamente riconducibili alla sola torbidità del plume.

Nel complesso, i candidati selezionati non risultano distribuiti casualmente sulla superficie marina, ma tendono a localizzarsi lungo i margini del plume e nelle fasce di transizione tra acque fluviali torbide e acque marine più esterne (Tavole 1.b–4.c). Questa disposizione suggerisce un possibile legame tra anomalie radiometriche, fronti del plume e strutture dinamiche superficiali favorevoli all'allineamento o alla concentrazione temporanea di materiale galleggiante. La sovrapposizione con i campi

di circolazione superficiale mostra, infatti, una coerenza generale tra la posizione dei candidati, il bordo del plume e l'andamento delle correnti, in accordo con l'idea che fronti e zone di convergenza possano agire come aree preferenziali di accumulo in ambiente costiero (Le et al., 2024) (Figg. 3.5–3.8).

Questa relazione deve tuttavia essere interpretata con prudenza. I campi di corrente Copernicus utilizzati hanno una risoluzione spaziale dell'ordine di alcuni chilometri e descrivono la circolazione superficiale a scala modellistica; non possono quindi risolvere direttamente processi più fini, come bande superficiali di accumulo (windrows) o circolazioni di Langmuir. Per questo motivo, la circolazione è stata utilizzata come supporto dinamico generale, mentre la valutazione dei singoli candidati è stata basata sull'integrazione tra segnale FDI, morfologia, posizione rispetto al plume e presenza di eventuali elementi confondenti (van Sebille et al., 2020; Cózar et al., 2021; Cózar et al., 2024).

I risultati non consentono di attribuire con certezza le anomalie osservate alla presenza di plastica, poiché l'FDI può rispondere anche a schiume, materiale organico, macroalghe, sedimenti sospesi o altri materiali galleggianti. Tuttavia, l'approccio adottato mostra che l'integrazione tra Sentinel-2, FDI, soglie progressive, analisi RGB e lettura dinamica della scena permette di selezionare in modo prudente candidati compatibili con possibili accumuli superficiali. In questo quadro, i margini del plume del Po emergono come settori preferenziali per la ricerca di anomalie coerenti con materiale galleggiante, mentre le aree di risposta FDI diffusa all'interno del plume devono essere considerate con maggiore cautela.

Oltre agli aspetti metodologici, il lavoro contribuisce a evidenziare una dimensione ambientale rilevante del problema. La plastica galleggiante non rappresenta soltanto un contaminante disperso sulla superficie marina, ma un materiale il cui destino è regolato dall'interazione tra sorgenti terrestri, trasporto fluviale, circolazione costiera e strutture di accumulo superficiale. In questo quadro, il plume del Po non è solo un elemento di complessità radiometrica, ma anche una struttura fisica attraverso cui il problema dei rifiuti galleggianti può essere osservato, contestualizzato e reso spazialmente interpretabile. La tesi suggerisce quindi che il telerilevamento, se integrato con la lettura oceanografica della scena, può supportare non solo la ricerca di possibili accumuli superficiali, ma anche una forma di prevenzione ambientale basata sull'individuazione delle aree più vulnerabili o più favorevoli alla concentrazione temporanea dei detriti. In questo senso, il contributo ecologico del lavoro risiede nella possibilità di passare da

una percezione generica dell'inquinamento plastico a una lettura più mirata dei luoghi e dei processi in cui tale problema tende a manifestarsi.

A partire dai risultati ottenuti, un primo sviluppo futuro potrebbe riguardare l'estensione dell'analisi a un intervallo temporale più ampio, includendo un numero maggiore di scene Sentinel-2 distribuite su più anni e su diverse condizioni stagionali. Questo permetterebbe di verificare se le anomalie radiometriche individuate lungo i margini del plume del Po rappresentino episodi isolati oppure configurazioni ricorrenti, associate a particolari condizioni idrologiche, meteorologiche e marine. La variabilità osservata nelle composizioni RGB preliminari e nelle distribuzioni FDI delle quattro scene rappresentative suggerisce infatti l'utilità di ampliare il numero di casi analizzati, così da distinguere meglio le caratteristiche episodiche da quelle ricorrenti (Fig. 3.1–3.4; Tavole 1.a–4. a). In particolare, sarebbe utile integrare le soglie FDI con dati di portata del fiume Po, vento, moto ondoso e circolazione superficiale, in modo da valutare meglio il ruolo combinato del trasporto fluviale e della dinamica marina nella formazione delle aree preferenziali di accumulo.

Un secondo sviluppo potrebbe consistere nel rafforzamento della validazione dei candidati individuati. Poiché l'FDI evidenzia anomalie radiometriche compatibili con materiale galleggiante ma non consente, da solo, di attribuire con certezza tali segnali alla presenza di plastica, sarebbe necessario confrontare i risultati con osservazioni indipendenti. Tra queste potrebbero rientrare immagini a maggiore risoluzione spaziale, dati acquisiti da drone, rilievi in situ o campagne di campionamento mirate nelle aree in cui le anomalie risultano più persistenti. I candidati localizzati e descritti nelle tavole di analisi rappresentano possibili aree prioritarie per una futura verifica sul campo, soprattutto quando mostrano coerenza radiometrica, organizzazione spaziale e relazione con strutture dinamiche superficiali (Tavole 1.b–4.c; Fig. 3.5–3.8). Questo passaggio permetterebbe di distinguere con maggiore affidabilità i possibili accumuli di materiale plastico da altri segnali superficiali, come sedimenti sospesi, schiume, materiale organico o effetti legati al glint solare.

Infine, il metodo potrebbe essere applicato in modo comparativo ad altre aree costiere influenzate da apporti fluviali significativi. Il ruolo dei fiumi come sorgenti e vie di trasporto della plastica verso il mare è già ampiamente documentato in letteratura; tuttavia, resta utile verificare se l'approccio adottato in questo lavoro, basato sull'integrazione tra Sentinel-2, FDI, analisi del plume e circolazione superficiale, sia trasferibile anche ad altri sistemi deltizi o estuarini. Il confronto con contesti fluviali

differenti permetterebbe di valutare se la localizzazione dei candidati lungo margini di plume, fronti e zone di transizione rappresenti una configurazione specifica del delta del Po oppure una dinamica più generale di trasporto e accumulo del materiale galleggiante in ambiente marino-costiero.

BIBLIOGRAFIA

Artegiani, A., Bregant, D., Paschini, E., Pinardi, N., Raicich, F., & Russo, A. (1997a). The Adriatic Sea general circulation. Part I: Air-sea interactions and water mass structure. *Journal of Physical Oceanography*, 27(8), 1492–1514. [doi:10.1175/1520-0485\(1997\)027<1492>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<1492>2.0.CO;2)

Artegiani, A., Bregant, D., Paschini, E., Pinardi, N., Raicich, F., & Russo, A. (1997b). The Adriatic Sea general circulation. Part II: Baroclinic circulation structure. *Journal of Physical Oceanography*, 27(8), 1515–1532. [doi:10.1175/1520-0485\(1997\)027<1515>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<1515>2.0.CO;2)

Atwood, E. C., Falcieri, F. M., Piehl, S., Bochow, M., Matthies, M., Franke, J., Carniel, S., Sclavo, M., Laforsch, C., & Siegert, F. (2019). Coastal accumulation of microplastic particles emitted from the Po River, Northern Italy: Comparing remote sensing and hydrodynamic modelling with in situ sample collections. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 561–574. [doi:10.1016/j.marpolbul.2018.11.045](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.045)

Biermann, L., Clewley, D., Martinez-Vicente, V., & Topouzelis, K. (2020). Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data. *Scientific Reports*, 10, 5364. [doi:10.1038/s41598-020-62298-z](https://doi.org/10.1038/s41598-020-62298-z)

Boldrin, A., Langone, L., Miserocchi, S., Turchetto, M., & Acri, F. (2005). Po River plume on the Adriatic continental shelf: Dispersion and sedimentation of dissolved and suspended matter during different river discharge rates. *Marine Geology*, 222–223, 135–158. doi.org/10.1016/j.margeo.2005.06.010

Borrelle, S. B., Ringma, J., Lavender Law, K., Monnahan, C. C., Lebreton, L., McGivern, A., Murphy, E., Jambeck, J., Leonard, G. H., Hilleary, M. A., Eriksen, M., Possingham, H. P., De Frond, H., Gerber, L. R., Polidoro, B., Tahir, A., Bernard, M., Mallos, N., Barnes, M., & Rochman, C. M. (2020). Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, 369(6510), 1515–1518. [doi:10.1126/science.aba3656](https://doi.org/10.1126/science.aba3656)

Braga, F., Zaggia, L., Bellafore, D., Bresciani, M., Giardino, C., Lorenzetti, G., Maicu, F., Manzo, C., Riminucci, F., Ravaioli, M., & Brando, V. E. (2017). Mapping turbidity patterns in the Po river prodelta using multi-temporal Landsat 8 imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 555–567. [doi:10.1016/j.ecss.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.11.003)

Brando, V. E., Braga, F., Zaggia, L., Giardino, C., Bresciani, M., Matta, E., Bellafore, D., Ferrarin, C., Maicu, F., Benetazzo, A., Bonaldo, D., Falcieri, F. M., Coluccelli, A., Russo, A., & Carniel, S. (2015). High-resolution satellite turbidity and sea surface temperature observations of river plume interactions during a significant flood event. *Ocean Science*, 11, 909–920. [doi:10.5194/os-11-909-2015](https://doi.org/10.5194/os-11-909-2015)

Carlson, D. F., Suaria, G., Aliani, S., Fredj, E., Fortibuoni, T., Griffo, A., Russo, A., & Melli, V. (2017). Combining litter observations with a regional ocean model to identify sources and sinks of floating debris in a semi-enclosed basin: The Adriatic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 4, 78. [doi:10.3389/fmars.2017.00078](https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00078)

Copernicus Data Space Ecosystem. (2026). *Sentinel-2 documentation*. Copernicus Programme. <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2>
Consultato il 17 giugno 2026.

BIBLIOGRAFIA

Cózar, A., Aliani, S., Basurko, O. C., Arias, M., Isobe, A., Topouzelis, K., Rubio, A., & Morales-Caselles, C. (2021). Marine litter windrows: A strategic target to understand and manage the ocean plastic pollution. *Frontiers in Marine Science*, 8, 571796. [doi: 10.3389/fmars.2021.571796](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.571796)

Cózar, A., Arias, M., Suaria, G., Viejo, J., Aliani, S., Koutroulis, A., Delaney, J., Bonnery, G., Macías, D., de Vries, R., Sumerot, R., Morales-Caselles, C., Turiel, A., González-Fernández, D., & Corradi, P. (2024). Proof of concept for a new sensor to monitor marine litter from space. *Nature Communications*, 15, 4637. [doi: 10.1038/s41467-024-48674-7](https://doi.org/10.1038/s41467-024-48674-7)

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. [doi:10.1016/j.rse.2011.11.026](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026)

Eleveld, M. A. (2001). *Po plume impact on the geomorphology of the Adriatic coast: Input for a distributed information system* (EUR 19831 EN). European Commission, Joint Research Centre. <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/@224419/po-plume-impact-on-the-geomorphology-the/>

European Commission. (s.d.). *What is Copernicus*. EU Space Programme. <https://eu-space.europa.eu/programmes/earth-observation-copernicus/what-copernicus>
Consultato il 17 giugno 2026.

European Space Agency. (2021). *Sentinel-2 Level-2A Algorithm Theoretical Basis Document: Sen2Cor processor* (Version 2.10). ESA. <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.10.0/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-ATBD-V2.10.0.pdf>

European Space Agency. (2024). *Sentinel-2 User Handbook*. ESA. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

European Space Agency SNAP. (2026a). *SNAP Help: Resampling operator / Resample Sentinel-2 products*. ESA STEP. <https://step.esa.int/main/wp-content/help/?version=11.0.0&helpid=s2resampler>
Consultato il 17 giugno 2026.

European Space Agency SNAP. (2026b). *SNAP Help: Create Land Mask / Land-Sea-Mask operator*. ESA STEP. <https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/13.0.0/snap/org.esa.snap.snap.raster.ui/operators/CreateLandMask.html>
Consultato il 17 giugno 2026.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. [doi:10.1126/sciadv.1700782](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782)

Hu, C. (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2118–2129. [doi:10.1016/j.rse.2009.05.012](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012)

Kikaki, K., Kakogeorgiou, I., Mikeli, P., Raitsos, D. E., & Karantza, K. (2022). MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data. *PLOS ONE*, 17(1), e0262247. [doi:10.1371/journal.pone.0262247](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262247)

Kourafalou, V. H. (1999). Process studies on the Po River plume, North Adriatic Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C12), 29963–29985. [doi:10.1029/1999JC900217](https://doi.org/10.1029/1999JC900217)

BIBLIOGRAFIA

- Le, P. T. D., Hardesty, B. D., Auman, H. J., & Fischer, A. M. (2024). Frontal processes as drivers of floating marine debris in coastal areas. *Marine Environmental Research*, 200, 106654. [doi:10.1016/j.marenvres.2024.106654](https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106654)
- Liubartseva, S., Coppini, G., Lecci, R., & Creti, S. (2016). Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1–2), 115–127. [doi:10.1016/j.marpolbul.2015.12.031](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.031)
- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-Knorn, M., Bieniarz, J., Müller-Wilm, U., Cadau, E., & Gascon, F. (2016). Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users. In *Proceedings of the Living Planet Symposium 2016* (ESA SP-740). European Space Agency. https://elib.dlr.de/107381/1/LPS2016_sm10_3louis.pdf
- Marini, M., Jones, B. H., Campanelli, A., Grilli, F., & Lee, C. M. (2008). Seasonal variability and Po River plume influence on biochemical properties along western Adriatic coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113, C05S90. [doi:10.1029/2007JC004370](https://doi.org/10.1029/2007JC004370)
- Meijer, L. J. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., & Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18), eaaz5803. [doi:10.1126/sciadv.aaz5803](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803)
- Onink, V., Jongedijk, C. E., Hoffman, M. J., van Sebille, E., & Laufkötter, C. (2021). Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. *Environmental Research Letters*, 16(6), 064053. [doi:10.1088/1748-9326/abecbd](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abecbd)
- Sentinel Hub. (2026). *Sentinel-2 L2A Scene Classification Map*. Sentinel Hub Custom Scripts Documentation. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/scene-classification/> Consultato il 17 giugno 2026.
- Topouzelis, K., Papakonstantinou, A., & Garaba, S. P. (2019). Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems: Plastic Litter Project 2018. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 175–183. [doi:10.1016/j.jag.2019.03.011](https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.011)
- van Sebille, E., Aliani, S., Law, K. L., Maximenko, N., Alsina, J. M., Bagaev, A., Bergmann, M., Chapron, B., Chubarenko, I., Cózar, A., Delandmeter, P., Egger, M., Fox-Kemper, B., Garaba, S. P., Goddijn-Murphy, L., Hardesty, B. D., Hoffman, M. J., Isobe, A., Jongedijk, C. E., Kaandorp, M. L. A., ... Wichmann, D. (2020). The physical oceanography of the transport of floating marine debris. *Environmental Research Letters*, 15(2), 023003. [doi:10.1088/1748-9326/ab6d7d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7d)
- Vona, I., Colella, S., Sammartino, M., Brando, V. E., & Falcini, F. (2025). Positive correlation between the Po River discharge and ocean colour trends of Chl and TSM in the Adriatic Sea. *Frontiers in Remote Sensing*, 6, 1574347. [doi:10.3389/frsen.2025.1574347](https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1574347)
- Zavatarelli, M., & Pinardi, N. (2003). The Adriatic Sea modelling system: A nested approach. *Annales Geophysicae*, 21, 345–364. [doi:10.5194/angeo-21-345-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-345-2003)
- Zavatarelli, M., Pinardi, N., Kourafalou, V. H., & Maggiore, A. (2002). Diagnostic and prognostic model studies of the Adriatic Sea general circulation: Seasonal variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C1), 3004. [doi:10.1029/2000JC000210](https://doi.org/10.1029/2000JC000210)