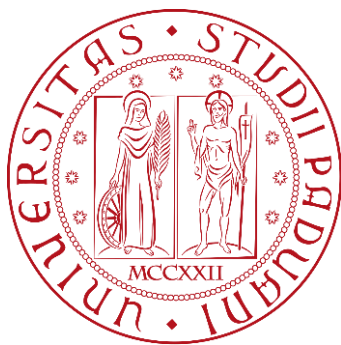




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

Direttore Prof. Nicola Surian

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA AMBIENTALE
E DINAMICA DELLA TERRA

Controlli morfodinamici sulla formazione e spaziatura dei canali a marea

Relatore: D'Alpaos Andrea

Correlatore: Finotello Alvise

Laureando: Carletti Mattia

Matricola: 2157577

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Ambienti intertidali e reti di canali a marea	1
1.2 Sistemi di canali a marea paralleli.....	8
1.3 Spaziatura e organizzazione dei canali a marea	12
2. AREE STUDIO	21
3. METODOLOGIA.....	24
3.1 Individuazione delle aree di studio e acquisizione dati	24
3.2 Identificazione e digitalizzazione dei canali a marea	25
3.3 Calcolo della larghezza dei canali e dell'interasse.....	28
3.4 Calcolo della distanza db dal canale più vicino di larghezza maggiore o uguale	29
3.5 Analisi statistica preliminare	31
3.6 Analisi dell'adattamento alla legge di potenza	32
3.7 Verifica del modello mediante log-likelihood.....	35
3.8 Binarizzazione della rete di canali di Sapelo Island.....	36
3.9 Nuova analisi dell'intera rete di canali a marea	38
4. RISULTATI.....	41
4.1 Distribuzione della distanza db dal canale più vicino di larghezza maggiore o uguale	41
4.2 Distribuzione degli interassi successivi.....	46
4.3 Confronto tra dati estratti dal DTM e immagini satellitari.....	52
4.4 Confronto tra casi vegetati e non vegetati	56
4.5 Confronto tra casi distinti per tidal range	58

4.6 Confronto tra casi sviluppati in differenti contesti ambienti	60
4.7 Analisi dell'intera rete di drenaggio.....	62
5. DISCUSSIONE	65
6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	74
BIBLIOGRAFIA	76

RIASSUNTO

Le reti di canali a marea rappresentano uno degli elementi morfologici fondamentali degli ambienti intertidali, poiché regolano gli scambi di acqua, sedimenti e nutrienti tra il mare e le superfici di barena e piana tidale. Tra le diverse configurazioni osservabili in natura, i sistemi caratterizzati da canali paralleli e sub-paralleli costituiscono una tipologia relativamente rara, la cui organizzazione spaziale risulta ancora poco compresa. L'obiettivo del presente studio è valutare se le reti di canali a marea paralleli presentino configurazioni spaziali ricorrenti, descrivibili attraverso relazioni statistiche comuni, oppure se tali configurazioni siano prevalentemente controllate da forzanti sito-specifiche. L'analisi mira quindi a contribuire alla comprensione dei processi che regolano la formazione, lo sviluppo e l'organizzazione spaziale delle reti di canali a marea paralleli.

Le analisi sono state condotte su dieci casi studio distribuiti a scala globale, appartenenti a differenti contesti geomorfologici e caratterizzati da diversi regimi di marea e condizioni di copertura vegetale. Per ciascun caso studio sono state analizzate due metriche rappresentative dell'organizzazione spaziale dei canali: la distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale, indicata come d_b , e l'interasse tra canali successivi. Per entrambe le metriche sono state costruite le corrispondenti distribuzioni cumulative, successivamente rappresentate in scala logaritmica al fine di verificare l'eventuale presenza di comportamenti riconducibili a relazioni di scala, tipicamente osservate nelle reti di drenaggio fluviale.

La compatibilità delle distribuzioni con una legge di potenza è stata valutata mediante analisi statistica della porzione di coda delle distribuzioni. Per la distribuzione degli interassi successivi è stato inoltre effettuato un confronto quantitativo tra il modello power law e una distribuzione esponenziale. Ove possibile, l'analisi è stata ripetuta utilizzando sia modelli digitali del terreno sia immagini satellitari, così da valutare l'influenza della tipologia di dato di partenza. Infine, è stato sviluppato e applicato un nuovo codice MATLAB per l'analisi dell'intera rete di drenaggio e per l'estrazione automatica di nuove metriche spaziali.

I risultati mostrano che entrambe le distribuzioni analizzate presentano, nella maggior parte dei casi, una coda compatibile con un comportamento di tipo power law, con una sostanziale uniformità dei coefficienti angolari e degli esponenti della legge di potenza stimati nei diversi casi studio. Per la distribuzione degli interassi successivi, il confronto statistico indica inoltre una prevalenza del modello power law rispetto a quello esponenziale. Le due metriche analizzate descrivono tuttavia aspetti differenti dell'organizzazione spaziale della rete: mentre l'interasse tra canali successivi rappresenta principalmente una misura della spaziatura locale e della densità degli outlet, la distanza d_b combina posizione spaziale e dimensione dei canali, fornendo un'indicazione della loro organizzazione gerarchica. La maggiore uniformità delle distribuzioni di d_b nei diversi casi studio suggerisce quindi che l'accoppiamento tra dimensione e separazione spaziale dei canali possa rappresentare una proprietà più robusta rispetto alla semplice spaziatura locale.

I confronti effettuati non evidenziano differenze sistematiche riconducibili alla presenza della vegetazione, al regime di marea o al contesto geomorfologico, suggerendo che tali fattori possano influenzare prevalentemente la geometria locale dei canali, piuttosto che la loro organizzazione spaziale complessiva. Il confronto tra le analisi basate su modelli digitali del terreno e quelle condotte utilizzando sole immagini satellitari ha evidenziato differenze contenute, indicando che, almeno per i casi esaminati, la metodologia sviluppata può fornire risultati confrontabili anche in assenza di dati topografici ad alta risoluzione.

L'applicazione preliminare del nuovo codice MATLAB all'intera rete di drenaggio ha restituito distribuzioni caratterizzate da andamenti e parametri statistici confrontabili con quelli ottenuti mediante la metodologia basata sull'analisi dei singoli transetti. Il fatto che distribuzioni analoghe emergano anche dall'analisi dell'intera rete suggerisce che il comportamento osservato non dipenda esclusivamente dal campionamento lungo i transetti, ma rifletta una proprietà più generale dell'organizzazione spaziale delle reti tidali.

In conclusione, i risultati ottenuti suggeriscono che l'organizzazione spaziale dei canali a marea paralleli possa emergere da processi morfodinamici comuni di auto-organizzazione, attivi in contesti ambientali differenti. In particolare, la distanza tra canali di dimensione comparabile o maggiore sembra rivelare una possibile organizzazione gerarchica comune delle reti tidali, più robusta della semplice spaziatura locale tra outlet consecutivi. Il nuovo approccio basato sull'analisi dell'intera rete di drenaggio offre inoltre prospettive interessanti per descrivere in modo più completo e oggettivo l'organizzazione spaziale e la geometria delle reti di canali a marea.

ABSTRACT

Tidal channel networks are one of the fundamental morphological elements of intertidal environments, as they regulate the exchange of water, sediment, and nutrients between the sea and marsh or tidal-flat surfaces. Among the different configurations observed in nature, systems characterized by parallel and sub-parallel channels represent a relatively rare type, whose spatial organization remains poorly understood. The aim of this study is to assess whether parallel tidal channel networks exhibit recurrent spatial configurations that can be described by common statistical relationships, or whether such configurations are primarily controlled by site-specific environmental forcings. The analysis therefore aims to contribute to a better understanding of the processes controlling the formation, development, and spatial organization of parallel tidal channel networks.

The analyses were carried out on ten case studies distributed globally, belonging to different geomorphological settings and characterized by different tidal regimes and vegetation-cover conditions. For each case study, two metrics representative of channel spatial organization were analyzed: the distance to the nearest channel of equal or greater width, hereafter referred to as d_p , and the spacing between successive channels. For both metrics, cumulative distributions were constructed and plotted on logarithmic axes to assess the possible presence of scale-invariant behavior, commonly observed in fluvial drainage networks.

The compatibility of the distributions with a power-law behavior was assessed through statistical analysis of the distribution tails. For the spacing between successive channels, a quantitative comparison between the power-law model and an exponential distribution was also performed. Where possible, the analysis was repeated using both digital terrain models and satellite imagery, in order to evaluate the influence of the input data type. Finally, a new MATLAB code was developed and applied to analyze the entire drainage network and automatically extract additional spatial metrics.

The results show that, in most cases, both analyzed distributions display a tail compatible with power-law behavior, with substantial consistency in the slopes and estimated power-law exponents across the different case studies. For the spacing between successive

channels, the statistical comparison also indicates that the power-law model generally performs better than the exponential model. However, the two metrics describe different aspects of network spatial organization: while the spacing between successive channels mainly represents local outlet spacing and channel density, d_b combines channel position and size, thereby providing an indication of the hierarchical organization of the network. The greater consistency of the d_b distributions across the case studies suggests that the coupling between channel size and spatial separation may represent a more robust property than simple local outlet spacing.

The comparisons performed do not reveal systematic differences related to vegetation presence, tidal range, or geomorphological setting, suggesting that these factors may primarily influence local channel geometry rather than the overall spatial organization of the network. The comparison between analyses based on digital terrain models and those based on satellite imagery alone shows only minor differences, indicating that, at least for the cases examined, the proposed methodology can provide comparable results even in the absence of high-resolution topographic data.

The preliminary application of the new MATLAB code to the entire drainage network produced distributions with trends and statistical parameters comparable to those obtained using the transect-based methodology. The fact that similar distributions also emerge from the analysis of the entire network suggests that the observed behavior does not depend exclusively on transect-based sampling, but may reflect a more general property of the spatial organization of tidal networks.

In conclusion, the results suggest that the spatial organization of parallel tidal channels may emerge from common morphodynamic self-organization processes operating across different environmental settings. In particular, the distance between channels of comparable or greater size appears to reveal a possible common hierarchical organization of tidal networks, more robust than the simple local spacing between successive outlets. The new approach based on the analysis of the entire drainage network also offers promising perspectives for describing the spatial organization and geometry of tidal channel networks in a more complete and objective way.

1. INTRODUZIONE

1.1 Ambienti intertidali e reti di canali a marea

Gli ambienti intertidali rappresentano sistemi morfodinamici complessi situati nella zona di transizione tra il dominio continentale e quello marino. All'interno di questi ambienti avviene un continuo scambio di acqua, sedimenti e nutrienti. Dal punto di vista morfologico, questi ambienti, possono essere suddivisi in tre principali domini: le barene, le piane tidali e la rete dei canali a marea. Le barene costituiscono le porzioni relativamente più elevate del bacino tidale, sono periodicamente sommerse dalle maree e colonizzate da vegetazione alofila; le piane tidali occupano invece quote inferiori e sono generalmente prive di copertura vegetale stabile; mentre la rete dei canali a marea innerva le superfici di barena e le piane tidali fornendo una via preferenziale per i flussi di acqua, sedimenti e nutrienti all'interno dei bacini tidali e tra i bacini tidali stessi ed il mare (D'Alpaos et al., 2005).

La rete dei canali a marea svolge dunque un ruolo fondamentale sia nel drenare sia nell'alimentare le superfici intertidali, governando la distribuzione dei flussi all'interno dei bacini a marea (D'Alpaos et al., 2005). I canali a marea costituiscono inoltre il principale collegamento idrodinamico tra le porzioni esterne e interne del bacino costiero, regolando la propagazione dell'onda di marea e controllando gli scambi di acqua, sedimenti, nutrienti e organismi biologici. Attraverso il controllo della frequenza e della durata dell'inondazione, essi influenzano direttamente l'evoluzione morfologica degli ambienti intertidali (Hughes, 2012).

L'evoluzione delle superfici intertidali dipende fortemente dal rapporto tra l'apporto sedimentario e le variazioni del livello del mare. In presenza di un'adeguata disponibilità di sedimento, le superfici intertidali possono aumentare progressivamente la loro quota all'interno del range tidale, favorendo la crescita della vegetazione e la trasformazione delle piane tidali in barene vegetate. Al contrario, limitati apporti sedimentari o elevati tassi di innalzamento del livello marino possono determinare il progressivo annegamento delle superfici vegetate, portando alla transizione delle superfici vegetate verso piane tidali prive di vegetazione (Geng et al., 2021).

Lo sviluppo delle piane tidali e delle barene è strettamente correlato alla dinamica dei canali a marea, che rappresentano percorsi preferenziali di drenaggio e regolano la

distribuzione dei flussi e dei sedimenti nell'ambiente intertidale (Rinaldo et al., 1999 a, b; Marani et al., 2003; D'Alpaos et al., 2005; Coco et al., 2013; Geng et al., 2021). La formazione e l'evoluzione dei sistemi tidali derivano dalla continua interazione tra processi idrodinamici, trasporto sedimentario, variazioni morfologiche e processi biologici, che non agiscono in maniera indipendente ma si influenzano reciprocamente nel tempo. L'insieme di tali interazioni dà origine a un ciclo di retroazione morfodinamica, comunemente indicato come *morphodynamic loop*, nel quale idrodinamica, trasporto sedimentario e morfologia si modificano reciprocamente, controllando l'evoluzione complessiva degli ambienti intertidali (Figura 1.1).

Le modificazioni della morfologia alterano infatti la distribuzione dei flussi e il trasporto dei sedimenti, determinando ulteriori cambiamenti morfologici che, a loro volta, modificano nuovamente le condizioni idrodinamiche del sistema. Nei sistemi vegetati, anche la vegetazione partecipa attivamente a queste dinamiche, influenzando sia le caratteristiche idrodinamiche sia i processi di erosione e deposizione sedimentaria. Attraverso queste interazioni, il sistema tende a evolvere verso condizioni di equilibrio dinamico, che possono tuttavia essere modificate da perturbazioni esterne, quali variazioni delle condizioni idrodinamiche, della disponibilità di sedimenti, dello sviluppo della vegetazione o dell'innalzamento relativo del livello del mare. La risposta del sistema a tali perturbazioni è regolata da meccanismi di retroazione, comunemente indicati come feedback. In particolare, i feedback positivi tendono ad amplificare le perturbazioni morfologiche, favorendo la concentrazione dei flussi, l'erosione e lo sviluppo dei canali; al contrario, i feedback negativi, associati principalmente all'azione della vegetazione, promuovono l'intrappolamento dei sedimenti, la produzione di suolo organico e la stabilizzazione delle superfici.

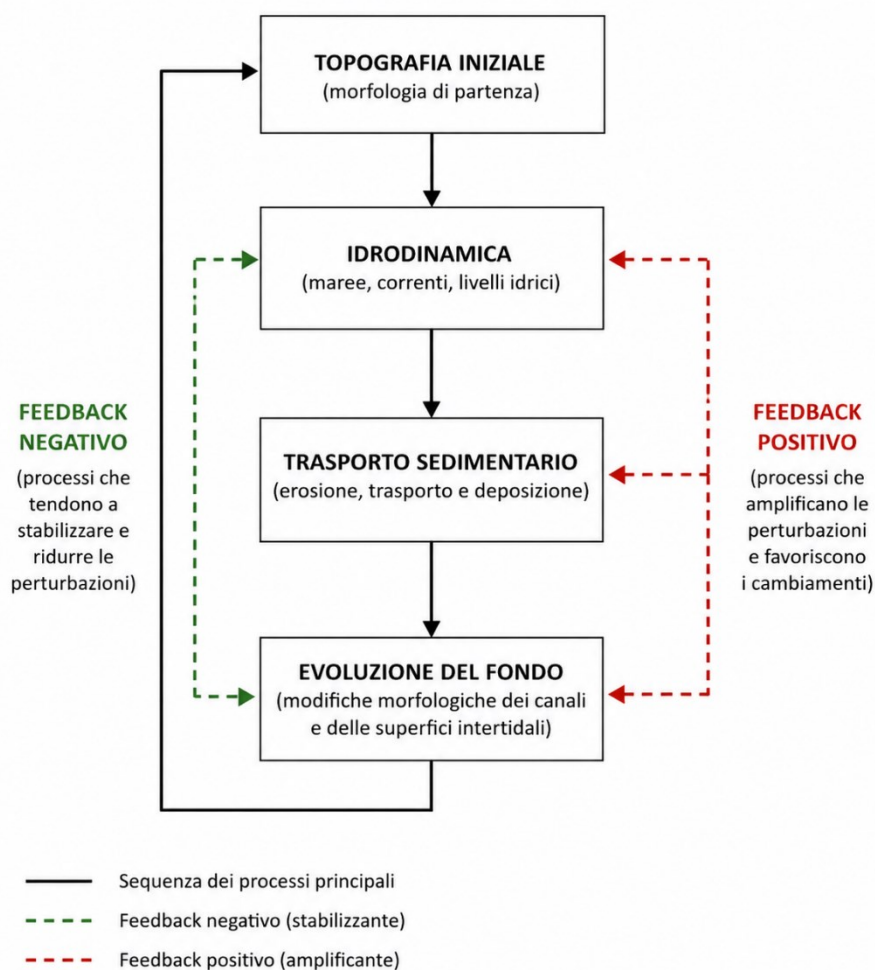


Figura 1.1 Schema concettuale del Morphodynamic Loop, che illustra le principali interazioni tra topografia, idrodinamica, trasporto sedimentario ed evoluzione morfologica

Numerosi studi hanno evidenziato come la vegetazione eserciti un ruolo fondamentale nello sviluppo e nell'evoluzione dei sistemi di canali a marea (D'Alpaos et al., 2005; Temmerman et al., 2007; Coco et al., 2013; Geng et al., 2021). La presenza della vegetazione tende a ridurre l'energia del flusso e ad aumentare la deposizione dei sedimenti attraverso processi di intrappolamento sedimentario e produzione di suolo organico. Allo stesso tempo, nelle prime fasi di sviluppo delle barene, la distribuzione delle parti vegetate può favorire concentrazioni localizzate del flusso, inducendo fenomeni erosivi che contribuiscono alla creazione e alla crescita dei canali a marea (Geng et al., 2021). Oltre a modificare i processi deposizionali ed erosivi, la presenza della vegetazione influenza anche la geometria dei canali (Kearney et al., 2016; Schwarz et al., 2022; van de Vijssel et al., 2023). Substrati vegetati e maggiormente coesivi tendono infatti a favorire lo sviluppo di reti più sinuose e complesse, mentre superfici prive di

vegetazione e caratterizzate da sedimenti meno coesivi mostrano frequentemente canali più rettilinei e pattern più semplici (D'Alpaos et al., 2005; Fagherazzi & Sun, 2004; Hughes, 2012; Schwarz et al., 2022). Le osservazioni riportate da Hughes et al. (2012) evidenziano inoltre come le reti di canali a marea presentino un'elevata variabilità morfologica e possano assumere configurazioni planimetriche molto differenti anche all'interno dello stesso sistema costiero. Accanto a reti semplici caratterizzate da canali lineari o debolmente ramificati, possono svilupparsi sistemi dendritici, meandriiformi, reticolati o altamente complessi, fino a configurazioni influenzate da processi naturali e antropici. Tale diversità riflette l'azione combinata delle condizioni idrodinamiche, delle caratteristiche sedimentarie e della presenza della vegetazione, che controllano l'evoluzione e l'organizzazione spaziale delle reti di drenaggio tidali.

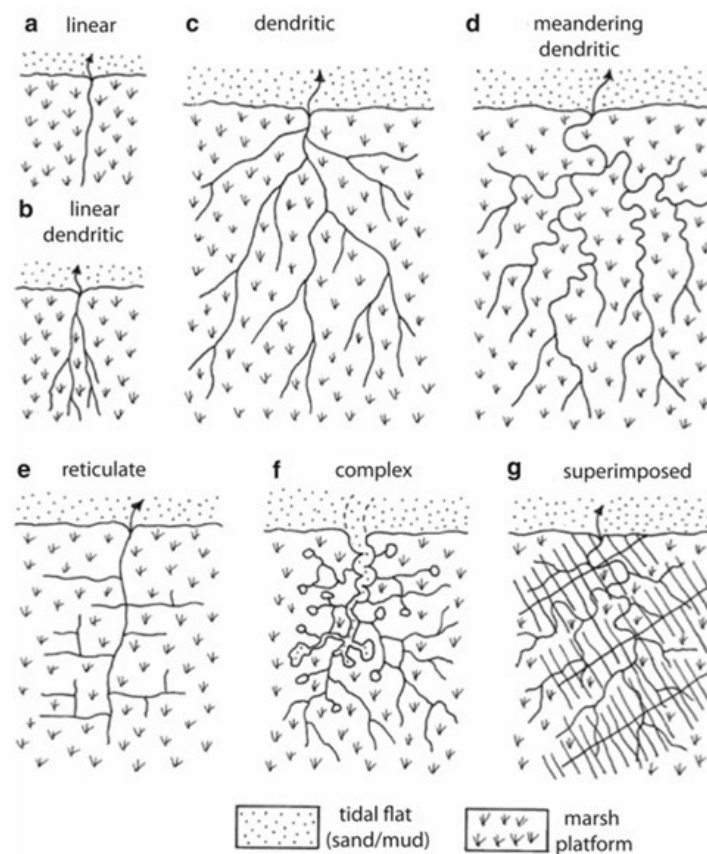


Figura 1.2 Principali configurazioni morfologiche delle reti di canali a marea: (a) lineare, (b) lineare dendritica, (c) dendritica, (d) dendritica meandriforme, (e) reticolata, (f) complessa e (g) superimposta.

Fonte: Hughes (2012).

La formazione dei canali a marea può essere interpretata come il risultato dell'amplificazione di piccole irregolarità presenti sulla superficie intertidale. Studi teorici sulla formazione delle reti di drenaggio evidenziano infatti come superfici inizialmente lisce possano diventare instabili quando il trasporto sedimentario è fortemente influenzato dalla concentrazione del flusso superficiale (Smith & Bretherton, 1972; Loewenherz, 1991; Perron et al., 2008). In tali condizioni, modeste perturbazioni topografiche tendono a convogliare quantità maggiori di acqua, aumentando localmente l'erosione e favorendo l'approfondimento delle incisioni. Questo processo rappresenta uno dei principali esempi di feedback morfodinamico positivo introdotti nel paragrafo precedente, in quanto la concentrazione del flusso favorisce l'erosione locale che, a sua volta, incrementa ulteriormente la concentrazione del flusso, amplificando progressivamente le incisioni fino a favorire lo sviluppo delle reti canalizzate (Smith & Bretherton, 1972; Loewenherz, 1991).

Successivi approfondimenti hanno evidenziato come la transizione da una superficie non canalizzata a una rete organizzata di canali rappresenti un processo di instabilità morfologica controllato dall'interazione tra processi erosivi e processi diffusivi che tendono a smussare le irregolarità della superficie. Le incisioni iniziali si sviluppano pertanto nelle aree maggiormente soggette alla concentrazione dei flussi, dando origine ai primi elementi della rete di drenaggio (Loewenherz, 1991).

Le osservazioni riportate da D'Alpaos et al. (2005) evidenziano come la formazione delle reti di canali a marea sia caratterizzata da una fase iniziale di rapida incisione, durante la quale il sistema tende a definire il proprio assetto principale, cui segue un'evoluzione più lenta che ne conserva poi l'impianto generale. Lo sviluppo dei canali avviene prevalentemente attraverso processi di erosione retrogressiva (*headward growth*) delle teste dei canali, con incisioni che si propagano verso le porzioni più interne della piana tidale. L'erosione tende a svilupparsi nelle aree in cui gli sforzi tangenziali esercitati dalle correnti di marea eccedono la soglia critica per la mobilitazione dei sedimenti presenti al fondo, favorendo l'espansione e la ramificazione della rete di drenaggio. La formazione delle nuove incisioni determina una progressiva concentrazione dei flussi verso le nuove depressioni morfologiche, aumentando localmente gli sforzi tangenziali al fondo e favorendo ulteriore erosione. La progressiva concentrazione dei flussi nelle incisioni favorisce l'espansione della rete verso le porzioni ancora non canalizzate della piana

tidale, contribuendo allo sviluppo del reticolo di drenaggio (D'Alpaos et al., 2007). La crescita progressiva della rete a marea determina così un aumento della densità e della complessità del sistema, mentre la rapida incisione iniziale conferisce alle superfici intertidali una configurazione morfologica destinata a permanere nel tempo. Le successive fasi evolutive tendono infatti ad elaborare e modificare una struttura di drenaggio già impostata, attraverso processi quali la migrazione laterale dei canali, il rimodellamento delle sponde, l'accrescimento verticale delle superfici intertidali, la colonizzazione della vegetazione e l'adattamento della rete alle variazioni del livello del mare, che agiscono su scale temporali maggiori (D'Alpaos et al., 2005; Finotello et al., 2018; Mariotti et al., 2024).

La successiva colonizzazione da parte della vegetazione alofila favorisce la stabilizzazione dei sedimenti superficiali e delle sponde dei canali, contribuendo a preservare l'impianto principale della rete di drenaggio. Di conseguenza, una volta raggiunte quote sufficientemente elevate da consentire l'insediamento della vegetazione, l'evoluzione del sistema è caratterizzata prevalentemente da modifiche locali della geometria dei canali e da processi di accrezione della superficie intertidale, piuttosto che dalla formazione di nuove strutture di drenaggio (D'Alpaos et al., 2007; Rinaldo et al., 2004).

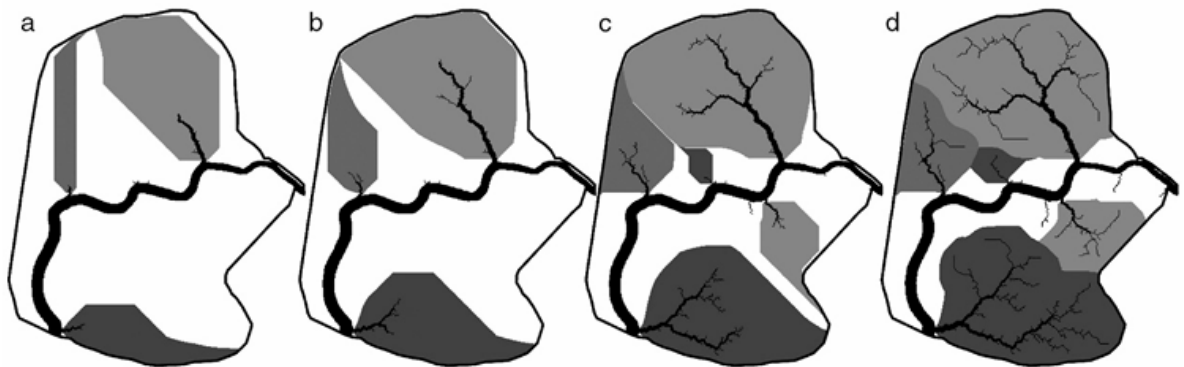


Figura 1.3 Evoluzione schematica della rete di canali a marea durante le diverse fasi di sviluppo, dalla formazione delle incisioni iniziali alla progressiva espansione e ramificazione del reticolo di drenaggio.

Fonte: D'Alpaos et al. (2007).

I processi descritti evidenziano come i canali a marea si sviluppino attraverso l'interazione tra idrodinamica, trasporto sedimentario, vegetazione e morfologia della piana intertidale. Durante la loro evoluzione, le differenti incisioni competono inoltre per il drenaggio della

superficie intertidale e per l'acquisizione dei flussi disponibili, determinando una continua riorganizzazione della rete.

A differenza delle reti fluviali, che presentano frequentemente relazioni invarianti di scala relativamente ben definite, le reti di canali a marea, pur mostrando alcune analogie planimetriche con i sistemi di drenaggio continentali, sono modellate da flussi bidirezionali (marea entrante e marea uscente) e presentano caratteristiche morfologiche e relazioni di scala proprie e sito specifiche. Esse mostrano infatti una marcata variabilità morfologica e una notevole eterogeneità spaziale, tipicamente interpretata come risultato dell'azione congiunta di processi idrodinamici, sedimentari ed ecologici che operano a differenti scale spaziali e temporali (Rinaldo et al., 2004; Hughes, 2012).

Tra le diverse configurazioni delle reti di canali a marea, i sistemi caratterizzati da canali paralleli o sub-paralleli rappresentano una tipologia relativamente rara, frequentemente associata ad ambienti caratterizzati da ampie escursioni di marea e superfici scarsamente vegetate (Hughes, 2012; Zhou et al., 2024). Tali sistemi costituiscono il principale oggetto di studio della presente tesi.



Figura 1.4 Esempi di reti di canali a marea: in alto a sinistra Cadice, in basso a sinistra il delta del fiume Colorado, in alto a destra Iranian bay e in basso a destra Sapelo Island

1.2 Sistemi di canali a marea paralleli

Una distinta tipologia di reti di canali a marea è rappresentata dal sistema di canali a marea paralleli, i quali sono caratterizzati da canali generalmente orientati trasversalmente rispetto alla linea di costa e distribuiti secondo una spaziatura relativamente regolare. Tali sistemi sono stati osservati in numerosi ambienti costieri a scala globale, inclusi estuari, lagune e piane tidali aperte, e possono svilupparsi anche in contesti in cui le correnti di marea scorrono prevalentemente in direzione parallela alla linea di costa o al canale principale (Zhou et al., 2024).



Figura 1.5 Canali a marea paralleli del delta del Fiume Colorado, Golfo della California (USA/Messico)

Una delle caratteristiche distintive di questi sistemi è rappresentata dalla geometria regolare dei rami, che tendono ad assumere direzioni quasi perpendicolari rispetto alla linea di costa o al canale principale. Per descrivere quantitativamente tale configurazione, vengono definiti due differenti angoli (Figura 1.6): l'angolo di intersezione α , misurato nel punto in cui il canale si dirama dal canale principale (radice del canale), e l'angolo β , che descrive invece l'orientazione generale dell'intero canale dalla testa fino alla radice, il punto di connessione con il canale principale. Dai casi analizzati da Zhou et al. (2024) sono emersi angoli medi di α e β rispettivamente pari a circa $78,9^\circ$ e $83,9^\circ$, con risultati

di α più variabili rispetto a quelli di β , evidenziando quindi una tendenza dei canali ad assumere configurazioni quasi ortogonali rispetto alla costa o al canale principale.

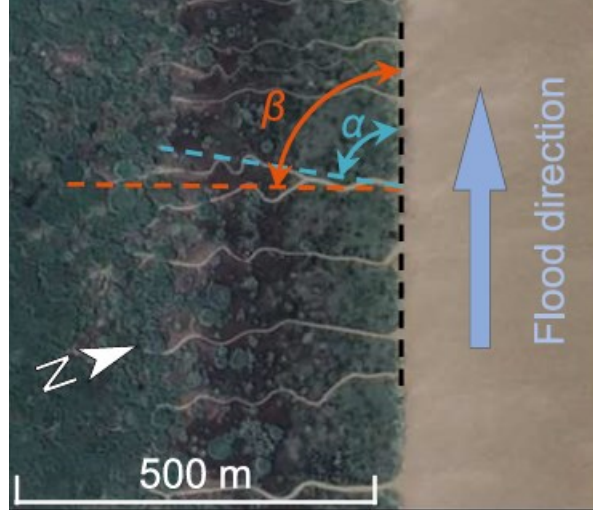


Figura 1.6 Angolo α e β . Fonte Zhou et al. (2024).

L'orientazione dei canali paralleli è fortemente controllata dalla topografia del fondale e dalle deviazioni delle correnti tidali in corrispondenza delle transizioni morfologiche presenti tra canale principale e piana tidale. In particolare, bruschi cambiamenti della topografia del fondale, come la presenza di scarpate o variazioni improvvise di pendenza, determinano rapide deviazioni del flusso che favoriscono la formazione di canali quasi perpendicolari alla linea di costa. Al contrario, transizioni topografiche più graduali consentono al flusso di adattarsi progressivamente, producendo sistemi di canali maggiormente obliqui.

Per descrivere l'evoluzione della direzione del flusso, da studi pregressi (Zhou et al., 2024), viene introdotto il parametro “flow trend angle” (angolo di tendenza del flusso): γ , che rappresenta la variazione di velocità relativa tra la componente di flusso lungo costa e quella trasversale verso mare o verso terra:

$$\tan \gamma = \frac{|\Delta u_x|}{|\Delta u_y|} \quad (1.1)$$

dove Δu_x e Δu_y rappresentano rispettivamente le variazioni delle componenti trasversali e longitudinali della velocità di flusso durante un ciclo tidale.

Valori di γ prossimi a 0° mostrano correnti prevalentemente parallele alla costa, mentre angoli vicini a 90° indicano correnti orientate trasversalmente rispetto alla linea di costa,

ovvero verso il mare o verso terra. Il parametro γ permette dunque di descrivere la progressiva rotazione del flusso tidale durante il passaggio dalle aree prossime al canale principale verso le porzioni più interne della piana tidale.

Le analisi numeriche condotte da Zhou et al. (2024) evidenziano come le correnti di marea, pur essendo prevalentemente orientate parallelamente alla linea di costa nel canale principale, vengano progressivamente deviate verso direzioni trasversali durante le fasi di allagamento e drenaggio della piana tidale. Tale variazione è legata alla necessità di garantire la continuità del flusso idrico tra il canale principale e le aree interne della piana. Ne consegue che i valori del “flow trend angle”, manifestano una propensione ad aumentare procedendo dalla linea di costa verso l’interno della piana tidale, indicando una progressiva rotazione del flusso da configurazioni prettamente longitudinali ad assetti sempre più trasversali.

Le simulazioni numeriche hanno inoltre evidenziato importanti differenze tra le fasi di marea entrante (“flood”) e marea uscente (“ebb”). Durante la fase di innalzamento dei livelli di marea le correnti risultano più parallele alla linea di costa, mentre durante la fase di abbassamento, ovvero durante il drenaggio della piana tidale, si hanno componenti di flusso perpendicolari rispetto alla linea di costa. In particolare, il contributo combinato tra correnti di marea uscente (“ebb”) e gradienti topografici favorisce l’incisione di canali quasi ortogonali rispetto alla costa, contribuendo allo sviluppo di sistemi di canali paralleli caratterizzati da elevati angoli di intersezione.

Le differenze morfologiche nei sistemi di canali paralleli sono fortemente controllate dalla geometria del profilo topografico della piana tidale. In presenza di brusche variazioni della topografia del fondale, come nel caso di scarpate o improvvisi cambi di pendenza del fondale, il flusso subisce rapide deviazioni direzionali in corrispondenza della zona di transizione morfologica. In tali condizioni i valori di γ aumentano rapidamente, favorendo la formazione di canali quasi perpendicolari rispetto alla linea di costa, con angoli prossimi a 90° . Al contrario, in presenza di fondali caratterizzati da pendenze più uniformi, il flusso riesce ad adattarsi progressivamente alle variazioni morfologiche della piana tidale. In questi casi la rotazione del flusso risulta più graduale e i valori di γ aumentano in maniera meno rapida, determinando sistemi di canali maggiormente obliqui rispetto alla costa e caratterizzati da angoli di intersezione inferiori a 90° .

Da un punto di vista idrodinamico, il flusso tidale è fortemente condizionato dagli effetti di attrito e dai gradienti della superficie libera. Variazioni della topografia del fondale determinano modifiche locali della resistenza idraulica, influenzando la distribuzione dei livelli idrici e causando la deviazione delle correnti tidali. In questo contesto, la topografia controlla indirettamente l'orientazione dei canali attraverso la modulazione della direzione del flusso e dei valori assunti dal parametro γ .

Secondo Zhou et al. (2024) anche il tidal range influenza significativamente la morfologia dei sistemi di canali paralleli. In presenza di tidal range ridotti, l'influenza della topografia locale risulta relativamente più importante rispetto a quella delle correnti tidali, favorendo la formazione di canali maggiormente perpendicolari alla linea di costa. Al contrario, tidal range più elevati aumentano l'influenza delle correnti tidali sulle radici dei canali, producendo pattern più obliqui e una maggiore variabilità morfologica.

Anche la pendenza della piana tidale influenza la geometria dei canali: piane caratterizzate da superfici quasi orizzontali tendono a produrre deviazioni del flusso relativamente limitate e quindi angoli più piccoli. Tuttavia, anche pendenze troppo elevate possono limitare lo sviluppo di sistemi paralleli ben definiti, poiché riducono l'estensione della zona intertidale, utile per la transizione del flusso da configurazioni longitudinali a trasversali; in tali condizioni i canali risultano generalmente più piccoli, maggiormente confinati e sviluppati in prossimità della linea di costa.

Le simulazioni effettuate hanno evidenziato come un aumento del rilievo topografico locale determini una maggiore variabilità morfodinamica del sistema. Condizioni topografiche irregolari tendono a produrre canali di differenti dimensioni e distribuiti in maniera irregolare, mentre condizioni relativamente omogenee favoriscono pattern più ordinati e regolari. (Zhou et al., 2024)

Le osservazioni e le simulazioni numeriche evidenziano come la formazione e l'orientazione dei sistemi di canali a marea paralleli siano controllate dall'interazione tra idrodinamica, topografia e condizioni morfologiche locali. Sebbene tali fattori spieghino l'orientazione dei canali, un ulteriore aspetto di interesse riguarda la loro distribuzione spaziale e la presenza di spaziature relativamente regolari tra elementi adiacenti. La comprensione dei processi che controllano tale organizzazione spaziale rappresenta il tema centrale del paragrafo successivo.

1.3 Spaziatura e organizzazione dei canali a marea

Nell'ambito dei sistemi fluviali, Perron et al. (2008) hanno analizzato i meccanismi che controllano la spaziatura delle valli di primo ordine all'interno di paesaggi erosivi, evidenziando come numerosi di questi ambienti geomorfologici siano caratterizzati dalla presenza di incisioni distribuite secondo configurazioni regolari. Tali pattern sono stati osservati in differenti contesti ambientali e a diverse scale (Hack & Goodlett, 1960; Talling et al., 1997; Perron et al., 2008), testimoniando l'esistenza di processi fisici in grado di controllare l'organizzazione delle reti drenanti anche in assenza di evidenti controlli litologici o strutturali.

Le valli non risultano distribuite casualmente all'interno del paesaggio, ma tendono ad organizzarsi secondo configurazioni quasi periodiche caratterizzate dall'esistenza di una spaziatura dominante. L'analisi delle frequenze spaziali evidenzia come tale periodicità dipenda dalla presenza di specifici meccanismi geomorfologici responsabili dell'organizzazione delle incisioni drenanti, piuttosto che una semplice distribuzione casuale delle stesse (Perron et al., 2008).

Sebbene il lavoro di Perron et al. (2008) sia stato sviluppato con riferimento a sistemi vallivi e bacini drenanti di primo ordine in ambienti continentali, i concetti relativi alla presenza di una spaziatura caratteristica e a meccanismi di auto-organizzazione delle reti drenanti possono essere correlabili anche nello studio delle reti di canali a marea. In entrambi i casi, la distribuzione spaziale delle incisioni dipende da processi dinamici che tendono ad organizzare il sistema secondo configurazioni non casuali.

Un comportamento analogo è stato proposto anche per i sistemi di canali a marea. Toffolon e Todeschini (2006) evidenziano infatti come canali già sviluppati possano interagire e competere reciprocamente per il drenaggio delle superfici intertidali, contribuendo alla riorganizzazione della rete nel tempo. Gli stessi autori distinguono inoltre il problema della formazione iniziale dei canali da quello della stabilità di reti già sviluppate. In quest'ultimo caso, ciascun canale tende a drenare una specifica porzione della superficie intertidale, definibile come area di competenza, e l'evoluzione del sistema dipende dall'interazione reciproca tra le diverse aree drenanti e dalla ripartizione dei flussi.

Per descrivere questo comportamento, Toffolon e Todeschini (2006) hanno proposto un modello concettuale semplificato, costituito da due soli elementi: la superficie intertidale,

riportata in marrone in Figura 1.7 e i canali che la drenano riportati in azzurro in Figura 1.7, assumendo che durante il ciclo di marea il livello della superficie libera vari senza che la piana emerga completamente.

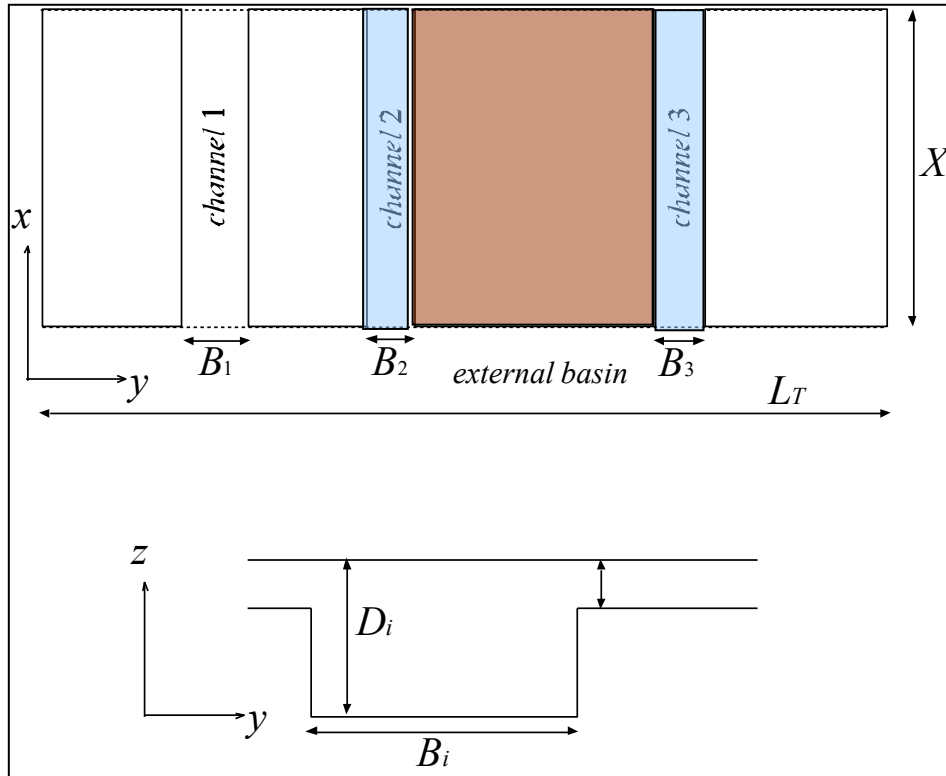


Figura 1.7 Schema concettuale semplificato. Fonte Toffolon e Todeschini (2006)

Nel modello, ciascun canale drena una specifica area di competenza e la sua capacità di evolvere dipende dalla quantità di flusso che riesce ad intercettare. Una variazione della profondità di uno dei canali modifica, infatti, la distribuzione delle portate e può influenzare l'evoluzione dei canali adiacenti. La portata associata a ciascun canale viene descritta mediante una relazione di equilibrio idraulico:

$$Q_i = B_i k_{s_i} \sqrt{J_i} D_i^{5/3} \quad (1.2)$$

Dove:

- Q_i rappresenta la portata del canale;
- D_i la profondità media;
- J_i il gradiente energetico, pari alla pendenza del canale calcolato come rapporto tra la differenza di carico idraulico e la lunghezza del canale;
- B_i rappresenta la larghezza del canale i ;
- k_{s_i} il coefficiente di scabrezza secondo Gauckler-Strickler.

Una prima analisi, sviluppata assumendo un gradiente energetico costante lungo la direzione trasversale della piana, evidenzia come una perturbazione locale possa amplificarsi nel tempo, favorendo l'approfondimento di un canale e il progressivo interrimento di quelli adiacenti.

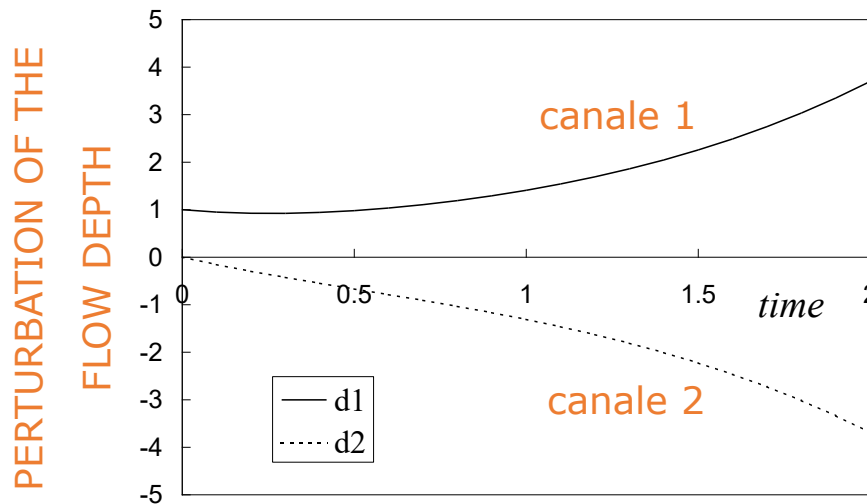


Figura 1.8 Evoluzione temporale della profondità (d_1 e d_2) di due canali adiacenti durante la competizione morfodinamica. Fonte Toffolon e Todeschini (2006)

Per rappresentare un comportamento più realistico, il modello introduce l'interazione tra le aree di competenza e la propagazione dell'onda di marea lungo i canali, mostrando che il grado di competizione dipende anche dalla loro distanza reciproca. In particolare, viene individuata una distanza critica (L_C), il cui valore dipende dalle caratteristiche idrodinamiche del sistema e dalla propagazione dell'onda di marea, che separa due differenti condizioni evolutive: per distanze superiori a tale soglia i canali possono essere considerati sostanzialmente indipendenti ($L > L_C$), mentre per distanze inferiori una perturbazione locale può propagarsi all'intero sistema, favorendo fenomeni di instabilità e la riorganizzazione della rete ($L < L_C$),.

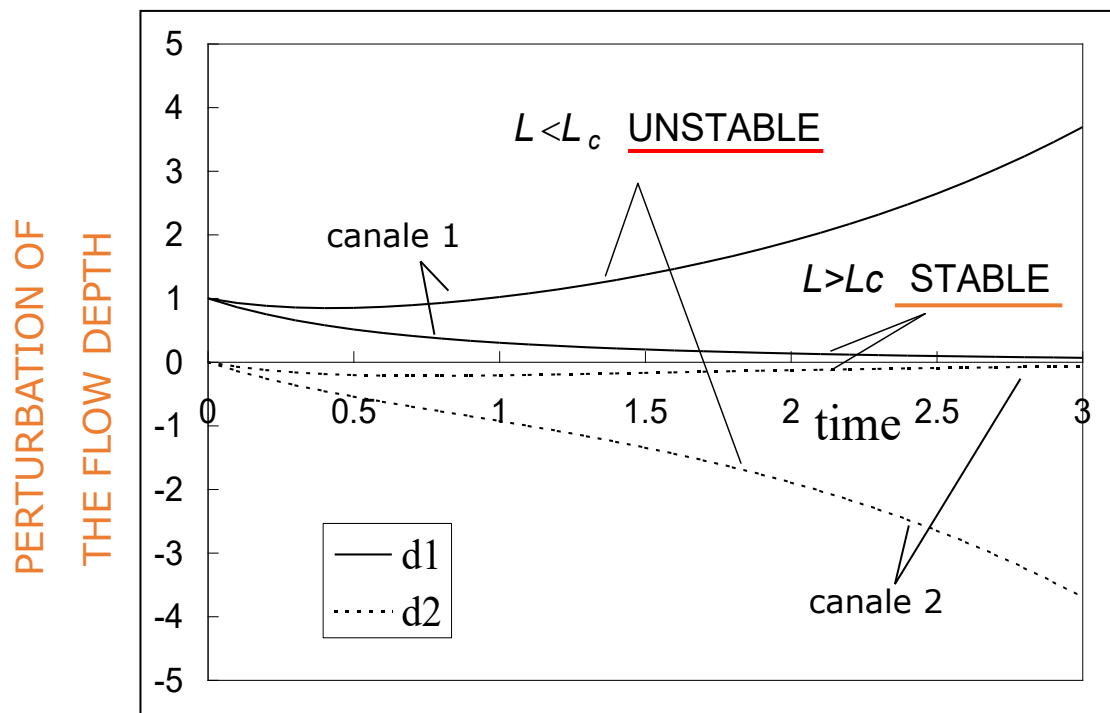


Figura 1.9 Rappresentazione schematica del comportamento stabile e instabile di due canali a marea in funzione della loro distanza reciproca (L). Fonte Toffolon e Todeschini (2006)

I meccanismi di competizione descritti da Toffolon e Todeschini (2006) trovano un'analogia con quanto osservato da Perron et al. (2008) nei sistemi valli. Le valli competono per l'area drenante disponibile, utilizzata come indicatore della quantità di acqua che alimenta ciascun sistema. Le incisioni che intercettano una porzione maggiore dell'area drenante ricevono flussi idrici più elevati e tendono quindi a propagarsi più rapidamente rispetto alle incisioni vicine. Questo processo favorisce la crescita delle valli maggiori a discapito di quelle minori, che vanno progressivamente a ridursi fino a scomparire. L'evoluzione delle reti drenanti avviene attraverso differenti fasi morfologiche (Figura 1.10): nelle fasi iniziali, il paesaggio risulta caratterizzato da numerose incisioni di piccole dimensioni distribuite in maniera irregolare; successivamente alcune di esse acquisiscono progressivamente maggiore importanza grazie alla capacità di intercettare porzioni più ampie dell'area drenante disponibile. La continua competizione tra sistemi adiacenti porta quindi all'eliminazione delle incisioni minori e alla formazione di valli maggiormente sviluppate e più uniformemente spaziate. Con il progressivo raggiungimento di condizioni prossime all'equilibrio topografico, la variabilità della spaziatura tende a diminuire e il sistema assume configurazioni sempre più ordinate.

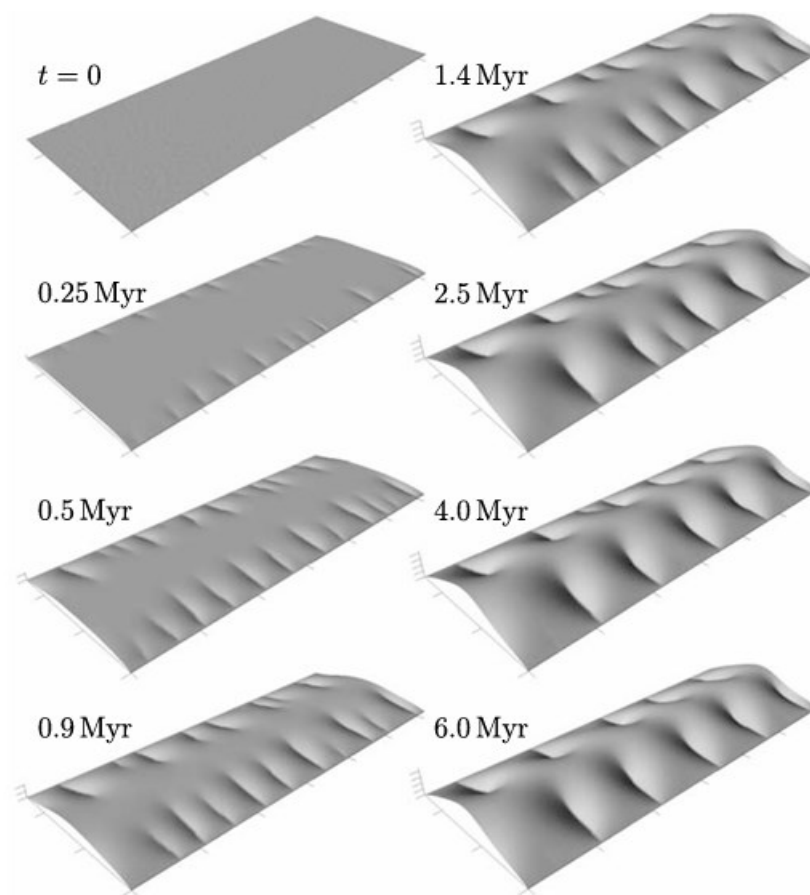


Figura 1.10 Evoluzione della topografia del modello a intervalli di tempo approssimativamente logaritmici. Fonte Perron et al. (2008)

Lo studio evidenzia inoltre come la spaziatura caratteristica delle valli sia controllata principalmente dal bilanciamento tra processi diffusivi e processi advettivi. I processi diffusivi legati al trasporto di detriti lungo i versanti tendono ad attenuare le irregolarità topografiche, favorendo una maggiore distanza tra le incisioni. Al contrario, i processi advettivi associati all'incisione fluviale promuovono la crescita e la propagazione delle valli, favorendo configurazioni caratterizzate da una maggiore densità di drenaggio e da spaziature inferiori. Per descrivere tale equilibrio, Perron et al. (2008) introducono un parametro adimensionale analogo al numero di Péclet, che rappresenta il rapporto tra l'efficacia relativa dei processi diffusivi e quella dei processi di incisione. Lo studio mostra inoltre come questo parametro costituisca uno dei principali controlli sulla morfologia delle reti drenanti e sulla spaziatura delle incisioni, evidenziando come la configurazione finale del paesaggio derivi dall'interazione tra processi che tendono

rispettivamente a smussare o amplificare le perturbazioni topografiche (Perron et al., 2008).

In questo contesto, è plausibile che anche le reti di canali a marea possano sviluppare una spaziatura caratteristica, legata all'interazione tra processi idrodinamici e morfodinamici e dipendente dalla scala del sistema considerato.

Le osservazioni relative all'esistenza di una spaziatura caratteristica trovano ulteriore supporto negli studi di Convertino et al. (2007), che hanno analizzato la distribuzione delle distanze longitudinali tra tributari lungo il corso principale di una rete drenante. Gli autori considerano la distanza tra confluenze associate a tributari con area drenante superiore ad una determinata soglia, evidenziando come tale parametro sia strettamente collegato ad altre grandezze geomorfologiche fondamentali, quali la portata, la larghezza del canale e l'estensione dell'area drenante.

Secondo Convertino et al. (2007) la probabilità che la distanza D tra due tributari con area drenante superiore ad una determinata soglia a sia maggiore o uguale ad un valore d può essere descritta mediante una legge esponenziale:

$$P(D \geq d | a) = \exp\left(-\frac{Cd}{a^{H/(1+H)}}\right) \quad (1.3)$$

Dove:

- C è una costante caratteristica del sistema;
- a rappresenta la soglia minima di area drenante considerata;
- H è l'esponente di Hurst;
- $P(D \geq d | a)$ rappresenta la probabilità che la distanza tra due tributari sia maggiore o uguale a d , fissata una soglia di area drenante a .

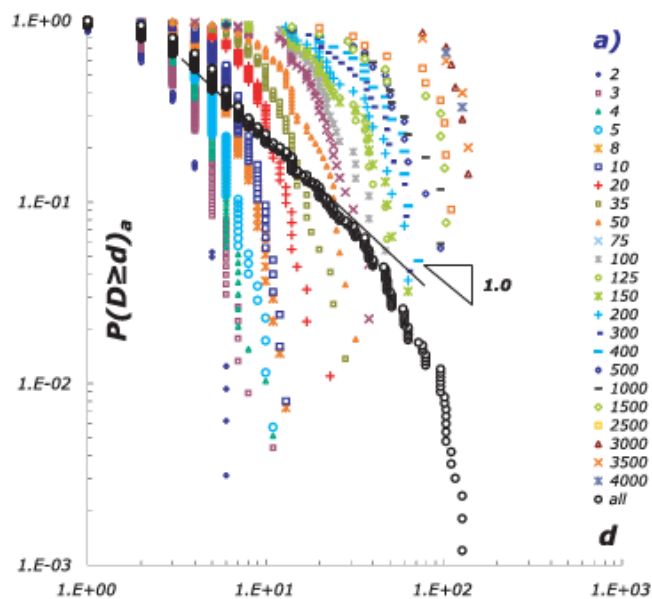


Figura 1.11 Distribuzioni cumulative della distanza tra tributari normalizzata ottenute considerando differenti soglie di area drenata. Fonte Convertino et al. (2007)

Questa relazione evidenzia come le distanze tra tributari non siano distribuite casualmente né uniformemente lungo il reticolo idrografico. Le distanze minori risultano infatti molto più frequenti di quelle maggiori e la distribuzione dipende direttamente dalla scala di osservazione adottata. All'aumentare della soglia di area drenante aumentano anche le distanze medie tra i tributari, indicando che i rami principali della rete tendono ad essere maggiormente distanziati rispetto a quelli inferiori.

Uno degli aspetti più significativi evidenziati dagli autori riguarda il cosiddetto collasso delle distribuzioni. Normalizzando infatti le distanze rispetto ad una scala caratteristica, le diverse distribuzioni ottenute per differenti soglie di area tendono a sovrapporsi in un'unica curva universale, suggerendo l'esistenza di principi organizzativi comuni che governano la struttura spaziale delle reti drenanti.

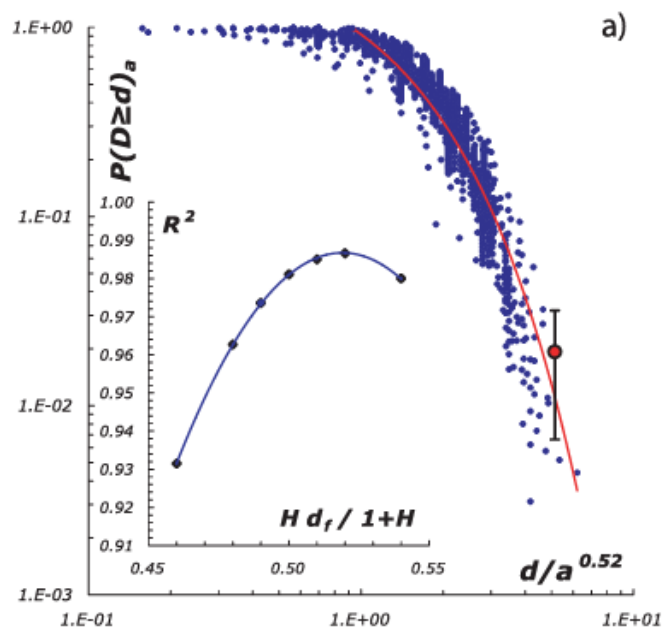


Figura 1.12 Collasso delle distribuzioni cumulative ottenuto mediante la normalizzazione della distanza tra tributari.
Fonte Convertino et al. (2007)

Sebbene lo studio sia stato sviluppato con riferimento ai sistemi fluviali, l'individuazione di relazioni probabilistiche e di leggi di scala nell'organizzazione dei tributari rappresenta un utile riferimento anche per l'analisi delle reti di canali a marea. In entrambi i casi, infatti, la disposizione spaziale delle incisioni sembra riflettere processi di auto-organizzazione capaci di selezionare configurazioni preferenziali e spaziture caratteristiche, dipendenti dalla scala del sistema considerato.

Nonostante i numerosi studi incentrati sulla formazione e l'evoluzione delle reti di canali a marea, risultano ancora limitate le conoscenze riguardante l'organizzazione spaziale dei sistemi di canali paralleli o sub-paralleli. Sebbene siano stati identificati i principali fattori che ne controllano la formazione e l'orientazione, non è ancora chiaro se la distribuzione spaziale dei canali risponda a leggi statistiche oppure se dipenda prevalentemente dalle condizioni ambientali di ciascun sito (Hughes, 2012; Zhou et al., 2024). Le evidenze emerse dagli studi discussi nei paragrafi precedenti, suggeriscono come numerose proprietà delle reti fluviali possano essere descritte attraverso leggi di scala e distribuzioni statistiche riconducibili a processi di auto-organizzazione. Relazioni di questo tipo suggeriscono che sistemi apparentemente molto differenti possano in realtà essere governati da meccanismi comuni, capaci di controllarne la struttura e l'organizzazione spaziale.

Il presente lavoro si propone di analizzare la distribuzione spaziale dei canali a marea paralleli in differenti ambienti distribuiti a scala globale; attraverso l'analisi delle distanze tra canali adiacenti e della loro organizzazione lungo la costa, verrà valutata la presenza di distribuzioni riconducibili a leggi di potenza e verranno confrontati i risultati ottenuti in funzione della tipologia ambientale, del regime di marea e della presenza della vegetazione.

L'obiettivo finale dello studio è valutare se la distribuzione spaziale delle reti di canali a marea paralleli possa essere descritta attraverso relazioni statistiche comuni tra differenti aree studio e verificare l'eventuale presenza di differenze associate a forzanti ambientali quali il tidal range locale, la presenza di vegetazione e il contesto geomorfologico di sviluppo della rete.

2. AREE STUDIO

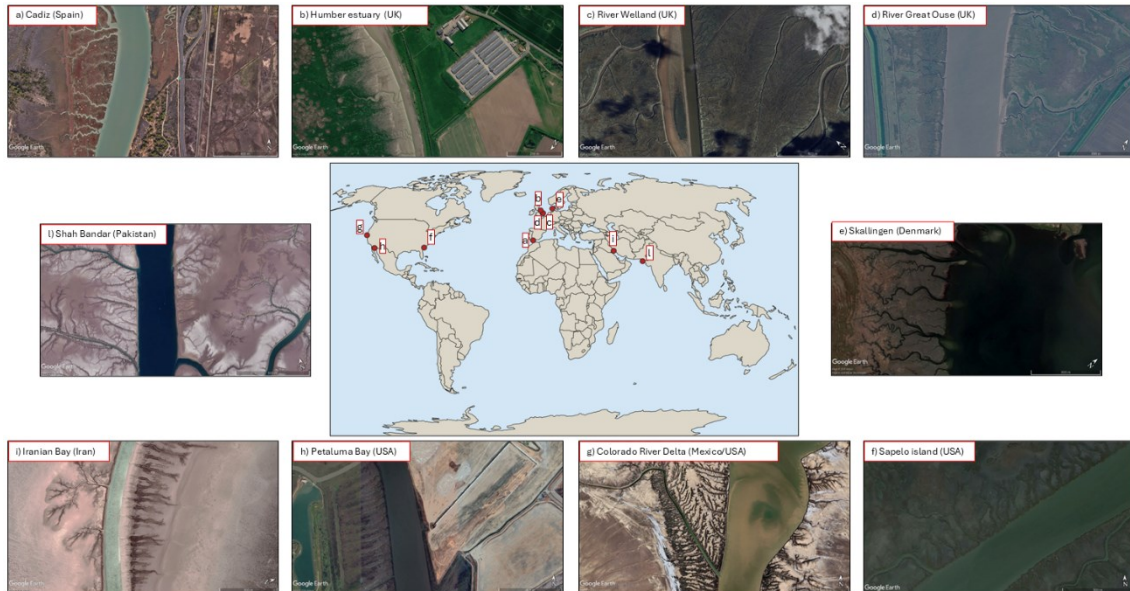


Figura 2.1 I casi studio dei canali a marea paralleli/subparalleli analizzati

Per analizzare la distribuzione spaziale dei canali a marea paralleli sono state selezionate differenti aree studio distribuite a scala globale (Figura 2.1). I siti considerati comprendono ambienti costieri caratterizzati da differenti background geomorfologici, regimi di marea e copertura vegetale.

La scelta delle aree studio è stata effettuata con l'obiettivo di includere sistemi che si sono sviluppati in differenti contesti ambientali e morfodinamici, permettendo di valutare l'eventuale influenza della tipologia ambientale, del tidal range e della presenza della vegetazione sull'organizzazione spaziale delle reti di canali a marea paralleli.

Nelle tabelle che seguono vengono riportati rispettivamente i valori di tidal range relativi alle aree di studio considerate, ottenuti attraverso dati bibliografici, studi pregressi e stazioni mareografiche (Tabella 2.1) e la classificazione dei casi studio in funzione della tipologia ambientale e della presenza della vegetazione (Tabella 2.2). In particolare, sono stati distinti sistemi sviluppati in contesti di retrobarriera da sistemi sviluppati nelle aree marginali in contesti estuarini.

Tabella 2.1 Classificazione dei casi studio in base al regime tidale e ai valori di tidal

Area di studio	Regime tidale	Tidal range (m)	Tipo di dato	Fonte
Cadice (Spagna)	Mesotidale semi-diurno	2.96	Mean spring tidal range	Curcio et al., 2023
Petaluma Bay (California, USA)	Microtidale/Mesotidale	1.7–1.9 / ~2.4	Mean tidal range / Mean spring tidal range	NOAA station 9415584
River Welland – The Wash (UK)	Macrotidale semi-diurno	~6.3 / ~3.0	Spring tidal range / Neap tidal range	The Wash SMP2, 2010
River Great Ouse – The Wash (UK)	Macrotidale semi-diurno	~6.3 / ~3.0	Spring tidal range / Neap tidal range	The Wash SMP2, 2010
Colorado River Delta (Messico/USA)	Macrotidale	~5.0	Maximum spring tidal amplitude	Lavín et al., 1998
Iranian Bay (Iran)	Mesotidale/Macrotidale	~4.0	Maximum tidal range	Pokavanich et al., 2013
Shah Bandar (Pakistan)	Mesotidale	2.0–4.0	Tidal range	Batool et al., 2025
Humber estuary (UK)	Macrotidale	3.18 / 6.18	Mean neap tidal range / Mean spring tidal range	ABLE Marine Energy Park, 2016
Sapelo island (Georgia, USA)	Microtidale	2.0	Tidal range	Long et al., 2020
Skallingen/Esbjerg (Danimarca)	Mesotidale	~2.3	Mean tidal range	Jänicke et al., 2021

Tabella 2.2 Classificazione dei casi studio in base al tipo di ambiente e presenza o meno della vegetazione

Area di studio	Tipo di ambiente	Vegetazione
Cadice (Spagna)	Back-barrier basin	Sì
Petaluma Bay (California, USA)	Flanking main estuarine channels	Sì
River Welland – The Wash (UK)	Flanking main estuarine channels	Sì
River Great Ouse – The Wash (UK)	Flanking main estuarine channels	Sì
Colorado River Delta (Messico/USA)	Flanking main estuarine channels	No
Iranian Bay (Iran)	Flanking main estuarine channels	No
Shah Bandar (Pakistan)	Flanking main estuarine channels	No
Humber Estuary (UK)	Flanking main estuarine channels	Sì
Sapelo Island (Georgia, USA)	Flanking main estuarine channels	Sì
Skallingen/Esbjerg (Danimarca)	Back-barrier basin	Sì

3. METODOLOGIA

3.1 Individuazione delle aree di studio e acquisizione dati

L'individuazione delle aree di studio è stata effettuata mediante un'attività di telerilevamento basata principalmente sull'analisi di immagini satellitari ad alta risoluzione disponibili tramite Google Earth. La ricerca è stata finalizzata all'identificazione di sistemi di canali a marea caratterizzati dalla presenza di configurazioni parallele o sub-parallele, distribuite in aree geograficamente differenti nel mondo.

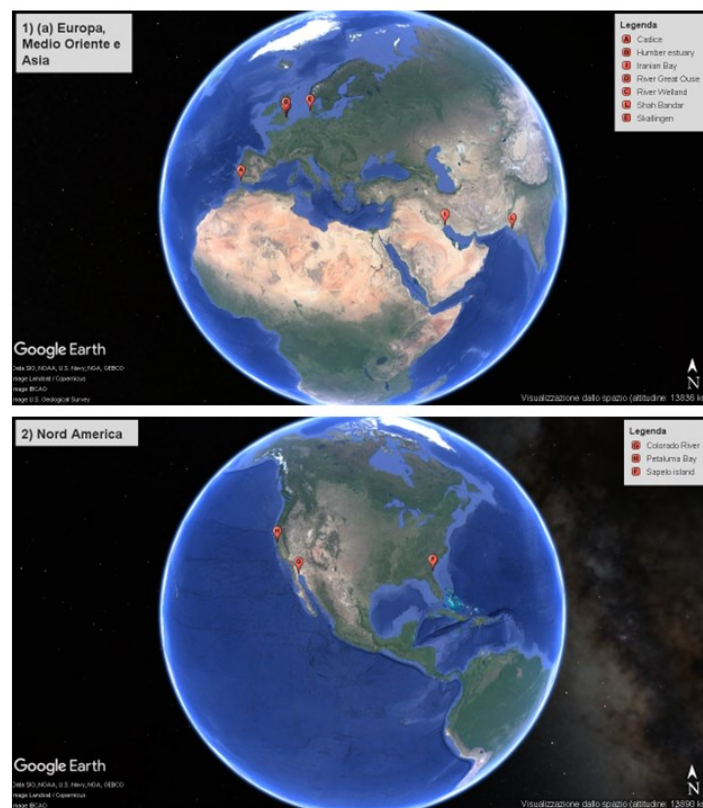


Figura 3.1 Identificazione dei casi studio da Google Earth

I casi studio sono stati selezionati sia mediante esplorazione diretta delle immagini satellitari, sia attraverso l'analisi della letteratura scientifica disponibile. In particolare, alcuni dei casi studio analizzati sono stati individuati a partire da casi già descritti in precedenti lavori scientifici dedicati alla morfologia delle reti di canali a marea, tra cui gli studi di Zhou et al. (2024) e Xu et al. (2024), successivamente verificati e analizzati mediante immagini satellitari disponibili tramite Google Earth. Tale approccio ha permesso di costruire un dataset comprendente dieci casi studio distribuiti a scala globale

e caratterizzate da differenti condizioni geomorfologiche, ambientali e mareali. (Figura 2.1)

Per ciascuna area di studio sono stati successivamente acquisiti i dati topografici necessari alle analisi. I modelli digitali del terreno (DTM), qualora disponibili, sono stati reperiti attraverso geoportali nazionali, infrastrutture di dati territoriali e dataset associati a pubblicazioni scientifiche. Nei casi in cui i DTM non fossero disponibili come per Shah Bandar e Iranian Bay, l'analisi è stata condotta esclusivamente mediante interpretazione delle immagini satellitari. Per i casi studio di Colorado River Delta e Petaluma Bay, l'analisi è stata inoltre effettuata sia utilizzando i DTM sia le sole immagini satellitari, al fine di valutare l'influenza della disponibilità del dato topografico sui risultati ottenuti.

3.2 Identificazione e digitalizzazione dei canali a marea

L'identificazione dei canali a marea è stata effettuata all'interno del software QGIS 3.40.5 mediante l'analisi dei modelli digitali del terreno (DTM), quando disponibili, e delle immagini satellitari ad alta risoluzione (Google Satellite Hybrid). L'obiettivo era individuare sistemi di canali caratterizzati da una disposizione parallela o sub-parallela rispetto alla linea di costa e/o al canale principale. Poiché l'estensione e la continuità dei sistemi di canali paralleli variano tra i diversi casi studio, per ciascun caso studio è stata individuata la porzione che meglio rappresentava tale configurazione morfologica. L'analisi è stata quindi limitata a questo settore, escludendo le porzioni della rete in cui la configurazione parallela o sub-parallela risultava assente o non sufficientemente sviluppata.

Una volta individuato il sistema di canali da analizzare, è stato creato un nuovo layer vettoriale di tipo lineare (LineString) all'interno di QGIS. Su questo layer è stata successivamente digitalizzata una polilinea lungo la linea di costa o lungo il margine del canale principale, utilizzando come riferimento i modelli digitali del terreno (DTM), quando disponibili, in caso contrario sono state utilizzate le immagini satellitari come riferimento. Durante la digitalizzazione, la polilinea è stata costruita posizionando i vertici in corrispondenza delle sponde dei canali selezionati e nelle porzioni di piana tidale

comprese tra essi. In questo modo è stato possibile ottenere una sequenza ordinata di vertici lungo l'intera area analizzata, necessaria per le successive elaborazioni.

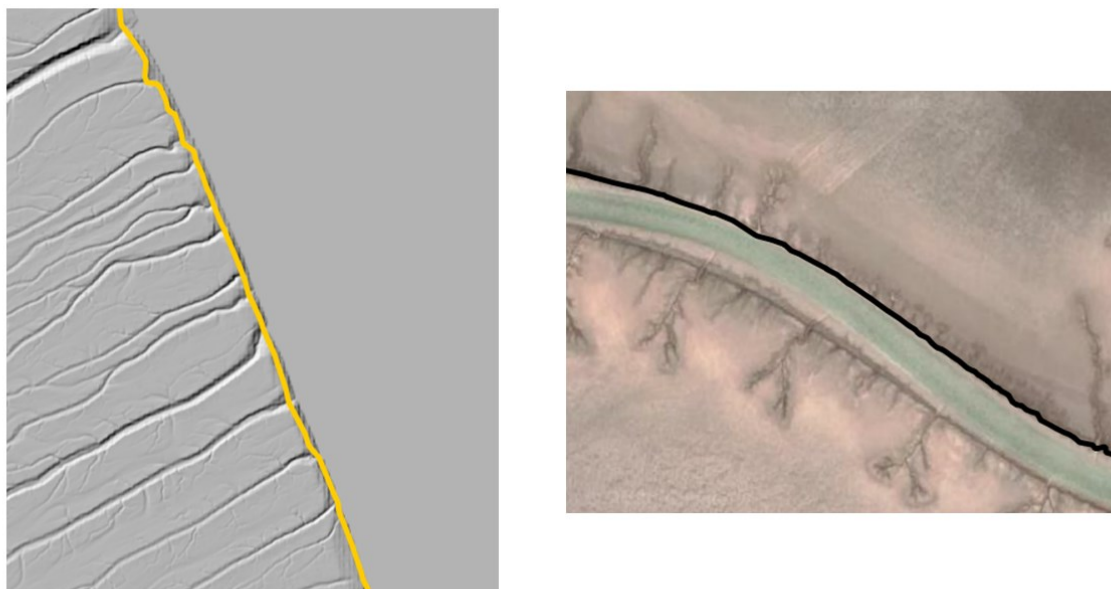


Figura 3.2 Digitalizzazione della polilinea, a sinistra su base DTM e a destra su base immagine satellitare

Successivamente, mediante lo strumento di processing “estrai vertici” di QGIS, tutti i vertici utilizzati per la costruzione della polilinea sono stati estratti e convertiti in uno shapefile puntuale, mantenendo l'ordine spaziale originario lungo la linea digitalizzata. Tale procedura ha permesso di trasformare la polilinea in una sequenza ordinata di punti. Lo shapefile puntuale così ottenuto contiene una tabella degli attributi nella quale ogni punto è identificato da un numero progressivo (fid), che ne mantiene l'ordine lungo la linea digitalizzata. Nella stessa tabella è stato successivamente creato un nuovo campo binario denominato bank.

A ciascun punto è stato assegnato un valore pari a 1 o 0 in funzione della sua posizione rispetto ai canali selezionati. In particolare, ai punti corrispondenti alle sponde dei canali è stato attribuito il valore 1, mentre ai punti localizzati nelle porzioni di piana tidale comprese tra canali consecutivi è stato attribuito un valore pari a 0.

I punti associati ai canali risultano pertanto organizzati in coppie consecutive di valori pari a 1, corrispondenti alle due sponde dello stesso canale, separate da una sequenza di punti variabile con valore pari a 0. Tale struttura della tabella degli attributi fid e bank

costituisce la base per le successive elaborazioni automatiche sviluppate in MATLAB R2023b, finalizzate all'identificazione dei singoli canali e al calcolo delle relative caratteristiche geometriche.

Tabella 3.1 Esempio della tabella di fid e bank su QGIS

fid	bank
648	0
649	1
650	1
651	0
652	1
653	1
654	0
655	1
656	1

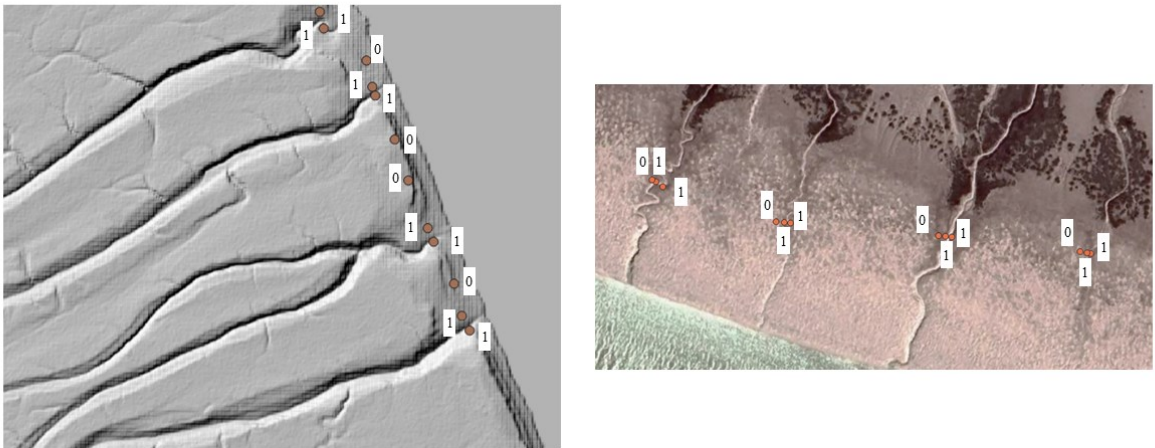


Figura 3.3 Sequenza di punti coi rispettivi valori, a sinistra su base DTM e a destra su base immagine satellitare

3.3 Calcolo della larghezza dei canali e dell'interasse

Le caratteristiche geometriche dei canali sono state desunte mediante dei codici sviluppati in MATLAB R2023b, progettati per elaborare automaticamente lo shapefile ottenuto nella fase precedente. L'elaborazione è stata sviluppata in due passaggi principali: il primo finalizzato al calcolo della larghezza dei canali e dell'interasse tra canali successivi, il secondo finalizzato al calcolo della distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale del canale preso in considerazione. L'impiego di queste procedure ha consentito di uniformare l'elaborazione di tutti i casi studio, riducendo gli interventi manuali e garantendo la riproducibilità e il confronto delle analisi.

Il primo codice MATLAB è stato utilizzato per leggere lo shapefile contenente i vertici estratti dalla polilinea digitalizzata in QGIS. Il codice utilizza le informazioni contenute nella tabella degli attributi: il numero identificativo progressivo (fid) e il campo bank, per riconoscere automaticamente le coppie di punti corrispondenti alle sponde di ciascun canale.

Il riconoscimento dei canali avviene individuando le coppie consecutive di punti caratterizzate da valore *bank* pari a 1. Ogni coppia di punti viene interpretata come le due sponde dello stesso canale. Per ciascun canale, la larghezza allo sbocco è stata calcolata come distanza euclidea tra le coordinate dei due punti corrispondenti alle sponde del canale:

$$B_i = \sqrt{(x_{i,2} - x_{i,1})^2 + (y_{i,2} - y_{i,1})^2} \quad (3.1)$$

Dove:

- B_i rappresenta la larghezza del canale i ;
- $(x_{i,1}, y_{i,1})$ rappresentano le coordinate della prima sponda;
- $(x_{i,2}, y_{i,2})$ rappresentano le coordinate della seconda sponda.

Per ogni canale è stato inoltre calcolato il punto medio tra le due sponde, utilizzato come riferimento per determinare la posizione del canale lungo la sequenza digitalizzata:

$$x_{m,i} = \frac{x_{i,1} + x_{i,2}}{2} \quad (3.2)$$

$$y_{m,i} = \frac{y_{i,1} + y_{i,2}}{2} \quad (3.3)$$

Dove:

- $x_{m,i}$ rappresenta la coordinata x del punto medio del canale i ;

- $y_{m,i}$ rappresenta la coordinata y del punto medio del canale i .

L'interasse tra due canali successivi è stato quindi calcolato come distanza euclidea tra i rispettivi punti medi. In questo modo, per ciascun canale è stata ottenuta una misura della distanza dal canale immediatamente successivo lungo la linea di costa o lungo il margine del canale principale.

$$I_i = \sqrt{(x_{m,i+1} - x_{m,i})^2 + (y_{m,i+1} - y_{m,i})^2} \quad (3.4)$$

Dove:

- I_i rappresenta l'interasse tra il canale i e il canale successivo;
- $(x_{m,i}, y_{m,i})$ e $(x_{m,i+1}, y_{m,i+1})$ rappresentano le coordinate dei punti medi dei due canali consecutivi.

L'output del codice è costituito da un file Excel contenente, per ciascun canale identificato, un codice progressivo (*Canale ID*), la larghezza del canale e l'interasse rispetto al canale successivo. Tale file rappresenta il dataset di base utilizzato nelle successive elaborazioni statistiche e nel calcolo della distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale.

3.4 Calcolo della distanza d_b dal canale più vicino di larghezza maggiore o uguale

A partire dal file Excel generato dal primo codice MATLAB, è stata successivamente calcolata, per ciascun canale, la distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale. Questa grandezza, indicata nel presente lavoro con il simbolo d_b , rappresenta la distanza lungo la sequenza dei canali necessaria per individuare il canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale a quella del canale considerato.

Il secondo codice MATLAB legge, per ciascun caso studio, il file Excel contenente le colonne *Canale ID*, *Larghezza* e *Interasse Successivo*. Per ogni canale (i), caratterizzato da una larghezza (B_i), l'algoritmo ricerca lungo la sequenza dei canali il primo elemento con larghezza maggiore o uguale a B_i :

$$B_j \geq B_i \quad (3.5)$$

Dove:

- B_i rappresenta la larghezza del canale considerato i ;

- B_j rappresenta la larghezza del primo canale individuato lungo la sequenza avente larghezza maggiore o uguale a quella del canale i .

La ricerca viene effettuata in entrambe le direzioni, cioè verso i canali precedenti e verso i canali successivi.

La distanza dal canale di larghezza maggiore o uguale viene calcolata come somma degli interassi compresi tra il canale considerato e il canale individuato:

$$D = \sum_{k=1}^n I_k \quad (3.6)$$

Dove:

- D rappresenta la distanza cumulata tra il canale considerato e il primo canale avente larghezza maggiore o uguale;
- I_k rappresenta l'interasse tra due canali consecutivi;
- n rappresenta il numero di interassi compresi tra i due canali.

La distanza cumulata viene calcolata indipendentemente verso i canali precedenti e verso quelli successivi. Nel caso in cui siano presenti canali idonei in entrambe le direzioni, viene selezionato quello posto alla distanza minore.

$$d_{b,i} = \min(D_{sx}, D_{dx}) \quad (3.7)$$

Dove:

- $d_{b,i}$ rappresenta la distanza del canale i dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale;
- D_{sx} rappresenta la distanza cumulata calcolata verso i canali precedenti;
- D_{dx} rappresenta la distanza cumulata calcolata verso i canali successivi.

Qualora non sia presente alcun canale con larghezza maggiore o uguale, il valore viene lasciato non definito, stando ad indicare che quel canale rappresenta il canale con la larghezza massima per il caso studio analizzato

L'output del codice è costituito da un nuovo file Excel contenente, oltre alle colonne del primo codice, l'identificativo del canale più vicino con larghezza maggiore o uguale, la sua larghezza e la relativa distanza. Il parametro d_b , ottenuto rappresenta insieme all'interasse successivo le variabili principali utilizzate nelle successive analisi statistiche delle distribuzioni spaziali dei canali a marea.

I file Excel prodotti dai due codici costituiscono il dataset finale utilizzato per tutte le elaborazioni statistiche descritte nei paragrafi successivi, comprendenti l'analisi delle

distribuzioni cumulative, la stima delle leggi di potenza e il confronto tra i differenti casi studio.

3.5 Analisi statistica preliminare

L'analisi statistica è stata eseguita analizzando singolarmente ciascun caso studio, utilizzando i file Excel ottenuti dai due codici MATLAB. Ogni dataset contiene, per ciascun canale identificato, le informazioni relative al codice identificativo del canale (Canale ID), alla larghezza, all'interasse rispetto al canale successivo, all'identificativo del canale vicino avente larghezza maggiore o uguale a quello preso in considerazione (ID Canale vicino), alla larghezza del canale vicino e alla distanza d_b dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale. Complessivamente sono stati analizzati dodici dataset, corrispondenti ai dieci casi studio selezionati, includendo anche le elaborazioni effettuate sui casi di Colorado River Delta e Petaluma Bay sia mediante DTM sia mediante immagini satellitari.

In una prima fase, i dati sono stati ordinati in ordine crescente e, a ciascun valore, è stato associato un Rank corrispondente alla posizione occupata nella sequenza ordinata. Successivamente è stata calcolata, per ciascuna osservazione, la probabilità cumulativa sia dell'interasse successivo (I) sia della distanza per raggiungere il canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale (d_b), mediante le seguenti formule:

per l'interasse:

$$P(I \geq x) = \frac{N - \text{Rank} + 1}{N + 1} \quad (3.8)$$

Dove:

- $P(I \geq x)$ rappresenta la probabilità che l'interasse I assuma un valore maggiore o uguale a x ;
- I rappresenta la variabile interasse;
- x rappresenta un valore assegnato dell'interasse I ;
- N rappresenta il numero totale delle osservazioni del caso studio;
- Rank rappresenta la posizione occupata dal valore dopo l'ordinamento crescente dei dati.

La medesima procedura è stata applicata alla distanza d_b :

$$P(d_b \geq x) = \frac{N - \text{Rank} + 1}{N + 1} \quad (3.9)$$

Dove:

- $P(d_b \geq x)$ rappresenta la probabilità che la distanza d_b assuma un valore maggiore o uguale a x ;
- d_b rappresenta la distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale;
- x rappresenta un valore assegnato della distanza d_b ;
- N rappresenta il numero totale delle osservazioni del caso studio;
- Rank rappresenta la posizione occupata dal valore dopo l'ordinamento crescente dei dati.

Le distribuzioni cumulative ottenute per l'interasse successivo e per la distanza d_b sono state rappresentate mediante grafici a dispersione realizzati sempre in Microsoft Excel. Per ciascun caso studio sono stati costruiti due grafici distinti: uno relativo alla distribuzione cumulativa degli interassi successivi e uno relativo alla distribuzione cumulativa delle distanze d_b . In entrambi i casi, sull'asse delle ascisse è stato riportato il valore della variabile considerata, mentre sull'asse delle ordinate è stata rappresentata la corrispondente probabilità cumulativa.

Successivamente, i grafici sono stati modificati andando ad applicare una scala logaritmica base dieci su entrambi gli assi cartesiani, ottenendo diagrammi con assi log-log. Tale rappresentazione è stata adottata al fine di evidenziare il comportamento delle distribuzioni su differenti ordini di grandezza e di costituire la base per le successive analisi relative all'eventuale presenza di distribuzioni riconducibili a leggi di potenza.

3.6 Analisi dell'adattamento alla legge di potenza

Per verificare se le distribuzioni cumulative dell'interasse successivo e della distanza d_b possano essere descritte mediante una legge di potenza, è stata effettuata un'analisi di regressione lineare sui dati opportunamente trasformati. Una distribuzione a legge di potenza è descritta da una relazione del tipo:

$$y = ax^b \quad (3.10)$$

Dove:

- y rappresenta la variabile dipendente;
- x rappresenta la variabile indipendente;
- a rappresenta una costante di proporzionalità;
- b rappresenta l'esponente della legge di potenza.

La relazione è di tipo non lineare e, se rappresentata in scala lineare, assume un andamento curvilineo. Di conseguenza, l'applicazione di una regressione lineare ai dati originali non consentirebbe di descriverne il corretto andamento. Per questo motivo è stata applicata una trasformazione logaritmica ad entrambi i membri dell'equazione, ottenendo:

$$\log(y) = \log(a) + b \log(x) \quad (3.11)$$

La trasformazione logaritmica consente di ricondurre la relazione originaria ad una forma lineare, rendendo possibile l'applicazione della regressione lineare ai dati trasformati. Inoltre, essa comprime i differenti ordini di grandezza delle variabili considerate, distribuendoli in modo più uniforme. Tale trasformazione facilita l'analisi e consente di evidenziarne più chiaramente l'eventuale andamento lineare.

Definendo:

$$X = \log(x) \quad (3.12)$$

e

$$Y = \log(y) \quad (3.13)$$

l'equazione precedente può dunque essere riscritta come:

$$Y = q + bX \quad (3.14)$$

dove:

- Y rappresenta il logaritmo della variabile dipendente;
- X rappresenta il logaritmo della variabile indipendente;
- $q = \log(a)$ rappresenta l'intercetta della retta;

- b rappresenta il coefficiente angolare (slope) della retta, corrispondente all'esponente della legge di potenza.

Nel presente lavoro tale procedura è stata applicata sia alle distribuzioni cumulative dell'interasse successivo sia a quelle della distanza d_b . Per ciascun caso studio, i valori della variabile considerata e della corrispondente probabilità cumulativa sono stati trasformati mediante logaritmo in base dieci. Successivamente, i dati trasformati sono stati rappresentati mediante grafici a dispersione e sottoposti a regressione lineare, ottenendo una prima stima dell'equazione della retta, del coefficiente angolare (slope), dell'intercetta e del coefficiente di determinazione (R^2) indicante la bontà dell'adattamento, utilizzando l'intero intervallo dei dati disponibili.

Poiché le distribuzioni non presentano generalmente un comportamento lineare sull'intero intervallo dei dati, è stata successivamente individuata, per ciascun caso studio, una soglia inferiore x_{min} , corrispondente al valore a partire dal quale la distribuzione mostra un andamento approssimativamente lineare in scala logaritmica e risultante quindi compatibile con una legge di potenza. L'individuazione dell' x_{min} è stata effettuata mediante analisi grafica delle distribuzioni log-log, selezionando il tratto caratterizzato dal migliore andamento lineare.

In seguito, sono stati esclusi dalle elaborazioni tutti i valori inferiori all' x_{min} ed è stata eseguita una nuova regressione lineare considerando esclusivamente i dati appartenenti alla coda della distribuzione. Tale procedura ha consentito di ottenere, per ciascun caso studio, i valori definitivi del coefficiente angolare (slope), dell'intercetta e del coefficiente di determinazione (R^2), utilizzati nelle successive analisi comparative tra i diversi casi studio.

3.7 Verifica del modello mediante log-likelihood

Durante l'analisi preliminare delle distribuzioni cumulative rappresentate mediante grafici a dispersione con assi log-log è emersa la necessità di effettuare un'ulteriore verifica statistica per le distribuzioni degli interassi successivi. Esclusivamente per questa variabile, è stato effettuato un confronto tra un modello a legge di potenza e un modello esponenziale mediante il rapporto di log-verosimiglianza (Log-Likelihood Ratio), seguendo la procedura proposta da Clauset et al. (2009)

L'analisi è stata condotta considerando solo i valori appartenenti alla coda della distribuzione ($x \geq x_{\min}$). In accordo con la metodologia proposta da Clauset et al. (2009), il valore di $x_{\min}$ è stato stimato automaticamente nell'ambito della procedura di massima verosimiglianza (Maximum Likelihood Estimation).

Per ciascun caso studio sono stati stimati i parametri della distribuzione a legge di potenza e della distribuzione esponenziale mediante il metodo della massima verosimiglianza. Successivamente è stato calcolato il rapporto di log-verosimiglianza:

$$R = LL_{PL} - LL_{EXP} \quad (3.15)$$

Dove:

- LL_{PL} rappresenta la log-verosimiglianza della distribuzione a legge di potenza;
- LL_{EXP} rappresenta la log-verosimiglianza della distribuzione esponenziale.

Il rapporto di log-verosimiglianza consente di confrontare quantitativamente l'adattamento dei due modelli ai dati osservati. Valori positivi di R indicano che la distribuzione a legge di potenza descrive meglio i dati rispetto alla distribuzione esponenziale, mentre valori negativi indicano un migliore adattamento del modello esponenziale.

L'analisi mediante log-likelihood è stata utilizzata come verifica aggiuntiva rispetto alla regressione lineare descritta nel capitolo precedente, con l'obiettivo di confrontare i due modelli statistici e di valutare quale risultasse maggiormente compatibile con la distribuzione degli interassi successivi.

3.8 Binarizzazione della rete di canali di Sapelo Island

Al fine di valutare un approccio alternativo rispetto alla metodologia descritta nei precedenti capitoli, è stata sviluppata un'analisi basata sull'intera rete dei canali a marea, anziché sulla sola distribuzione dei canali lungo una linea di costa o lungo il margine del canale principale. Tale approccio consente di sfruttare l'intera geometria della rete di drenaggio, permettendo di analizzare direttamente la configurazione spaziale dei canali sull'intera rete, anziché lungo una sola linea di campionamento, e di ricavare una serie di parametri morfologici senza ricorrere alla digitalizzazione manuale dei singoli canali. La procedura è stata applicata esclusivamente al caso studio di Sapelo Island, scelto come caso pilota per valutare l'efficacia del nuovo approccio.

La procedura di binarizzazione è stata eseguita in QGIS 3.40.5 utilizzando il modello digitale del terreno (DTM) del caso studio di Sapelo Island, opportunamente ritagliato sull'area di interesse. A partire dal DTM è stato calcolato, mediante gli strumenti del Processing Toolbox, il raster di pendenza (Slope).

La binarizzazione del DTM è stata effettuata individuando una soglia di quota (h^*) mediante l'analisi dell'istogramma dei valori di elevazione. La soglia è stata scelta in corrispondenza della principale variazione nella distribuzione dei valori evidenziata nell'istogramma, corrispondente al punto di transizione tra le quote attribuibili ai canali e quelle della piana tidale. Il valore individuato è stato successivamente verificato mediante controllo visivo della mappa binaria ottenuta.

L'utilizzo della sola elevazione non risultava tuttavia sufficiente a rappresentare correttamente le geometrie dei canali, poiché comportava una perdita di informazioni relative alla larghezza dei canali, in particolare quelli più ramificati e di dimensioni minori. Per questo motivo è stato utilizzato anche il raster di pendenza, successivamente binarizzato applicando una soglia pari a 8.7° , in modo da evidenziare con maggiore precisione i margini dei canali e le principali discontinuità morfologiche associate alle sponde. Questa procedura di estrazione semi-automatica, basata sull'applicazione combinata di soglie di elevazione e pendenza, è ispirata all'approccio proposto da Chirol et al. (2018).

I raster binari ottenuti dall'elevazione e dalla pendenza sono stati successivamente combinati mediante il Raster Calculator di QGIS, ottenendo una singola mappa binaria della rete di canali contenente le informazioni derivanti da entrambi i raster. Nella mappa

risultante i pixel appartenenti ai canali assumono valore 1, i pixel non appartenenti ai canali valore 0, mentre i pixel esterni all'area di studio sono stati mantenuti come NoData, identificati mediante il valore -99999.

La mappa binaria così ottenuta è stata successivamente sottoposta ad una fase di correzione manuale mediante il plugin Serval, utilizzato per l'eliminazione di alcuni falsi valori non coerenti con la morfologia reale, derivanti dalla procedura di binarizzazione, quali pixel isolati o classificati erroneamente come canale o non-canale. La correzione ha consentito di rimuovere questi artefatti, migliorando la continuità geometrica della rete di canali e riducendo la presenza di elementi non rappresentativi prima della successiva elaborazione automatica. Infine, il raster corretto è stato esportato in formato GeoTIFF, mantenendo la georeferenziazione originale, e utilizzato come dato di ingresso per il codice MATLAB descritto nel paragrafo successivo.

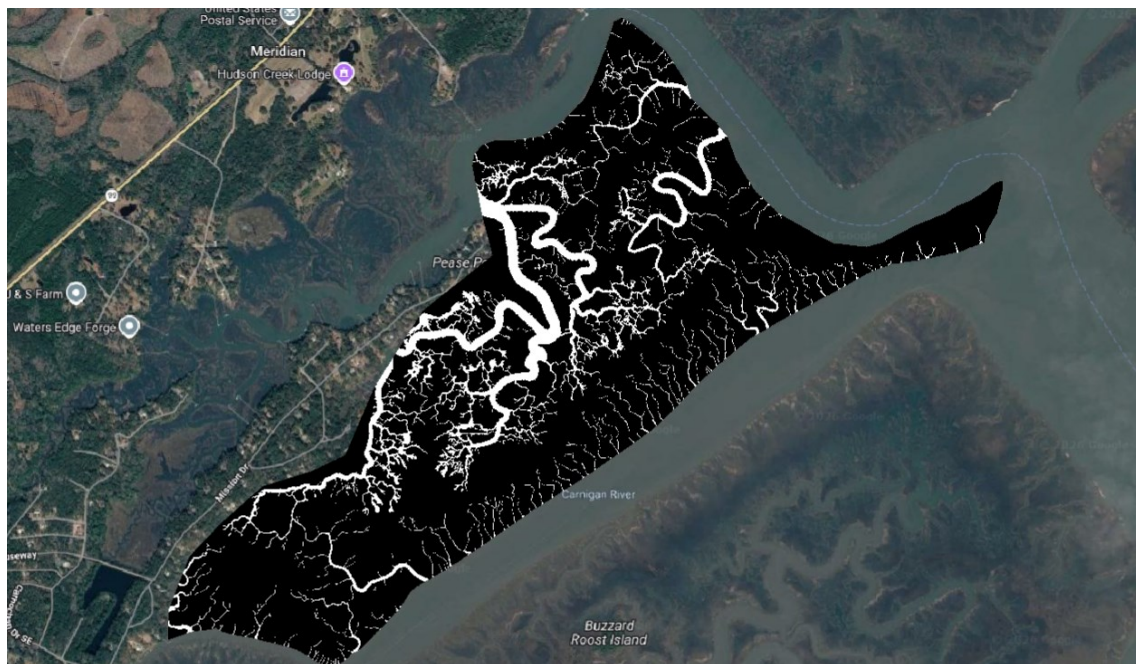


Figura 3.4 Mappa binaria della rete di canali ottenuta per il caso studio di Sapelo Island



Figura 3.5 Riquadro di dettaglio della mappa binaria della rete di canali ottenuta per il caso studio di Sapelo Island

3.9 Nuova analisi dell'intera rete di canali a marea

La mappa binaria ottenuta è stata utilizzata come dato di ingresso per un nuovo codice sviluppato in MATLAB, finalizzato all'analisi dell'intera rete di canali a marea. A differenza della metodologia descritta nei capitoli precedenti, basata sulla digitalizzazione manuale dei canali lungo una linea di campionamento, il nuovo approccio consente di analizzare direttamente l'intera rete di drenaggio, permettendo l'estrazione automatica di numerose caratteristiche geometriche e topologiche dei canali.

Il codice acquisisce il raster binario in formato GeoTIFF, convertendo i pixel NoData in valori NaN e rimuovendo automaticamente gruppi di pixel connessi isolati derivanti dalla procedura di binarizzazione, non identificati tramite il plugin Serval. Successivamente, mediante la trasformata euclidea della distanza, viene calcolata per ciascun pixel appartenente ai canali la distanza dal bordo più vicino, interpretata come half-width locale. Tale informazione viene successivamente utilizzata per stimare la larghezza locale dei canali lungo l'intera rete.

A partire dalla mappa binaria viene quindi calcolato lo skeleton della rete di canali, ovvero l'asse mediano di ciascun canale del sistema di drenaggio. Ad ogni pixel dello skeleton viene associata la corrispondente larghezza locale, ottenuta come doppio dell'half-width precedentemente calcolato. Lo skeleton viene successivamente segmentato in tratti distinti mediante la rimozione automatica dei punti di biforcazione (branch points), consentendo l'identificazione dei singoli segmenti che costituiscono la rete di canali. Per ciascun segmento vengono quindi determinate alcune proprietà geometriche, tra cui il baricentro e la larghezza media.

Il codice, inoltre, identifica automaticamente gli outlet (bocche dei canali verso il mare) e le channel heads (porzioni di origine della rete di drenaggio), utilizzati come riferimenti per il calcolo di alcune metriche spaziali lungo lo skeleton. Nel presente lavoro è stato adottato un raggio di ricerca pari a 1 pixel per l'identificazione degli outlet. Tale parametro rappresenta la distanza massima dal margine marino entro la quale una terminazione della rete di canali viene classificata come outlet. Il valore è stato scelto sulla base di verifiche visive, risultando il più efficace per il corretto riconoscimento delle bocche dei canali. Sulla base della rete, il codice calcola automaticamente numerose variabili spaziali e geometriche, la figura 3.6 mostra, ad esempio, la distribuzione spaziale della distanza dall'outlet normalizzata rispetto alla larghezza locale. Tra le diverse variabili prodotte sono state selezionate, per le successive analisi statistiche, esclusivamente due metriche ritenute maggiormente rappresentative dell'organizzazione spaziale della rete:

- la distanza tra i baricentri di tratti di canale aventi larghezza simile o maggiore rispetto a quello considerato;
- la distanza lungo lo skeleton tra ciascun punto della rete e il primo punto appartenente ad un canale avente larghezza maggiore o uguale.

Il codice è stato successivamente modificato al fine di esportare automaticamente tali variabili in formato Microsoft Excel, generando i dataset utilizzati nelle successive elaborazioni statistiche.

Per entrambe le variabili è stata applicata la medesima procedura statistica descritta nei paragrafi precedenti, comprendente l'ordinamento dei dati, il calcolo della probabilità cumulativa, la rappresentazione mediante grafici a dispersione con assi logaritmici, la stima della legge di potenza mediante regressione lineare sui dati trasformati e l'individuazione del valore di $x_{\min}$. L'applicazione della medesima procedura statistica ha consentito di confrontare direttamente le distribuzioni ottenute dal nuovo approccio

con quelle derivate dalla metodologia basata sulla linea di campionamento, garantendo l'omogeneità delle elaborazioni effettuate.

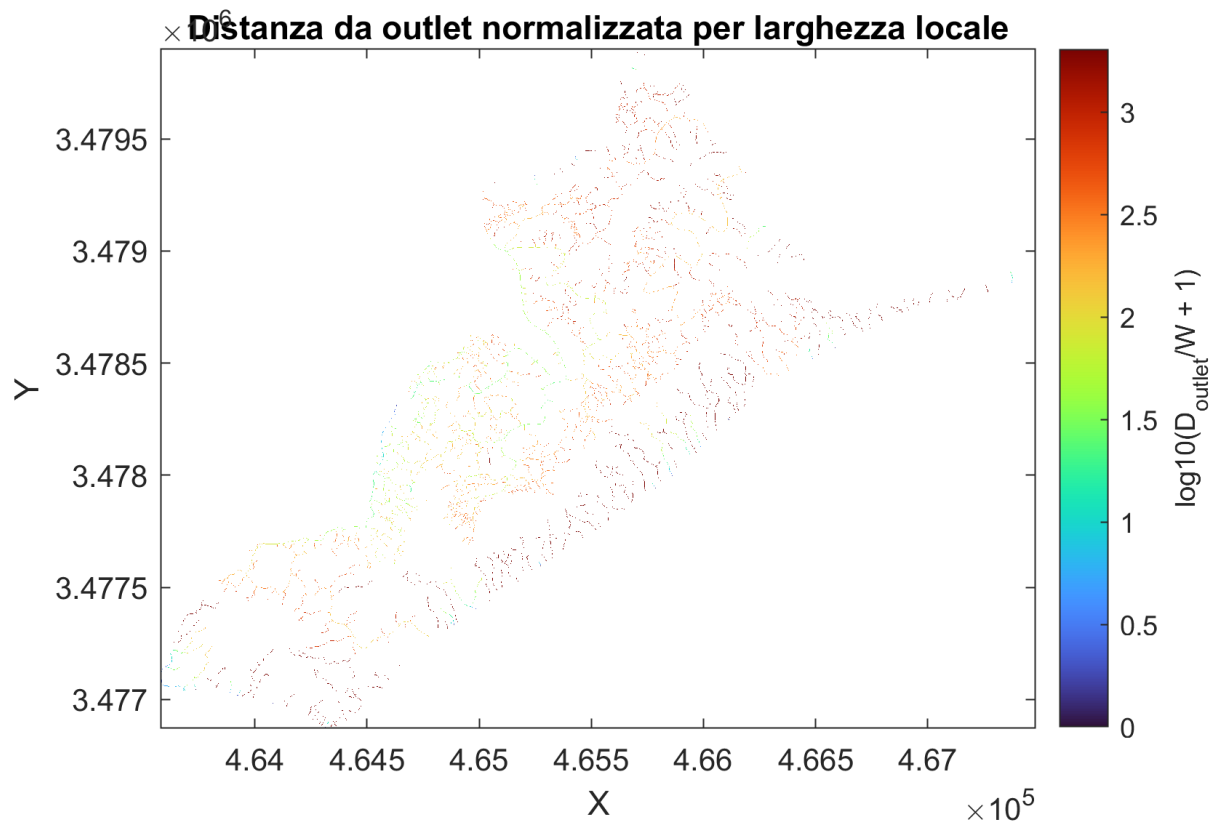


Figura 3.6 Distribuzione spaziale della distanza dall'outlet normalizzata rispetto alla larghezza locale ottenuta dal codice MATLAB

4. RISULTATI

4.1 Distribuzione della distanza d_b dal canale più vicino di larghezza maggiore o uguale

Per ciascun caso studio è stata analizzata la distribuzione cumulativa della distanza d_b , definita come la distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale a quella del canale considerato. La distanza d_b descrive la separazione tra ciascun canale e il canale più vicino, avente larghezza maggiore o uguale, consentendo quindi di caratterizzare l'organizzazione gerarchica e spaziale dei sistemi di canali paralleli analizzati. Per ciascun caso studio è stata costruita la distribuzione cumulativa di d_b , successivamente rappresentata in scala logaritmica per valutarne l'andamento e verificare l'eventuale presenza di un andamento compatibile con una legge di potenza.

La Figura 4.1 riporta, a titolo esemplificativo, la distribuzione ottenuta per il caso studio del Colorado River Delta con DTM, mentre la Figura 4.2 mostra il confronto tra le distribuzioni cumulative dei dodici casi studio analizzati. In entrambe le figure, le distribuzioni sono rappresentate utilizzando assi in scala logaritmica, mentre i valori riportati corrispondono ai dati originali.

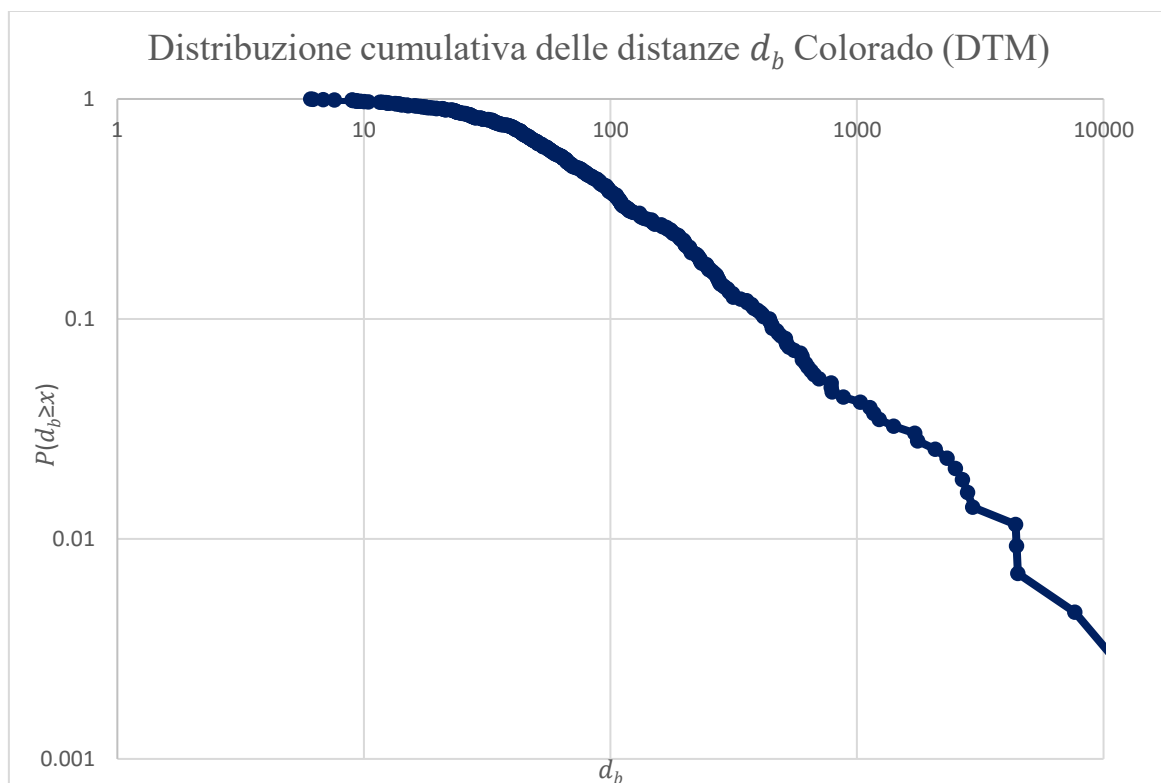


Figura 4.1 Distribuzione cumulativa della distanza d_b del caso studio del Colorado River Delta

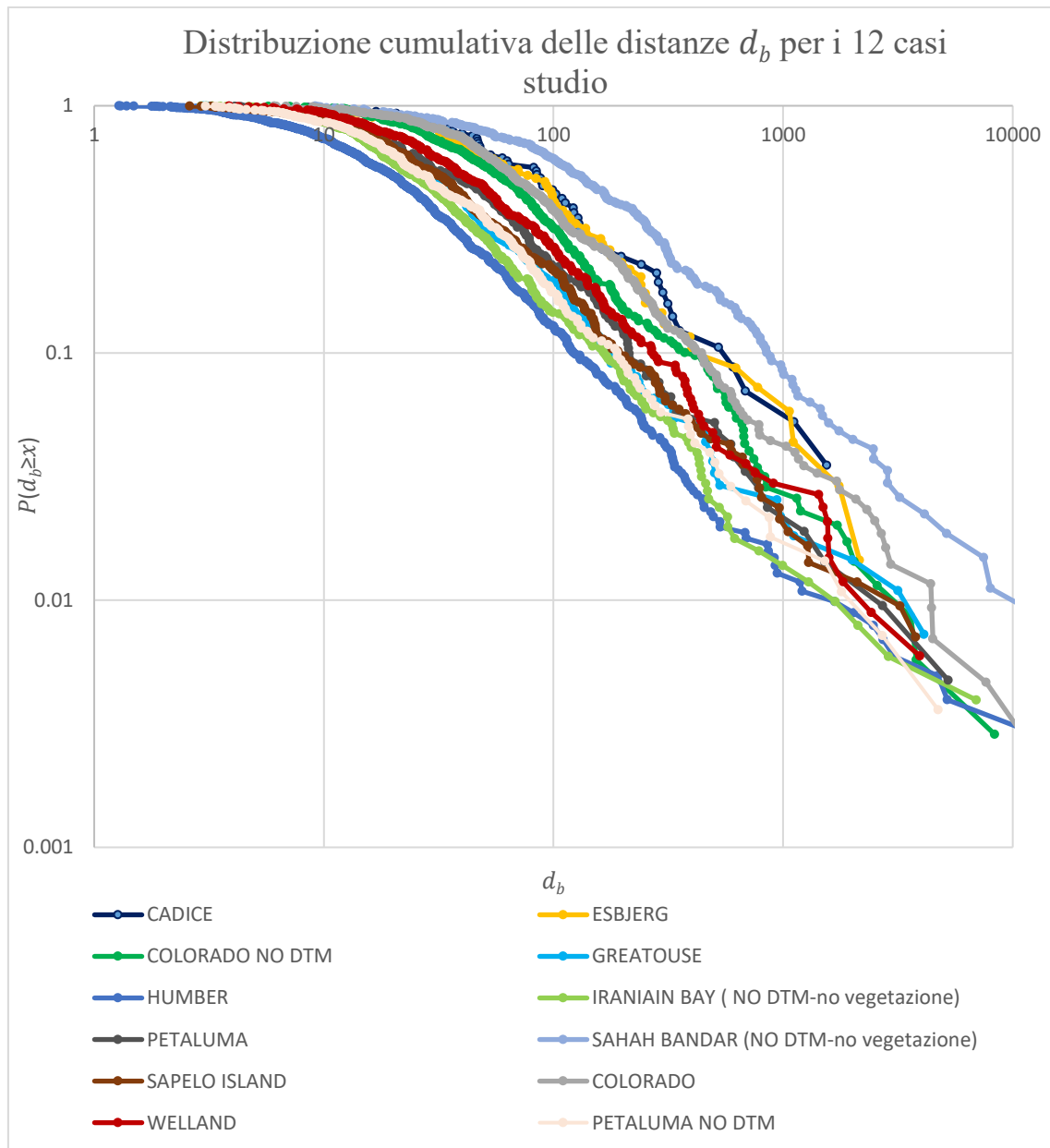


Figura 4.2 Distribuzioni cumulative della distanza d_b per i dodici casi studio analizzati

Sui valori trasformati in forma logaritmica, è stata poi eseguita una regressione lineare considerando l'intera distribuzione dei dati trasformati in scala logaritmica. I parametri ottenuti sono riportati nella Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Parametri della regressione lineare ottenuti considerando l'intera distribuzione della distanza d_b .

Caso studio	Pendenza (Slope)	Intercetta	R²	Formula
Cadice	-0.6933	0.9613	0.9341	$Y = 0.9613 - 0.6933X$
Skallingen/Esbjerg	-0.6754	0.8762	0.9036	$Y = 0.8762 - 0.6754X$
Colorado NO DTM	-0.785	1.0119	0.9393	$Y = 1.0119 - 0.7850X$
Great Ouse	-0.7309	0.7123	0.9497	$Y = 0.7123 - 0.7309X$
Humber	-0.7049	0.5367	0.9329	$Y = 0.5367 - 0.7049X$
Iranian Bay	-0.7976	0.7682	0.9632	$Y = 0.7682 - 0.7976X$
Petaluma NO DTM	-0.7445	0.7187	0.9419	$Y = 0.7187 - 0.7445X$
Petaluma	-0.7249	0.7612	0.9349	$Y = 0.7612 - 0.7249X$
Shah Bandar	-0.6617	1.0106	0.9077	$Y = 1.0106 - 0.6617X$
Sapelo Island	-0.708	0.6929	0.9396	$Y = 0.6929 - 0.7080X$
Colorado	-0.7603	1.0331	0.9387	$Y = 1.0331 - 0.7603X$
Welland	-0.7319	0.8209	0.9373	$Y = 0.8209 - 0.7319X$

Considerando l'intero intervallo dei dati, le regressioni lineari evidenziano un comportamento complessivamente simile tra i diversi casi studio. I coefficienti angolari risultano infatti compresi tra -0.66 e -0.80 , mentre i valori di R^2 , sempre superiori a 0.90 , indicano una buona aderenza complessiva dei dati trasformati a un andamento lineare in scala logaritmica, e ad un andamento a legge di potenza in scala naturale. Si osservano, tuttavia deviazioni dall'andamento lineare in scala log-log, soprattutto per i valori più bassi di d_b , che giustificano la successiva analisi separata della coda delle distribuzioni, come riportato nel seguito.

Per ciascun caso studio, è stata quindi individuata, la soglia inferiore x_{min} , corrispondente all'inizio del tratto della distribuzione compatibile con una legge di potenza. La Figura 4.3 mostra, a titolo di esempio per il caso studio del Colorado River Delta, la regressione lineare eseguita considerando esclusivamente i dati appartenenti alla coda della distribuzione.

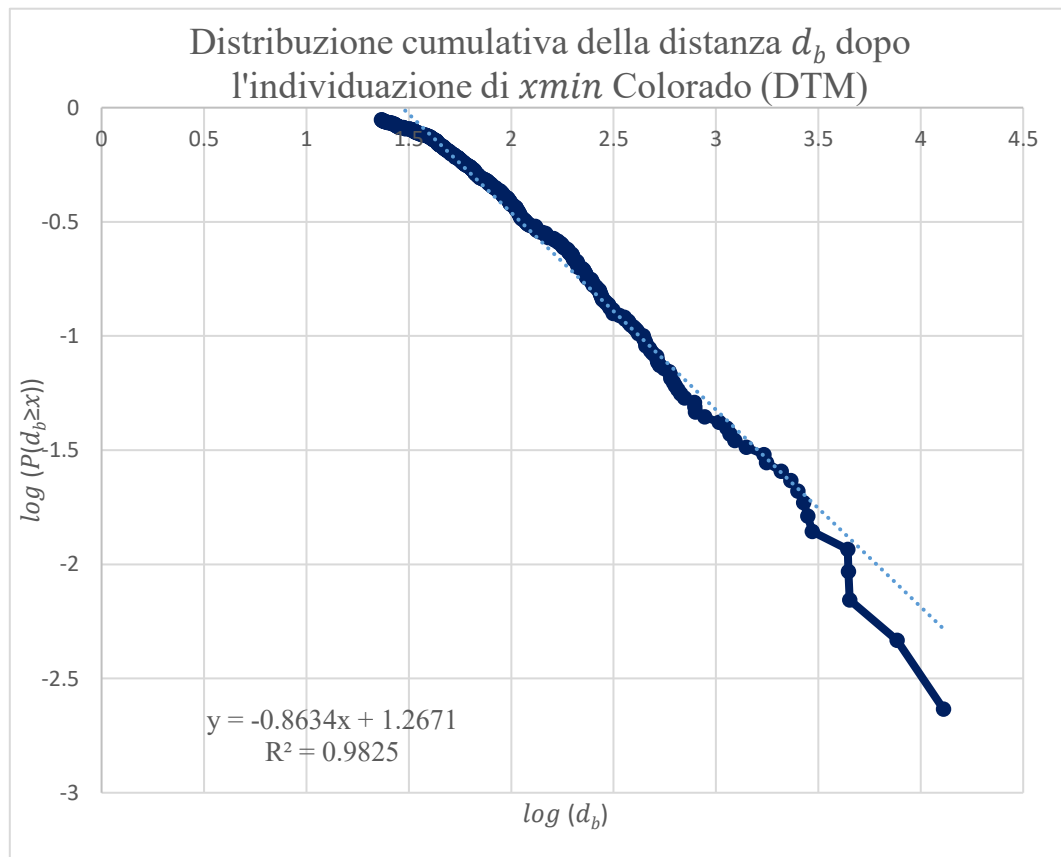


Figura 4.3 Regressione lineare della distribuzione della distanza d_b del caso studio del Colorado River Delta dopo l'applicazione del valore di x_{min} pari a 1.32.

I parametri della regressione lineare ottenuti dopo l'applicazione del valore di x_{min} per tutti i casi studio analizzati sono riportati nella Tabella 4.2.

Tabella 4.2 Parametri della regressione lineare ottenuti dopo l'applicazione del valore di x_{min} per la distribuzione della distanza d_b .

Caso studio	Pendenza (Slope)	Intercetta	R²	Formula	x_{min} (log)	x_{min}
Cadice	-0.8495	1.3192	0.9834	$Y = 1.3192 - 0.8495X$	1.673536	47.15595
Skallingen/Esbjerg	-0.8602	1.3	0.9728	$Y = 1.3000 - 0.8602X$	1.527621	33.69931
Colorado NO DTM	-0.8932	1.2487	0.9788	$Y = 1.2487 - 0.8932X$	1.323293	21.05197
Great Ouse	-0.8607	0.9668	0.9909	$Y = 0.9668 - 0.8607X$	1.205274	16.04257
Humber	-0.8592	0.8127	0.9888	$Y = 0.8127 - 0.8592X$	0.968595	9.302396
Iranian Bay	-0.8722	0.9067	0.9877	$Y = 0.9067 - 0.8722X$	0.981201	9.576367
Petaluma NO DTM	-0.8691	0.9596	0.986	$Y = 0.9596 - 0.8691X$	1.106095	12.76719
Petaluma	-0.864	1.0472	0.9789	$Y = 1.0472 - 0.8640X$	1.22697	16.86436
Shah Bandar	-0.8671	1.5478	0.9879	$Y = 1.5478 - 0.8671X$	1.809821	64.53889
Sapelo Island	-0.8436	0.959	0.9892	$Y = 0.9590 - 0.8436X$	1.15887	14.41682
Colorado	-0.8634	1.2671	0.9825	$Y = 1.2671 - 0.8634X$	1.366155	23.23566
Welland	-0.8712	1.1125	0.9831	$Y = 1.1125 - 0.8712X$	1.269798	18.61222

Nella maggior parte dei casi studio, le distribuzioni mostrano un andamento curvilineo per i valori più bassi di d_b e una porzione di coda approssimativamente lineare in coordinate log-log. A partire dal valore di x_{min} , le regressioni lineari restituiscono coefficienti angolari relativamente simili tra i diversi casi studio, compresi tra circa -0.84 e -0.89, e valori del coefficiente di determinazione R^2 generalmente superiori a 0.97. Ciò indica che, al di sopra di x_{min} , le code delle distribuzioni presentano caratteristiche statistiche confrontabili tra loro e risultano compatibili con un andamento di tipo power law.

4.2 Distribuzione degli interassi successivi

Per ciascun caso studio è stata analizzata la distribuzione cumulativa dell'interasse tra canali successivi, che descrive la distanza reciproca tra elementi adiacenti lungo la linea di campionamento e fornisce quindi una misura diretta della loro spaziatura. La Figura 4.4 riporta, a titolo esemplificativo, la distribuzione ottenuta per il caso studio del Colorado River Delta utilizzando il DTM, mentre la Figura 4.5 mostra il confronto tra le distribuzioni cumulative dei dodici casi studio analizzati. In entrambe le figure, le distribuzioni sono rappresentate mediante diagrammi con assi in scala logaritmica, mentre i valori riportati corrispondono ai dati originali.

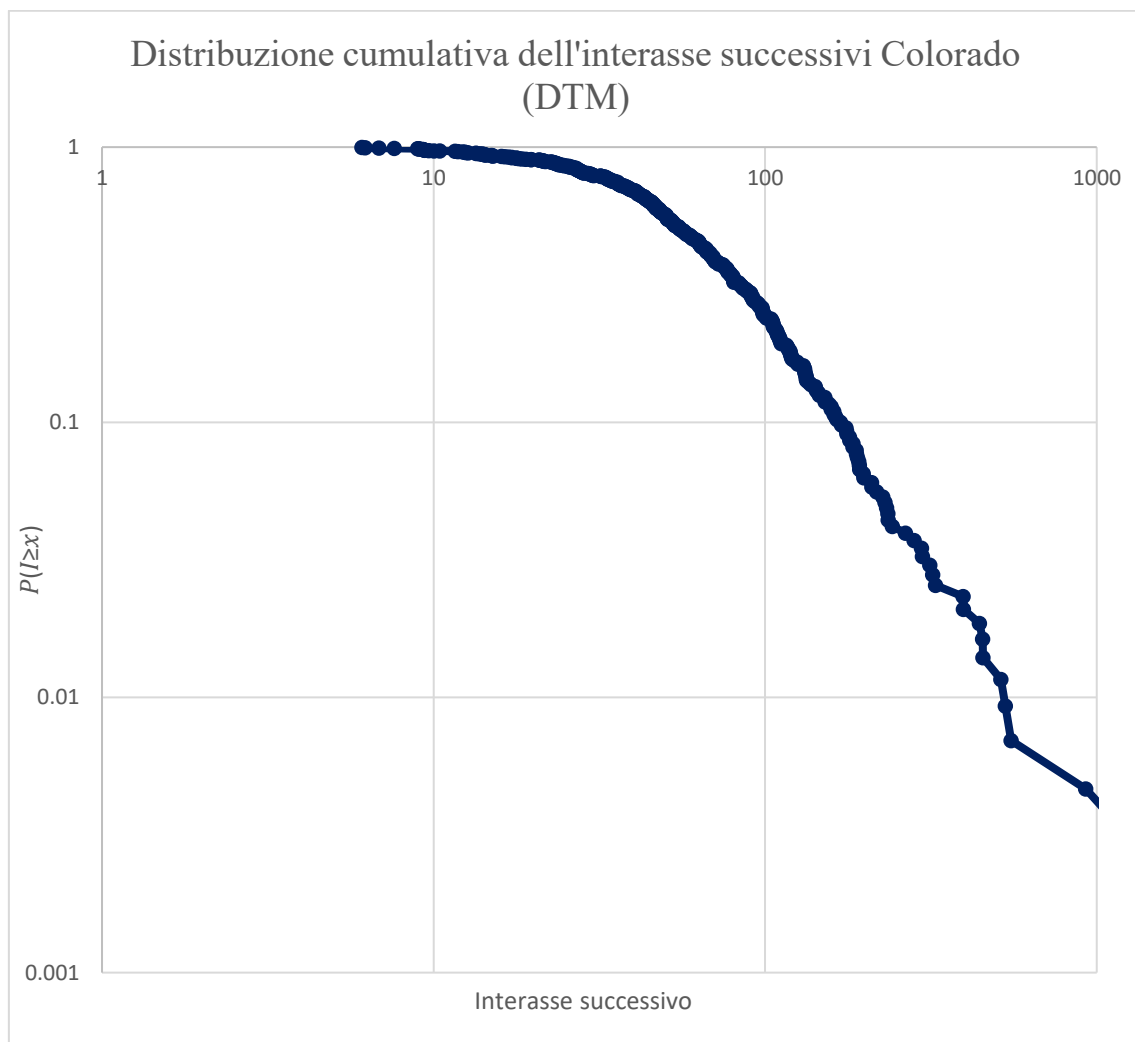


Figura 4.4 Distribuzione cumulativa dell'interasse successivo del caso studio del Colorado River Delta

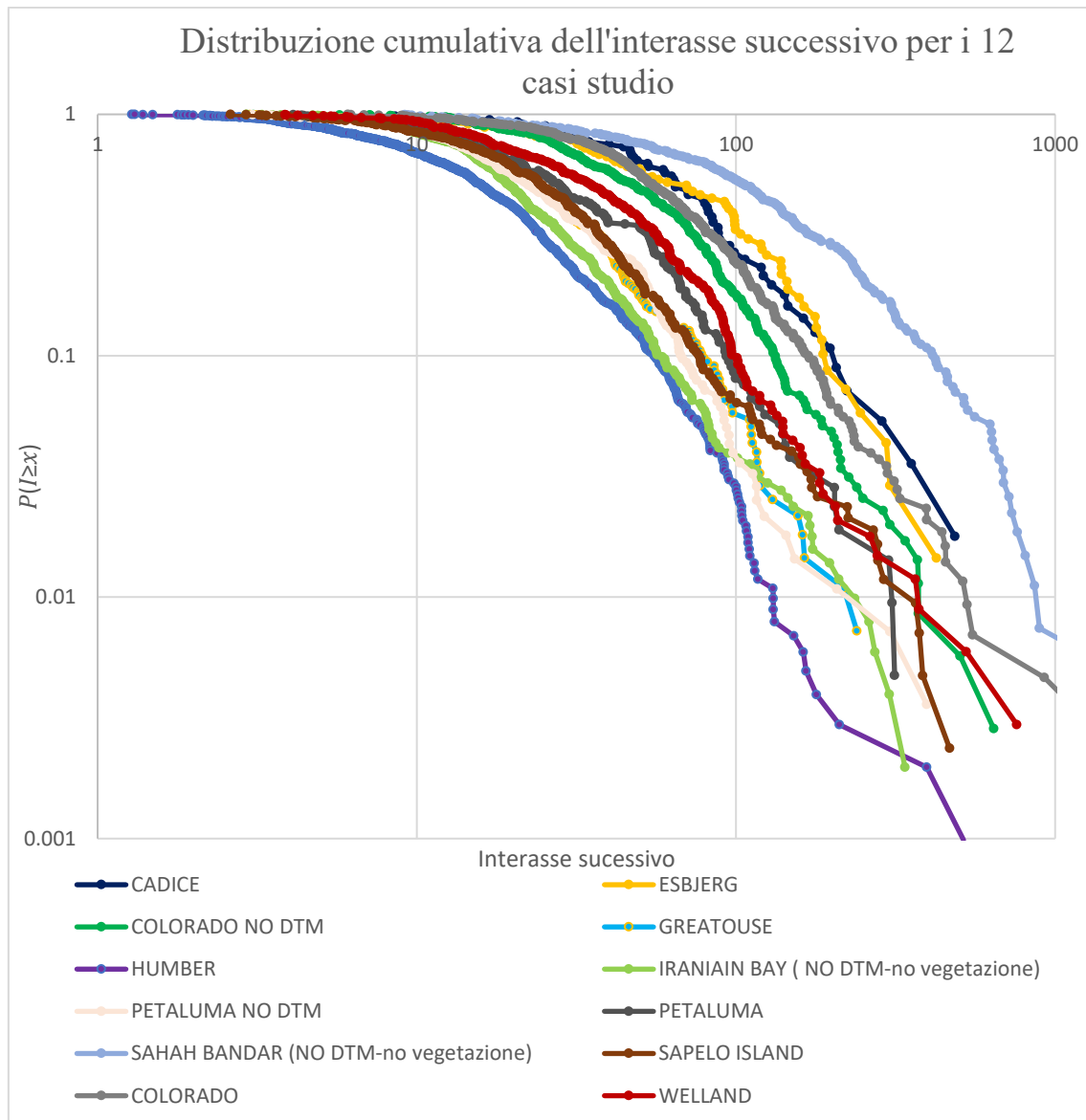


Figura 4.5 Distribuzioni cumulative dell'interasse successivo per i dodici casi studio analizzati

Rispetto alle distribuzioni della distanza d_b , quelle degli interassi successivi mostrano una maggiore dispersione tra i diversi casi studio e deviazioni più marcate dalla linearità, soprattutto per i valori più bassi della variabile. Nella porzione di coda, tuttavia, la maggior parte delle distribuzioni presenta un andamento approssimativamente lineare in coordinate log-log, suggerendo una possibile compatibilità con un comportamento di tipo power law.

Sui valori trasformati in forma logaritmica, è stata poi eseguita una regressione lineare considerando l'intera distribuzione dei dati trasformati in scala logaritmica. I parametri ottenuti sono riportati nella Tabella 4.3.

Tabella 4.3 Parametri della regressione lineare ottenuti considerando l'intera distribuzione dell'interasse successivo

Caso studio	Pendenza (Slope)	Intercetta	R ²	Formula
Cadice	-1.0059	1.4124	0.8553	$Y = 1.4124 - 1.0059X$
Skallingen/Esbjerg	-0.8242	1.0518	0.769	$Y = 1.0518 - 0.8242X$
Colorado NO DTM	-1.0861	1.3987	0.8433	$Y = 1.3987 - 1.0861X$
Great Ouse	-1.0354	1.0133	0.8636	$Y = 1.0133 - 1.0354X$
Humber	-0.9579	0.7206	0.8298	$Y = 0.7206 - 0.9579X$
Iranian Bay	-1.1848	1.1465	0.9094	$Y = 1.1465 - 1.1848X$
Petaluma NO DTM	-1.0421	1.0028	0.8493	$Y = 1.0028 - 1.0421X$
Petaluma	-0.9536	0.973	0.8456	$Y = 0.9730 - 0.9536X$
Shah Bandar	-0.8143	1.2125	0.8017	$Y = 1.2125 - 0.8143X$
Sapelo Island	-0.9967	0.9692	0.8671	$Y = 0.9692 - 0.9967X$
Colorado	-1.0552	1.429	0.8498	$Y = 1.4290 - 1.0552X$
Welland	-0.9975	1.1105	0.8432	$Y = 1.1105 - 0.9975X$

Le regressioni lineari applicate all'intera distribuzione evidenziano una maggiore variabilità rispetto a quanto osservato per d_b , sia nei coefficienti angolari sia nei valori di R^2 . Tale variabilità riflette la maggiore dispersione degli interassi successivi e rende opportuno concentrare l'analisi sulla porzione di coda individuata mediante x_{min} .

Per ciascun caso studio, è stata quindi individuata la soglia inferiore x_{min} , corrispondente all'inizio del tratto della distribuzione compatibile con una legge di potenza. La Figura 4.6 mostra, a titolo di esempio per il caso studio del Colorado River Delta, la regressione lineare eseguita considerando esclusivamente i dati appartenenti alla coda della distribuzione.

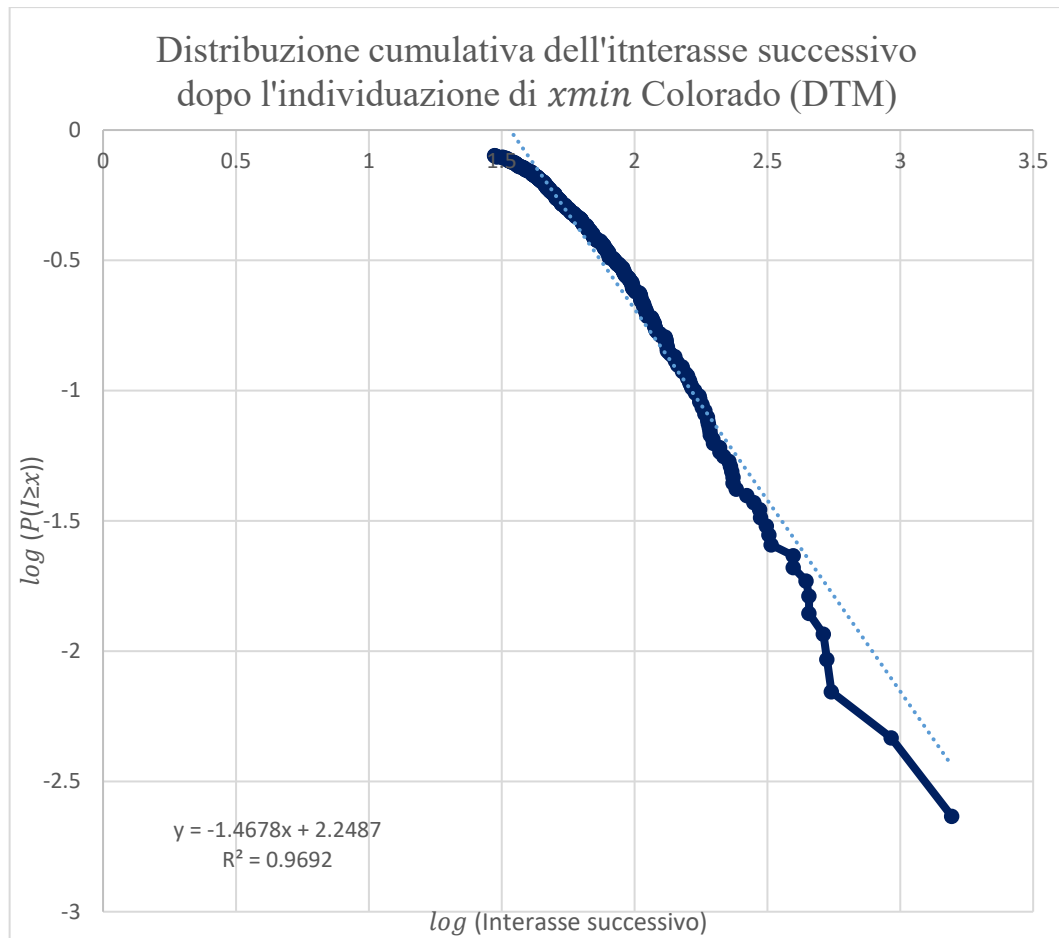


Figura 4.6 Regressione lineare della distribuzione dell'interasse successivo del caso studio del Colorado River Delta dopo l'applicazione del valore di x_{min} pari a 1.37.

I parametri della regressione lineare ottenuti dopo l'applicazione del valore di x_{min} per tutti i casi studio analizzati sono riportati nella Tabella 4.4.

Tabella 4.4 Parametri della regressione lineare ottenuti dopo l'applicazione del valore di x_{min} per la distribuzione della dell'interasse successivo.

Caso studio	Pendenza (Slope)	Intercetta	R²	Formula	x_{min} (log)	x_{min}
Cadice	-1.4486	2.402	0.9829	$Y = 2.4020 - 1.4486X$	1.667866	46.54426
Skallingen/Esbjerg	-1.3912	2.2219	0.8848	$Y = 2.2219 - 1.3912X$	1.572283	37.34936
Colorado NO DTM	-1.4354	2.0622	0.9321	$Y = 2.0622 - 1.4354X$	1.379636	23.96823
Great Ouse	-1.4464	1.6829	0.9594	$Y = 1.6829 - 1.4464X$	1.163956	14.58665
Humber	-1.4322	1.4259	0.9429	$Y = 1.4259 - 1.4322X$	0.972628	9.389186
Iranian Bay	-1.4483	1.5564	0.9758	$Y = 1.5564 - 1.4483X$	1.016494	10.3871
Petaluma NO DTM	-1.5034	1.7574	0.9469	$Y = 1.7574 - 1.5034X$	1.184364	15.28849
Petaluma	-1.4522	1.8591	0.9377	$Y = 1.8591 - 1.4522X$	1.326056	21.18636
Shah Bandar	-1.264	2.2558	0.9228	$Y = 2.2558 - 1.2640X$	1.738371	54.74838
Sapelo Island	-1.4395	1.7157	0.9803	$Y = 1.7157 - 1.4395X$	1.21749	16.50022
Colorado	-1.4678	2.2487	0.9692	$Y = 2.2487 - 1.4678X$	1.473561	29.7551
Welland	-1.4309	1.8971	0.9388	$Y = 1.8971 - 1.4309X$	1.276662	18.90874

Considerando esclusivamente i valori superiori a x_{min} , i coefficienti angolari risultano generalmente compresi tra circa -1.39 e -1.50, con l'eccezione di Shah Bandar, per il quale si osserva una pendenza pari a circa -1.26. I valori di R^2 sono compresi tra circa 0.88 e 0.98 e indicano, nella maggior parte dei casi, una buona aderenza della coda delle distribuzioni a un andamento lineare in coordinate log-log.

Per le distribuzioni degli interassi successivi è stata inoltre effettuata un'analisi di log-likelihood al fine di confrontare l'adattamento dei modelli di legge di potenza ed esponenziale. I risultati ottenuti per ciascun caso studio sono riportati nella Tabella 4.5.

Tabella 4.5 Risultati dell'analisi di log-likelihood per le distribuzioni degli interassi successivi. Per ciascun caso studio sono riportati il valore di x_{min} , l'esponente della legge di potenza (α), il numero di interassi considerati nell'analisi (N), corrispondenti ai valori con $x \geq x_{min}$, il rapporto di log-verosimiglianza $R = LL(PL) - LL(EXP)$ e il modello statistico favorito.

Caso studio	x_{min}	alfa	N iterassi tali che $x \geq x_{min}$	$R = LL(PL) - LL(EXP)$	Modello favorito
Cadice	70.7	2.73	27	0.89	Power Law
Skallingen/Esbjerg	120	3.49	20	-0.32	Esponenziale (debole)
Colorado NO DTM	74.7	3.08	110	8.15	Power Law
Great Ouse	34.2	2.79	94	-0.37	Esponenziale (debole)
Humber	18.9	2.49	444	13.57	Power Law
Iranian Bay	39.4	2.84	104	14.01	Power Law
Petaluma NO DTM	48.5	3.46	66	7.71	Power Law
Petaluma	59.5	3.1	52	3.23	Power Law
Shah Bandar	232.2	2.9	66	1.66	Power Law
Sapelo Island	36.5	2.63	140	20.79	Power Law
Colorado	90.2	2.87	127	15.11	Power Law
Welland	108.5	2.81	25	2.73	Power Law

Il confronto mediante rapporto di log-verosimiglianza sembra favorire il modello power-law per dieci delle dodici distribuzioni analizzate. Nei casi di Skallingen/Esbjerg e Great Ouse il rapporto assume invece valori leggermente negativi, rispettivamente pari a -0.32

e -0.37, indicando una debole preferenza per il modello esponenziale. Nei casi favorevoli alla legge di potenza, i valori di R variano da 0.89 a 20.79, mentre gli esponenti α risultano compresi tra 2.49 e 3.46.

4.3 Confronto tra dati estratti dal DTM e immagini satellitari

Al fine di valutare l'influenza della tipologia di dato utilizzata per l'estrazione della rete di canali, sono state confrontate le distribuzioni cumulative ottenute dei casi studio di Colorado River Delta e Petaluma Bay, gli unici due casi studio per i quali erano disponibili sia un modello digitale del terreno (DTM) sia le immagini satellitari. Il confronto è stato effettuato per entrambe le metriche analizzate, ossia la distanza d_b dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale e l'interasse tra canali successivi. Le Figure 4.7-4.10 riportano le distribuzioni ottenute mediante le due diverse fonti di dati, rappresentate in scala logaritmica.

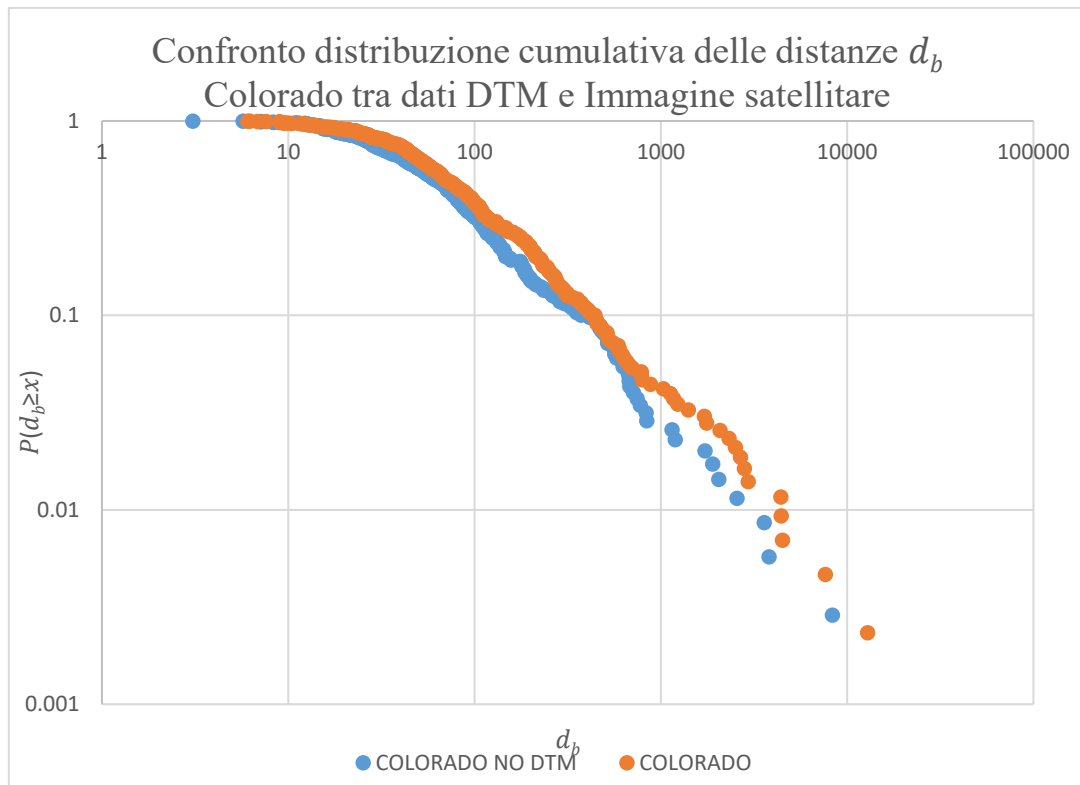


Figura 4.7 Confronto tra le distribuzioni cumulative della distanza d_b ottenute per il caso studio del Colorado River Delta mediante dati DTM in arancione e immagini satellitari in colore blu.

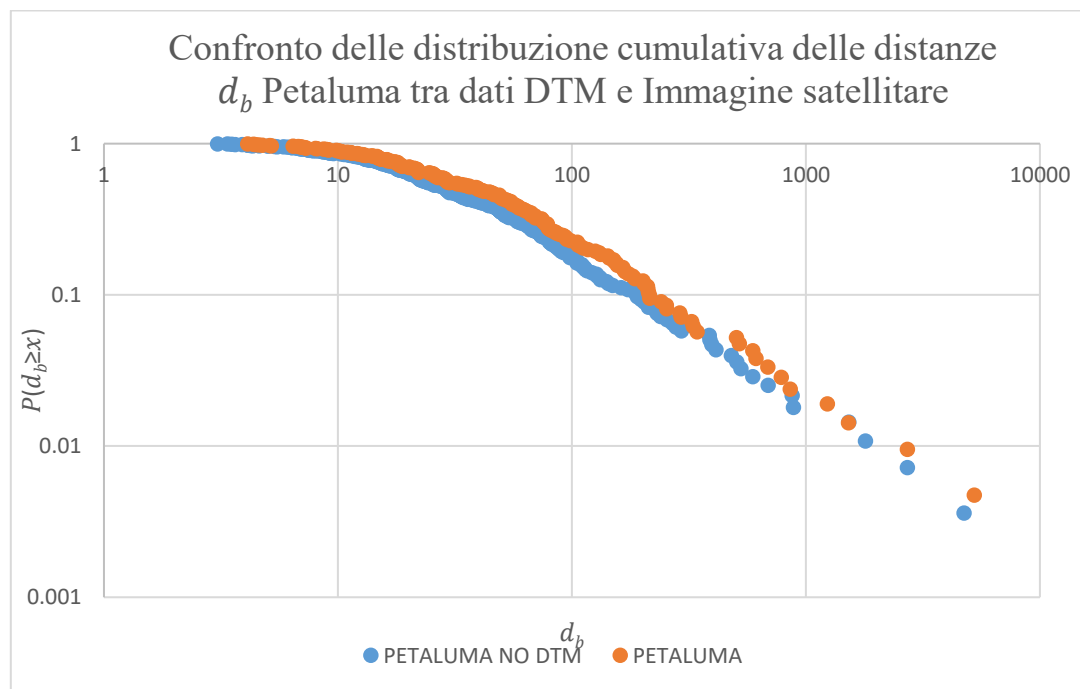


Figura 4.8 Confronto tra le distribuzioni cumulative della distanza d_b ottenute per il caso studio di Petaluma Bay mediante dati DTM in arancione e immagini satellitari in colore blu.

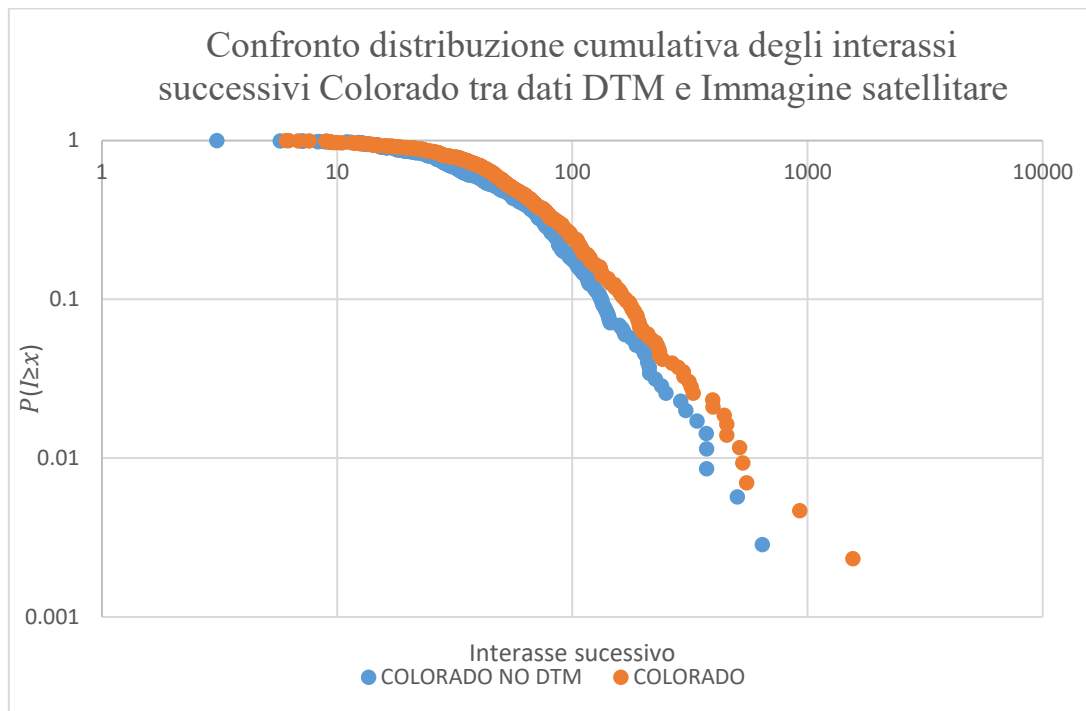


Figura 4.9 Confronto tra le distribuzioni cumulative degli interassi successivi ottenute per il caso studio del Colorado River Delta mediante dati DTM in arancione e immagini satellitari in colore blu.

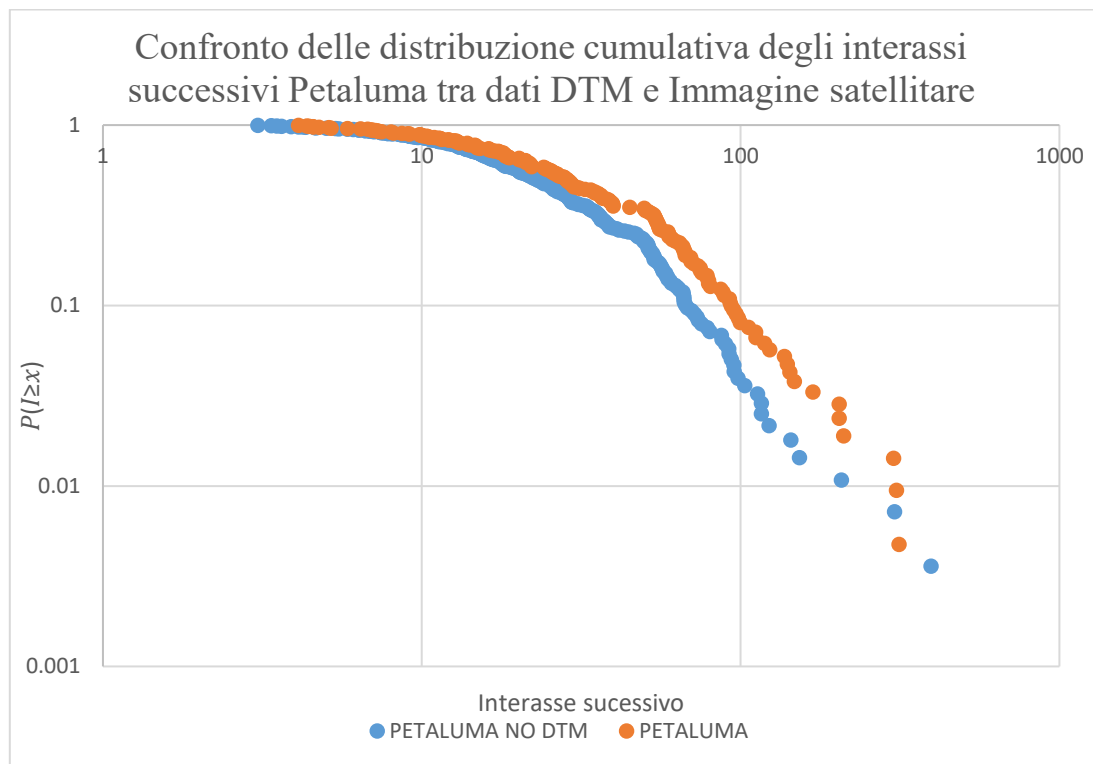


Figura 4.10 Confronto tra le distribuzioni cumulative degli interassi successivi ottenute per il caso studio di Petaluma Bay mediante dati DTM in arancione e immagini satellitari in colore blu.

Per entrambi i casi studio, le distribuzioni ottenute mediante DTM e immagini satellitari mostrano andamenti complessivamente simili e una sostanziale sovrapposizione lungo gran parte dell'intervallo analizzato. Le differenze risultano più evidenti in corrispondenza degli estremi delle distribuzioni, dove il numero di osservazioni è minore, ma non modificano in modo sostanziale la forma generale delle curve né la loro pendenza.

Al fine di fornire una valutazione quantitativa delle differenze osservate, per il caso studio del Colorado River Delta è stato effettuato un confronto tra i parametri delle regressioni lineari ottenute dai dati DTM e dalle immagini satellitari. I risultati sono riportati nella Tabella 4.6.

Tabella 4.6 Confronto quantitativo tra i parametri delle regressioni lineari ottenute dai dati DTM e dalle immagini satellitari per il caso studio del Colorado River Delta.

Variabile	Caso	Slope DTM	Slope NO DTM	Δ Slope	Δ %	R² DTM	R² IMM SATEL
d_b	Colorado	-0.7603	-0.785	0.0247	3.25	0.9387	0.9393
Interasse successivo	Colorado	-1.0552	-1.0861	0.0309	2.93	0.8498	0.8433

Il confronto quantitativo condotto per il Colorado River Delta conferma quanto osservato graficamente. Per la distribuzione di d_b , i coefficienti angolari ottenuti mediante DTM e immagini satellitari sono rispettivamente pari a -0.76 e -0.78, con una differenza percentuale del 3.25%. Inoltre, per entrambi i casi, i corrispondenti valori di R^2 sono risultati essere pari a 0.94. Per gli interassi successivi, le pendenze risultano pari a -1.055 e -1.086, con una differenza del 2.93%, mentre i valori di R^2 sono rispettivamente pari a 0.85 e 0.84.

Nel complesso, le modeste differenze tra i coefficienti angolari e la somiglianza tra le distribuzioni indicano che, almeno per i due casi esaminati, la tipologia di dato di partenza ha un'influenza limitata sulle proprietà statistiche considerate. Questo risultato suggerisce che analisi come quelle qui condotte possano fornire risultati soddisfacenti anche quando la rete viene estratta dalle sole immagini satellitari, pur con le limitazioni connesse alla minore capacità di riconoscere i canali di dimensioni più ridotte.

4.4 Confronto tra casi vegetati e non vegetati

Al fine di valutare l'eventuale influenza della copertura vegetale sull'organizzazione spaziale dei canali, i casi studio sono stati suddivisi in sistemi vegetati e non vegetati. Il confronto è stato effettuato per entrambe le metriche analizzate, ossia la distanza d_b dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale e l'interasse tra canali successivi. Le distribuzioni cumulative sono state successivamente confrontate distinguendo i casi studio in funzione della presenza o meno della vegetazione. Le Figure 4.11 e 4.12 riportano le corrispondenti distribuzioni cumulative, rappresentate mediante diagrammi con assi in scala logaritmica.

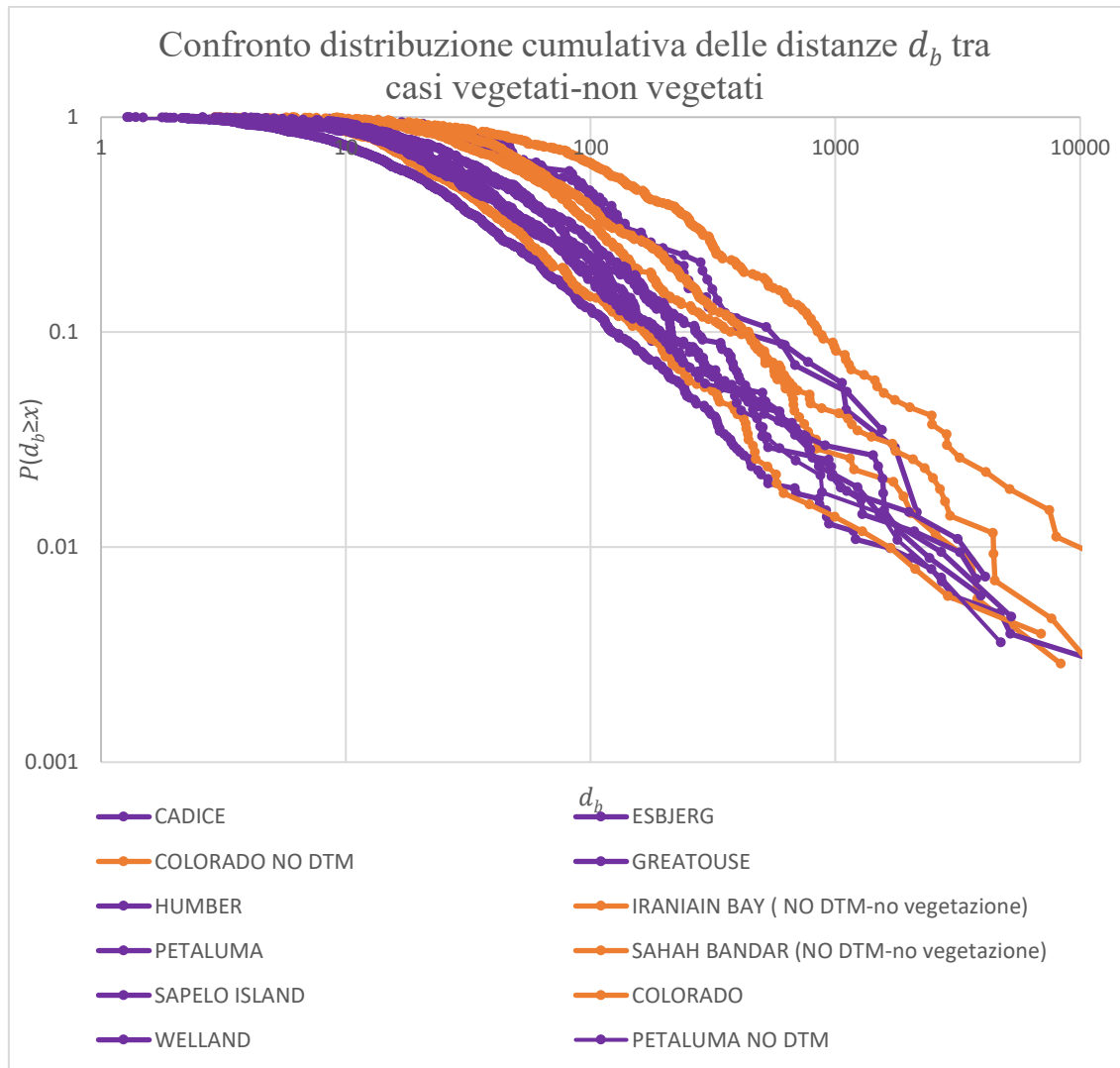


Figura 4.11 Confronto tra le distribuzioni cumulative della distanza d_b dei dodici casi studio, suddivisi in funzione della presenza in viola o dell'assenza di vegetazione in colore arancione.

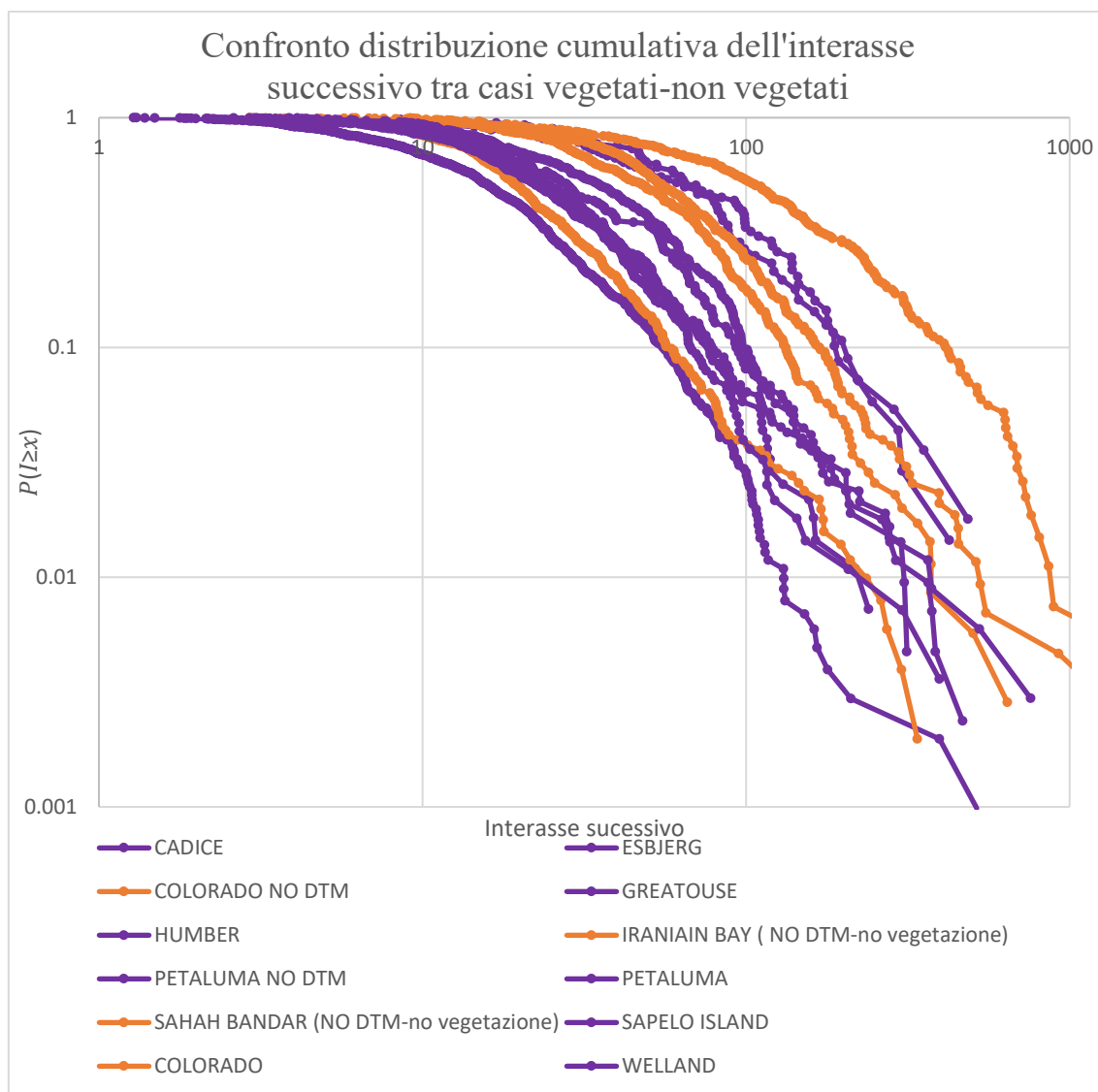


Figura 4.12 Confronto tra le distribuzioni cumulative dell'interasse successivo dei dodici casi studio, suddivisi in funzione della presenza in viola o dell'assenza di vegetazione in colore arancione.

Per entrambe le metriche considerate, le distribuzioni relative ai casi vegetati e non vegetati mostrano un'ampia sovrapposizione lungo gran parte dell'intervallo analizzato. Non emerge una netta separazione tra le due categorie né una variazione sistematica della forma generale delle curve. Le differenze osservabili tra i singoli casi risultano infatti maggiori di quelle riconducibili alla presenza o all'assenza di vegetazione.

Nel complesso, il confronto non evidenzia differenze sistematiche nelle proprietà statistiche delle distribuzioni associate alla copertura vegetale, suggerendo che, per i casi studio considerati, la presenza (o l'assenza) della vegetazione non consente di distinguere in modo chiaro gruppi caratterizzati da differenti modalità di spaziatura dei canali.

4.5 Confronto tra casi distinti per tidal range

Per valutare l'eventuale influenza del regime tidale sull'organizzazione spaziale dei canali, i casi analizzati sono stati suddivisi nelle tre classi adottate in letteratura: ambienti microtidali (con tidal range < 2 m), mesotidali (tidal range tra 2 e 4 m) e macrotidali (tidal range > 4 m). Le Figure 4.13 e 4.14 riportano le distribuzioni cumulative della distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale d_b e l'interasse tra canali successivi per i dodici casi studio, raggruppati secondo tali classi. Le corrispondenti distribuzioni cumulative sono rappresentate mediante diagrammi con assi in scala logaritmica.

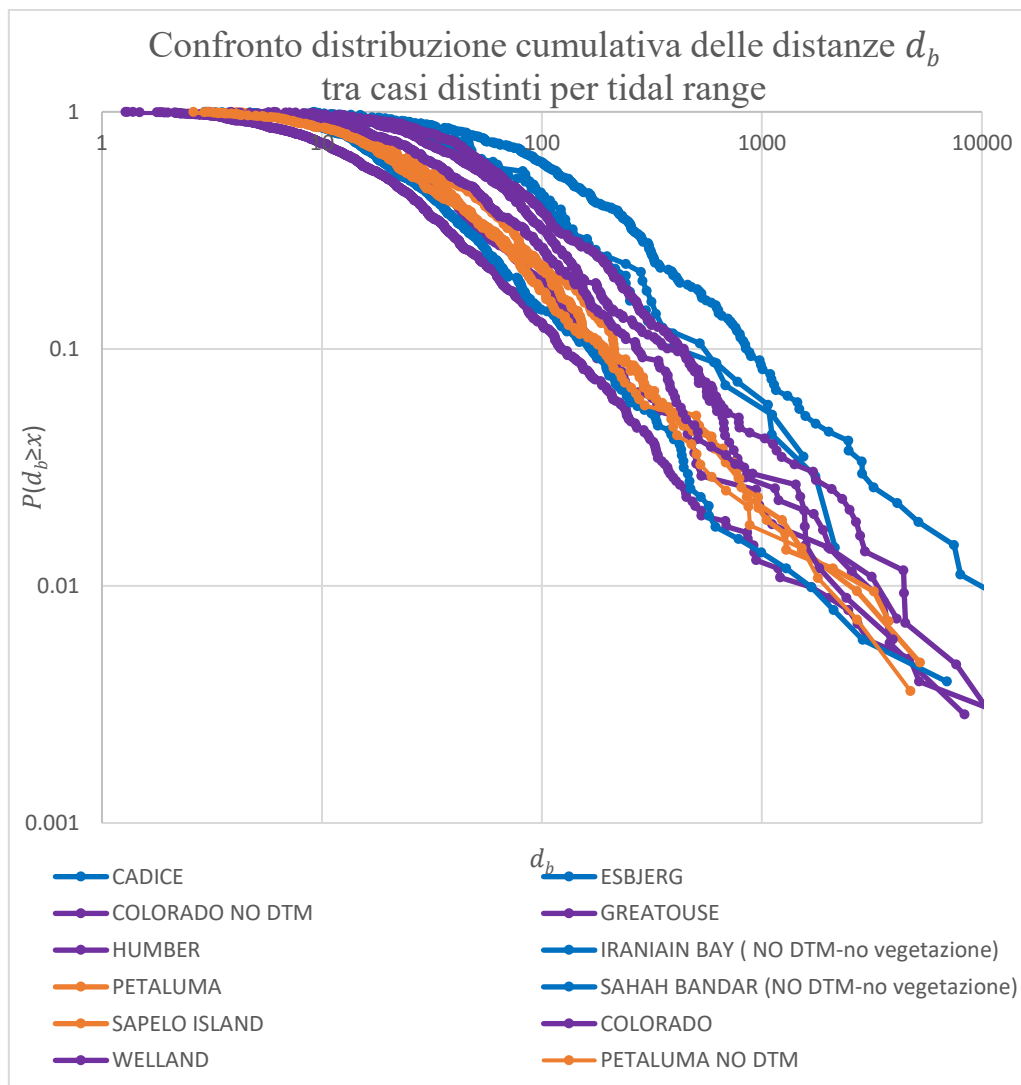


Figura 4.13 Confronto tra le distribuzioni cumulative della distanza d_b dei dodici casi studio, raggruppati in funzione del regime tidale microtidale in arancio, mesotidale in blu e macrotidale in viola.

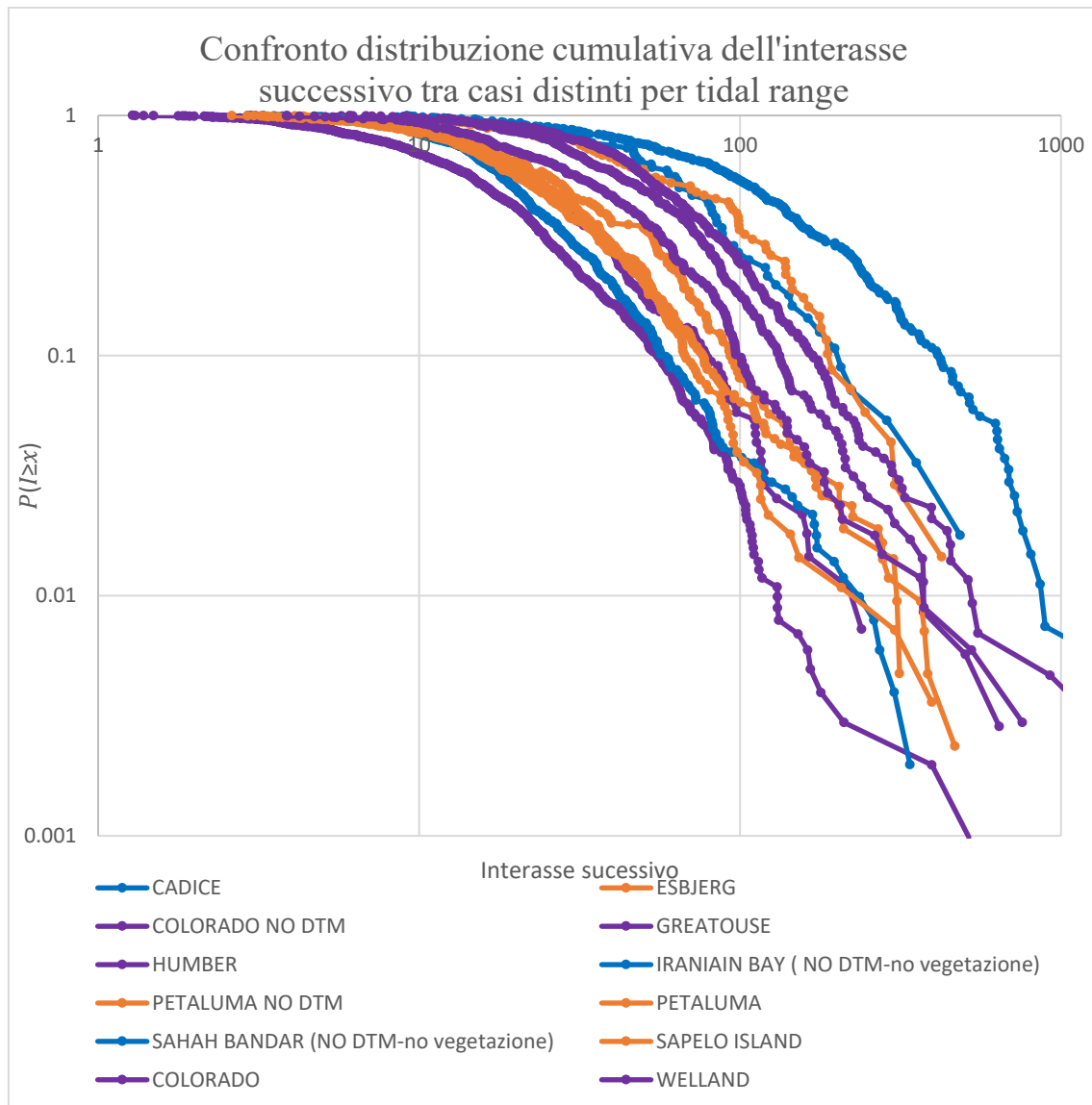


Figura 4.14 Confronto tra le distribuzioni cumulative dell'interasse successivo dei dodici casi studio, raggruppati in funzione del regime tidale microtidale in arancio, mesotidale in blu e macrotidale in viola.

Per entrambe le metriche, le distribuzioni relative ai sistemi microtidali, mesotidali e macrotidali mostrano un'ampia sovrapposizione lungo gran parte dell'intervallo analizzato. Non emerge, quindi, una separazione netta tra le tre classi né una variazione sistematica della forma o della pendenza delle curve al variare del tidal range. La dispersione osservata all'interno di ciascuna classe risulta, inoltre, confrontabile con quella rilevata tra classi differenti.

Nel complesso, il confronto grafico non evidenzia differenze sistematiche nelle proprietà statistiche delle distribuzioni riconducibili al regime tidale. Per i casi studio considerati, il tidal range non consente quindi di distinguere con chiarezza gruppi caratterizzati da differenti modalità di spaziatura dei canali.

4.6 Confronto tra casi sviluppati in differenti contesti ambientali

Al fine di valutare l'eventuale influenza del contesto geomorfologico di formazione, sull'organizzazione spaziale dei canali, i casi studio sono stati suddivisi in sistemi sviluppati in ambienti di retrobarriera e sistemi sviluppati nelle aree marginali di contesti estuarini. Il confronto è stato effettuato per entrambe le metriche analizzate, ossia la distanza d_b dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale e l'interasse tra canali successivi.

Le Figure 4.15 e 4.16 riportano le distribuzioni cumulative della distanza d_b e degli interassi successivi per i dodici casi studio, raggruppati secondo tali tipologie ambientali. Le corrispondenti distribuzioni cumulative sono rappresentate mediante diagrammi con assi in scala logaritmica.

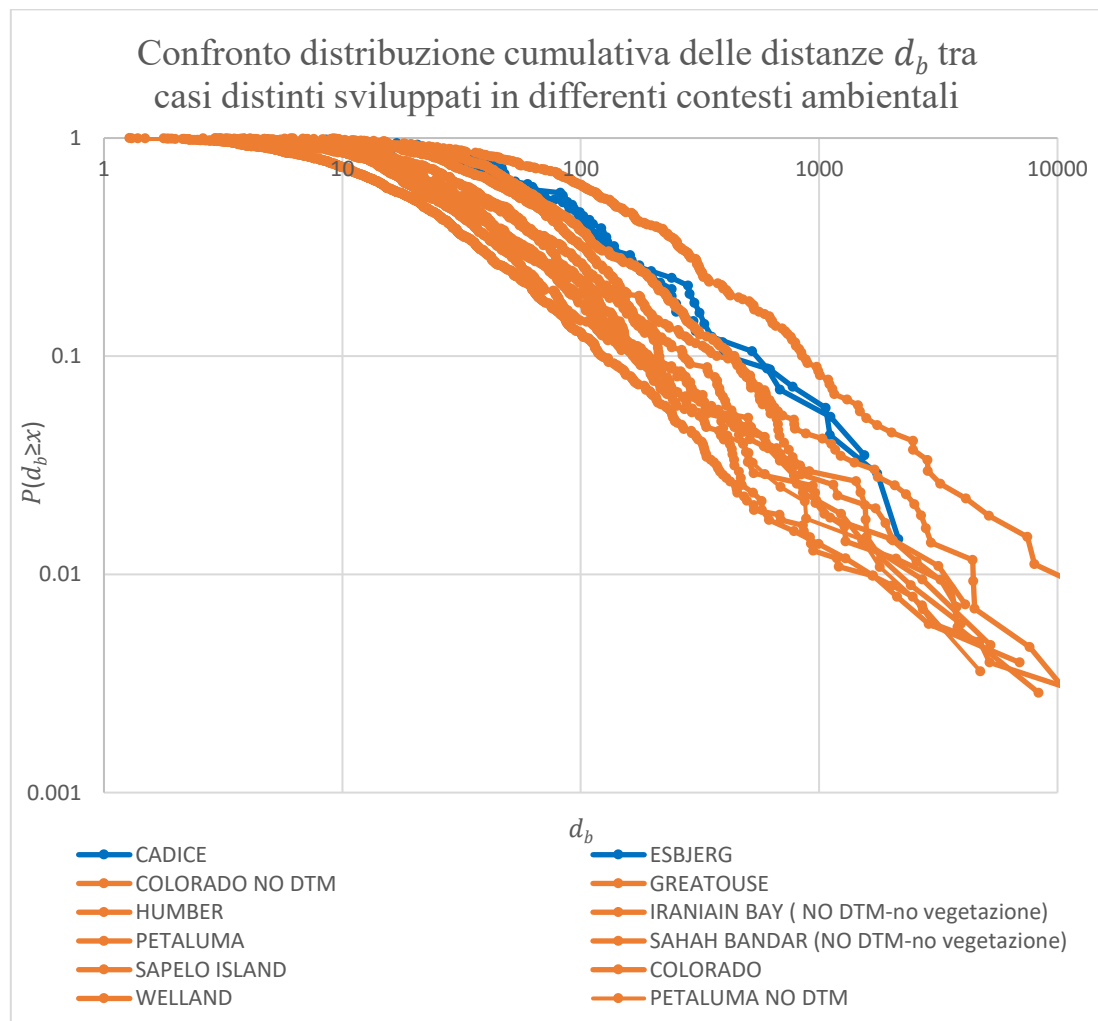


Figura 4.15 Confronto tra le distribuzioni cumulative della distanza d_b dei dodici casi studio, raggruppati in funzione del contesto geomorfologico di sviluppo della rete di canali: ambienti di retrobarriera in blu e aree marginali di contesti estuarini in colore arancione.

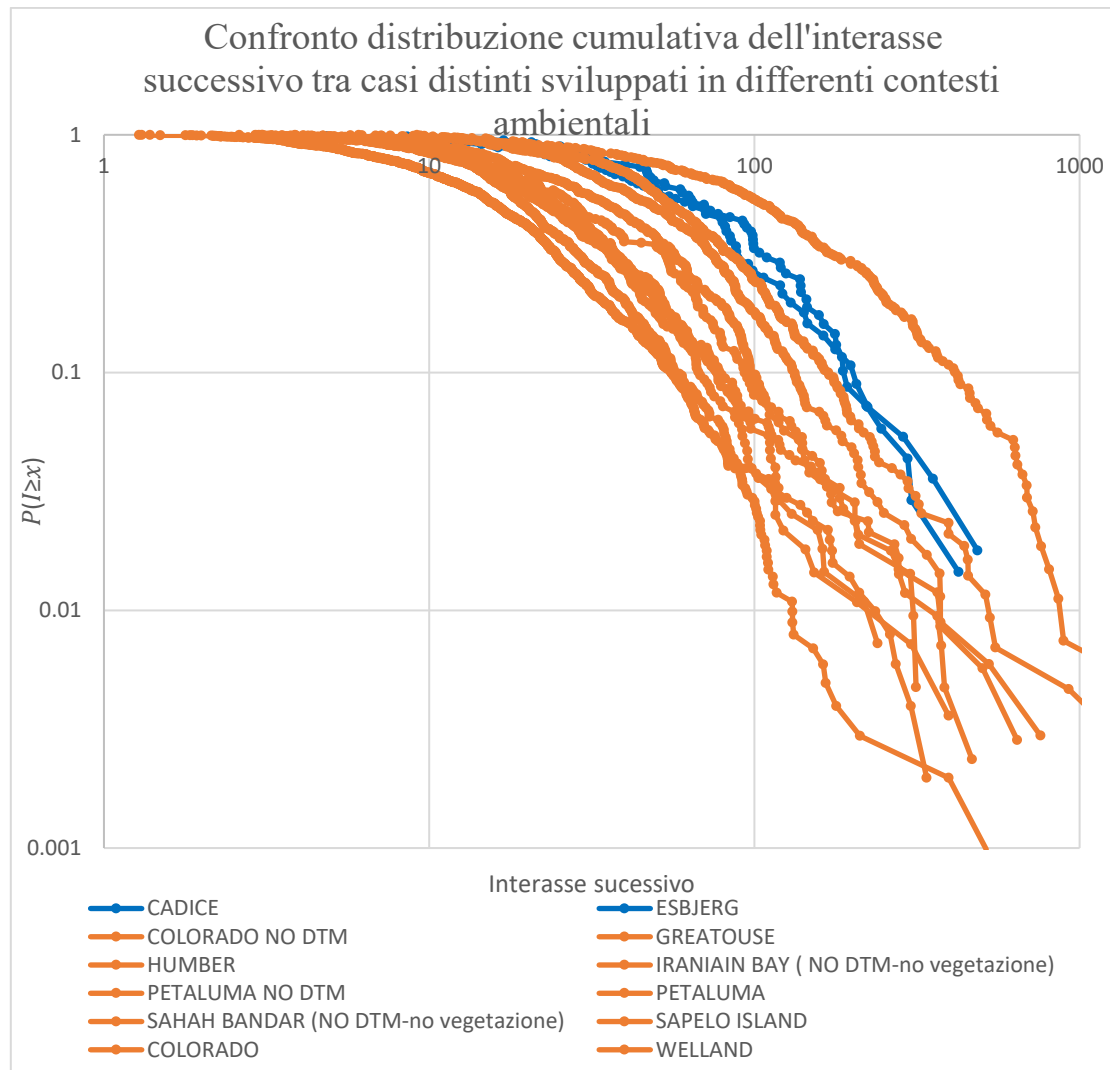


Figura 4.16 Confronto tra le distribuzioni cumulative dell'interasse successivo dei dodici casi studio, raggruppati in funzione del contesto geomorfologico di sviluppo della rete di canali: ambienti di retrobarriera in blu e aree marginali di contesti estuarini in colore arancione

Per entrambe le metriche considerate, le distribuzioni relative ai sistemi sviluppati in ambienti di retrobarriera e a quelli sviluppati nelle aree marginali di contesti estuarini mostrano un'ampia sovrapposizione lungo gran parte dell'intervallo analizzato. Non emerge una netta separazione tra le due tipologie ambientali né una variazione sistematica della forma generale delle curve. Le differenze osservabili tra i singoli casi risultano infatti maggiori di quelle riconducibili al contesto geomorfologico di sviluppo della rete. Nel complesso, il confronto non evidenzia differenze sistematiche nelle proprietà statistiche delle distribuzioni associate alla tipologia ambientale. Per i casi studio considerati, il contesto geomorfologico di sviluppo della rete non consente quindi di distinguere con chiarezza gruppi caratterizzati da differenti modalità di spaziatura dei canali.

4.7 Analisi dell'intera rete di drenaggio

Al fine di verificare la possibilità di estendere l'analisi dall'approccio basato su una singola linea di campionamento all'intera rete di drenaggio, il codice MATLAB descritto nel capitolo 3.9 è stato applicato al caso studio di Sapelo Island. L'analisi ha considerato due metriche spaziali: la distanza tra baricentri di segmenti aventi larghezza uguale o maggiore e la distanza misurata lungo lo skeleton fino al primo punto caratterizzato da larghezza maggiore o uguale.

Per entrambe le metriche sono state costruite le distribuzioni cumulative, successivamente analizzate mediante la stessa procedura statistica adottata per le variabili d_b e interasse successivo. Le Figure 4.17 e 4.18 riportano le distribuzioni ottenute dopo l'applicazione del valore di x_{min} e la trasformazione logaritmica dei dati, mentre la Tabella 4.7 confronta i parametri delle regressioni lineari con quelli derivanti dall'analisi effettuata lungo la linea di campionamento.

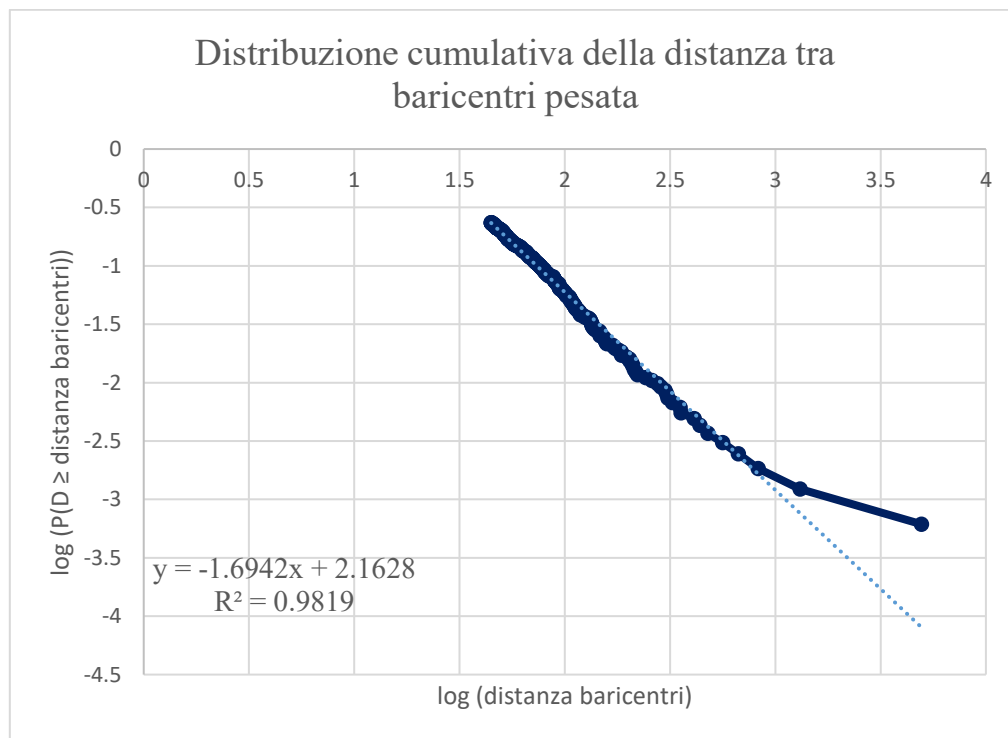


Figura 4.17 Distribuzione cumulativa della distanza tra i baricentri di segmenti aventi larghezza simile o maggiore per il caso studio di Sapelo Island, rappresentata dopo l'applicazione del valore di x_{min} di 1.65

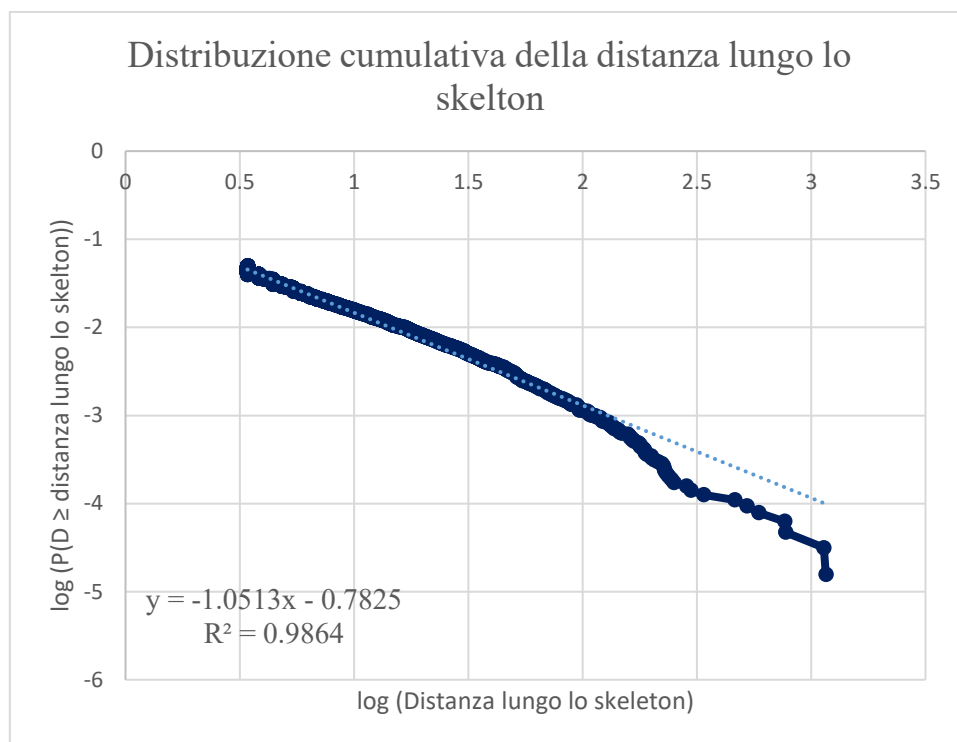


Figura 4.18 Distribuzione cumulativa della distanza lungo lo skeleton verso il primo punto appartenente a un canale avente larghezza maggiore o uguale, per il caso studio di Sapelo Island, rappresentata dopo l'applicazione del valore di x_{min} di 0.53

Tabella 4.7 Confronto tra i parametri delle regressioni ottenuti mediante l'analisi lungo la linea di campionamento e mediante il nuovo approccio applicato all'intera rete di canali per il caso studio di Sapelo Island.

SAPELO ISLAND						
Metrica	Dominio di analisi	Slope	Intercetta	R ²	x_min (log10)	x_min
Interasse	Linea di costa	-1.4395	1.7157	0.9803	1.2175	16.5
d_b	Linea di costa	-0.8436	0.959	0.9892	1.1589	14.42
Distanza baricentri pesata	Intera rete	-1.6942	2.1628	0.9819	1.6503	44.7
Distanza lungo skeleton	Intera rete	-1.0513	-0.7825	0.9864	0.5333	3.41

Entrambe le distribuzioni mostrano una deviazione dalla linearità per i valori più bassi della variabile e una porzione di coda tendenzialmente lineare in un diagramma log-log. A partire dai rispettivi valori di x_{min} , le regressioni lineari sono caratterizzate da elevati

valori del coefficiente di determinazione, indicando una buona compatibilità delle code con un andamento di tipo power law.

Dal confronto con le distribuzioni ottenute mediante singola linea di campionamento emergono analogie nella forma generale delle curve e nell'andamento lineare delle rispettive porzioni di coda. Le pendenze non risultano coincidenti, poiché le nuove metriche descrivono relazioni spaziali differenti e utilizzano l'intera struttura ramificata della rete, anziché una sequenza unidimensionale di canali lungo un singolo transetto.

5. DISCUSSIONE

L'obiettivo del presente lavoro era verificare se la distribuzione spaziale dei canali a marea paralleli potesse essere descritta con relazioni statistiche comuni, indipendentemente dalle differenti condizioni ambientali in cui le reti si sviluppano. A tale scopo sono stati analizzati dieci casi studio distribuiti a scala globale, caratterizzati da differenti regimi di marea, contesti geomorfologici e condizioni di vegetazione, confrontando sia la distribuzione della distanza dal canale più vicino avente larghezza maggiore o uguale (d_b) sia quella degli interassi successivi. Per due dei casi studio (Colorado River Delta e Petaluma Bay) l'analisi è stata inoltre ripetuta utilizzando sia il DTM sia la sola immagine satellitare, al fine di valutare l'influenza del dato di partenza sui risultati ottenuti.

L'analisi preliminare delle distribuzioni cumulative rappresentate mediante diagrammi con assi in scala logaritmica ha evidenziato come la metrica d_b presenti, già ad una prima osservazione, un comportamento molto simile nei diversi casi studio. Le distribuzioni mostrano infatti pendenze confrontabili lungo gran parte della loro estensione, suggerendo l'esistenza di un'organizzazione spaziale ricorrente, indipendentemente dalle differenti caratteristiche ambientali considerate. Al contrario, le distribuzioni degli interassi successivi risultano caratterizzate da una maggiore dispersione, rendendo necessario ricorrere a un'ulteriore verifica statistica. Per tale motivo, oltre alla regressione lineare per gli interassi, è stata eseguita un'analisi di log-likelihood finalizzata a confrontare quantitativamente il modello power law con una distribuzione esponenziale, così da valutare quale dei due descrivesse in maniera più appropriata il comportamento osservato.

L'individuazione del valore di x_{min} ha consentito di selezionare, per ciascun caso studio, la porzione di distribuzione caratterizzata da un andamento pressoché lineare nei diagrammi log-log, sulla quale è stata successivamente eseguita la regressione lineare. Per la variabile d_b , i risultati ottenuti confermano quanto già osservato dall'analisi preliminare delle distribuzioni cumulative. I coefficienti angolari risultano infatti molto simili nei diversi casi studio, mentre gli elevati valori del coefficiente di determinazione (R^2) indicano che il modello lineare descrive efficacemente i dati trasformati in scala logaritmica. Tali risultati suggeriscono che la distribuzione della distanza dal canale più

vicino avente larghezza maggiore o uguale sia compatibile con un comportamento di tipo power law nella porzione di coda della distribuzione analizzata.

Per gli interassi successivi, invece, la maggiore dispersione osservata nelle distribuzioni ha reso necessario un ulteriore approfondimento mediante analisi di log-likelihood. I risultati ottenuti confermano tale interpretazione: in dieci delle dodici distribuzioni analizzate il confronto tra il modello power law e quello esponenziale risulta infatti favorevole alla legge di potenza, mentre solo per i casi di Great Ouse e Skallingen risulta debolmente favorevole alla legge esponenziale. Considerata la ridotta differenza tra i due modelli (circa 0.3 in entrambi i casi studio), tale risultato potrebbe riflettere una reale differenza statistica oppure essere influenzato dalla procedura di campionamento adottata, basata sulla digitalizzazione dei canali lungo una singola linea di costa, che potrebbe introdurre una maggiore variabilità nella distribuzione degli interassi. Nel complesso, il confronto tra i modelli evidenzia una chiara prevalenza della legge di potenza. Un ulteriore elemento a supporto di tale interpretazione è rappresentato dai valori dell'esponente α , stimati mediante l'analisi di massima verosimiglianza. L'esponente α , che rappresenta il parametro caratteristico della legge di potenza e ne descrive la pendenza, assume valori compresi tra circa 2.5 e 3.5 per tutti i casi studio analizzati, evidenziando una certa uniformità tra i diversi casi studio, rafforzando dunque l'ipotesi che anche la distribuzione degli interassi successivi sia compatibile con un comportamento di tipo power law nella porzione di coda della distribuzione analizzata.

La presenza di distribuzioni statistiche analoghe in sistemi caratterizzati da differenti condizioni ambientali suggerisce che l'organizzazione spaziale dei canali a marea paralleli non sia il risultato di processi casuali, ma dell'azione di meccanismi morfodinamici comuni.

Tuttavia, per interpretare correttamente questo risultato è importante sottolineare che le due metriche analizzate non descrivono esattamente lo stesso aspetto dell'organizzazione spaziale della rete. L'interasse successivo misura la distanza locale tra outlet consecutivi lungo il margine della wetland e fornisce quindi un'indicazione della densità locale dei canali. In questo senso, esso è una metrica strettamente legata alla densità di drenaggio e alla complessità planimetrica della rete, proprietà che negli ambienti tidali sono generalmente considerate fortemente sito-specifiche. Studi precedenti hanno infatti mostrato come la densità di drenaggio, il grado di ramificazione, la sinuosità e la

complessità morfologica delle reti di canali a marea possano variare in funzione delle condizioni idrodinamiche, della disponibilità sedimentaria, della vegetazione, della coesione del substrato, della morfologia del margine e della storia evolutiva del sistema (D'Alpaos et al., 2005; Marani et al., 2003; Rinaldo et al., 1999a,b; Kearney & Fagherazzi, 2016; Xu et al., 2024; van de Vijssel et al., 2023). Tali proprietà, pertanto, non sono generalmente interpretate come invarianti di scala, bensì come il risultato della risposta locale della rete alle specifiche condizioni ambientali di ciascun sito.

La distanza d_b , invece, assume un significato geomorfologico diverso e potenzialmente più informativo. Essa non misura semplicemente la distanza tra canali vicini, ma la distanza necessaria per incontrare un canale di larghezza uguale o maggiore rispetto a quello considerato. Questa metrica combina quindi posizione spaziale e dimensione del canale, e può essere interpretata come un indicatore del grado di gerarchizzazione spaziale della rete. In altri termini, d_b non descrive soltanto quanto siano ravvicinati gli outlet, ma come canali di rango comparabile o superiore siano distribuiti nello spazio.

Il risultato più rilevante del presente lavoro non è quindi soltanto la compatibilità delle distribuzioni con una legge di potenza, ma il fatto che tale comportamento emerga in modo particolarmente chiaro per una metrica d_b , che incorpora esplicitamente l'informazione dimensionale dei canali. La maggiore somiglianza tra le distribuzioni della variabile d_b nei diversi casi studio suggerisce che l'accoppiamento tra dimensione e spaziatura dei canali possa rappresentare una proprietà più robusta rispetto alla semplice distanza tra outlet consecutivi. In questa prospettiva, la legge di potenza può riflettere una struttura gerarchica, potenzialmente invariante di scala: canali piccoli o di rango locale tendono a essere più frequenti e ravvicinati, mentre canali di dimensione maggiore, o comunque comparabile tra loro, risultano più rari e più distanziati secondo una relazione di scala simile tra sistemi diversi.

Questo aspetto rappresenta un elemento di particolare interesse, poiché suggerisce la possibile esistenza di una proprietà organizzativa comune in reti tidali che, per molte altre metriche geometriche e morfologiche, sono state generalmente descritte come fortemente dipendenti dalle condizioni locali. La semplice spaziatura tra canali può quindi essere interpretata soprattutto come una misura della densità locale degli outlet, mentre la distanza verso canali di dimensione uguale o maggiore sembra rivelare una struttura

gerarchica comune, nella quale dimensione e separazione spaziale dei canali risultano accoppiate.

Tale interpretazione risulta coerente con quanto proposto da Perron et al. (2008) per i sistemi fluviali, nei quali la spaziatura delle incisioni può emergere da processi di competizione per una risorsa spaziale limitata. In modo analogo, anche nei sistemi tidali le incisioni vicine possono competere tra loro per intercettare porzioni adiacenti della superficie drenata, influenzando reciprocamente la propria crescita. I canali che riescono a convogliare flussi maggiori tendono ad approfondirsi, secondo i meccanismi di retroazione positiva descritti nell'Introduzione, e a propagarsi più rapidamente, riducendo al contempo l'area e la portata disponibili per quelli adiacenti. Questo processo può favorire la crescita selettiva di alcuni canali e l'inibizione o la scomparsa di altri, conducendo progressivamente a configurazioni spaziali organizzate. La competizione morfodinamica tra incisioni, quindi, non produce necessariamente soltanto una spaziatura locale più o meno regolare, ma può contribuire alla formazione di una vera e propria gerarchia spaziale, nella quale la distanza tra elementi della rete aumenta con il rango o la dimensione dei canali. La ricorrenza di distribuzioni statistiche simili tra casi studio differenti risulta pertanto coerente con l'azione di meccanismi comuni di auto-organizzazione. Un meccanismo analogo, riferito ai sistemi a marea, è descritto dal modello di Toffolon e Todeschini (2006), in cui ciascun canale drena una propria area di competenza e la sua evoluzione morfodinamica dipende dalla quantità di flusso che riesce a catturare. Una variazione della profondità di un canale modifica la distribuzione delle portate e può quindi influenzare la crescita dei canali adiacenti, secondo un meccanismo di competizione per l'area drenata e per i flussi ad essa associati. Tale interazione dipende anche dalla distanza reciproca: canali sufficientemente distanti tendono a evolvere in modo sostanzialmente indipendente, mentre canali più ravvicinati competono per il drenaggio della stessa porzione di superficie intertidale. Questi processi possono favorire l'approfondimento e la crescita di alcuni canali e l'inibizione o il progressivo interrimento di altri, contribuendo alla selezione morfodinamica della loro spaziatura. I risultati ottenuti nel presente lavoro suggeriscono che tale selezione possa riguardare non solo la distanza tra canali adiacenti, ma anche l'organizzazione gerarchica dei canali in funzione della loro dimensione.

I modelli proposti da Perron et al. (2008) e da Toffolon e Todeschini (2006), pur riferendosi a sistemi e processi differenti, evidenziano quindi un principio comune: l'organizzazione spaziale delle reti di drenaggio può emergere dalla competizione tra incisioni adiacenti per l'acquisizione dei flussi e delle superfici drenate. I processi fisici responsabili dello sviluppo delle reti tidali sono differenti da quelli che governano i sistemi fluviali; in questi la formazione della rete di drenaggio è prevalentemente controllata dall'erosione gravitativa e dall'evoluzione dei bacini idrografici (Perron et al., 2008), mentre nei sistemi tidali interviene l'azione delle correnti di marea (entrante e uscente), il trasporto e la deposizione dei sedimenti, la presenza o meno della vegetazione e i continui feedback tra idrodinamica e morfologia (D'Alpaos et al., 2005; Rinaldo et al., 2004; Geng et al., 2021). Nonostante le differenze nei processi che governano l'evoluzione dei due sistemi, entrambe le tipologie di reticolo presentano configurazioni spaziali caratterizzate da proprietà statistiche confrontabili, suggerendo che i meccanismi di auto-organizzazione possano rappresentare un principio comune nell'evoluzione dei sistemi di drenaggio dei canali a marea e fluviali.

Nel complesso, i risultati ottenuti suggeriscono che l'organizzazione spaziale dei canali a marea possa essere interpretata come il risultato di processi di auto-organizzazione analoghi a quelli osservati in altri sistemi di drenaggio naturali. La sostanziale uniformità dei coefficienti angolari ottenuti e la compatibilità delle distribuzioni con una legge di potenza indicano che la disposizione spaziale dei canali non sia casuale, ma rifletta l'azione di meccanismi morfodinamici comuni. Il contributo più originale del presente lavoro consiste tuttavia nell'aver individuato una possibile proprietà di scala non semplicemente nella densità o nella spaziatura locale dei canali, ma nella relazione tra dimensione e separazione spaziale degli elementi della rete.

Prima di analizzare il possibile ruolo esercitato dalle differenti caratteristiche ambientali, risulta opportuno valutare l'influenza della metodologia adottata per l'estrazione della rete di canali, verificando se l'utilizzo del DTM o della sola immagine satellitare come base per l'estrazione dei dati, possa modificare le distribuzioni statistiche ottenute.

Il confronto tra le distribuzioni ottenute mediante DTM e quelle ricavate dalla sola immagine satellitare ha evidenziato differenze molto contenute, con variazioni della pendenza inferiori al 3% per entrambe le variabili analizzate. Tale risultato suggerisce che, almeno per i due casi studio analizzati (Petaluma Bay e Colorado River), la tipologia

di dato utilizzata per l'estrazione della rete di canali eserciti un'influenza limitata sulle proprietà statistiche delle distribuzioni ottenute. La sostanziale sovrapposizione delle curve e la ridotta differenza dei coefficienti angolari indicano che la metodologia adottata risulta sufficientemente robusta da fornire risultati confrontabili anche in assenza di un modello digitale del terreno. Questo, rappresenta un aspetto di particolare interesse, poiché amplia le potenziali applicazioni della metodologia anche in aree dove non siano disponibili DTM ad alta risoluzione, ma soltanto immagini satellitari per l'estrazione della rete di canali.

Il confronto tra i casi vegetati e non vegetati non evidenzia differenze apprezzabili nelle distribuzioni statistiche ottenute. Le curve cumulative mostrano infatti un comportamento sostanzialmente analogo, senza variazioni significative delle pendenze delle distribuzioni né della forma generale delle curve. Tale risultato suggerisce che, nei casi analizzati, la presenza della vegetazione non determini differenze evidenti nell'organizzazione spaziale dei canali paralleli analizzati. Questo risultato potrebbe apparire, almeno in parte, inatteso, poiché numerosi studi attribuiscono alla vegetazione un ruolo fondamentale nell'evoluzione degli ambienti intertidali. Il ruolo della vegetazione deve tuttavia essere interpretato all'interno del più ampio spettro di processi che, operando su scale spaziali e temporali sovrapposte, contribuiscono mediante feedback ecomorfodinamici alla modellazione delle strutture osservate (D'Alpaos et al., 2005; Temmerman et al., 2007; Geng et al., 2021). La colonizzazione da parte della vegetazione, infatti, modifica localmente la resistenza al moto, favorisce la deposizione dei sedimenti e aumenta la stabilità delle superfici e delle sponde. Le conseguenti modificazioni morfologiche alterano, a loro volta, la distribuzione dei flussi e il successivo sviluppo della rete. Tali interazioni possono quindi condizionare la forma, la profondità e la sinuosità dei canali senza necessariamente determinare una diversa distribuzione delle distanze tra canali stessi.

I risultati del presente lavoro suggeriscono che tali processi influenzino quindi prevalentemente la geometria locale dei canali e l'evoluzione delle superfici intertidali, piuttosto che la distribuzione spaziale dei canali paralleli a scala di rete. L'assenza di differenze evidenti tra casi vegetati e non vegetati è pertanto compatibile con l'ipotesi che la spaziatura principale venga selezionata durante le fasi iniziali di formazione della rete e sia successivamente preservata o modificata solo localmente dalla vegetazione. Questa

interpretazione è coerente con studi che indicano come l'impianto principale della rete possa definirsi durante una fase iniziale di rapida incisione, mentre la successiva colonizzazione vegetale contribuisce soprattutto alla stabilizzazione delle superfici e delle sponde e al rimodellamento locale dei canali (D'Alpaos et al., 2005, 2007).

Il confronto tra i casi studio distinti in funzione del regime tidale non evidenzia una separazione netta tra le distribuzioni dei sistemi microtidali, mesotidali e macrotidali. Le curve cumulative ottenute mostrano un'elevata sovrapposizione tra le diverse classi, senza evidenziare variazioni sistematiche dei coefficienti angolari tali da suggerire un controllo diretto del tidal range sull'organizzazione spaziale dei canali paralleli. Tale risultato non è del tutto inatteso. Nel Capitolo 1.2 è stato evidenziato come Zhou et al. (2024) abbiano mostrato che il tidal range esercita un ruolo importante nella formazione dei sistemi di canali paralleli, influenzandone principalmente l'orientazione e la geometria. In particolare, tidal range maggiori favoriscono pattern maggiormente obliqui e caratterizzati da una più elevata variabilità morfologica, mentre valori inferiori tendono a produrre canali più prossimi alla perpendicolarità rispetto alla linea di costa.

Anche nei casi studio analizzati nel presente lavoro, i canali paralleli appaiono generalmente orientati secondo direzioni prossime all'ortogonalità rispetto alla linea di costa o al canale principale, con angoli di intersezione spesso vicini a 90° . Tale osservazione, pur essendo di natura qualitativa e non derivando da una misura sistematica degli angoli, risulta coerente con il quadro interpretativo proposto da Zhou et al. (2024). I risultati del presente lavoro suggeriscono tuttavia che gli effetti del tidal range descritti da Zhou et al. (2024) non si traducano necessariamente in variazioni dell'organizzazione statistica della rete. È quindi plausibile che il regime di marea influenzi prevalentemente la geometria locale dei canali, la loro orientazione e le dimensioni delle incisioni, senza modificare in maniera sostanziale i meccanismi che regolano l'organizzazione spaziale delle reti di canale a marea.

Il confronto tra i casi studio sviluppati in contesti di retrobarriera e quelli localizzati lungo i margini dei principali sistemi estuarini non evidenzia differenze sostanziali nelle distribuzioni ottenute. Le curve cumulative mostrano infatti un comportamento confrontabile tra le due categorie, senza differenze tali da suggerire un controllo diretto del contesto ambientale di formazione sull'organizzazione spaziale dei canali paralleli. Tale risultato è coerente solo in parte con quanto riportato in letteratura. I contesti

geomorfologici analizzati sono caratterizzati da differenti condizioni idrodinamiche e sedimentarie, che influenzano i processi di formazione ed evoluzione delle reti di canali a marea. I sistemi di retrobarriera risultano generalmente più protetti dall'azione del moto ondoso e sono dominati da una circolazione prevalentemente controllata dalle correnti di marea. Al contrario, i sistemi sviluppati lungo i margini estuarini risentono dell'interazione tra propagazione della marea e apporti fluviali, con conseguenti differenze nei processi di trasporto e deposizione dei sedimenti e nell'evoluzione morfologica delle superfici intertidali (de Swart & Zimmerman, 2009; Dalrymple et al., 2012). I risultati del presente lavoro suggeriscono tuttavia che tali differenze non si traducano necessariamente in variazioni dell'organizzazione statistica della rete di canali; è plausibile che il contesto geomorfologico influenzi prevalentemente l'evoluzione morfologica locale e le caratteristiche geometriche dei canali, senza modificare in maniera sostanziale i meccanismi che regolano la loro distribuzione spaziale.

L'insieme dei risultati ottenuti mostra come le differenti condizioni considerate, comprendenti la vegetazione, il regime tidale e il contesto geomorfologico di formazione, non determinino variazioni sostanziali nelle proprietà statistiche delle distribuzioni analizzate. Sebbene ciascuno di questi fattori influenzi aspetti specifici della morfologia dei canali, tra cui: la geometria locale, l'orientazione e l'evoluzione delle superfici intertidali, tali effetti non sembrano modificarne l'organizzazione spaziale complessiva della rete. I risultati ottenuti suggeriscono pertanto che l'organizzazione spaziale e, in particolare, l'accoppiamento tra dimensione e separazione dei canali siano governati da processi morfodinamici più generali, riconducibili a meccanismi di auto-organizzazione comuni.

Oltre alle analisi condotte mediante la digitalizzazione dei canali lungo una linea di campionamento, il presente lavoro ha consentito di valutare in modo preliminare un nuovo approccio di campionamento basato sull'analisi dell'intera rete di drenaggio. L'applicazione del codice MATLAB, basato sull'intera rete permette di descrivere l'organizzazione spaziale del sistema utilizzando informazioni che non possono essere ricavate mediante una singola linea di campionamento. Il codice, applicato al caso studio di Sapelo Island, ha permesso di confrontare le distribuzioni ottenute dalle due nuove metriche (distanza tra baricentri di segmenti aventi larghezza uguale o maggiore e alla distanza lungo lo skeleton verso il primo punto con larghezza maggiore o uguale) con

quelle ricavate dalla metodologia tradizionale (d_b e interasse successivo), al fine di verificarne la coerenza statistica.

Analogamente a quanto osservato per la distribuzione della distanza d_b e degli interassi successivi, anche le due metriche ottenute dall'analisi dell'intera rete mostrano una porzione di distribuzione compatibile con un comportamento di tipo power law a partire dal valore di x_{min} selezionato. Gli elevati valori del coefficiente di determinazione (R^2) indicano infatti che la regressione lineare descrive efficacemente i dati trasformati in scala logaritmica, suggerendo che anche le nuove variabili estratte dal codice riflettano proprietà statistiche analoghe a quelle osservate mediante l'approccio basato sulla linea di campionamento.

Sebbene l'analisi sia stata applicata, nel presente lavoro, esclusivamente al caso studio di Sapelo Island, i risultati ottenuti suggeriscono che l'approccio basato sull'intera rete di drenaggio sia in grado di descrivere in maniera coerente l'organizzazione spaziale dei canali. Il fatto che distribuzioni invarianti di scala emergano anche considerando distanze definite nello spazio bidimensionale dell'intera rete suggerisce inoltre che il comportamento osservato non sia esclusivamente un effetto del campionamento lungo il margine della wetland, ma possa riflettere una proprietà più generale dell'organizzazione spaziale del network tidale. La sostanziale analogia tra i risultati ottenuti mediante le due differenti metodologie rappresenta un primo riscontro della validità del nuovo approccio, che potrà essere approfondito mediante l'applicazione ad un numero maggiore di casi studio.

6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il principale risultato del presente lavoro consiste nell'aver evidenziato che la distanza tra canali di dimensione comparabile o maggiore (d_b) mostra distribuzioni molto simili in sistemi tidali caratterizzati da differenti condizioni ambientali. Tale comportamento suggerisce l'esistenza di una possibile organizzazione gerarchica comune delle reti di canali a marea paralleli, che appare più robusta della semplice spaziatura tra outlet consecutivi, la quale descrive prevalentemente la densità locale di drenaggio. Le distribuzioni della metrica d_b e degli interassi successivi risultano infatti, nella maggior parte dei casi, compatibili con un comportamento di tipo power law nella porzione di coda delle distribuzioni. La sostanziale uniformità dei coefficienti angolari ottenuti, gli elevati valori del coefficiente di determinazione (R^2) e i risultati dell'analisi di log-likelihood suggeriscono che l'organizzazione spaziale dei canali a marea non sia il risultato di processi casuali, ma rifletta l'azione di meccanismi morfodinamici comuni.

I confronti effettuati tra i sistemi vegetati e non vegetati, i differenti regimi di marea e i differenti contesti ambientali di formazione hanno evidenziato come questi fattori, pur influenzando la geometria locale dei canali e l'evoluzione delle superfici intertidali, non determinino variazioni sostanziali nelle proprietà statistiche delle distribuzioni analizzate. Nel complesso, i risultati ottenuti suggeriscono che l'organizzazione spaziale dei canali e, in particolare, la relazione tra dimensione e separazione spaziale siano governate da processi di auto-organizzazione comuni ai differenti sistemi di canali a marea, analogamente a quanto proposto da Perron et al. (2008) per i sistemi fluviali, sebbene i processi fisici responsabili dell'evoluzione siano differenti.

Dal punto di vista metodologico, il confronto tra le analisi effettuate mediante DTM e quelle ricavate dalla sola immagine satellitare ha evidenziato differenze molto contenute, con variazioni inferiori al 3% dei coefficienti angolari. Tale risultato suggerisce che la metodologia sviluppata nel presente lavoro risulti relativamente poco sensibile al dato di partenza utilizzato per l'estrazione della rete di canali, consentendo di ottenere risultati confrontabili anche in aree dove non siano disponibili modelli digitali del terreno ad alta risoluzione, definendo quindi la possibilità di ampliare tale procedura di campionamento su più casi studio.

L'applicazione preliminare del nuovo codice MATLAB all'intera rete di drenaggio ha mostrato come sia possibile superare i limiti dell'approccio basato su una singola linea di

campionamento, consentendo di analizzare direttamente la geometria e l'organizzazione dell'intero network di canali. Sebbene il metodo sia stato applicato, nel presente lavoro, esclusivamente al caso studio di Sapelo Island, le nuove metriche estratte dall'intera rete hanno evidenziato proprietà statistiche coerenti con quelle ottenute mediante la metodologia tradizionale, rappresentando un primo riscontro della validità del nuovo approccio. L'estensione di tale approccio a tutti i casi studio consentirà di verificare se le distribuzioni osservate lungo i transetti siano effettivamente rappresentative dell'organizzazione bidimensionale dell'intera rete di drenaggio. In particolare, sarà possibile confrontare sistematicamente la distanza tra canali di larghezza comparabile, la distanza lungo lo skeleton e le metriche ottenute lungo il margine della piana tidale.

I risultati ottenuti costituiscono quindi una solida base per futuri sviluppi della metodologia proposta.

Un ulteriore sviluppo consisterà nell'estendere sistematicamente il confronto tra metriche di spaziatura locale e metriche gerarchiche basate sulla dimensione dei canali. Questo permetterà di chiarire se la legge di scala osservata sia associata principalmente alla distribuzione spaziale degli outlet oppure, più specificamente, all'accoppiamento tra distanza e rango dimensionale dei canali. Consentirà inoltre di descrivere in maniera più completa la geometria e la struttura delle reti di canali a marea, consentendo così di approfondire il ruolo esercitato da fattori quali la vegetazione, il regime di marea e il contesto geomorfologico sull'organizzazione spaziale delle reti tidali. In conclusione, il presente lavoro contribuisce ad approfondire le conoscenze sull'organizzazione spaziale dei canali a marea, evidenziando come reti sviluppate in differenti condizioni ambientali possano condividere una comune organizzazione gerarchica spaziale, descritta dalla relazione tra dimensione e separazione spaziale dei canali e riconducibile a principi comuni di auto-organizzazione. Parallelamente, lo sviluppo del nuovo approccio basato sull'analisi dell'intera rete di drenaggio apre prospettive promettenti per future ricerche, ponendo le basi per una descrizione più completa dei processi morfodinamici che governano l'evoluzione dei sistemi di canali a marea.

BIBLIOGRAFIA

Able Humber Ports Ltd. (2016). *Appendix UES9-3: Tidal Levels*. Able Marine Energy Park Development Consent Order.

Batool, H., He, Z., Kalhor, N. A., & Kong, X. (2025). Geospatial analysis of shoreline shifts in the Indus Delta using DSAS and satellite data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(10), 1986. <https://doi.org/10.3390/jmse13101986>

Chirol, C., Haigh, I. D., Pontee, N., Thompson, C. E., & Gallop, S. L. (2018). Parametrizing tidal creek morphology in mature saltmarshes using semi-automated extraction from lidar. *Remote Sensing of Environment*, 209, 291–311. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.012>

Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>

Coco, G., Zhou, Z., van Maanen, B., Olabarrieta, M., Tinoco, R., & Townend, I. (2013). Morphodynamics of tidal networks: Advances and challenges. *Marine Geology*, 346, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.08.005>

Convertino, M., Rigon, R., Maritan, A., Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (2007). Probabilistic structure of the distance between tributaries of given size in river networks. *Water Resources Research*, 43, W11418. <https://doi.org/10.1029/2007WR006176>

Curcio, A. C., Barbero, L., & Peralta, G. (2023). UAV-hyperspectral imaging to estimate species distribution in salt marshes: A case study in the Cadiz Bay (SW Spain). *Remote Sensing*, 15(5), 1419. <https://doi.org/10.3390/rs15051419>

Dalrymple, R. W., Mackay, D. A., Ichaso, A. A., & Choi, K. S. (2012). Processes, morphodynamics, and facies of tide-dominated estuaries. In R. A. Davis Jr. & R. W.

Dalrymple (Eds.), *Principles of tidal sedimentology* (pp. 79–107). Springer.

https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6_5

D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M., Fagherazzi, S., & Rinaldo, A. (2005). Tidal network ontogeny: Channel initiation and early development. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F2), F02001. <https://doi.org/10.1029/2004JF000182>

D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M., Bonometto, A., Cecconi, G., & Rinaldo, A. (2007). Spontaneous tidal network formation within a constructed salt marsh: Observations and morphodynamic modelling. *Geomorphology*, 91(3–4), 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.013>

de Swart, H. E., & Zimmerman, J. T. F. (2009). Morphodynamics of tidal inlet systems. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 41, 203–229. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.010908.165159>

Fagherazzi, S., & Sun, T. (2004). A stochastic model for the formation of channel networks in tidal marshes. *Geophysical Research Letters*, 31, L21503. <https://doi.org/10.1029/2004GL020965>

Finotello, A., Lanzoni, S., Ghinassi, M., Marani, M., Rinaldo, A., & D'Alpaos, A. (2018). Field migration rates of tidal meanders recapitulate fluvial morphodynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(7), 1463–1468. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711330115>

Geng, L., D'Alpaos, A., Sgarabotto, A., Gong, Z., & Lanzoni, S. (2021). Intertwined eco-morphodynamic evolution of salt marshes and emerging tidal channel networks. *Water Resources Research*, 57(11), e2021WR030840. <https://doi.org/10.1029/2021WR030840>

Hack, J. T., & Goodlett, J. C. (1960). *Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians*. U.S. Geological Survey Professional Paper 347.

Hughes, Z. J. (2012). Tidal Channels on Tidal Flats and Marshes. In R. A. Davis Jr. & R. W. Dalrymple (Eds.), *Principles of Tidal Sedimentology* (pp. 269–300). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6_11

Jänicke, L., Ebener, A., Dangendorf, S., Arns, A., Schindelegger, M., Niehüser, S., Haigh, I. D., Woodworth, P., & Jensen, J. (2021). Assessment of tidal range changes in the North Sea from 1958 to 2014. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016456. <https://doi.org/10.1029/2020JC016456>

Kearney, W. S., & Fagherazzi, S. (2016). Salt marsh vegetation promotes efficient tidal channel networks. *Nature Communications*, 7, 12287.
<https://doi.org/10.1038/ncomms12287>

Lavín, M. F., Godínez, V. M., & Álvarez, L. G. (1998). Inverse-estuarine features of the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(6), 769–795.

Loewenherz, D. S. (1991), Stability and the initiation of channelized surface drainage: A reassessment of the short wavelength limit, *J. Geophys. Res.*, 96(B5), 8453–8464, doi:[10.1029/90JB02704](https://doi.org/10.1029/90JB02704).

Long, S. (2020). *Investigating the Effects of Sea-Level Rise and Increasing Storm Intensity on Sapelo Island, Georgia* (Bachelor's thesis). Georgia College.

Marani, M., Belluco, E., D'Alpaos, A., Defina, A., Lanzoni, S., & Rinaldo, A. (2003). On the drainage density of tidal networks. *Water Resources Research*, 39(2), 1040.
<https://doi.org/10.1029/2001WR001051>

Mariotti, G., & Finotello, A. (2024). *A flow-curvature-based model for channel meandering in tidal marshes*. *Water Resources Research*, 60, e2023WR035747.
<https://doi.org/10.1029/2023WR035747>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2025). *Station 9415584 – Petaluma River Entrance, CA: Tides and Currents*. National Ocean Service.

Perron, J. T., Dietrich, W. E., & Kirchner, J. W. (2008). Controls on the spacing of first-order valleys. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F4), F04016.

Pokavanich, Tanuspong & Polikarpov, Igor & Lennox, Alan & Al-Hulail, Faisal & Al-Said, Turki & Al-Enezi, Eqbal & Al-Yamani, Faiza & Stokozov, Nikolai & Shuhaibar, Bassam. (2013). COMPREHENSIVE INVESTIGATION OF SUMMER HYDRODYNAMIC AND WATER QUALITY CHARACTERISTICS OF DESERTIC SHALLOW WATER BODY: KUWAIT BAY.

Rinaldo, A., Belluco, E., D'Alpaos, A., Feola, A., Lanzoni, S. and Marani, M. (2004). Tidal Networks: form and Function. In *The Ecogeomorphology of Tidal Marshes* (eds S. Fagherazzi, M. Marani and L.K. Blum). <https://doi.org/10.1029/CE059p0075>

Rinaldo, A., S. Fagherazzi, S. Lanzoni, M. Marani, and W. E. Dietrich (1999a), Tidal networks: 2. Watershed delineation and comparative network morphology, *Water Resour. Res.*, 35(12), 3905–3917, doi:[10.1029/1999WR900237](https://doi.org/10.1029/1999WR900237).

Rinaldo, A., S. Fagherazzi, S. Lanzoni, M. Marani, and W. E. Dietrich (1999b), Tidal networks: 3. Landscape-forming discharges and studies in empirical geomorphic relationships, *Water Resour. Res.*, 35(12), 3919–3929, doi:[10.1029/1999WR900238](https://doi.org/10.1029/1999WR900238).

Schwarz, C., van Rees, F., Xie, D. *et al.* Salt marshes create more extensive channel networks than mangroves. *Nat Commun* 13, 2017 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29654-1>

Smith, T. R., & Bretherton, F. P. (1972). Stability and the conservation of mass in drainage basin evolution. *Water Resources Research*, 8(6), 1506–1529. <https://doi.org/10.1029/WR008i006p01506>

Talling, P. J., Stewart, M. D., Stark, C. P., Gupta, S., & Vincent, S. J. (1997). Regular spacing of drainage outlets from linear fault blocks. *Basin Research*, 9(4), 275–302. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1997.00048.x>.

Temmerman, S., Bouma, T. J., van de Koppel, J., van der Wal, D., de Vries, M. B., & Herman, P. M. J. (2007). Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology*, 35(7), 631–634. <https://doi.org/10.1130/G23502A.1>

The Wash Estuary Strategy Group. (2010). *The Wash Shoreline Management Plan 2 (SMP2), Appendix C: Baseline Processes*.

Toffolon, M., & Todeschini, I. (2006). Channel competition in tidal flats. In G. Parker & M. García (Eds.), *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2005* (pp. 653–661). Taylor & Francis.

van de Vijssel, R.C., van Belzen, J., Bouma, T.J. *et al.* Vegetation controls on channel network complexity in coastal wetlands. *Nat Commun* 14, 7158 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42731-3>

Xu, F., Zhou, Z., Fagherazzi, S., D'Alpaos, A., Townend, I., Zhao, K., Xie, W., Guo, L., Wang, X., Peng, Z., Yang, Z., Chen, C., Cheng, G., Xu, Y., & He, Q. (2024). Anomalous scaling of branching tidal networks in global coastal wetlands and mudflats. *Nature Communications*, 15, 9700. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54154-9>

Zhou, Z., Wei, Y., Geng, L., Finotello, A., D'Alpaos, A., Zhang, Y., Gu, Y., Gong, Z., Xu, F., Zhang, C., & Coco, G. (2024). Cross-shore parallel tidal channel systems formed by alongshore currents. *Nature Communications*, 15, 4732. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49176-2>

RINGRAZIAMENTI

Un sincero ringraziamento va al Professor Andrea D'Alpaos per avermi dato la possibilità di sviluppare questo lavoro di tesi e per avermi guidato durante tutto il percorso con competenza, disponibilità e grande attenzione.

Ringrazio il Dottor Alvise Finotello, che mi ha seguito con costanza durante questi mesi. La sua disponibilità, i suoi consigli e il tempo dedicato sono stati fondamentali per la realizzazione di questa tesi.

Il grazie più grande va alla mia famiglia, che ha sempre creduto in me, sostenendomi nei momenti più semplici e in quelli più difficili e per avermi dato la possibilità di arrivare fino a qui.

Un grazie speciale va ai miei amici, quelli con cui sono cresciuto e quelli conosciuti durante il percorso universitario. Ognuno di loro, in modi diversi, ha contribuito a rendere questi anni ricchi di esperienze, soddisfazioni e ricordi che porterò sempre con me.

Un ringraziamento va anche a tutte le persone che ho incontrato durante questo percorso universitario e lavorativo, perché ognuna di loro, in modi diversi, ha contribuito alla mia crescita personale e professionale.