



Politecnico
di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Interazione delle dinamiche fluviali e costiere alla foce del fiume Ofanto

This is a PhD Thesis

Original Citation:

Interazione delle dinamiche fluviali e costiere alla foce del fiume Ofanto / Carbone, F.. - ELETTRONICO. - (2026).

Availability:

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/306960> since: 2026-09-10

Published version

DOI:

Publisher: Politecnico di Bari

Terms of use:

(Article begins on next page)



D.R.S.A.T.E.

Doctor in Risk And Environmental, Territorial And
Building Development

Coordinator: Prof. Francesco Fiorito

XXXVII CYCLE – ICAR/02 Hydraulic and
Maritime Constructions and Hydrology

DICATECh

Department of Civil, Environmental,
Building Engineering and Chemistry

POLITECNICO DI BARI

19
2025

Filomena Carbone

Fluvial–coastal interactions at the Ofanto River delta

Prof. Leonardo Damiani, Prof. Vito Iacobellis, Prof. ssa Daniela Malcangio
DICATECh, Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry,
Bari, IT

Prof. Giovanni Schicchitano, Prof. Giovanni Scardino
Department of Earth and Environmental Science, University of Bari, Bari, IT

Eng. Raffaele Sannicandro
ASSET, Regional Strategic Agency for Sustainable Land Development, Bari, IT



EXTENDED ABSTRACT (eng)

This work analyzes the interactions between fluvial and coastal dynamics at the mouth of the Ofanto River, an area characterized by high hydro-morphological vulnerability. The investigation was based on the integration of three numerical models, i.e. (i) HEC-RAS, used for unsteady hydrodynamic simulations along the river course, (ii) Delft3D, applied to represent hydrodynamic and wave processes in the coastal environment, and (iii) XBeach, employed to assess morphodynamic responses to extreme events. The results highlighted the strong variability of the river response under flood conditions, the sensitivity of the coastal domain to meteorological and bathymetric variations, and the occurrence of local erosion and sedimentation processes linked to wave–current–river flow interactions. Comparison with reanalysis data further revealed the influence of spatial resolution and local morphological features on the system’s response. These dynamics are embedded in a context already affected by anthropogenic pressures, such as groundwater exploitation, reduction of sediment supply, degradation of dune systems, and the construction of infrastructures and rigid coastal defenses. Overall, the evidence confirms that the Ofanto River mouth represents a coastal system in disequilibrium, whose evolution requires integrated and sustainable management strategies oriented toward the long term, aimed at reducing vulnerability and enhancing system resilience.

Coastal Hydrodynamic, Morphodynamic Modeling, Coastal Erosion, Flood risk

EXTENDED ABSTRACT (ita)

Il presente lavoro analizza le interazioni tra dinamiche fluviali e costiere alla foce del fiume Ofanto, un'area caratterizzata da elevata vulnerabilità idro-morfologica. L'indagine si è basata sull'integrazione di tre modelli numerici, (i) HEC-RAS per le simulazioni idrodinamiche in moto vario lungo l'asta fluviale, (ii) Delft3D per la rappresentazione dei processi idrodinamici e ondosi in ambiente costiero e (iii) XBeach per la valutazione delle risposte morfodinamiche a eventi estremi. I risultati hanno messo in evidenza la forte variabilità della risposta fluviale in condizioni di piena, la sensibilità del dominio costiero alle variazioni meteomarine e batimetriche e la presenza di processi locali di erosione e sedimentazione legati all'interazione onda-corrente-deflusso fluviale. Il confronto con dati di rianalisi ha inoltre evidenziato l'influenza della risoluzione spaziale e delle caratteristiche morfologiche locali sulla risposta del sistema. Queste dinamiche si inseriscono in un contesto già compromesso da pressioni antropiche quali lo sfruttamento delle acque sotterranee, la riduzione degli apporti solidi, la perdita dei sistemi dunari e la costruzione di infrastrutture e difese rigide. L'insieme delle evidenze conferma come la foce dell'Ofanto rappresenti un sistema costiero in disequilibrio, la cui evoluzione richiede strategie di gestione integrata e sostenibile orientate al lungo periodo, capaci di ridurre la vulnerabilità e accrescere la resilienza del territorio.

Modellazione idrodinamica, Morfodinamica costiera, Erosione costiera, Rischio inondazione

INDICE

PREFAZIONE	4
INTRODUZIONE	5
APPROCCIO METODOLOGICO	7
1. CONTESTO GENERALE	9
1.1. Caratteristiche geologiche e geomorfologiche	9
1.2. Idrologia e caratteristiche fluviali	20
1.3. Arretramento della linea di costa	20
1.3.1. Inondazione da mareggiata	24
1.3.2. Subsidenza costiera	26
1.3.3. Uso del suolo e pressioni antropiche	29
2. MATERIALI E METODI	35
2.1. Analisi dell' idrodinamica costiera	35
2.1.1. Scelta del dominio d'indagine	35
2.1.2. Dati per la modellazione numerica	42
2.1.3. Scelta del processo	46
2.2. Analisi idraulica	49
2.2.1. Dati di pluviometria, idrometria e di portata	50
2.2.2. Scelta e calibrazione del modello idraulico	55
2.3. Inondazione e allagamenti	58
2.3.1. Scelta del dominio d'indagine	58
2.3.2. Scelta del processo	60
3. RISULTATI E DISCUSSIONE	63
3.1. Discussione dei risultati	78
CONCLUSIONI	80
ELENCO DELLE FIGURE	82
ELENCO DELLE TABELLE	87
BIBLIOGRAFIA	88
SITOGRAFIA	92
CURRICULUM	93

PREFAZIONE

Le aree costiere in prossimità delle foci fluviali costituiscono ambienti particolarmente sensibili, nei quali l'interazione tra processi idrologici, idrodinamici e morfodinamici determina condizioni di equilibrio estremamente fragili. Negli ultimi decenni, l'insieme dei fattori naturali e antropici ha innescato una progressiva trasformazione di questi sistemi, con effetti tangibili in termini di erosione costiera, riduzione degli apporti sedimentari e aumento della vulnerabilità ai fenomeni meteomarinari estremi. In tale contesto, il settore costiero compreso tra Barletta e Manfredonia e, in particolare, la foce del fiume Ofanto, rappresentano un caso studio emblematico. Qui, la combinazione di subsidenza differenziale, arretramento della linea di riva e interventi di regolazione fluviale e costiera ha condotto a un marcato squilibrio morfologico, con tassi di regressione che superano la media regionale. Lo studio di quest'area riveste pertanto un interesse strategico, non solo per la comprensione delle dinamiche evolutive locali, ma anche come riferimento per la gestione integrata di altri sistemi costieri mediterranei caratterizzati da simili criticità.

La ricerca condotta si è avvalsa di un approccio multidisciplinare, basato sull'acquisizione e sull'elaborazione di dati topografici, batimetrici, idrologici e meteomarinari, integrati con rilievi storici e recenti. A livello metodologico, sono stati applicati modelli numerici idrostatici e idrodinamici di diversa complessità – Delft3D, XBeach e HEC-RAS – con l'obiettivo di simulare scenari estremi di interazione mare-fiume, nei quali eventi di piena significativa coincidono con mareggiate di eccezionale intensità. Tale approccio ha consentito di analizzare il bilancio sedimentario e le condizioni idrodinamiche in situazioni critiche, valutando le conseguenze in termini di sommersione, erosione e instabilità morfologica. I risultati ottenuti mettono in evidenza la forte vulnerabilità dell'area della foce dell'Ofanto, dove l'azione congiunta di forzanti naturali e pressioni antropiche contribuisce ad accelerare i processi erosivi e ad amplificare il rischio idraulico e costiero. Le simulazioni hanno inoltre confermato la rilevanza della riduzione degli apporti fluviali e dell'interruzione dei processi di trasporto litoraneo nel determinare l'attuale disequilibrio.

La presente tesi di dottorato si inserisce pertanto in un quadro di ricerca finalizzato a migliorare la comprensione delle dinamiche costiere in contesti a elevata vulnerabilità e a fornire strumenti utili alla pianificazione e gestione sostenibile della fascia costiera, con particolare riferimento alla mitigazione del rischio e alla salvaguardia degli ecosistemi e delle attività socio-economiche locali.

INTRODUZIONE

Le recenti problematiche connesse alle variazioni climatiche globali hanno alimentato l'interesse da parte delle amministrazioni locali e delle istituzioni mondiali sugli effetti dell'innalzamento del livello del mare e sull'impatto di eventi marini estremi (Rahmstorf, 2007; Rahmstorf *et al.*, 2011; IPCC, 2013; 2019; 2021). In un quadro generale dei possibili effetti dei cambiamenti climatici sulle coste e sul loro equilibrio naturale, l'impatto antropico sta giocando un ruolo importante, determinando emissioni di gas serra in atmosfera in forte aumento nell'ultimo secolo. Attualmente, la concentrazione di CO₂ in atmosfera ha superato il valore di 410 ppm, raggiungendo uno dei massimi storici negli ultimi 500 mila anni (ka) (IPCC, 2014). Le evidenze dei cambiamenti climatici globali ritrovano riscontro nelle perdite di masse glaciali, come osservato dai radar altimetrici satellitari sia in Antartide che in Groenlandia (Chen *et al.*, 2006; Pritchard *et al.*, 2012; Sasgen *et al.*, 2012; Paolo *et al.*, 2015; Shepherd *et al.*, 2020). La perdita progressiva delle masse glaciali si riflette nell'innalzamento del livello del mare globale, come rivelato dai radar altimetrici, dalle misure gravimetriche e dalle registrazioni mareografiche, le quali hanno mostrato un tasso di innalzamento di 1.7 mm/a nel XX secolo e 3.3 mm/a dagli anni 1990 ad oggi (Nerem *et al.*, 2010; Meyssignac *et al.*, 2012). A livello di scala del Mediterraneo, un tasso di risalita del livello del mare pari a 1.8 mm/a è stato registrato durante il XIX e XX secolo ed attualmente risulta in forte accelerazione (Anzidei *et al.*, 2014; Vecchio *et al.*, 2019). Nell'ottica di un rapido innalzamento del livello del mare risulta probabile che una parte delle aree costiere potrebbe subire una sommersione permanente, inficiando le normali attività economiche e sociali (Antonioli *et al.*, 2017; 2020). Inoltre, ad una sommersione permanente potrebbero seguire dei fenomeni di inondazione, causate da mareggiate o tsunami (Pignatelli *et al.*, 2010; Lo Re *et al.*, 2020; Scardino *et al.*, 2020; Scicchitano *et al.*, 2020). Nel bacino del Mediterraneo, fenomeni di inondazione dovute ad eventi marini estremi, come mareggiate intense o Mediterranean Hurricane (Medicane) (Woodruff *et al.*, 2013; Cavicchia *et al.*, 2014; Bakkensen, 2017; Scicchitano *et al.*, 2020; 2021) stanno assumendo un'intensità sempre più elevata determinando particolari criticità lungo le coste della penisola italiana. Lo sviluppo costiero della penisola italiana, comprese le isole, è di circa 7900 km. Con circa 865 km di coste, dopo le regioni Sardegna e Sicilia, la Regione Puglia è caratterizzata dalla maggiore estensione costiera. Le principali criticità delle coste pugliesi sono legate ai forti tassi di arretramento che negli ultimi anni hanno raggiunto valori molto elevati. Gli studi condotti nel corso degli ultimi anni confermano lo stato di sofferenza della maggior parte delle spiagge sabbiose pugliesi, imputabile principalmente alla crescente pressione antropica, alle variazioni climatiche che hanno determinato una modifica delle condizioni meteo-marine, nonché alla riduzione degli apporti solidi, per la sistemazione di falesie e corsi d'acqua (Caldara *et al.*, 1998; 2006; 2013; 2014; Rose *et al.*, 2015; De Santis *et al.*, 2018b; De Serio *et al.*, 2018; Casarano *et al.*, 2019; Antonioli *et al.*, 2020; Scardino *et al.*, 2020a.). Per tale ragione, la previsione delle aree potenzialmente allagabili è di particolare importanza per una corretta gestione della fascia costiera e per l'individuazione di criteri di progettazione per la mitigazione del rischio.

L'obiettivo della presente attività di ricerca è analizzare l'interazione tra le dinamiche fluviali e marine alla foce del fiume Ofanto, con particolare attenzione al bilancio sedimentario. In particolare, si intende valutare la fattibilità di interventi finalizzati a garantire una condizione di equilibrio morfologico alla foce, agendo su entrambi i contributi sedimentari: quello proveniente dal fiume, analizzato attraverso un'accurata modellazione idrologica, e quello marino, influenzato da eventi meteomarinari estremi. Per ottenere risultati significativi, lo studio si concentra sullo scenario di maggiore criticità, simulando condizioni idrauliche e marine estreme che possono verificarsi simultaneamente. Si tratta, in particolare, di eventi in cui un'intensa precipitazione sul bacino dell'Ofanto genera una piena significativa, in coincidenza di una mareggiata di eccezionale intensità. Questa combinazione rappresenta la condizione più cautelativa per la valutazione del rischio idraulico e per l'analisi dell'impatto sul trasporto solido alla foce.

Il presente lavoro di ricerca è stato condotto rappresentando innanzitutto il contesto generale della foce del fiume Ofanto evidenziandone le caratteristiche geologiche e geomorfologiche, idrologiche e fluviali con un focus finale sull'arretramento della linea di costa per cause naturali ed antropiche. Dopodiché, in base ai dati disponibili, è stata scelta la metodologia idonea per condurre un'analisi costiera i cui risultati sono stati implementati in ambito idraulico oggetto di discussione.

APPROCCIO METODOLOGICO

Il presente lavoro si basa su un approccio metodologico integrato finalizzato all'analisi delle interazioni tra dinamiche fluviali e costiere nei sistemi di foce, concepito in modo da essere generalizzabile e applicabile a diversi contesti morfologici. In tale ottica, il sistema costituito dal fiume Ofanto e dalla fascia costiera ad esso sottesa viene considerato come caso studio rappresentativo per valutare l'effettiva applicabilità del metodo proposto e affidabilità dei risultati ottenuti.

L'approccio adottato prevede l'utilizzo combinato di modelli numerici distinti, ciascuno deputato alla simulazione di specifici processi fisici, opportunamente accoppiati al fine di descrivere in maniera coerente il comportamento del sistema fluvio-costiero nel suo complesso.

In particolare, la dinamica fluviale è stata analizzata mediante il modello idrodinamico HEC-RAS, impiegato per la simulazione del deflusso in condizioni di moto vario. Il modello consente di descrivere l'evoluzione spazio-temporale dei livelli idrici e delle portate lungo l'asta fluviale attraverso la risoluzione delle equazioni di Saint-Venant, discretizzate mediante schemi numerici alle differenze finite. Le condizioni al contorno a monte e a valle sono state definite sulla base di dati idrologici e idraulici disponibili, permettendo di ricostruire gli idrogrammi di piena e le relative condizioni alla foce.

La componente costiera è stata invece analizzata mediante il modello Delft3D, utilizzato per la simulazione dei processi idrodinamici e del trasporto solido in ambiente marino. Il modello risolve le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto in condizioni bidimensionali o tridimensionali, includendo gli effetti della marea, delle correnti e dell'interazione con il fondale. Inoltre, il modulo ondoso consente di descrivere la propagazione del moto ondoso e i principali fenomeni dissipativi.

Per l'analisi di dettaglio delle dinamiche nella zona di battigia e nella regione di foce è stato utilizzato il modello XBeach, specificamente sviluppato per la simulazione degli effetti delle onde e degli eventi estremi sulle aree costiere. Tale modello permette di rappresentare in modo accurato i processi di interazione onda-corrente, il trasporto sedimentario e le variazioni morfologiche a scala locale, risultando particolarmente adatto per lo studio delle aree di transizione tra ambiente fluviale e marino.

L'integrazione tra i modelli è stata realizzata attraverso uno schema di accoppiamento sequenziale, in cui i risultati ottenuti da un modello costituiscono input per il successivo. In particolare, le condizioni idrauliche alla foce (portata liquida e livelli idrici) derivate dalle simulazioni con HEC-RAS sono state utilizzate come condizioni al contorno per i modelli costieri dato che si trascura l'influenza dell'idrodinamica costiera sul deflusso fluviale poichè non di interesse per la finalità del lavoro. Analogamente, i parametri marini, quali livello del mare e caratteristiche del moto ondoso, ottenuti dalle simulazioni con Delft3D, sono stati impiegati come input per le simulazioni di dettaglio con XBeach.

Le condizioni al contorno sono state definite in modo da garantire la coerenza tra i diversi domini modellistici, utilizzando dati osservati o risultati di simulazioni a scala più ampia. La discretizzazione spaziale è stata realizzata mediante griglie a differente risoluzione, con un maggiore dettaglio nelle aree di interesse, al fine di cogliere adeguatamente le dinamiche locali della zona di foce.

L'applicazione del metodo consente di ottenere una descrizione integrata dei principali processi fisici che governano l'evoluzione dei sistemi fluvio-costieri, includendo la distribuzione dei livelli idrici, dei campi di velocità, dei flussi sedimentari e delle variazioni morfologiche. Tali risultati permettono di analizzare i meccanismi di interazione tra contributo fluviale e forzanti marine, individuando le condizioni che determinano fenomeni di erosione o accumulo.

In una prospettiva più ampia, l'approccio metodologico proposto rappresenta uno strumento di supporto alla pianificazione e gestione delle aree di foce, consentendo la valutazione di scenari evolutivi legati a variazioni climatiche, innalzamento del livello del mare e modifiche degli apporti fluviali. La sua struttura modulare e generalizzabile ne permette l'applicazione ad altri contesti, rendendolo utile per la definizione di strategie di gestione sostenibile nel medio e lungo termine.

1. CONTESTO GENERALE

1.1. *Caratteristiche geologiche e geomorfologiche*

La piana costiera del Golfo di Manfredonia è ubicata nella parte orientale del Tavoliere di Puglia ed è delimitata a nord dal Promontorio del Gargano, ad ovest dal Subappennino Dauno e a sud-est dall'Altopiano delle Murge (Caldara *et al.*, 1998; 2002). La fascia costiera è estesa per circa 60 km, fra Barletta e Manfredonia. Le oscillazioni del livello del mare hanno determinato limitate evidenze geomorfologiche, benché otto ordini di terrazzi marini sono stati riconosciuti tra 350 m e 5 m sopra il livello del mare e quattro ordini di terrazzi marini sono stati individuati tra 15 m e 110 m sotto il livello del mare (Caldara *et al.*, 1998; De Santis *et al.*, 2010; 2014). L'intera fascia costiera è alimentata dagli apporti sedimentari dei fiumi Carapelle, Cervaro, Candelaro e Ofanto, e tali apporti sono influenzati da una deriva litorale da SE verso NW (De Santis *et al.*, 2015). L'attuale topografia dell'area evidenzia un'ampia zona lagunare retrostante ad un cordone litorale ampio circa 3 km (Caldara *et al.*, 2002). A partire dal 1930, ingenti attività di bonifica sono state eseguite lungo l'intera area, determinando l'attuale configurazione costiera (Caldara *et al.*, 1993; De Santis *et al.*, 2018). Le recenti opere di difesa – come barriere, pennelli, gabbionate - costruite lungo le porzioni di spiaggia emersa e battigia, sono state progettate allo scopo di prevenire la forte erosione della costa, soprattutto nel tratto compreso tra Zapponeta e Margherita di Savoia (Caldara *et al.*, 2006), dove il sistema dunare originario risulta fortemente alterato e localmente assente, a causa della combinazione tra processi erosivi e pressioni antropiche legate allo sviluppo costiero..

La valle incisa dell'Ofanto presenta una marcata differenza morfologica rispetto alle valli adiacenti del torrente Carapelle, del torrente Cervaro e della valle incisa di Manfredonia. Recenti studi geo-stratigrafici hanno valutato la risposta delle unità trasgressive a un innalzamento graduale e a salti del livello del mare, con particolare attenzione all'evoluzione delle paleobarriere e delle paleolinee di riva sia sulla piattaforma continentale sia all'interno del riempimento sedimentario della valle dell'Ofanto, evidenziando l'esistenza di una complessa architettura transgressiva dei sistemi di barriera costiera. Nel lavoro di De Santis (2020) è documentata la presenza di depositi relitti di paleobarriere sviluppatasi durante fasi di innalzamento graduale (*stepwise*) del livello del mare, associate a eventi climatici globali come il Meltwater Pulse 1A (~14.6 ka BP) e il successivo Bølling-Allerød / Younger Dryas.

L'analisi dei sedimenti e delle configurazioni stratigrafiche ha permesso di distinguere due stili principali di risposta trasgressiva:

- il *rollover* (traslazione verso terra dei corpi sedimentari con rimaneggiamento parziale);
- l'*overstepping* (seppellimento in situ di barriere costiere sommerse).

In questo studio, la valle incisa dell'Ofanto viene descritta per la prima volta nella sua interezza come mostra la Figura 1.

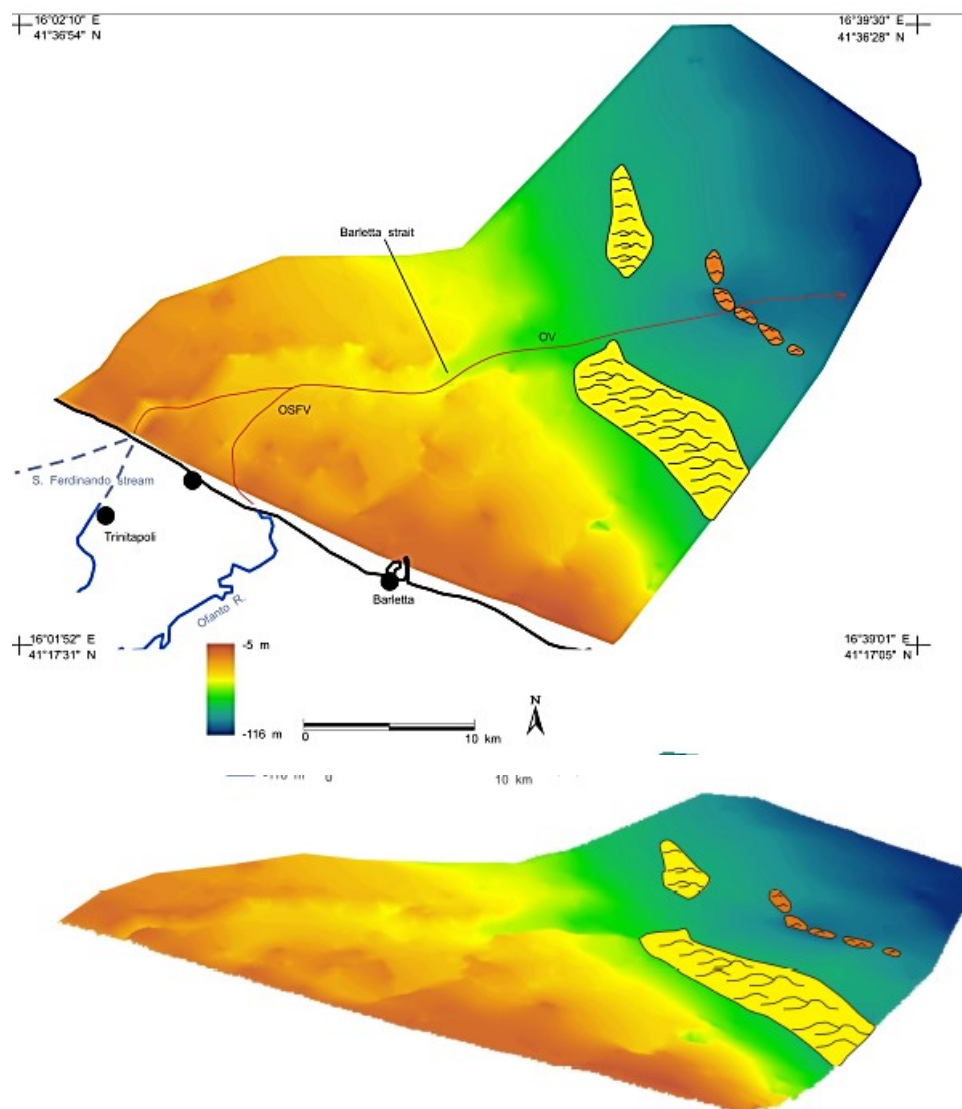


Figura 1 - Modello Digitale del Terreno (DEM) della superficie erosiva (ES1) attorno alla valle dell'Ofanto, sia in vista piana (in alto) che obliqua (in basso). In arancione e giallo, con morfologie a cumulo, è rappresentata l'estensione dei corpi di facies 2 in morfologie dunose/a barriera delle unità A l e B m, rispettivamente (De Santis, 2020).

Nel settore più interno, l'incisione legata all'attività del fiume Ofanto taglia la superficie di esposizione subaerea ES1 (Figura 1) e si presenta inizialmente con due rami distinti. Questi solchi convergono andando a costituire un'unica depressione alluvionale ampia e poco incisa, denominata OSFV (Ofanto–San Ferdinando Valley).

La larghezza di questa valle raggiunge valori massimi prossimi ai 12 km, restringendosi progressivamente fino a circa 2,5 km nei pressi dello stretto di Barietta (De Santis *et al.*, 2020). La profondità della OSFV oscilla tra –15 m e –50 m sotto il livello del mare in corrispondenza dello stretto. Procedendo verso il mare aperto,

rispetto alla superficie ES1, la valle tende a rassottigliarsi, passando da circa 17 m a meno di 10 m di profondità.

Superata la soglia dello stretto di Barletta, la morfologia si espande nuovamente, pur senza tornare alla larghezza massima osservata nel tratto più interno. Questo segmento, sviluppatosi in modo autonomo grazie all'azione fluviale dell'Ofanto, è qui identificato come valle dell'Ofanto (OV). La valle dell'Ofanto (OV) si sviluppa fino a raggiungere una larghezza massima di circa 8 km, poggiando sulla superficie ES1 nei tratti laterali.

Per cui, ciò che caratterizza maggiormente la valle incisa dell'Ofanto (comprendente sia il tratto prima dello stretto di Barletta — OSFV, che quello a valle — OV) è la sua forma molto ampia e poco profonda.

Questi meccanismi hanno governato l'evoluzione e la migrazione dei sistemi di barriera lungo la costa settentrionale della Puglia, compresa l'area della foce dell'Ofanto, creando una stratigrafia complessa e polifasica che oggi influenza:

- l'assetto morfologico sottomarino;
- la distribuzione dei sedimenti litoranei;
- il comportamento del sistema costiero in risposta a forzanti moderne (es. subsidenza, onde, mareggiate).

L'importanza di questa ricostruzione paleoambientale risiede nel fornire una base geologica e morfologica fondamentale per comprendere le dinamiche erosive attuali, nonché per pianificare in modo più consapevole eventuali interventi di gestione integrata della fascia costiera. Inoltre, la presenza di barriere sommerse relitte potrebbe giocare un ruolo attenuante sulla propagazione ondosa in condizioni normali, ma essere bypassata o riattivata in caso di eventi estremi, contribuendo alla variabilità spaziale del rischio costiero.

La figura 2, estratta dalla Carta geolitologica d'Italia tramite il Geoportale Nazionale, evidenzia la presenza di detriti e depositi alluvionali e fluviolacustri a carattere sedimentario risalenti al periodo dell'Olocene.

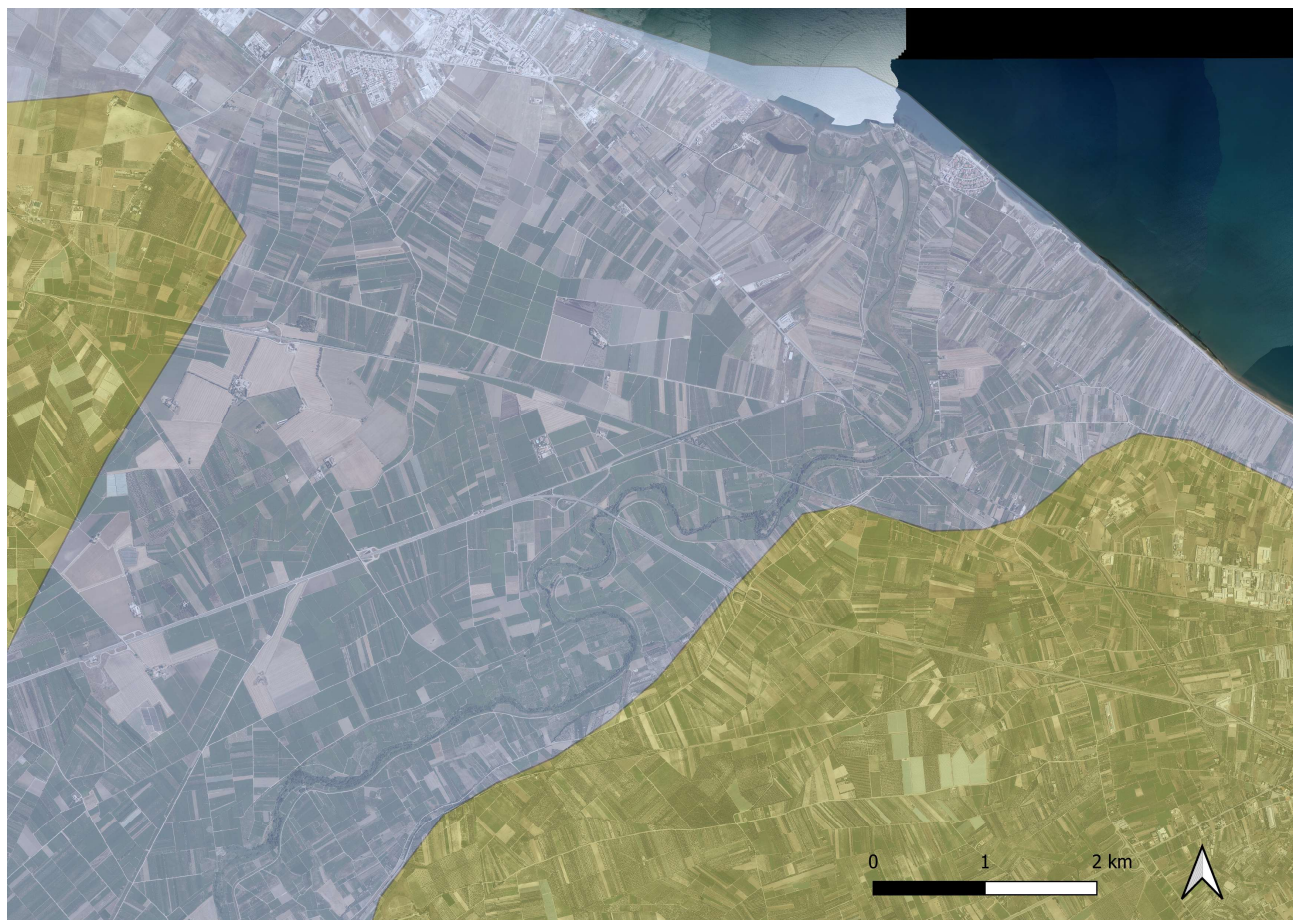


Figura 2- Carta geolitologica d'Italia alla scala 1:500.000 (Geoportale Nazionale)

In particolare, nel 2014 sono state condotte delle indagini in situ nell'ambito dello studio geologico a supporto della Progettazione preliminare degli interventi di mitigazione del rischio idraulico nel tratto terminale del Fiume Ofanto tra Ponte Romano e la Foce – 1°stralcio da parte del Commissario di Governo per il contrasto del dissesto idrogeologico nella Regione Puglia, la cui ubicazione è mostrata nella figura 3 e nella tabella 1 sono elencate le profondità dei sondaggi, le quote altimetriche, le coordinate geografiche, i campioni prelevati, le prove eseguite e la relativa strumentazione installata in foro.



Figura 3– Sondaggi eseguiti nel 2014 nell’ambito della Progettazione preliminare degli interventi di mitigazione del rischio idraulico nel tratto terminale del Fiume Ofanto tra Ponte Romano e la Foce – 1° stralcio.

Tabella 1 – Elementi caratteristici dei sondaggi eseguiti nel 2014

SONDAGGIO	Prof.	Quota	Coordinate WGS84		Campioni	Prelevati	Prove in foro.	Strumentaz. installata.
N.	m.	slm.	Long.	Lat.	Dist.	Ind.		
S1	15	1,5	16°12'28.26	41°21'6.19	/	1	n. 2 Lefranc	Piezometro
S2	15	2,2	16°12'21.81	41°20'48.19	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro
S3	15	2,6	16°12'29.12	41°20'24.51	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro
S4	15	2,9	16°12'33.81	40°20'5.75	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro
S5	14	6,3	16°12'4.46	41°19'52.34	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro
S6	15	3,1	16°12'7.13	41°20'31.42	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro

SONDAGGIO	Prof.	Quota	Coordinate WGS84		Campioni	Prelevati	Prove in foro.	Strumentaz. installata.
N.	m.	slm.	Long.	Lat.	Dist.	Ind.		
S7	15	2,4	16°12'9.31	41°20'51.60	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro
S8	15	4,8	16°12'3.93	41°19'57.53	/	/	Lefranc Lugeon	Piezometro
S9	15	5,0	16°11'42.10	41°19'56.46	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro
S10	15	5,9	16°10'23.48	41°19'40.48	/	1	Lefranc Lugeon	Piezometro
S11	15	6,7	16°10'44.58	41°19'52.06	/	2	Lefranc Lugeon	Piezometro

Dai fori di sondaggio, sono stati ricavati dei campioni attraverso il sondaggio geotecnico a “carotaggio continuo”. Durante la fase di prelievo dei campioni semidisturbati in argine sono stati prelevati anche due campioni rimaneggiati nell’immediata vicinanza dell’alveo del fiume Ofanto, uno in corrispondenza del sondaggio S2 (in destra idraulica) ed uno in corrispondenza del sondaggio S8 (in sinistra idraulica). Qui di seguito si riportano alcune delle immagini delle cassette catalogatrici, relativamente al sondaggio S1, S2 ed S7 (vedi figura 4,5,6).



Cassetta catalogatrice S1 da 0,00 a 5,00



Cassetta catalogatrice S1 da 5,00 a 10,00



Cassetta catalogatrice S1 da 10,00 a 15,00

Figura 4- Cassetta catalogatrice del sondaggio S1



Cassetta catalogatrice S2 da 0,00 a 5,00



Cassetta catalogatrice S2 da 5,00 a 10,00



Cassetta catalogatrice S2 da 10,00 a 15,00

Figura 5- Cassetta catalogatrice del sondaggio S2



Figura 6 – Cassetta catalogatrice del sondaggio S7

In particolare, la stratigrafia dei sondaggi d'interesse S1, S2, S3 in destra idraulica ed S6,67 in sinistra idraulica sono riportati nel seguito. Relativamente al:

- Sondaggio S1 (destra idraulica), la perforazione ha attraversato:

da 0.0 m a 1.0 m	terreno vegetale
da 1.0 m a 6.0 m	sabbie limose, addensate e umide
da 6.0 m a 12.5 m	argille limose, consistenti e umide

da 12.5 m a 15.0 m	sabbie ghiaiose e ghiaie, in acqua
--------------------	------------------------------------

In questo primo sondaggio non si è ritenuto di operare alcun accorpamento in quanto i quattro strati erano caratterizzati da una litologia differente, ben distinguibile già alla scala macroscopica. Durante la perforazione è stata rinvenuta una falda il cui livello idrico si è stabilizzato a 1.12 m dal piano campagna;

- Sondaggio S2 (destra idraulica), la perforazione ha attraversato:

da 0.0 m a 1.0 m	terreno vegetale
da 1.0 m a 6.0 m	sabbie limose e sabbie grossolane sciolte, in falda
da 6.0 m a 12.0 m	alternanze limoso sabbiosi e sabbie limose con diverso grado di umidità
da 12.0 m a 13.0 m	sabbie limose plastiche e umide
da 13.0 m a 15.0 m	ghiaie sciolte

In tale sondaggio sono state accorpate le alternanze di limi e sabbie costituite da strati di diverso spessore. Durante la perforazione è stata rinvenuta una falda il cui livello idrico si è stabilizzato a 1.79 m dal piano campagna;

- Sondaggio S3 (destra idraulica), la perforazione ha attraversato:

da 0.0 m a 0.8 m	terreno vegetale
da 0.8 m a 2.5 m	limi sabbiosi molto consistenti, umidi
da 2.5 m a 5.0 m	sabbie sciolte inglobanti elementi ghiaiosi
da 5.0 m a 9.0 m	alternanze di limi sabbiosi e argillosi, umidi
da 9.0 m a 10.0 m	ghiaie sciolte
da 10.0 m a 12.2 m	limi argillosi umidi
da 12.2 m a 15.0 m	sabbie e ghiaie

In tale sondaggio sono stati accorpati gli ultimi due strati rappresentati rispettivamente da sabbie (aventi spessore pari a 1.8 m) e ghiaie (di spessore pari a 1.0 m). Durante la perforazione è stata rinvenuta una falda il cui livello idrico si è stabilizzato a 2.34 m dal piano campagna.

- Sondaggio S6 (sinistra idraulica), la perforazione ha attraversato:

da 0.0 m a 0.2 m	terreno vegetale
da 2.0 m a 12.8 m	alternanza di limi argillosi e limi sabbiosi, per lo più umidi e plastici
da 12.8 m a 15.0 m	ghiaie etero metriche, sciolte

In tale sondaggio sono stati accorpati cinque strati di diversi spessore, di limi argillosi e limi sabbiosi rinvenuti al disotto dello strato di terreno vegetale, aventi spessore complessivo pari a 11 m circa. Durante la perforazione è stata rinvenuta una falda il cui livello idrico si è stabilizzato a 3.05 m dal piano campagna.

- Sondaggio S7 (sinistra idraulica), la perforazione ha attraversato:

da 0.0 m a 0.4 m	terreno vegetale
da 0.4 m a 5.5 m	sabbie limose addensate, umide
da 5.5 m a 9.8 m	limi argillosi umidi
da 9.8 m a 15.0 m	ghiaie per lo più sciolte, bagnate

Per tale sondaggio è stato accorposto alle sabbie il sottile strato limoso (spesso 0.6 m) immediatamente sottostante al terreno vegetale e sono stati accorpati i due strati limosi compresi tra 5.5 m e 9.8 m. Durante la perforazione è stata rinvenuta una falda il cui livello idrico si è stabilizzato a 2.05 m dal piano campagna.

Si può quindi dedurre che, a parte alcuni livelli più marcatamente sabbioso-ghiaiosi, corrispondenti alla classe litologica D, i terreni di fondazione degli argini indagati siano rappresentati dai litotipi limoso-sabbiosi e subordinatamente sabbioso-limosi, che rappresentano rispettivamente le classi litologiche B e C (vedi Tabella 2).

Tabella 2 – Sintesi parametrica delle indagini in situ

Sintesi parametrica delle indagini sui terreni di fondazione degli argini						
Postazione	Prof. Campione	Carattere litologico	γ (t/mc)	param. Resistenza		Eed (kg/cm ²)
				c' (kg/cm ²)	ϕ' (°)	
S1	8,00	Limo Argilloso (C)	1,82	0,0	21	23
S2	9,40	Argilla limosa (C)	1,81	0,3	16	110
S3	8,50	Argilla limosa (C)	1,84	0,3	20	47
S4	2,20	Limo Sabbioso (C)	2,00	0,2	28	108
S5	4,40	Limo Sabbioso (B)	2,01	0,6	13	57
S6	2,50	Limo Argilloso (C)	1,87	0,4	16	50
S7	7,50	Argilla limosa (C)	1,84	0,6	13	91
S9	3,00	Limo Sabbioso (B)	1,71	0,6	13	47
S10	3,00	Sabbia Limosa (B)	1,97	0,2	26	179*
S11a	3,50	Limo Argilloso (C)	2,03	0,2	19	76
S11b	5,50	Limo Argilloso (C)	1,97	0,2	22	88

**valore ottenuto in un campo di pressione diverso dagli altri*

Tali terreni, ancorché tendenzialmente fini e plastici, possiedono nel complesso valori di permeabilità da medio-alti ad alti. Tale situazione favorisce fenomeni di filtrazione e di possibile sifonamento degli argini. A tale proposito l'indagine geoelettrica eseguita sugli argini nelle 11 postazioni di indagine ha evidenziato la presenza di acqua; è sempre presente una falda superficiale a pelo libero o in modestissima pressione che in alcuni casi è stata intercettata a poco più di 1 metro di profondità dal p.c. Tale falda circola per filtrazione nei

sedimenti fini del F. Ofanto e subisce variazioni piezometriche anche sensibili in funzione dell'andamento dei deflussi di piena ordinaria o eccezionale dello stesso fiume. La presenza di umidità nella parte media e bassa degli argini, è confermata dalla diffusa presenza lungo i paramenti di monte degli argini ed alla base degli stessi, di canneti di acqua dolce.

1.2. Idrologia e caratteristiche fluviali

Il fiume Ofanto rappresenta uno dei principali corsi d'acqua del Mezzogiorno d'Italia. Nasce in provincia di Avellino a circa 715 metri sul livello del mare e si sviluppa per un percorso di circa 170 km, confluendo infine nel mare Adriatico in corrispondenza del confine tra le province di Barletta-Andria-Trani e Foggia. Il suo regime idrologico è di tipo marcatamente torrentizio: alla foce si registra una portata media di circa 15 m³/s, ma con forti escursioni stagionali che includono lunghi periodi di magra, durante i quali le portate possono ridursi quasi a zero. Tuttavia, non sono rari episodi di piena di rilevante intensità, alcuni dei quali sono documentati sin dall'antichità, a conferma della forte variabilità del regime fluviale. Dai dati dell'idrometro a San Samuele di Cafiero (25 km dalla foce) si è osservato infatti un forte calo nel trasporto solido sospeso dalla fine degli anni '50 con una corrispondente diminuzione delle piene significative dopo il 1960. Dal 1960 si è verificata una riduzione nelle portate, segno che da quell'anno in poi si sono verificate numerose piene di lieve entità, che non sono state in grado di trasportare sedimenti in modo significativo, a differenza di altri anni in cui si verificarono piene sporadiche ma più intense (L. Damiani *et al.*, 2003).

L'analisi idrologica è stata ampiamente trattata nella relazione tecnica dello Studio Ofanto redatta dall'Autorità di Bacino in occasione della revisione delle perimetrazioni delle aree a diversa pericolosità idraulica del Fiume Ofanto, a cui si rimanda per ogni informazione integrativa di dettaglio.

1.3. Arretramento della linea di costa

Lungo la costa pugliese si osserva una tendenza generalizzata all'arretramento della linea di riva, attribuibile a una combinazione di fattori di origine naturale e antropica. Tra le cause principali rientrano l'innalzamento del livello del mare verificatosi durante l'Olocene, una bassa subsidenza dei tratti litoranei pugliesi, più accentuata nella zona del Tavoliere delle Puglie essendo un'area alluvionale e la diminuzione dell'apporto torbido fluviale dovuta alla presenza diffusa di dighe e sbarramenti costruiti in epoca recente, che hanno alterato il bilancio sedimentario naturale (Caldara *et al.*, 1998). A ciò si aggiunge l'effetto delle mareggiate frequenti e intense, che amplificano l'erosione costiera e favoriscono la regressione della spiaggia.

In generale, i principali fattori responsabili dell'arretramento della linea di costa nell'area del Tavoliere delle Puglie sono riconducibili ad una combinazione di fattori naturali e antropici. Tra i primi, il moto ondoso, le correnti litoranee e gli eventi meteomarinari estremi regolano il trasporto e la ridistribuzione dei sedimenti lungo costa. Tuttavia, negli ultimi decenni, i fattori antropici hanno assunto un peso sempre più rilevante nel determinare condizioni di disequilibrio del sistema costiero (vedi Tabella 3).

In particolare, la realizzazione di dighe e invasi lungo i principali corsi d'acqua ha comportato una significativa riduzione del trasporto solido verso la costa, determinando un marcato deficit sedimentario nei sistemi litoranei. A ciò si aggiungono i prelievi di inerti in alveo, che hanno ulteriormente ridotto la disponibilità di sedimenti trasportabili fino alla foce. Tali interventi hanno alterato profondamente il naturale apporto fluviale, compromettendo la capacità delle spiagge di mantenere un equilibrio morfodinamico.

Ulteriori elementi di pressione sono rappresentati dalle opere portuali e dalle strutture di difesa costiera, quali opere rigide trasversali e longitudinali, che interferiscono con il trasporto litoraneo dei sedimenti, causando accumuli localizzati a monte delle opere e fenomeni erosivi nei settori sottovento. Infine, l'urbanizzazione costiera e la conseguente alterazione dei sistemi dunari hanno ridotto la capacità naturale di accumulo e riserva sedimentaria, rendendo i litorali maggiormente vulnerabili all'azione erosiva del moto ondoso.

Tabella 3 - Fattori di controllo dell'evoluzione costiera (Caldara *et al.*, 1998).

Fattore	Effetto	Origine
Moto ondoso	Trasporto e ridistribuzione dei sedimenti lungo la costa	Naturale
Correnti litoranee	Migrazione dei sedimenti e modellazione della linea di riva	Naturale
Eventi meteomarini estremi	Erosione rapida e rimodellamento della spiaggia	Naturale
Apporti fluviali naturali	Alimentazione sedimentaria del sistema costiero	Naturale
Dighe e invasi	Riduzione del sedimento disponibile con un deficit sedimentario costiero	Antropica
Difese costiere rigide	Alterazione del flusso e della dinamica naturale con effetti localizzati di erosione e accumulo	Antropica
Prelievi di inerti fluviali	Diminuzione dei sedimenti disponibili con aumento dell'erosione costiera	Antropica
Infrastrutture turistiche ed opere portuali	Interruzione del trasporto e accelerazione dell'erosione a valle ed accumulo a monte	Antropica

Tali fattori non agiscono isolatamente, ma interagiscono amplificando localmente il processo erosivo, soprattutto in presenza di subsidenza attiva e carente bilancio sedimentario.

L'intera fascia litoranea del Tavoliere delle Puglie è alimentata da sedimenti di origine alluvionale provenienti dai fiumi Candelaro, Cervaro, Carapelle e Ofanto, con un trasporto litoraneo dominante orientato lungo un asse SE-NO (De Santis *et al.*, 2015).

Le cause dell'erosione costiera possono essere generalmente classificate in naturali o antropiche, a seconda che derivino da fenomeni ambientali indipendenti dall'attività umana o che siano direttamente imputabili a quest'ultima. Tuttavia, questa distinzione risulta sempre più sfumata nell'attuale contesto, in cui l'influenza dell'uomo sugli equilibri costieri si è fatta pervasiva e, spesso, predominante.

Tra le cause naturali, rientrano processi quali le variazioni del livello del mare (eustatismo), le mareggiate frequenti e intense, l'azione dei venti, i cambiamenti nella direzione e intensità del moto ondoso, nonché la naturale dinamica del trasporto solido lungo costa. Anche eventi estremi come le tempeste o la subsidenza di origine geologica contribuiscono, su scale temporali diverse, alla perdita di sedimenti litoranei e alla conseguente regressione della linea di riva. Occorre osservare che, la subsidenza antropica è fortemente influenzata dal-

le variazioni repentine del livello piezometrico causate da intense precipitazioni o portate alluvionali. Infatti l'analisi delle serie storiche dei livelli piezometrici, illustrata nei grafici di confronto tra dati osservati e simulati tramite il modello numerico di flusso MODFLOW da Petio et al. (2024), come mostrato nella Figura 7, evidenzia come i fenomeni di costipamento e aumento della pressione interstiziale sono correlati a eventi idrogeologici di breve durata (dell'ordine di due o tre settimane) e non a tassi tettonici (Petio *et al.*, 2014).

La marcata variabilità stagionale e i picchi di risalita della falda, chiaramente visibili in corrispondenza degli eventi di ricarica invernale, confermano l'esistenza di una stretta correlazione tra gli impulsi di precipitazione intensa e le repentine fluttuazioni del potenziale idraulico. In un contesto di questo tipo, la sussidenza antropica non può essere considerata solo come un fenomeno di lungo periodo legato al costipamento dei sedimenti, ma appare fortemente modulata da tali variazioni piezometriche di breve durata. La rapida alternanza tra fasi di ricarica naturale e periodi di intenso emungimento agricolo — che raggiungono il picco nei mesi estivi — determina cicli di variazione della pressione neutra nei pori del terreno che possono influenzare direttamente la stabilità volumetrica del sottosuolo, rendendo il monitoraggio ad alta risoluzione temporale uno strumento indispensabile per la gestione del rischio geologico nell'area.

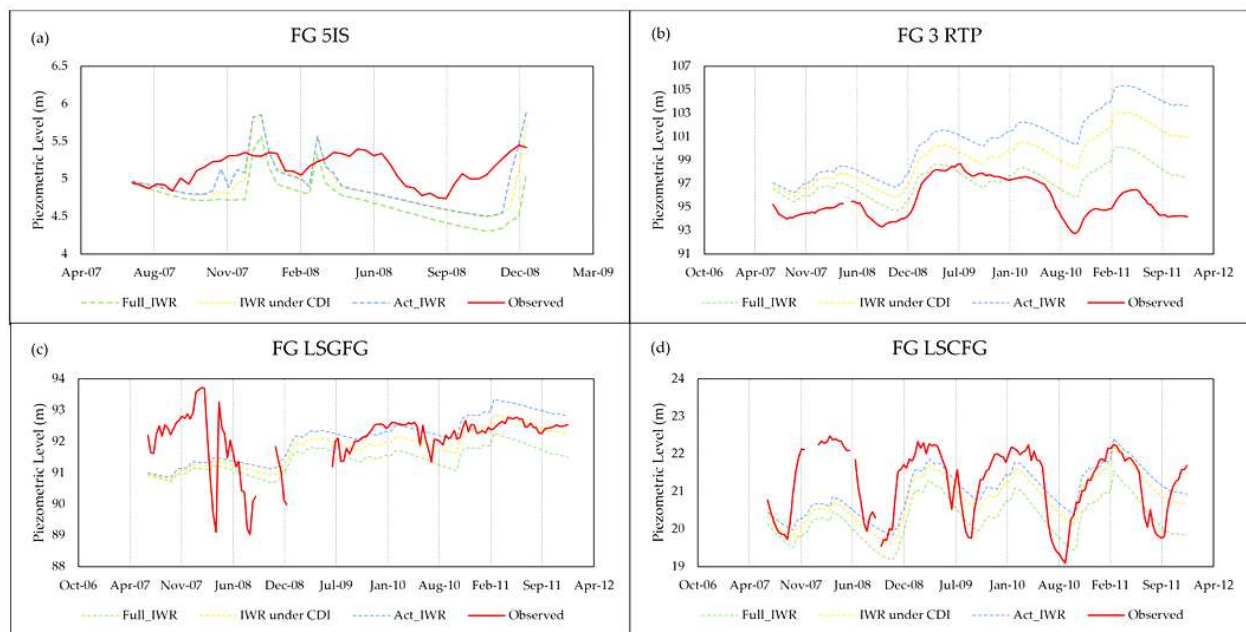


Figura 7 - Grafici di confronto tra i livelli piezometrici osservati e quelli simulati (calcolati) per ogni stazione di monitoraggio automatico in riferimento ai tre scenari di portata di pompaggio considerati, corrispondenti ai tre diversi regimi di estrazione idrica per uso agricolo, definiti sulla base dei fabbisogni irrigui delle colture nell'area di studio del Tavoliere di Puglia (Petio *et al.*, 2014).

Tuttavia, numerosi studi e osservazioni sul campo dimostrano che la componente antropica rappresenta oggi il principale motore indiretto e spesso diretto dei fenomeni erosivi che hanno provocato, nel caso

della costa adriatica, tra le città di Trani e Manfredonia (Figura 8), un cambiamento della sua morfologia a causa degli effetti dell'azione antropica (De Santis *et al.*, 2023).

In particolare, dal XX secolo, interventi come la costruzione di dighe, porti, pennelli e altre opere rigide alterano il naturale bilancio sedimentario, bloccando o deviando i flussi di sedimenti lungo la costa. Allo stesso modo, le attività di estrazione in alveo o in prossimità della foce dei fiumi, il dragaggio e la rettifica dei corsi d'acqua hanno spesso ridotto drasticamente il contributo solido fluviale, fondamentale per il mantenimento dell'equilibrio costiero.

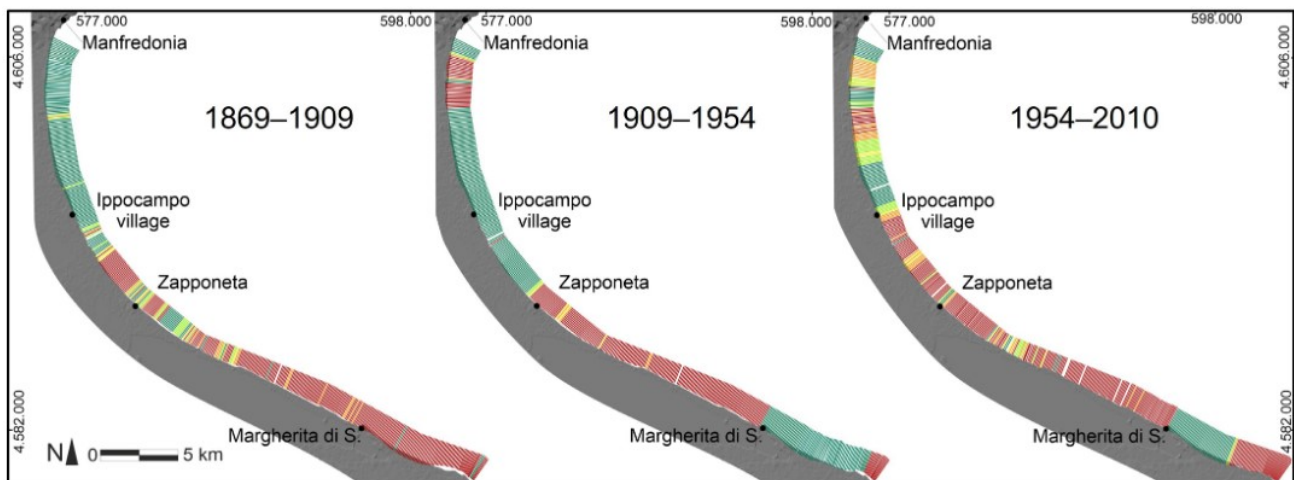


Figura 8 - Andamento delle linee di riva valutato per il settore costiero indagato nei periodi 1869-1909, 1909-1954 e 1954-2010 (De Santis *et al.*, 2023)

Dallo studio condotto da De Santis *et al.* (2018) la foce dell'Ofanto si presenta così come mostrato in figura 9 mettendo in evidenza un arretramento della linea di costa in corrispondenza della foce del fiume Ofanto rispettivamente per l'anno 1957, 1976 e 2015. Nel corso degli anni, nella zona fra Margherita di Savoia e Barletta, la dinamica del litorale, in passato regolata dall'apporto solido dell'Ofanto, è recentemente entrata in una fase di violento arretramento a causa degli importanti interventi sistematori e di regimazione del fiume.

Infatti, nell'area intorno alla foce del fiume Ofanto è stato stimato un tasso di arretramento medio di circa 2 m/anno. Si osserva la totale scomparsa della cuspidi di foce e l'arretramento complessivo dell'arco di costa prospiciente la foce.

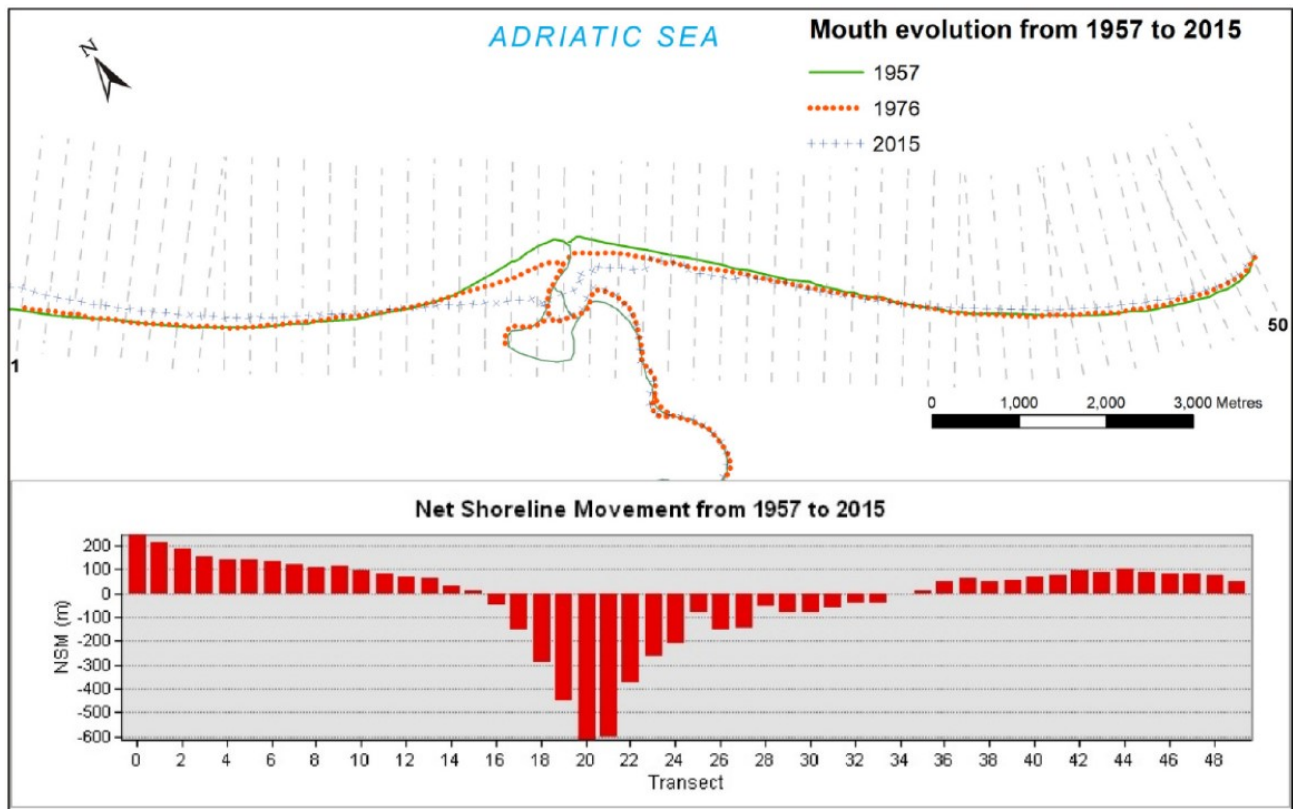


Figura 9- Linee di riva e corso inferiore del fiume Ofanto dal 1957 al 2015 (fase 5) e grafico dello Spostamento Netto della Linea di Riva (NSM) calcolato dal DSAS tra la linea di riva più antica e quella più recente. (De Santis *et al.*, 2018).

Le modificazioni antropiche recenti (villaggi turistici, pennelli, frangiflutti) hanno interrotto i processi naturali di redistribuzione dei sedimenti e si sono sommate alla diminuzione dell'apporto fluviale da parte dell'Ofanto, contribuendo a un arretramento della linea di riva di circa 200 m in 65 anni (Scardino *et al.*, 2022).

1.3.1. Inondazione da mareggiata

L'evoluzione morfologica del delta del fiume Ofanto negli ultimi secoli è stata fortemente influenzata da fattori climatici su scala sinottica, come illustrato da De Santis *et al.* (2018).

L'analisi, infatti, basata su una combinazione di fonti cartografiche storiche, immagini aeree, dati climatici e modellazione sinottica, nel ricostruire le principali fasi evolutive del delta dalla Piccola Età Glaciale (*Little Ice Age*) fino ai giorni nostri, ha evidenziato il ruolo esercitato da modificazioni climatiche su larga scala, come la frequenza e l'intensità delle mareggiate, le variazioni pluviometriche e la circolazione atmosferica atlantica ed europea.

I litorali prossimi alla foce del fiume Ofanto si caratterizzano per una morfologia estremamente bassa e pianeggiante, con quote altimetriche molto vicine al livello medio del mare. Questa conformazione rende il territorio particolarmente esposto al rischio di inondazione marina, anche in occasione di mareggiate non partico-

larmente intense. In effetti, eventi meteomarinari di intensità moderata possono facilmente causare allagamenti delle aree retrostanti la linea di costa, con conseguenti danni a infrastrutture, colture agricole e habitat naturali.

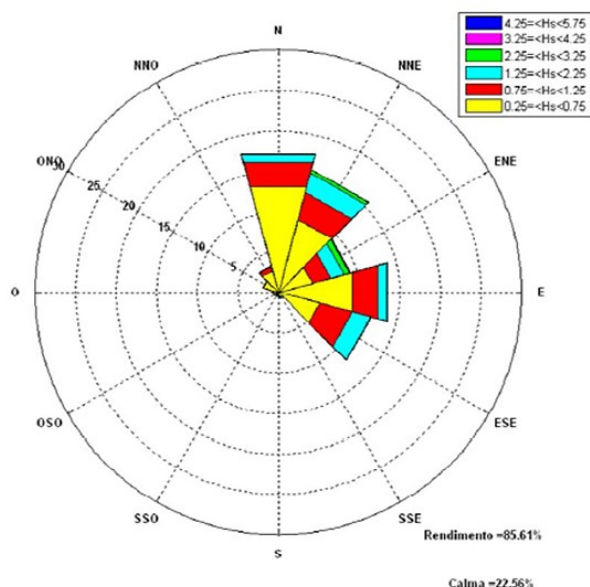


Figura 10 - Distribuzione percentuale del moto ondoso.

I dati evidenziano una prevalenza di onde provenienti dai quadranti orientali e sud-orientali, coerente con la circolazione meteomarina del basso Adriatico (Figura 10). La configurazione morfologica dell'area e la scarsa protezione naturale o strutturale hanno favorito la propagazione del moto ondoso verso terra, contribuendo all'allagamento della fascia retrodunale durante eventi meteo-marini estremi.

Tali evidenze confermano la necessità di integrare i dati di statistica del moto ondoso nella valutazione della vulnerabilità costiera e della pericolosità da mareggiate, in particolare per le zone adiacenti alla foce del fiume Ofanto.

Questa vulnerabilità è accentuata da diverse condizioni fisiche e antropiche tipiche della zona. Da un lato, la mancanza di un sistema dunale ben sviluppato o la sua frammentazione a causa di pressioni antropiche riduce significativamente la capacità di difesa naturale della costa. Dall'altro, la progressiva subsidenza costiera, combinata con l'innalzamento del livello marino, contribuisce ad abbassare ulteriormente la quota effettiva del terreno rispetto al livello del mare.

Nel contesto specifico della foce dell'Ofanto, la dinamica fluviale e quella marina si intrecciano in modo critico: da un lato, il fiume apporta sedimenti che potrebbero contribuire alla costruzione naturale del litorale; dall'altro, l'azione erosiva delle onde e l'assenza di un efficace bilancio sedimentario impediscono l'accumulo stabile di materiale. Questo equilibrio fragile comporta che ogni mareggiata significativa può produrre una regressione della linea di riva e l'ingressione superficiale delle acque marine nelle zone interne, in particolare nei tratti più depressi.

Risulta pertanto fondamentale adottare strumenti di monitoraggio, modellazione e pianificazione, orientati a valutare e mitigare il rischio di inondazione costiera, anche considerando scenari futuri legati al cambiamento climatico e all'aumento della frequenza e intensità degli eventi estremi.

1.3.2. Subsidenza costiera

Le zone costiere a bassa quota, come l'area della foce del fiume Ofanto, risultano particolarmente esposte ai pericoli marini derivanti dall'innalzamento del livello del mare, fenomeno ulteriormente amplificato dalla subsidenza del suolo, sia essa di origine naturale che antropica.

Come evidenziato da Scardino *et al.* (2022), la pianura costiera del Tavoliere delle Puglie, situata lungo il margine adriatico settentrionale della Puglia, è interessata da fenomeni di subsidenza differenziale. Questi derivano da una combinazione di movimenti tettonici di lungo termine e compattazione dei sedimenti, aggravata da attività antropiche, tra cui il prelievo eccessivo di acque sotterranee e la crescente urbanizzazione.

Per analizzare l'innalzamento relativo del livello marino (RSLR), lo studio ha applicato un approccio multidisciplinare, basato sull'integrazione di:

- Proiezioni del livello del mare, fornite dall'IPCC;
- Modelli digitali di elevazione (DSM) ad alta risoluzione, ottenuti da rilievi LiDAR;
- Movimenti verticali del suolo (VLM) misurati tramite tecniche InSAR e GNSS;
- Analisi evolutiva della linea di costa, ricostruita a partire da ortofoto storiche e immagini satellitari.

I risultati ottenuti da Scardino *et al.* (2022) sono rappresentati in maniera sintetica nella Figura 11, e forniscono un supporto cruciale anche alla presente ricerca, in quanto illustrano la distribuzione spaziale dei movimenti verticali del suolo (VLM) lungo la fascia costiera settentrionale della Puglia, e la validazione dell'analisi InSAR attraverso il confronto con i dati GNSS.

In particolare:

- ❖ la Figura 11a mostra una mappa interpolata dei tassi di subsidenza ricavati dai dati Persistent Scatterer InSAR (orbite ascendenti e discendenti), riferiti al periodo 2014–2021, evidenziando come le zone comprese tra Margherita di Savoia, Zapponeta e la foce del fiume Ofanto siano caratterizzate da VLM negativi fino a -7 mm/anno, indicativi di una subsidenza attiva e differenziata;
- ❖ la Figura 11b, invece, mostra il confronto tra le componenti di velocità misurate da stazioni GNSS e quelle derivate da InSAR proiettate lungo la linea di vista (LoS), confermando la coerenza delle stime satellitari con i dati geodetici da terra e rafforzando l'affidabilità delle correzioni applicate al modello altimetrico.

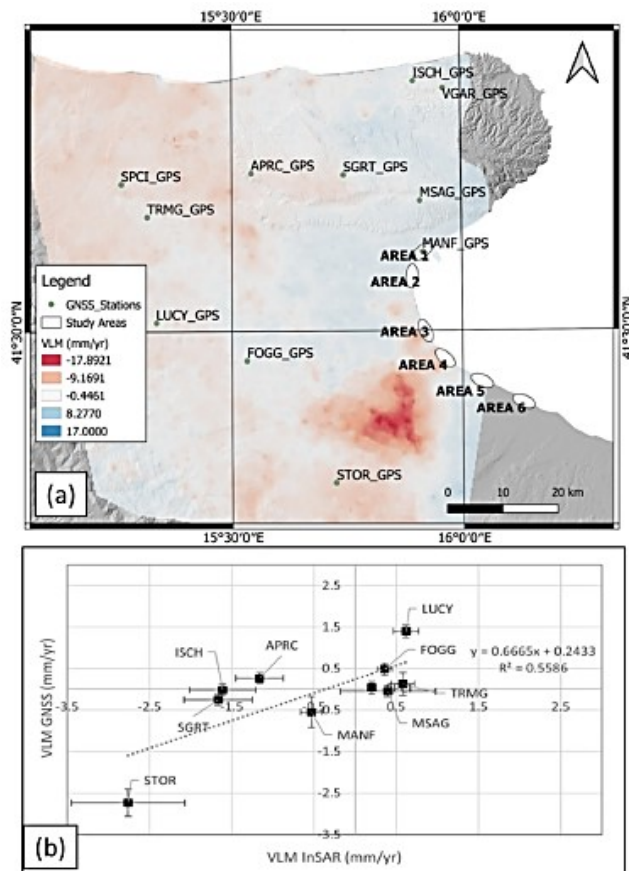


Figura 11– a) Mappa dei movimenti verticali del suolo ottenuta da dati PS-InSAR (orbite ascendenti e discendenti), interpolati su una griglia regolare a passo 250 m. Le stazioni GNSS e le sei aree rappresentative di riferimento sono evidenziate. b). Diagramma di dispersione che confronta le velocità GNSS proiettate lungo la linea di vista SAR con le corrispondenti componenti di velocità SAR. Fonte: Scardino et al., 2022, adattato da Remote Sensing.

La Tabella 4 riporta i tassi medi di subsidenza del suolo (VLM) e di variazione della linea di costa per le aree oggetto di studio.

In particolare, l'Area 6, che comprende la fascia costiera tra Margherita di Savoia e la foce del fiume Ofanto, rappresenta uno dei comparti morfologicamente più fragili del Tavoliere.

Tabella 4 – Tassi medi di subsidenza del suolo (-8VLM) tra Manfredonia e Margherita di Savoia. Fonte: Scardino et al., 2022, adattato da Remote Sensing

Study Areas	Sites	VLM Rates	Effective Shoreline Change Rate
Area 1	Manfredonia	-0.45 ± 0.25 mm/yr	-0.196 ± 0.06 m/yr
Area 2	Siponto sandy coast	-1.08 ± 0.2 mm/yr	-1.079 ± 0.32 m/yr
Area 3	Ippocampo	-7.5 ± 1.7 mm/yr	-2.983 ± 0.89 m/yr
Area 4	Zapponeta	-4.1 ± 1.5 mm/yr	-2.733 ± 0.82 m/yr
Area 5	Torre Pietra	-2 ± 1.5 mm/yr	-2.762 ± 0.83 m/yr
Area 6	Margherita di Savoia	-0.13 ± 0.08 mm/yr	-5.825 ± 1.75 m/yr

La combinazione tra subsidenza attiva del suolo (Vertical Land Movement negativi) e innalzamento eustatico del livello marino (SLR) contribuisce in modo determinante all'incremento della vulnerabilità costiera lungo il margine adriatico del Tavoliere delle Puglie, inclusa l'area compresa tra Margherita di Savoia e la foce del fiume Ofanto.

Secondo le simulazioni modellistiche sviluppate da Scardino *et al.* (2022), i movimenti verticali del suolo, stimati con tecniche GNSS e InSAR, sono stati utilizzati per correggere il modello digitale di elevazione (DSM) e valutare l'estensione potenziale delle aree allagabili fino al 2150.

Tali stime sono riportate nella Tabella 5, che evidenzia una progressiva estensione delle superfici soggette a sommersione permanente in corrispondenza di diversi orizzonti temporali (2050, 2100, 2150), in funzione dello scenario climatico considerato.

Tabella 5 - Superficie delle aree costiere soggette a sommersione permanente in diversi orizzonti temporali e scenari emissivi (SSP1-2.6 e SSP5-8.5). Fonte: Scardino et al., 2022, adattato da Remote Sensing

Study Areas	Flooding Surface SSP1-2.6 (km ²)			Flooding Surface SSP5-8.5 (km ²)		
	2050	2100	2150	2050	2100	2150
Area 1	0.114	0.325	0.418	0.147	0.772	0.906
Area 2	1.453	5.394	8.102	1.913	23.739	23.739
Area 3	0.415	3.696	6.908	0.755	20.709	22.289
Area 4	4.854	16.635	21.474	9.161	20.331	35.448
Area 5	35.735	45.615	49.171	35.736	45.615	55.071
Area 6	1.963	4.872	6.072	2.785	7.53	10.289
Total	44.534	76.537	92.145	50.497	118.696	147.742

In particolare nello scenario SSP1-2.6 (*Shared Socioeconomic Pathway 1*), che rappresenta una traiettoria di basse emissioni di gas serra, basata su politiche globali di mitigazione attiva e sostenibilità, e nello scenario SSP5-8.5, che simula uno scenario di emissioni elevate, compatibile con la continuazione delle tendenze attuali ("*business as usual*") e con una forte dipendenza dai combustibili fossili.

Entrambe le proiezioni mostrano un'accelerazione significativa dell'innalzamento del livello del mare (SLR), specialmente se non vengono attuate misure di contenimento delle emissioni. Entrambi gli scenari derivano dal Rapporto IPCC 2021 (*Intergovernmental Panel on Climate Change, Sixth Assessment Report – AR6*), pubblicato dal principale organismo scientifico internazionale per lo studio del cambiamento climatico. Il IPCC fornisce valutazioni periodiche basate su modelli climatici globali, che includono dati aggiornati su:

- temperatura atmosferica;
- livello del mare;
- feedback geofisici;
- impatti ambientali e socioeconomici.

La Tabella 5 evidenzia come nel tratto compreso tra Manfredonia e Margherita di Savoia, anche nello scenario più virtuoso (SSP1-2.6), l'estensione delle superfici allagate nel 2150 potrebbe superare i 92 km².

In assenza di mitigazione (scenario SSP5-8.5), tali superfici risulterebbero ancora più estese, aggravando ulteriormente i rischi per le infrastrutture urbane e turistiche (es. Zapponeta, Margherita di Savoia), le attività agricole litoranee e la qualità delle risorse idriche, soggette all'intrusione salina.

Dunque, per la comprensione dell'evoluzione morfodinamica dell'area di studio, la subsidenza rilevata contribuisce ad amplificare l'innalzamento relativo del livello del mare (RSLR) e, di conseguenza, ad accelerare i processi di:

- a) arretramento della linea di costa;
- b) erosione delle spiagge;
- c) perdita di funzionalità delle difese naturali e artificiali.

1.3.3. *Uso del suolo e pressioni antropiche*

Un'altra fonte di pressione è costituita dall'urbanizzazione delle aree costiere, con conseguente impermeabilizzazione del suolo e modifica delle reti di drenaggio superficiale, che alterano il regime idrologico dei bacini e riducono ulteriormente l'apporto di sedimenti. A ciò si aggiunge l'impatto indiretto del cambiamento climatico, dovuto essenzialmente alle emissioni antropiche, che contribuisce all'innalzamento del livello del mare e all'intensificazione degli eventi meteomarinari estremi. Le principali azioni antropiche che hanno modificato il trasporto solido del fiume Ofanto (L. Damiani *et al.*, 2003) sono qui di seguito elencate.

- Agricoltura e insediamenti umani: prima dell'installazione delle prime opere di regimazione delle piene, erano frequenti le esondazioni e gli allagamenti dannosi nelle aree agricole lungo il corso del fiume. Nella zona della foce, queste esondazioni si dirigevano prevalentemente verso Margherita di Savoia, a causa della particolare orografia del terreno, che vedeva la sponda sinistra del fiume generalmente più bassa rispetto a quella destra. Dopo ogni esondazione, i proprietari terrieri intervenivano per riparare gli argini e proteggere le coltivazioni. Ciascun proprietario tendeva anche a sfruttare l'occasione per bonificare una porzione più ampia di terreno, spostando i confini delle proprietà e, di conseguenza, modificando il tracciato dell'alveo fluviale.
- Riforestazione massiccia: dal 1951 al 1972 è stato realizzato un Programma Generale Continuo di Sistemazione Idraulico-Forestale e Agraria, che ha interessato un'area di oltre 1.000 km² del bacino.
- Costruzione di dighe e invasi:
 - a) Invaso di Conza della Campania, una diga in terra completata nel 1985 e in esercizio sperimentale sul fiume Ofanto dal 1992 con un volume utile dell'invaso di 63 milioni di m³ ed una capacità utilizzata annualmente per uso irriguo: 40 milioni di m³ (Fonte E.I.P.L.I.- Ente per lo sviluppo dell'Irrigazione e la trasformazione fondiaria in Puglia, Lucania e Irpinia);
 - b) Invaso Saette con una capacità totale di 3,5 milioni di m³ (Fonte E.I.P.L.I.- Ente per lo sviluppo dell'Irrigazione e la trasformazione fondiaria in Puglia, Lucania e Irpinia);
 - c) Invaso San Pietro sul torrente Osento con una capacità totale ed utilizzabile di circa 17 milioni di m³, (Fonte: Consorzio per la Bonifica della Capitanata);
 - d) Attraversamento di Santa Venere, costruito negli anni '50 sul corso principale dell'Ofanto;

- e) Invaso Abate Alonia sul torrente Rendina con una capacità totale di 22 milioni di m³ (Fonte: Autorità di Bacino dell'Appennino Meridionale);
- f) Invaso Marana Capacciotti con una capacità totale di circa 50 milioni di m³ (Fonte: Consorzio per la Bonifica della Capitanata);
- g) Invaso Locone (capacità totale: 115,3 milioni di m³).
- **Escavazione del letto fluviale:** questa attività è cominciata all'inizio degli anni '60, soprattutto lungo la sezione valliva, dove si sono potuti prelevare sabbia e ghiaia dal letto di piena. Le cavità create da queste estrazioni costituiscono depressioni locali, da cui viene continuamente asportato materiale proveniente da monte. Infatti, i porti di Margherita di Savoia e di Barletta, che racchiudono la foce del fiume Ofanto, formano un'area che già tra il 1931 e il 1954 mostrava i primi segni di notevoli trasformazioni morfologiche come mostra la Figura 12.

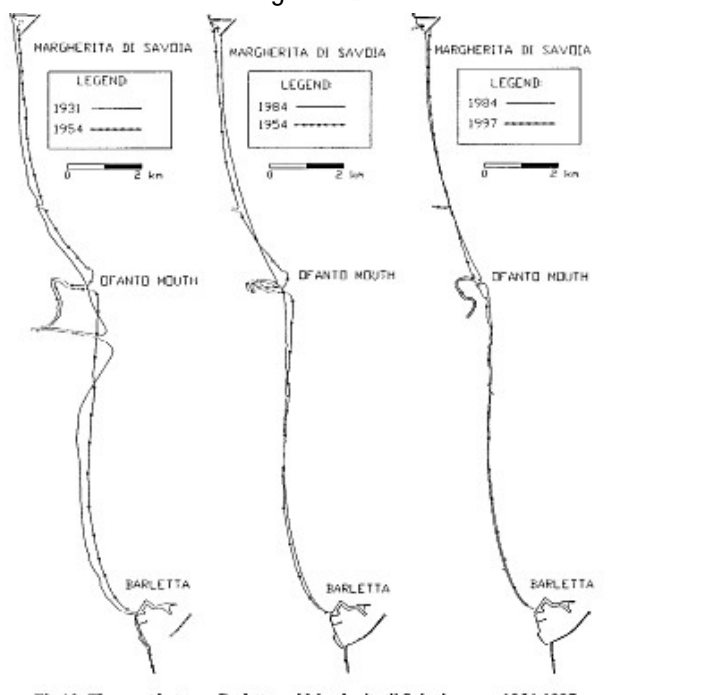


Figura 12 – La costa tra Barletta e Margherita di Savoia negli anni 1954-1997. Fonte: Damiani *et al.*, 2003.

La successione di queste attività ha modificato la forma dell'alveo del fiume, come si può osservare nella figura sottostante, dove si nota che la linea originaria dell'alveo nel 1931 portava il fiume a sfociare nel mare in corrispondenza di quella che oggi è l'area del villaggio turistico "La Fiumara". Con il tempo, il fiume è stato spostato verso ovest, formando ampi meandri (vedi Figura 13). Inoltre, si sono verificati prelievi illegali di sabbia nei pressi della foce, contribuendo così all'appiattimento dell'apice della foce stessa. Oltre alle esondazioni e alle bonifiche, anche i bombardamenti durante la Seconda Guerra Mondiale hanno avuto un ruolo nel modificare il corso del fiume (Russo, 1998), provocando la formazione di sbarramenti e costringendo il fiume a creare un nuovo corso verso il mare, vicino al tracciato precedente.

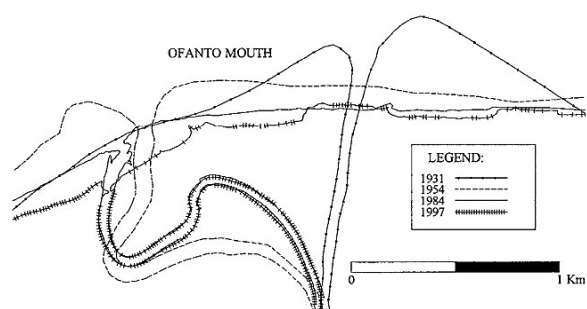


Figura 13– Evoluzione della foce del fiume Ofanto tra il 1954 ed il 1997. Fonte: Damiani *et al.*, 2003.

Opere di difesa costiera

All'interno del quadro delle pressioni antropiche che hanno interessato la foce dell'Ofanto, un ruolo significativo è svolto dalle opere di difesa costiera. Dopo gli interventi legati alla regolazione idraulica, all'agricoltura e alle attività estrattive, si è reso infatti necessario realizzare infrastrutture specificamente destinate alla protezione del litorale dagli effetti dell'erosione e delle mareggiate.

Secondo il quinto volume del Piano di Bacino, lungo il fiume Ofanto e i suoi principali affluenti sono presenti complessivamente 944 opere idrauliche. Ogni opera è descritta con la localizzazione, la tipologia e le principali caratteristiche geometriche.

La costruzione di opere rigide di difesa costiera, come pennelli e barriere (vedi Figura 14), ha interrotto la dinamica sedimentaria litoranea, producendo effetti erosivi nei tratti adiacenti non protetti (Caldara *et al.*, 1998). Il tratto compreso tra Barletta e Manfredonia, dove sfocia il fiume Ofanto, risulta essere uno dei più vulnerabili, in quanto privo di barriere naturali efficaci contro le mareggiate ricorrenti, che agiscono con particolare forza nei mesi invernali.



Figura 14– Costruzione di barriere frangiflutti in prossimità del porto di Margherita di Savoia. Fonte: Caldara *et al.*, 2006.

Tali interventi sono stati spesso realizzati in modo reattivo, ossia a seguito di eventi meteorici intensi, piuttosto che all'interno di un quadro di pianificazione preventiva. Inoltre, la scelta progettuale e tipologica delle opere ha mostrato una notevole disomogeneità, come rappresentato nella Figura 15, con soluzioni adottate caso per caso senza un'analisi approfondita delle condizioni idrodinamiche e meteo-marine locali.



Figura 15- Pennelli rettilinei costruiti tra Margherita di Savoia e Zapponeta. Fonte: Caldara *et al.*, 2006.

Questa frammentazione ha prodotto un sistema difensivo discontinuo e scarsamente integrato, in cui le singole opere risultano spesso scollegate tra loro e, in alcuni casi, inefficaci o addirittura controproducenti nel lungo termine.

Interventi di mitigazione del rischio idraulico

L'articolo 10 del decreto-legge 24 giugno 2014, n. 91, convertito con Legge 11 agosto 2014 n. 116, ed in particolare il suo comma 1, dispone che "a decorrere dall'entrata in vigore del presente decreto, i Presidenti delle Regioni subentrano relativamente al territorio di competenza nelle funzioni dei commissari straordinari delegati per il sollecito espletamento delle procedure relative alla realizzazione degli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico". Il Commissario di governo per il contrasto del dissesto idrogeologico nella Regione Puglia ha concluso nel 2023 gli interventi di mitigazione del rischio idraulico del tratto terminale del Fiume Ofanto, tra Ponte Romano (in territorio di Canosa di Puglia) e la Foce (in territorio di Margherita di Savoia e di Barletta rispettivamente in sinistra e in destra idraulica).

Tali interventi sono ricompresi tra quelli oggetto dell'"Accordo di programma finalizzato alla programmazione e al finanziamento di interventi urgenti e prioritari per la mitigazione del rischio idrogeologico", stipulato in data 25 novembre 2010 tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e l'Assessorato Regionale del territorio e dell'Ambiente della Regione Puglia (intervento BT027A/10) per un importo complessivo finanziato ex Delibera CIPE n. 8/2012 pari ad € 5.000.000,00.

L'attuazione degli interventi di cui all'Accordo stesso, ivi compreso quello di cui in progetto, rientrano nella competenza del Commissario di Governo per il contrasto al dissesto idrogeologico della Regione Puglia nominato dalla Presidenza del Consiglio dei Ministri, con il quale la Provincia di Barletta Andria Trani ha sottoscritto in data 12/03/2012 apposito disciplinare.

Lo studio dell'area di intervento è stato condotto basandosi sullo studio di fattibilità per la "Revisione delle perimetrazioni delle aree a diversa pericolosità idraulica del fiume Ofanto dal Ponte Romano alla foce" redatto dall'Autorità di Bacino della Puglia.

Le opere realizzate (vedi Figura 16) consistono essenzialmente:

- ❖ nel ripristino della quota della sommità arginale al fine di garantire un adeguato franco di sicurezza in riferimento al deflusso della piena duecentennale prevista;
- ❖ nell'allargamento degli argini per assicurare la sicurezza a filtrazione degli stessi;
- ❖ nel ripristino della sezione arginale ove questa risulti compromessa da interventi antropici;
- ❖ nella realizzazione di rampe di accesso sia alla sommità arginale che nelle aree golenali;
- ❖ nel ripristino e/o realizzazione di piste di servizio che possano garantire nel tempo una corretta e continua manutenzione degli argini stessi.

La realizzazione dei suddetti interventi, pur non modificando complessivamente l'attuale perimetrazione in termini di pericolosità idraulica così come prevista dal vigente PAI, consente di ridurre la frequenza delle esondazioni risultando pertanto funzionale alla mitigazione del rischio.

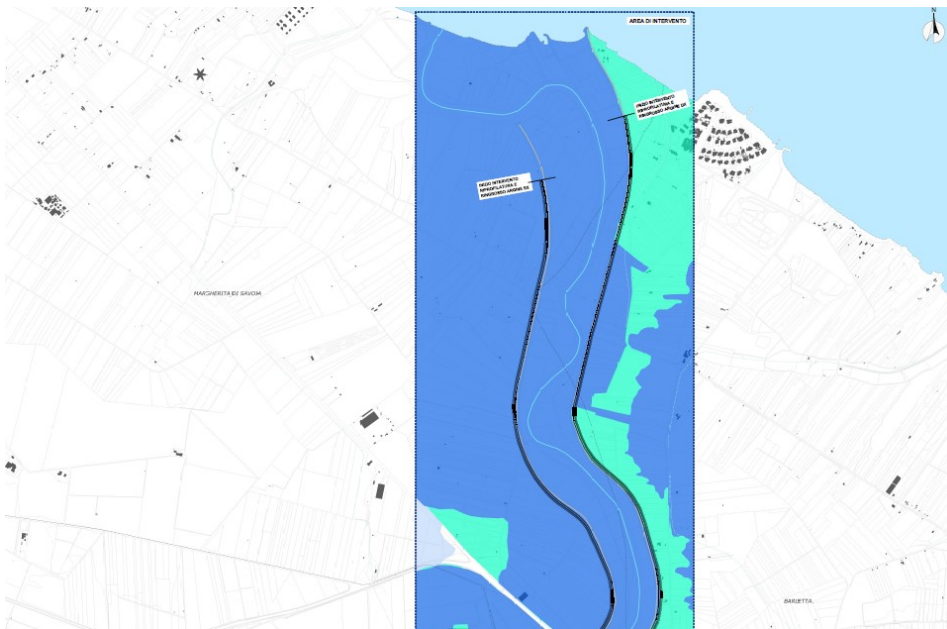


Figura 16– INQUADRAMENTO al P.A.I. (PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO) vigente degli interventi di mitigazione del rischio idraulico. Fonte: Commissario di Governo per il contrasto al dissesto idrogeologico nella Regione Puglia.

Pertanto, lo scopo principale degli interventi realizzati è stato quello di garantire la funzionalità del sistema di arginature in terra battuta, realizzato a partire degli anni '60 per il mantenimento e la ricostituzione delle condizioni strutturali di controllo delle piene, attraverso il ripristino delle situazioni di criticità rilevate.

2. MATERIALI E METODI

Il percorso metodologico seguito in questa ricerca si basa su un duplice approccio, articolato in un'analisi della dinamica costiera e in un'analisi idraulica del corso terminale del fiume Ofanto. La prima ha riguardato lo studio dei processi idrodinamici e morfodinamici che influenzano l'evoluzione del litorale, con particolare attenzione al bilancio sedimentario, alle variazioni della linea di costa e alla risposta del sistema agli eventi meteomarinari estremi. La seconda, invece, si è concentrata sulle caratteristiche idrauliche del tratto fluviale prossimo alla foce, valutando il regime idrologico e la propagazione delle piene al fine di comprendere le interazioni con il dominio marino. Per affrontare tali aspetti, sono stati impiegati modelli numerici differenti e complementari: Delft3D e XBeach per la rappresentazione dei processi costieri e delle risposte morfodinamiche, e HEC-RAS per la simulazione idraulica in moto vario lungo l'asta fluviale. L'integrazione di questi strumenti ha permesso di sviluppare una visione multidisciplinare delle dinamiche fluvio-costiere, utile ad analizzare scenari di criticità ed a individuare i potenziali effetti combinati tra piene fluviali e mareggiate. L'obiettivo atteso da questo approccio è duplice: da un lato, valutare l'equilibrio morfologico della foce e le sue tendenze evolutive; dall'altro, fornire indicazioni operative e conoscitive a supporto della gestione integrata e sostenibile della fascia costiera, con particolare riferimento alla riduzione della vulnerabilità e alla mitigazione del rischio idraulico e marino.

2.1. *Analisi dell'idrodinamica costiera*

2.1.1. *Scelta del dominio d'indagine*

La pianificazione degli interventi in ambito costiero richiede un'attenta valutazione della naturale tendenza evolutiva dei litorali, soprattutto in aree già caratterizzate da criticità ambientali e socio-economiche. A tal fine, la classificazione delle aree costiere sulla base dei principali parametri fisici e morfologici che ne descrivono lo stato attuale risulta fondamentale per individuare unità morfodinamicamente indipendenti, cui ricondurre qualsiasi ipotesi di intervento. In questo contesto, gli studi specialistici in ambito marino-costiero fanno sempre più spesso riferimento al concetto di Unità Fisiografica (UF) (Pranzini *et al.*, 2013), intesa, in senso strettamente ingegneristico, come un'unità all'interno della quale gli effetti generati dalla realizzazione di un'opera non si estendono oltre i suoi confini. In particolare, la UF identifica un tratto costiero all'interno del quale il trasporto sedimentario avviene in modo sostanzialmente autonomo e chiuso. In termini pratici, si tratta di un'area in cui i sedimenti della spiaggia — sia emersa sia sommersa — sono confinati, e in cui gli scambi di materiale con le aree adiacenti sono trascurabili o assenti. Questo isolamento funzionale implica che i processi di erosione e accumulo si autoregolano all'interno dell'unità, rendendola il livello di riferimento ottimale per qualsiasi analisi morfodinamica o pianificazione di interventi di difesa costiera.

I limiti di un'unità fisiografica sono determinati dalla presenza di elementi morfologici o strutturali che ostacolano o interrompono la continuità del trasporto lungo costa (*longshore transport*). Tali barriere possono essere naturali, come promontori rocciosi, isole, secche, canyon sottomarini, oppure di origine antropica, come porti, pennelli, dighe foranee e altre opere di difesa costiera. Una condizione necessaria affinché tali elementi fungano da effettivi limiti di una U.F. è che si estendano fino a profondità comparabili con la profondità di chiusura della spiaggia, ovvero quella oltre la quale i movimenti sedimentari indotti dal moto ondoso non sono più significativi.

Inoltre, anche un cambio marcato nella direzione della deriva litoranea (la componente dominante del trasporto sedimentario lungo costa) può costituire un limite funzionale dell'unità. In questi casi, se la direzione prevalente del moto ondoso cambia a causa dell'orientamento della costa o della presenza di ostacoli, si determina una discontinuità nel flusso sedimentario, che giustifica la delimitazione di una nuova unità.

Questo approccio, basato su una segmentazione funzionale della fascia costiera, consente di affrontare in maniera più efficace sia le analisi diagnostiche — ad esempio per comprendere le dinamiche erosive — sia la pianificazione degli interventi, che dovrebbero sempre essere concepiti e dimensionati a scala di unità fisiografica, evitando soluzioni puntuali che possono alterare l'equilibrio di sistema.

Nel campo della modellazione numerica, la definizione del dominio d'indagine inteso come "sistema di griglia" rappresenta un passaggio cruciale per la corretta rappresentazione spaziale del dominio fisico e per l'efficienza computazionale del modello. Le griglie utilizzate nei modelli possono essere distinte in due categorie principali: strutturate e non strutturate.

Le griglie strutturate sono caratterizzate da un ordinamento regolare degli elementi (celle), che può essere descritto con un sistema di coordinate a indici (tipicamente I, J, K). Questa struttura regolare consente un accesso più rapido e diretto ai nodi adiacenti, facilitando i calcoli numerici, l'implementazione dei modelli e l'interpolazione spaziale. L'utilizzo di una griglia strutturata è particolarmente vantaggioso in modelli con geometrie relativamente semplici o domini rettangolari, poiché consente una più agevole discretizzazione e una gestione efficiente della memoria.

Al contrario, le griglie non strutturate offrono una maggiore flessibilità geometrica, permettendo di adattare la discretizzazione a forme complesse o irregolari, come bacini idrografici articolati o zone costiere frastagliate. Tuttavia, in questo tipo di griglia, l'organizzazione degli elementi è meno ordinata e richiede la gestione di liste di connettività (ad esempio, elenchi di nodi e celle adiacenti), aumentando la complessità computazionale e la necessità di un maggiore controllo sull'integrità topologica della mesh.

Per la caratterizzazione morfologica dell'area di studio sono stati utilizzati differenti dataset batimetrici e topografici, selezionati in funzione della scala di analisi e della risoluzione spaziale richiesta dai modelli numerici implementati.

La topografia costiera è stata integrata mediante DTM regionale ad alta risoluzione. In particolare è stato adottato il dato LiDAR 2016 con una risoluzione di cella 2m x 2m per il rilievo topografico della parte emersa, in quanto rappresenta una delle fonti più accurate disponibili in termini di dettaglio altimetrico e copertura co-

stiera. Il dato LiDAR permette di acquisire una modellazione molto fine del terreno, risultando particolarmente utile nelle zone di transizione tra terra e mare, come spiagge, dune e aree retro-litoranee.

Mentre la batimetria offshore è stata derivata dal Digital Terrain Model di EMODnet Bathymetry (re-lease 2024), un modello batimetrico regionale che copre le aree marine europee, con una risoluzione spaziale maggiore rispetto alla griglia GEBCO, pari a 1/16 di minuto d'arco.

Esso rientra nell'ambito della European Marine Observation and Data Network (EMODnet) ed è stato sviluppato in conformità alla Direttiva Quadro sulla Strategia Marina dell'Unione Europea (Marine Strategy Framework Directive) e all'Agenda Europea per la Conoscenza Marina 2020, con finanziamento dell'Unione Europea.

La griglia batimetrica è ottenuta dall'integrazione di dataset eterogenei, comprendenti dati di rilievi batimetrici, informazioni derivate da carte nautiche e griglie composite; le aree prive di dati (gap) sono colmate mediante l'utilizzo della griglia GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), una griglia batimetrica ad alta copertura sviluppata nell'ambito del progetto internazionale Seabed 2030, promosso dalla Nippon Foundation in collaborazione con GEBCO. Il modello GEBCO è un prodotto integrato, basato su una combinazione di:

- dati SRTM15+ (che forniscono una copertura gravimetrica globale),
- dati batimetrici ad alta risoluzione raccolti da rilievi multibeam, provenienti da numerose campagne scientifiche coordinate nell'ambito del progetto.

Il vantaggio principale della griglia GEBCO risiede nella sua copertura globale continua, con una risoluzione spaziale di 15 secondi d'arco (circa 500 metri all'equatore), che la rende adatta per applicazioni su scala regionale o oceanica.

Inoltre, il dataset è accompagnato dalla Type Identifier Grid (TID), una griglia associata che assegna un valore qualitativo ai diversi punti della batimetria, indicando l'origine del dato (es. rilievo diretto, interpolazione, modello predittivo). Questo strumento è essenziale per valutare l'affidabilità locale del modello batimetrico e per supportare eventuali operazioni di calibrazione o integrazione con dati più accurati.



Figura 17- Valore batimetrico estrapolato dalla piattaforma di EMODnet ed il valore topografico del fiume Ofanto.

La batimetria dell'area di studio è stata preliminarmente elaborata in ambiente GIS e successivamente convertita in formato XYZ mediante il software Global Mapper, al fine di renderla compatibile con la suite modellistica Delft3D.

Non essendo perfettamente allineati i valori batimetrici e topografici, è stato necessario unirli e sovrapporli in maniera tale che la batimetria sia sovrapposta alla topografia come mostrato nella figura seguente (Figura 18). In particolare, dopo la riproiezione del Digital Terrain Model (DTM) nel sistema di riferimento WGS 84 / UTM zona 33N (EPSG:32633) e la definizione del corretto valore di NoData, il raster è stato esportato in formato ASCII XYZ, contenente per ciascun punto le coordinate planimetriche (X, Y) espresse in metri e la quota batimetrica (Z) espressa in metri rispetto al livello medio del mare.

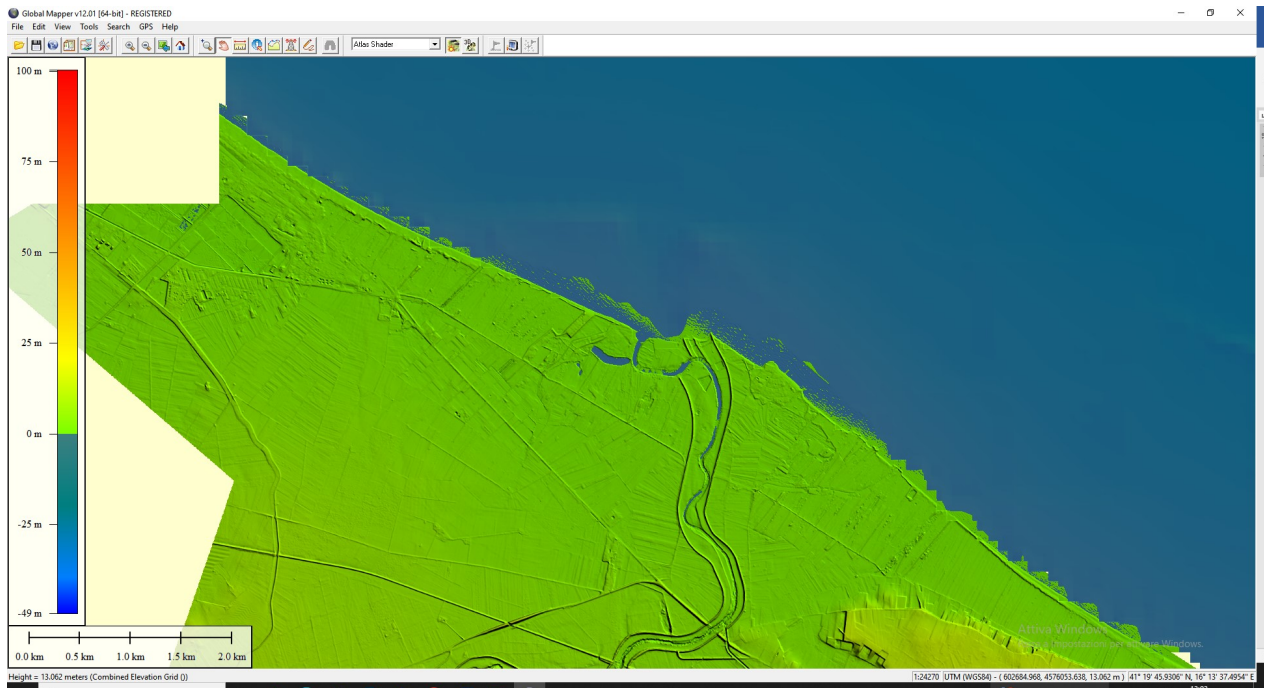


Figura 18 – Sovrapposizione della batimetria e della topografia attraverso il software Global Mapper.

Nel caso studio, è stata adottata una griglia strutturata a larga scala generata mediante il modulo RGFRID di Delft3D, un software tra i più diffusi per la modellazione idrodinamica e morfodinamica costiera. La costruzione della griglia è stata effettuata specificando una serie di parametri fondamentali:

- L'estensione spaziale del dominio: definendo l'origine della griglia nel piano (x, y), si stabilisce il punto di riferimento da cui si sviluppano tutte le celle.
- Il numero di righe e colonne (M, N): questi parametri determinano la risoluzione spaziale della griglia e quindi l'accuratezza con cui il dominio viene rappresentato.
- L'angolo di rotazione della griglia: parametro essenziale per orientare correttamente il dominio rispetto alla costa reale e all'azione delle forzanti marine. Una rotazione ben calibrata consente di ottimizzare l'allineamento della griglia con le direzioni prevalenti delle onde off-shore, migliorando la capacità del modello di rappresentare correttamente l'interazione tra onde e morfologia costiera.

Nel caso in questione è stato creato il grigliato partendo dal file XYZ ottenuto in Global Mapper. Tale procedura consente di associare alla griglia computazionale i punti batimetrici esterni, che vengono successivamente utilizzati per l'interpolazione delle profondità all'interno del dominio modellistico. I dati caricati rappresentano quindi il dataset di campionamento (samples) su cui viene eseguita l'interpolazione spaziale per la generazione del file di profondità (.dep).

L'uso di una griglia strutturata su scala ampia rappresenta un primo passo essenziale nella modellazione gerarchica multi-scala, in quanto consente di rappresentare il contesto regionale con un livello di dettaglio suffi-

ciente a includere tutte le forzanti esterne (vento, onde, marea), per poi successivamente procedere con griglie nidificate a maggiore risoluzione nelle aree di interesse specifico, come la foce dell'Ofanto.

La griglia computazionale rettangolare (Figura 19,20) a più bassa risoluzione è definita sia in termini di numero di nodi, sia in termini di dimensione fisica delle celle:

- Numero di celle lungo la direzione M (est-ovest) pari a 750;
- Numero di celle lungo la direzione N (nord-sud) pari a 550;
- Delta X ed Y che costituiscono la dimensione delle celle (dx, dy) ossia la distanza tra i centri delle celle in direzione X e Y pari a 12m.
- Coordinate estreme in X (xmin, xmax): longitudine o coordinate UTM est della griglia;
- Coordinate estreme in Y (ymin, ymax): latitudine o coordinate UTM nord della griglia.

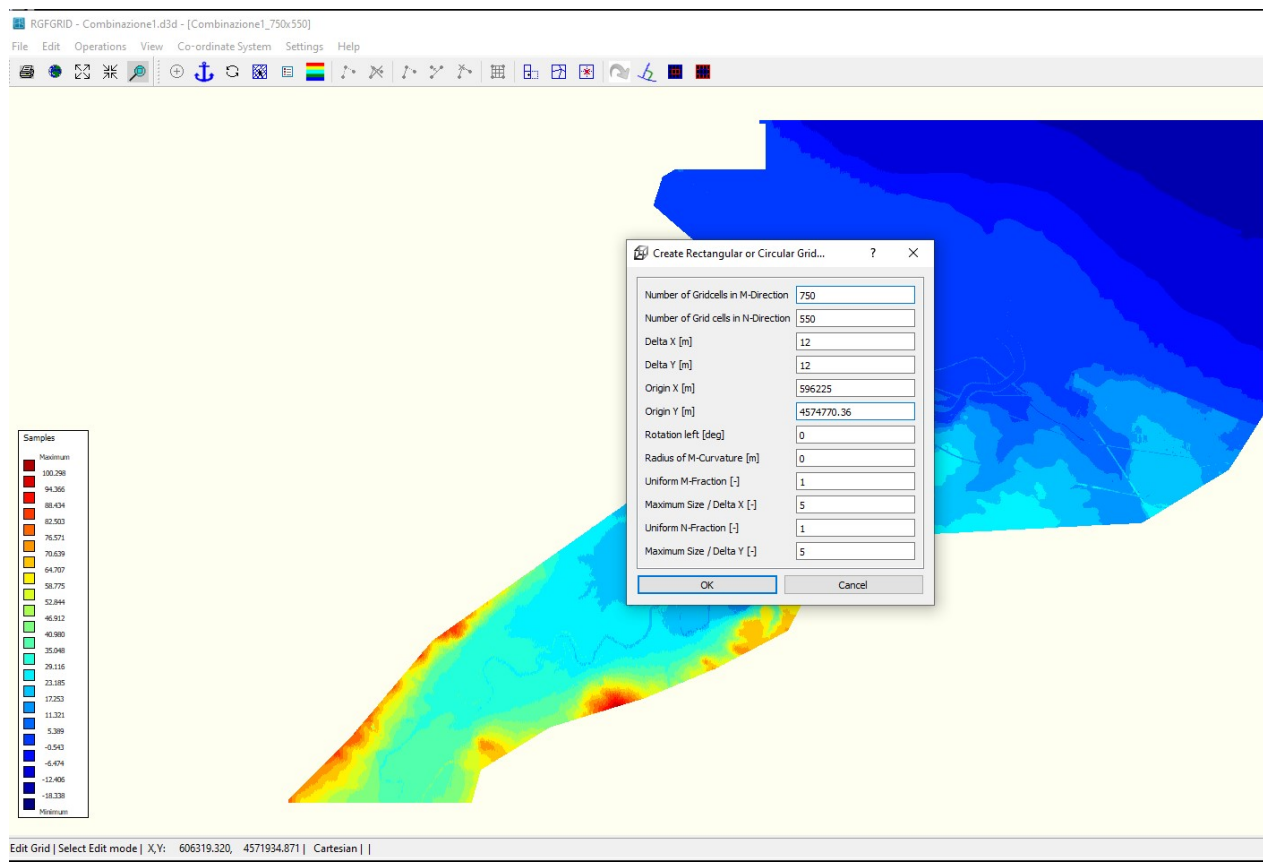


Figura 19 - Operazione di creazione della griglia rettangolare in RGFRID (griglia 770x550) adoperata in Delft3d

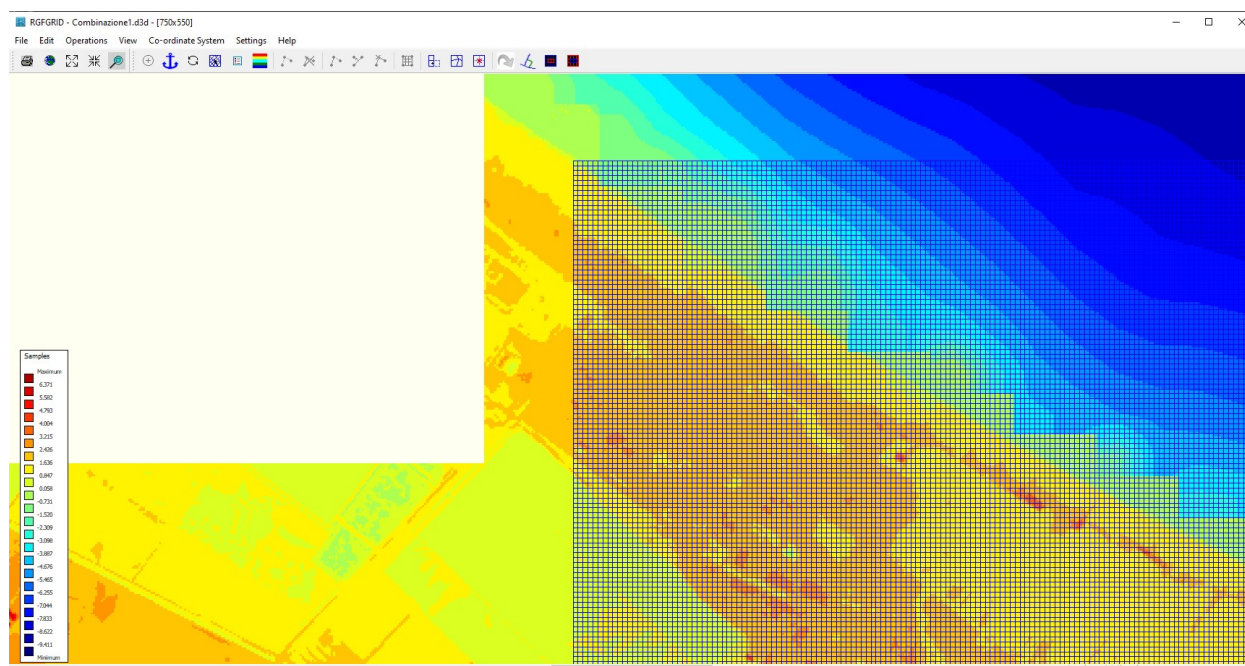


Figura 20- Griglia rettangolare a bassa risoluzione 750x550 con risoluzione griglia 12x12.

L'analisi di sensitività è stata condotta modificando localmente lo spacing delle celle nella zona di foce mediante il raffinamento locale della griglia (refine grid locally). Sono stati confrontati i principali parametri idrodinamici (livelli idrici, velocità e trasporto solido) tra la griglia originale e quella con maggiore dettaglio locale. Le differenze risultano minime con errore standard di circa 5m, confermando la convergenza della soluzione e giustificando l'uso del raffinamento locale come approccio adeguato.

Dopodichè i dati batimetrici (Figura 21) sono stati interpolati sulla griglia numerica tramite la funzione Grid Cell Averaging di Quickin, in modo da assegnare a ciascuna cella un valore medio rappresentativo della profondità.

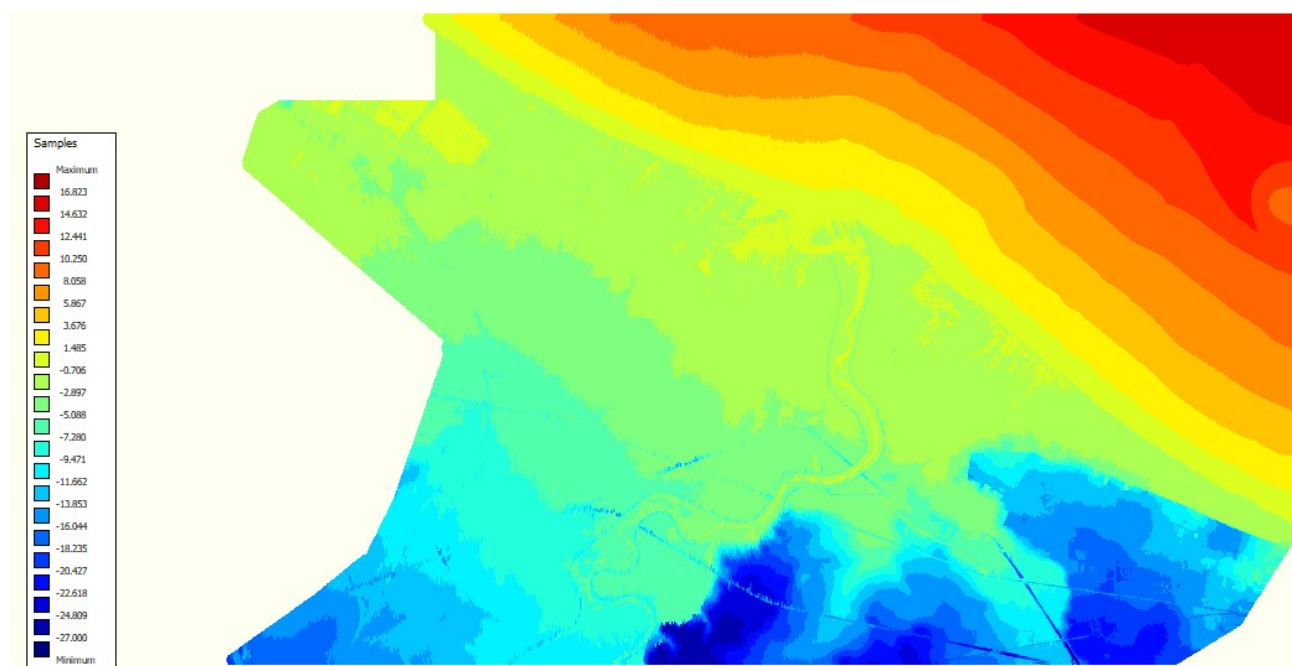


Figura 21- Interpolazione della griglia con i dati batimetrici e topografici attraverso il modulo QUICKIN del Delft 3D impiegando come metodo di interpolazione la media mobile “*grid cell averaging*”.

2.1.2. Dati per la modellazione numerica

Per l'impostazione dei modelli numerici è stato necessario reperire una serie di dataset relativi alle principali forzanti meteorologiche e oceanografiche che influenzano l'area di studio. In particolare, i dati raccolti hanno riguardato:

- *Dati morfologici e topografici*, inclusi modelli digitali di elevazione, rilievi batimetrici e cartografie storiche della linea di riva, utili per definire il dominio di modellazione e per valutare i cambiamenti avvenuti nel tempo.
- *Condizioni meteomarine*, comprendenti altezza d'onda significativa, direzione e periodo delle onde, velocità e direzione del vento, nonché il livello medio del mare, indispensabili per la simulazione dell'evoluzione morfodinamica costiera.

Il periodo di riferimento utilizzato nella seguente ricerca ricade nell'intervallo di tempo compreso tra settembre e dicembre 2019.

Per quel che riguarda i dati meteo-marini, in tabella 6 è mostrato l'elenco delle forzanti idrodinamiche, atmosferiche e oceanografiche utilizzate.

Tabella 6 – Elenco delle variabili meteo-marine utilizzate nello studio. Fonte: Data Marine Copernicus

Variabile	Descrizione	Unità	Categoria fisica
SSH	Sea Surface Height (altezza della superficie del mare)	m	Idrodinamica
10m U wind component	Componente zonale (Est-Ovest) del vento a 10 metri	m/s	Atmosfera – Vento
10m V wind component	Componente meridionale (Nord-Sud) del vento a 10 metri	m/s	Atmosfera – Vento
WIND speed	Velocità del vento (modulo di U e V)	m/s	Atmosfera – Vento
WW (wind direction)	Direzione da cui proviene il vento	gradi (°)	Atmosfera – Vento
SWH	Significant Wave Height (altezza significativa delle onde)	m	Stato del mare – Onde
VMDR	Mean Wave Direction (direzione media di propagazione delle onde)	gradi (°)	Stato del mare – Onde
MWT	Mean Wave Period (periodo medio delle onde)	s	Stato del mare – Onde
Peak Wave Period	Periodo corrispondente al picco dello spettro d'onda	s	Stato del mare – Onde

Gli anzidetti dati sono stati estrapolati dal Servizio Marino di Copernicus (Copernicus, 2024), i cui dati sono stati scaricati mediante il formato NETCDF, e dai dati di ERA 5 (Copernicus Climate Change Service, s.d.) che fanno parte del Copernicus Climate Change Service (C3S) e rappresentano una rianalisi atmosferica globale prodotta da ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) prodotta combinando osservazioni reali tramite misure satellitari, boe, navi, stazioni di rilevamento con modelli numerici (simulazioni fisico-matematiche dell'atmosfera o del mare) utili a colmare i vuoti delle osservazioni correggendo le discrepanze tra le misurazioni, con lo scopo di ottenere una ricostruzione coerente e continua nel tempo e di riprodurre uno scenario unico per ogni intervallo di tempo (vedi Figura 22 e 23).

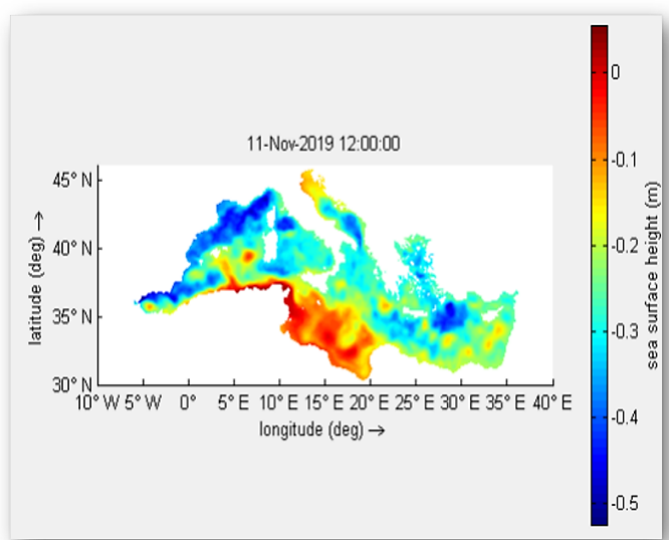


Figura 22 – Rappresentazione del dato livello medio mare dal sito del Servizio marino di Copernicus.

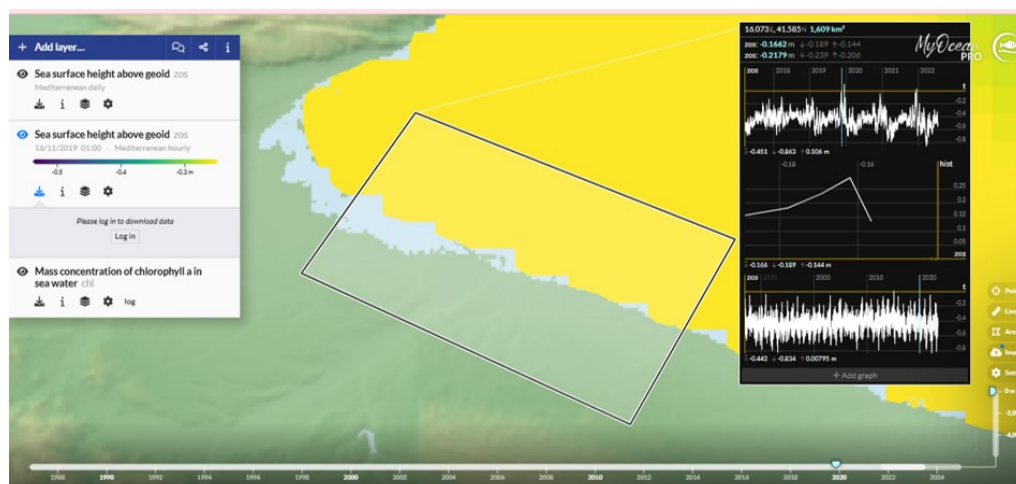


Figura 23- Area d'inquadramento scelto dai DATA MARINE COPERNICUS.

In particolare, nelle figure qui di seguito (24,25,26,27), si riportano le valutazioni quantitative adoperate relativamente alla componente di velocità del vento, alla componente direzionale del vento, all'altezza d'onda significativa, ed al periodo di picco dell'onda adoperati come dati di input delle varie simulazioni eseguite per il periodo compreso dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.

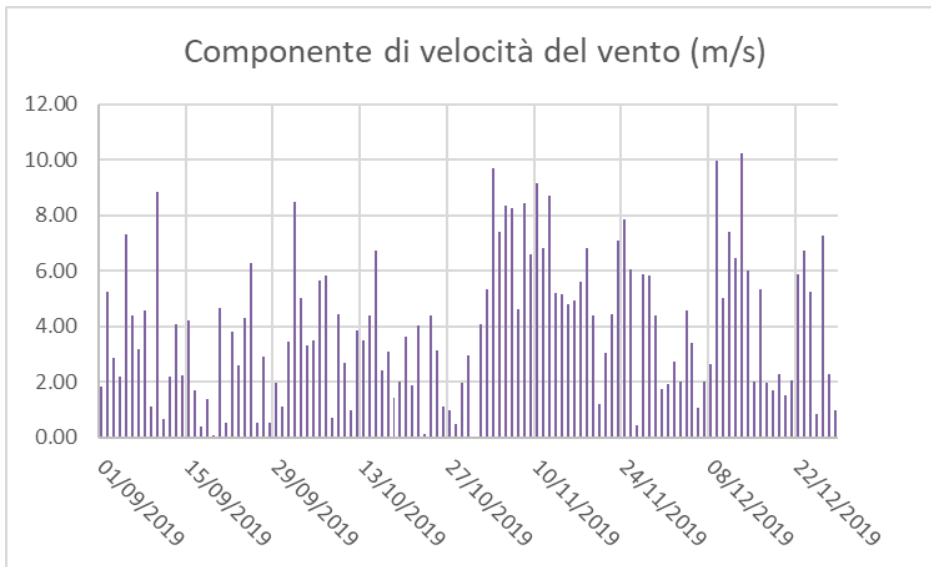


Figura 24 – Componente di velocità del vento espressa in m/s dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.

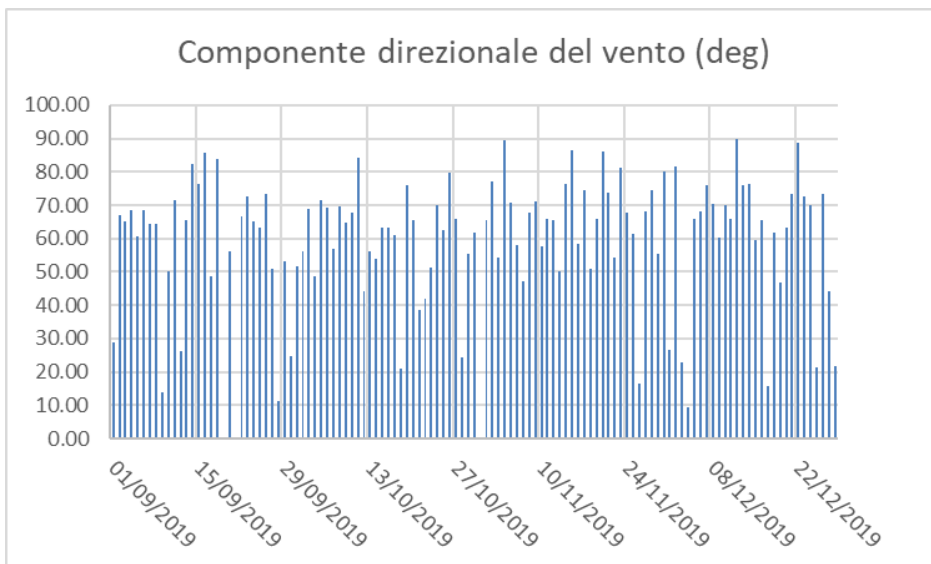


Figura 25 – Componente direzionale del vento espressa in gradi dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.



Figura 26 - Altezza d'onda significativa espressa in metri dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.

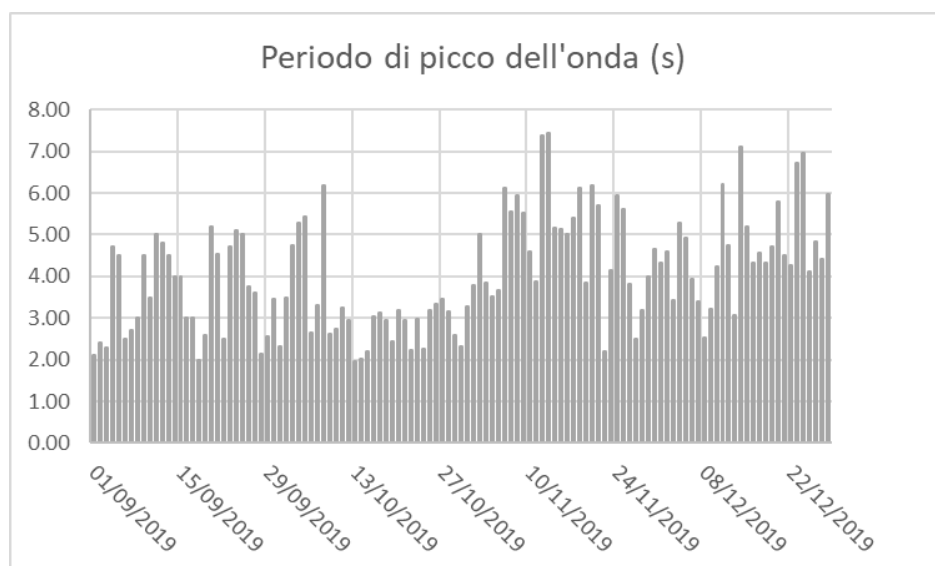


Figura 27 - Periodo di picco dell'onda espressa in secondi dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.

2.1.3. Scelta del processo

La modellazione della dinamica costiera comprende due approcci principali. Una modellazione fisica, che consiste nella costruzione di una rappresentazione in scala ridotta di un dominio costiero, utilizzando forzanti oceaniche e atmosferiche scalate per guidare il sistema e studiare i processi fisici al suo interno. La seconda tipologia di modellazione è quella matematica, che impiega metodi numerici per risolvere le equazioni matematiche relative alla conservazione di massa e momento, simulando onde, idrodinamica, trasporto di sedimenti e cambiamenti morfologici nella zona costiera.

I modelli numerici di idraulica marittima che studiano la propagazione delle onde possono essere distinti in due principali categorie:

➤ *phase-resolving models*, basati su equazioni di bilancio di massa e quantità di moto integrate verticalmente e dipendenti dal tempo. Questi modelli risolvono il livello dell'acqua (*water level*) e le informazioni verticali della colonna d'acqua. Sono in grado di rappresentare quasi tutte le trasformazioni delle onde e forniscono informazioni nel dominio temporale sull'intero dominio di studio.

➤ *phase-averaged models*, basati su un'equazione di bilancio dell'energia spettrale. Questi modelli risolvono l'equazione di bilancio dell'azione dell'energia ondosa e forniscono principalmente informazioni sulla distribuzione dell'energia delle onde.

L'applicazione dei modelli a risoluzione di fase, che richiedono da 10 a 100 passi temporali per ciascun periodo d'onda, è ancora limitata ad aree relativamente piccole (circa 1-10 km). Al contrario, i modelli a media di fase sono meno restrittivi in termini di risoluzione spaziale e possono essere utilizzati su regioni molto più estese. Inoltre, nessuno dei modelli esistenti, né a risoluzione di fase né a media di fase, considera tutti i processi fisici coinvolti. In particolare risolvono l'equazione di bilancio dell'azione dell'energia delle onde e forniscono principalmente informazioni sulla distribuzione dell'energia delle stesse.

I processi che influenzano l'energia delle onde sono:

- le fonti che la generano: le onde oceaniche acquisiscono energia principalmente dal vento che soffia sulla superficie del mare; questa energia trasferita rappresenta la fonte del sistema ondoso;
- i meccanismi che la trasportano ossia l'advezione (tasso di propagazione dell'energia verso e lontano da un luogo); l'energia delle onde non resta confinata in un punto, ma si propaga nello spazio;
- perdite dovute alla dissipazione: parte dell'energia delle onde viene persa per effetto della dissipazione, ad esempio a causa della frizione con il fondale, della rottura delle onde o dell'assorbimento da parte delle coste o delle strutture sommerse.

L'equazione di base che descrive un modello spettrale delle onde si chiama equazione di bilancio dell'azione spettrale:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

Dove

N è la densità di azione delle onde, una grandezza utilizzata nei modelli spettrali per descrivere l'energia delle onde in funzione della frequenza e della direzione, tenendo conto della variazione del livello del mare pari a:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (2)$$

in cui $E(\sigma, \theta)$ rappresenta lo spettro di varianza delle onde o densità di energia che descrive la distribuzione della varianza (ovvero la misura della dispersione) delle onde in funzione della frequenza e della direzione.

Le quantità c_σ e c_θ sono le velocità di propagazione nello spazio spettrale (σ, θ) .

Nell'equazione, la quantità:

$\frac{\partial N}{\partial t}$ rappresenta il tasso di variazione della densità di azione nel tempo;

$\frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y}$ denota la propagazione dell'energia delle onde nello spazio geografico bidimensionale, includendo l'effetto della crescita delle onde, con la velocità di gruppo che dipende dalla relazione di dispersione;

$\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}$ rappresenta l'effetto del cambiamento della frequenza radiante a causa delle variazioni di profondità e delle correnti medie;

$\frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta}$ rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalle correnti.

A tal proposito, è stata condotta un'analisi prima su larga scala, utilizzando come modello di *phase-averaged* dell'onda, il metodo di risoluzione spettrale Swan attraverso il software opensource di Delft3d e dell'interfaccia grafica di Delftdashboard, mediante:

- Valutazioni su ampia scala regionale;
- Calcolo delle condizioni costiere a partire da dati offshore.

Attraverso uno scambio diretto con l'Università degli studi di Bari, si è avviata l'attività di modellazione meteorologica-marina.

La valutazione delle superfici di inondazione per impatto da mareggiata è stata eseguita utilizzando il modello Delft 3D. Delft3D è un software open source. Si tratta di un sistema integrato di modelli matematici per la modellazione idrodinamica dei processi di trasporto, morfologici, biologici e di qualità delle acque in un generico ambiente acquatico di tipo fluviale, lacustre o costiero.

E' suddiviso in diversi moduli come da Figura 28, tra cui quelli che sono stati utilizzati nel corso della ricerca sono:

- il modulo Delft3D-FLOW per l'idrodinamica;
- il modulo Delft3D-WAVE per lo studio del moto ondoso;
- il modulo XBeach per lo studio morfodinamico.

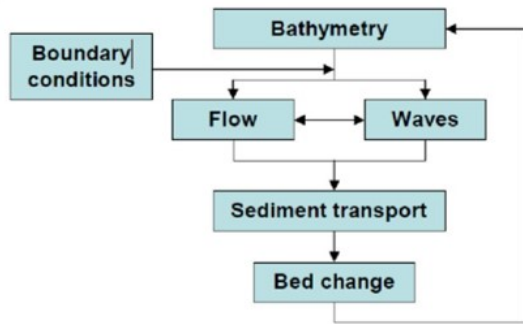


Figura 28 - Flusso concettuale del modello morfodinamico costiero

In primo luogo, per poter studiare l'evento meteorico estremo ricadente nel mese di Novembre 2019, si è deciso di analizzare il periodo compreso tra Settembre e Dicembre 2019, effettuando, per ogni settimana, una simulazione idrodinamica e ondosa accoppiata (Flow–Wave) di tipo non stazionario in Delft3D.

2.2. Analisi idraulica

La simulazione della foce del fiume Ofanto è stata condotta utilizzando il modello numerico HEC-RAS sviluppato nell'ambito del software di ingegneria idrologica "*Next Generation*" (NexGen) dell'*Hydrologic Engineering Center* (USACE). Si tratta di un sistema di modellazione idraulica che consente di analizzare il deflusso in alvei naturali o artificiali sia in regime stazionario che in moto vario, risolvendo le equazioni di Saint-Venant monodimensionali o, nelle versioni più recenti, anche bidimensionali.

Il software viene comunemente impiegato per la valutazione delle piene fluviali, la simulazione delle condizioni di inondazione, l'analisi del trasporto solido e la progettazione di opere idrauliche. Nel presente lavoro, HEC-RAS è stato utilizzato per rappresentare in moto vario il tratto terminale dell'Ofanto, con l'obiettivo di ricostruire le condizioni idrodinamiche alla foce durante eventi estremi e di valutare le interazioni con il dominio marino.

Numerosi studi hanno confermato l'affidabilità e la versatilità di HEC-RAS in contesti simili (Horritt *et al.* (2002); Di Baldassarre *et al.* 2010) evidenziandone l'applicabilità nella valutazione del rischio idraulico e costiero in aree soggette a forte pressione antropica.

In questo quadro, l'adozione di HEC-RAS per il caso studio dell'Ofanto si giustifica come scelta metodologica consolidata, in grado di fornire output quantitativi (portate, livelli idrici, velocità di corrente) utili al confronto con i risultati della modellazione costiera (Delft3D, XBeach) e di restituire una visione integrata delle dinamiche fluvio-marittime.

In questa ricerca è stato adottato un approccio monodimensionale in moto vario (1D unsteady flow), in quanto le variazioni idrodinamiche prevalenti nel tratto terminale dell'Ofanto risultano essenzialmente di tipo longitudinale, mentre le componenti trasversali e verticali hanno un'influenza secondaria rispetto alla portata totale. Tale semplificazione permette di ridurre la complessità computazionale mantenendo un elevato livello di det-

taglio nella stima dei livelli idrici, delle portate e delle velocità lungo il corso d'acqua, fornendo informazioni fondamentali per la gestione delle inondazioni e per la valutazione dell'impatto di eventi di piena.

La scelta di tale intervallo temporale si giustifica in quanto caratterizzato da un evento di precipitazione intensa che ha generato una piena significativa, coincidente con condizioni meteomarine avverse di particolare rilevanza per l'area di foce.

2.2.1. Dati di pluviometria, idrometria e di portata

Per l'impostazione dei modelli numerici è stato necessario reperire una serie di dataset relativi alle principali forzanti idrodinamiche costituite da serie storiche di precipitazioni, idrometria e portate fluviali, necessarie per caratterizzare il regime idraulico del fiume Ofanto e calibrare le simulazioni idrodinamiche.

Dopo un'attenta indagine degli strumenti di monitoraggio presenti in corrispondenza della foce del fiume Ofanto con misurazioni relative all'anno 2019, in particolare al periodo intercorrente tra settembre e novembre 2019, sono stati reperiti i dati di seguito mostrati, ottenuti grazie a interlocuzioni dirette con il Dipartimento protezione civile e gestione emergenze sezione Protezione Civile della Regione Puglia. Per i dati di pioggia il grafico della Figura 30 mostra i dati pluviometrici con aggregazione ogni 30 minuti dal 1° settembre 2019 al 31 dicembre 2019 in corrispondenza della stazione più vicina alla foce dell'Ofanto, ossia della stazione di San Samuele Cafiero, situata nel territorio di San Ferdinando di Puglia (FG) nei pressi del fiume Ofanto, ad una distanza dalla foce di 25 km circa. Quest'ultimo rappresenta un punto di monitoraggio noto nell'ambito della Protezione Civile, in particolare per il monitoraggio idrometrico/pluviometrico del bacino dell'Ofanto (vedi figura 29).



Figura 29- La figura mostra la posizione esatta della stazione di San Samuele Cafiero utilizzata per l'acquisizione delle osservazioni pluviometriche ed idrologiche.

Come si può notare, in un intervallo di tempo molto ravvicinato, si sono verificati due eventi pluviometrici ricadenti tra il 10/11/2019 ed il 13/11/2019.

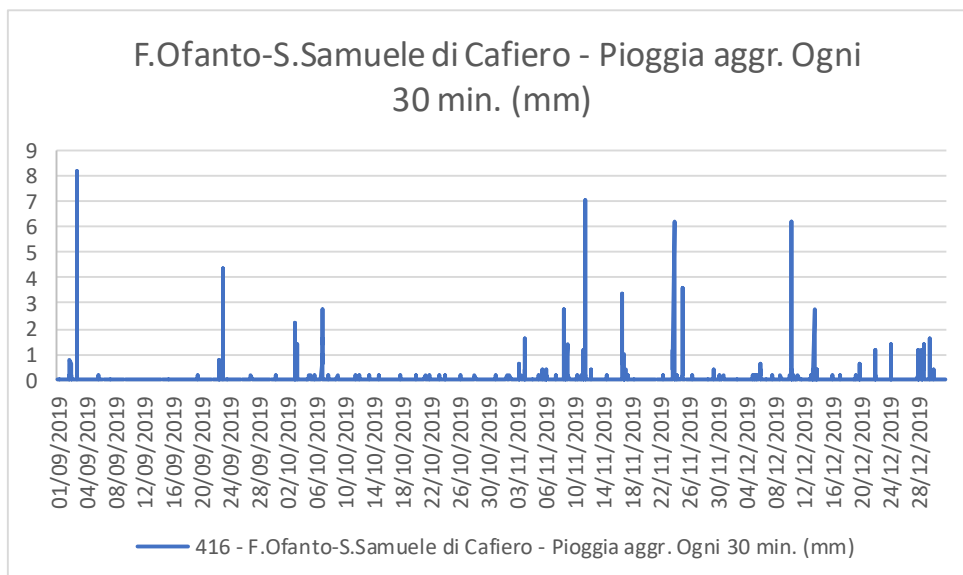


Figura 30 - Dati pluviometrici con aggregazione ogni 30 minuti presso S. Samuele Cafiero. Fonte: Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia.

In particolare le osservazioni pluviometriche giornaliere presso la stazione di S. Samuele Ca-fiero, mostrano una cumulata di 64,6 mm per un totale di 9 giorni piovosi per il mese di Novembre 2018 con un picco pari a 18,8 mm in data 12/11/2019, come mostra la figura qui di seguito, recuperati dagli Annali Idrologici – Parte I messi a disposizione dal Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia che contengono informazioni circa la termometria (sezione A), pluviometria (sezione B) e meteorologia.

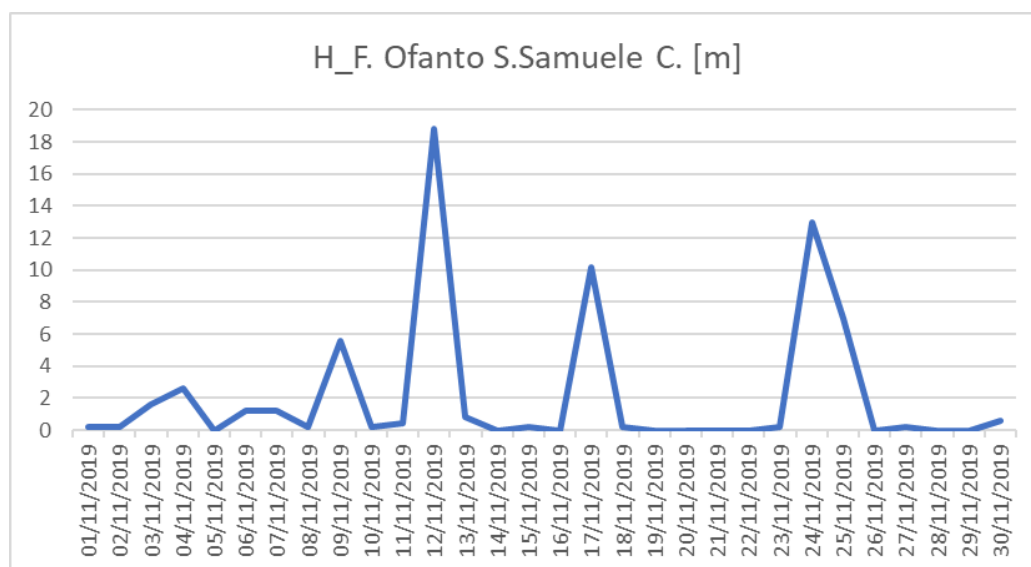


Figura 31- Osservazione pluviometriche giornaliere presso S. Samuele Cafiero. Fonte: Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia, Annale Idrologico – Parte I per l'anno 2019.

Un altro dato fondamentale è il livello idrometrico (h), che rappresenta la quota del pelo libero rispetto a un riferimento locale, disponibile in continuo (es. ogni 30 min). In Figura 32 è riportata la serie storica idrometrica rilevata presso la stazione di S. Samuele, a cui si riferiscono i dati pluviometrici con un focus sulla settimana di riferimento rappresentata nella Figura 33.

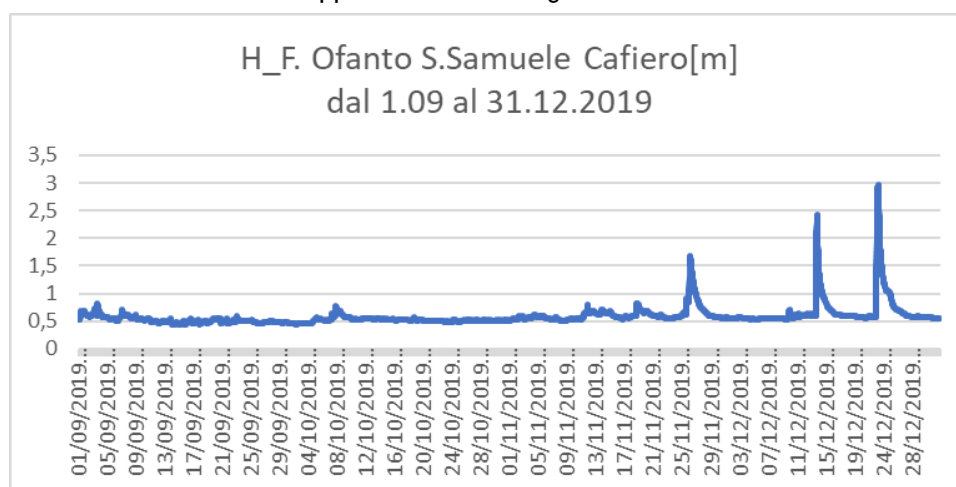


Figura 32- Livelli idrometrici presso S. Samuele Cafiero. Fonte: Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia.

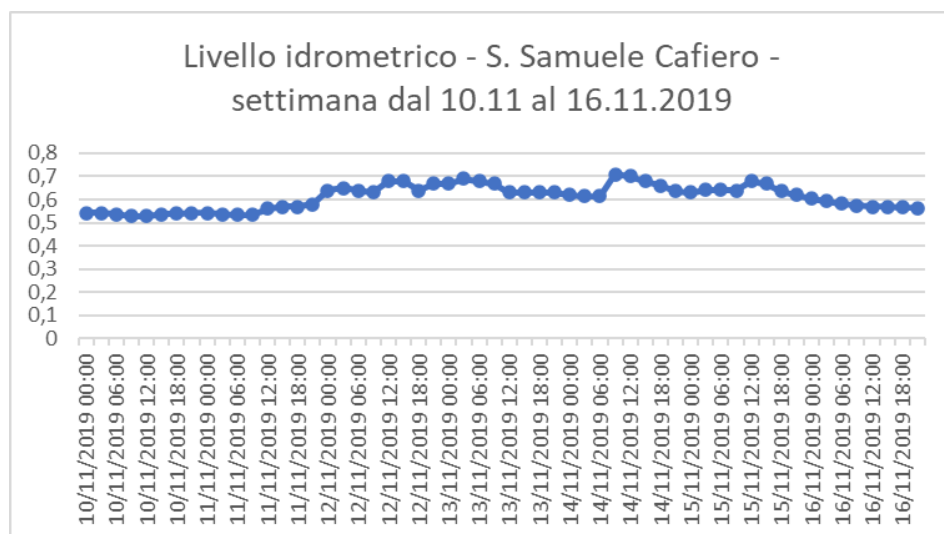


Figura 33– Focus sulla settimana compresa tra il 10 novembre ed il 16 novembre 2019.

Avendo come obiettivo quello di riprodurre quanto accaduto nel periodo di riferimento e non essendo il valore di portata del 2019 reperibile direttamente, è stato adoperato, come dato di partenza, l'ultimo dato aggiornato riferito alla scala di deflusso relativa alla stazione idrometrica di San Samuele di Cafiero (fiume Ofanto), reperibile dagli Annali Idrologici – Parte II per l'anno 2012 messi a disposizione dal Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia che contengono informazioni sugli afflussi meteorici (sezione A), idrometria (sezione B) oltre che sulle portate e sui bilanci idrologici (sezione C).

Dalla scala numerica delle portate per l'anno 2012 (vedi Tabella 7 e figura 34), è stato ricavato l'idrogramma di piena tra il 10 novembre 2019 ed il 16 novembre 2019 (vedi figura 35) avendo come unico dato fornito dal Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia, la serie storica idrometrica rilevata presso la stazione di S. Samuele per l'anno 2019.

Tabella 7- Scala numerica delle portate per l'anno 2012 estrapolata dagli Annali Idrologici – Parte II.

SCALA NUMERICA DELLE PORTATE per l'anno 2012	
Altezza H (m)	Portata Q (m3/s)
0.12	0.03
0.15	0.07
0.2	0.19
0.25	0.35
0.3	0.52
0.4	1.1
0.5	2
0.6	3.16
1	9.68
1.5	23.13
2	34.51
3	116
4	297
5.27	928

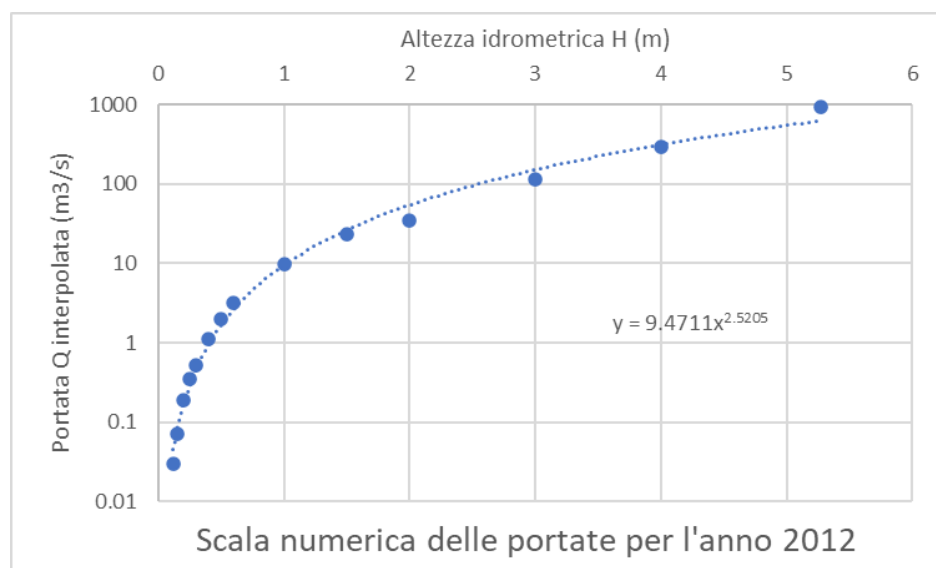


Figura 34– Rappresentazione della scala numerica delle portate per l'anno 2012

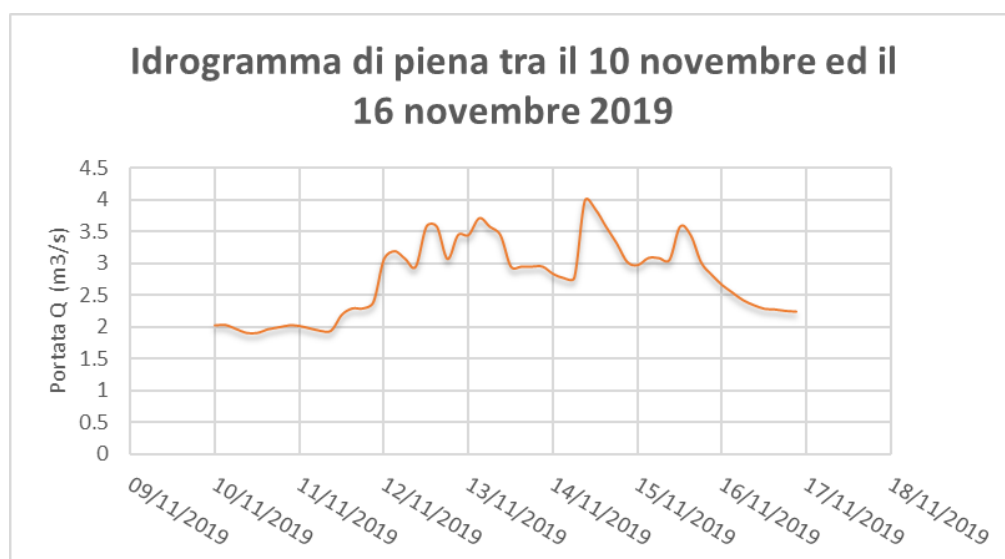


Figura 35 - Idrogramma di piena tra il 10 novembre ed il 16 novembre 2019

2.2.2. Scelta e calibrazione del modello idraulico

La simulazione della foce del fiume Ofanto è stata condotta utilizzando HEC-RAS in regime di moto variabile (*unsteady flow*) monodimensionale, al fine di rappresentare in maniera realistica le dinamiche idrauliche locali caratterizzate da portata fluviale e livello del mare variabili nel tempo. L'approccio monodimensionale è giustificato dalla prevalenza delle variazioni longitudinali rispetto a quelle trasversali, che rendono sufficientemente accurato lo studio lungo l'asse principale del fiume. In questo contesto, HEC-RAS risolve le equazioni di Saint-Venant 1D, costituite da:

a) Equazione di continuità (conservazione della massa)

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (3)$$

- A = area della sezione bagnata [m^2]
- Q = portata [m^3/s]
- x = coordinata longitudinale [m]
- t = tempo [s]
- q_l = apporto laterale di flusso [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]

Questa equazione garantisce che il cambiamento di volume in una sezione sia bilanciato dai flussi in entrata/uscita e dagli apporti laterali.

b) Equazione della quantità di moto (conservazione della quantità di moto)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f - gAS_0 = 0 \quad (4)$$

- h = livello dell'acqua [m]

- g = accelerazione di gravità [m/s^2]
- S_f = pendenza di attrito (Manning)
- S_0 = pendenza del fondo del canale

Questa equazione descrive l'equilibrio tra accelerazione del flusso, pressione idrostatica, attrito e gravità. Per entrambe le equazioni si fa riferimento al volume di controllo come da Figura 36:

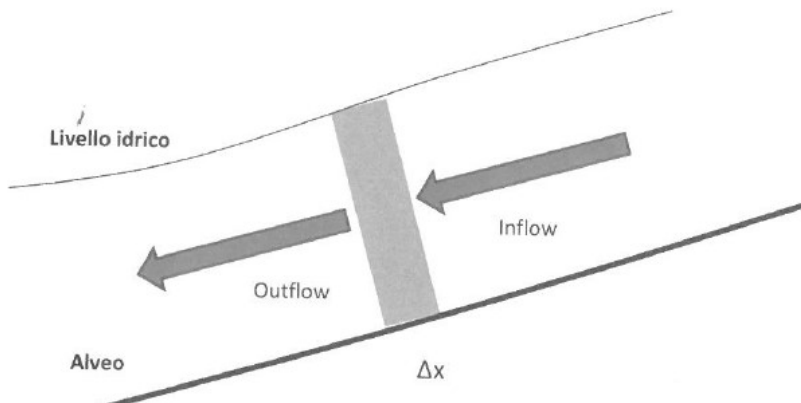


Figura 36– Volume di controllo

L'impiego di un modello *unsteady* consente di simulare in modo dettagliato la propagazione di onde di piena, le interazioni fiume-mare dovute a maree o risalite saline e la risposta del sistema a eventi idraulici transitori, fornendo output temporali di portata e livello idrico confrontabili sia con misure sul campo sia con simulazioni di altri modelli numerici, come Delft3D o XBeach.

La geometria dell'alveo nel tratto di studio è stata ricostruita mediante 35 sezioni trasversali, ortogonali alla direzione della corrente, rilevate attraverso uno specifico rilievo topografico nei punti caratteristici del corso d'acqua, corrispondenti a variazioni significative della morfologia o delle condizioni idrauliche.

Occorre precisare che il progetto di ricerca è stato nominato come "stato ante-operam" poiché l'evento oggetto di simulazione, del 2019, è antecedente alla realizzazione degli interventi di mitigazione da parte del Commissario di Governo per il contrasto del dissesto idrogeologico nella Regione Puglia, conclusi nel 2023.

Il rilievo ha interessato l'intero tratto fluviale oggetto degli interventi di mitigazione, per una lunghezza complessiva di circa 6.850 m. Le sezioni così ottenute sono state inserite nel modello idraulico, insieme agli attraversamenti principali:

- il ponte della S.S. 16 bis, localizzato alla sezione 6685.6 del modello, a valle del quale hanno inizio gli interventi oggetto di progetto;
- il ponte ferroviario, posto alla sezione 4007;
- il ponte ferroviario della S.S. 16, collocato alla sezione 2927.

Segue in Figura 37 un'immagine rappresentativa delle sezioni significative inserite nel modello con un focus sulla foce nella Figura 38 in cui si osservano le tre sezioni che, partendo da valle verso monte, sono rispettivamente la sezione 0,1 e 2.

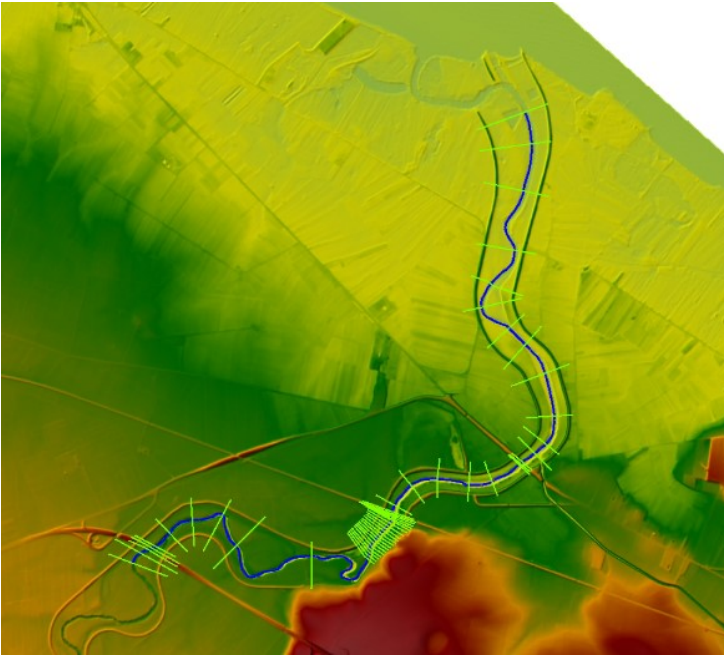


Figura 37– Rappresentazione dell'alveo del fiume Ofanto tramite il software HEC-RAS: in verde sono evidenziate le sezioni inserite tramite il comando cross section. Tra le sezioni inserite ci sono anche gli attraversamenti principali.



Figura 38– Particolare delle sezioni alla foce del fiume Ofanto tramite il software HEC-RAS.

2.3. Inondazione e allagamenti

2.3.1. Scelta del dominio d'indagine

Rispetto all'analisi della dinamica costiera che è stata condotta su una griglia a più bassa risoluzione ma più estesa (griglia 770x550), per la modellazione idrodinamica costiera più accurata e più rappresentativa del processo, è stata adottata una griglia a più alta risoluzione attraverso una griglia nidificata 200×400 (vedi figura 39) al fine di approfondire lo studio in corrispondenza della zona della foce del fiume Ofanto.

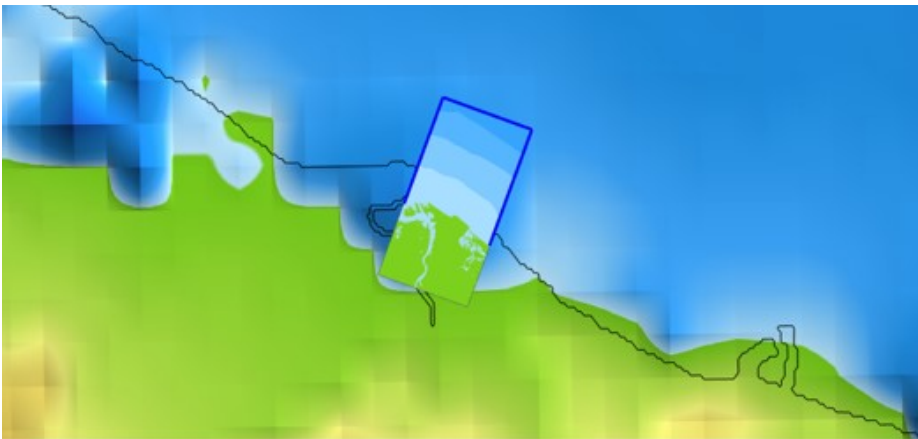


Figura 39– Griglia a più alta risoluzione (200x400) adoperata in XBeach.

La componente batimetrica di questa stessa griglia a più alta risoluzione (200×400) è stata invece ottenuta grazie ai dati forniti dall'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiana (IIM) e rielaborati secondo gli standard IHO S-44. I rilievi contemporanei dell'IIM impiegano sistemi ecoscandaglio single-beam e multibeam (MBES) che operano sul principio della propagazione delle onde acustiche. L'accuratezza della moderna determinazione della profondità dipende in modo critico dalla precisa profilazione della velocità del suono, la quale varia in funzione della temperatura, della salinità e della pressione all'interno della colonna d'acqua. L'IIM ha stabilito protocolli rigorosi per la correzione della velocità del suono, applicando formule standardizzate (Chen & Millero–UNESCO, Medwin, Mackenzie) per garantire l'affidabilità delle misurazioni.

Sono stati eseguiti i medesimi passaggi per la creazione della griglia a più alta risoluzione, come mostra la figura seguente (vedi Figura 40,41,42).

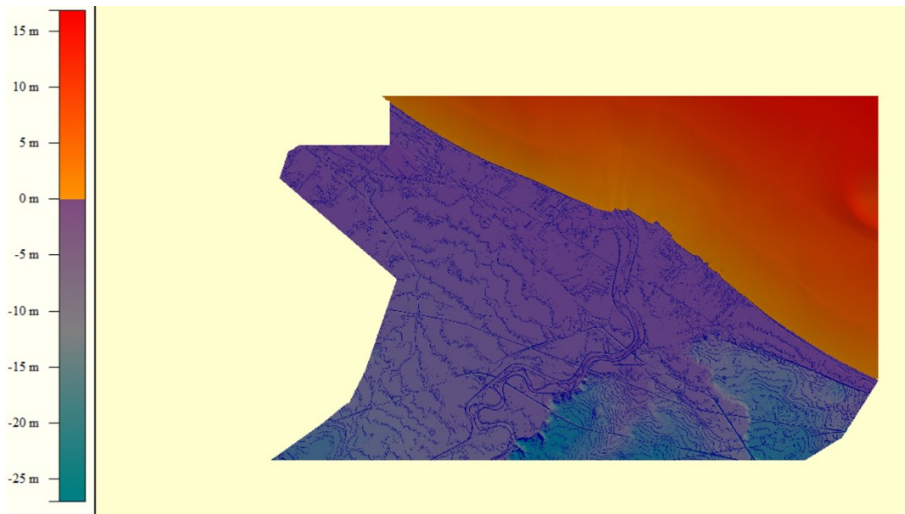


Figura 40– Merge tra componente batimetrica e topografica sulla griglia a più alta risoluzione.

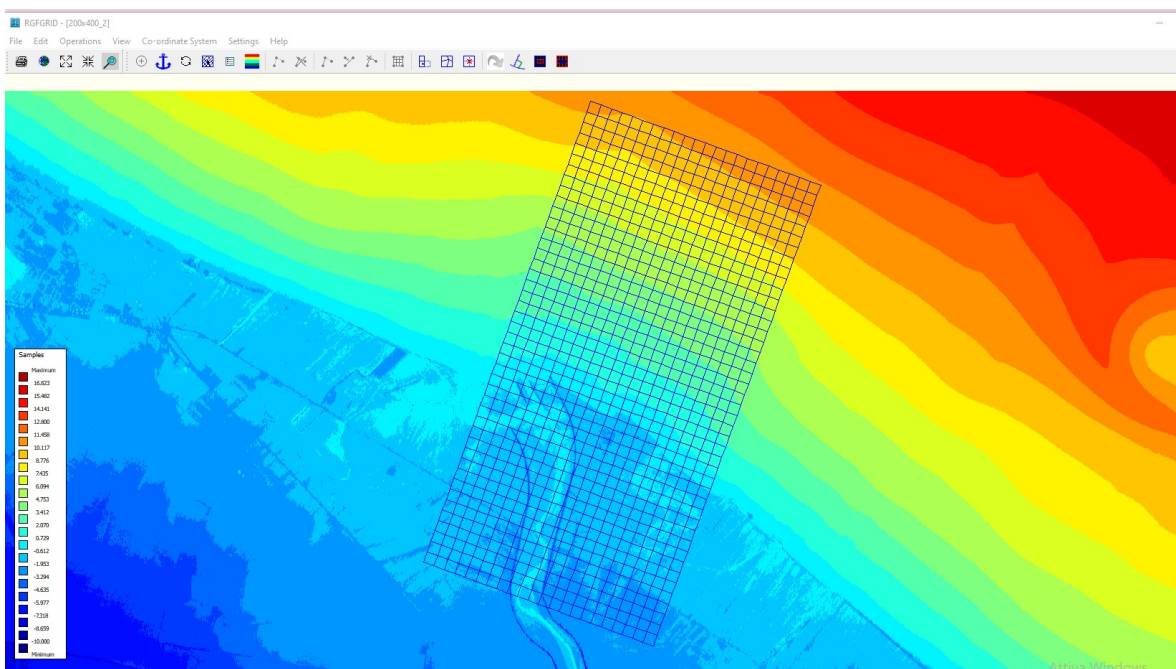


Figura 41- Rappresentazione della griglia a più alta risoluzione (200x400) in RGFgrid.

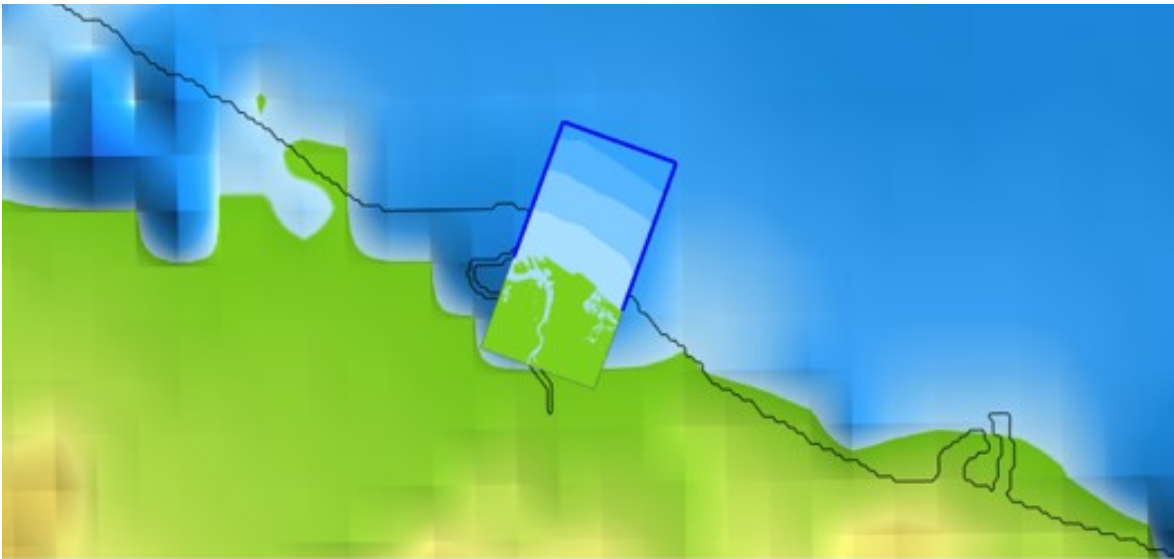


Figura 42- Rappresentazione della griglia a più alta risoluzione (200x400) adoperata in Xbeach tramite Delftdashboard.

2.3.2. Scelta del processo

Il metodo di risoluzione spettrale Swan utilizzato sulla precedente analisi della dinamica costiera su larga scala, condotta attraverso il software *open source* di Delft3D, non considera le onde singolarmente ma utilizza invece lo spettro d'onda come variabile prognostica. Per tale ragione, lo stesso non è adattabile a regioni in cui si verificano fenomeni complessi su distanze relativamente brevi, ad esempio vicino a strutture costiere, spiagge con pendenze ripide e all'interno di porti o come nel caso studio, alla foce del fiume Ofanto, dato che ha una capacità limitata nel rappresentare fenomeni fortemente non lineari, come la forte diffrazione e rifrazione attorno a grandi ostacoli.

Per tale ragione, per ottenere previsioni delle onde più accurate, è stato necessario passare al modello di *phase-resolving* dell'onda attraverso il software di modellazione costiera XBeach che fa parte dello stesso gruppo Deltares di Delft3D.

XBeach è un modello numerico che permette di riprodurre fenomeni di propagazione dell'onda, di trasporto sedimentario e di variazione del fondale, imponendo condizioni al contorno di onde variabili in termini di altezza d'onda significativa, periodo e direzione (McCall *et al.*, 2014). Il modello risolve le equazioni dell'azione ondosa e dell'idrodinamica su scala del gruppo d'onda (modalità *surfbeat*), riproducendo fenomeni chiave come il set-down. Per questo motivo, è stato considerato lo strumento più adatto a modellare i processi di interazione mare-fiume nei tratti di spiaggia prossimi alla foce, dove la morfologia ghiaiosa e la combinazione tra piene fluviali e mareggiate richiedono una risoluzione fisica più realistica rispetto ai modelli spettrali (es. SWAN).

Nella modalità utilizzata *surfbeat* (stazionaria), vengono risolte le variazioni delle onde corte sulla scala del gruppo di onde (involuppo delle onde corte) e le onde lunghe ad esse associate. Il moto a onde corte viene ri-

solto utilizzando l'equazione dell'azione delle onde, che è una forzatura dipendente dal tempo delle equazioni HISWA (Holthuijsen *et al.*, 1989.). Tale modalità permette di studiare i processi della zona di scia, valido sulle spiagge dissipative, dove le onde corte vengono per lo più dissipate quando si avvicinano alla riva, risolvendo le oscillazioni infragravitazionali, ossia le variazioni del livello del mare dovute ai gruppi d'onda, anziché le singole onde corte.

E' stata condotta una modellazione 2D, con condizioni al contorno il lato di mare aperto ed il bordo opposto verso la foce, imponendo una condizione non stazionaria nel tempo, con uno spettro delle onde di tipo Jonswap per la propagazione del moto ondoso (Hasselmann *et al.*, 1973) che consente di rappresentare realisticamente la distribuzione energetica del moto ondoso durante l'evento (vedi Figura 43).

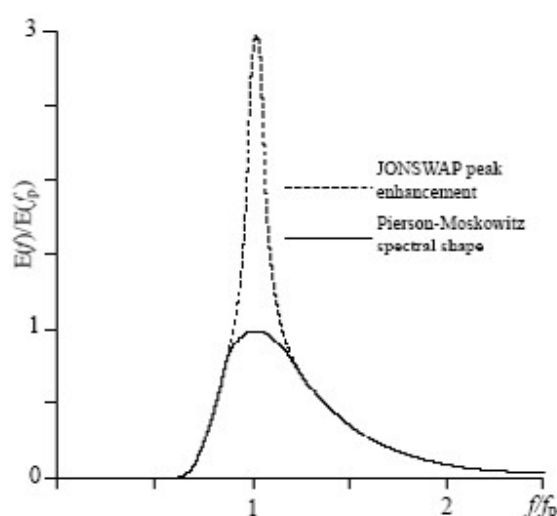


Figura 43– The JONSWAP spectrum (Hasselmann *et al.*, 1973).

Per simulare l'azione combinata del contributo fluviale e costiero, in XBeach sono stati utilizzati come dati di input i principali parametri idrodinamici derivati dai modelli precedentemente implementati. In particolare, il livello del mare e l'altezza d'onda significativa sono stati ricavati dalle simulazioni Delft3D, con riferimento alla griglia a più bassa risoluzione, mentre il valore della portata alla foce è stato ottenuto dalle simulazioni idrauliche condotte con HEC-RAS.

Il livello marino è stato introdotto mediante una serie temporale del livello idrico (*zsOfile*), che riproduce le variazioni del livello del mare durante il periodo di simulazione, includendo gli effetti combinati di marea e sovrizzo meteorologico.

Il contributo fluviale è stato rappresentato attraverso una serie temporale di portata assegnata in corrispondenza della sezione di ingresso del dominio (*discharge*), consentendo di simulare l'interazione tra deflusso fluviale e dinamica costiera in condizioni di evento combinato.

Mentre l'evoluzione del fondo è stata simulata considerando la conservazione della massa dei sedimenti e l'aggiornamento morfologico del fondale durante l'intera durata dell'evento.

Le forzanti considerate consentono di rappresentare in modo coerente l'interazione tra moto ondoso, variazioni del livello marino e deflusso fluviale, che costituiscono i principali fattori di controllo della dinamica idro-morfologica alla foce.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I. Delft3D

Dal software Delft3D, con la lettura dei dati output ottenuti per tutte le diciassette settimane come mostrate nella Tabella 8, è stata individuata come settimana più critica in quanto caratterizzata dal picco del moto ondoso registrato nella serie temporale considerata, l'undicesima, ricadente tra il 10 ed il 16 novembre 2019. Tuttavia, la selezione di tale intervallo non è stata effettuata esclusivamente sulla base dell'intensità del moto ondoso, ma tenendo conto della concomitanza delle principali forzanti idrodinamiche in cui l'interazione tra onde, livello marino e deflusso fluviale determina le condizioni più gravose per il sistema di foce. Pertanto, la settimana selezionata è stata definita "più critica" non solo in relazione al picco del moto ondoso, ma soprattutto per la sinergia tra le diverse forzanti, che amplifica il potenziale di inondazione e di alterazione morfodinamica nell'area di studio.

Tabella 8 - Elenco delle 17 settimane simulate in Delft 3D.

numero di simulazioni	tempo	numero di simulazioni	tempo	numero di simulazioni	tempo
	dd mm yy		dd mm yy		dd mm yy
1	01/09/2019	7	13/10/2019	13	24/11/2019
	02/09/2019		14/10/2019		25/11/2019
	03/09/2019		15/10/2019		26/11/2019
	04/09/2019		16/10/2019		27/11/2019
	05/09/2019		17/10/2019		28/11/2019
	06/09/2019		18/10/2019		29/11/2019
	07/09/2019		19/10/2019		30/11/2019
2	08/09/2019	8	20/10/2019	14	01/12/2019
	09/09/2019		21/10/2019		02/12/2019
	10/09/2019		22/10/2019		03/12/2019
	11/09/2019		23/10/2019		04/12/2019
	12/09/2019		24/10/2019		05/12/2019
	13/09/2019		25/10/2019		06/12/2019
	14/09/2019		26/10/2019		07/12/2019
3	15/09/2019	9	27/10/2019	15	08/12/2019
	16/09/2019		28/10/2019		09/12/2019
	17/09/2019		29/10/2019		10/12/2019
	18/09/2019		30/10/2019		11/12/2019
	19/09/2019		31/10/2019		12/12/2019
	20/09/2019		01/11/2019		13/12/2019
	21/09/2019		02/11/2019		14/12/2019
4	22/09/2019	10	03/11/2019	16	15/12/2019
	23/09/2019		04/11/2019		16/12/2019
	24/09/2019		05/11/2019		17/12/2019
	25/09/2019		06/11/2019		18/12/2019
	26/09/2019		07/11/2019		19/12/2019
	27/09/2019		08/11/2019		20/12/2019
	28/09/2019		09/11/2019		21/12/2019
5	29/09/2019	11	10/11/2019	17	22/12/2019
	30/09/2019		11/11/2019		23/12/2019
	01/10/2019		12/11/2019		24/12/2019
	02/10/2019		13/11/2019		25/12/2019
	03/10/2019		14/11/2019		26/12/2019
	04/10/2019		15/11/2019		27/12/2019
	05/10/2019		16/11/2019		28/12/2019
6	06/10/2019	12	17/11/2019		
	07/10/2019		18/11/2019		
	08/10/2019		19/11/2019		
	09/10/2019		20/11/2019		
	10/10/2019		21/11/2019		
	11/10/2019		22/11/2019		
	12/10/2019		23/11/2019		

Le simulazioni sono state condotte sulla griglia più grande a più bassa risoluzione con lo scopo di individuare tutte le forzanti marine che influenzano la costa. Di seguito sono riportati gli output per 3 istanti di tempo:

- Istante 1: ricadente l'8 novembre 2019 ore 12.00;
- Istante 2: ricadente il 10 novembre 2019 ore 12.00;
- Istante 3: ricadente il 12 novembre 2019 ore 12.00;

relativamente per:

superficie libera dell'acqua (Figure 44,45 e 46): indica la quota istantanea del livello d'acqua rispetto al datum di riferimento della simulazione. L'analisi dei tre istanti temporali evidenzia un progressivo innalzamento del livello del mare, che presenta un'oscillazione compresa tra 5 e 18 cm rispetto al livello medio locale. Tale variazione è da intendersi come il risultato combinato delle componenti meteomarine, includendo principalmente il contributo del set-up meteorologico (storm surge) e, in misura minore, la componente astronomica, che nel basso Adriatico risulta generalmente contenuta.

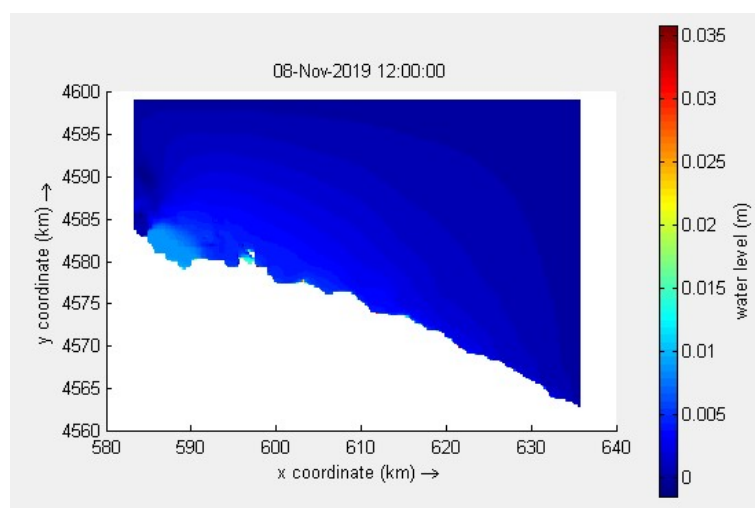


Figura 44– Superficie libera dell'acqua - Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.

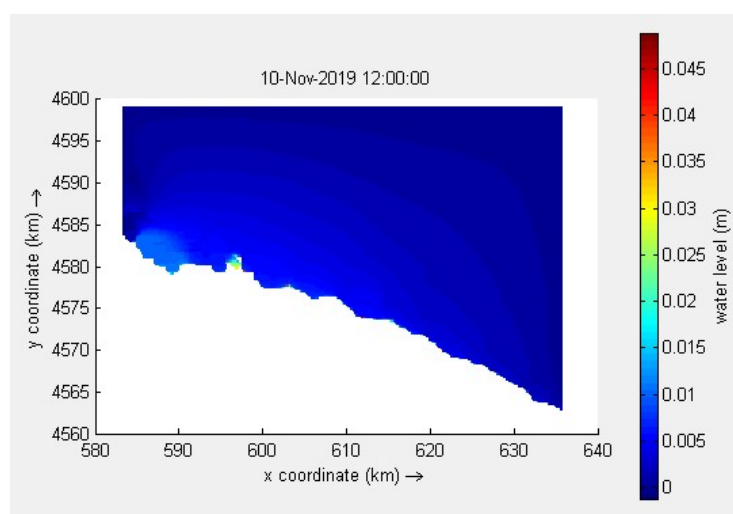


Figura 45- Superficie libera dell'acqua - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.

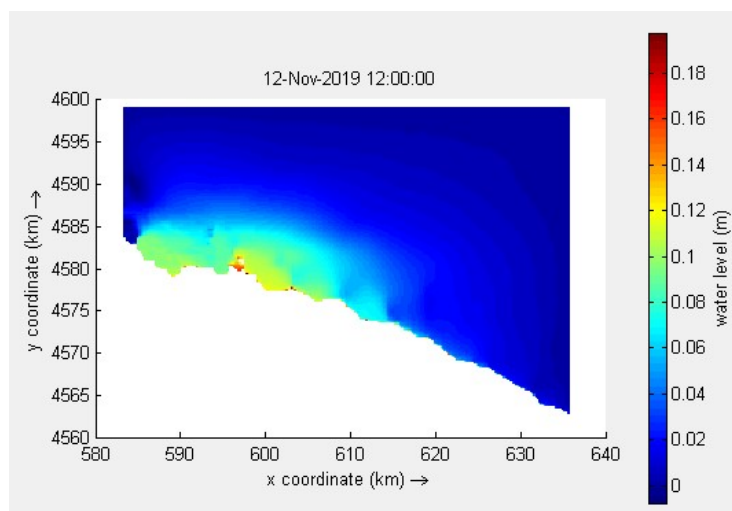


Figura 46 - Superficie libera dell'acqua - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.

A tal proposito si può osservare, dalla Figura 47, che il tempo di ritorno associato a tale anomalia del livello medio evidenzia che le oscillazioni considerate nello studio (5–18 cm) risultano significativamente inferiori rispetto anche agli eventi con tempo di ritorno annuale, collocandosi quindi nell'ambito di condizioni frequenti. Dunque i valori considerati non rappresentano condizioni estreme associate a specifici tempi di ritorno elevati (es. 50 o 100 anni), bensì condizioni osservate o ricostruite nel periodo analizzato, caratterizzate pertanto da una frequenza relativamente elevata (tempi di ritorno brevi).

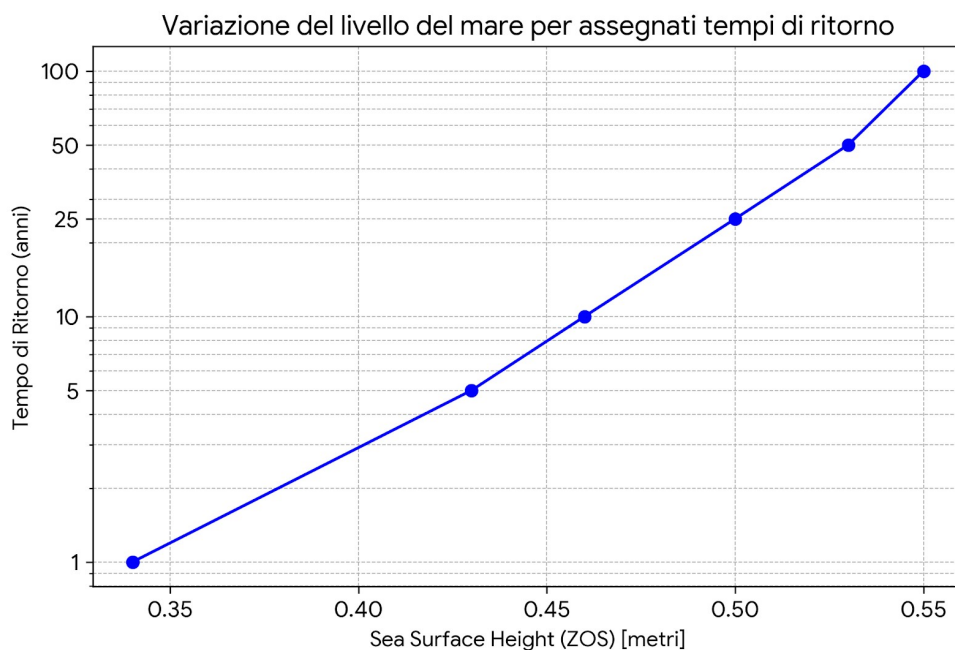


Figura 47– Variazione del livello del mare per assegnati tempi di ritorno.

Pertanto, la settimana selezionata è stata definita “più critica” non solo in relazione al picco del moto ondoso, ma soprattutto per la sinergia tra le diverse forzanti (onde, livello del mare e portata fluviale), che configura un evento composito in grado di amplificare il potenziale di inondazione e le dinamiche morfodinamiche nell’area di foce.

b) Altezza dell’onda significativa (*Hsig wave height*) (Figura 48,49 e 50): definita come la media del terzo delle onde più alte in un determinato intervallo temporale. Benchè non sia l’altezza massima, risulta essere la più usata per descrivere lo stato del mare e dimensionare strutture marittime.

Si osserva un aumento dell’altezza d’onda in prossimità della foce del fiume, con valori che crescono da circa 0,30 m fino a 0,65 m. Questo incremento è da mettere in relazione sia con l’interazione onda-corrente che con le condizioni batimetriche locali, che modulano l’energia ondosa in ingresso.

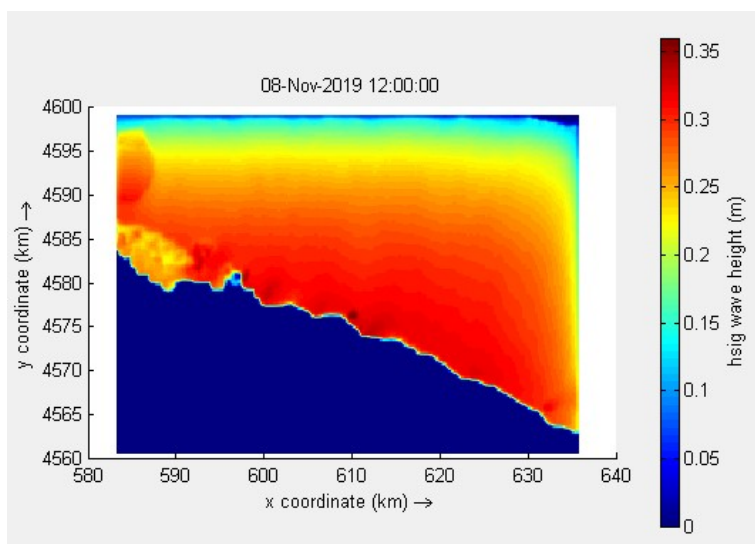


Figura 48– Altezza dell’onda significativa - Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.

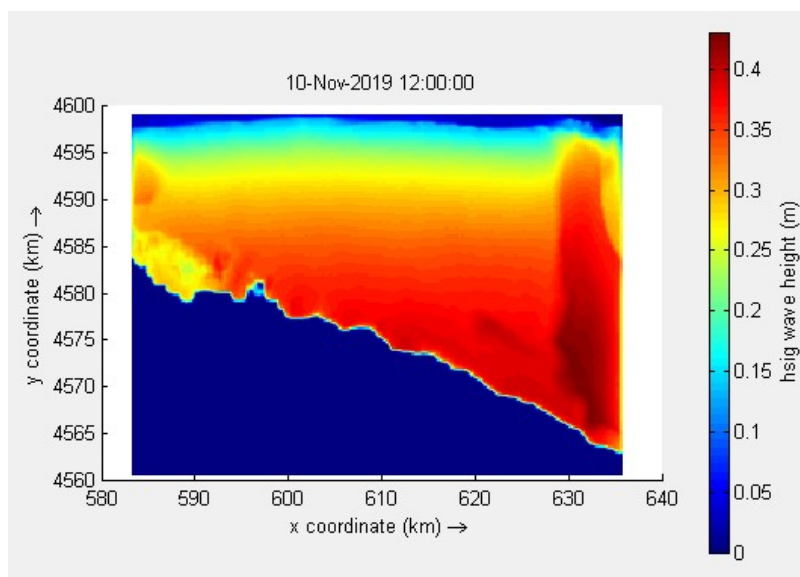
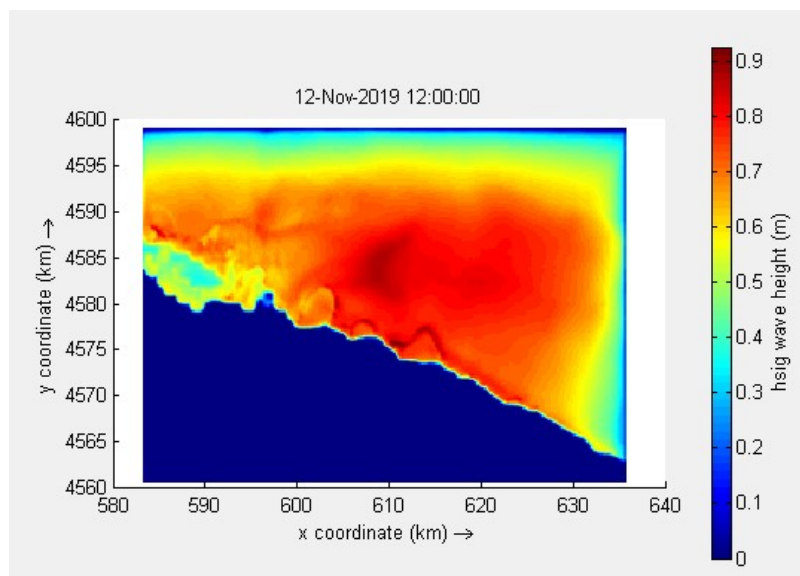


Figura 49- Altezza dell'onda significativa - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.



50- Altezza dell'onda significativa - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.

Anche in questo caso, dal grafico seguente (Figura 51), si può notare una crescita da 2,6 m a 4,4 m considerando un periodo di picco di 100 anni; per cui i valori osservati risultano inferiori rispetto ai livelli associati a tempi di ritorno annuali ed estremi.

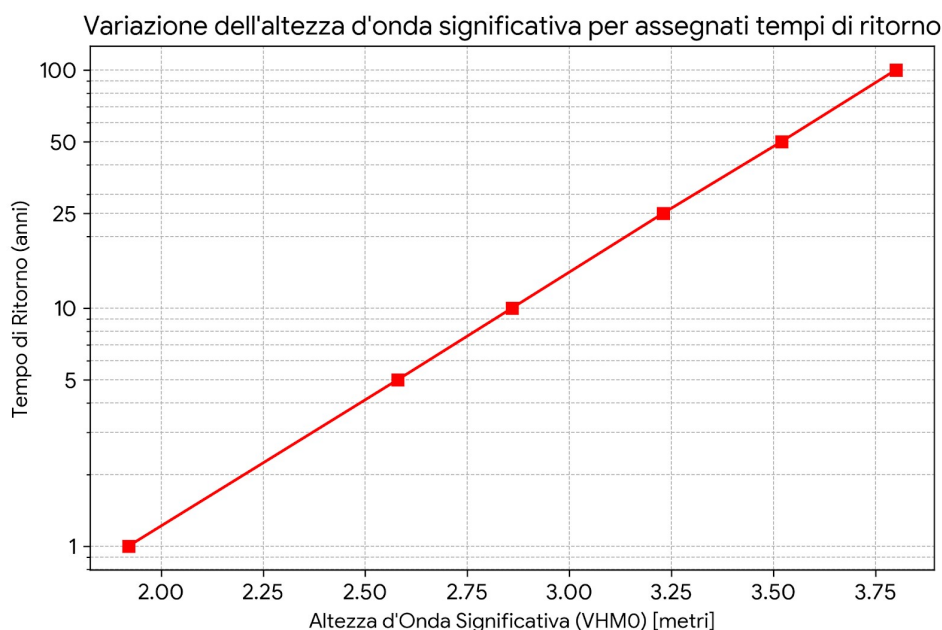


Figura 51– Variazione dell'altezza d'onda significativa per assegnati tempi di ritorno.

- c) Periodo di picco (Figure 52,53 e 54): è il periodo delle onde più energetiche in un determinato stato del mare, corrispondente al picco di energia nello spettro delle onde. Indica il tempo tra le creste delle onde più significative, che siano onde generate localmente dal vento o swell (onde più lunghe e distanti). Un periodo di picco elevato è generalmente associato a sistemi di swell dominanti, mentre un periodo più basso suggerisce la predominanza di onde generate dal vento.

Il periodo di picco mostra un trend crescente tra l'8 e il 12 novembre, passando da 2,5 s a 3 s, con picchi locali che raggiungono valori fino a 4 s. All'interno di questo trend temporale, si osserva però una marcata eterogeneità spaziale, particolarmente evidente nella giornata del 12 novembre, con valori che variano sensibilmente tra la zona di riva e quella più al largo.

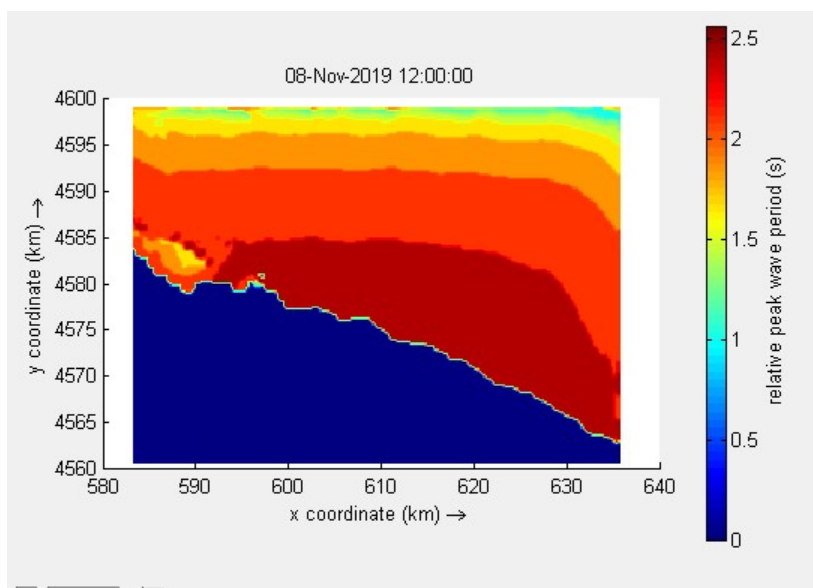


Figura 52 – Periodo di picco - Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.

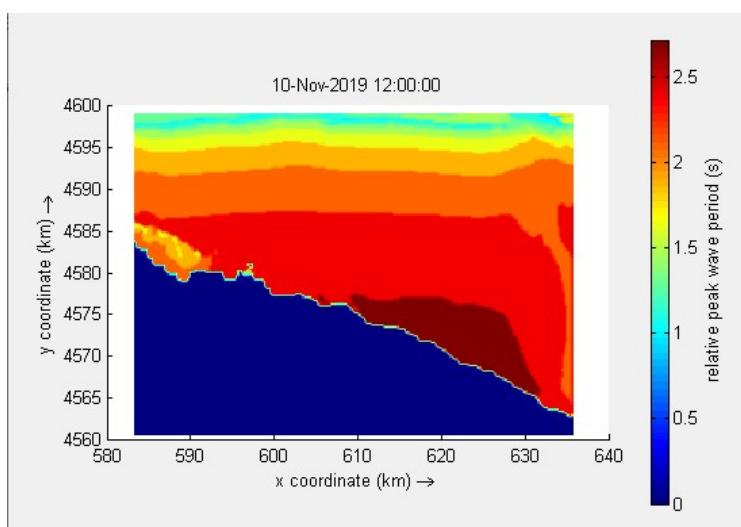


Figura 53- Periodo di picco - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.

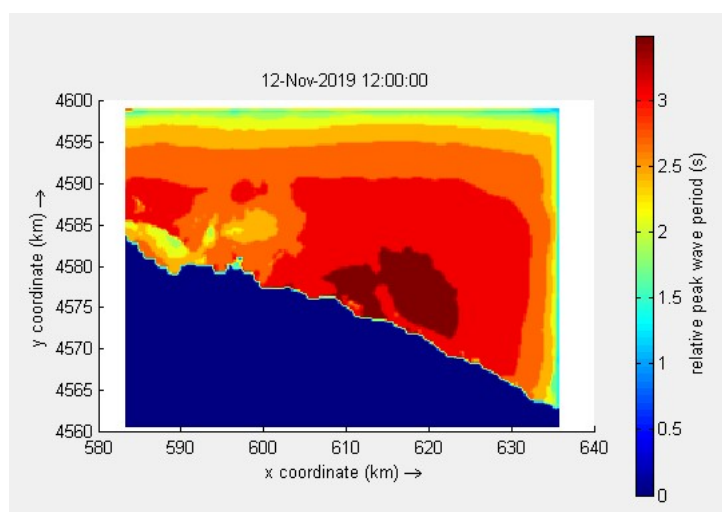


Figura 54- Periodo di picco - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.

II. HEC-RAS

In generale, dalle simulazioni idrauliche in regime di moto vario effettuate risulta che, nello "stato ante-operam", l'argine assume il seguente profilo idraulico, come si evince dall'andamento longitudinale rappresentato dall'immagine di cui alla Figura 55. Tale profilo evidenzia un progressivo innalzamento del livello idrico lungo il tratto modellato, con variazioni locali associate a discontinuità geometriche e condizioni al contorno. In prossimità della foce si osserva un effetto di rigurgito che influenza significativamente la propagazione della piena, determinando un aumento del tirante idrico e una riduzione della pendenza della linea di energia.

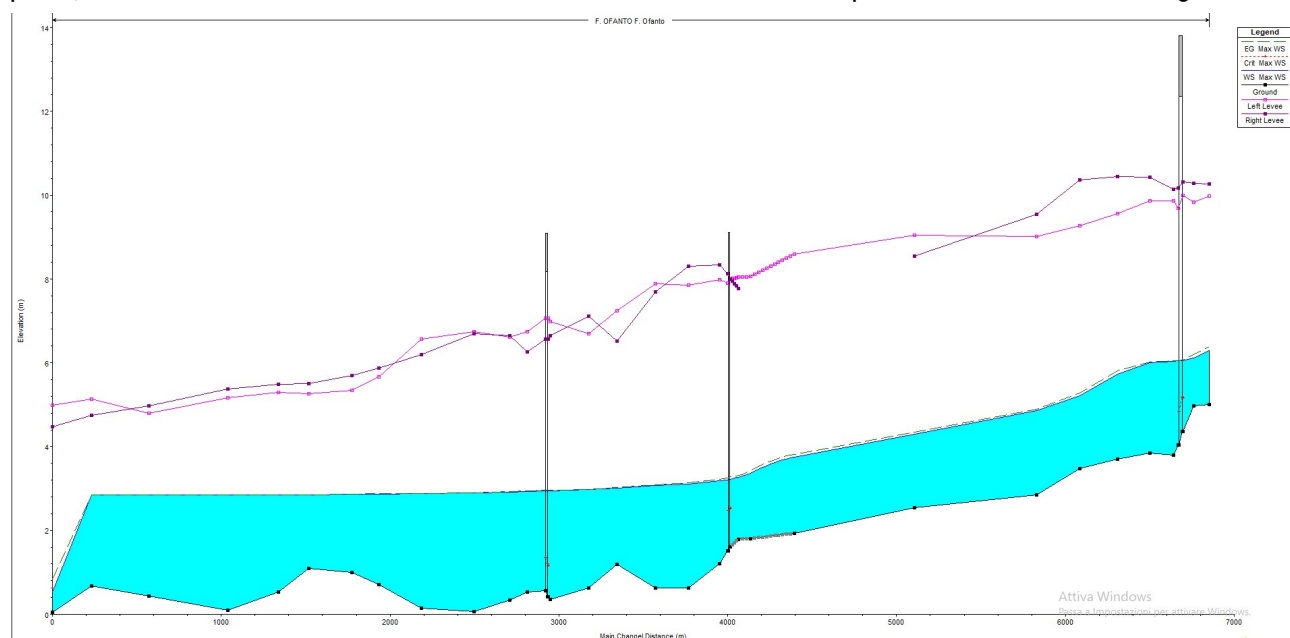


Figura 55– Andamento longitudinale nello stato ante-operam lungo il fiume Ofanto estrapolato dal modello HEC-RAS.

In particolare come condizione a monte, è stato imposto un idrogramma di portata “flow hydrograph” che rappresenta la variazione della portata in funzione del tempo. Tale dato è stato ricavato partendo dalla scala afflussi- deflussi per l’anno 2012 da cui, avendo come unico dato di input per il 2019, il livello idrometrico, è stato ricavato l’idrogramma di piena per il 2019.

Al limite a valle è stata definita una condizione di Normal Depth, che corrisponde alla profondità di moto uniforme calcolata mediante la formula di Manning. Questa scelta consente di impostare un riferimento per la superficie libera in assenza di dati idrometrici diretti a valle. In particolare si trascura l’influenza dell’idrodinamica costiera sul deflusso fluviale poichè non di interesse per la finalità del lavoro.

Tale condizione, in regime di moto uniforme, richiede la definizione della pendenza della linea dell’energia denominata “friction slope”, parametro che rappresenta la perdita di carico per attrito lungo il corso d’acqua, motivo per cui tale pendenza è pari alla pendenza al fondo.

La stima della friction slope è stata effettuata sulla base delle caratteristiche morfologiche del tratto terminale del fiume Ofanto, caratterizzato da un alveo particolarmente ampio (circa 400 m) e da pendenze molto ridotte tipiche delle zone di foce. Considerando un coefficiente di scabrezza di Manning rappresentativo di alveo naturale, è stato stimato un valore della pendenza della linea dell’energia pari a circa 0.02 %, coerente con i valori tipici dei tratti fluviali di pianura prossimi alla foce.

Il limite a valle è stato posizionato sufficientemente distante dalle sezioni di interesse per minimizzare l’influenza della condizione al contorno sui risultati della simulazione.

Analizzare questo scenario ha permesso di riprodurre una situazione rappresentativa da imporre alla componente costiera, alla luce delle condizioni di maggiore pericolosità idraulica e costiera per il territorio. Inoltre, la disponibilità di serie idrologiche e meteorologiche dettagliate per quel periodo ha reso possibile una calibrazione più affidabile del modello, garantendo la coerenza dei risultati numerici con le osservazioni reali.

Da HEC-RAS è stato ricavato il valore di portata per l’anno 2019 in corrispondenza delle varie sezioni, tra cui la foce che si identifica con la sezione 0 (vedi Figure 56, 57 e 58).

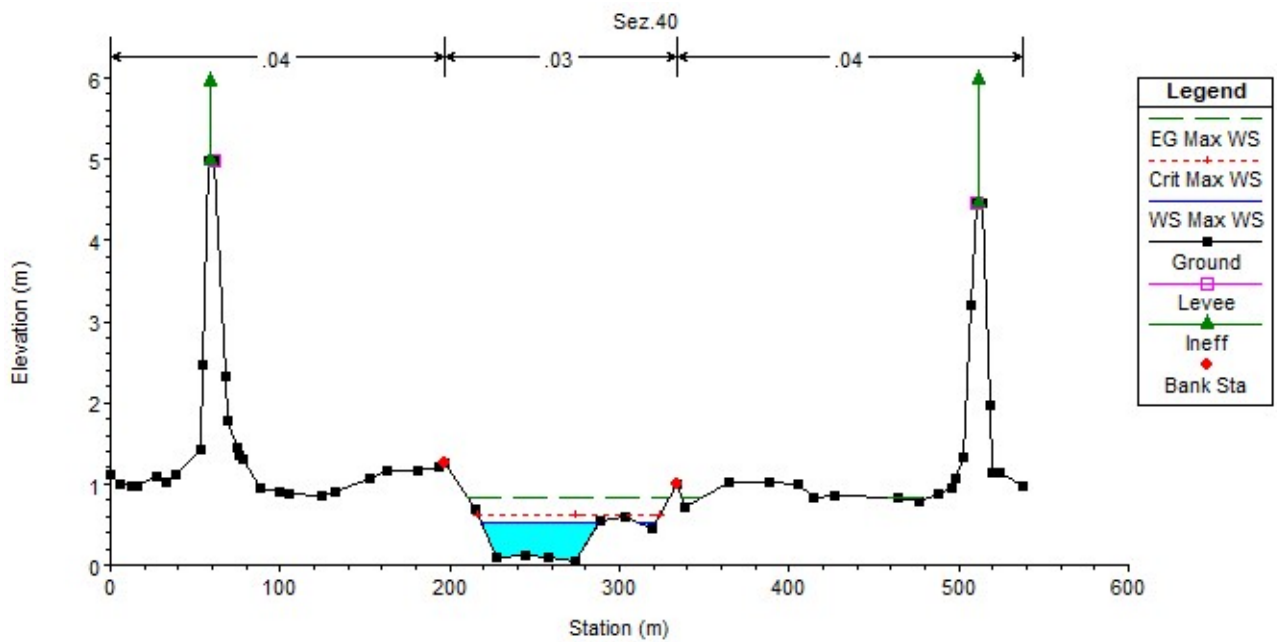


Figura 56 – Output della sezione trasversale 0 alla foce del fiume Ofanto, estrapolato dal modello HEC-RAS per rappresentare la configurazione dell'alveo e della zona di riva.

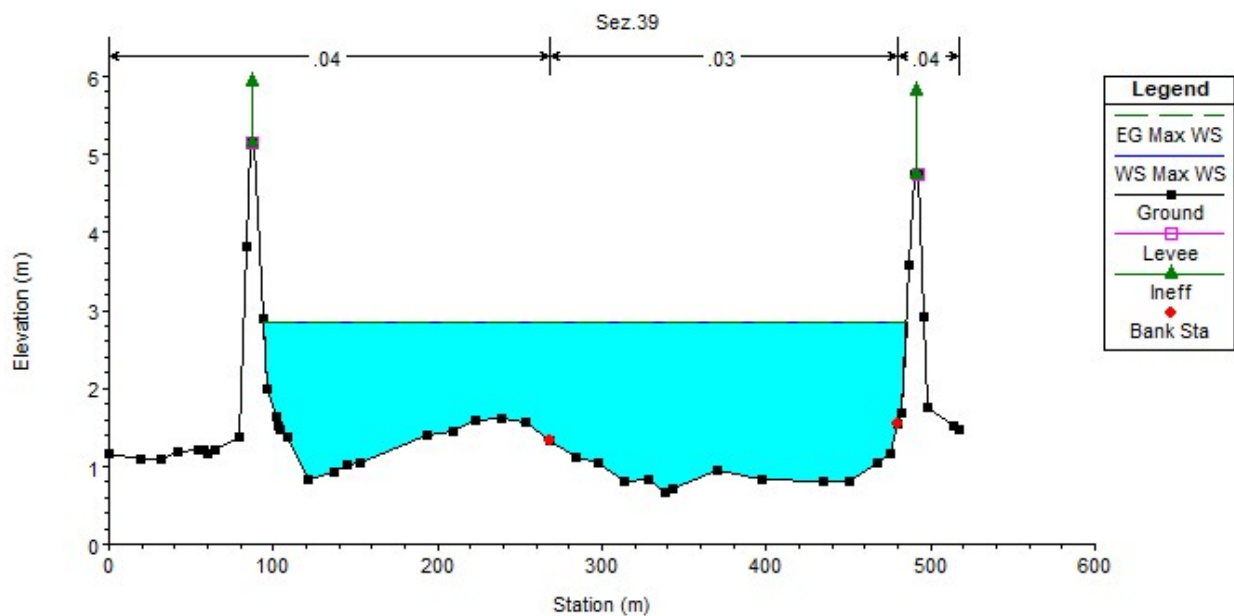


Figura 57 – Output della sezione trasversale 1 alla foce del fiume Ofanto, estrapolato dal modello HEC-RAS per rappresentare la configurazione dell'alveo e della zona di riva.

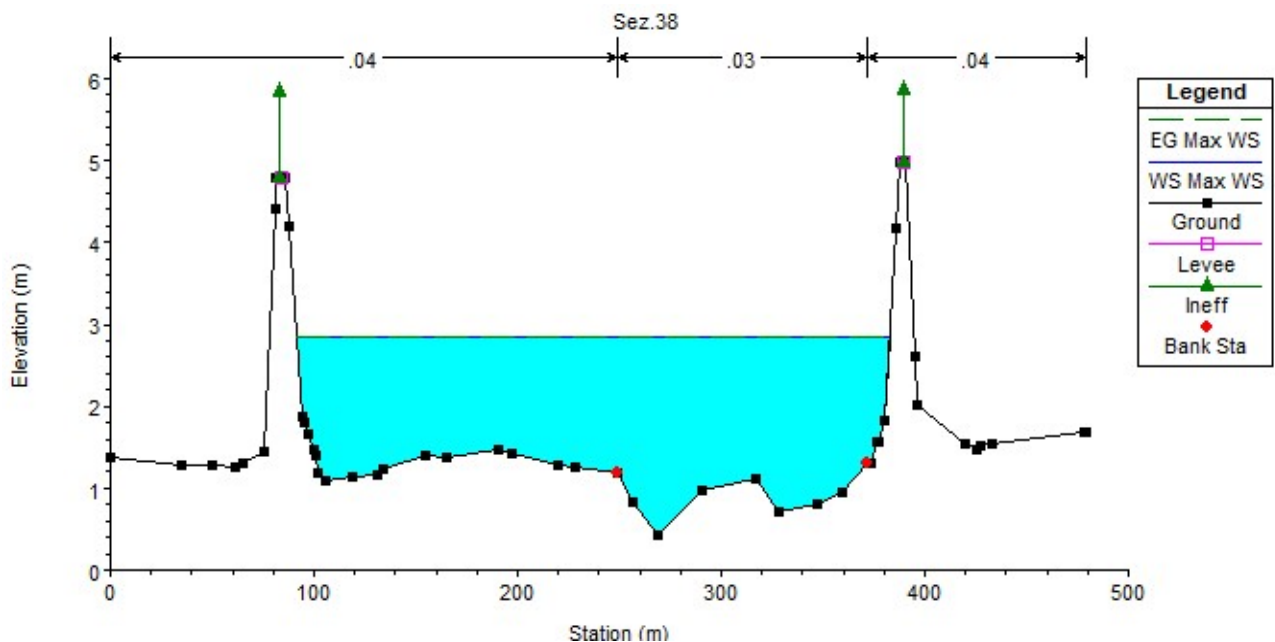


Figura 58 – Output della sezione trasversale 2 alla foce del fiume Ofanto, estrapolato dal modello HEC-RAS per rappresentare la configurazione dell'alveo e della zona di riva.

III. XBeach

Scelta la settimana più cautelativa ossia quella più critica in termini di eventi estremi, al fine di ottenere dei risultati più accurati a scala locale in corrispondenza della foce del fiume Ofanto, la valutazione delle superfici di inondazione per impatto da mareggiata è stata eseguita in XBeach attraverso la griglia ad alta risoluzione (200x400).

In particolare, dalla simulazione su ampia scala condotta in Delft3D, è stato ricavato, per ciascun istante temporale, (i) il valore massimo della superficie libera dell'acqua, (ii) dell'altezza d'onda significativa e (iii) del periodo di picco.

Dalla simulazione idrodinamica condotta con HEC-RAS, è stato estrapolato il valore di portata combinando la simulazione costiera con quella idraulica.

- a) Superficie libera dell'acqua (vedi Figure 59,60 e 61): la simulazione evidenzia una progressiva intrusione del flusso marino nel tratto terminale del fiume, con una propagazione verso monte indotta dall'interazione tra moto ondoso, livelli marini elevati e ridotta capacità di deflusso fluviale., con un aumento del livello marino compreso tra 0,50 m e 1,00 m nel periodo 10–12 novembre. L'incremento è quindi di circa 50 cm in 4 giorni, è riconducibile alla variazione delle condizioni al contorno marine e alla conseguente propagazione del segnale idrodinamico all'interno del dominio, evidenziando una significativa interazione tra dinamica fluviale e marina.

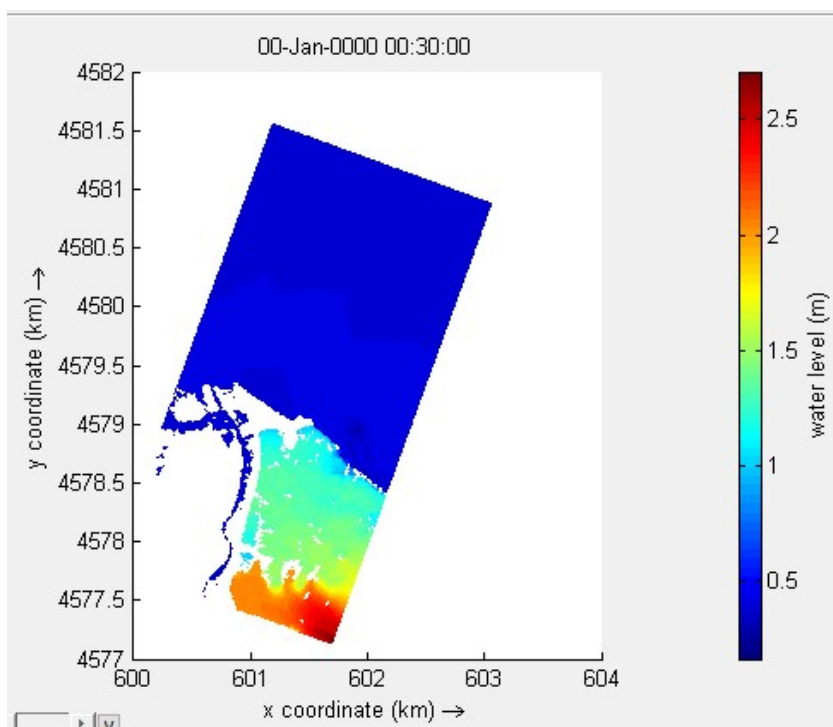


Figura 59 - Superficie libera dell'acqua ottenuta con XBeach – Istante 1: 8 novembre 2019, ore 12:00.

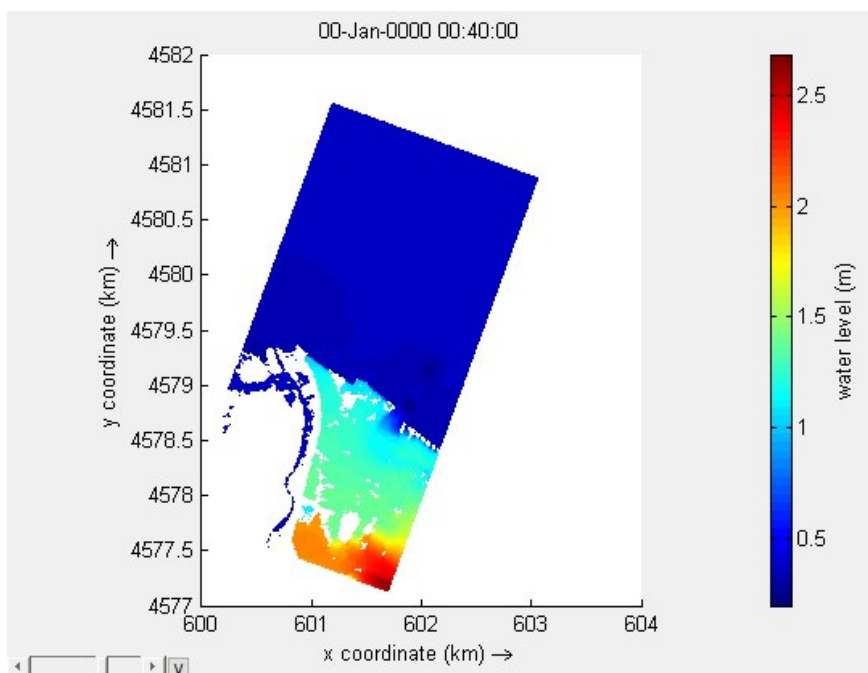


Figura 60 - Superficie libera dell'acqua ottenuta con XBeach – Istante 2: 10 novembre 2019, ore 12:00.

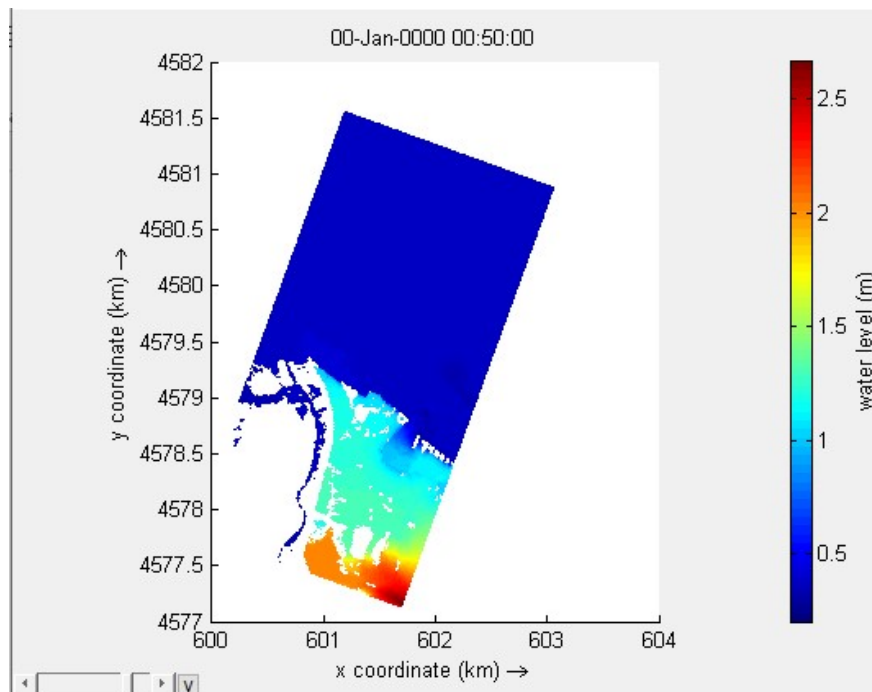


Figura 61 - Superficie libera dell'acqua ottenuta con XBeach – Istante 3: 12 novembre 2019, ore 12:00.

- b) Variazione cumulata del fondo nel tempo (vedi Figure 62,63 e 64): rappresenta la somma di tutti i processi di erosione e sedimentazione che avvengono durante la simulazione. Nei grafici sottostanti i valori positivi indicano sedimentazione (accumulo di materiale, innalzamento del fondo) mentre i valori negativi indicano erosione (asportazione di materiale, abbassamento del fondo).

È una grandezza cumulata che non mostra la variazione istantanea ma il risultato totale dall'inizio della simulazione fino al tempo corrente.

Essa permette di valutare il bilancio morfologico complessivo (dove il sistema erode e dove accumula).

La variazione morfologica risulta complessivamente contenuta. Si osserva tuttavia un passaggio da zone caratterizzate da sedimentazione (valori in blu/celeste) a tratti soggetti a erosione (tendenza al giallo).

Questo suggerisce una dinamica di riequilibrio locale, con processi di mobilizzazione del sedimento non omogenei lungo la linea di costa.

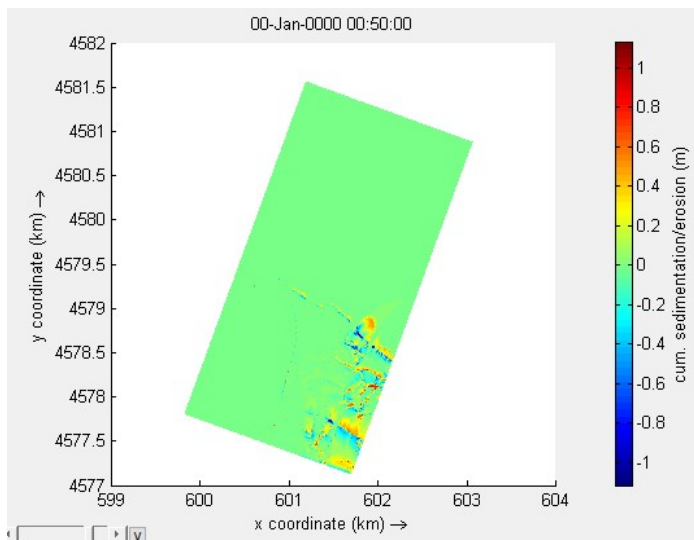


Figura 62- Variazione cumulata del fondo ottenuta con XBeach – Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.

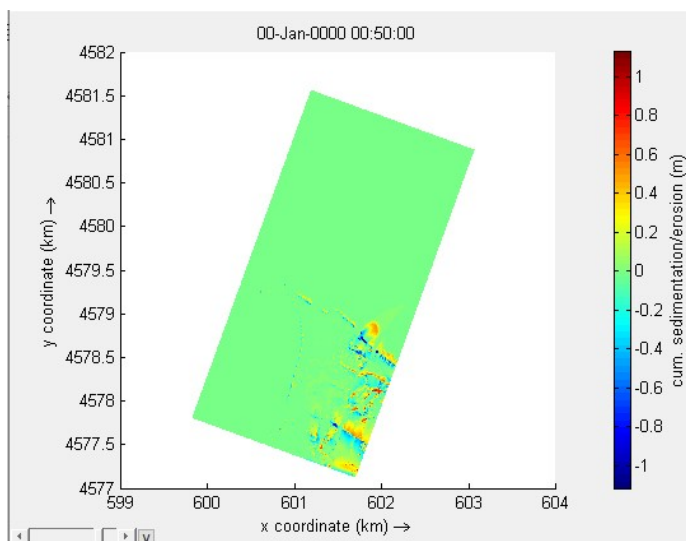


Figura 63- Variazione cumulata del fondo ottenuta con XBeach - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.

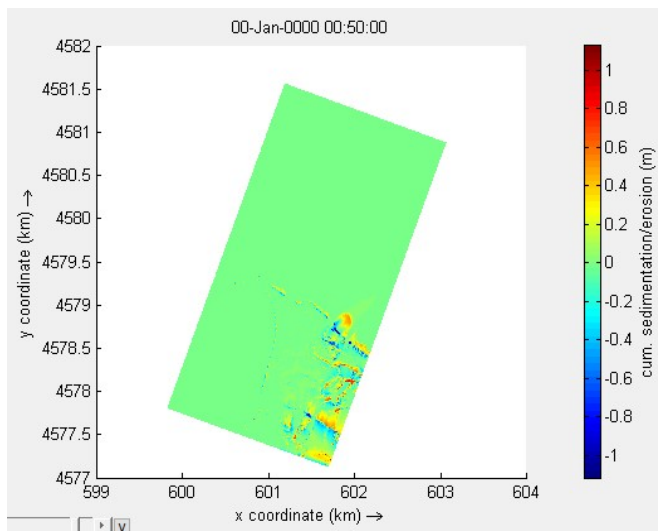


Figura 64 - Variazione cumulata del fondo ottenuta con XBeach - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.

3.1. *Discussione dei risultati*

Nello studio condotto dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia, relativo alla "Revisione delle perimetrazioni delle aree a diversa pericolosità idraulica del fiume Ofanto dal Ponte Romano alla foce", è riportato che la portata media alla foce del fiume si attesta intorno a $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Nel presente lavoro, la simulazione numerica eseguita in regime di moto vario ha invece restituito un valore di portata di picco in corrispondenza della foce pari a circa $65 \text{ m}^3/\text{s}$, ossia quasi quattro volte superiore rispetto al valore medio indicato dallo studio di riferimento. Tale risultato evidenzia la significativa differenza tra le condizioni ordinarie e quelle di piena, sottolineando l'importanza di utilizzare approcci di modellazione idrodinamica non stazionaria per analizzare la risposta del sistema fluviale in condizioni di evento estremo.

Il confronto tra i risultati ottenuti con Delft3D e XBeach mette in evidenza come i due modelli descrivano in maniera complementare l'interazione tra dinamica fluviale e marina alla foce dell'Ofanto. Dal punto di vista idrodinamico, Delft3D ha mostrato un progressivo incremento del livello medio del mare, con valori compresi tra 0,005 e 0,18 m, a cui si associa un aumento dell'altezza d'onda significativa (da 0,30 a 0,65 m) e un allungamento del periodo di picco (da 2,5 a 3 s, con massimi locali fino a 4 s). Tali variazioni evidenziano la sensibilità del dominio alla combinazione di condizioni meteomarine e alla complessità della batimetria costiera, che modula la propagazione e la trasformazione dell'onda. Il modello XBeach, maggiormente orientato alla rappresentazione dei processi morfodinamici, conferma una tendenza analoga all'innalzamento del livello marino, ma con valori più marcati: tra il 10 e il 12 novembre il livello d'acqua alla foce cresce infatti da 0,50 a 1,00 m, con un incremento complessivo di circa 50 cm. Parallelamente, la variazione cumulata del fondo, pur risultando contenuta, mostra la transizione da aree di sedimentazione a tratti soggetti a erosione, segnalando una redistribuzione locale del sedimento indotta dall'interazione onda-corrente-flusso fluviale.

Inoltre, dall'osservazione dei risultati ottenuti emerge come il dato sul livello idrico ricavato dal Servizio marino Copernicus, utilizzato come condizione di input per le simulazioni costiere, presenti valori sistematica-

mente inferiori rispetto a quelli restituiti dai modelli numerici. In particolare, per il 12 novembre 2019 il livello idrico da rianalisi risultava pari a circa 0,15 m, mentre le simulazioni con XBeach hanno evidenziato, in corrispondenza della foce, un valore minimo di 0,25 m. Tale differenza suggerisce una sottostima delle condizioni di forzante nei dataset di rianalisi, imputabile non solo alla scala di risoluzione del dato, ma anche all'influenza della batimetria locale e della topografia costiera, che modulano in modo significativo la propagazione del segnale idrodinamico nell'area di studio.

Un ulteriore elemento da considerare, seppure non indagato nel presente elaborato, riguarda la presenza della falda freatica lungo la piana costiera in prossimità del fiume Ofanto, caratterizzata da livelli piezometrici particolarmente bassi e strettamente connessi sia alle oscillazioni del livello idrico fluviale sia alle variazioni del livello marino. Tale interazione determina condizioni di vulnerabilità idrogeologica, con possibili risalite della falda e fenomeni di intrusione salina nelle aree più prossime alla foce. L'azione combinata di portate fluviali elevate, innalzamento del livello marino e variazioni piezometriche contribuisce pertanto a delineare un quadro di complessità idraulica, che rende ancora più rilevante l'utilizzo di modelli numerici integrati per valutare le dinamiche idro-morfologiche del sistema Ofanto (Caldara et al., 2013; Scardino et al., 2022).

Alla luce dei risultati ottenuti e delle considerazioni sopra esposte, è possibile individuare alcune implicazioni operative e indirizzi di gestione del sistema fluvio-costiero nel lungo termine.

3.1.1 Implicazioni operative e strategie di gestione

L'integrazione dei risultati dei tre modelli mette in evidenza come la risposta del sistema fluvio-costiero sia il risultato di un equilibrio dinamico tra contributo fluviale e forzanti marine. In questo contesto, gli effetti di rigurgito alla foce, amplificati dalle condizioni meteomarine estreme, rappresentano uno degli elementi di maggiore criticità, in quanto influenzano simultaneamente il rischio idraulico e l'evoluzione morfologica della costa.

Dal punto di vista operativo, tali risultati indicano chiaramente la necessità di adottare un approccio integrato nella gestione del sistema, superando la tradizionale separazione tra pianificazione fluviale e costiera. In particolare, la progettazione delle opere idrauliche lungo il tratto terminale del fiume dovrebbe tenere conto non solo delle portate di piena, ma anche delle condizioni marine estreme, includendo scenari combinati di piena e mareggiata. Inoltre, l'evidenza di un marcato deficit sedimentario e di processi erosivi attivi suggerisce l'opportunità di adottare strategie di riequilibrio del bilancio sedimentario, privilegiando interventi a basso impatto ambientale, quali soluzioni nature-based, in grado di ripristinare la funzionalità dei sistemi dunari e delle aree retrodunali.

In termini di pianificazione territoriale, i risultati ottenuti permettono di individuare le aree maggiormente esposte a rischio di esondazione e inondazione marina, fornendo un supporto concreto alla definizione di misure di mitigazione e adattamento nel lungo termine. In tale ottica, l'approccio modellistico integrato adottato si configura come uno strumento efficace per la valutazione di scenari evolutivi futuri, in relazione agli effetti dei cambiamenti climatici e dell'innalzamento del livello del mare.

CONCLUSIONI

L'area della foce dell'Ofanto si configura come un sistema costiero fragile e in evidente stato di disequilibrio, in cui l'interazione tra dinamiche naturali e pressioni antropiche determina un progressivo peggioramento della stabilità litoranea.

La subsidenza indotta dallo sfruttamento della falda, la riduzione dell'apporto solido dovuta alla presenza di dighe e invasi, la trasformazione della fascia costiera e la distruzione dei sistemi dunari, insieme all'alterazione del trasporto litoraneo legata alle infrastrutture portuali, contribuiscono in maniera significativa all'evoluzione erosiva del litorale.

A queste cause dirette si somma una gestione della fascia costiera spesso frammentaria e non integrata in una pianificazione complessiva. La costruzione di pennelli e altre opere rigide, adottata in maniera puntuale e reattiva, ha talvolta prodotto effetti di protezione locali, ma ha contemporaneamente aggravato l'erosione nei tratti adiacenti non protetti, generando un sistema disomogeneo e poco efficace nel lungo termine. In questo contesto, gli interventi umani, pur mirati alla protezione o allo sviluppo costiero, hanno finito per amplificare i fenomeni erosivi già in atto, rendendo evidente come il peso delle attività antropiche superi ormai quello delle forzanti naturali.

Questi meccanismi concorrono a spiegare l'arretramento significativo della fascia costiera tra Zapponeta, Margherita di Savoia e la foce dell'Ofanto. L'analisi condotta, basata sull'integrazione di modellazioni idrauliche, idrodinamiche e morfodinamiche, ha consentito di ricostruire in maniera accoppiata il comportamento del sistema fluvio-costiero, evidenziando il ruolo delle condizioni estreme nella sua evoluzione.

Le simulazioni numeriche hanno messo in luce come, in condizioni di piena, la portata fluviale possa raggiungere valori di picco ben superiori alla media storica di 15 m³/s riportata dagli studi di riferimento, evidenziando la forte variabilità del regime idrologico e l'importanza di valutare gli eventi estremi attraverso un approccio idrodinamico in moto vario.

I risultati modellistici mostrano inoltre un incremento del livello idrico sia nelle simulazioni Delft3D (da 0,005 a 0,18 m) che in quelle XBeach (da 0,50 a 1,00 m), segnalando una risposta marcata del sistema fluviale-costiero in presenza di condizioni meteomarine avverse. Contestualmente, si osserva un aumento dell'altezza d'onda significativa (fino a 0,65 m) e del periodo di picco (fino a 4 s) in corrispondenza dell'Istante 3 del 12 novembre 2019 ore 12.00, accompagnato da fenomeni localizzati di erosione.

La gestione sostenibile del litorale richiede quindi un approccio di gestione integrata e sostenibile, capace di superare le logiche emergenziali e puntuali e di orientarsi verso strategie di lungo periodo, in cui le dinamiche fluviali, marine e antropiche siano considerate in maniera congiunta.

L'approccio adottato rappresenta un elemento di originalità dello studio, in quanto consente di integrare in un unico schema modellistico le componenti idrauliche, idrodinamiche e morfodinamiche, superando la tradizionale trattazione separata dei processi fluviali e costieri. Sebbene applicato al caso studio della foce dell'Ofanto, tale approccio risulta generalizzabile e trasferibile ad altri sistemi fluvio-costieri caratterizzati da

analoghe condizioni di interazione tra dinamiche continentali e marine, costituendo uno strumento utile per la valutazione del rischio e la pianificazione costiera nel lungo termine.

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 - Modello Digitale del Terreno (DEM) della superficie erosiva (ES1) attorno alla valle dell'Ofanto, sia in vista piana (in alto) che obliqua (in basso). In arancione e giallo, con morfologie a cumulo, è rappresentata l'estensione dei corpi di facies 2 in morfologie dunose/a barriera delle unità A l e B m, rispettivamente (De Santis, 2020).....	10
Figura 2- Carta geolitologica d'Italia alla scala 1:500.000 (Geoportale Nazionale)	12
Figura 3– Sondaggi eseguiti nel 2014 nell’ambito della Progettazione preliminare degli interventi di mitigazione del rischio idraulico nel tratto terminale del Fiume Ofanto tra Ponte Romano e la Foce – 1°stralcio.	13
Figura 4- Cassetta catalogatrice del sondaggio S1	15
Figura 5- Cassetta catalogatrice del sondaggio S2	16
Figura 6 – Cassetta catalogatrice del sondaggio S7	17
Figura 7 - Grafici di confronto tra i livelli piezometrici osservati e quelli simulati (calcolati) per ogni stazione di monitoraggio automatico in riferimento ai tre scenari considerati.....	22
Figura 8 - Andamento delle linee di riva valutato per il settore costiero indagato nei periodi 1869–1909, 1909–1954 e 1954–2010 (De Santis <i>et al</i> , 2023).....	23
Figura 9- Linee di riva e corso inferiore del fiume Ofanto dal 1957 al 2015 (fase 5) e grafico dello Spostamento Netto della Linea di Riva (NSM) calcolato dal DSAS tra la linea di riva più antica e quella più recente. (De Santis <i>et al.</i> , 2018).	24
Figura 10 - Distribuzione percentuale del moto ondoso e inondazione registrata nel 2013 a Ippocampo	25
Figura 11– a) Mappa dei movimenti verticali del suolo ottenuta da dati PS-InSAR (orbite ascendenti e discendenti), interpolati su una griglia regolare a passo 250 m. Le stazioni GNSS e le sei aree rappresentative di riferimento sono evidenziate. b). Diagramma di dispersione che confronta le velocità GNSS proiettate lungo la linea di vista SAR con le corrispondenti componenti di velocità SAR. Fonte: Scardino <i>et al.</i> , 2022, adattato da Remote Sensing.	27

Figura 12 – La costa tra Barletta e Margherita di Savoia negli anni 1954-1997. Fonte: Damiani <i>et al.</i> , 2003.....	30
Figura 13– Evoluzione della foce del fiume Ofanto tra il 1954 ed il 1997. Fonte: Damiani <i>et al.</i> , 2003.	31
Figura 14– Costruzione di barriere frangiflutti in prossimità del porto di Margherita di Savoia. Fonte: Caldara <i>et al.</i> , 2006.....	31
Figura 15- Pennelli rettilinei costruiti tra Margherita di Savoia e Zapponeta. Fonte: Caldara <i>et al.</i> , 2006.	32
Figura 16– INQUADRAMENTO al P.A.I. (PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO) vigente degli interventi di mitigazione del rischio idraulico. Fonte: Commissario di Governo per il contrasto al dissesto idrogeologico nella Regione Puglia.	33
Figura 17- Valore batimetrico estrapolato dalla piattaforma di EMODnet ed il valore topografico del fiume Ofanto.	38
Figura 18 – Sovrapposizione della batimetria e della topografia attraverso il software Global Mapper.	39
Figura 19 - Operazione di creazione della griglia rettangolare in RGFGGRID (griglia 770x550) adoperata in Delft3d	40
Figura 20- Griglia rettangolare a bassa risoluzione 750x550 con risoluzione griglia 12x12.....	41
Figura 21- Interpolazione della griglia con i dati batimetrici e topografici attraverso il modulo QUICKIN del Delft 3D impiegando come metodo di interpolazione la media mobile “ <i>grid cell averaging</i> ”	42
Figura 22 – Rappresentazione del dato livello medio mare dal sito del Servizio marino di Copernicus.	44
Figura 23- Area d’inquadrimento scelto dai DATA MARINE COPERNICUS.	44
Figura 24 – Componente di velocità del vento espressa in m/s dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.....	45
Figura 25 – Componente direzionale del vento espressa in gradi dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.....	45

Figura 26 - Altezza d'onda significativa espressa in metri dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.	46
Figura 27 - Periodo di picco dell'onda espressa in secondi dal 01 settembre 2019 al 31 dicembre 2019.	46
Figura 28 - Flusso concettuale del modello morfodinamico costiero	49
Figura 29- La figura mostra la posizione esatta della stazione di San Samuele Cafiero utilizzata per l'acquisizione delle osservazioni pluviometriche ed idrologiche.	51
Figura 30 - Dati pluviometrici con aggregazione ogni 30 minuti presso S. Samuele Cafiero. Fonte: Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia.	51
Figura 31- Osservazione pluviometriche giornaliere presso S. Samuele Cafiero. Fonte: Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia, Annale Idrologico – Parte I per l'anno 2019.	52
Figura 32- Livelli idrometrici presso S. Samuele Cafiero. Fonte: Dipartimento Protezione Civile e Gestione Emergenze - Regione Puglia.	52
Figura 33– Focus sulla settimana compresa tra il 10 novembre ed il 16 novembre 2019.	53
Figura 34– Rappresentazione della scala numerica delle portate per l'anno 2012	54
Figura 35 - Idrogramma di piena tra il 10 novembre ed il 16 novembre 2019	55
Figura 36– Volume di controllo	56
Figura 37– Rappresentazione dell'alveo del fiume Ofanto tramite il software HEC-RAS: in verde sono evidenziate le sezioni inserite tramite il comando cross section. Tra le sezioni inserite ci sono anche gli attraversamenti principali.	57
Figura 38– Particolare delle sezioni alla foce del fiume Ofanto tramite il software HEC-RAS.	57
Figura 39– Griglia a più alta risoluzione (200x400) adoperata in XBeach.	58
Figura 40– Merge tra componente batimetrica e topografica sulla griglia a più alta risoluzione.	59
Figura 41- Rappresentazione della griglia a più alta risoluzione (200x400) in RGFgrid.	59
Figura 42- Rappresentazione della griglia a più alta risoluzione (200x400) adoperata in Xbeach tramite Delftdashboard.	60

Figura 43– The JONSWAP spectrum (Hasselmann et al.,1973).	61
Figura 44– Superficie libera dell’acqua - Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.	65
Figura 45- Superficie libera dell’acqua - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.	65
Figura 46 - Superficie libera dell’acqua - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.	66
Figura 47– Variazione del livello del mare per assegnati tempi di ritorno.....	66
Figura 48– Altezza dell’onda significativa - Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.....	67
Figura 49- Altezza dell’onda significativa - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.....	68
Figura 50- Altezza dell’onda significativa - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.....	68
Figura 51– Variazione dell’altezza d’onda significativa per assegnati tempi di ritorno.	69
Figura 52 – Periodo di picco - Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.	70
Figura 53- Periodo di picco - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.	70
Figura 54- Periodo di picco - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.	71
Figura 55– Andamento longitudinale nello stato ante-operam lungo il fiume Ofanto estrapolato dal modello HEC-RAS.	71
Figura 56 – Output della sezione trasversale 0 alla foce del fiume Ofanto, estrapolato dal modello HEC-RAS per rappresentare la configurazione dell’alveo e della zona di riva.....	73
Figura 57 – Output della sezione trasversale 1 alla foce del fiume Ofanto, estrapolato dal modello HEC-RAS per rappresentare la configurazione dell’alveo e della zona di riva.....	73
Figura 58 – Output della sezione trasversale 2 alla foce del fiume Ofanto, estrapolato dal modello HEC-RAS per rappresentare la configurazione dell’alveo e della zona di riva.....	74
Figura 59 - Superficie libera dell’acqua ottenuta con XBeach – Istante 1: 8 novembre 2019, ore 12:00.	75
Figura 60 - Superficie libera dell’acqua ottenuta con XBeach – Istante 2: 10 novembre 2019, ore 12:00.....	75

Figura 61 - Superficie libera dell'acqua ottenuta con XBeach – Istante 3: 12 novembre 2019, ore 12:00.....	76
Figura 62- Variazione cumulata del fondo ottenuta con XBeach – Istante 1 - 8 novembre 2019 ore 12.00.....	77
Figura 63- Variazione cumulata del fondo ottenuta con XBeach - Istante 2 - 10 novembre 2019 ore 12.00.....	77
Figura 64 - Variazione cumulata del fondo ottenuta con XBeach - Istante 3 - 12 novembre 2019 ore 12.00.....	78

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 – Elementi caratteristici dei sondaggi eseguiti nel 2014	13
Tabella 2 – Sintesi parametrica delle indagini in situ	19
Tabella 3 - Fattori di controllo dell'evoluzione costiera (Caldara <i>et al.</i> , 1998).	21
Tabella 4 – Tassi medi di subsidenza del suolo -8VLM) tra Manfredonia e Margherita di Savoia. Fonte: Scardino et al., 2022, adattato da Remote Sensing	27
Tabella 5 - Superficie delle aree costiere soggette a sommersione permanente in diversi orizzonti temporali e scenari emissivi (SSP1-2.6 e SSP5-8.5). Fonte: Scardino et al., 2022, adattato da Remote Sensing.....	28
Tabella 6 – Elenco delle variabili meteo-marine utilizzate nello studio. Fonte: Data Marine Copernicus	43
Tabella 7- Scala numerica delle portate per l'anno 2012 estrapolata dagli Annali Idrologici – Parte II.54	
Tabella 8 - Elenco delle 17 settimane simulate in Delft 3D	64

BIBLIOGRAFIA

Antonioli, F., Anzidei, M., Amorosi, A., Lo Presti, V., Mastronuzzi, G., Deiana, G., De Falco, G., Fontana, A., Fontolan, G., Lisco, S., Marsico, A., Moretti, M., Orrù, P.E., Sannino, G., Serpelloni, E., Vecchio, A. (2017). Sea-level rise and potential drowning of the Italian coastal plains: Flooding risk scenarios for 2100. *Quaternary Science Reviews*, 158, pp. 29 - 43. 10.1016/j.quascirev.2016.12.021.

Antonioli, F., De Falco, G., Lo Presti, V., Moretti, L., Scardino, G., Anzidei, M., Bonaldo, D., Carniel, S., Leoni, G., Furlani, S., Marsico, A., Petitta, M., Randazzo, G., Scicchitano, G., Mastronuzzi, G. (2020). Innalzamento relativo del livello del mare e potenziale rischio di sommersione per il 2100 su 16 pianure costiere del Mar Mediterraneo. *Acqua*, 12 (8), 2173. <https://doi.org/10.3390/w12082173>.

Anzidei, M., Lambeck, K., Antonioli, F., Furlani, S., Mastronuzzi, G., Serpelloni, E., Vannucci, G. (2014). Coastal structure, sea-level changes and vertical motion of the land in the Mediterranean. *Geological Society, London, Special Publications*, 388, pp. 453-479. 10.1144/SP388.20.

Bakkensen, L. (2017). Mediterranean Hurricanes and Associated Damage Estimates. *Journal of Extreme Events*, 4(2).10.1142/S2345737617500087.

Caldara, M., Pennetta, L. (1993). Nuovi dati per la conoscenza geologica e morfologica del Tavoliere di Puglia. *Bonifica*, 8(3), pp. 25-42.

Caldara M., Centenaro E., Mastronuzzi G., Sansò P. and Sergio A. (1998). Features and present evolution of Apulian coast (Southern Italy). *Journal of Coastal Research*, 12, pp. 55-64. <https://hdl.handle.net/11587/103025>.

Caldara, M., Pennetta, L., Simone, O. (2002). Holocene Evolution of the Salpi Lagoon (Puglia, Italy). *Journal of Coastal Research*, 36(sp1), pp. 124-133 10.2112/1551-5036-36.sp1.124.

Caldara, M., Capolongo, D., Damato, B., Pennetta, L. (2006). Can the ground laser scanning technology be useful for coastal defences monitoring?. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1, pp. 35-49.10.4408/IJEGE.2006-01.0-03.

Caldara, M., Capolongo, D., Triggiani, M., Refice, A. (2013). La subsidenza delle piane costiere pugliesi. *Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 2/2013*, pp. 30-36.

Casarano, D., Dragone, V., Polemio, M. (2019). Groundwater resources at salinisation risk: effects of climate and utilisation changes in the case of Apulian coastal aquifers (Southeastern Italy). *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 8(1). 10.7343/as-2019-374.

Cavicchia, L., Von Storch, H., Gualdi, S. (2014). Mediterranean Tropical-Like Cyclones in Present and Future Climate. *Journal of Climate*, 27, pp. 7493-7501. 10.1175/JCLI-D-14-00339.1.

Chen, Y., Lai, S., Wen, C. (2006). The Influence of Green Innovation Performance on Corporate Advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, 67, pp. 331-339. 10.1007/s10551-006-9025-5.

Damiani, L., Petrillo, A. F., Ranieri, G. (2003). The Erosion along Apulia Region near the Ofanto River. *Coastal Engineering VI*, pp. 407-418.

- De Santis, V., Caldara, M., Torres, T., Ortiz, J. (2010). Stratigraphic units of the Apulian Tavoliere plain (Southern Italy): Chronology, correlation with marine isotope stages and implications regarding vertical movements. *Sedimentary Geology*, 228, pp. 255-270. 10.1016/j.sedgeo.2010.05.001.
- De Santis, V., Caldara, M., Pennetta, L. (2014). The marine and alluvial terraces of Tavoliere di Puglia plain (southern Italy). *Journal of Maps*, 10, pp. 114-125. 10.1080/17445647.2013.861366.
- De Santis, V., Caldara, M. (2014). Evolution of an incised valley system in the southern Adriatic Sea (Apulian margin): An onshore-offshore correlation. *Geological Journal*, 51, pp. 263-284. 10.1002/gj.2628.
- De Santis, V., Caldara, M. (2015). The 5.5-4.5 kyr climatic transition as recorded by the sedimentation pattern of coastal deposits of the Apulia region, southern Italy. *The Holocene*, 25(8), pp. 1313-1329. 10.1177/0959683615584207.
- De Santis, V., Caldara, M., Torres, T., Ortiz, J., Sánchez-Palencia, Y. (2018). A review of MIS 7 and MIS 5 terrace deposits along the Gulf of Taranto based on new stratigraphic and chronological data. *Italian Journal of Geosciences*, 137, pp. 349-368. 10.3301/IJG.2018.02.
- De Santis, V., Caldara, M., Marsico, A., Capolongo, D., Pennetta, L. (2018). Evolution of the Ofanto River delta from the 'Little Ice Age' to modern times: Implications of large-scale synoptic patterns. *The Holocene*, 28(12), pp. 1948-1967. 10.1177/0959683618798109.
- De Santis, V., Caldara, M., Pennetta L. (2020). Transgressive Architecture of Coastal Barrier Systems in the Ofanto Incised Valley and Its Surrounding Shelf in Response to Stepped Sea-Level Rise. *Geosciences* 2020, 10(12), pp. 497. 10.3390/geosciences10120497.
- De Santis, V., Scicchitano, G., Scardino, G., Mele, D., Sulpizio, R., Colangelo, G., Zingaro, M., Antonino, N.L., Tomaselli, V., Caldara, M. (2023). Construction of a deltaic strandplain during the Roman period in the Tavoliere di Puglia plain and palaeoclimatic implications. *Front. Earth Sci.* 11:1278105. doi: 10.3389/feart.2023.1278105.
- De Serio, F., Mossa, M., Sciancalepore, F. (2018). Data Analysis and Numerical Modelling to Detect Hydrodynamics and Sediment Transport in a semi Enclosed Basin. *HIC 2018: 13th International Conference on Hydroinformatics*, 3, pp. 526–534. 10.29007/h936.
- De Serio F, Mossa M. (2018). Meteo and Hydrodynamic Measurements to Detect Physical Processes in Confined Shallow Seas. *Sensors*, 18(1), pp. 280. 10.3390/s18010280.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G. J.-P., Bates, P. D. (2010). Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal*, 55(3), pp. 364–376. 10.1080/02626661003683389.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Herbers, T.H.C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13(1), pp. 23–54. 10.1016/0378-3839(89)90031-8.
- Horritt, M. S., Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1-D and 2-D numerical models for predicting river flood inundation. *Hydrological Processes*, 16(14), pp. 2869–2883. 10.1002/hyp.1059.

- Lo Re, C., Manno, G., Ciraolo, G. (2020). Tsunami Propagation and Flooding in Sicilian Coastal Areas by Means of a Weakly Dispersive Boussinesq Model. *Water*, 12(5), pp. 1448. 10.3390/w12051448.
- Meyssignac, B., Cazenave, A. (2012). Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics*, 58, pp. 96-109. 10.1016/j.jog.2012.03.005.
- McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T.G., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., Davidson, M., Russell, P.E. (2014). Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering*, 91, pp. 231-250, 10.1016/j.coastaleng.2014.06.007.
- Nerem, R., Chambers, D., Choe, C., Mitchum, G. (2010). Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions. *Marine Geodesy*, 33, pp. 435-446. 10.1080/01490419.2010.491031.
- Petio, P., Liso, I.S., Pastore, N., Pagliarulo, P., Refice, A., Parise, M., Mastronuzzi, G., Caldara, M.A., Capolongo, D. (2014). Application of Hydrological and Hydrogeological Models for Evaluating Groundwater Budget in a Shallow Aquifer in a Semi-Arid Region Under Three Pumping Rate Scenarios (Tavoliere di Puglia, Italy). *Water* 2024, 16, 3253. <https://doi.org/10.3390/w16223253>.
- Pignatelli, C., Ferilli, S., Capolongo, D., Marsico, A., Milella, M., Penneta, L., Piscitelli, A., Mastronuzzi, G. (2010). Morphological evidences and computer science techniques in order to evaluate tsunami inundation limit. *Italian Journal of Remote Sensing*, 42(2), pp. 129-142. 10.5721/ItJRS201042210.
- Pranzini, E., Williams, A.T., (2013). *Coastal erosion and protection in Europe*. Routledge, London & New York, pp. 476.
- Pritchard, H., Ligtenberg, S., Fricker, H., Vaughan, D., Van den Broeke, M., Padman, L. (2012). Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, 484, pp. 502-505. 10.1038/nature10968.
- Rahmstorf, S. (2007). A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science*, 315(5810), pp. 368-370. 10.1126/science.1135456.
- Rahmstorf, S., Perrette, M., Vermeer, M. (2011). Testing the robustness of semi-empirical sea level projections. *Climate Dynamics*, 39, pp. 861–875. 10.1007/s00382-011-1226-7.
- Rizzo, A., Scardino, G., De Santis, V., Kyriakoudi, D., Rovere, A., Torrisi, S., Vacchi, M., Scicchitano, G. (2021). Insights on the origin of multiple tsunami events affected the archaeological site of Ognina (south-eastern Sicily, Italy). *Quaternary International*, 638-639, pp. 122-139. 10.1016/j.quaint.2021.09.013.
- Rose, M. (2015). Medium-term Erosion Processes of South Adriatic Beaches (Apulia, Italy): A Challenge for an Integrated Coastal Zone Management. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 6(9). 10.4172/2157-7617.1000306.
- Russo, R. (1998). *Ofanto fiume d' Italia*. Edizione Rotas.
- Sasgen, I., Van den Broeke, M., Bamber, J., Rignot, E., Sørensen, L., Wouters, B., Martinec, Z., Velicogna, I., Simonsen, Sebastian. (2012). Timing and origin of recent regional ice-mass loss in Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 333-334, pp. 293-303. 10.1016/j.epsl.2012.03.033.

Scardino, G., Sabatier, F., Scicchitano, G., Piscitelli, A., Milella, M., Vecchio, A., Anzidei, M., Mastronuzzi, G. (2020). Sea-Level Rise and Shoreline Changes Along an Open Sandy Coast: Case Study of Gulf of Taranto, Italy. *Water*, 12(5), pp. 1414. 10.3390/w12051414.

Scardino, G., Anzidei, M., Petio, P., Serpelloni, E., De Santis, V., Rizzo, A., Liso, S. I., Zingaro, M., Capolongo, D., Vecchio, A., Refice, A., & Scicchitano, G. (2022). The Impact of Future Sea-Level Rise on Low-Lying Subsiding Coasts: A Case Study of Tavoliere Delle Puglie (Southern Italy). *Remote Sensing*, 14(19), pp. 4936. 10.3390/rs14194936.

Scicchitano, G., Scardino, G., Tarascio, S., Monaco, C., Barracane, G., Locuratolo, G., Milella, M., Piscitelli, A., Mazza, G., & Mastronuzzi, G. (2020). The First Video Witness of Coastal Boulder Displacements Recorded during the Impact of Medicanes “Zorbas” on Southeastern Sicily. *Water*, 12(5), pp. 1497. 10.3390/w12051497. Scicchitano, G., Scardino, G., Monaco, C., Piscitelli, A., Milella, M., De Giosa, F., Mastronuzzi, G. (2021). Comparing impact effects of common storms and Medicanes along the coast of south-eastern Sicily. *Marine Geology*, 439. 10.1016/j.margeo.2021.106556.

Serpelloni, E., Cavaliere, A., Martelli, L., Pintori, F., Anderlini, L., Borghi, A., Randazzo, D., Bruni, S., Devoti, R., Perfetti, P., Cacciaguerra, S. (2022). Surface Velocities and Strain-Rates in the Euro-Mediterranean Region from Massive GPS Data Processing. *Frontiers in Earth Science*, 10. 10.3389/feart.2022.907897.

Shepherd, D. A., & Williams, T. (2020). Entrepreneurship responding to adversity: Equilibrating Adverse Events and Disequilibrating Persistent Adversity. *Organization Theory*, 1(4). 10.1177/2631787720967678.

Paolo, F. S., Fricker H. A., Padman L. (2015). Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, 348, pp. 327-331. 10.1126/science.aaa0940.

Vecchio, A., Anzidei, M., Serpelloni, E., Florindo, F. (2019). Natural Variability and Vertical Land Motion Contributions in the Mediterranean Sea-Level Records over the Last Two Centuries and Projections for 2100. *Water*, 11(7), pp. 1480. 10.3390/w11071480.

Woodruff, Jonathan & Irish, Jennifer & Camargo, Suzana. (2013). Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, 504, pp. 44-52. 10.1038/nature12855.

SITOGRAFIA

IPCC (2013). *AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

IPCC (2014). *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

IPCC (2019). <https://www.ipcc.ch/2019/>

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Direttiva alluvioni Geoportale MASE. <https://gn.mase.gov.it/portale/direttive-alluvioni>

Geoportale Nazionale. <http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>

CURRICULUM

Curriculum Vitae Europass



Informazioni personali

Nome e Cognome **Filomena Carbone**
Indirizzo Via A.M. Calefati, 396 – 70122- Bari (BA) - Italia
Telefono 3461086770
Pec filomena.carbone@ingpec.eu
E-mail f.carbone@asset.regione.puglia.it ; filocarbo91@gmail.com

Cittadinanza Italiana

Luogo e Data di nascita Manfredonia (FG) - 11.08.1991 CRBFMN91M51E885R

Sesso Femmina

Occupazione Dipendente a tempo indeterminato. Area Funzionari e dell'Elevata qualificazione, cat. D

Esperienza professionale

Lingue	
Italiano	Madrelingua
Inglese	C1
Francese	B1
Patente	B

07/2025 in corso

RUP e supporto al RUP

RUP per progettazione e lavori

Regione Puglia – ASSET (Agenzia regionale strategica dello sviluppo ecosostenibile del territorio)

Responsabile dei tempi, costi, qualità e conformità normativa con supervisione finale dell'esecuzione e collaudo. Analisi dei rischi connessi alle operazioni.

11/2023 in corso

RUP, Gestore piattaforme di monitoraggio, Componente Commissione di gara, Verificatore di progetto

RUP per progettazione e lavori

Regione Puglia –Ufficio del Commissario delegato per la mitigazione del rischio Idrogeologico

- Analisi integrata di progetti complessi, coordinando attività tecniche, amministrative e operative.
- Gestione delle procedure di gara per l'aggiudicazione di appalti per servizi di progettazione, per lavori e per indagini.
- Attività di verifica della documentazione di progetto ai sensi del Codice degli Appalti ed individuazione di eventuali criticità, proponendo soluzioni correttive in conformità alle norme

Istruzione e formazione

05/2022

Corso di formazione BIM - 2° modulo relativo alla parte delle “verifiche dei progetti in ambiente BIM” della durata di 40 ore

ASSET – DICATECH Politecnico di Bari

01/2021 al 12/2021

Piano di formazione del RUP - Percorso formativo 1 – Linea A, B e C

MIMS – Piano nazionale di formazione per l'aggiornamento professionale del RUP

Dal 06/2018 al 06/2019

Master di II Livello in Esperto Integrato del TerritorioMessa in Sicurezza dal Rischio Idrogeologico, Tutela del Paesaggio e Sviluppo Locale Sostenibile

Sono stati svolti una serie di workshop su argomenti di ingegneria marittima e fluviale (es. MOSE di Venezia, Canale scolmatore del torrente Bisagno a Genova)

Università degli Studi di Genova

04/2019

Iscrizione all'albo degli Ingegneri di Bari

Ordine degli Ingegneri di Bari

12/2017

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile (LM - 23) – Indirizzo Idraulica

TESI DI LAUREA su Idrologia di Bacino: “INFLUENZA DELLE VARIAZIONI CLIMATICHE SULLE DISTRIBUZIONI DELLE PROBABILITA' DELLE PIENE”.

Politecnico di Bari

108/110

04/2015

Laurea in Ingegneria Civile (DM 270/04)

TESI DI LAUREA: “ASPETTI IDROGEOLOGICI DEL TERRITORIO DI IPPOCAMPO”

Politecnico di Bari