



Doc. SICS\_210\_Integraz  
Progetto messa in produzione pozzo  
Agosta 1 Dir

## **INTEGRAZIONI ALLO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE**

### **Allegato 7c.**

**Attività 3 – Analisi degli effetti della subsidenza  
indotta dalla coltivazione del giacimento Agosta  
sull’assetto della fascia costiera delle Vene di  
Bellocchio**

Luglio 2016



---

**Contratto Aperto n. 2500017034**

## **Attività 3**

### **Analisi degli effetti della subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento Agosta sull'assetto della fascia costiera delle Vene di Bellocchio**

*Rapporto finale*

*Giugno 2016*

Coordinatore: Prof. Daniele Masetti

Responsabili Scientifico: Prof. Paolo Ciavola

*Paolo Ciavola*

Collaboratori:  
Dott. PhD Duccio Bertoni  
Dott. Enrico Duo  
Dott. PhD Edoardo Grottoli

## Abstract

Le analisi numeriche, volte a quantificare l'impatto della subsidenza attesa sulla vulnerabilità idraulica della costa in condizioni di mareggiata hanno evidenziato che:

- la subsidenza indotta dai pozzi di Dosso e Agosta, calcolata al 2030 considerando i dati dello scenario peggiore fornito da Eni ( $\leq 2$  cm sul dominio costiero), hanno effetti trascurabili sulle aree inondate relative alle mareggiate simulate del 2012, 2013 e 2015 che si ritengono rappresentative di condizioni estreme;
- la stessa, ha impatti trascurabili sulle variazioni volumetriche indotte dalle mareggiate simulate.

Si rammenta che le considerazioni qui presentate sul basso impatto previsto, sia dal punto di vista delle inondazioni marine, che della perdita volumetrica in condizioni di mareggiata, sono fortemente condizionate dalle politiche di gestione della fascia costiera che verranno portate avanti nel tempo dagli enti preposti.

Possibili interventi di protezione delle zone urbanizzate ed occupate da concessioni balneari nel periodo invernale, tramite la costruzione di argini invernali sulla spiaggia, localmente noti come "dune invernali" e non considerati in questo studio, potrebbero alterare la risposta alle mareggiate, addirittura abbassando o annullando l'impatto previsto. Assumendo questo, la previsione dell'impatto della subsidenza indotta genera, in maniera abbastanza affidabile, un effetto trascurabile.

Vi è una serie di fattori incogniti che potrebbero essere introdotti da un cambio nelle politiche gestionali, quali ad esempio interventi che cambino le dinamiche del trasporto sedimentario lungocosta, come ad esempio una maggiore dinamicità della foce del Gobbino. Rimane infine incognito come l'ormai esaurita riserva sedimentaria della freccia litorale del Reno potrà essere nel tempo rimpiazzata da un'eventuale riattivazione del trasporto solido al fondo da parte del fiume.

# Indice

<b>Indice</b>	<b>3</b>
<b>1. Introduzione e scopo del lavoro</b>	<b>5</b>
<b>2. Area di studio</b>	<b>6</b>
<b>3. Materiali e metodi</b>	<b>14</b>
<i>Attività 3.1: Rilievo morfobatimetrico dei fondali adiacenti le Vene di Bellocchio</i>	14
<i>Attività 3.2: Caratterizzazione topografica, morfologica, batimetrica delle Vene di Bellocchio e di un intorno opportunamente esteso ed integrazione con i rilievi esistenti</i>	18
<i>Attività 3.3: Costruzione del DEM delle Vene di Bellocchio</i>	23
<i>Attività 3.4: Implementazione di un modello morfologico bidimensionale</i>	25
<i>Attività 3.5: Caratterizzazione dell'assetto morfologico nello stato di fatto (SDF)</i>	31
<i>Attività 3.6: Caratterizzazione dell'assetto idrodinamico nello stato di previsione (SDP)</i>	34
<i>Attività 3.7: Caratterizzazione degli effetti morfologici associati alla subsidenza negli scenari simulati</i>	36
<b>4. Analisi dei risultati</b>	<b>38</b>
<i>Attività 3.1: Rilievo morfobatimetrico dei fondali adiacenti le Vene di Bellocchio</i>	38
<i>Attività 3.2: Caratterizzazione topografica, morfologica, batimetrica delle Vene di Bellocchio e di un intorno opportunamente esteso ed integrazione con i rilievi esistenti</i>	58
<i>Attività 3.3: Costruzione del DEM delle Vene di Bellocchio</i>	62
<i>Attività 3.4: Implementazione di un modello morfologico bidimensionale</i>	65
<i>Attività 3.5: Caratterizzazione dell'assetto morfologico nello stato di fatto (SDF)</i>	65
<i>Attività 3.6: Caratterizzazione dell'assetto idrodinamico nello stato di previsione (SDP)</i>	78
<i>Attività 3.7: Caratterizzazione degli effetti morfologici associati alla subsidenza negli scenari simulati</i>	87
<b>5. Affidabilità</b>	<b>89</b>
<i>Attività 3.4 - 3.7: Affidabilità del dato iniziale</i>	89
<i>Attività 3.4 - 3.7: Sensitività del modello</i>	102

<b>6. Conclusioni</b>	<b>128</b>
<b>7. Bibliografia</b>	<b>130</b>

# 1. Introduzione e scopo del lavoro

Il contributo di ricerca, nell'ambito della convenzione più generale, ha avuto come scopo lo studio degli effetti sulla fascia costiera prodotti dalla subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento "Agosta" nell'arco dei prossimi 15 anni. I dati riguardanti la subsidenza attesa (i.e. traslazione verticale) si basano sui risultati del modello geomeccanico ad elementi finiti sviluppato da Isamgeo Engineering GmbH per conto del Committente. Il sistema oggetto dello studio si riferisce all'unità fisiografica compresa tra il canale di Porto Garibaldi e la foce del Fiume Reno. In particolare l'assetto morfologico del sistema è stato indagato considerando la presenza dei processi erosivi in corso, il ruolo svolto dal Canale Gobbino, il comportamento morfologico dei bassi fondali e la sedimentazione sulla zona emersa delle Vene di Bellocchio. Pertanto sono stati eseguiti due rilievi topografici della porzione emersa della spiaggia e un'indagine morfobatimetrica dei bassi fondali antistanti le Vene di Bellocchio, per aggiornare i rilievi esistenti anche in seguito all'impatto della mareggiata eccezionale del 05 febbraio 2015, al fine di ricostruire in dettaglio la topografia del sistema morfologico nel suo complesso.

Le simulazioni hanno riguardato uno stato di fatto attuale e vari scenari sulla scala temporale concordata con il Committente ed in particolare gli intervalli 2017 – 2020 e 2020 – 2030. Inizialmente è stato caratterizzato lo stato di fatto (SDF), così come oggi si presenta in considerazione dei bilanci sedimentari in essere. Successivamente è stato caratterizzato lo stato di previsione (SDP) considerando l'effetto della subsidenza.

La ricerca è stata pertanto articolata sulle seguenti macroattività:

1. Caratterizzazione topografica, morfologica, batimetrica delle Vene di Bellocchio e di un intorno opportunamente esteso;
2. Implementazione di un modello morfologico bidimensionale;
3. Caratterizzazione dell'assetto morfologico nello stato di fatto (SDF);
4. Caratterizzazione dell'assetto morfologico nello stato di previsione (SDP).

## 2. Area di studio

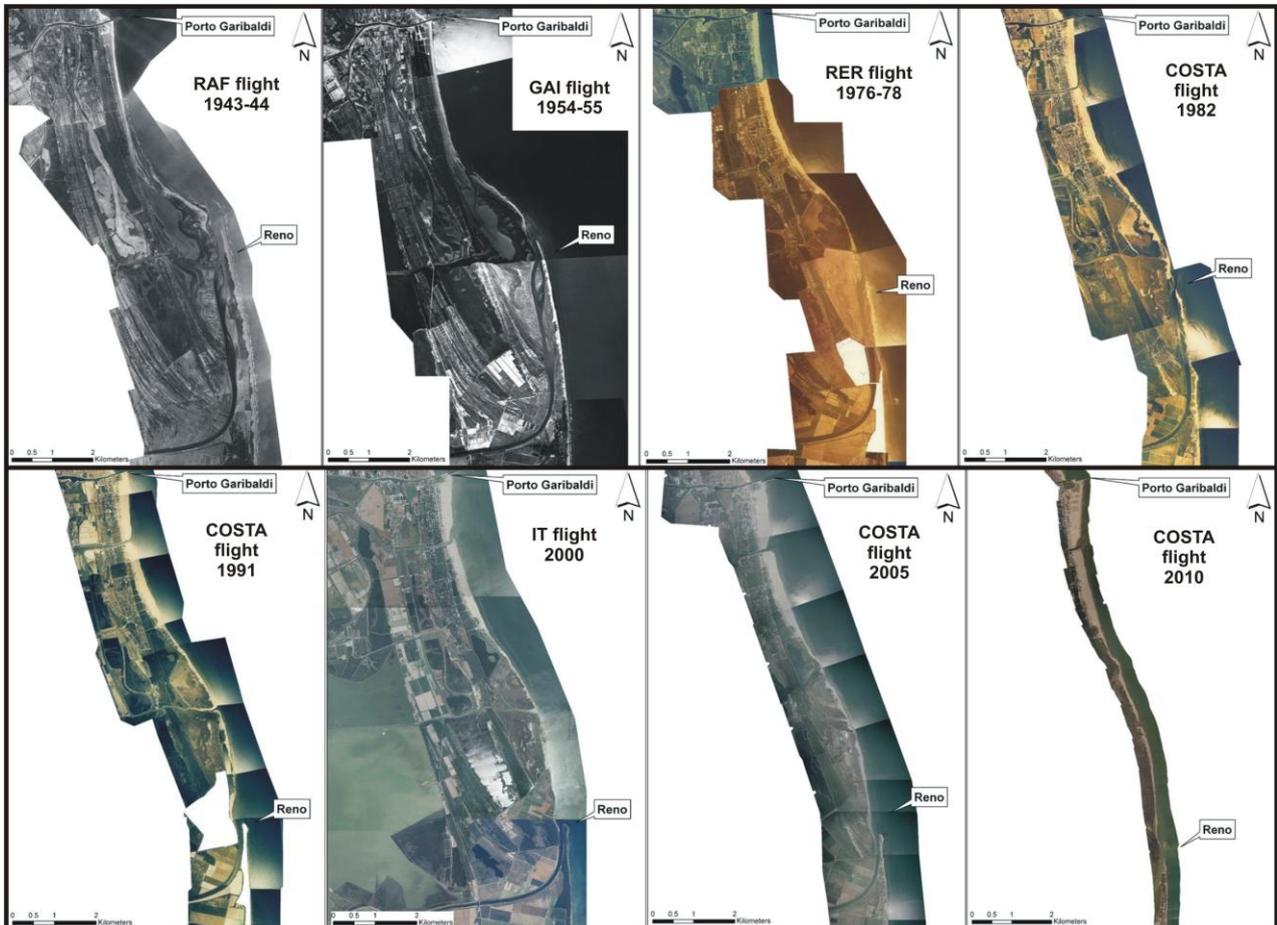
Il settore di costa compreso all'interno dell'area di studio della presente indagine include il tratto di litorale tra Porto Garibaldi, a nord, e la foce del Fiume Reno, a sud (Figura 1). Tale area è da tempo caratterizzata da processi morfodinamici di notevole intensità, i quali hanno pesantemente influito sull'evoluzione costiera. Attraverso una serie di immagini storiche (gentilmente fornite dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/immagini/costa/sic>) riprese da voli aerei è possibile osservare lo sviluppo del litorale a partire dagli anni 40 del secolo scorso (ODL Dosso degli Angeli).



Figura 1 Immagine satellitare del tratto Porto Garibaldi – foce Reno (immagine satellitare di sfondo da Google Earth)

Tra il 1943 e il 1954 il tratto di costa oggetto di studio appare diviso in due settori, uno a nord in avanzamento e uno a sud in arretramento: il punto di flesso sembra posizionato nell'area

corrispondente all'attuale stabilimento balneare chiamato "Jamaica" (Figura 2). Tra il 1954 e il 1977 l'evoluzione del paraggio è simile al decennio precedente, ovvero avanzamento a nord e arretramento a sud, con punto di flesso sempre in corrispondenza dell'attuale bagno "Jamaica".



*Figura 2 Serie di foto aeree che mostrano l'evoluzione della fascia di litorale compresa tra Porto Garibaldi e la foce del Fiume Reno*

Contemporaneamente aumenta l'antropizzazione dell'area, che prosegue ancora più decisa nell'intervallo di tempo successivo, ovvero tra il 1977 e il 1982: le tendenze di avanzamento/arretramento rimangono sostanzialmente inalterate. Tra il 1982 e il 1991 la fascia costiera assume una configurazione simile a quella odierna, in particolare per quanto riguarda la foce del Fiume Reno, che dopo svariate modifiche raggiunge la posizione corrente; si conferma la tendenza di avanzamento a nord e arretramento a sud del bagno "Jamaica", con piccole variazioni locali dovute alle attività dell'uomo. Medesima situazione nell'intervallo 1991-1998, mentre in quello 1998-2005 si evidenzia arretramento a sud del bagno "Jamaica" con valori molto elevati e sostanziale stabilità a nord, a causa di dragaggi che hanno obliterato l'avanzamento della linea di

riva. L'ultimo intervallo di tempo, 2005-2010, conferma le tendenze precedenti, anche se l'arretramento nella zona sud continua ad essere molto significativo; la zona nord, invece, presenta alternanza tra avanzamento e arretramento, ma con tassi ridotti (Figura 2). Nordstrom et al. (2015) discutono in dettaglio l'evoluzione recente della spiaggia compresa tra il Canale Logonovo e lo stabilimento balneare "Jamaica" e si rimanda il lettore al loro lavoro per ulteriori dettagli.

Per quanto riguarda il bilancio sedimentario della spiaggia antistante l'area di indagine è possibile fare riferimento a stime realizzate attraverso confronti fra i rilievi LiDAR del 2004 (Progetto CADSEALAND), 2010 (Protezione Civile) e 2012 (Eni) per la parte emersa, e fra rilievi batimetrici tradizionali (quali rilievi ARPA risalenti al 1994, 2000, 2006 e 2012) per la parte sommersa (ODL Dosso degli Angeli). I confronti sono stati eseguiti attraverso elaborazioni dei dati in ambiente ArcGIS, in particolare ricorrendo alla triangolazione come metodo di interpolazione. La mappa globale, da Lido degli Estensi fino alla foce del Fiume Reno, mostra un netto aumento dei volumi nella zona a nord dello stabilimento balneare "Jamaica", in particolare nel tratto tra il Canale Logonovo e il pennello a sud di Porto Garibaldi (Figura 3). Questo conferma che il trasporto lungo costa nella zona di studio è diretto prevalentemente da sud verso nord, tanto che gli Enti svolgono regolari operazioni di *back-passing* dalla spiaggia di Lido di Spina verso il bagno "Jamaica" ed hanno in passato effettuato un *bypassing* in direzione di Lido degli Estensi. Al contrario, la zona a sud del bagno "Jamaica" mostra una variazione significativa della spiaggia emersa, con una notevole perdita volumetrica, e un corrispondente incremento di sedimenti nella porzione di costa retrostante la spiaggia, verso l'area umida che occupa il sistema delle Vene di Bellocchio. La fascia corrispondente alla spiaggia emersa appare in erosione lungo l'intera porzione di costa fino alla foce del Fiume Reno, con valori più accentuati nella parte prossima al bagno "Jamaica" e in corrispondenza della foce del Canale Gobbino. Per quanto riguarda le variazioni volumetriche, i calcoli effettuati nell'ambito del medesimo studio (ODL Dosso degli Angeli) mostrano che l'intero tratto di litorale esaminato ha un bilancio sedimentario positivo della porzione emersa (Tabella 1). In particolare, tra il 2004 e il 2012 c'è stato un incremento del volume pari a circa  $310000 \text{ m}^3$ . Nel bilancio sedimentario è però fondamentale non trascurare gli interventi antropici eseguiti sull'area (dragaggi, prelievi, ripascimenti), in modo da evitare errori di valutazione e non escludere importanti informazioni riguardanti la dinamica dei sedimenti, sia naturale sia artificiale. Tenendo a mente che le valutazioni effettuate dai dati LiDAR includono esclusivamente la spiaggia emersa (manca quindi la parte di arenile al di sotto del medio mare), è possibile affermare che la spiaggia emersa ha incrementato il volume di materiale in essa presente, compensando il prelievo artificiale di  $202000 \text{ m}^3$  effettuato dal 2004 al 2012.

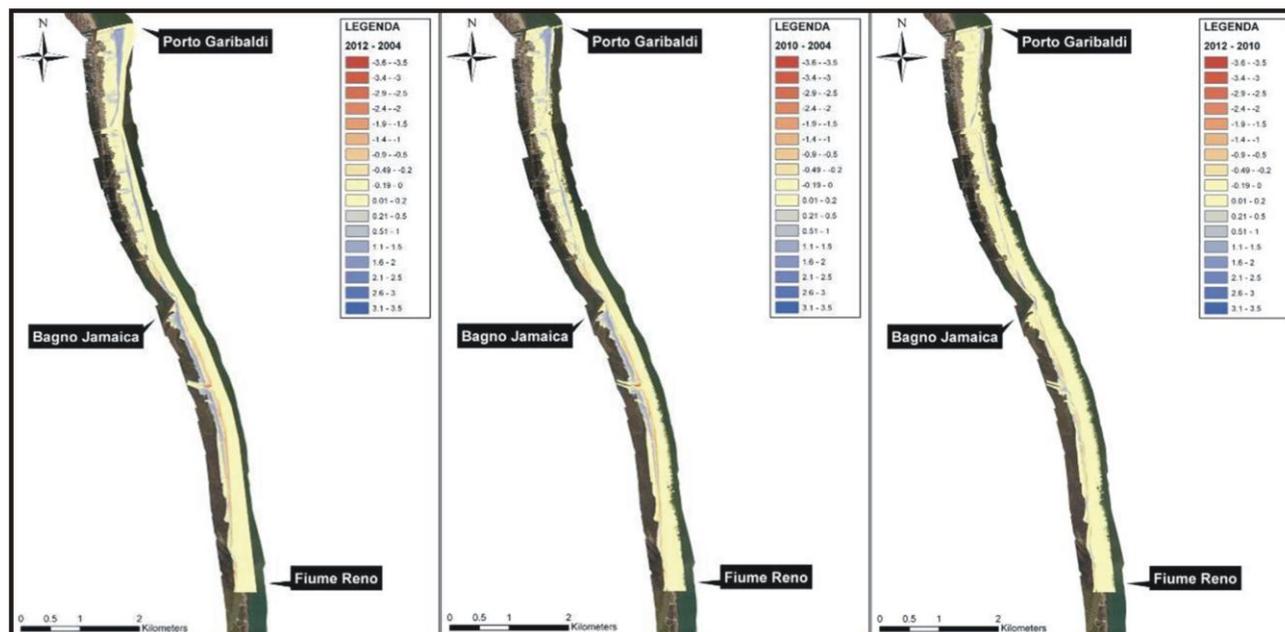


Figura 3 Mappe di erosione/deposizione (scala di colori nella legenda), tra Porto Garibaldi/Lido degli Estensi e la foce del Fiume Reno, ottenute dal confronto tra il DTM 2012 e 2004 (a sinistra), il DTM 2010 e 2004 (al centro) e il DTM 2012 e 2010 (a destra)

Sommando poi i valori ottenuti, il tratto di costa compreso tra Lido degli Estensi e la foce del Fiume Reno ha ricevuto una quantità di sedimento pari a circa  $512000 \text{ m}^3$ , che è servito a compensare i  $202000 \text{ m}^3$  estratti per ripascere altre zone e che si è accumulato nell'area per un totale di  $310000 \text{ m}^3$ .

Tabella 1 Volume di materiale depositato, rimosso e bilancio totale nel periodo indicato nella prima colonna. Tutti i valori sono espressi in metri cubi.

TOTALE (Lido degli Estensi - Foce Reno)			
Confronti LiDAR	Accrezione (volume $\text{m}^3$ )	Erosione (volume $\text{m}^3$ )	Bilancio: accrezione - erosione (volume $\text{m}^3$ )
<b>2012-2004</b>	555413	247850	<b>307563</b>
<b>2010-2004</b>	444756	233698	<b>211058</b>
<b>2012-2010</b>	227649	134986	<b>92662</b>

Per quanto riguarda il bilancio sedimentario della parte sommersa sono stati messi a confronto i rilievi ARPA del 2000, del 2006 e del 2012 in modo da costruire mappe di erosione/deposizione per quegli intervalli temporali (ODL Dosso degli Angeli): i risultati indicano una consistente perdita volumetrica nella mappa 2006-2000 nella porzione di costa a sud del bagno "Jamaica" in corrispondenza della zona tra il medio mare e le barre sommerse; mostrano invece un enorme

incremento del volume della spiaggia sommersa, fino a -7.5 m sul l.m.m., a nord del bagno “Jamaica” (Figura 4). Un altro punto di accumulo si trova a ridosso del molo di Porto Garibaldi. Il bilancio totale è positivo, con un incremento del volume di circa 2.5 milioni di metri cubi. La mappa di erosione e deposizione del confronto 2012-2006 indica un deciso decremento del volume di sedimento a sud del bagno “Jamaica”, che si estende fino alla batimetrica -7.5 m. I valori massimi di erosione sono localizzati nella spiaggia sommersa tra il medio mare e le barre. Le aree caratterizzate da incremento di volume si trovano a nord del bagno “Jamaica”, in prossimità del molo di Porto Garibaldi. Il bilancio totale è negativo, con un volume in erosione di circa 2.6 milioni di metri cubi.

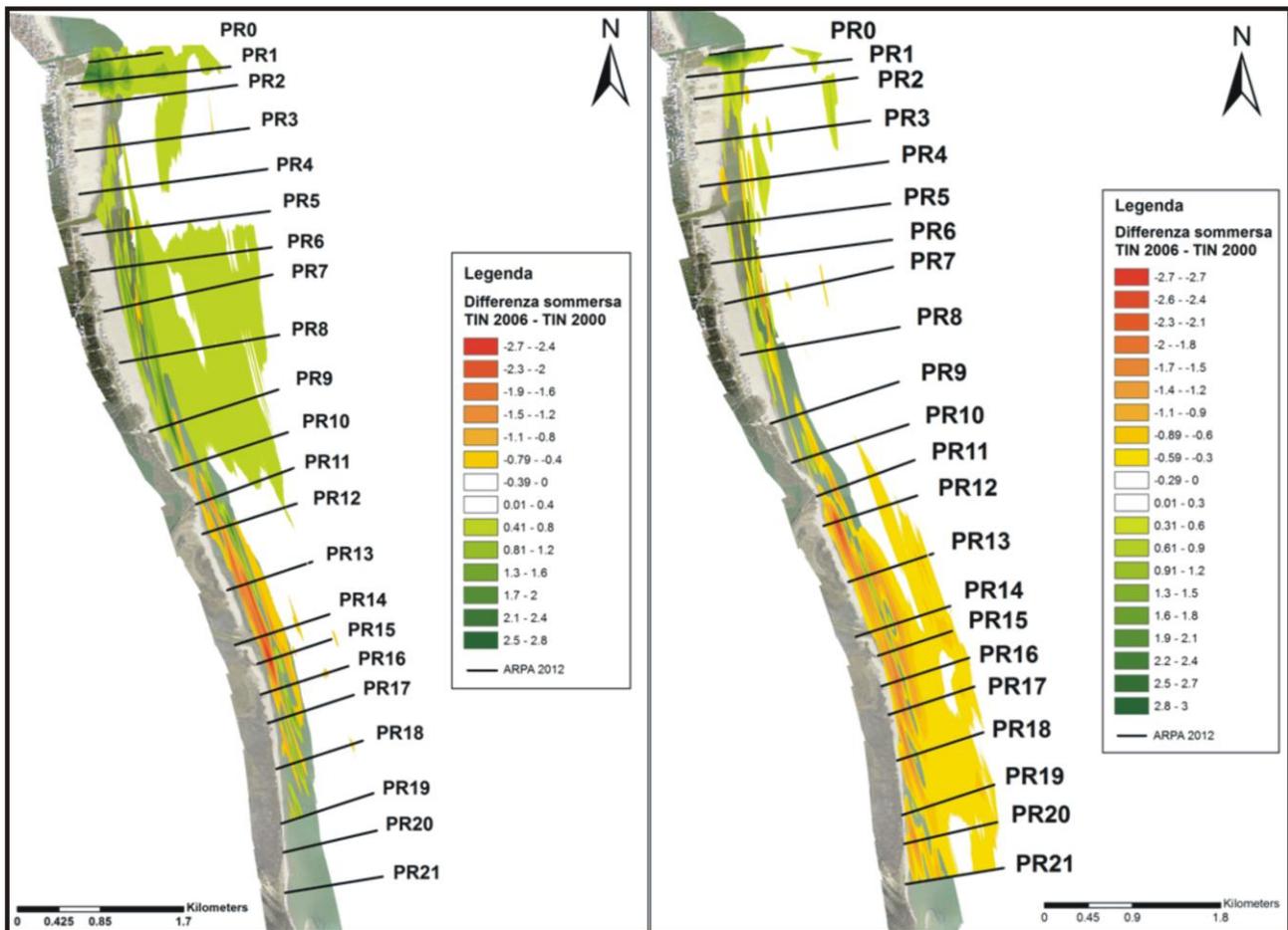


Figura 4 Mappe di erosione/deposizione della spiaggia sommersa tra il 2000 e il 2006 (sinistra) e tra il 2006 e il 2012 (destra). Foto aerea: Volo Costa 2010

Da ulteriori indagini effettuate è stato riscontrato un abbassamento di fondale sia sulle sezioni ARPA 2006 e 2012 sia nei rilievi LiDAR e multibeam: tuttavia, tale abbassamento potrebbe essere causato da una non ottimale qualità dei dati piuttosto che da fenomeni reali, anche se le dinamiche

recenti della costa Emiliano-Romagnola potrebbero averlo generato. A conclusione di tutte le analisi effettuate emerge che (i) il molo di Porto Garibaldi è in grado di intercettare il sedimento che si sposta lungo la costa da sud verso nord; (ii) il punto di flesso, prima localizzato in corrispondenza del bagno “Jamaica”, si sta lentamente spostando verso nord a causa della carenza di apporto sedimentario; (iii) l’erosione di sedimenti in corrispondenza del bagno “Jamaica” è evidente, ma viene compensata dai ripascimenti: tuttavia, questi devono essere effettuati sempre più frequentemente e non evitano comunque il danneggiamento delle strutture antropiche; (iv) a sud dello stabilimento balneare “Jamaica” la situazione è critica perché la spiaggia emersa arretra e la spiaggia sommersa perde sedimento.

Per quanto riguarda la ricostruzione del clima meteo-marino nell’area è possibile far riferimento ai risultati del modello dello Stato del Mare SWAN, operativo presso il Servizio IdroMeteorologico dell’ARPA Emilia-Romagna (Deserti et al., 2011). Per il litorale sotto studio, Porto Garibaldi – foce Reno, vengono prese in considerazione le elaborazioni eseguite in corrispondenza della stazione di Comacchio (44.700 Lat. N; 12.333 Long. E; Profondità 10.7 m). Il diagramma polare riferito all’altezza significativa delle onde mostra che la direzione principale di provenienza è E (Figura 5), che corrisponde a circa il 24% del totale, come si evince dal grafico tabellare (Figura 6). Direzioni subordinate, ma non trascurabili, sono quelle da ESE, ENE e SE (rispettivamente 17%, 16% e 13%); interessante notare che il settore da cui provengono con maggiore frequenza gli stati a più alta energia è quello da ENE. I periodi di calma risultano essere il 22% del totale.

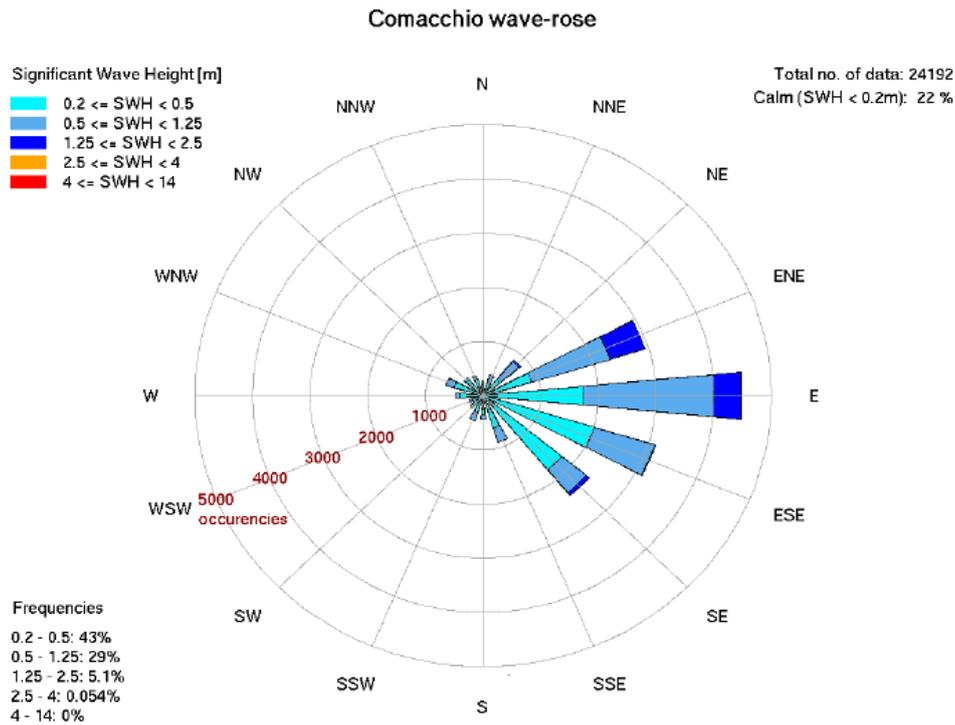


Figura 5 Diagramma polare dell'altezza significativa delle onde incidenti per direzione di provenienza. I dati si riferiscono alla stazione di Comacchio (Deserti et al., 2011)

In questo settore di costa i valori di marea sono quelli tipici del Mar Adriatico, ovvero un regime di tipo microtidale: le maree hanno infatti componenti sia diurne che semidiurne, con un valore di escursione massima in sizigie che è mediamente pari a 70-80 cm, e che scende a 30 cm in quadratura (IDROSER, 1996).

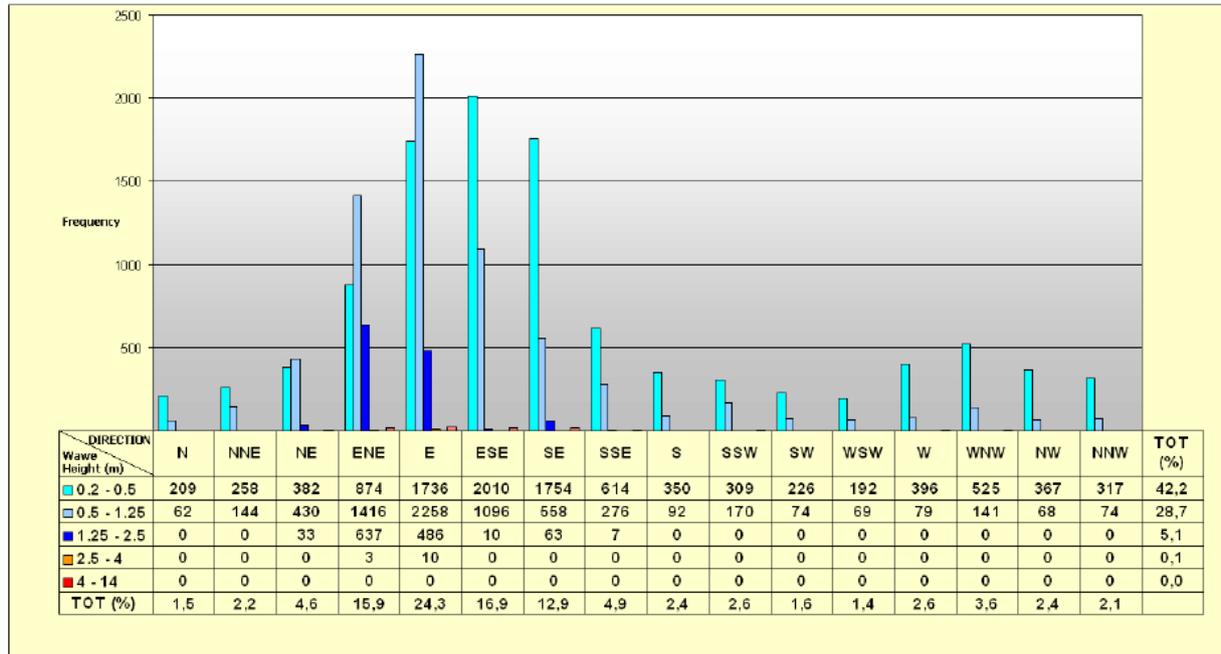


Figura 6 Grafico tabellare dell'altezza significativa delle onde incidenti per direzione di provenienza. I dati si riferiscono alla stazione di Comacchio (Deserti et al., 2011).

## 3. Materiali e metodi

### Attività 3.1: Rilievo morfobatimetrico dei fondali adiacenti le Vene di Bellocchio

La prima attività riguarda lo svolgimento di rilievi topografici della spiaggia emersa e della spiaggia sommersa in corrispondenza del litorale delle Vene di Bellocchio. I rilievi hanno definito il comportamento stagionale ed occasionale di profili tipo e hanno permesso di calibrare il modello concettuale di risposta del litorale. L'indagine di dettaglio ha fornito dati più precisi sull'evoluzione recente del sito così da definirne le principali tendenze. A partire dal giugno 2013 sono stati eseguiti, con cadenza stagionale o seguendo le maggiori mareggiate, numerosi rilievi di campo in questo settore di costa, in particolare nell'area compresa tra lo stabilimento balneare "Jamaica" e la foce del Fiume Reno, nell'ambito dello studio eseguito per il Committente in relazione all'impatto sulla fascia costiera delle attività estrattiva sul giacimento Dosso degli Angeli (ODL Dosso degli Angeli). All'interno dell'area di riferimento, che si estende per circa 3500 m, sono stati quindi individuati 12 profili spazati 300 m l'uno dall'altro (Figura 7). Per quanto riguarda la parte a mare, i medesimi profili sono stati prolungati fino a raggiungere la profondità di 4 m.

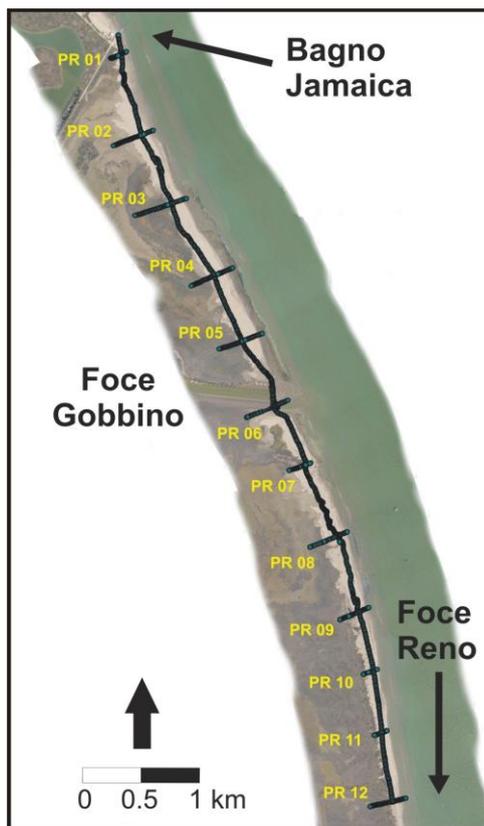


Figura 7 Ubicazione della traccia dei profili realizzati per i rilievi topografici

Per la porzione emersa sono stati eseguiti per mezzo di un ricevitore DGPS-RTK utilizzato in modalità VRS (correzione di rete fornita da Stonex o Topcon Italia). La correzione istantanea fornisce un'accuratezza al centimetro. Il sistema di proiezione geodetico-cartografica utilizzato è UTM Zona 33 N e come Datum è stato usato il WGS84. Sono state realizzate due campagne di rilievi: la prima in data 29 luglio 2015 con risorse proprie per aggiornare la rete di monitoraggio creata nell'ambito dell'ODL relativo alle attività di Dosso degli Angeli; la seconda in data 06 novembre 2015. Dal momento che sono stati seguiti gli stessi criteri di esecuzione utilizzati per i rilievi topografici effettuati nella medesima area a partire dal 2013, è stato possibile sovrapporre i risultati con i dati pregressi a disposizione (ODL 4310078051). Tali confronti hanno quindi permesso di estendere fino a circa 30 mesi lo studio dell'evoluzione recente del paraggio, anche alla luce dell'impatto della mareggiata estrema avvenuta nella notte fra il 05 e 06 febbraio 2015. I transetti partono dal piede verso terra della duna costiera (laddove presente) e sono stati chiusi alla massima profondità raggiungibile dall'operatore, ovvero circa 1.5 m. Lungo ciascun profilo sono stati registrati punti ad ogni variazione di pendenza significativa, così da ricostruire la morfologia del transetto nel modo più accurato possibile. L'elaborazione dei dati risultanti è stata

compiuta attraverso l'utilizzo del *software* ArcGIS e di sue applicazioni geospaziali quali *3D Analyst* e *Spatial Analyst*, e di un'applicazione del *software* Excel chiamata *Profiler*, una *macro* gentilmente fornita dal Dr. Mouncef Sedrati dell'Università della Bretagna Sud in Francia.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei fondali antistanti le Vene di Bellocchio, i rilievi sono stati eseguiti per mezzo di un ecoscandaglio SonarMite (singlebeam echosounder) collegato al medesimo ricevitore GPS utilizzato per i rilievi topografici in ambiente subaereo. Anche in questo caso la correzione differenziale istantanea fornisce un'accuratezza al centimetro per quanto riguarda le coordinate X e Y, mentre per la quota l'accuratezza è fra i 2 e i 3 cm. Le apparecchiature sono state montate su un gommone Bombard Typhoon 420. Il rilievo è stato eseguito a velocità costante (2.5 nodi) in modalità continua: è stato registrato un punto al secondo. La campagna di rilievi è stata compiuta in data 14 novembre 2015, sfruttando una delle poche finestre di condizioni meteomarine favorevoli (mare calmo e alta marea) al di fuori dei giorni in cui vigevano le restrizioni alla navigazione in tale settore di costa (tutti i giorni feriali nei mesi di settembre, ottobre, novembre e dicembre 2015) per permettere le esercitazioni militari al poligono di tiro di Foce Reno (Figura 8).



## **Attività 3.2: Caratterizzazione topografica, morfologica, batimetrica delle Vene di Bellocchio e di un intorno opportunamente esteso ed integrazione con i rilievi esistenti**

Nel caso dell'utilizzo di un modello bidimensionale è necessario schematizzare le caratteristiche morfologiche in maniera dettagliata, compatibilmente con la griglia di calcolo scelta, ed in particolare la scabrezza del fondo, che dipende dalla granulometria del sedimento e dalla presenza o meno di vegetazione. Per questo motivo è stata realizzata una foto-interpretazione di un mosaico di immagini aeree risalenti al 2010 (Volo Costa, al momento l'unica disponibile per quanto riguarda l'area di interesse) di tutta la fascia costiera compresa tra Porto Garibaldi e la foce del Fiume Reno (Figura 9).



*Figura 9 Mosaico di immagine aeree del settore di litorale compreso tra Porto Garibaldi e la foce del Fiume Reno tratte dal Volo Costa 2010; su di esso è stata realizzata la foto-interpretazione per l'anno 2010*

Per lo svolgimento della modellistica morfologica bidimensionale era infatti necessario un

aggiornamento delle conoscenze rispetto alla precedente foto-interpretazione effettuata dalla Regione Emilia-Romagna utilizzando fotografie del 2008 (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/costa/sistema-informativo-del-mare-e-della-costa-sic>). Il mosaico di fotografie aeree del 2010 copre l'area di interesse fino a circa 600 m dalla linea di riva nella parte settentrionale, che diminuiscono a circa 400 m nella zona naturale, mentre l'area prevista dal modello si estende per circa 1 km dal litorale verso l'entroterra. Per ovviare a tale problematica è stato scelto di utilizzare l'uso del suolo del 2008 realizzato dalla Regione Emilia-Romagna per la parte mancante: non essendo influenzata dai processi marini, quest'area non è comunque stata soggetta a determinanti variazioni durante l'intervallo di tempo intercorso tra le due fotografie.

La foto-interpretazione del mosaico del 2010 è stata effettuata utilizzando le stesse classi che la Regione Emilia-Romagna aveva individuato per la realizzazione della mappa dell'uso del suolo del 2008 alla scala 1:5000: ciò ha permesso di definire in misura più puntuale le variazioni avvenute tra il 2008 e il 2010 sulla fascia costiera sotto studio. Le classi individuate, 23 in totale, sono le seguenti (riportate in ordine alfabetico, con breve descrizione per semplificare l'identificazione e definizione dei valori RGB del colore utilizzato per la costruzione della legenda):

- Area agricola eterogenea (RGB: 233, 255, 190): identifica le aree caratterizzate da attività agricole di qualsiasi tipo;
- Argine (RGB: 255, 0, 0): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di argini di corsi d'acqua attivi e relitti o delimitanti la parte interna delle zone umide;
- Argine e golena (RGB: 255, 127, 127): identifica gli argini di corsi d'acqua in cui sono ancora presenti le aree golenali;
- Corpo idrico (RGB: 115, 223, 255): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di masse d'acqua superficiali che non fluiscono (es., laghi);
- Corso d'acqua (RGB: 0, 112, 255): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di masse d'acqua superficiali correnti (es., fiumi, canali);
- Darsena (RGB: 0, 76, 115): identifica le aree caratterizzate da bacini artificiali atti all'uso di attività portuali quali rimessaggio e ormeggio di imbarcazioni;
- Difesa longitudinale aderente (RGB: 78, 78, 78): identifica le aree caratterizzate da interventi di difesa costiera rigidi paralleli a costa (es., scogliere) realizzati a diretto contatto con la riva o la struttura da proteggere;
- Difesa trasversale (RGB: 178, 178, 178): identifica le aree caratterizzate da interventi di difesa costiera rigidi ortogonali a costa (es., pennelli in scogli o in legno);
- Duna attiva (RGB: 255, 255, 0): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di dune

- tuttora attive, con scarsa vegetazione tipica di queste forme;
- Duna semi-stabilizzata (RGB: 230, 230, 0): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di dune non ancora stabilizzate, in cui è presente la vegetazione tipica di queste forme, ma in cui sono riconoscibili processi ancora in atto;
  - Duna stabilizzata (RGB: 255, 170, 0): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di dune stabili, interamente ricoperte da vegetazione tipica di queste forme ed in cui non sono riconoscibili processi ancora in atto;
  - Foce armata (RGB: 0, 0, 0): identifica le aree caratterizzate da strutture di irrigidimento dell'asta finale di corsi d'acqua al fine di aumentarne la navigabilità e diminuirne i processi di insabbiamento;
  - Infrastrutture minori (RGB: 168, 112, 0): identifica le aree caratterizzate da piccole strutture antropiche isolate (es., capanni di caccia) spesso costruite in siti distanti da zone urbanizzate (es., retroduna, boschi);
  - Opera portuale (RGB: 102, 119, 205): identifica le aree caratterizzate da strutture antropiche connesse alle attività portuali della zona;
  - Spiaggia con infrastrutture (RGB: 205, 170, 102): identifica le aree di spiaggia emersa caratterizzate dalla presenza di strutture antropiche, permanenti e non, connesse alle attività degli stabilimenti balneari;
  - Spiaggia emersa (RGB: 245, 202, 122): identifica le aree di spiaggia emersa prive di alcuna struttura antropica, con limite verso mare l'inizio della zona riconoscibile come intertidale;
  - Vegetazione arborea (RGB: 38, 115, 0): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di alberi con fusto o vegetazione alta;
  - Vegetazione sparsa (RGB: 85, 255, 0): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di vegetazione bassa o non continua all'interno dell'area stessa;
  - Ventaglio di overwash (RGB: 245, 245, 122): identifica le aree di spiaggia emersa in cui sono riconoscibili forme legate all'occorrenza di processi quali overwash durante le mareggiate;
  - Verde urbano (RGB: 115, 178, 115): identifica le aree caratterizzate dalla presenza di vegetazione (es., parchi, campi non coltivati) all'interno di zone urbanizzate;
  - Zona umida inondata (RGB: 102, 205, 171): identifica le aree umide retrodunali in cui al momento è presente acqua stagnante;
  - Zona umida non inondata (RGB: 205, 205, 102): identifica le aree retrodunali in cui al momento non è presente acqua stagnante;

- Zona urbanizzata (RGB: 225, 225, 225): identifica le aree caratterizzate da strade, edifici e strutture antropiche legate alle zone urbane.

La foto-interpretazione è stata compiuta attraverso l'utilizzo del *software* ArcGIS e di sue applicazioni geospaziali quali *Editor*, lavorando alla scala 1:2000 per poter dettagliare in misura più efficace i vari elementi presenti nell'area di indagine.

Successivamente, a causa della necessità di definire delle classi di rugosità del terreno e la presenza di layers non erodibili per le attività di modellistica, è stato deciso di semplificare la suddivisione delle classi sopraelencate raggruppando quelle affini in modo da creare 5 macrogruppi, lasciando solo 6 classi invariate, secondo il seguente schema:

#### Classi invariate:

- Corpo idrico (RGB: 115, 223, 255);
- Corso d'acqua (RGB: 0, 112, 255);
- Difesa longitudinale aderente (RGB: 78, 78, 78);
- Difesa trasversale (RGB: 178, 178, 178);
- Foce armata (RGB: 0, 0, 0);
- Spiaggia con infrastrutture (RGB: 205, 170, 102).

#### Macrogruppi:

- Spiaggia (RGB: 245, 202, 122): accomuna le aree caratterizzate da sedimento sabbioso e mobilizzato da processi di trasporto eolico e marino; non è presente una copertura vegetazionale se non singole piante, trascurabili alla scala della griglia di simulazione. Comprende:
  - Duna attiva
  - Spiaggia emersa
  - Ventaglio di overwash
- Vegetazione Alta (RGB: 38, 115, 0): accomuna infrastrutture isolate di piccole dimensioni e vegetazione arborea con copertura continua che genera disturbo al flusso idrico se sommersa. Comprende:
  - Infrastrutture minori
  - Vegetazione arborea
- Vegetazione Bassa (RGB: 85, 255, 0): accomuna le aree caratterizzate da piante di piccole dimensioni e vegetazione che genera disturbo limitato al flusso idrico se sommersa; da

notare che argini e golena vengono trattati in questo modo per la natura costruttiva utilizzata in zona, essenzialmente in terra con copertura a prato. Comprende:

- Area agricola eterogenea
- Argine
- Argine e golena
- Duna semi-stabilizzata
- Duna stabilizzata
- Vegetazione sparsa
- Verde urbano
- Zone Umide (RGB: 205, 205, 102): accomuna zone umide di origine salmastra o con dominante acqua dolce che possono essere vegetate da piante di piccole dimensioni e vegetazione che genera disturbo limitato al flusso idrico se sommersa; da notare che da un punto di vista sedimentologico sono costituite da una dominanza di sedimento fangoso, spesso consolidato, e per tale motivo verranno trattate come layer non erodibile nel modello morfologico. Comprende:
  - Zona umida inondata
  - Zona umida non-inondata
- Zone Urbanizzate (RGB: 225, 225, 225): accomuna zone urbanizzate con infrastrutture costruttive in cemento; da notare che nonostante in tale zona esistano sistemi di drenaggio che contribuirebbero allo smaltimento delle acque durante una sommersione, tale aspetto non viene trattato nel modello bidimensionale e si assume che la zona sia impermeabilizzata. Comprende:
  - Darsena
  - Opera portuale
  - Zona urbanizzata

### **Attività 3.3: Costruzione del DEM delle Vene di Bellocchio**

La costruzione del DEM delle Vene di Bellocchio e aree adiacenti è stata basata sulle informazioni disponibili dai più recenti rilievi. In particolare sono stati utilizzati:

- A. DTM Ottobre 2014: dataset risultato del rilievo Lidar di Ottobre 2014 fornito da Eni;
- B. DTM 2013: dataset risultato del rilievo batimetrico Multibeam del 2013 fornito da Eni;
- C. DTM 2012: dataset risultato del rilievo Lidar batimetrico (nearshore) del 2012 recuperato dagli autori presso ARPA Emilia-Romagna;

Si evidenzia che il dataset A (Ottobre 2014) è stato fornito da Eni senza una opportuna descrizione o report in grado di definire univocamente il sistema di riferimento adottato. Il dataset risultava infatti corretto nel riferimento orizzontale ma le quote fornite erano traslate di parecchie decine di metri rispetto al geoide di riferimento WGS84, evidenziando che le stesse erano probabilmente fornite come quote ellissoidiche. Gli autori hanno pertanto corretto le quote utilizzando una stima del valore di ondulazione ellissoide-geoide sulla base di elementi considerati stabili (strade, piazze, ecc...) e noti (da rilievi precedenti).

I dataset A, B e C coprivano zone diverse salvo limitate zone di sovrapposizione. In particolare:

- A. il DTM Ottobre 2014 copriva tutta la zona costiera emersa fino a +0.5-0.6 s.l.m. (elevazione media della superficie del mare durante il rilievo, quantificabile tramite osservazione del dato);
- B. il DTM batimetrico del 2013 copriva i fondali della zona di interesse da -11 m a circa -1.75 m s.l.m.;
- C. il DTM del 2012 copriva la zona intertidale più una parte della spiaggia sommersa fino a -4 m s.l.m.

Il DEM finale è il risultato di un processo di fusione dei tre dataset (Figura 10). Nel particolare:

- la zona emersa fino a 0.75 m s.l.m. è stata descritta tramite il dataset A di Ottobre 2014: tale scelta permette di avere il dato più aggiornato nella zona suscettibile di inondazione;
- l'emerso da 0.75 m ed il sommerso fino a -4.5 m s.l.m. sono stati descritti tramite il dataset C (2012) poichè rappresentava il dato più completo della zona del surf e dei primi metri del sommerso;
- le quote da -4.5 a -11 m s.l.m. sono state descritte tramite dataset B (2013).

Si sottolinea che alcune zone erano prive di dato e sono state evidenziate zone a bassissima risoluzione nel Dataset C (2012) per la parte più a nord di Lido degli Estensi (Figura 10). Inoltre, le profondità dei canali (e relative foci) ed il Lago di Spina sono stati opportunamente inserite localmente poichè il dato rilevato era riferito alla superficie dell'acqua. Le correzioni apportate sono state definite in modo da rendere realistico il DEM per le applicazioni numeriche delle attività successive.

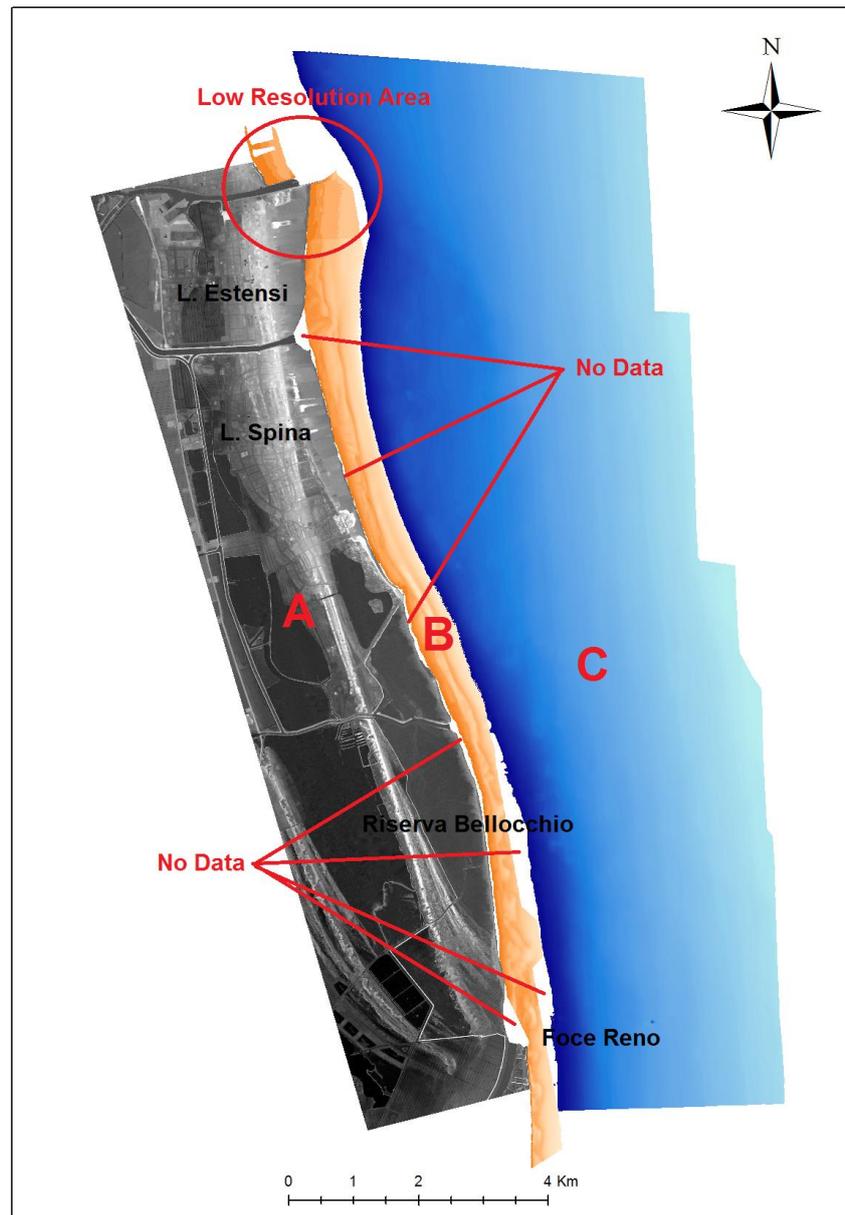


Figura 10 Copertura dei datasets A in scala di grigi (2014), B in scala di arancione(2013) e C in scala di blu (2012): in evidenza le zone prive di dato e la zona a bassa risoluzione del dataset C.

## Attività 3.4: Implementazione di un modello morfologico bidimensionale

Xbeach (Roelvink et al., 2009; Roelvink and Reniers, 2012) è stato selezionato come codice di calcolo per le analisi numeriche morfodinamiche relative a Stato di Fatto (SDF), rappresentativo

della situazione attuale (assunta al 2017), e Stato di Previsione (SDP), rappresentativo dello stato al 2030 modificato dalla subsidenza indotta dal pozzo di Dosso degli Angeli e dalla apertura nel 2017 del pozzo di Agosta. Il dominio di studio è stato suddiviso in tre sottodomini così definiti, con riferimento alla Figura 11:

- Dominio 1 (D1): comprendente le zone ad alta attività turistica di Lido degli Estensi e Lido di Spina (fino al Bagno Piramidi);
- Dominio 2 (D2): a copertura delle zone dal Bagno Piramidi a circa 600 m a sud della Foce del Canal Gobbino;
- Dominio 3 (D3): a copertura della restante area a sud del Gobbino fino al limite dell'area con presenza di dati sufficienti all'implementazione numerica.

Si noti come nella determinazione dei domini siano state escluse la zona a bassa risoluzione di Lido degli Estensi evidenziata nel paragrafo precedente e la zona di Foce Reno in quanto priva di dati per poter essere correttamente implementata. Le rimanenti zone prive di dato sono state interpolate in sede di creazione delle griglie di calcolo.

Il prodotto dell'Attività 3.2 (fotointerpretazione) è stato alla base della caratterizzazione della rugosità in termini di coefficiente di Manning. Le classi utilizzate, opportunamente modificate, ed i relativi valori sono esposti in Tabella 2. I valori sono stati determinati sulla base delle indicazioni ricavate da Chow (1959) e Chaudhry (2007) considerando la classe di appartenenza e le caratteristiche in termini di presenza di ostacoli (es. edifici per la zona urbanizzata). La distribuzione spaziale delle classi è rappresentata in Figura 12.

*Tabella 2 Tabella riassuntiva delle classi di rugosità e relativi valori del coefficiente di Manning.*

Classe	Manning
	[-]
Spiaggia/Sabbia	0.02
Concessioni	0.03
Zona Urbana	0.035
Vegetazione Alta	0.07
Vegetazione Bassa	0.05
Zone Umide	0.04

Sulla base delle informazioni precedenti è stata definita la zona "Hardlayer", necessaria come input al modello per definire le zone non soggette a erodibilità del fondo (es. zone urbane, argini e morfologie con risposta morfodinamica lenta rispetto a quella di spiaggia e dune, ecc...). In Figura 13 è rappresentata la zona definita "HardLayer".

I dati presentati sono stati interpolati sulle griglie di calcolo dei domini con celle rettangolari di dimensioni variabili. Tali griglie sono state costruite in modo tale da ottenere una elevata risoluzione nella zona considerata decisiva per i fenomeni fisici che determinano i fenomeni erosivi e di inondazione: in particolare, in direzione cross-shore la risoluzione off-shore varia da 15-20 m fino ad un minimo di 1.2 m sulla battigia, per poi decrescere ancora fino a 15 m sul il contorno della griglia. Analogamente, la risoluzione alongshore cresce velocemente da 15 m ai bordi laterali della griglia fino circa 8 m nelle zone centrali dei domini. Si porta ad esempio in Figura 14 la rappresentazione dei punti della griglia per il dominio D1. In Tabella 3 si presentano le informazioni riassuntive delle griglie dei tre domini.

*Tabella 3 Numero di celle per dominio di calcolo.*

Dominio	Numero Celle		Totale
	Cross-shore	Alongshore	
D1	979	356	348524
D2	979	356	348524
D3	979	273	267267

Il setup di base per i tre domini è stato definito tramite il file dei parametri di Xbeach (params.txt). Fatto salvo per i parametri di seguito descritti, il settaggio segue quello di default. In particolare, sono stati definiti: diametro medio (D50) pari a 0.00023 m, D90 pari a 0.0003 m, fattore di scala morfodinamica (morfac) pari a 10 e fattore di trasporto legato alla forma delle onde (facua) pari a 0.25. Tali valori sono stati definiti sulla base delle analisi di affidabilità del modello sul dominio D1, precedenti al presente ODL.

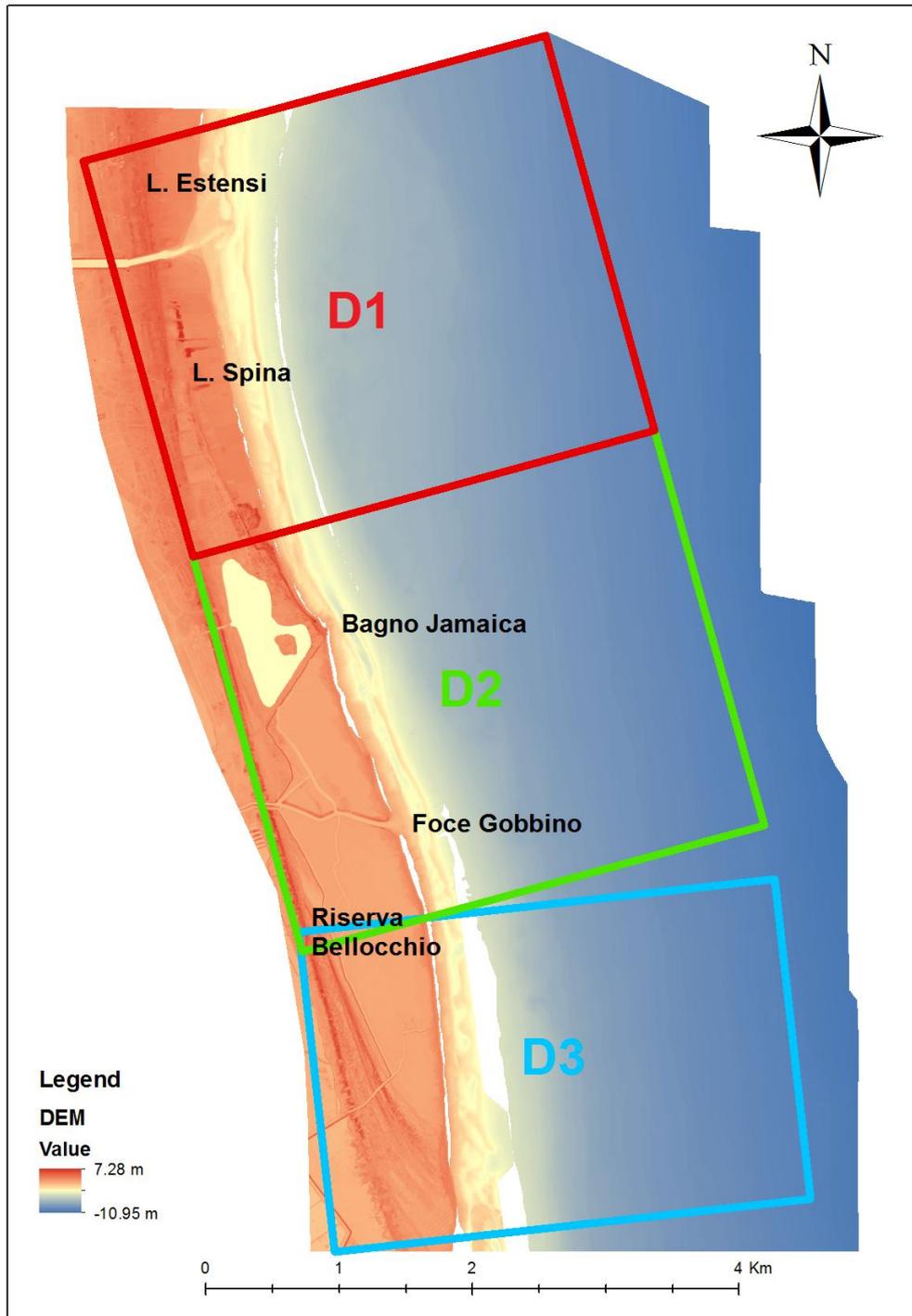


Figura 11 Rappresentazione dei Domini di calcolo D1, D2 e D3.

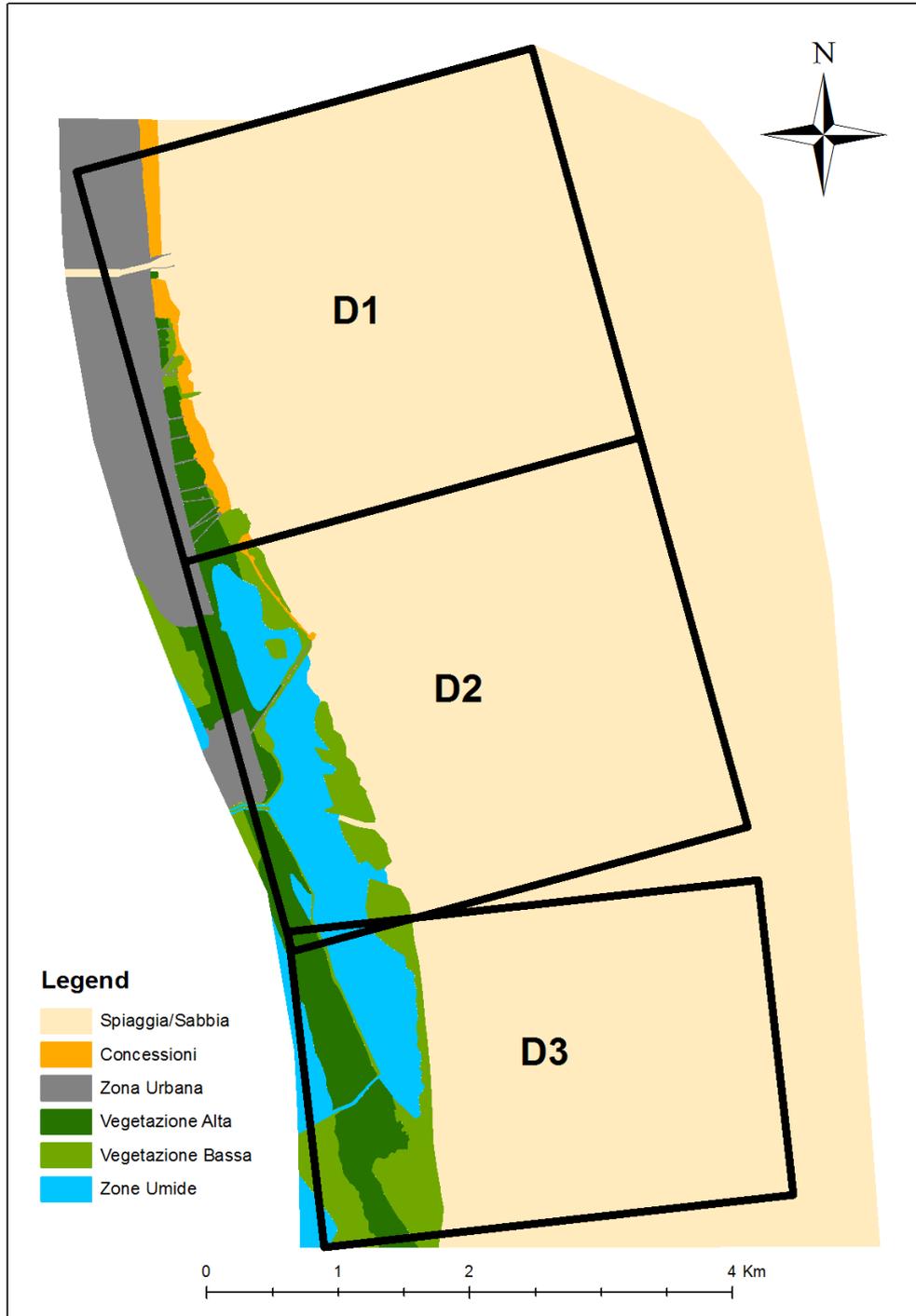


Figura 12 Rappresentazione delle classi di rugosità per i domini D1, D2 e D3.

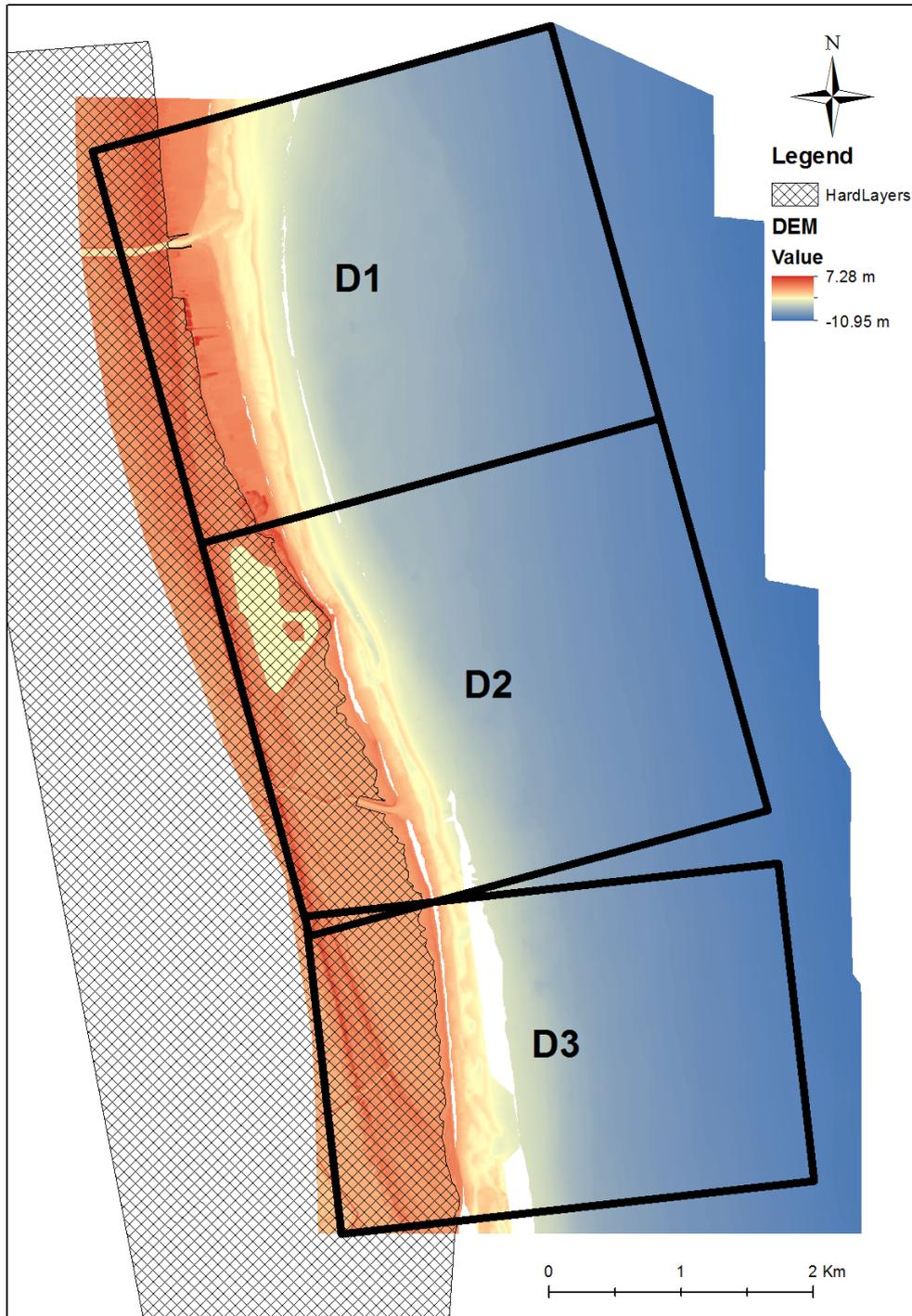


Figura 13 Rappresentazione della zona "Hardlayer" ad erodibilità nulla per i domini D1, D2 e D3.

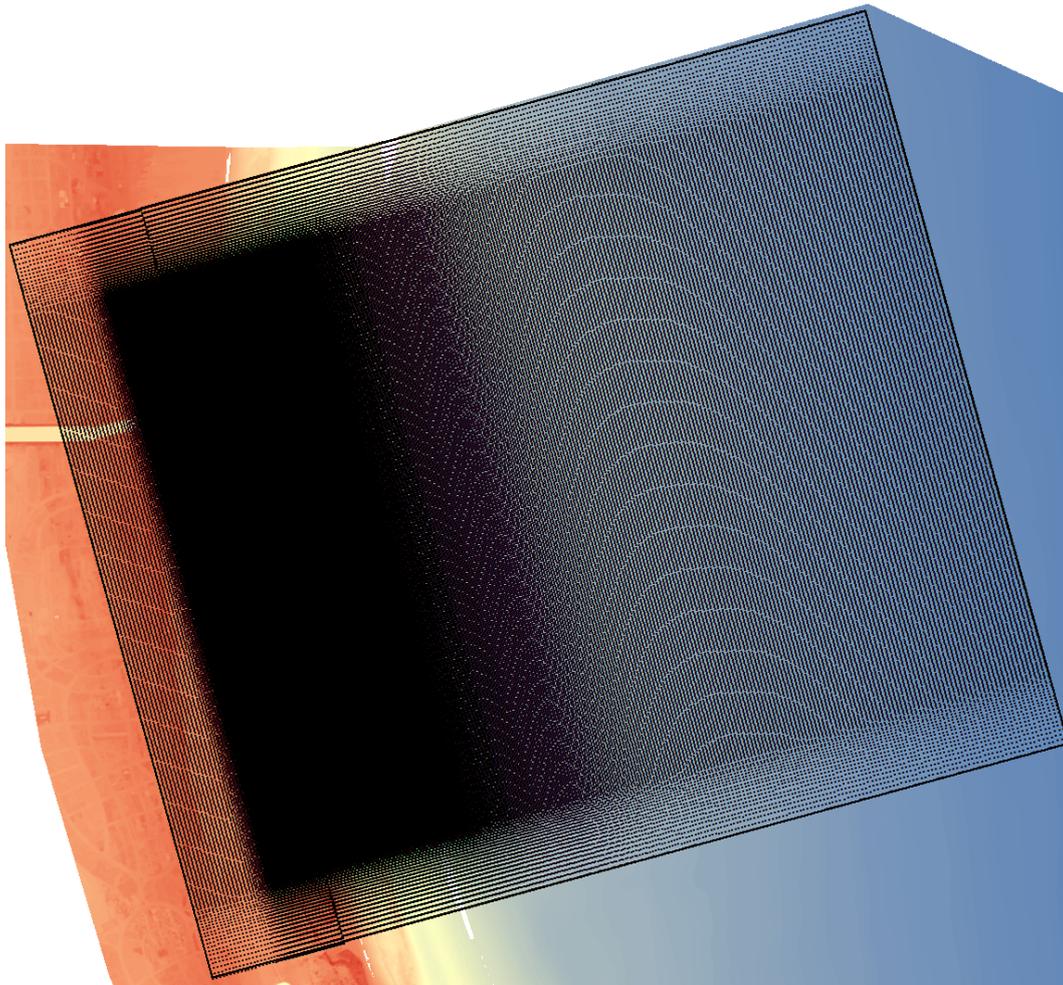


Figura 14 Rappresentazione dei punti della griglia del dominio D1: la zona ad alta risoluzione è quella che risulta più scura.

### **Attività 3.5: Caratterizzazione dell'assetto morfologico nello stato di fatto (SDF)**

Lo Stato di Fatto (SDF) del modello è rappresentato dalle impostazioni di base e dalle griglie descritte nei paragrafi precedenti. In particolare la topo-batimetria costruita è rappresentativa dello Stato di Fatto all'anno 2017 assumendo uno scenario di subsidenza relativa nulla.

Lo Stato di Fatto è stato testato simulando tre mareggiate recenti che hanno causato un impatto significativo alle zone oggetto dello studio in termini di erosione ed inondazione.

Le forzanti del modello sono state definite tramite successioni di spettri Jonswap (instat = jons\_table) per le onde e variazione del livello del mare (zs0file) costruiti sulla base delle serie temporali reali di tre mareggiate recenti:

- Mareggiata di Halloween del 31 Ottobre 2012: il breve evento di 15 ore proveniente da Scirocco e caratterizzato da onde non eccezionali di altezza significativa al picco minore di 2.5 m, ha colpito le coste dell'Emilia-Romagna con importanti impatti erosivi e di inondazione dovuti principalmente all'eccezionale livello dell'acqua registrato e pari a 1.16 m;
- Mareggiata del 11 Novembre 2013: l'evento di Bora, durato circa 30 ore e caratterizzato da onde significative al picco di 3.8 m e livello d'acqua massimo pari a 0.84 m, ha danneggiato strutture in legno a protezione della costa e proprietà private causando, inoltre, forti impatti erosivi specialmente nella zona a sud di Lido di Spina;
- Mareggiata di Sant'Agata del 5-6 Febbraio 2015: l'evento, durato quasi 2 giorni e caratterizzato da onda significativa al picco di 4.66 m e livello d'acqua massimo pari a 1.2 m, è considerato uno dei più importanti ed intensi eventi di mareggiata che abbia colpito le coste emiliano-romagnole facendo registrare danni da inondazione ed erosione in buona parte delle concessioni ed in alcuni abitati nel ferrarese e nel ravennate.

In Tabella 4 si riassumono le caratteristiche delle mareggiate simulate. Le serie temporali sono state ricavate dal mareografo di Porto Corsini - Ravenna (livelli) e dalla boa di Cesenatico (onde). Onde e livelli non sono stati trasformati e/o trasportati nella zona di interesse poichè gli eventi sono considerati indicativi del dominio a scala regionale (Emilia-Romagna) e l'approssimazione introdotta permette di ricavare gli impatti rappresentativi generati dalle mareggiate esaminate. Le serie temporali di onde e livelli, presentate in Figura 15, Figura 16 e Figura 17, sono state ricavate dai dati misurati dalla Boa di Cesenatico (Nausicaa). Le serie temporali sono state estrapolate considerando la metodologia proposta in Perini et al. (2015).

*Tabella 4 Tabella riassuntiva delle caratteristiche delle mareggiate simulate: per ogni evento si presentano data e ora di inizio, durata, livello massimo registrato (Mareografo di Porto Corsini), onda significativa al picco, periodo di picco e direzione media in coordinate nautiche (Boa ondometrica di Cesenatico).*

Mareggiata	Inizio	Durata	TWL	Hs	Tp	Dir.
		[h]	[m]	[m]	[s]	[naut. deg.]
2012	31/10/2012 21:00	14	1.16	2.43	10	86
2013	11/11/2013 01:00	36	0.84	3.79	9.1	56
2015	05/02/2015 04:30	48	1.2	4.57	9.8	61

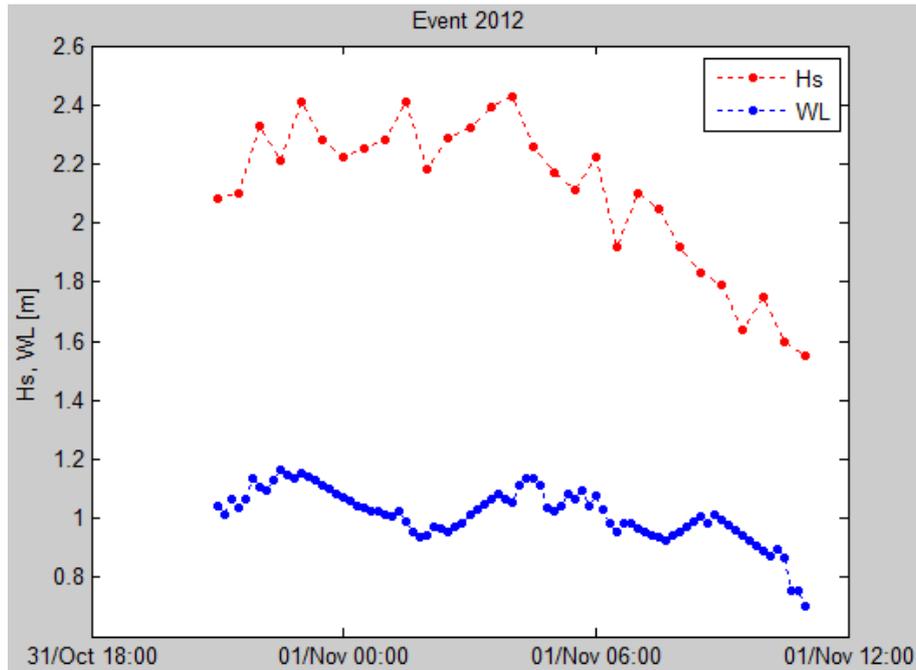


Figura 15 Onde e livelli della mareggiata di Halloween del 31 Ottobre 2012.

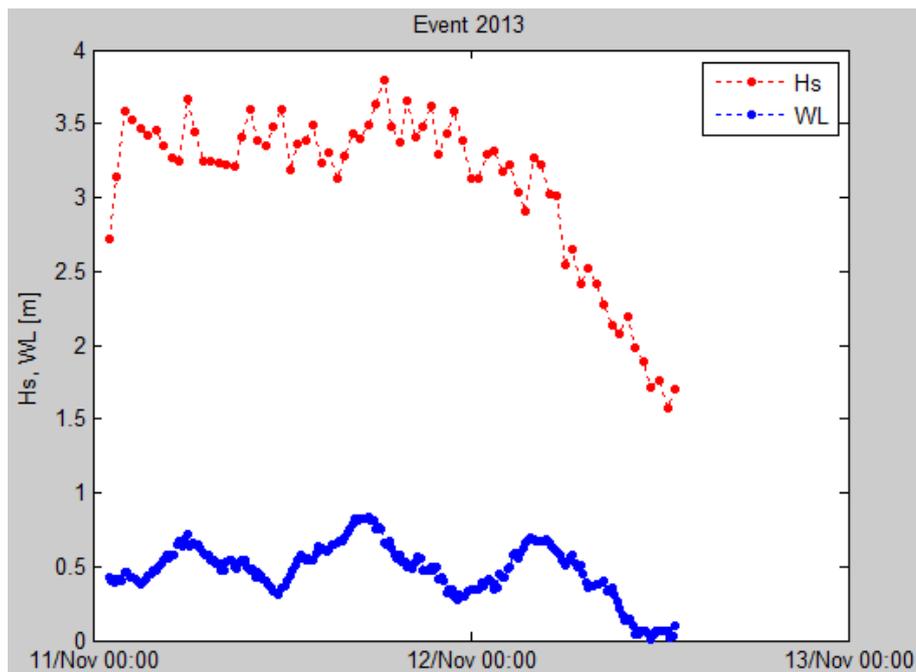


Figura 16 Onde e livelli della mareggiata del 11 Novembre 2013.

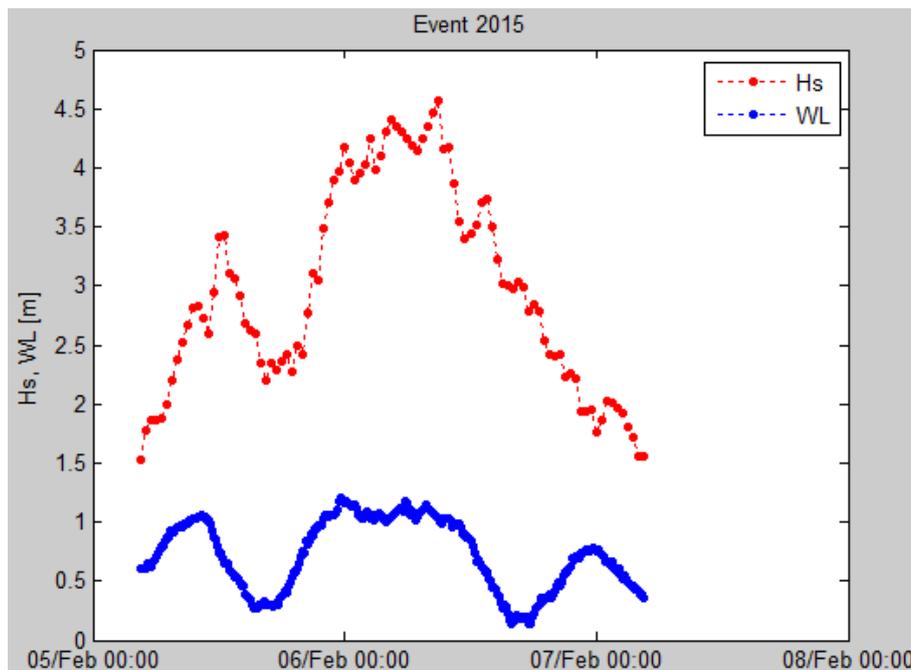


Figura 17 Onde e livelli della mareggiata di Sant'Agata del 5-6 Febbraio 2015.

### Attività 3.6: Caratterizzazione dell'assetto idrodinamico nello stato di previsione (SDP)

E' stato definito lo Stato di Previsione (SDP) come la variazione del modello definita dallo scenario di subsidenza previsto per un determinato anno successivo al 2017 (scenario a subsidenza nulla). E' stata richiesta la caratterizzazione del SDP per gli anni 2020 e 2030.

Sono stati forniti da Eni i risultati di un modello geomeccanico per gli anni 2017, 2020 e 2030 e per gli scenari Medio e Upper. Si tratta di valori di subsidenza a partire dal 1980 (anno apertura Dosso degli Angeli) che coprono una vasta area centrata sulle Valli di Comacchio e relativi agli effetti combinati degli impianti di Dosso degli Angeli e Agosta (apertura prevista nel 2017).

Come anticipato in precedenza, il dato al 2017 è da considerarsi l'istante temporale iniziale dello studio oggetto del presente ODL. Pertanto alla griglia deve essere assegnata subsidenza nulla per lo scenario 2017 (nonché SDF, assumendo il DEM dell'Attività 3.3 rappresentativo dello stesso). Per lo scenario al 2020 invece, la griglia deve essere corretta di una subsidenza pari alla differenza tra il dato al 2020 ed al 2017, per gli scenari Medio ed Upper. Per lo scenario al 2030 invece, la griglia iniziale deve essere corretta di una subsidenza pari alla differenza tra il 2030 ed il

2017, per gli scenari Medio ed Upper.

Tuttavia, una analisi accurata dei dati di subsidenza in relazione alle precisioni del DEM e del calcolo numerico ha dimostrato che, nei domini del modello Xbeach (Attività 3.4):

- le differenze in termini di subsidenza tra scenario Medio ed Upper sono inferiori a 0.001 m;
- gli spostamenti verticali dal 2017 al 2030 per lo scenario Medio risultano inferiori a 0.02 m;
- gli spostamenti verticali dal 2017 al 2030 per lo scenario Upper risultano inferiori a 0.02 m;

Pertanto:

- lo stato della subsidenza dovuta al Dosso degli Angeli può considerarsi stabile mentre quella relativa ad Agosta ha influenza in un'area che non comprende il dominio costiero;
- lo scenario Upper e Medio sul dominio costiero possono considerarsi coincidenti;
- le variazioni verticali dovute alla subsidenza indotta da Dosso e Agosta sul dominio costiero sono trascurabili se confrontate con le precisioni strumentali dei rilievi topo-batimetrici e quelle numeriche del codice, senza considerare i processi di trasformazione del dato in fase di pre-processing (es. interpolazioni e smoothing).

Le precedenti considerazioni hanno permesso la selezione di un unico "peggior scenario" per lo SDP determinato dalla subsidenza indotta nel periodo 2017-2030 dallo scenario Upper e valutato per le tre mareggiate recenti (2012, 2013 e 2015) descritte in precedenza, a confronto con lo SDF per le medesime forzanti. In Figura 18 si presenta la distribuzione della subsidenza in metri sul dominio oggetto di studio per lo scenario adottato (Upper 2017-2030). Si può notare come i valori non superino 2 cm.

Il dato così definito è stato interpolato sulle griglie di calcolo dei domini definiti in precedenza e la topo-batimetria degli stessi è stata opportunamente corretta.

Lo SDP è stato testato per le tre mareggiate recenti precedentemente descritte per permettere il confronto in termini idrodinamici delle differenze indotte rispetto al SDF.

L'analisi dei risultati è stata svolta utilizzando i risultati dello SDP a confronto con lo SDF. In particolare, sono stati processati i dati in output del modello per ricavare le aree inondate per lo SDF e lo SDP per i tre domini (D1, D2 e D3) durante tutta la durata dei tre eventi simulati (2012, 2013 e 2015). I risultati delle analisi verranno presentati per mezzo di mappe semplificate rappresentanti le aree inondate per SDF ed SDP in modo da evidenziare chiaramente le variazioni tra lo scenario a subsidenza nulla (SDF) e quello con subsidenza al 2030 (SDP).



Figura 18 Rappresentazione della distribuzione della subsidenza [m] sul dominio di studio per lo scenario Upper al 2030 calcolato con riferimento al 2017.

### Attività 3.7: Caratterizzazione degli effetti morfologici associati alla subsidenza negli scenari simulati

Lo SDP definito al paragrafo precedente è stato testato per le tre mareggiate recenti descritte in precedenza per confrontare in termini morfologici le differenze indotte dalla subsidenza rispetto al SDF.

L'analisi in termini morfologici è stata svolta confrontando le variazioni volumetriche, mediate sui profili appartenenti alle zone ad alta risoluzione delle griglie (3. Materiali e Metodi, Attività 3.4: Implementazione di un modello morfologico bidimensionale, esempio in Figura 14) dei tre domini (D1, D2 e D3) indotte dalle tre mareggiate simulate (2012, 2013 e 2015), confrontando lo SDF e lo SDP. Le variazioni volumetriche sono state calcolate in base agli output del modello calcolando le

variazioni in percentuale rispetto ad un volume di controllo. Sono stati definiti due volumi di controllo allo stato iniziale per ogni profilo. Il primo, relativo alla spiaggia emersa, è stato definito per ogni profilo allo stato iniziale come il volume di sedimento racchiuso tra il profilo emerso erodibile (si veda 3. Materiali e Metodi, Attività 3.4: Implementazione di un modello morfologico bidimensionale, Figura 13) fino alla quota di 0 m s.l.m. Analogamente, il secondo è stato definito fino alla quota di -1 m s.l.m, includendo quindi una porzione di profilo sommerso. Le differenze volumetriche sono pertanto calcolate nel primo caso fino a 0 m s.l.m mentre, nel secondo caso, fino a -1 m s.l.m..

## 4. Analisi dei risultati

### Attività 3.1: Rilievo morfobatimetrico dei fondali adiacenti le Vene di Bellocchio

L'analisi dei dati del rilievo realizzato in data 29 luglio 2015 mostra variazioni degne di nota rispetto alla situazione pregressa (Figura 19, Figura 22, Figura 24, Figura 25). I profili più settentrionali (01, 02 e 03) mostrano un chiaro arretramento del sistema fino a marzo 2014, seguito da un periodo di stabilità dal momento che il rilievo dell'autunno 2014 non evidenzia ulteriori arretramenti (Figura 19). La mareggiata avvenuta nel febbraio del 2015 comporta tuttavia un notevole spostamento di sedimenti verso il retrospiaggia, visibile in particolare nei profili 02 e 03. Il transetto 03, già nel rilievo di metà febbraio 2015, presenta un leggero accumulo in corrispondenza della riva: ciò è probabilmente dovuto all'arrivo da sud di sabbia proveniente dal ripascimento che fu eseguito a fine primavera 2014 con sedimenti dragati dall'asta finale del Canale Gobbino (Figura 20). A luglio 2015, tuttavia, la spiaggia mostra un nuovo spostamento di sabbia verso terra con conseguente formazione di una berma, molto simile a quella presente nei rilievi di marzo e ottobre 2014. Tale berma si ritrova anche lungo il Profilo 02 a luglio 2015, a significare che la mareggiata di febbraio 2015 aveva letteralmente spianato la spiaggia emersa. Il rilievo realizzato in data 06 novembre 2015 non presenta considerevoli differenze rispetto a quello compiuto in estate 2015: lungo il Profilo 01, nella parte verso mare, è individuabile la formazione di una barra, prima invece non rilevata; a questa corrisponde però una lieve erosione alla quota -0.5 m, con formazione di un gradino abbastanza evidente. Tale andamento è confermato anche lungo il Profilo 02, dove però è possibile notare anche l'aumento delle dimensioni della cresta della berma, a fronte dell'arretramento osservato all'incirca alla quota -0.75 m. Il Profilo 03 è invece pressoché identico alla situazione precedente, anche se è apprezzabile l'arretramento della barra intertidale ed erosione alla quota -0.5 m.

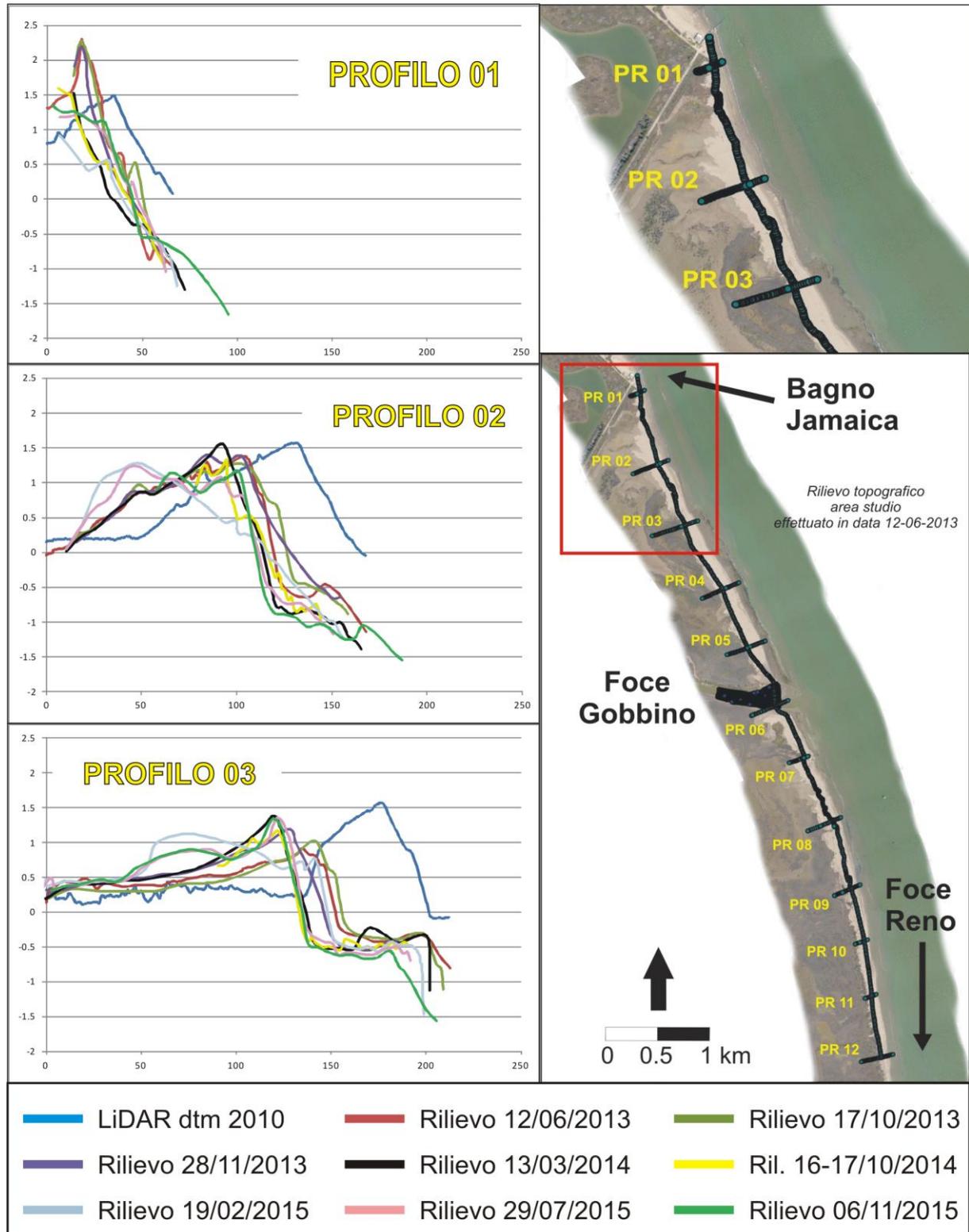


Figura 19 Sovrapposizione dei profili 01, 02 e 03 ottenuti dal rilievo topografico eseguito nell'ambito del presente studio, da rilievi topografici effettuati in studi pregressi e dal rilievo LiDAR del 2010; in alto a destra dettaglio

*dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le distanze sui grafici sono espresse in metri*



*Figura 20 Immagine dell'asta finale del Canale Gobbino durante i lavori di dragaggio che ne hanno consentito la riapertura della foce (giugno 2014); ancorché meno ampia, in novembre 2015 la foce risulta ancora aperta*

Queste tendenze sono chiaramente visibili anche nei profili successivi, in particolare il Profilo 04, che mostra in corrispondenza di ottobre 2014 un enorme aumento rispetto ai rilievi eseguiti in precedenza, sempre a causa del ripascimento con materiali dragati dal Canale Gobbino (Figura 22). Il fatto che il Profilo 05 presenti avanzamento in ottobre 2014, ma decisamente meno evidente che il Profilo 04, indica che l'area in cui i sedimenti dragati sono stati scaricati è proprio quella in corrispondenza del Profilo 04. Il rilievo LiDAR effettuato da Eni nel luglio del 2014 conferma le osservazioni (Figura 23): in corrispondenza del Profilo 04 è riscontrabile un notevole accumulo di sedimenti che determinano l'avanzamento della linea di costa in quel punto. Interessante notare che i profili 04 e 05 erano quelli che avevano mantenuto una certa stabilità anche in passato, proprio perché erano quelli più soggetti agli effetti benefici dei diversi dragaggi avvenuti in corrispondenza del Canale Gobbino negli ultimi anni. Come detto, anche qui appare molto evidente l'ingente spostamento verso terra della sabbia dalla porzione di spiaggia emersa vicino alla linea di riva avvenuto prima del rilievo di febbraio 2015 (Figura 22): tale variazione è infatti da ascrivere agli effetti dell'intensa mareggiata avvenuta pochi giorni prima su tutto il litorale emiliano-romagnolo. Il trasferimento di sedimento è ancor più marcato laddove la spiaggia presentava

precedentemente berme particolarmente sviluppate, appunto in corrispondenza del ripascimento con i materiali dragati dal Canale Gobbino. Lungo i profili 04 e 05 è possibile notare il recupero della spiaggia nei mesi successivi, con la riformazione della berma (in corrispondenza del transetto 05 è pressoché identica a quella rilevata in giugno ed ottobre 2013). I profili 04 e 05, peraltro, mantengono una configurazione molto simile anche alla luce del rilievo effettuato in novembre 2015, segno che tra febbraio e novembre 2015 non sono avvenute mareggiate di notevoli intensità. Infatti, benché dalla Figura 21 si può notare che dopo l'evento del 5-6 febbraio si sono registrati eventi con picchi di onde non trascurabili, non sono stati registrati impatti erosivi da febbraio a novembre. Infatti tali eventi non sono avvenuti in concomitanza con livelli di marea importanti ( $>0.7$  m). Il transetto 04 mostra soltanto accrescimento delle creste delle berme nella parte emersa, e formazione di una barra intertidale con cresta alla quota 0 m.

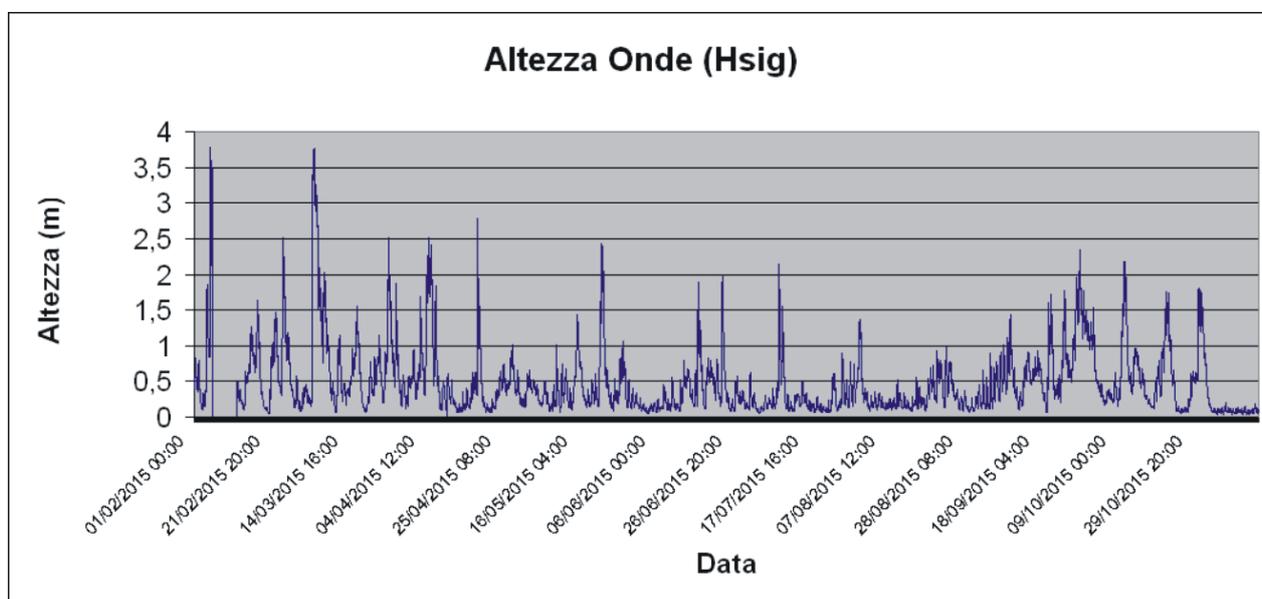


Figura 21 Il grafico mostra l'altezza delle onde registrata dalla boa onda metrica di Cesenatico nell'intervallo di tempo compreso tra febbraio 2015 e novembre 2015

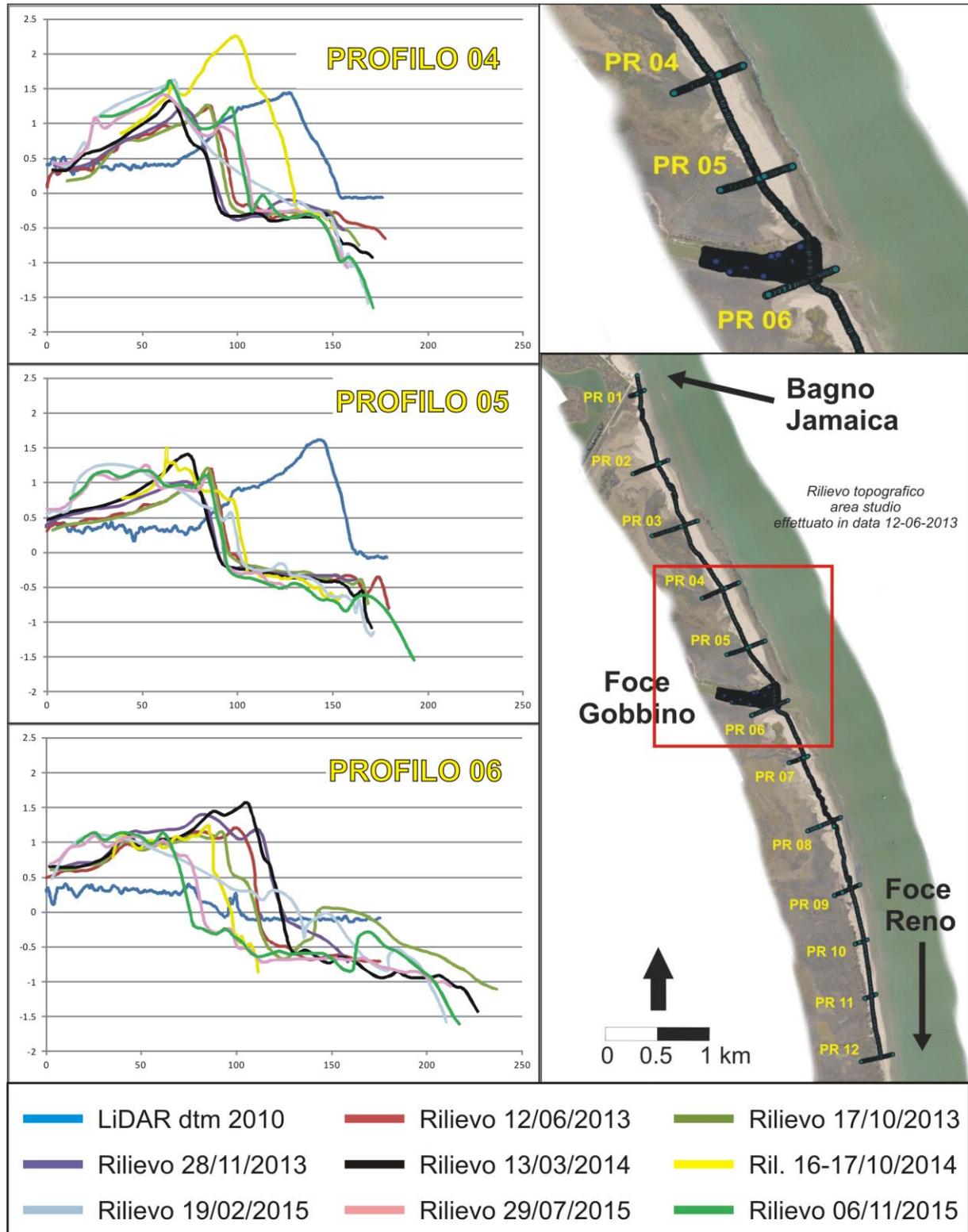


Figura 22 Sovrapposizione dei profili 04, 05 e 06 ottenuti dal rilievo topografico eseguito nell'ambito del presente studio, da rilievi topografici effettuati in studi pregressi e dal rilievo LiDAR del 2010; in alto a destra dettaglio

*dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le distanze sui grafici sono espresse in metri*

Il Profilo 06 non segue lo stesso andamento dei precedenti perché la sua traccia attraversa la foce del Canale Gobbino, e quindi è stato fortemente influenzato dai molteplici interventi eseguiti in questo settore del litorale. Anche qui è comunque chiaro lo spostamento dei sedimenti verso terra dopo la mareggiata di febbraio 2015, dal momento che l'alta berma prima presente è scomparsa. Nei mesi successivi si nota la sua riformazione (rilievo di luglio 2015), anche se la cresta risulta più bassa e in posizione più arretrata rispetto a prima (Figura 22). Lungo tale transetto, durante fine estate e inizio autunno del 2015 è possibile osservare la prosecuzione dei fenomeni di arretramento del sistema e la formazione di una barra intertidale di notevoli dimensioni, seppur decisamente inferiore rispetto a quella presente nell'ottobre del 2013.

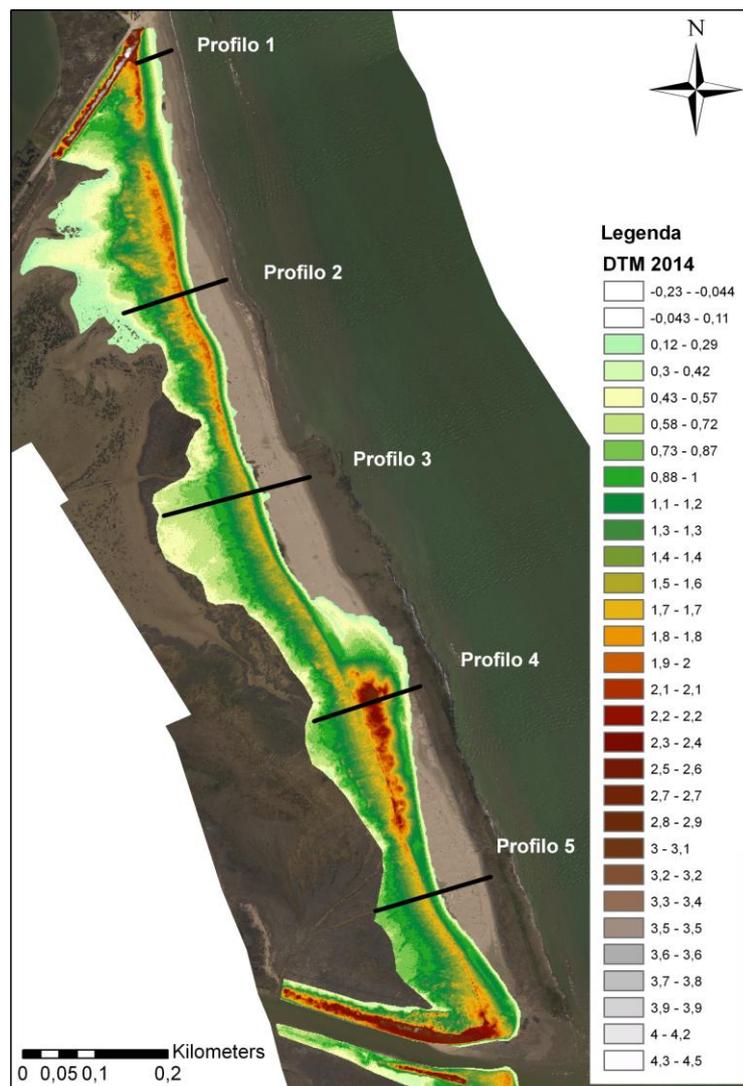


Figura 23 Elaborazione del rilievo LiDAR realizzato da Eni nel luglio 2014. È facilmente osservabile il notevole accumulo di sedimenti in corrispondenza del Profilo 04 (base fotografica volo Costa 2010)

Peraltro è evidente che le attività di dragaggio hanno interessato particolarmente quest'area, perché l'arretramento di 25 m in 7 mesi (tra cui quelli estivi) potrebbe essere difficilmente spiegabile. Rispetto a situazioni precedenti, in novembre 2015 è talvolta presente una barra vicino a costa nel settore a nord della foce del Canale Gobbino: è però doveroso considerare che il grosso accumulo nei Profili 04 e 05 è legato ad attività antropiche e quindi non naturale, e pertanto la formazione delle barre potrebbe essere stata una conseguenza degli interventi di ripascimento. Tuttavia, va anche ricordato che in tale area sono presenti larghi affioramenti di argille residuali ad una profondità di circa 0.5 m (particolarmente visibili nei Profili 02, 03, e 05; meno nel 04 perché obliterati dai notevoli volumi di sedimento derivato dal dragaggio del Canale Gobbino).

Proseguendo verso sud, la tendenza all'arretramento è palese pressoché ovunque ed è significativa soprattutto nei mesi precedenti il rilievo di luglio 2015, ed in particolare lungo i profili 07 e 09 (Figura 24): qui si notano infatti spostamenti di sedimento dalla spiaggia sommersa a quella emersa, dove in alcuni casi vanno a formare berme (profili 07 e 08). Il Profilo 07 diventa però un'eccezione in novembre del 2015, perché mostra un lieve avanzamento in corrispondenza della cresta della berma ordinaria e, soprattutto, la presenza di una barra intertidale di considerevoli dimensioni, là dove non era più stata presente se non nel marzo 2014 e nel febbraio 2015 (sempre comunque alla fine dell'inverno).

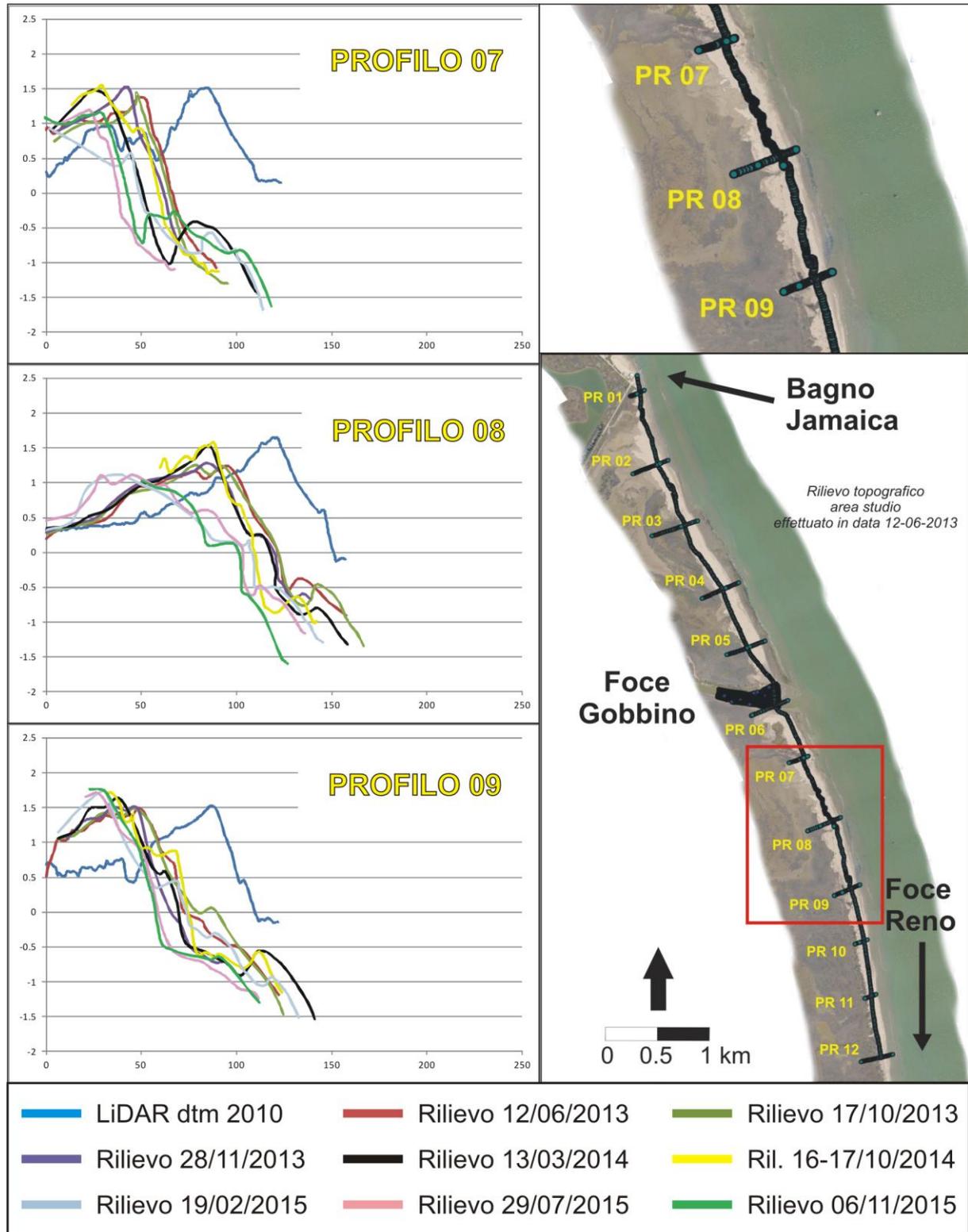


Figura 24 Sovrapposizione dei profili 07, 08 e 09 ottenuti dal rilievo topografico eseguito nell'ambito del presente studio, da rilievi topografici effettuati in studi pregressi e dal rilievo LiDAR del 2010; in alto a destra dettaglio

*dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le  
distanze sui grafici sono espresse in metri*

Il Profilo 08, generalmente abbastanza stabile in passato, indica invece segnali di chiaro arretramento della zona intertidale in corrispondenza del rilievo di ottobre 2014: la cresta della barra interna si è infatti spostata verso terra per più di 10 m. Tale trend è stato poi confermato successivamente, anche in quest'area è infatti rilevabile il trasferimento di sedimenti verso terra a seguito della mareggiata di febbraio 2015 (Figura 24). L'ultimo rilievo effettuato, in novembre 2015, mostra ulteriori arretramenti del sistema. Al contrario, il Profilo 09 è rimasto pressoché invariato tra giugno 2013 e febbraio 2015: anche la barra è addirittura nella medesima posizione. Tuttavia, durante la primavera del 2015 si è assistito ad una notevole erosione della spiaggia sommersa, a cui non corrisponde un conseguente accumulo nella parte emersa: evidentemente i sedimenti si sono spostati verso nord seguendo la direzione prevalente della corrente litoranea. A novembre 2015 non sono invece presenti variazioni degne di nota lungo tale transetto. Nei mesi precedenti a luglio 2015 non si è però assistito ad un efficace recupero della spiaggia dopo la mareggiata estrema di febbraio: il Profilo 07 presenta formazione di una berma, ma in posizione decisamente più arretrata che in precedenza, mentre i profili 08 e 09 mostrano trasferimento di sedimenti dalla porzione sommersa a quella emersa, anche se in quest'ultimo i volumi persi dalla spiaggia sommersa non corrispondono all'accumulo sulla spiaggia emersa, confermando quindi uno spostamento lungo costa verso nord.

Passando infine al settore più meridionale dell'area (Figura 25), si nota come i Profili 10, 11 e 12 non presentino modifiche sostanziali, fatta eccezione per il gradino di battigia del Profilo 10, decisamente più evidente in ottobre 2014 che in primavera 2014: tuttavia, anche se in posizione differente, già nel rilievo di ottobre 2013 tale gradino era presente lungo lo stesso transetto. Il fatto che si riformi nuovamente in novembre del 2015, praticamente nella stessa posizione, può implicare che la sua presenza sia legata agli stati ad energia medio-bassa tipici dei mesi estivi. Anche in questa zona la mareggiata di febbraio 2015 ha spianato la spiaggia emersa, anche se durante la primavera si nota la ricostituzione della berma ordinaria. In generale, nel novembre 2015 la situazione non è particolarmente differente anche se è importante segnalare lo spostamento verso mare della barra lungo il Profilo 11 e un lieve avanzamento della zona intertidale lungo il Profilo 12, probabilmente legato ai movimenti della barra stessa. L'estensione così limitata dei transetti 10 e 11 è dovuta alla presenza di un tratto di cordone dunare che ancora resiste all'erosione. Infine, è interessante notare come in ottobre 2014 la barra interna lungo il Profilo 12 sia tornata in una posizione simile a quella risalente al giugno 2013. Queste frequenti variazioni della barra interna, oltre a confermarne l'alta dinamicità e la diretta influenza

sull'evoluzione del profilo di spiaggia, potrebbero essere quindi collegate alla sua conformazione ritmica, cosa apprezzabile anche dal LiDAR batimetrico realizzato da Eni nel 2012 (Figura 26). Il fatto che la barra intertidale compaia e scompaia può quindi essere dovuto alla presenza della ritmicità che, come dimostrato da Armaroli e Ciavola (2011) nel tratto di litorale compreso tra Lido di Dante e la foce del Torrente Bevano (circa 30 km a sud del settore di costa investigato nel presente studio), si muove lungocosta o cambia in lunghezza d'onda in risposta al recupero della spiaggia dopo le mareggiate.

Anche lungo questo transetto è possibile evidenziare il notevole spostamento di sedimenti verso terra a seguito della mareggiata di inizio febbraio 2015. Il rilievo di luglio 2015 mostra però che a fronte della riformazione della berma ordinaria si è avuta erosione nella parte sommersa della spiaggia stessa (Figura 25).

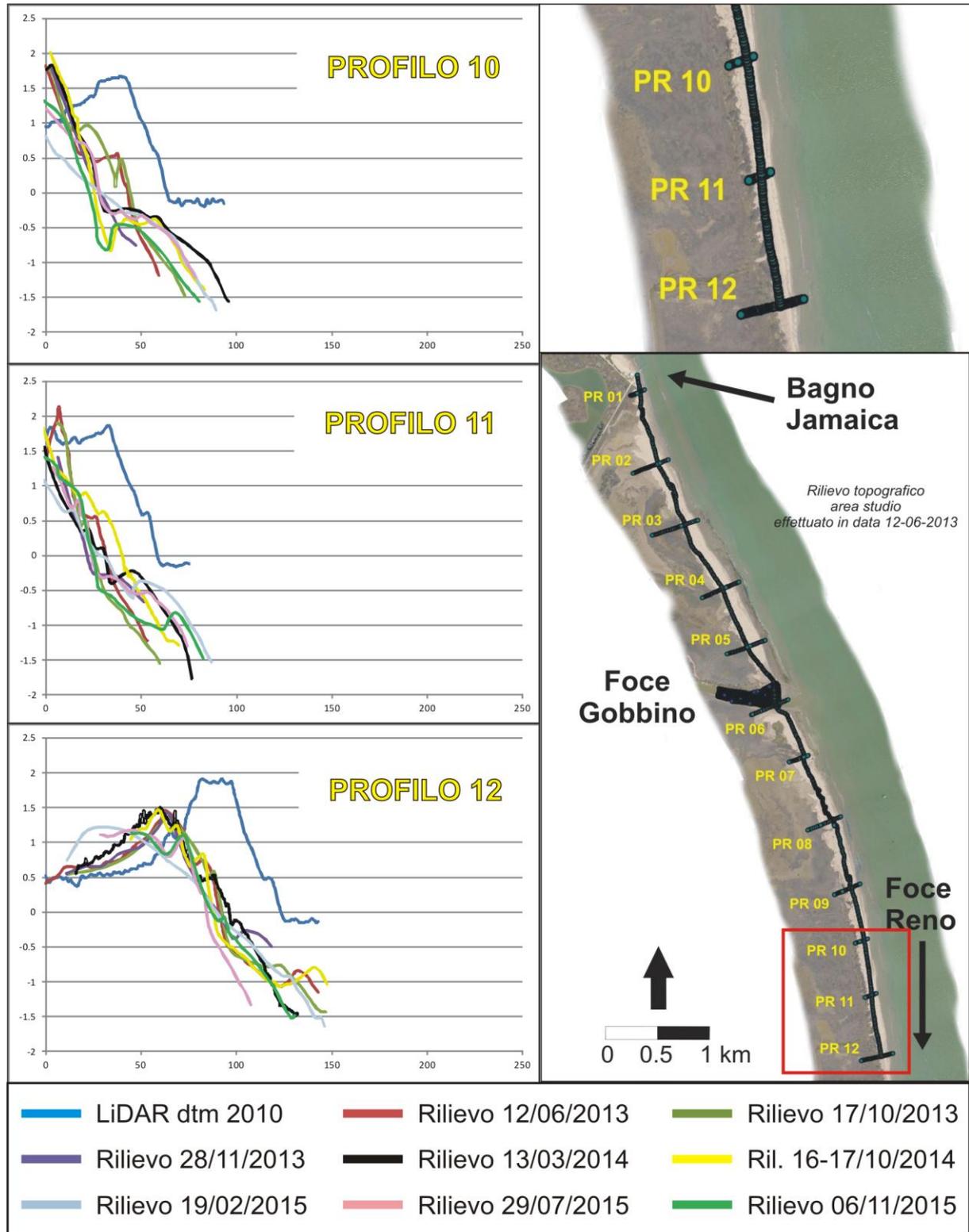


Figura 25 Sovrapposizione dei profili 10, 11 e 12 ottenuti dal rilievo topografico eseguito nell'ambito del presente studio, da rilievi topografici effettuati in studi pregressi e dal rilievo LiDAR del 2010; in alto a destra dettaglio

*dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le  
 distanze sui grafici sono espresse in metri*

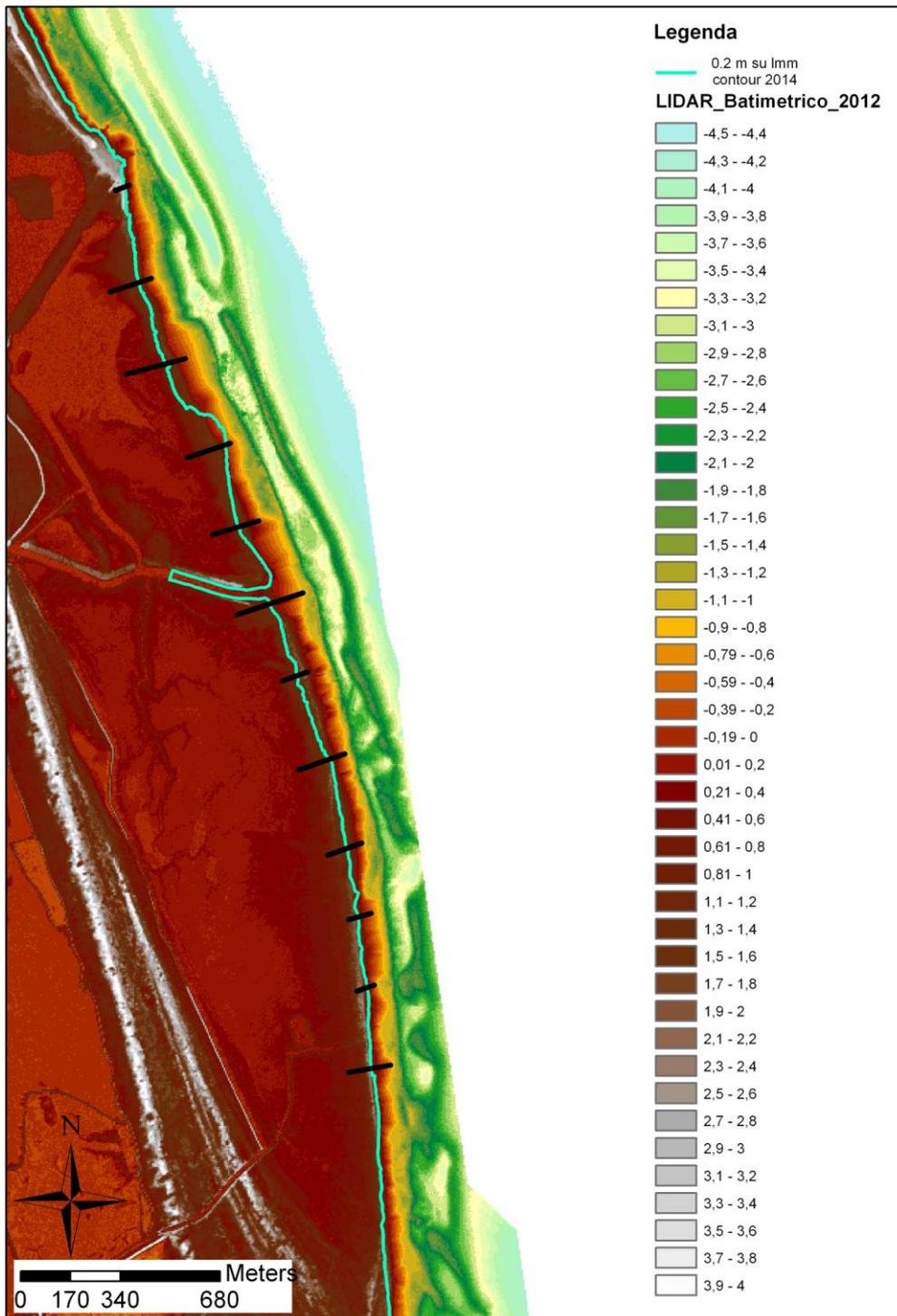


Figura 26 Elaborazione del rilievo LiDAR batimetrico svolto da Eni nel 2012, dove si nota in maniera evidente la forma  
 ritmica delle barre interne

La presenza di barre anche nella porzione non raggiungibile dall'operatore munito di strumento RTK-DGPS è apprezzabile in maniera ancor più chiara analizzando i rilievi batimetrici effettuati ad ottobre 2014 e novembre 2015 nell'area compresa tra lo stabilimento balneare "Jamaica" e la foce del Fiume Reno (Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30). Osservando il rilievo realizzato in novembre del 2015, è possibile infatti individuare una barra con cresta compresa tra le isobate -2 e -3, fatta eccezione per i profili 10 e 12, dove la cresta è circa a -1,5 m di profondità: ciò è probabilmente spiegabile con il fatto che lungo questi due transetti la barra è più vicina alla linea di riva rispetto agli altri, cosa che conferma ulteriormente la ritmicità di questi elementi lungo il tratto di litorale preso in esame. Procedendo a sovrapporre quest'ultimo rilievo con quello effettuato nell'ottobre del 2014 (ODL 4310078051), è possibile notare come la posizione della barra non sia mutata in maniera significativa durante i 13 mesi intercorsi tra i due rilievi. Le variazioni sono più rilevanti in termini di altezza della cresta: laddove fu intercettata la barra esterna nel rilievo di ottobre 2014, si osserva che la cresta era generalmente meno rilevata rispetto al rilievo di novembre 2015, in particolare nei profili 01, 02, 03 e 04 (Figura 27 e Figura 28).

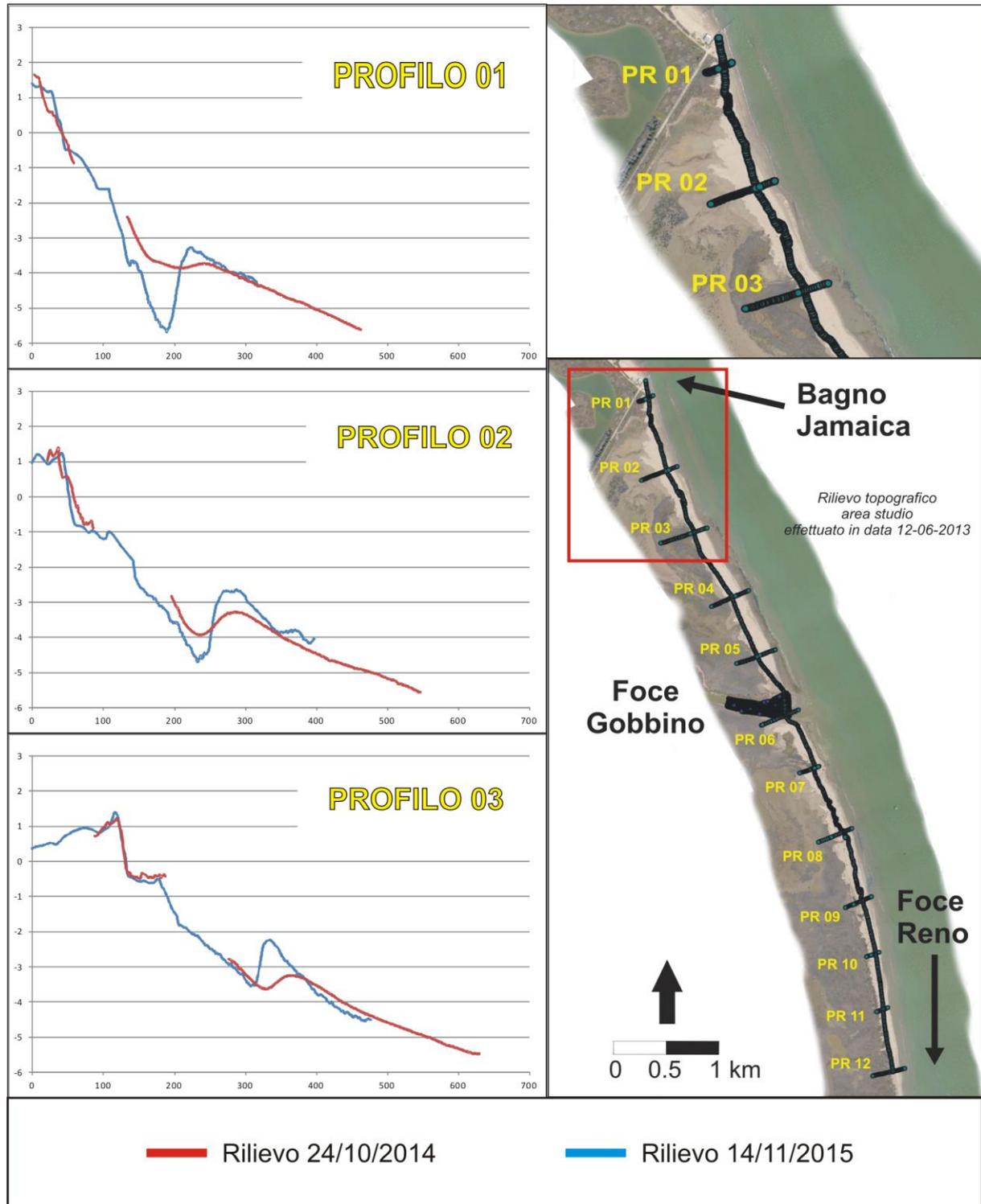


Figura 27 Sovrapposizione dei profili 01, 02 e 03 ottenuti dal rilievo batimetrico eseguito nell'ambito del presente studio e da un rilievo batimetrico effettuato nell'ambito dell'ODL 4310078051; in alto a destra dettaglio dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le distanze sui grafici sono espresse in metri

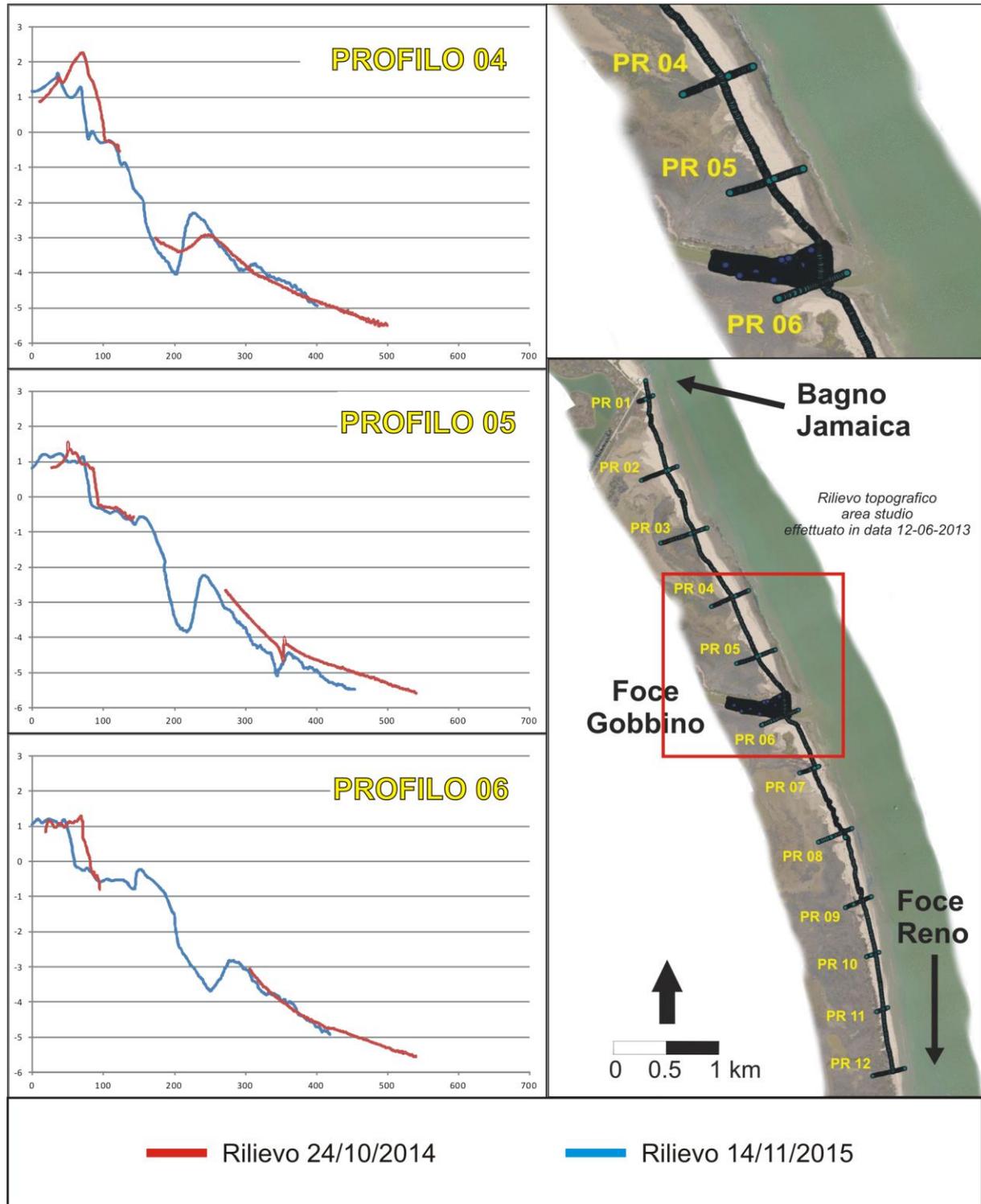


Figura 28 Sovrapposizione dei profili 04, 05 e 06 ottenuti dal rilievo batimetrico eseguito nell'ambito del presente studio e da un rilievo batimetrico effettuato nell'ambito dell'ODL 4310078051; in alto a destra dettaglio dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le distanze sui grafici sono espresse in metri

Va infatti tenuto presente che il rilievo di ottobre 2014 fu eseguito in fase di bassa marea a causa delle restrizioni alla navigazione vigenti in tale area per consentire le esercitazioni militari al poligono di Foce Reno: pertanto agli operatori non fu possibile avvicinarsi a costa con l'imbarcazione in modo tale da connettere i rilievi effettuati a terra con quelli batimetrici, contrariamente a ciò che è avvenuto per il rilievo di novembre 2015.

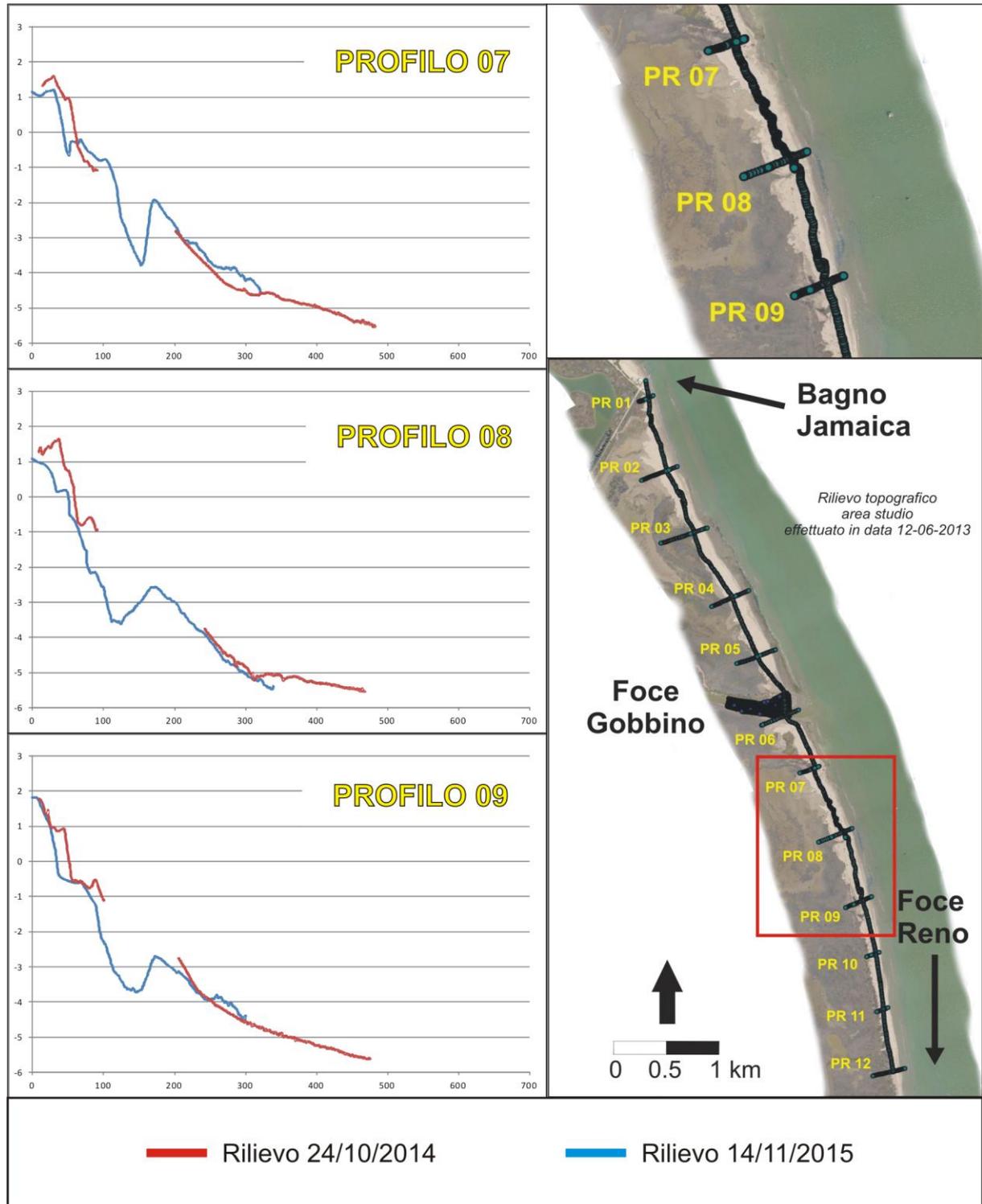


Figura 29 Sovrapposizione dei profili 07, 08 e 09 ottenuti dal rilievo batimetrico eseguito nell'ambito del presente studio e da un rilievo batimetrico effettuato nell'ambito dell'ODL 4310078051; in alto a destra dettaglio dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le distanze sui grafici sono espresse in metri

Per quanto riguarda la porzione di fondale oltre la barra esterna, non si rilevano variazioni considerevoli della morfologia: la traccia del fondale nella batimetria di novembre 2015 tende a sovrapporsi abbastanza fedelmente a quella dell'autunno precedente, fatta eccezione per alcuni profili (07, 10 e 11; Figura 29 e Figura 30) in cui il piede esterno della barra presenta profondità inferiori rispetto al 2014. A causa del gap di dati nel rilievo del 2014 purtroppo non è possibile avanzare ipotesi riguardo un trasferimento di sedimenti verso mare che possa aver determinato il lieve accumulo in tale zona. Lungo il Profilo 03 si assiste alla tendenza contraria, ma in questo caso si nota un aumento nell'altezza della barra nel novembre 2015 a fronte di perdita volumetrica rispetto alla situazione del 2014.

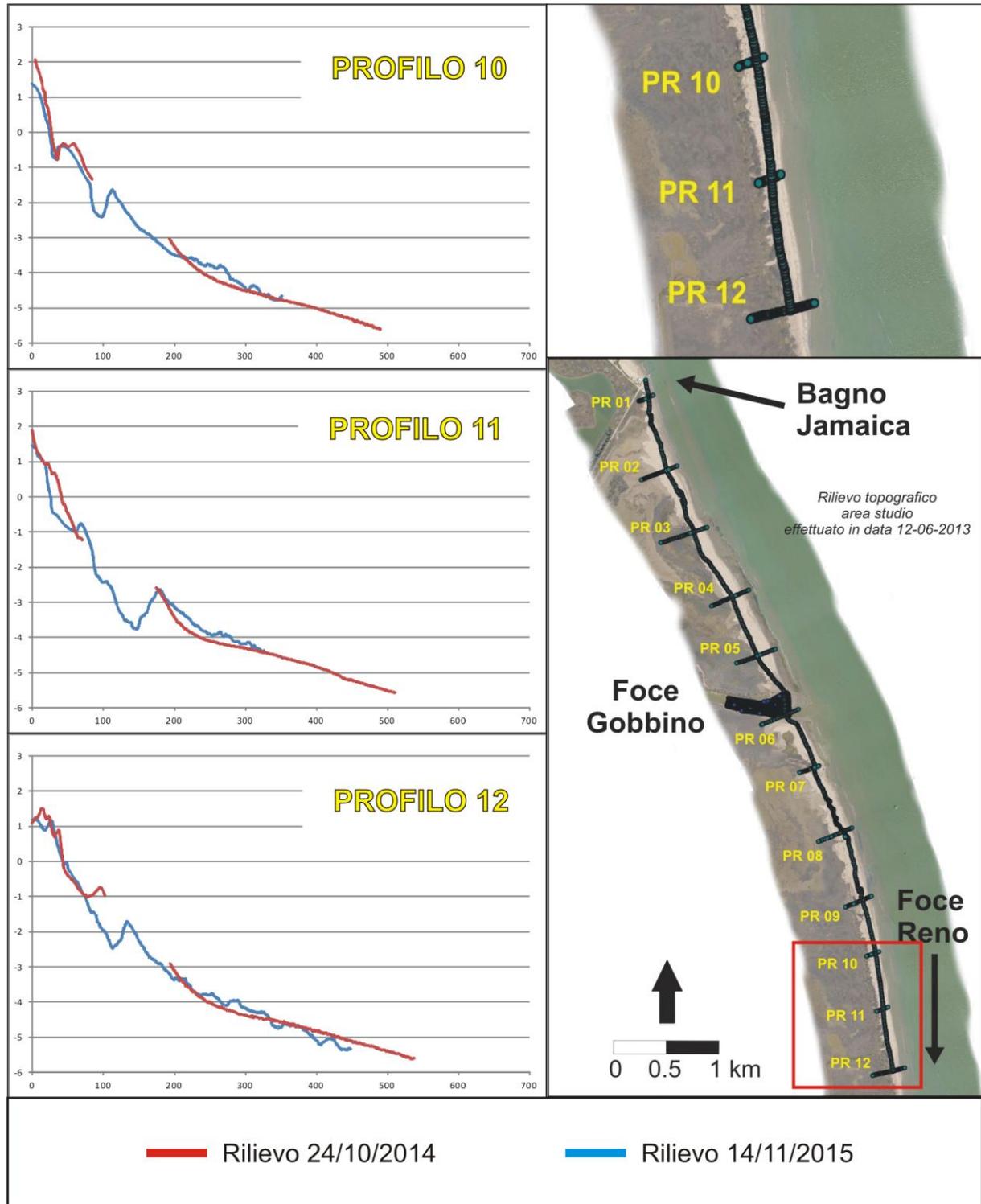


Figura 30 Sovrapposizione dei profili 10, 11 e 12 ottenuti dal rilievo batimetrico eseguito nell'ambito del presente studio e da un rilievo batimetrico effettuato nell'ambito dell'ODL 4310078051; in alto a destra dettaglio dell'esatta ubicazione dei profili (sullo sfondo immagine tratta da Regione Emilia-Romagna – Piano Coste 2010); le distanze sui grafici sono espresse in metri

L'unico transetto la cui traccia ha subito una decisa modificazione è il Profilo 05 (Figura 28): nell'anno di intervallo fra il rilievo del 2014 e quello del 2015 si osserva infatti un approfondimento del fondale stesso di circa 20-30 cm. L'andamento del profilo stesso si mantiene simile anche in corrispondenza di una piccola fossa di circa 0,5 m di profondità (tra le isobate -4 e -5 m), probabilmente causata dalla presenza di manufatti antropici risalenti a quando tale area era emersa. L'aumento di profondità lungo questo transetto potrebbe essere stato causato dalla ridistribuzione dei sedimenti ad opera delle forti mareggiate dell'inverno 2014-2015: quest'era, infatti, era quella dove erano stati scaricati i sedimenti dragati dal Canale Gobbino nell'estate del 2014. Gli eventi ad alta energia, talvolta anche estremi (per esempio la mareggiata di inizio febbraio 2015), potrebbero aver provocato la rielaborazione dei materiali di ripascimento presenti a profondità tali che normali mareggiate non avrebbero potuto rimobilizzare (-5 m).

### **Attività 3.2: Caratterizzazione topografica, morfologica, batimetrica delle Vene di Bellocchio e di un intorno opportunamente esteso ed integrazione con i rilievi esistenti**

L'attività di foto-interpretazione del mosaico di fotografie aeree realizzate durante il Volo Costa del 2010 ha fornito interessanti indicazioni per quanto riguarda la situazione di uso del suolo nell'area di interesse, compresa tra la località Porto Garibaldi a nord e la foce del Fiume Reno a sud. Da un'osservazione generale delle risultanze si nota immediatamente la bipartizione di questo settore di costa (Figura 31): il tratto settentrionale, dal Portocanale di Porto Garibaldi fino allo stabilimento balneare "Jamaica" è caratterizzato dalla presenza larghi settori di spiaggia attrezzata con infrastrutture e di aree urbane ben definite (Lido degli Estensi, Lido di Spina) e là dove la zona urbanizzata non è presente, essa lascia il posto a vegetazione arborea e sparsa (area in corrispondenza del Lago di Spina); al contrario, il tratto meridionale, compreso tra lo stabilimento balneare "Jamaica" e la foce del Fiume Reno, non presenta né zona urbanizzata né estesa vegetazione arborea o sparsa, bensì un ampio settore caratterizzato da aree umide inondate e non inondate.

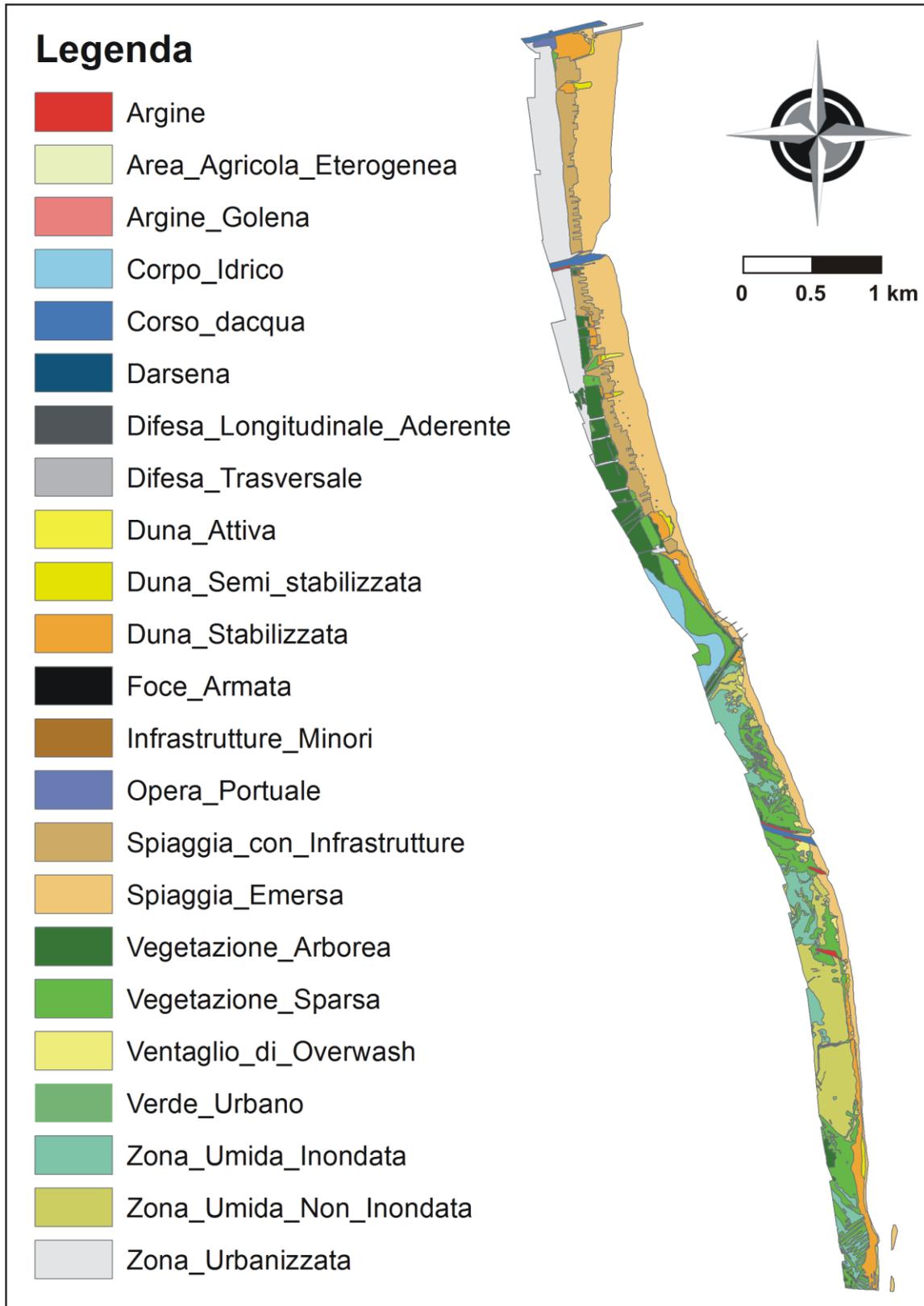


Figura 31 Foto-interpretazione del mosaico di immagini aeree relative all'area di studio tratte dal Volo Costa 2010

Inoltre, procedendo dall'interno verso la linea di riva, è facilmente riscontrabile come la spiaggia sia nettamente più ampia nella porzione settentrionale dell'area di studio rispetto al settore meridionale. In corrispondenza della parte centrale del tratto di costa investigato, infatti, si nota chiaramente come la spiaggia tenda a ridurre la propria ampiezza fino a diventare una sottile striscia di sabbia a ridosso dell'area occupata dallo stabilimento balneare "Jamaica". A sud di esso le dimensioni aumentano leggermente, ma non è lontanamente confrontabile con le ampiezze che si rilevano nel settore settentrionale, cosa che va a confermare la direzione preferenziale di trasporto sedimentario da parte delle correnti litoranee verso nord. All'interno del settore settentrionale stesso è possibile individuare due aree separate dal Canale Logonovo: la parte a nord presenta un'ampiezza di spiaggia ancora maggiore di quella a sud.

Per quanto riguarda le dune, esse sono presenti in pochissimi siti conservati e protetti nel tratto più antropizzato dell'area: a parte alcuni rari punti, in cui è pure presente la duna attiva, si tratta in particolare dei resti di duna stabilizzata che componevano l'antico campo dunare. Nel tratto naturale, invece, qualsiasi traccia di cordone dunare è stato cancellato a sud dello stabilimento balneare "Jamaica", dove l'azione del moto ondoso durante le mareggiate più forti hanno spianato completamente il corpo di spiaggia emersa. Si ritrovano in quest'area, infatti, tanti ventagli di overwash. Nel tratto più meridionale, a ridosso della foce del Fiume Reno, si rileva invece la presenza del vecchio cordone dunare, quantomeno sottoforma di duna stabilizzata: lo si ritrova, con ampiezze non trascurabili, direttamente fino alla foce del fiume stesso.

Attraverso un rapido confronto tra la foto-interpretazione del mosaico di fotografie del Volo Costa 2010 realizzata nell'ambito del presente studio e la carta dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna del 2008, è possibile osservare le variazioni avvenute nei due anni di intervallo (Figura 32).

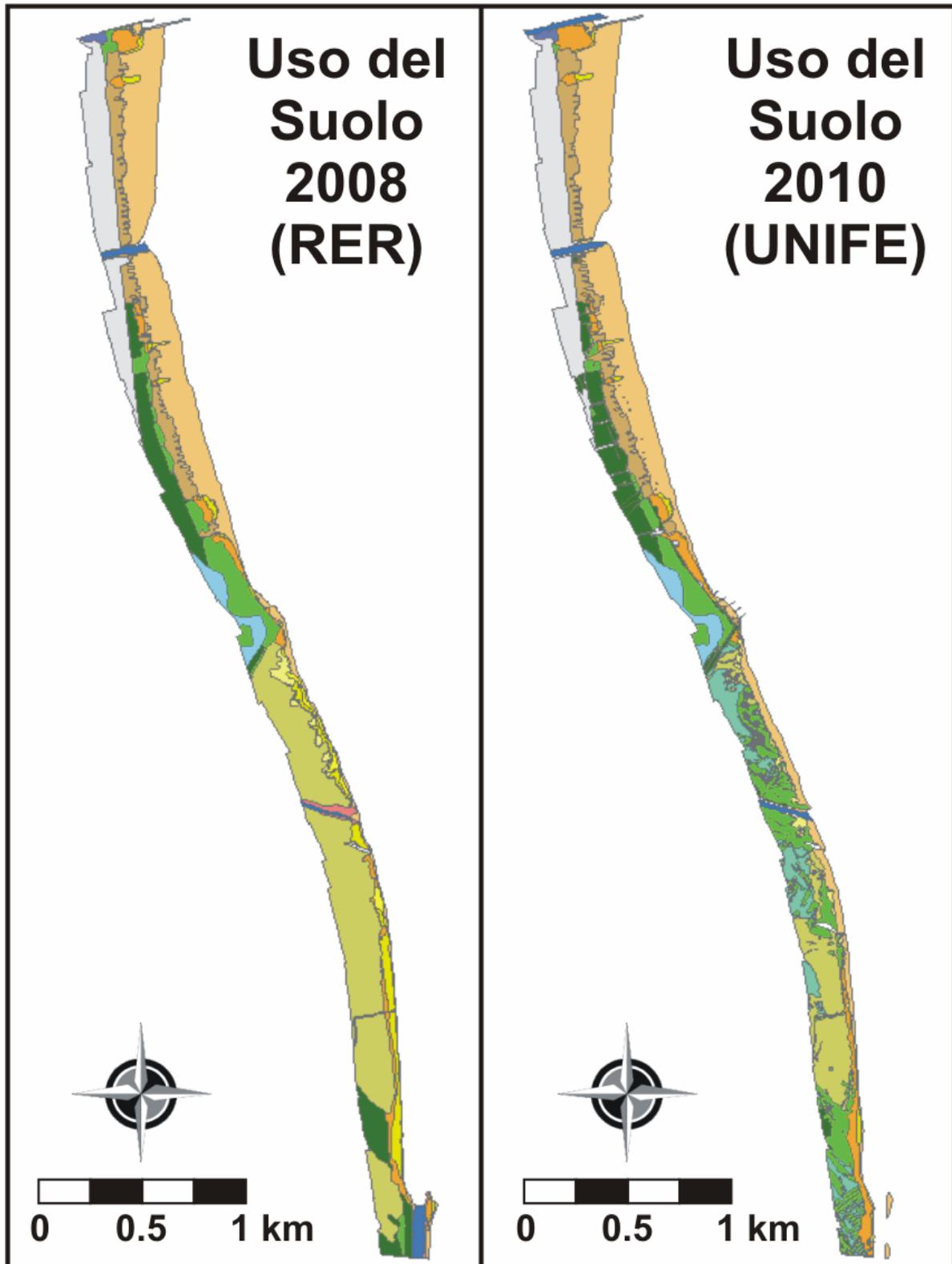


Figura 32 Foto-interpretazione del settore compreso tra Porto Garibaldi e la foce del Fiume Reno per l'anno 2010 (immagine di sinistra) e per l'anno 2008 (immagine di destra)

Il settore settentrionale non presenta pressoché alcuna modifica (Figura 32): ciò è comprensibile perché questa è l'area più fortemente antropizzata, anche nella parte della spiaggia emersa, dove si osservano lunghe serie di stabilimenti balneari. Pure nel settore più interno, verso i centri abitati, non è possibile rilevare particolari differenze anche per quanto riguarda l'estensione delle aree a vegetazione arborea. Le stradine rilevate all'interno di esse nell'immagine del 2010 erano già presenti nel 2008, ma evidentemente non individuate a causa della diversa scala a cui la foto-interpretazione è stata effettuata (1:2000 per il 2010; 1:5000 per il 2008).

Il settore meridionale, a sud dello stabilimento balneare "Jamaica", mostra invece alcune notevoli variazioni in particolare per due elementi: le dune e le zone umide alle spalle delle dune stesse (Figura 32). Per quanto riguarda le zone umide, nel 2008 sono pressoché interamente costituite da aree non inondate, mentre nel 2010 si rilevano vaste zone inondate: tale differenza potrebbe essere causata dal fatto che questa porzione di costa è soggetta a rapide variazioni dell'altezza della falda acquifera e pertanto può presentarsi inondata o meno anche in limitati intervalli di tempo. Per quanto riguarda le dune, invece, è facilmente osservabile la cancellazione di larghi tratti del cordone dunare attivo nei due anni intercorsi fra le due foto-interpretazioni. A sud dello stabilimento balneare "Jamaica", infatti, nel 2008 la duna attiva è presente in diversi punti, mentre a sud del Canale Gobbino il cordone arriva ininterrotto fino quasi alla foce del Fiume Reno. Due anni dopo, la duna attiva è sparita del tutto tranne che per alcune aree isolate verso la foce del Reno stesso.

È infine apprezzabile l'evoluzione dell'ultimo tratto dello *spit* che un tempo caratterizzava la foce del Fiume Reno: già enormemente ridotto rispetto ad alcuni decenni fa, tra il 2008 e il 2010 si assiste alla sua quasi completa sparizione, con gli ultimi lembi ancora presenti, ma che verranno erosi negli anni a seguire (Figura 32).

### Attività 3.3: Costruzione del DEM delle Vene di Bellocchio

I dataset descritti in precedenza sono stati fusi producendo un DEM finale con risoluzione planimetrica di 1x1 m. La precisione del DEM è riconducibile alla precisione dei rilievi Lidar (15-20 cm), senza considerare la correzione apportata al dataset A che ha probabilmente introdotto un errore aggiuntivo nella zona emersa. Le zone a bassa risoluzione e con una accentuata carenza di dati sono state escluse dal prodotto finale. Il DEM finale è rappresentato in Figura 33.

Come evidenziato nei paragrafi precedenti alcune zone del dominio sono prive di dato, pertanto il prodotto finale è affetto da numerose limitazioni in termini di rappresentatività della situazione

attuale, in particolare per quanto riguarda la zona intertidale e la fascia che include i primi metri della spiaggia sommersa. Infatti, come dimostrato dai risultati dell' Attività 3.1, la zona ha subito un notevole arretramento negli ultimi anni. La forma dei fondali del dataset del 2012 non include pertanto l'arretramento avvenuto tra il 2012 ed il 2014, come evidenziato dalla forbice con il dataset A (Ottobre 2014) nella zona di giunzione dei due datasets.

Tale fenomeno verrà meglio sottolineato nel paragrafo "Affidabilità

Attività 3.4 - 3.7: Affidabilità del dato iniziale" attraverso il confronto tra il dato del DEM interpolato sulle griglie di calcolo del modello bidimensionale e i rilievi topografici di Ottobre 2014.

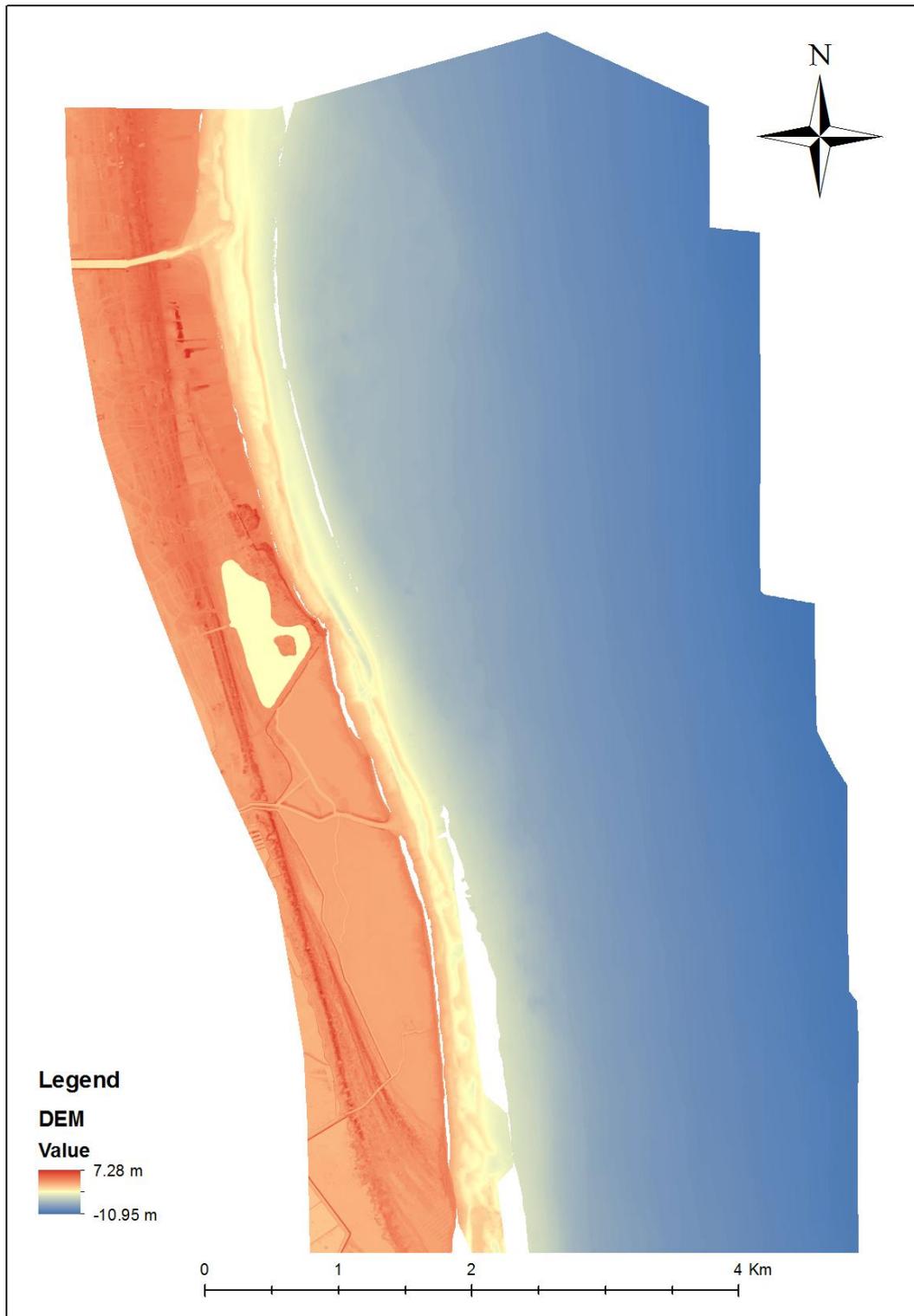


Figura 33 DEM prodotto finale dell'Attività 3.3.

## Attività 3.4: Implementazione di un modello morfologico bidimensionale

Il codice di calcolo Xbeach è stato parametrizzato su tre domini (D1, D2 e D3) rappresentativi dell'area di studio (P. Garibaldi - Foce Reno). Lo SDF è stato caratterizzato sulla scorta delle informazioni topo-batimetriche disponibili e secondo un settaggio dei parametri definito da studi precedenti. Lo SDP, rappresentativo delle variazioni indotte dalla subsidenza al 2030 legata alla presenza di Dosso degli Angeli ed alla apertura del pozzo di Agosta secondo lo scenario peggiore, è stato implementato modificando unicamente l'elevazione dei punti griglia dello SDF per tutti i domini. SDF e SDP per i tre domini sono stati testati, per un totale di 18 simulazioni, su tre mareggiate recenti (2012, 2013 e 2015) per evidenziare le variazioni degli impatti derivati dal fenomeno di inondazione e dai cambiamenti morfologici.

## Attività 3.5: Caratterizzazione dell'assetto morfologico nello stato di fatto (SDF)

Area Inondata. Si presentano di seguito le rappresentazioni delle aree inondate nel SDF per le tre mareggiate (2012, 2013 e 2015) sui tre domini. Il codice Xbeach è tale per cui, salvo più complessi settaggi, le aree bagnate ad inizio simulazione sono determinate dal rapporto tra l'elevazione di ciascun punto griglia con il valore di livello del mare assegnato al tempo zero tramite il file zs0file. I livelli iniziali delle serie temporali delle mareggiate 2012, 2013 e 2015 sono circa 1.05 m, 0.45 m e 0.60 m rispettivamente. Pertanto, le aree inondate al tempo iniziale sono diverse per ogni simulazione e vengono definite sull'intero dominio di calcolo, non solo per la zona che si affaccia sul mare. Per tale motivo i risultati sono forniti come mappe riassuntive che includono informazioni sull'area inondata iniziale (in blu scuro), l'area non soggetta ad inondazione per l'intera simulazione (in grigio) e l'area allo SDF (in rosso). In Figura 34, Figura 35 e Figura 36 si presentano i risultati sul dominio D1 delle tre mareggiate. Da Figura 37 a Figura 39 i risultati per il dominio D2 mentre da Figura 40 a Figura 42 quelli per il dominio D3.

Il dominio D1 presenta aree inondate pressochè equivalenti per le mareggiate 2012 e 2013, mentre il fronte di avanzamento è più marcato ed invasivo per la mareggiata del 2015, che non si ferma alla linea del fronte delle concessioni ma penetra all'interno per svariate decine di metri, in particolare nella zona a sud (Lido di Spina) dove si insinua nella pineta retrostante, pur non

interessando direttamente le zone abitate. Ne consegue la conferma che, per la zona di interesse, un evento con onde moderate ma livelli di surge estremi come l'evento del 2012 ( $H_s = 2.43$  m e  $TWL = 1.16$  m) abbia impatti comparabili, se non peggiori, di un evento con onde estreme ma surge limitata come l'evento del 2013 ( $H_s = 3.79$  m e  $TWL = 0.84$  m). Da non trascurare comunque la variabile del periodo al picco  $T_p$ , caratterizzante l'energia di un evento, che risulta di 10 sec per il 2012 mentre di 9.1 sec per il 2013. Durante l'evento del 2015, onde estreme di 4.6 m ( $T_p = 9.8$  sec) (Boa di Cesenatico) sono occorse in concomitanza con un livello di surge di 1.2 m (Mareografo di Porto Corsini, Ravenna): le conseguenze sull'area inondata sono immediatamente osservabili in Figura 36.

L'allagamento del dominio D2 risulta fortemente dominato dalle zone inondate allo stato iniziale. Le zone lagunari, spesso sotto 0.5 m di elevazione, vengono facilmente inondate. Si noti come il mare riesca a superare la debole barriera dunale che lo separa dalla laguna durante tutte e tre le mareggiate. Si evidenzia che la zona retrostante il Bagno Jamaica presenta un'ingressione marina molto accentuata per la mareggiata del 2015 (Figura 39), dovuta al superamento del sistema argine-strada che si estende dalla concessione al campeggio. In Figura 39 si nota inoltre che l'area a sud del campeggio, protetta dall'argine, risulta inondata. Il superamento dell'argine è dovuto in prima ipotesi alle discontinuità dell'altezza massima dello stesso. In Figura 43 si riporta l'andamento dell'elevazione della sommità dell'argine nel dominio D2 estratto dal DEM. Nel grafico A si trova il dato relativo alla parte nord dell'argine, che si estende dal Bagno Jamaica fino ad incontrare il corso del Canale Gobbino mentre, nel grafico B, il dato relativo alla parte sud, dal Canale Gobbino fino al limite del dominio D2. La parte a sud evidenzia un livello medio della sommità dell'argine (circa 2.3 m) generalmente più basso della parte a nord che si attesta mediamente attorno ai 3 m. Le discontinuità locali della parte nord dell'argine (grafico A) evidenziano cali nell'elevazione fino a circa 1.75 m mentre risultano più contenute nella parte sud (grafico B), benchè più estese.

Il dominio D3, anch'esso rappresentativo di ampie zone lagunari inondate ad inizio simulazione, presenta il superamento del sistema dunale da parte del mare per tutte e tre le mareggiate. Si noti che l'inondazione della zona a sud-ovest del dominio non è in nessun modo collegabile all'evento che proviene da mare, per alcuna mareggiata implementata.

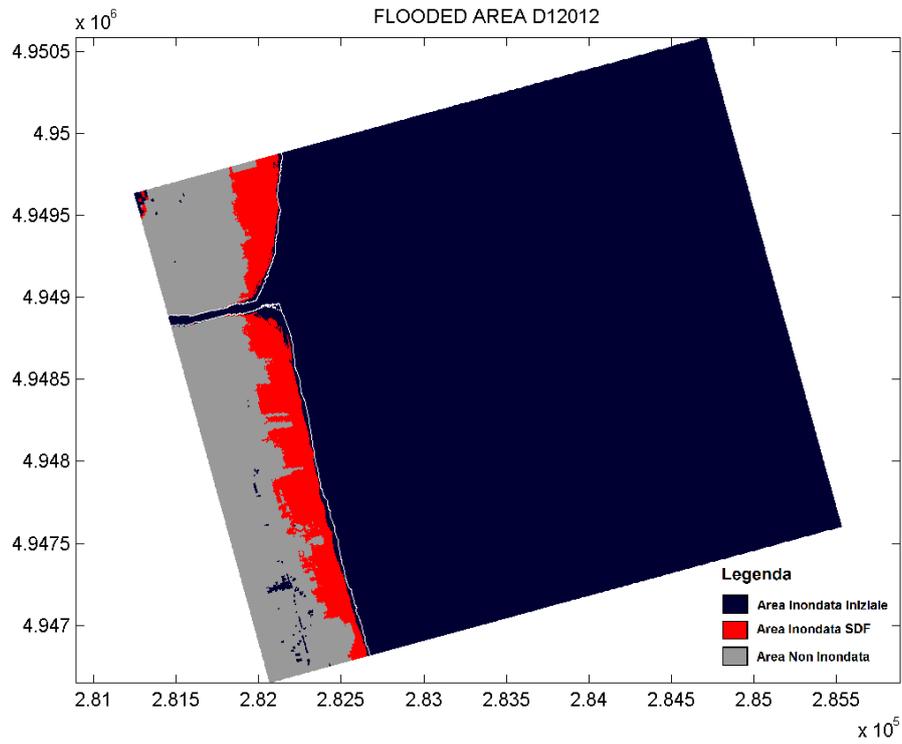


Figura 34 Area inondata SDF - Dominio D1- Mareggiata 2012.

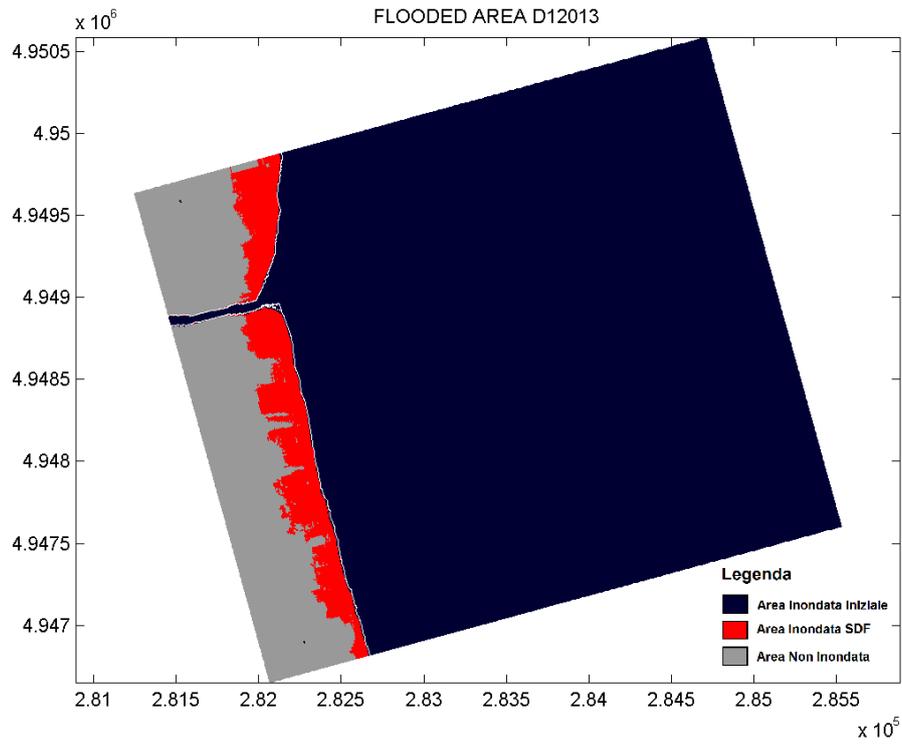


Figura 35 Area inondata SDF - Dominio D1- Mareggiata 2013.

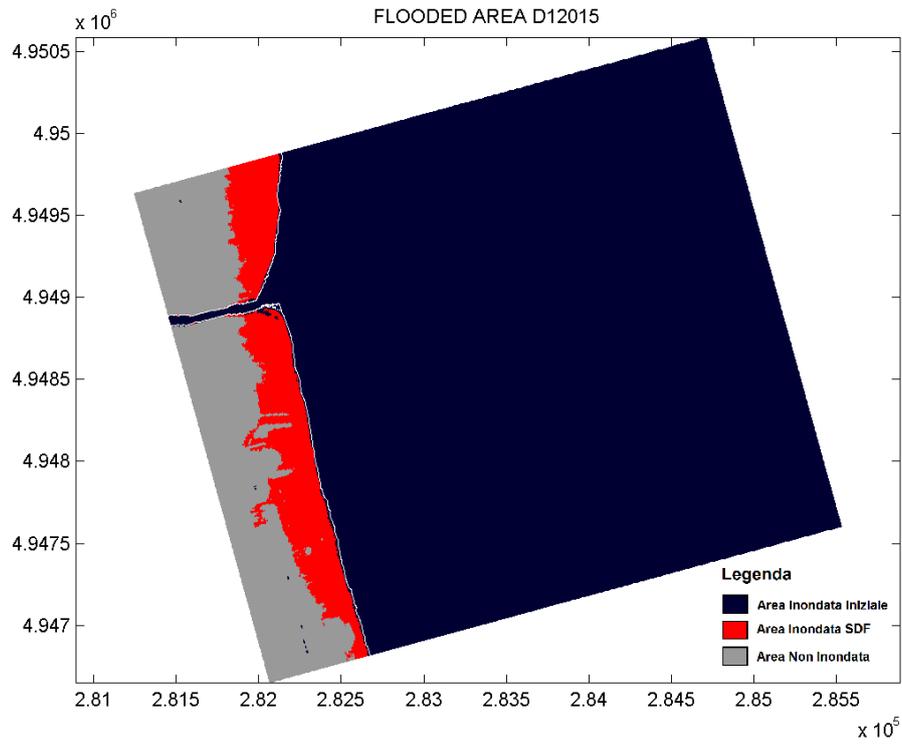


Figura 36 Area inondata SDF - Dominio D1- Mareggiata 2015.

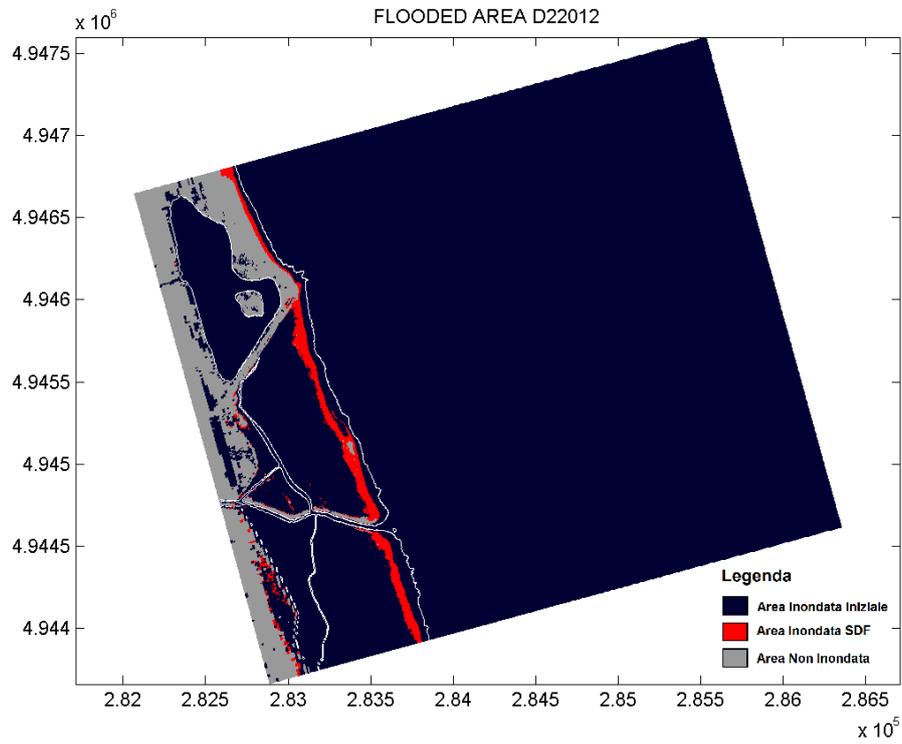


Figura 37 Area inondata SDF - Dominio D2- Mareggiata 2012.

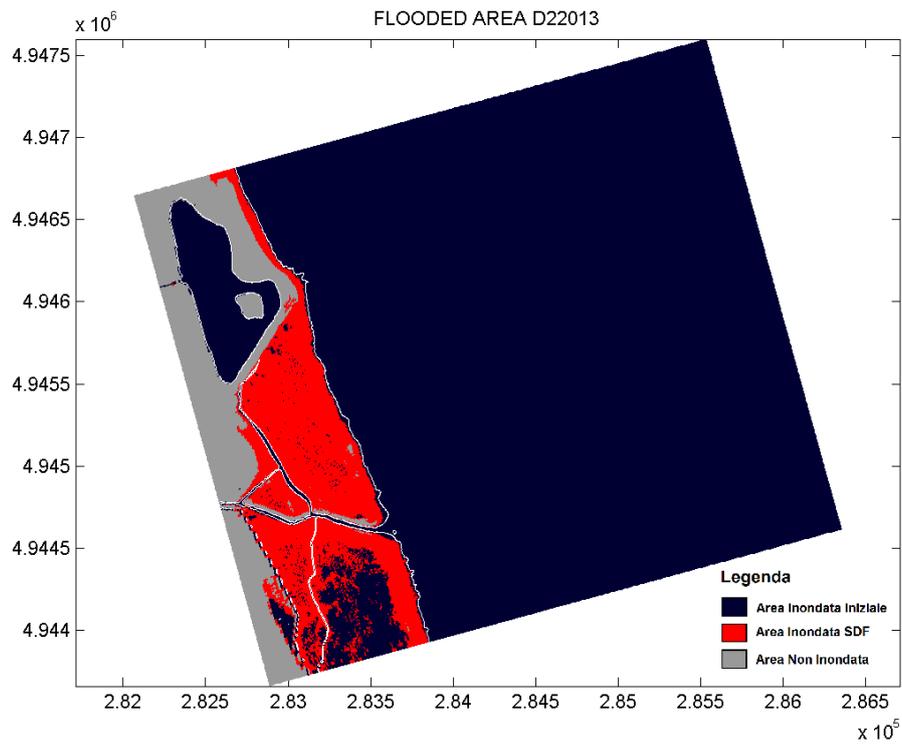


Figura 38 Area inondata SDF - Dominio D2- Mareggiata 2013.

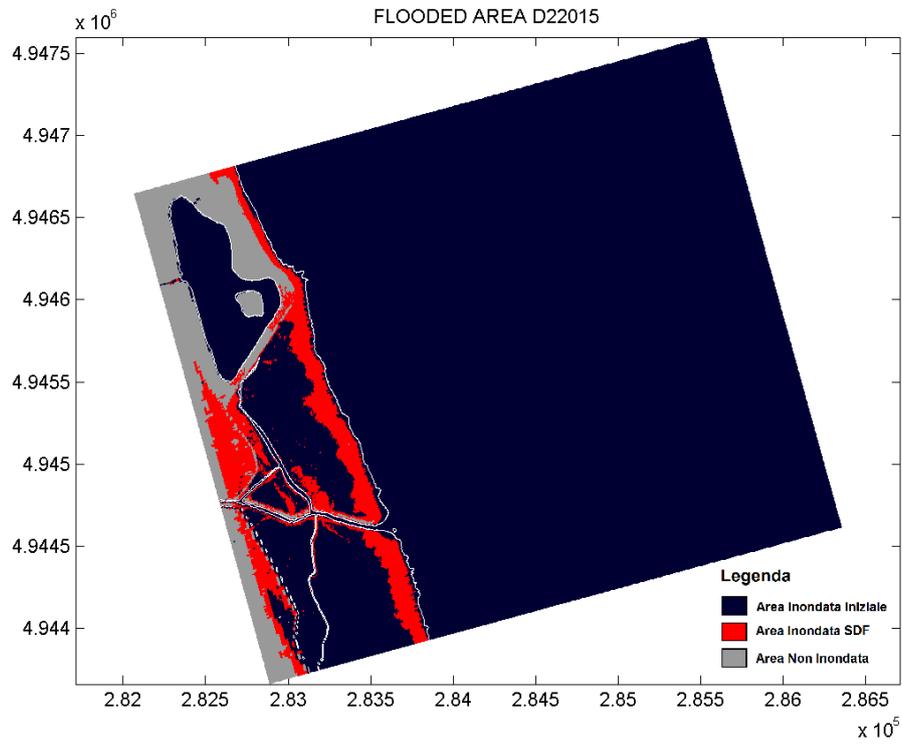


Figura 39 Area inondata SDF - Dominio D2- Mareggiata 2015.

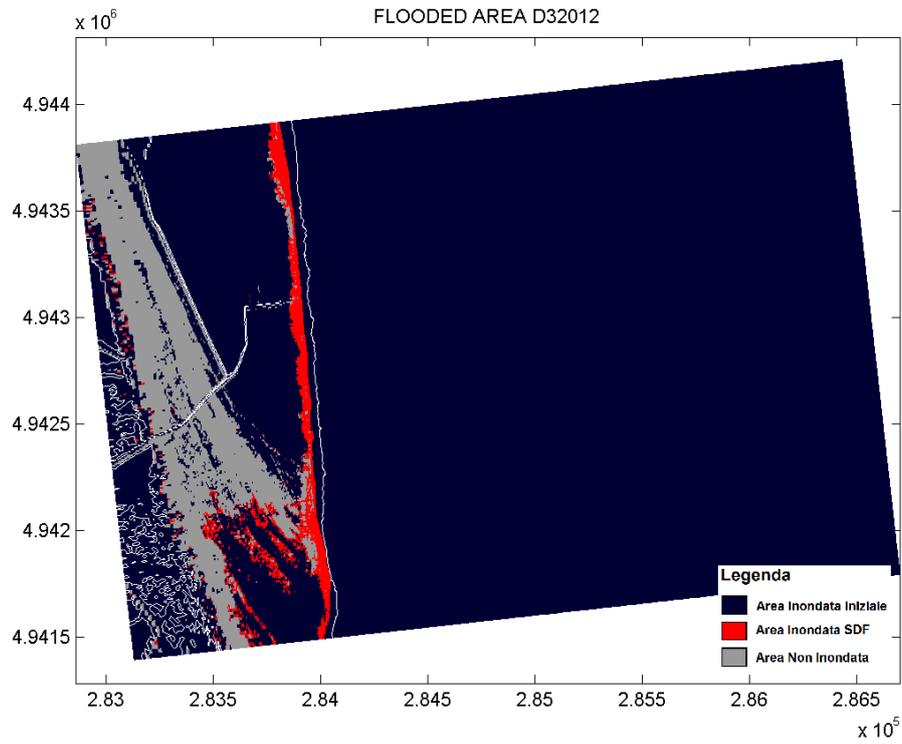


Figura 40 Area inondata SDF - Dominio D3- Mareggiata 2012.

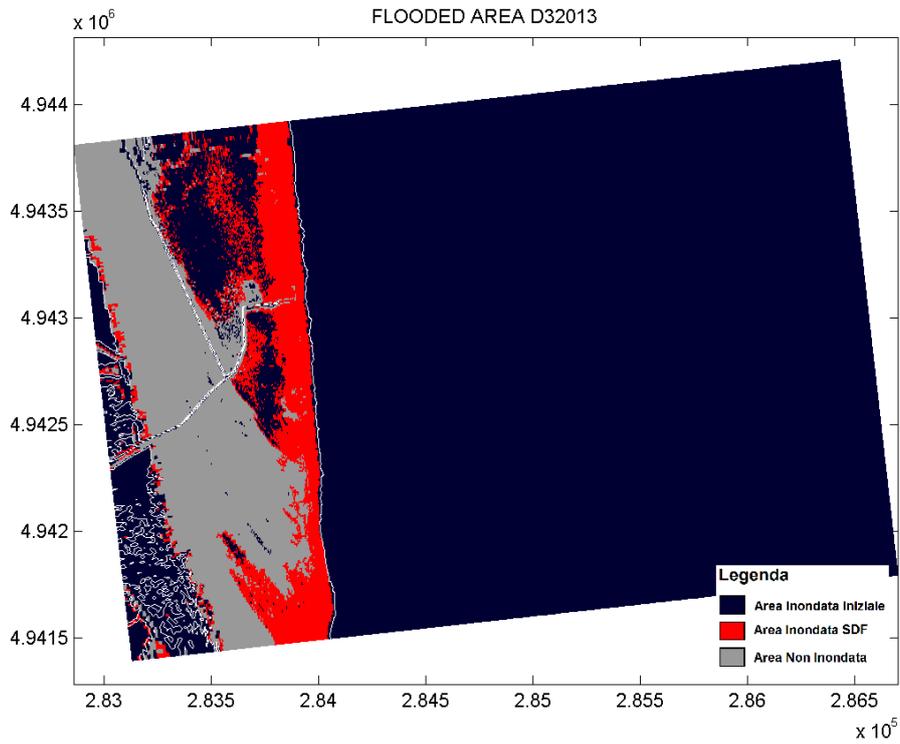


Figura 41 Area inondata SDF - Dominio D3- Mareggiata 2013.

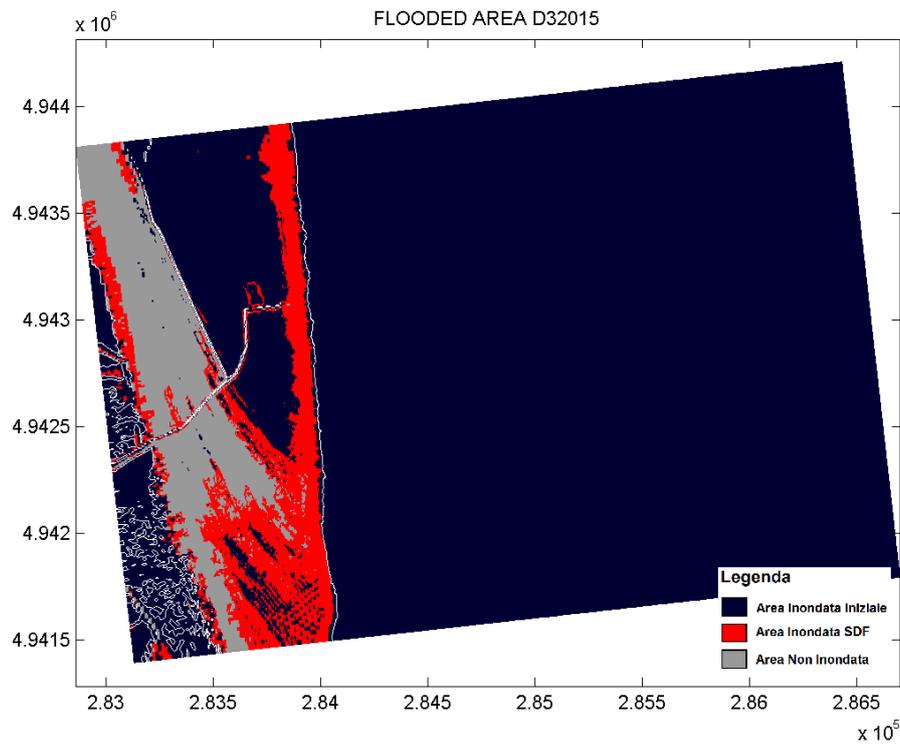


Figura 42 Area inondata SDF - Dominio D3- Mareggiata 2015.

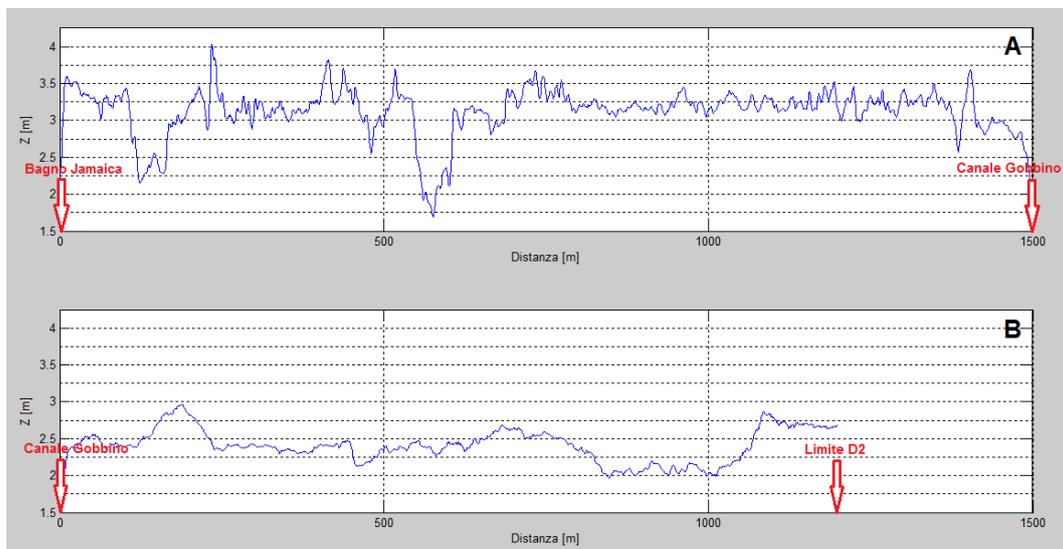


Figura 43 A) Elevazione del tratto nord dell'argine dal Bagnò Jamaica all'intersezione con il Canale Gobbino; B) Elevazione del tratto sud dell'argine dall'intersezione con il Canale Gobbino fino al limite del dominio D2.

Variazioni Volumetriche. Si presentano nel seguito i risultati delle analisi sulle variazioni volumetriche in percentuale per le tre mareggiate simulate (2012, 2013 e 2015). I dati sono presentati come diagrammi a barre verticali. I colori delle barre, blu, verde e rosso, rappresentano rispettivamente i domini D1, D2 e D3. Per ogni mareggiata sono presentati due grafici: il grafico di sinistra presenta le variazioni dei volumi allo SDF calcolate per tutto il profilo attivo emerso fino alla profondità nulla (0 m s.l.m.); il grafico di destra mette invece a confronto le stesse variazioni, calcolate però sul profilo attivo emerso fino alla profondità di 1 m (-1 m s.l.m.). In Figura 44 si presentano i dati per la mareggiata del 2012 mentre in Figura 45 e Figura 46 i dati per le mareggiate 2013 e 2015, rispettivamente.

La mareggiata del 2012 (Figura 44) presenta variazioni volumetriche mediate sui profili cross-shore delle griglie, spaziate approssimativamente 8 m l'uno dall'altro, minori del 3% per tutti i domini allo SDF, sia per il profilo emerso, che per quello parzialmente sommerso, in cui la variazione è calcolata fino alla profondità di 1 m. Nel dettaglio, considerando solo il profilo emerso: il dominio D1 subisce un'erosione mediata del 2.29 %; il D2 evidenzia una tendenza erosiva (0.25 %); il D3 presenta una tendenza erosiva al 0.41 %. Tali valori cambiano leggermente considerando le variazioni volumetriche del profilo semi-sommerso: D1 rimane pressochè stabile (-0.36 %) confermando la lieve tendenza erosiva; per il D2 si accentua la tendenza al deposito (0.89 %) così come per il D3 (2.31 %). Sostanzialmente, ciò che viene eroso nel profilo emerso viene depositato in parte nel primo metro di profondità del profilo sommerso. Non si esclude che il sedimento possa essere depositato a profondità maggiori.

Per la mareggiata del 2013 (Figura 45) le percentuali di variazione volumetrica rimangono minori del 5 % per tutti i domini. Analogamente al caso precedente le analisi tra il profilo emerso e semi-sommerso confermano che il sedimento che viene eroso dalla spiaggia emersa si deposita nella zona sommersa intertidale o a profondità maggiori. Il dominio che mostra tendenza erosiva maggiore è il D2.

La mareggiata del 2015 (Figura 46) presenta tendenze erosive del profilo emerso per D1 e D2 ma non per D3. In particolare il D2 presenta le uniche variazioni superiori al 5 % in valore assoluto (-6.84 %). Il D3 risulta in deposito per valori attorno al 4 % mentre il D1 in erosione per il 2 %. Analizzando il profilo parzialmente sommerso si nota come per D1 e D2 si abbia un incremento di tendenza al deposito, viceversa per il D3 dove si ipotizza che i volumi depositati sulla spiaggia emersa provengano dal profilo sommerso.

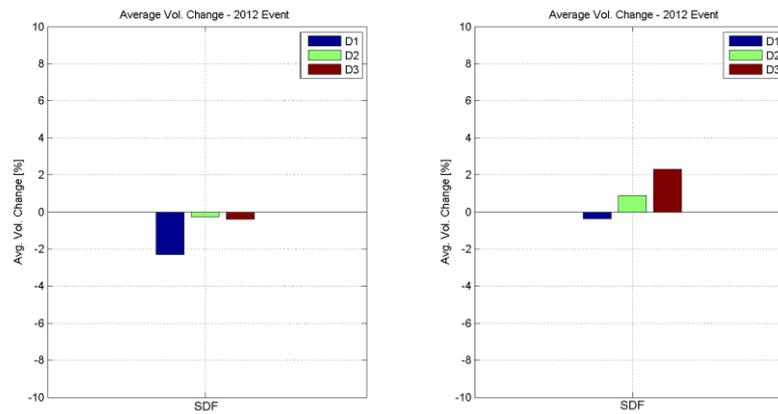


Figura 44 Confronto variazioni volumetriche tra SDF ed SDP - Domini D1, D2 e D3 - Mareggiata 2012.

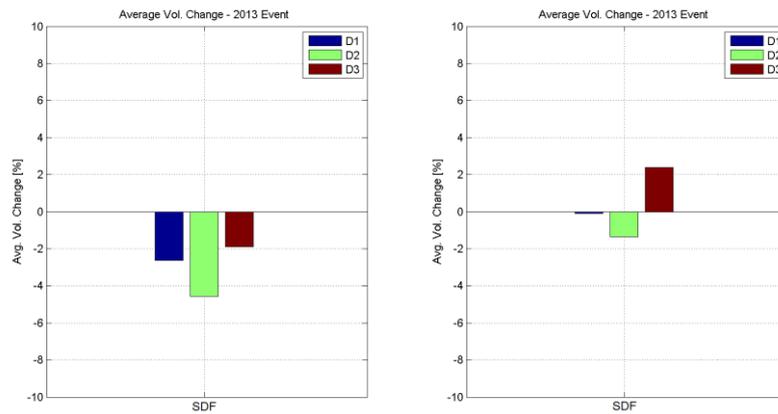


Figura 45 Confronto variazioni volumetriche tra SDF ed SDP - Domini D1, D2 e D3 - Mareggiata 2013.

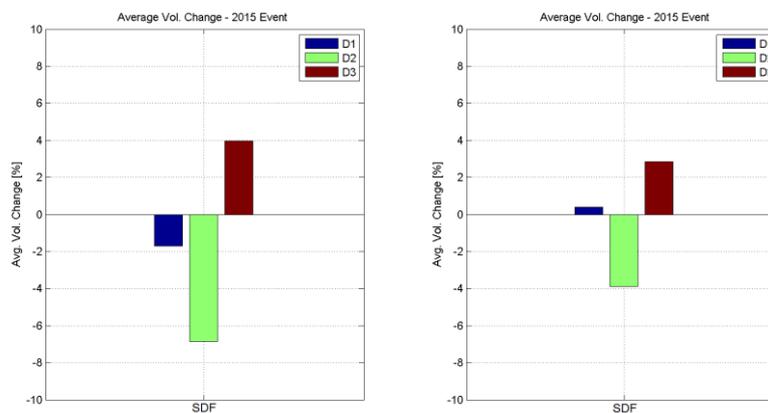


Figura 46 Confronto variazioni volumetriche tra SDF ed SDP - Domini D1, D2 e D3 - Mareggiata 2015.

## Attività 3.6: Caratterizzazione dell'assetto idrodinamico nello stato di previsione (SDP)

Area Inondata. Si presentano di seguito le rappresentazioni del confronto tra le aree inondate nel SDP ed SDF per le tre mareggiate (2012, 2013 e 2015) sui tre domini. In Figura 47, Figura 48 e Figura 49 si presentano i risultati sul dominio D1 delle tre mareggiate. Da Figura 50 a Figura 52 i risultati per il dominio D2 mentre da Figura 53 a Figura 55 quelli per il dominio D3.

Nel dominio D1 e per tutte e tre le mareggiate, le zone verde chiaro o rosse, rappresentative delle zone inondate nel solo SDP o SDF, sono estremamente limitate ed imputabili più alla sensibilità numerica del codice piuttosto che ad un'effettiva influenza della subsidenza che è nell'ordine di 2 cm sull'intero dominio. Nel dominio D2 le zone inondate solamente nello SDF e nello SDP sono molto limitate e trascurabili. Il dominio D3 ha dei risultati in controtendenza per le mareggiate 2013 e 2015 (Figura 54 e Figura 55) poiché presenta zone più ampie inondate per lo SDF, piuttosto che per lo SDP. Tuttavia, anche per quest'ultimo dominio tali aree non sono significative poiché limitate in estensione, nonostante siano più ampie di quelle ottenute per i domini precedenti. Inoltre, si evidenzerebbe un inaspettato impatto positivo della subsidenza, motivo in più per sostenere che il risultato sia imputabile più alla sensibilità numerica del codice che alla subsidenza. La mareggiata del 2012 (Figura 53) conferma le tendenze riscontrate in precedenza per i domini D1 e D2.

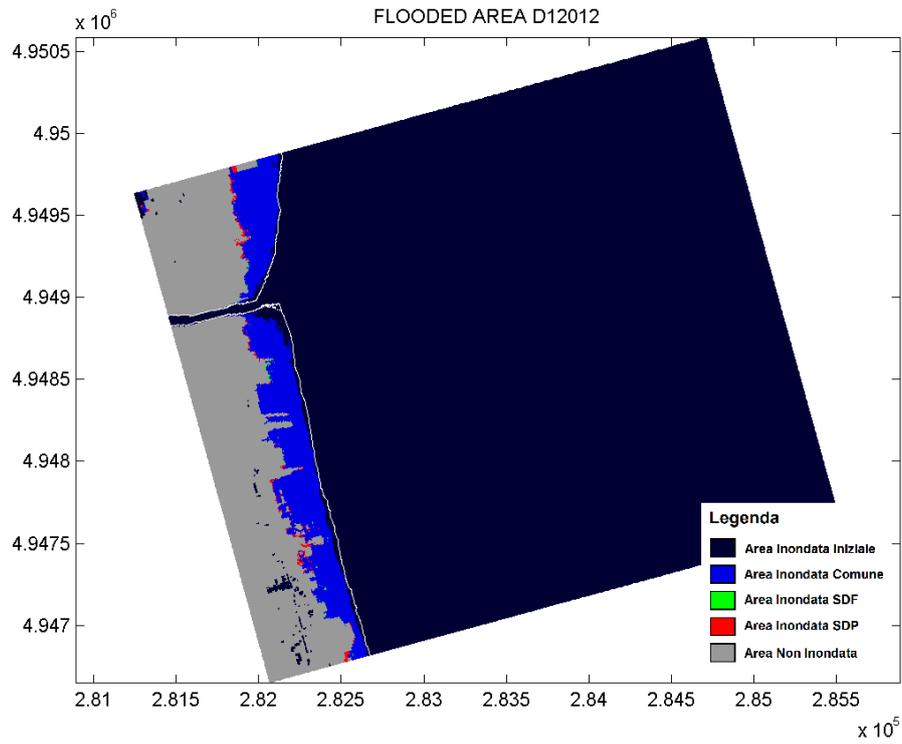


Figura 47 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D1- Mareggiata 2012.

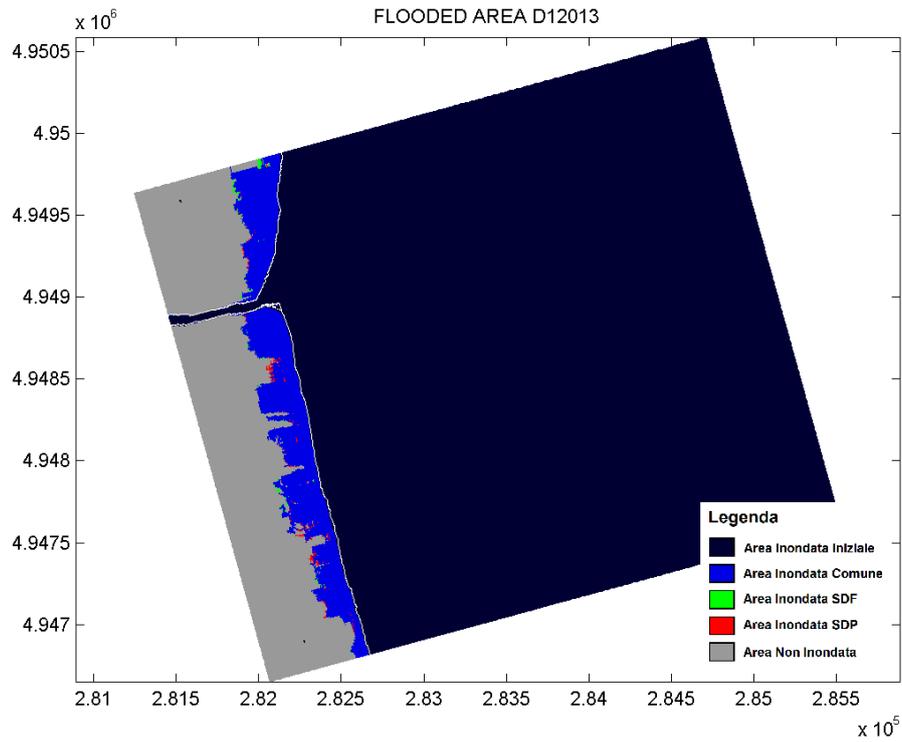


Figura 48 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D1- Mareggiata 2013.

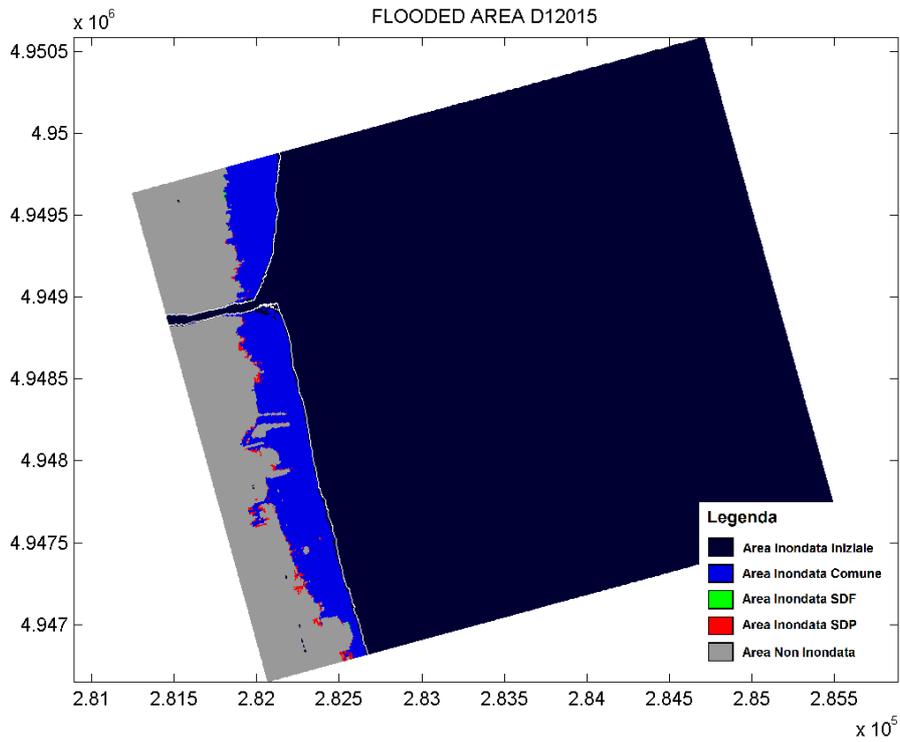


Figura 49 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D1- Mareggiata 2015

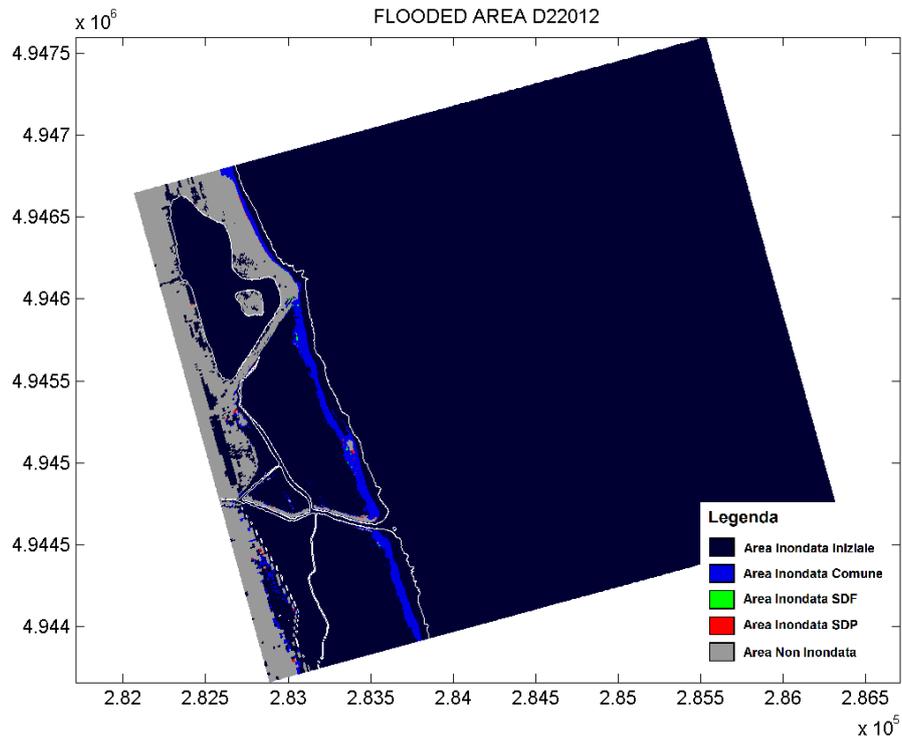


Figura 50 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D2- Mareggiata 2012.

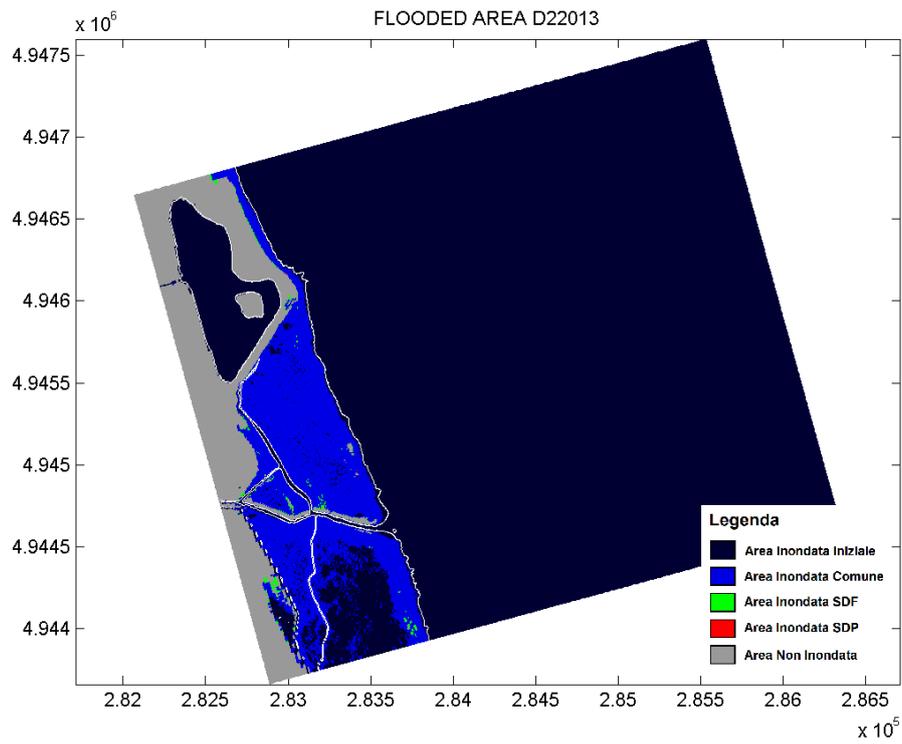


Figura 51 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D2- Mareggiata 2013.

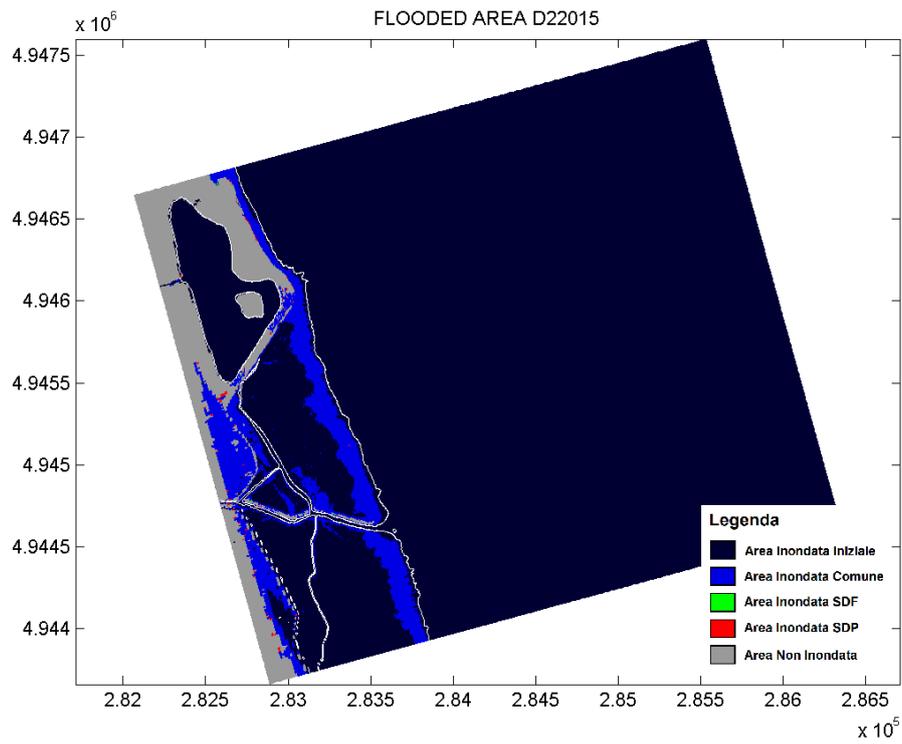


Figura 52 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D2- Mareggiata 2015.

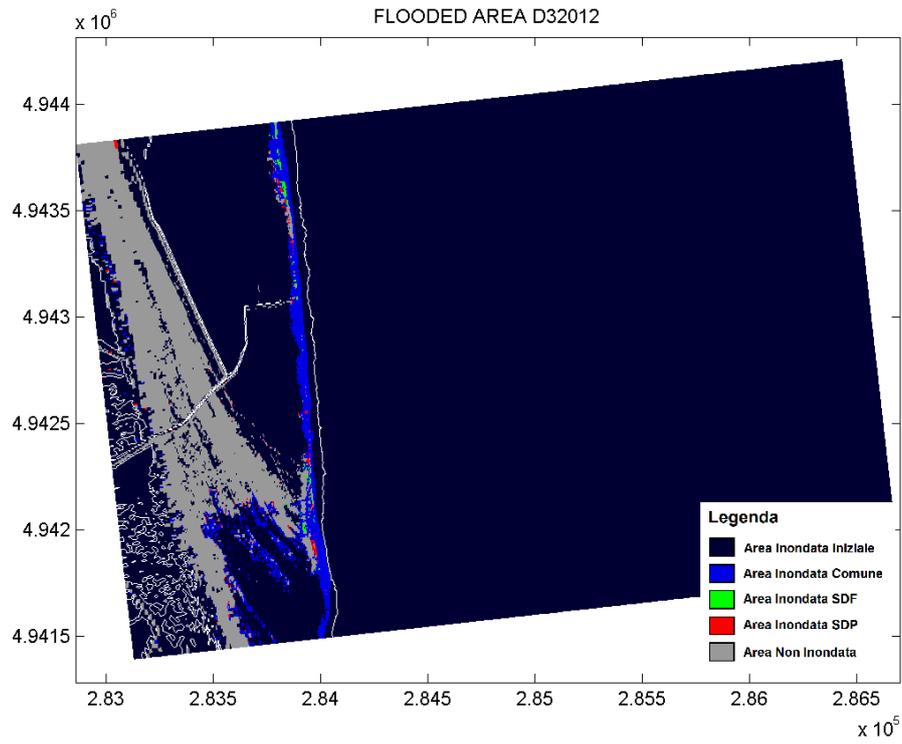


Figura 53 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D3- Mareggiata 2012.

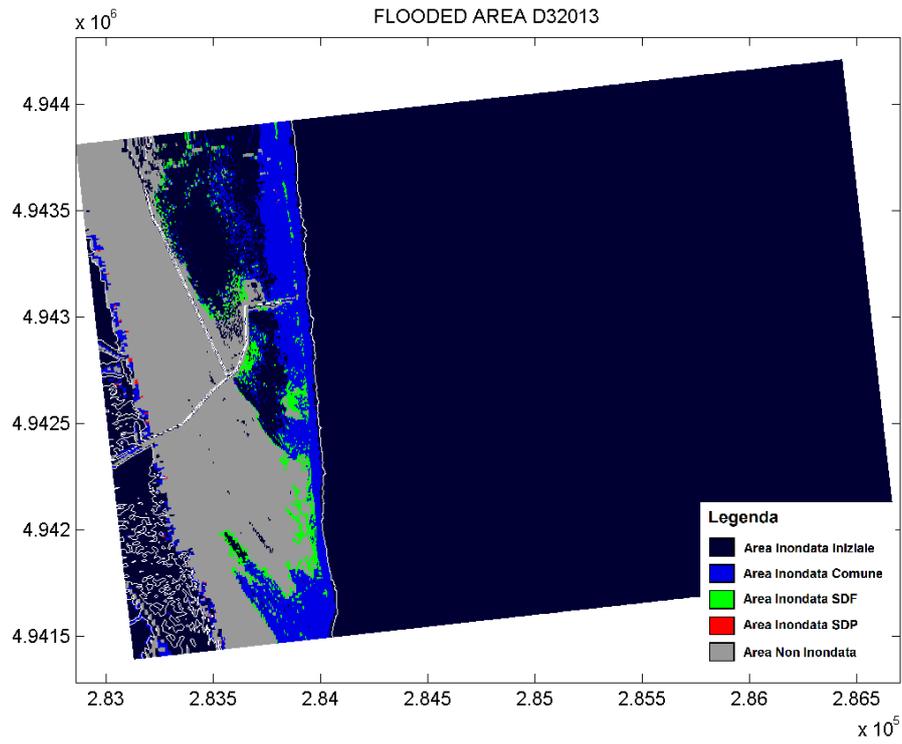


Figura 54 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D3- Mareggiata 2013.

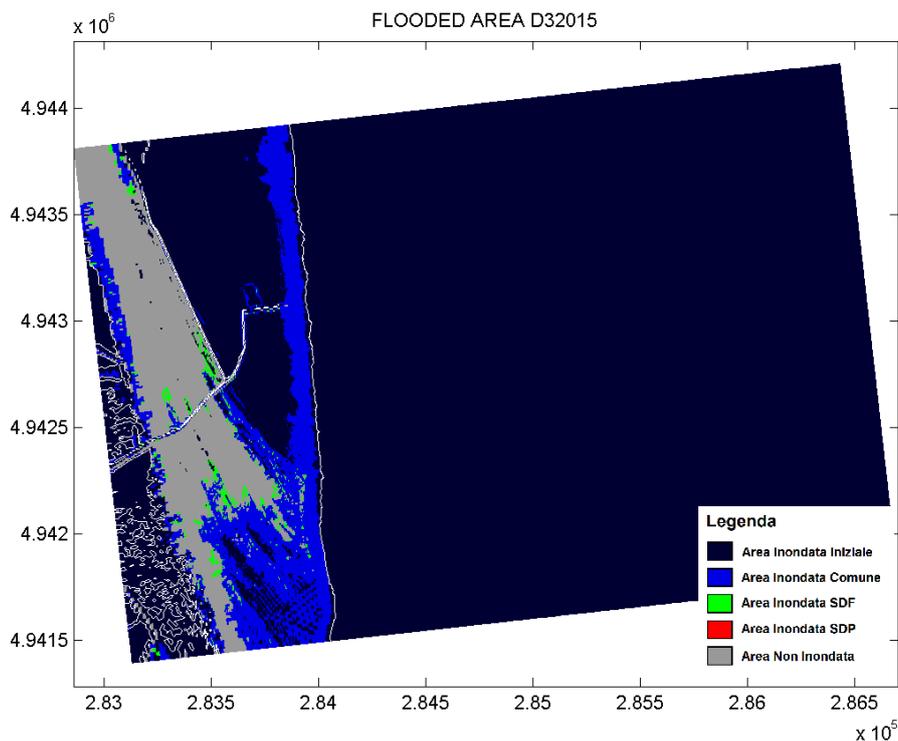


Figura 55 Confronto aree inondate tra SDF ed SDP - Dominio D3- Mareggiata 2015.

### Attività 3.7: Caratterizzazione degli effetti morfologici associati alla subsidenza negli scenari simulati

Variazioni Volumetriche. Si presentano nel seguito i confronti sui risultati delle analisi sulle variazioni volumetriche in percentuale per le tre mareggiate simulate (2012, 2013 e 2015). I dati sono presentati come diagrammi a barre verticali. I colori delle barre, blu, verde e rosso, rappresentano rispettivamente i domini D1, D2 e D3. Per ogni mareggiata sono presentati due grafici: il grafico di sinistra mette a confronto le variazioni dei volumi allo SDF ed allo SDP calcolate per tutto il profilo attivo emerso fino alla profondità nulla (0 m s.l.m.); il grafico di destra mette invece a confronto le stesse variazioni, calcolate però sul profilo attivo emerso fino alla profondità di 1 m (-1 m s.l.m.). In Figura 56 si presentano i dati per la mareggiata del 2012 mentre in Figura 57 e Figura 58 i dati per le mareggiate 2013 e 2015, rispettivamente.

In tutti i domini e per tutte le mareggiate, i volumi cambiano di pochi decimi di percentuale tra SDF ed SDP. La massima variazione assoluta si registra nel dominio D3 per la mareggiata del 2012 ed è pari ad un incremento della tendenza erosiva di 0.47% (0.41 % SDF al 0.88 % SDP).

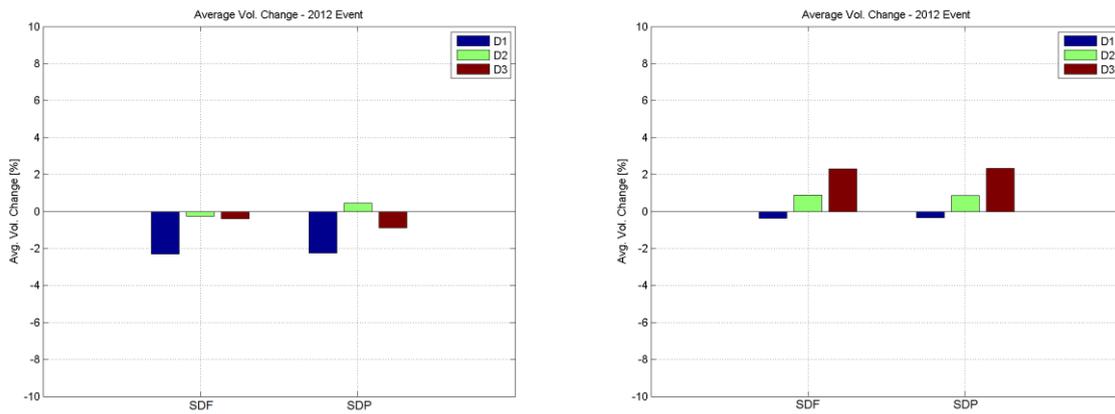


Figura 56 Confronto variazioni volumetriche tra SDF ed SDP - Domini D1, D2 e D3 - Mareggiata 2012.

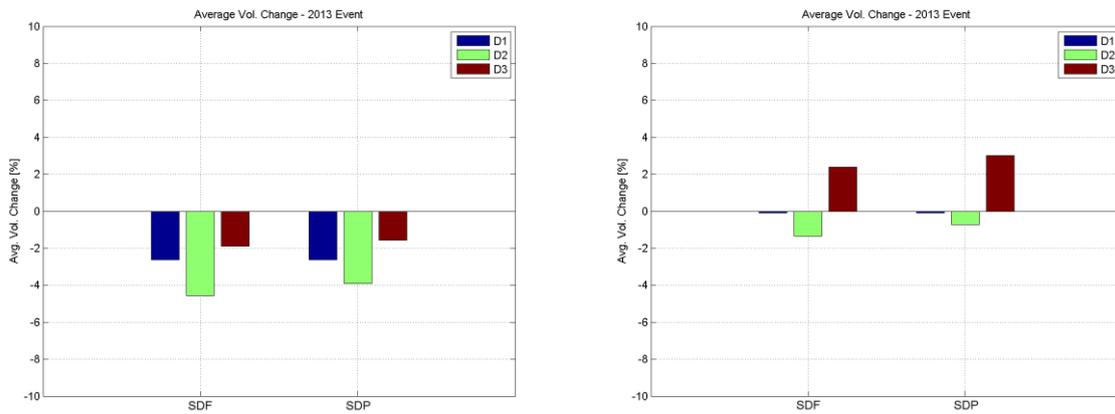


Figura 57 Confronto variazioni volumetriche tra SDF ed SDP - Domini D1, D2 e D3 - Mareggiata 2013.

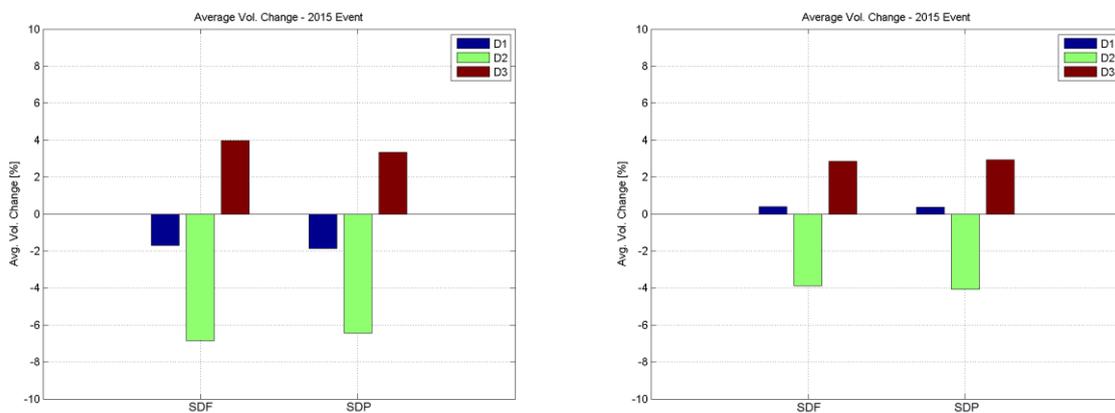


Figura 58 Confronto variazioni volumetriche tra SDF ed SDP - Domini D1, D2 e D3 - Mareggiata 2015.

## 5. Affidabilità

### Attività 3.4 - 3.7: Affidabilità del dato iniziale

Si presenta di seguito un confronto tra il dato topo-batimetrico delle griglie di calcolo basato sull'interpolazione del DEM prodotto nell'Attività 3.3 ed il rilievo topografico svolto in data 16 Ottobre 2014 ed analizzato nell'Attività 3.1 sui 12 profili di controllo (da Figura 59 a Figura 70). I dati sono forniti riportando le bande di errore di misurazione stimate nell'ordine di  $\pm 10$  cm per il rilievo topografico e di  $\pm 20$  cm per il DEM.

Si evidenzia per tutti i profili un offset tra il dato delle griglie (DEM) ed il dato rilevato (16-10-14) nell'ordine di 20-30 cm nella parte dove il DEM è costruito sulla base delle informazioni estratte dal Lidar di Ottobre 2014, corretto in quota. Tale scostamento può essere dovuto a vari fattori. In primo luogo, l'aggiustamento del datum verticale è stato fatto in maniera empirica basandosi su punti considerati stabili e punti comuni tra DEM e rilievo mentre sarebbe più auspicabile avere concordato con il sub-contractor un inquadramento comune basato su un caposaldo condiviso. In secondo luogo, il dato Lidar presenta una precisione dell'ordine di 10-15 cm.

Tali differenze incrementano notevolmente per elevazioni inferiori a 0.75 m s.l.m. (rispetto al dato DEM): infatti, da questo punto in poi, il DEM si basa sulle informazioni ricavate dal dataset relativo al 2012. Il rilievo topografico del 16 Ottobre 2014 evidenzia elevazioni inferiori anche di 1-2 m rispetto al dato in input al modello, che non tiene conto dell'arretramento della linea di riva dal 2012 al 2014.

Tali differenze rappresentano una limitazione del modello in termini di realistica della zona sommersa rispetto alla condizione attuale ed alla magnitudine dei risultati finali. Tuttavia non influisce sul confronto tra i risultati tra SDF a SDP, basandosi questi sullo stesso dato in input, corretto della subsidenza per lo SDP.

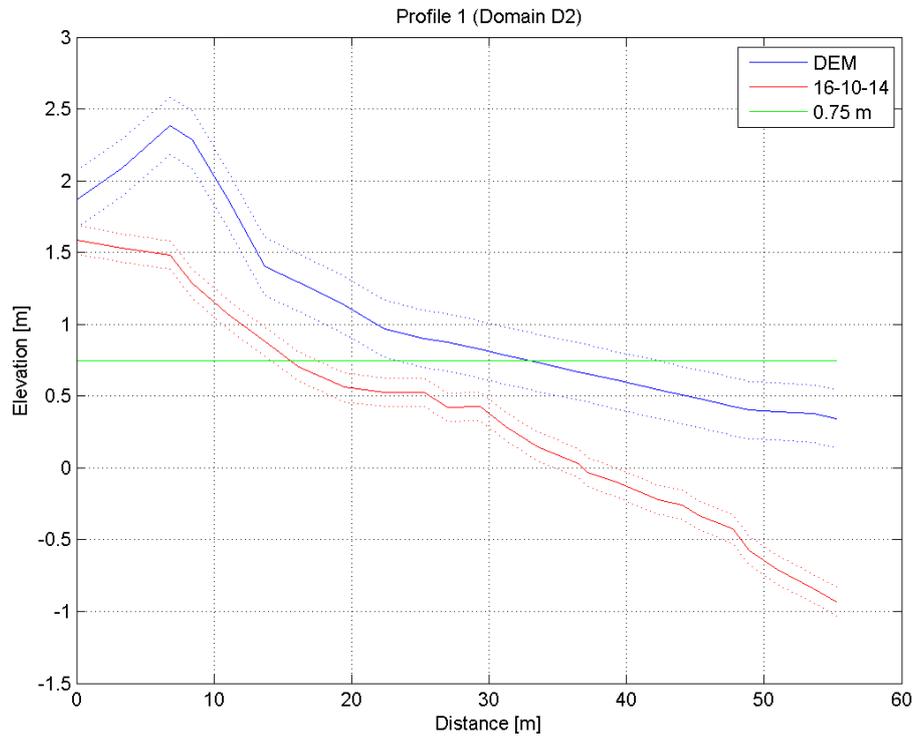


Figura 59 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 1 (Dominio D2).

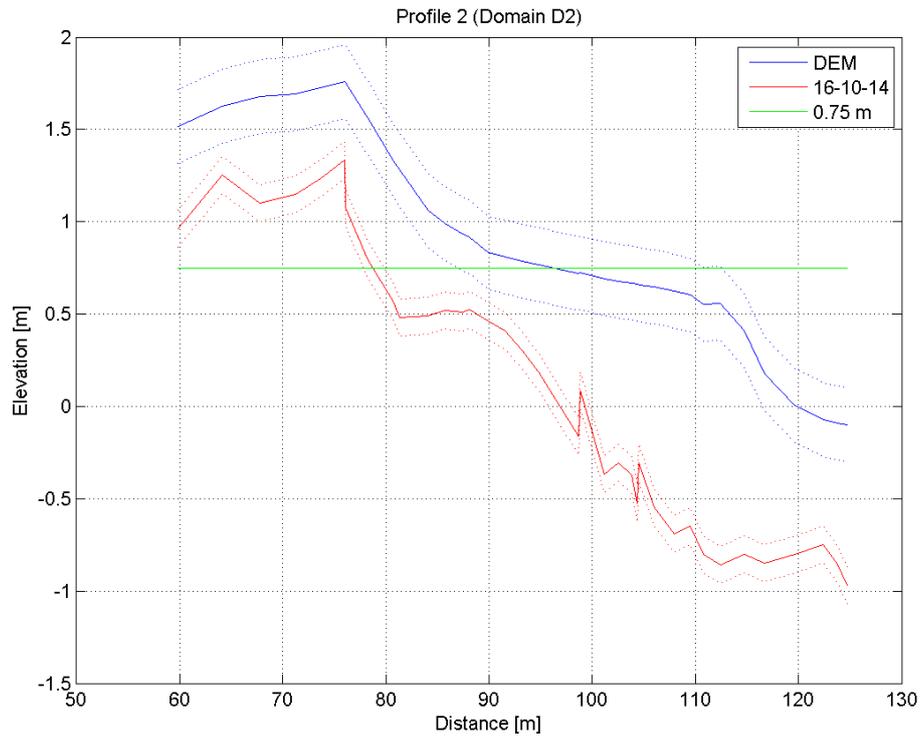


Figura 60 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 2 (Dominio D2)

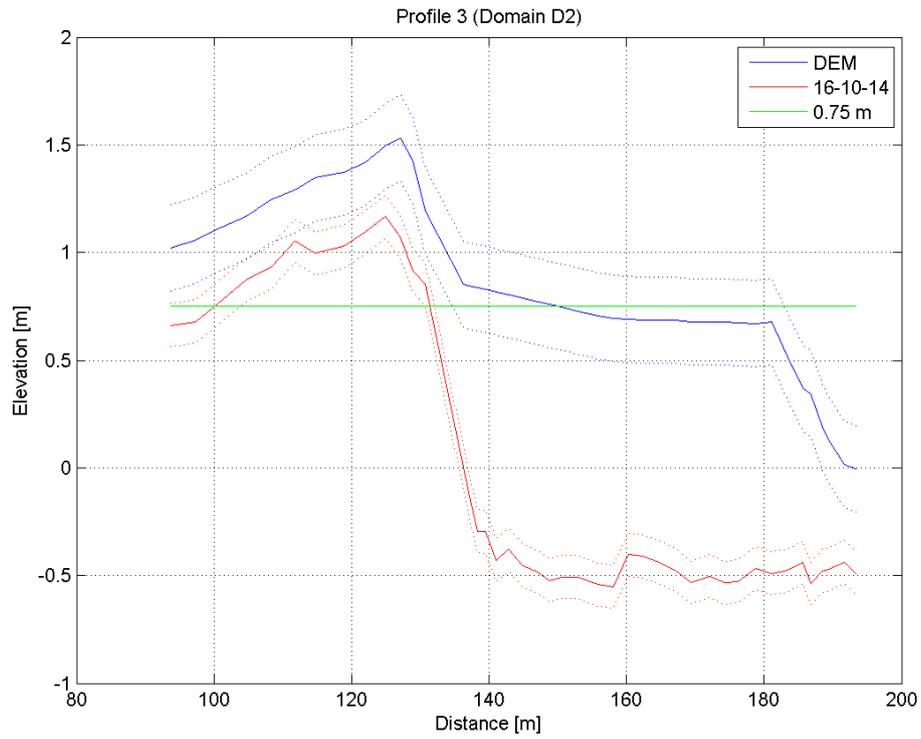


Figura 61 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 3 (Dominio D2).

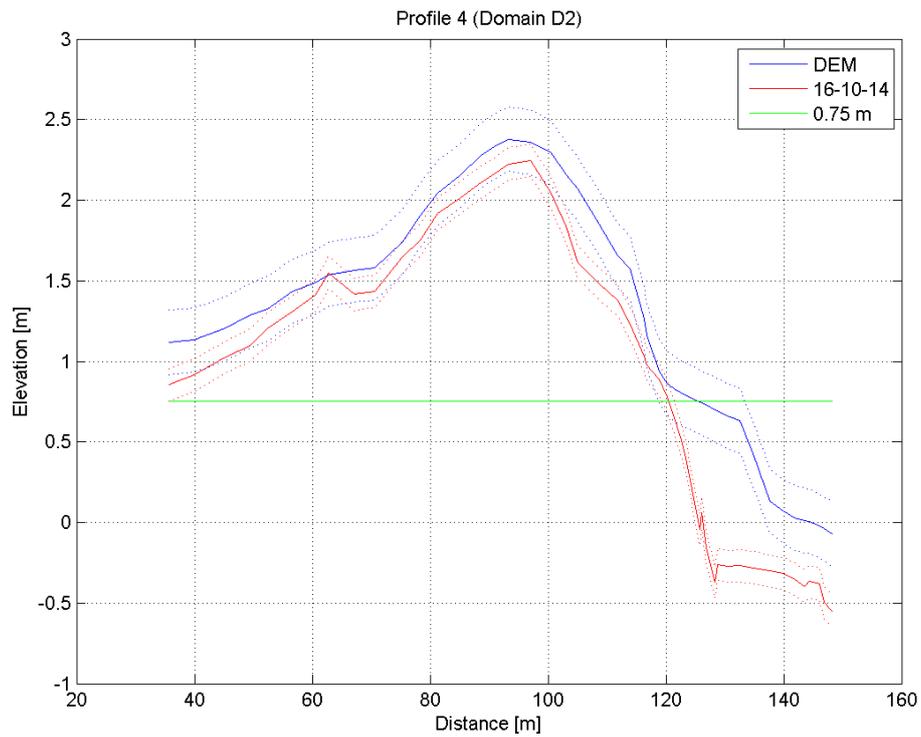


Figura 62 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 4 (Dominio D2).

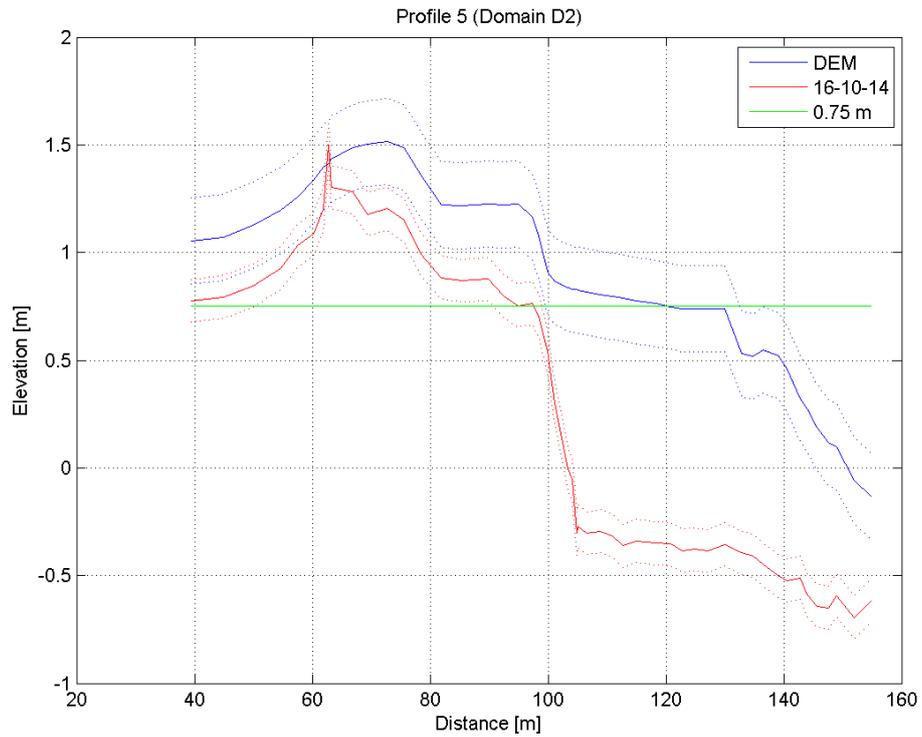


Figura 63 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 5 (Dominio D2).

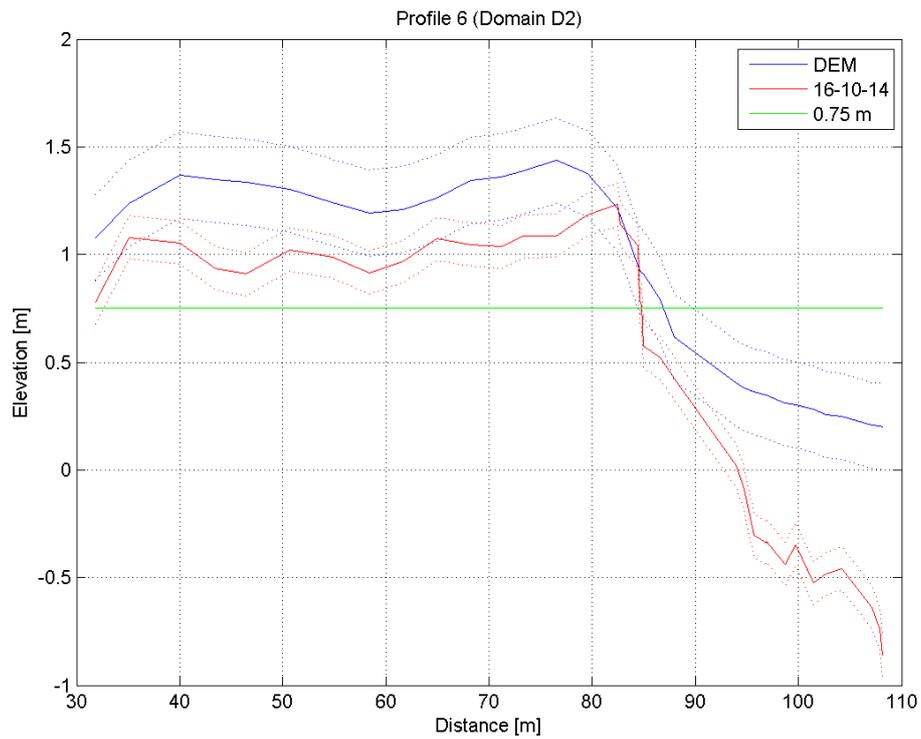


Figura 64 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 6 (Dominio D2).

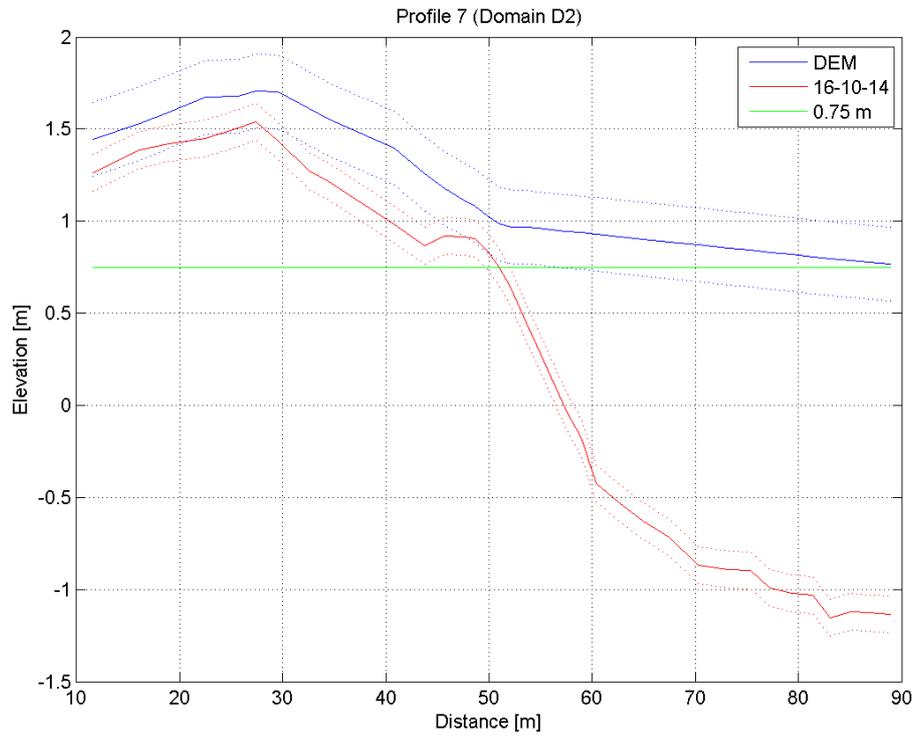


Figura 65 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 7 (Dominio D2).

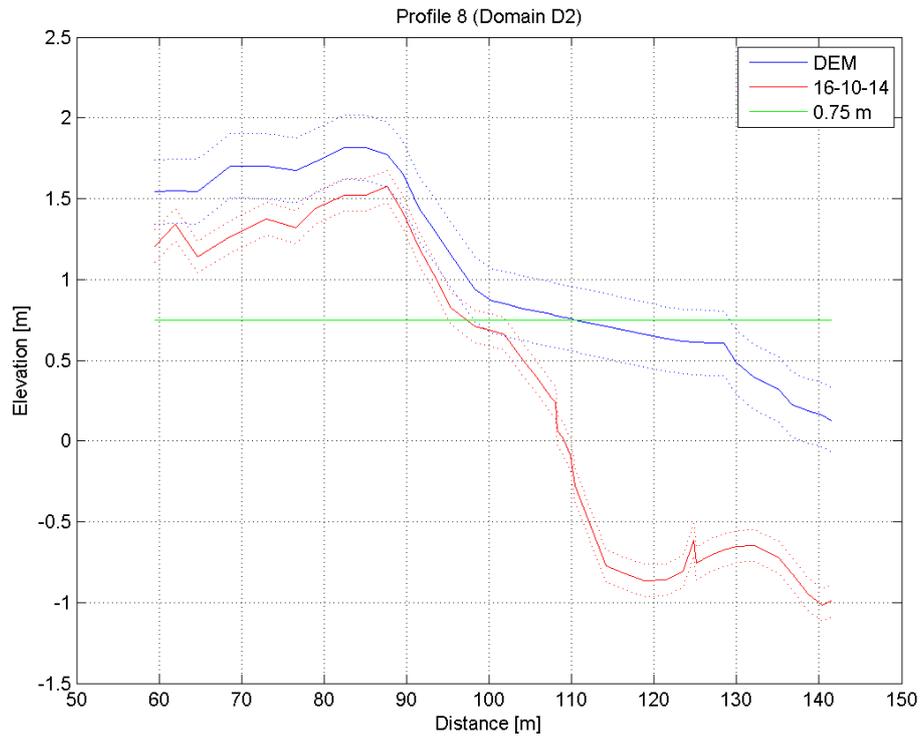


Figura 66 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 8 (Dominio D2).

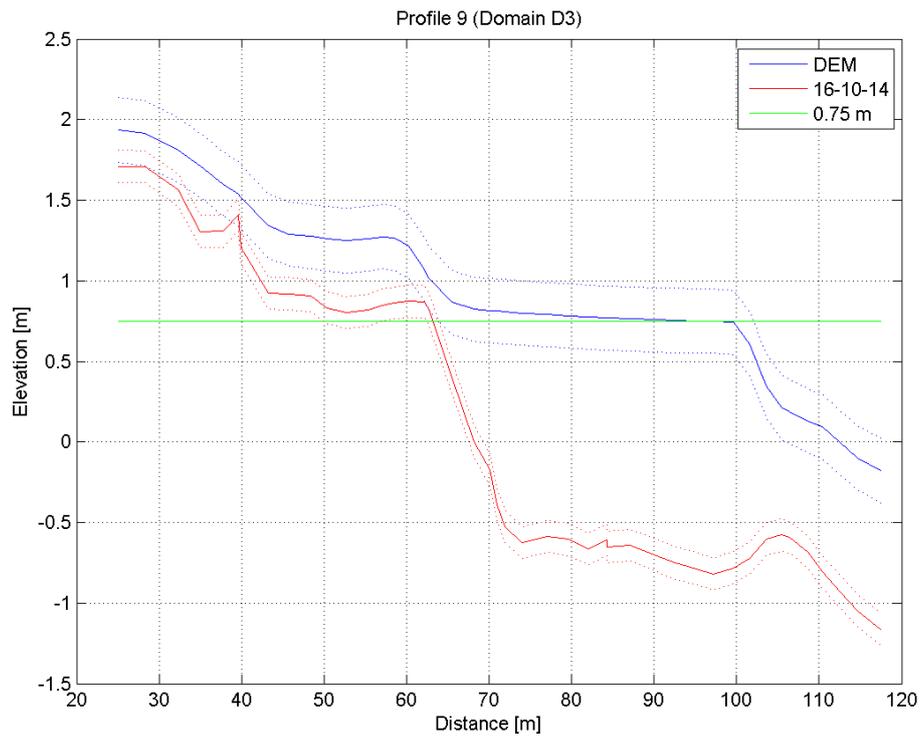


Figura 67 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 9 (Dominio D2).

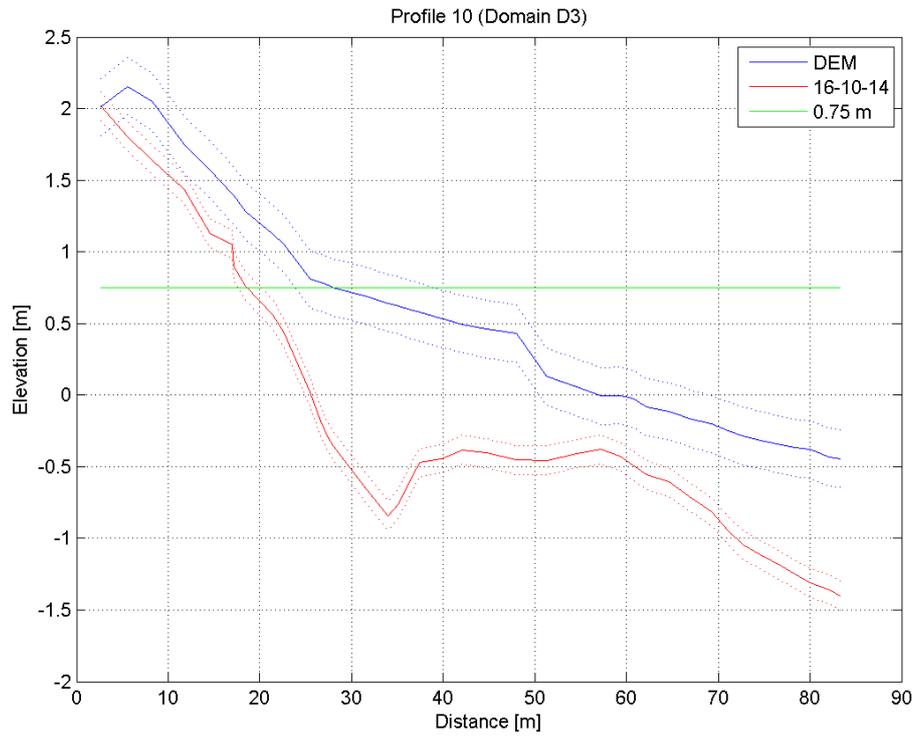


Figura 68 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 10 (Dominio D2).

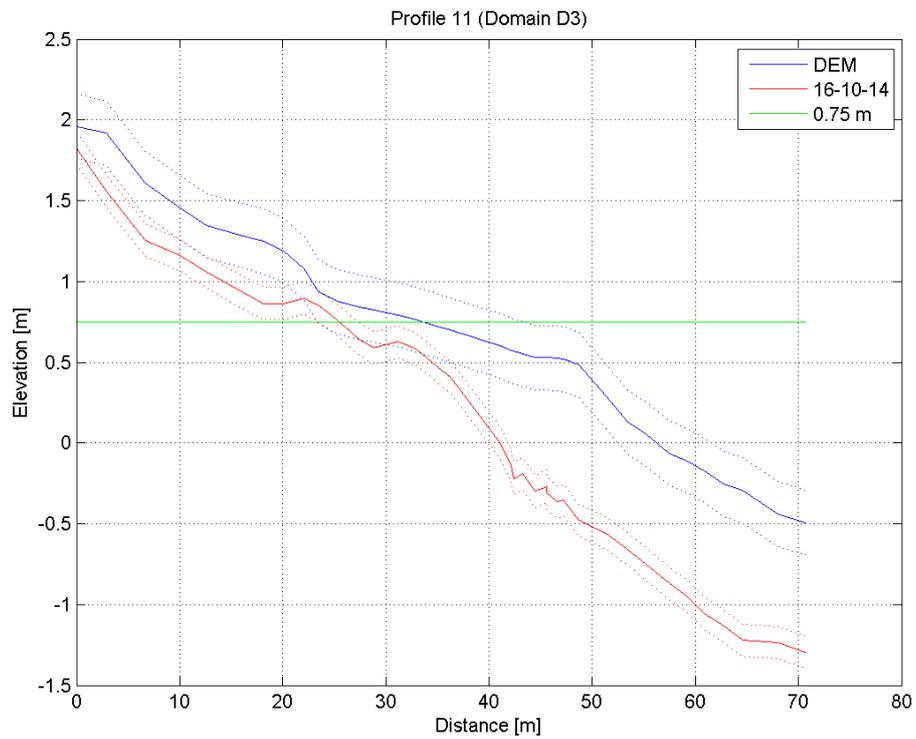


Figura 69 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 11 (Dominio D2).

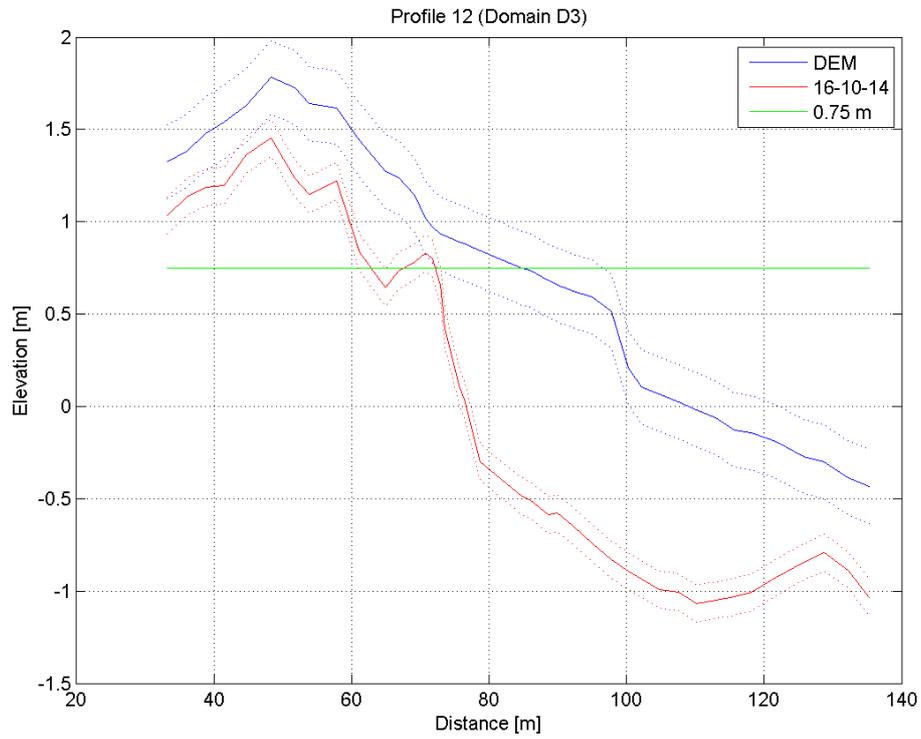


Figura 70 Confronto tra DEM (Xbeach) e rilievo DGPS 16 Ottobre 2014 - Profilo 12 (Dominio D2).

## Attività 3.4 - 3.7: Sensitività del modello

La sensitività del modello è stata analizzata ripetendo le simulazioni relative alla mareggiata del 2015 e cambiando, rispetto al modello di base definito nelle attività precedenti, il parametro del trasporto relativo alla forma delle onde (facua). Il parametro, posto pari a 0.25 nel modello base, è stato posto pari a 0.1 nel modello modificato. La risposta a tale cambiamento in termini morfologici è un incremento generalizzato dell'erosione. Si sono valutati i profili finali sui 20 profili di controllo (di cui: 8 su D1, 8 su D2 e 4 su D3) a confronto con i dati rilevati a Febbraio 2015 e le variazioni volumetriche.

Analisi dei profili. I dati dei due modelli sono stati confrontati con il rilievo post-evento della mareggiata del 5 Febbraio 2015: erano infatti disponibili i 12 transetti rilevati per l'Attività 3.1 ed appartenenti ai domini D2 e D3, e 8 transetti rilevati nella zona a nord, appartenenti al dominio D1. In Figura 71 si mostra la posizione dei profili il cui ID indica il dominio di appartenenza ed il numero dello stesso.

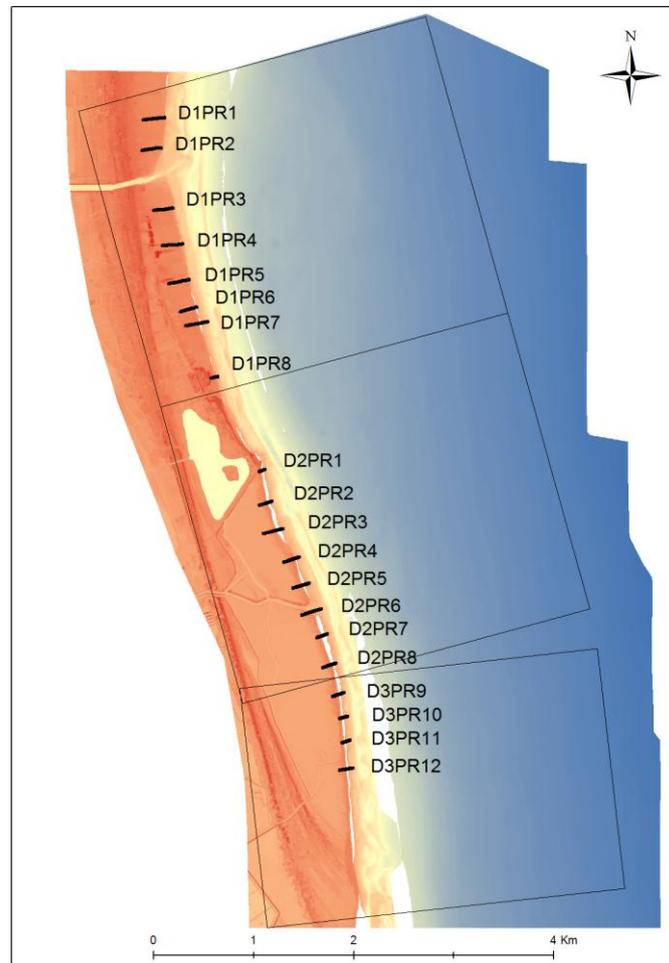


Figura 71 Posizione dei profili di controllo per le analisi di sensitività.

Si presenta nel seguito il confronto tra i profili rilevati in occasione del rilievo post-evento di Febbraio 2015 ed i profili finali del modello di base ( $facua = 0.25$ ) e modificato ( $facua = 0.10$ ). In tab sono riassunti i risultati in termini di BSSvR. Il Brier Skill Score è usato nella forma proposta da Van Rijn et al. (2003) in modo da tenere in considerazione gli errori sulle quote rilevate. Tale errore ( $\delta$ ) è stato fissato pari a 0.1 m, ordine di grandezza dell'errore per rilievi a profili costieri con DGPS. La formulazione utilizzata è quindi:

$$BSSvR = 1 - \frac{\sum(|Zf_{mod} - Zf_{obs}| - \delta)^2}{\sum(Z0 - Zf_{obs})^2}$$

dove  $Zf_{mod}$  e  $Zf_{obs}$  sono rispettivamente le quote finali da modello ed osservate,  $\delta$  è l'errore assunto sulla misura delle quote mentre  $Z0$  sono le quote del profilo iniziale. Si evidenzia che il grado di affidabilità del modello viene definito in base al valore di BSSvR dalla Tabella 5 (Van Rijn et al., 2003).

Tabella 5 Classificazione dell'affidabilità del modello in base al BSSvR secondo Van Rijn et al., 2003.

BSSvR [-]		Description
min	max	
0.8	1	Excellent
0.6	0.8	Good
0.3	0.6	Reasonable/Fair
0	0.3	Poor
-999	0	Bad

In Tabella 6 si presentano i valori di BSSvR per ogni transetto analizzato per il settaggio base e modificato. I colori all'interno delle caselle si riferiscono al grado di affidabilità presentato in Tabella 5. Di seguito si propone la rappresentazione dei profili dove sono riportati il profilo iniziale (Z0-MOD: linea continua nera), il profilo finale del modello modificato (Zf-MOD-f010: linea continua blu), il profilo finale del modello base (Zf-MOD-f03: linea continua azzurra) ed il profilo finale osservato (Zf-OBS: linea tratteggiata rossa). Da Figura 72 a Figura 79 si presentano i profili relativi al dominio D1, da Figura 80 a Figura 87 quelli relativi al D2 e da Figura 88 a Figura 91 quelli relativi al D3.

Si noti da Tabella 6 come il dominio D1 per il modello base presenti 3 profili con BSSvR minore di 0.6 (affidabilità < "Good"), di cui uno solo minore di 0 mentre, per il settaggio modificato il numero di profili con affidabilità minore di "Good" aumenti a 4 di cui ben 2 con affidabilità "Bad".

I domini D2 e D3 presentano nel loro insieme per il modello base 9 profili su 12 con affidabilità medio-bassa (< "Good") mentre, il modello modificato migliora le prestazioni sui profili, facendo salire a 7 il numero di profili con buona/eccellente affidabilità (>"Good"). Si deduce che il settaggio del modello di base, fissato sulla base di considerazioni ed analisi svolte sul dominio D1 in periodo precedente al presente ODL (vedere paragrafo Materiali e Metodi Attività 3.4), sia ragionevolmente affidabile per il D1 ma necessita di modifiche e ricalibrazione per ottenere risultati più affidabili per i domini D2 e D3, caratterizzati da spiagge naturali non occupate da attività umane. Per eventuali futuri studi si consiglia l'utilizzo del settaggio di base per il dominio D1 mentre, per D2 e D3 si consiglia il settaggio modificato.

Variazioni volumetriche. In Figura 92 si presentano i risultati dei confronti sulle variazioni volumetriche per la mareggiata del 2015 con settaggio di base (riquadri in alto a sinistra e a destra) e modificato (riquadri in basso). Analogamente a quanto esposto in precedenza i riquadri a sinistra sono relativi alle variazioni sul profilo emerso mentre a destra al profilo semi-sommerso. Le

variazioni volumetriche calcolate (con la stessa metodologia descritta per l'Attività 3.7) per la mareggiata 2015 simulata con il settaggio modificato presenta valori percentuali notevolmente diversi. La tendenza erosiva si accentua notevolmente utilizzando  $\text{facua} = 0.1$ , raggiungendo valori del 30-35% per i domini D2 e D3, mentre D1 rimane al di sotto del 10 % (in erosione). Passando al profilo semi-sommerso tali percentuali in erosione diminuiscono scendendo al di sotto del 20 % per D2 e D3 ed al di sotto del 5 % per il D1. Si noti, ancora una volta, come le variazioni indotte dallo SDP rispetto allo SDF siano nell'ordine di pochi punti percentuale, trascurabili.

Tabella 6 Confronto sui valori calcolati di BSSvR sui profili di controllo per il settaggio base e modificato del modello Xbeach.

ID	Dominio	Nr.	BSSvR [-]	
			Base	Modificato
D1PR1	D1	1	0.59	0.84
D1PR2	D1	2	0.84	0.78
D1PR3	D1	3	0.69	0.74
D1PR4	D1	4	0.41	0.22
D1PR5	D1	5	0.73	0.84
D1PR6	D1	6	0.78	0.55
D1PR7	D1	7	-1.7	-0.3
D1PR8	D1	8	0.62	-0.02
D2PR1	D2	1	0.96	0.88
D2PR2	D2	2	-0.67	0.35
D2PR3	D2	3	-0.19	0.28
D2PR4	D2	4	0.69	0.72
D2PR5	D2	5	-0.19	0.45
D2PR6	D2	6	-0.01	0.68
D2PR7	D2	7	0.32	0.58
D2PR8	D2	8	0.48	0.77
D3PR9	D3	9	0.57	0.83
D3PR10	D3	10	0.79	0.86
D3PR11	D3	11	-0.22	0.45
D3PR12	D3	12	0.41	0.76

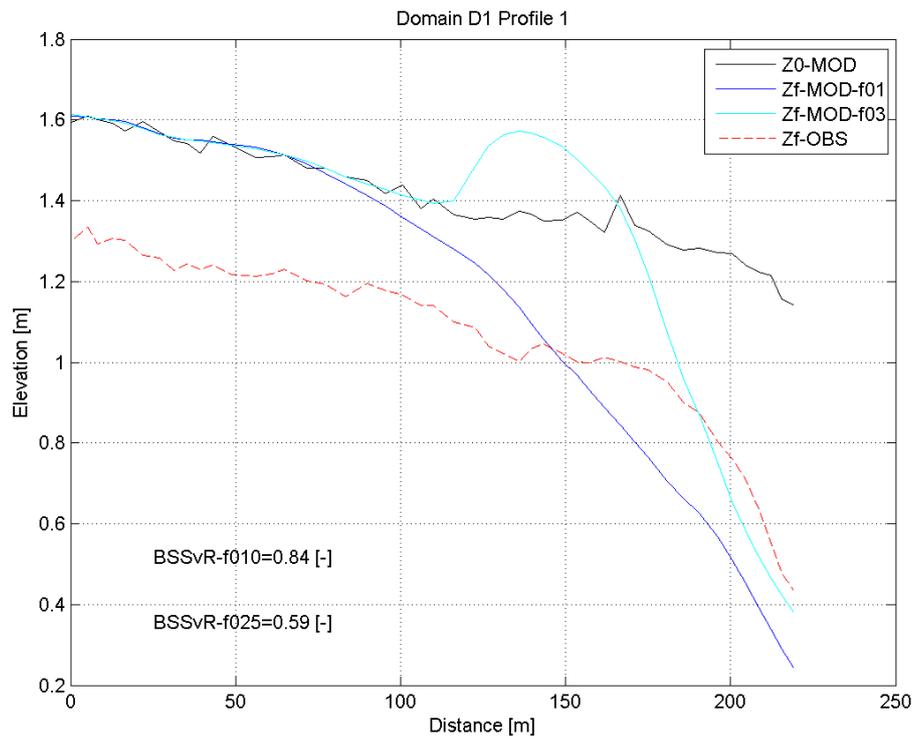


Figura 72 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR1.

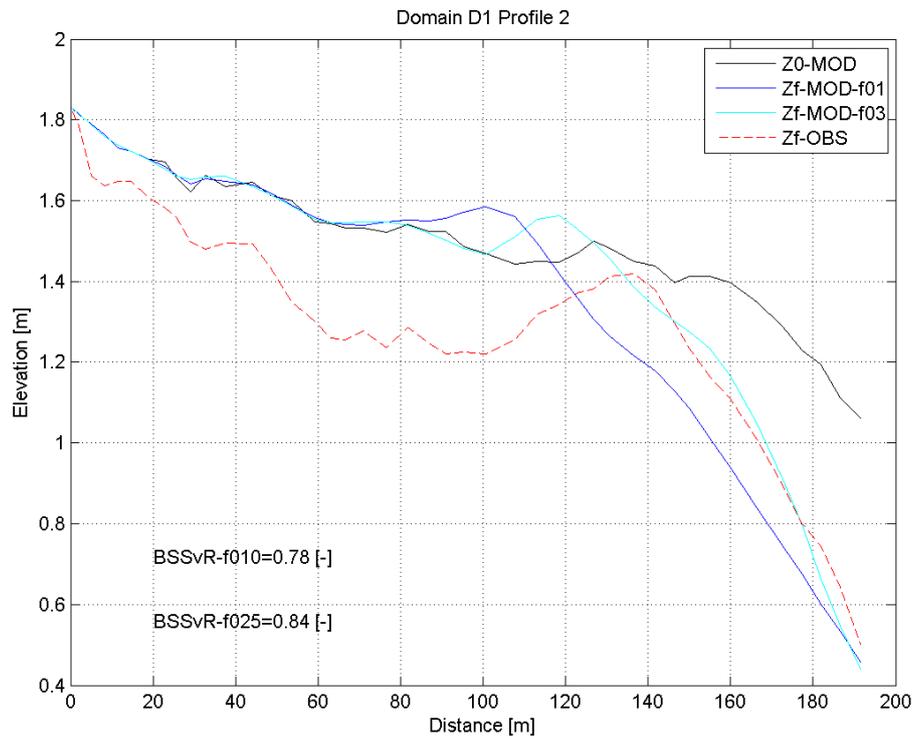


Figura 73 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR2.

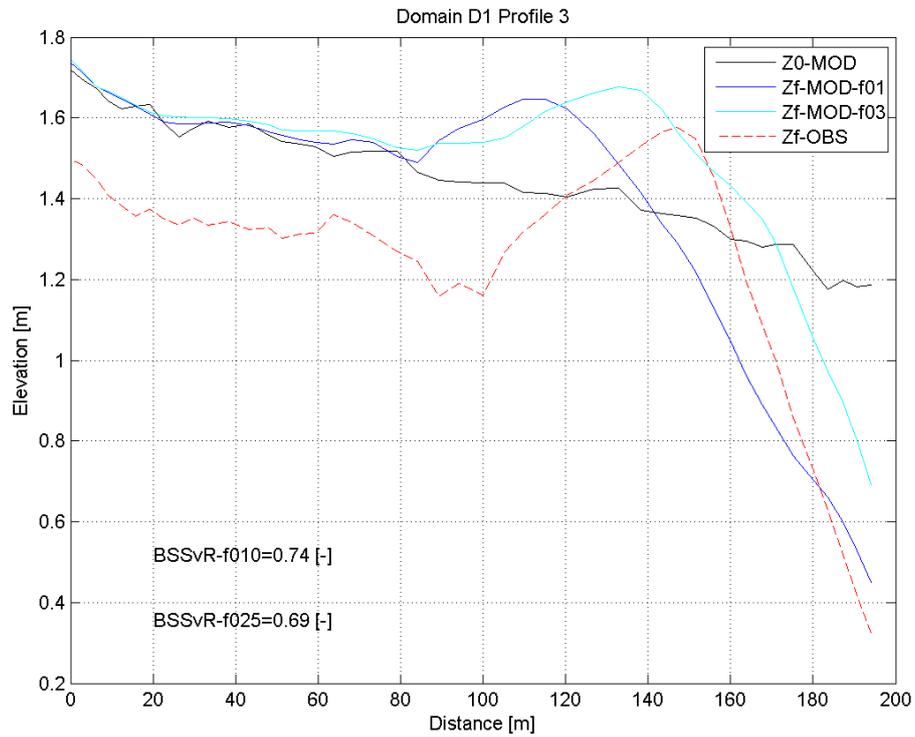


Figura 74 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR3.

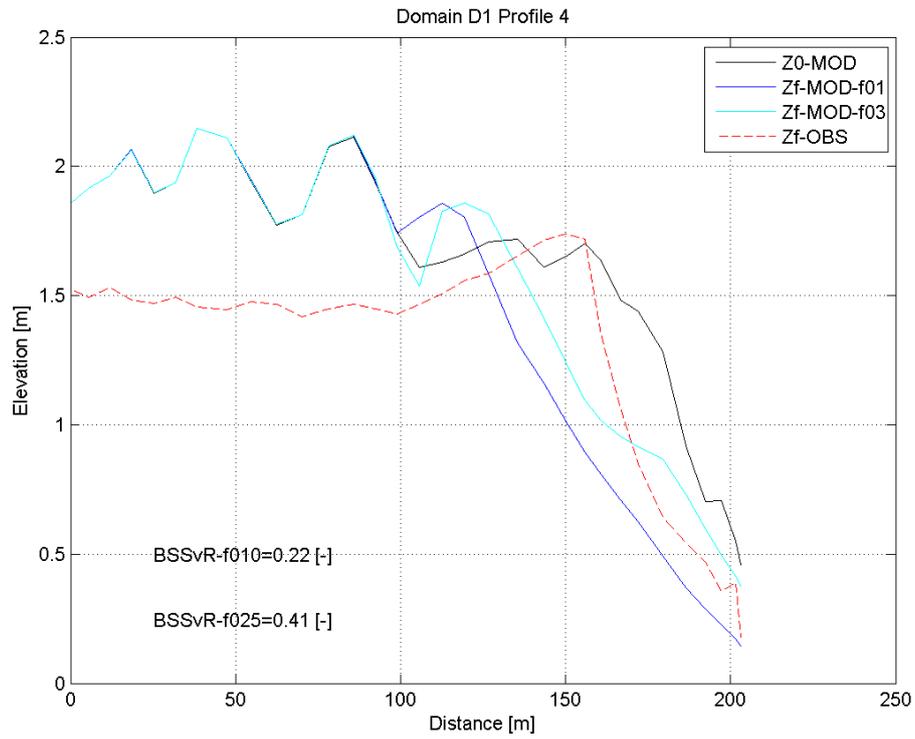


Figura 75 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR4.

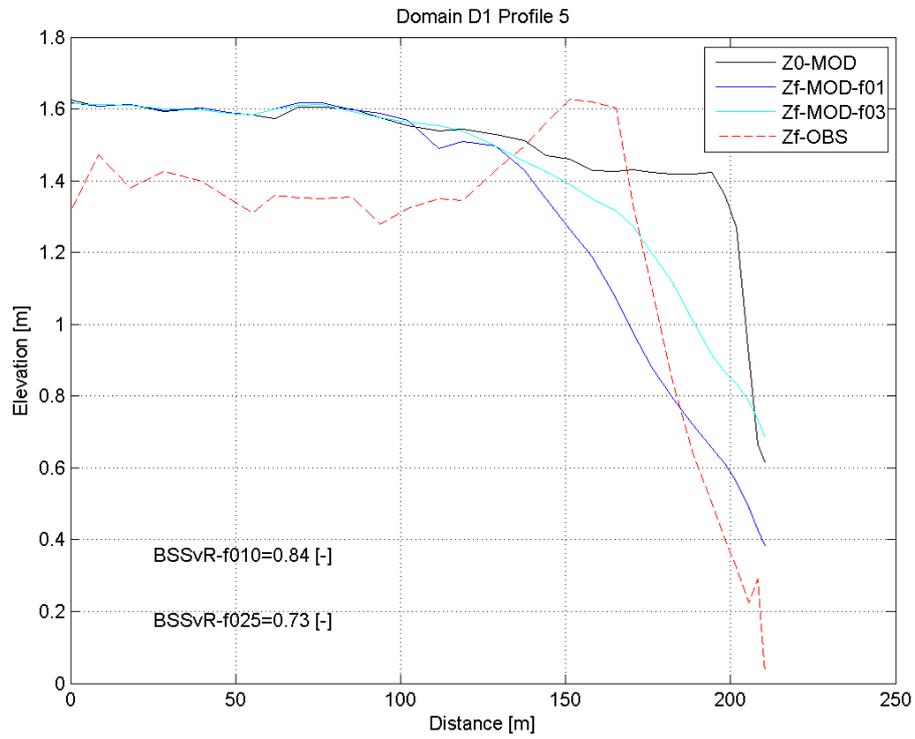


Figura 76 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR5.

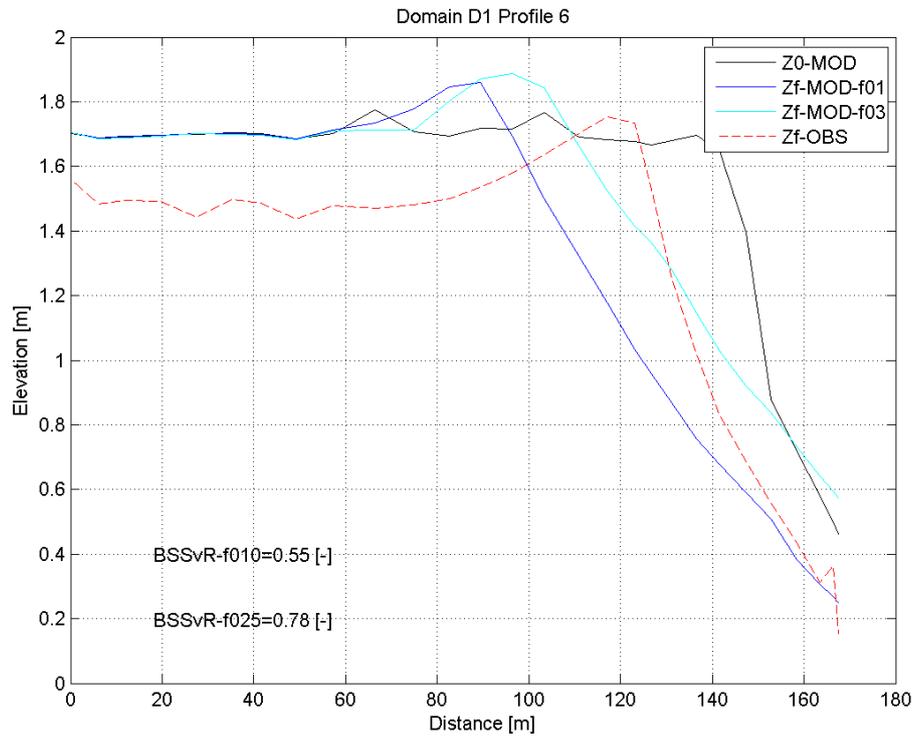


Figura 77 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR6.

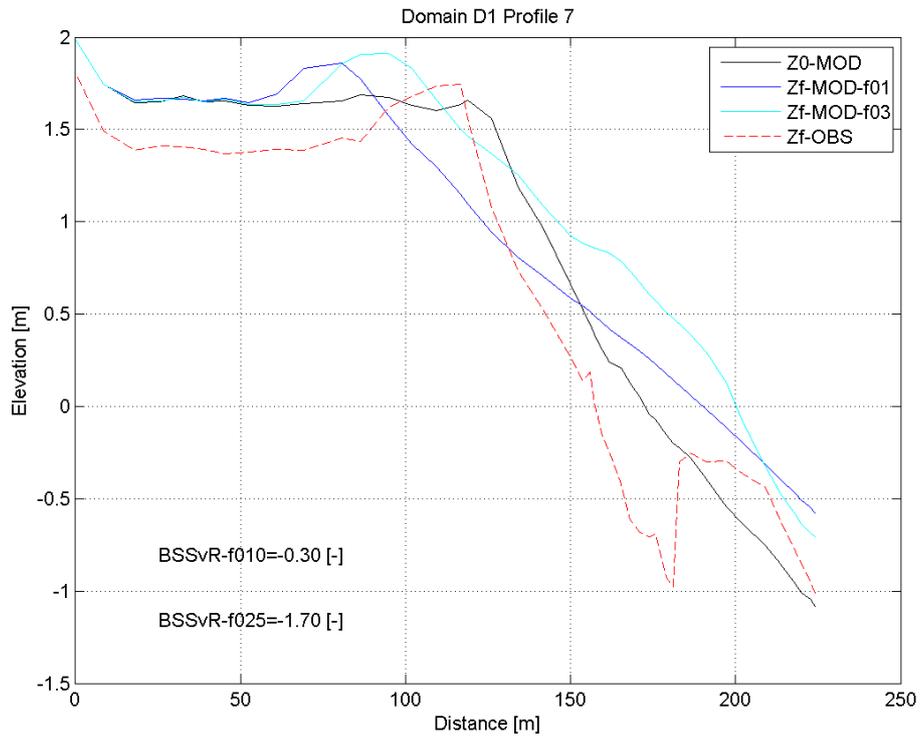


Figura 78 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR7.

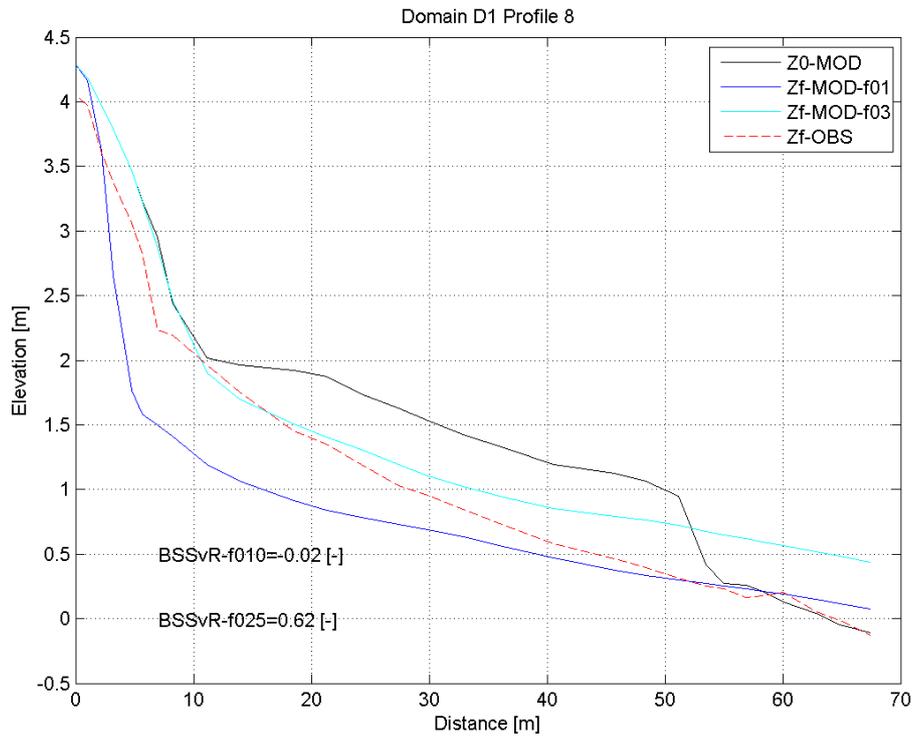


Figura 79 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D1PR8.

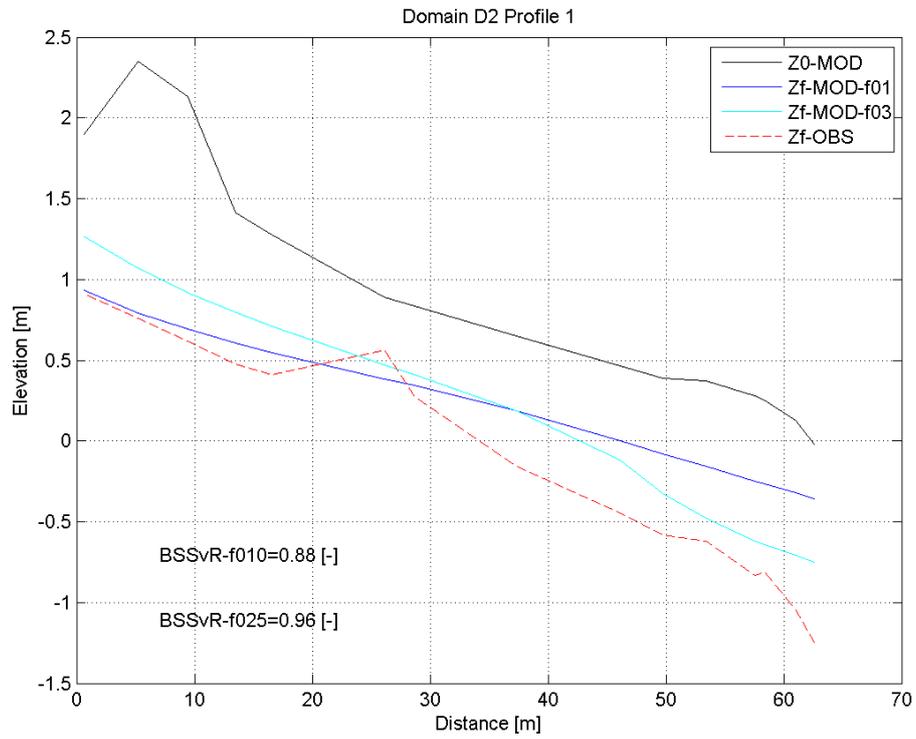


Figura 80 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR1.

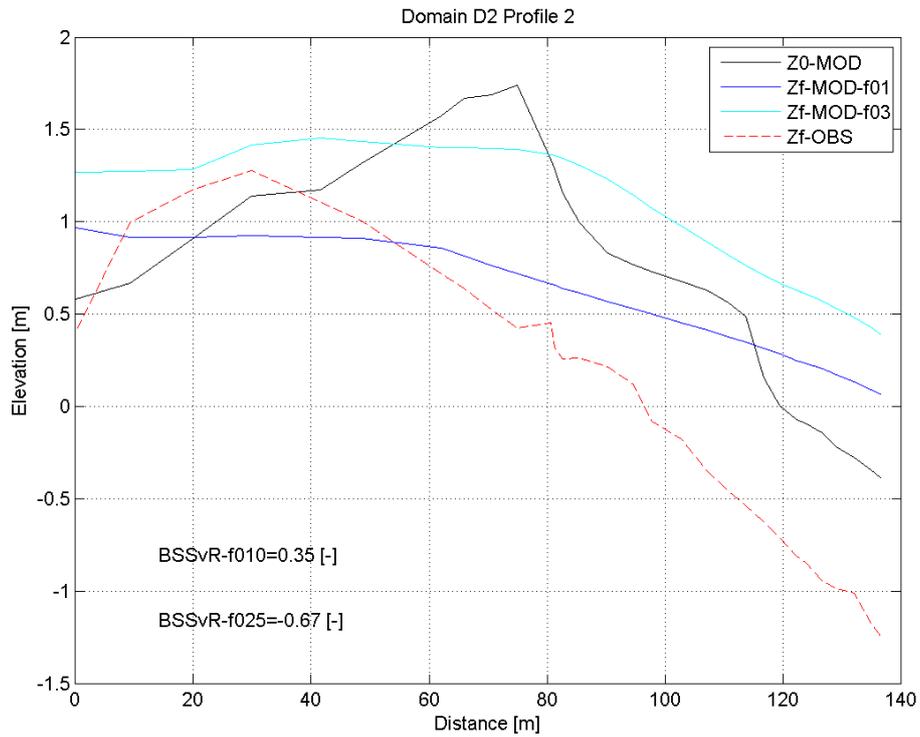


Figura 81 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR2.

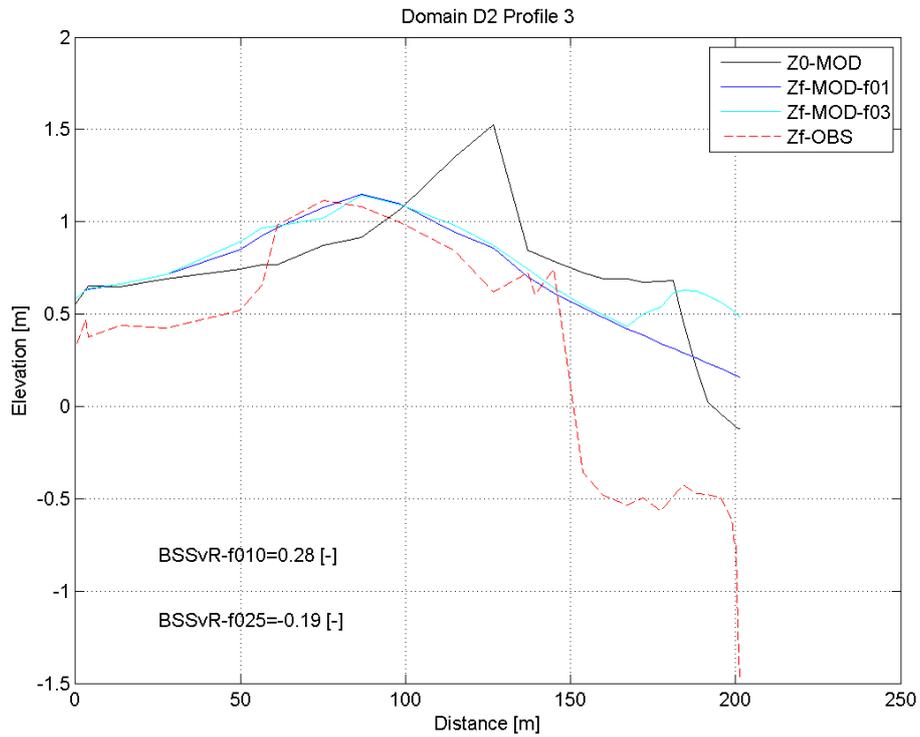


Figura 82 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR3.

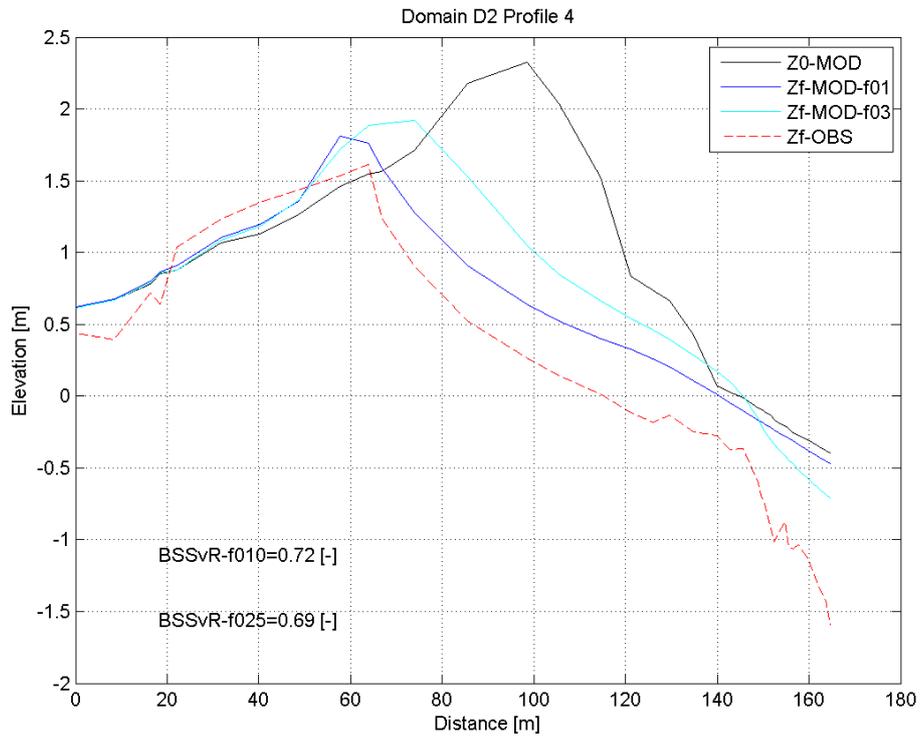


Figura 83 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR4.

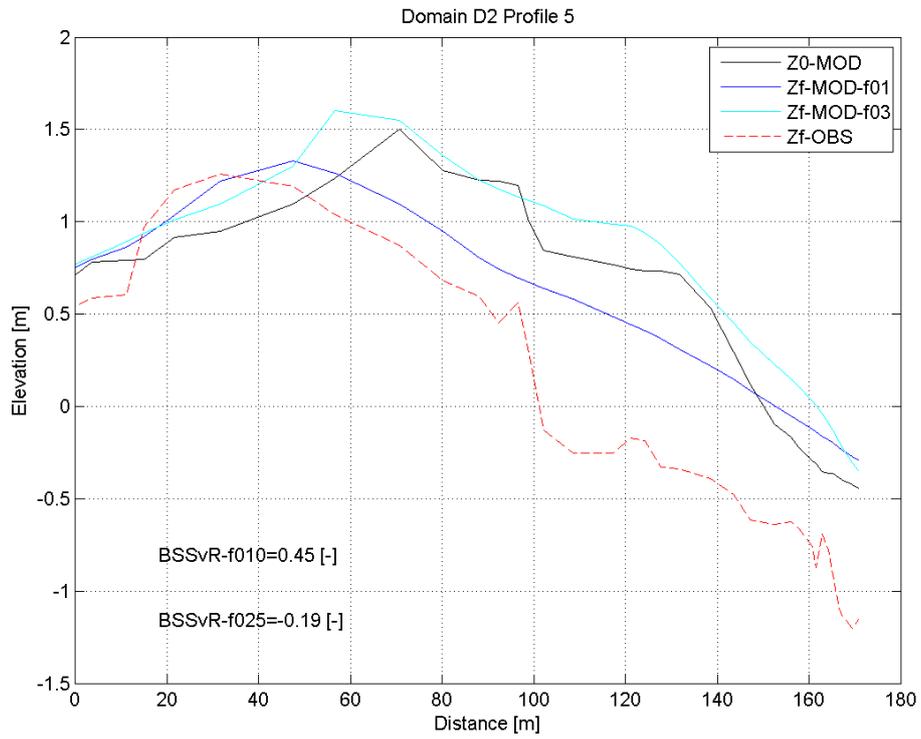


Figura 84 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR5.

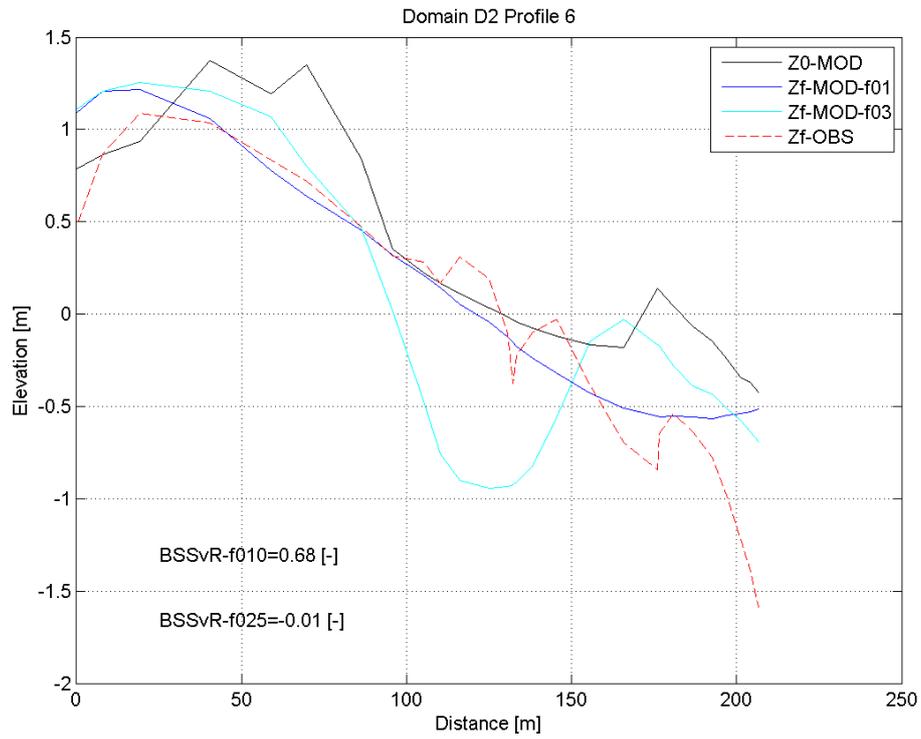


Figura 85 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR6.

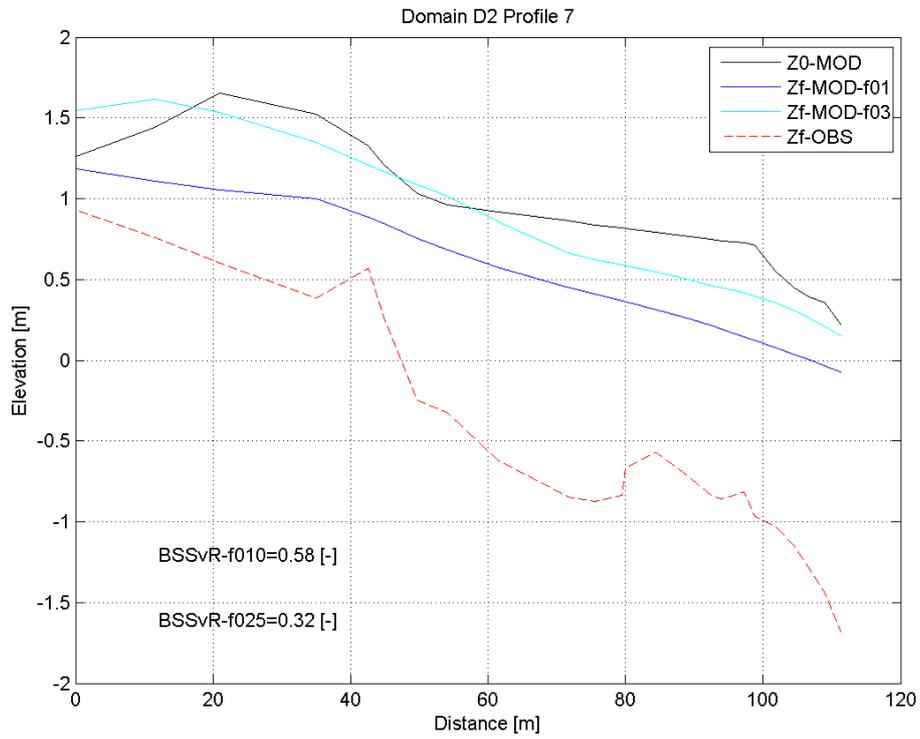


Figura 86 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR7.

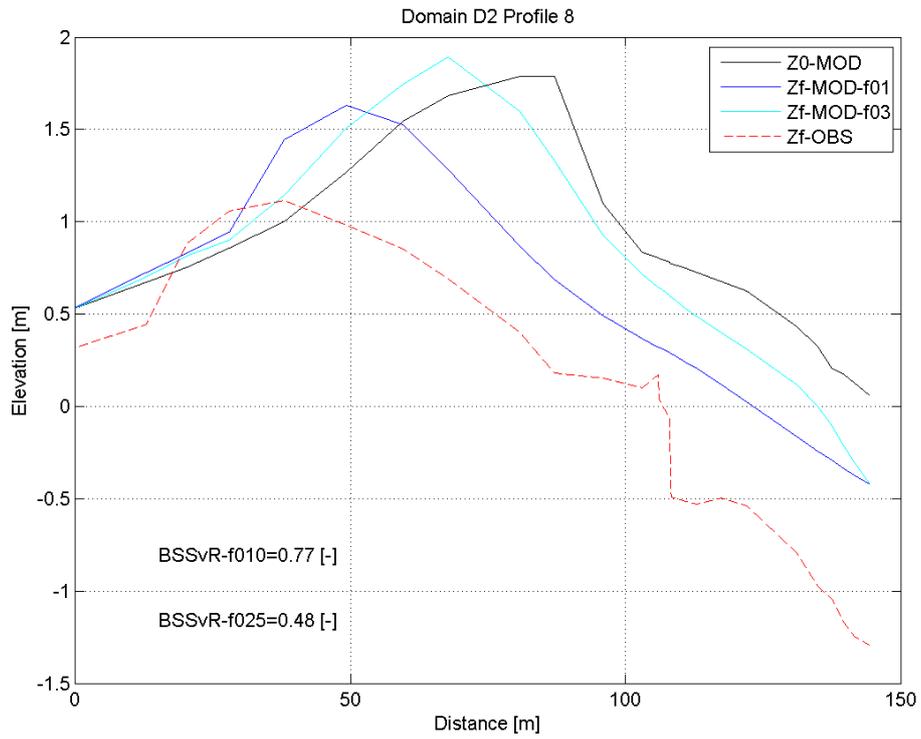


Figura 87 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D2PR8.

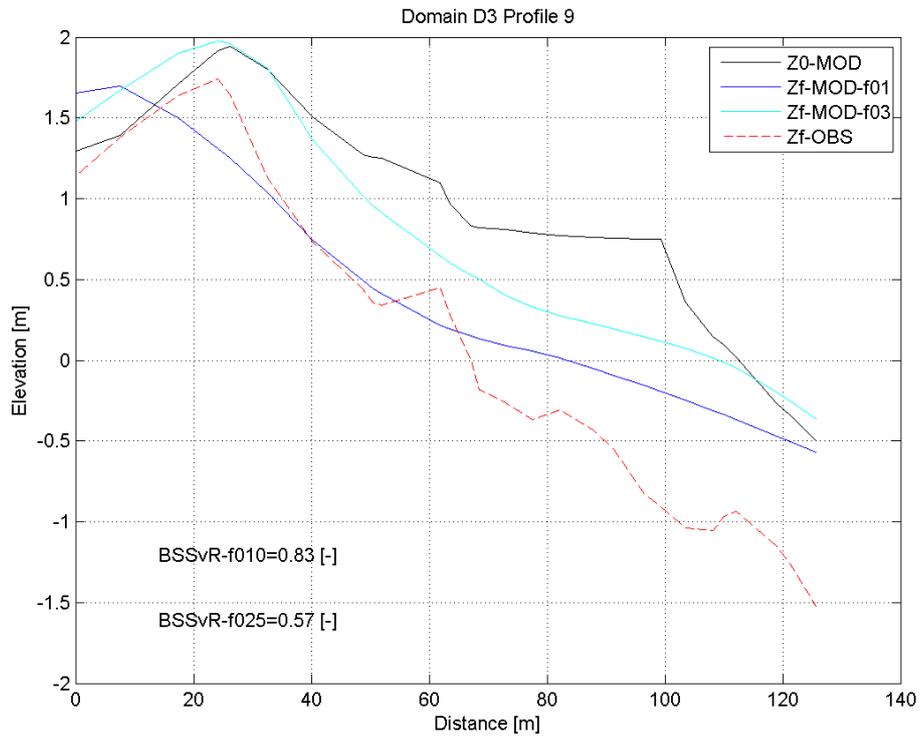


Figura 88 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D3PR9.

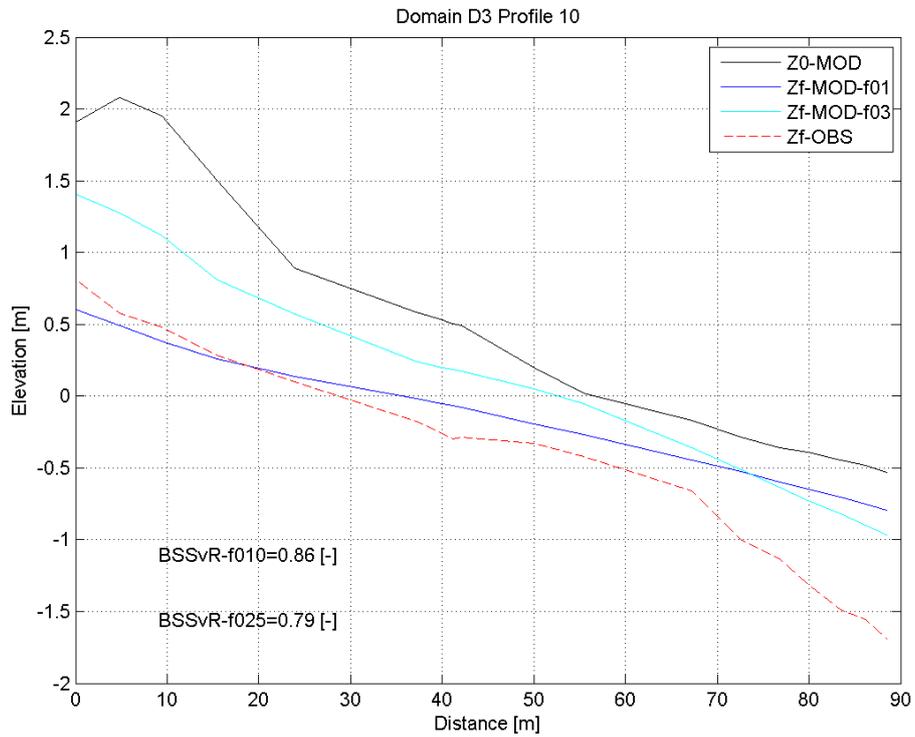


Figura 89 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D3PR10.

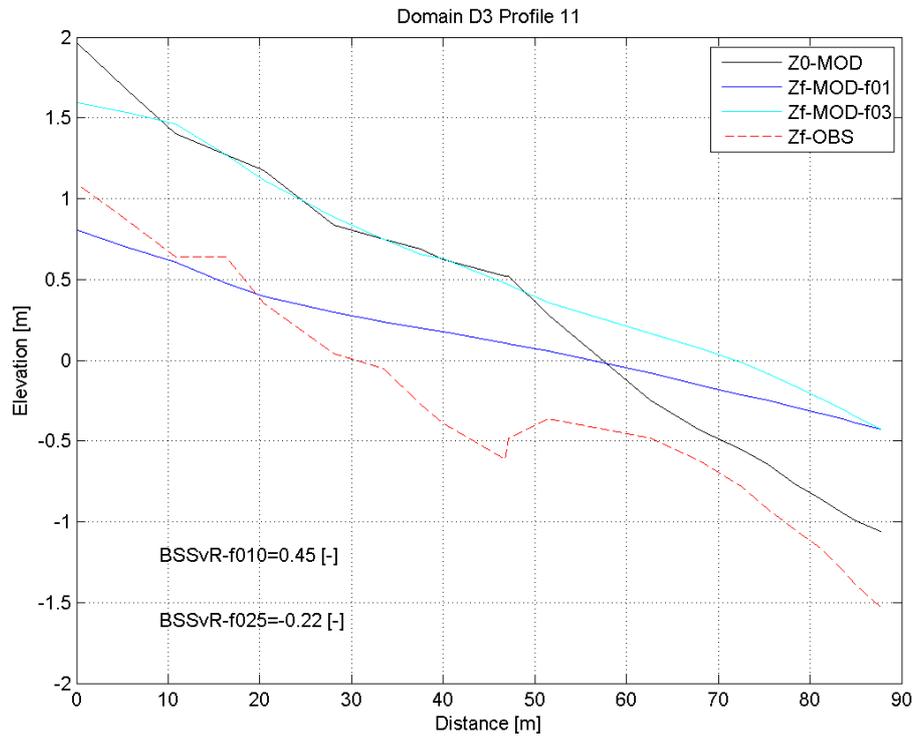


Figura 90 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D3PR11.

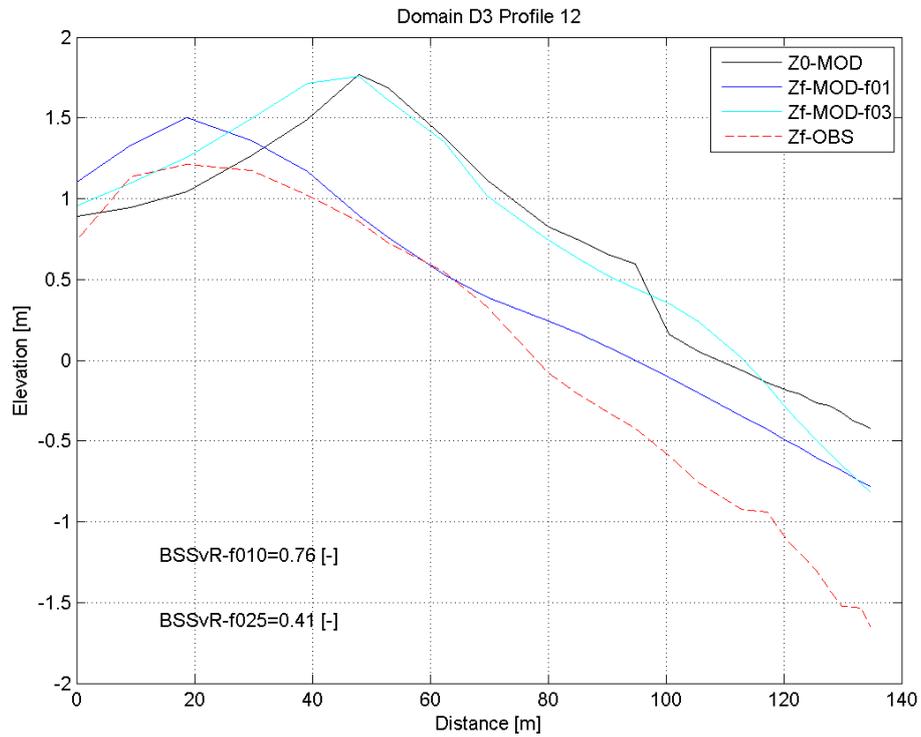


Figura 91 Confronto dei profili finali del SDF settaggio base e modificato con il rilievo Febbraio 2015 - Profilo D3PR12.

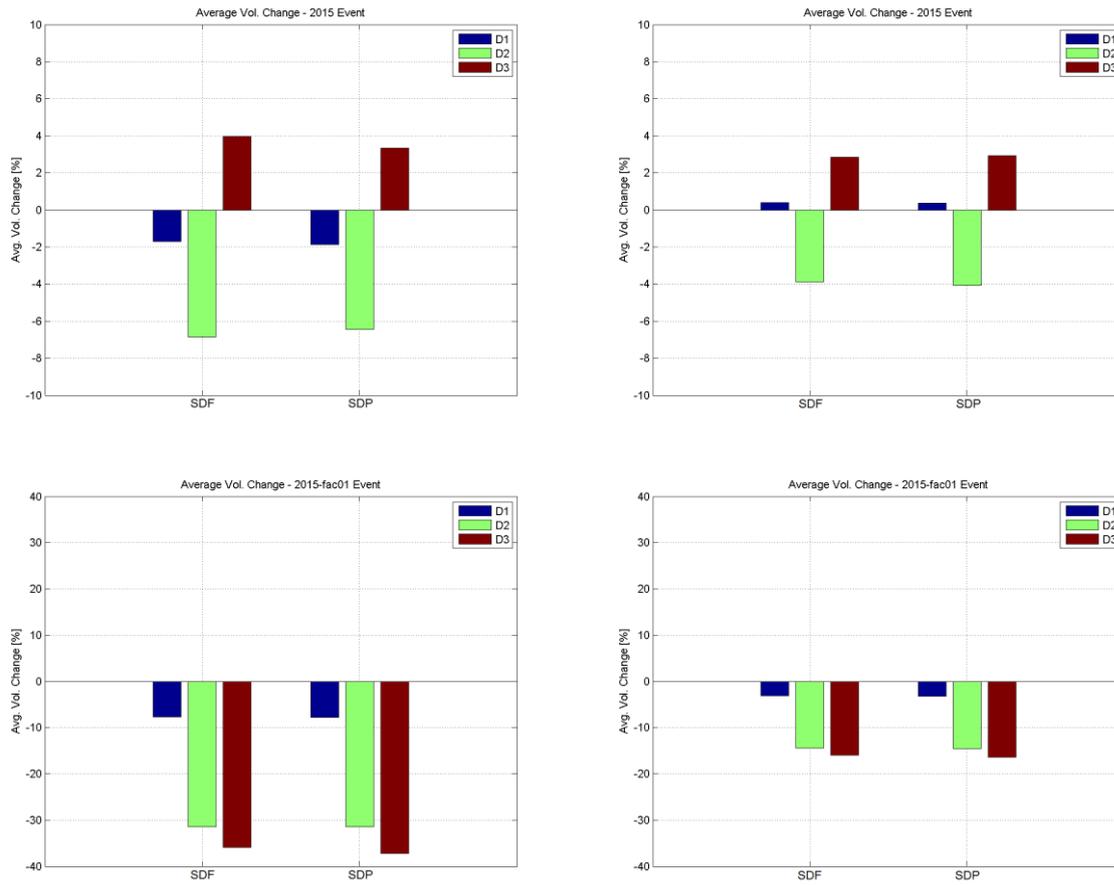


Figura 92 Confronto delle variazioni volumetriche: in alto i dati relativi al settaggio base; in basso quelli relativi al settaggio modificato; la colonna di sinistra mostra i risultati relativi al profilo emerso fino a 0 m s.l.m.; quella di destra i dati relativi al profilo semi-sommerso, fino a 1 m di profondità.

## 6. Conclusioni

Dall'analisi dell'aggiornamento dei profili topobatimetrici si evidenzia che dopo la mareggiata del 5 febbraio 2015 vi è stata un'accelerazione nel trasferimento dei volumi di sedimento dalla spiaggia al retro spiaggia tramite deposito di ventagli di overwash che progrediscono all'interno delle zone umide retrostanti. Tale tendenza si propaga dalla zona a sud del Bagno Jamaica (profili 02-03) sino al profilo 09 dove i resti del cordone finale arginano debolmente il processo.

Lo studio effettuato sulla variazione dell'uso del suolo del territorio costiero conferma che tra il 2008 ed il 2010 le zone antropizzate sono rimaste pressoché invariate. Si nota invece una perdita di vasti tratti del cordone di dune, che ormai è solo presente in forma discontinua in prossimità della foce del fiume Reno. Sulla foce si nota come la freccia litorale, che era già in una fase di erosione avanzata nel 2008, nel 2010 era pressoché scomparsa.

Le analisi numeriche, svolte con il codice di calcolo Xbeach, hanno evidenziato che:

- la subsidenza indotta dai pozzi di Dosso e Agosta, calcolata al 2030 considerando i dati dello scenario peggiore fornito da Eni ( $\leq 2$  cm sul dominio costiero), hanno effetti trascurabili sulle aree inondate relative alle mareggiate simulate del 2012, 2013 e 2015;
- la stessa, ha impatti trascurabili sulle variazioni volumetriche indotte dalle mareggiate simulate.

Sono state svolte analisi aggiuntive per la caratterizzazione dell'affidabilità dei risultati del modello numerico. Tali analisi hanno portato alle seguenti conclusioni:

- il confronto dello stato topo-batimetrico iniziale delle griglie dei domini di calcolo, basate sul DEM prodotto durante l'Attività 3.3, ed il rilievo topografico a profili del 16 Ottobre 2014, ha evidenziato limitazioni nella rappresentatività della condizione iniziale reale per la spiaggia sommersa a fine 2014, dovute principalmente alla fusione dei dataset topo-batimetrici di anni diversi (topografia a fine 2014 e batimetria nearshore al 2012);
- l'analisi di sensitività del modello rispetto al parametro di trasporto relativo alla forma delle onde (facua) svolte per lo SDF della mareggiata di Febbraio 2015, effettuata confrontando i risultati dei modelli dei tre domini (D1, D2 e D3) con il rilievo post-evento delle settimane successive all'evento, ha mostrato che:
  - il settaggio base del modello è ragionevolmente affidabile per il dominio D1, che copre le spiagge di Lido degli Estensi e Lido di Spina, caratterizzate dalla presenza di numerose concessioni e afflussi turistici;

- lo stesso settaggio risulta meno rappresentativo per le spiagge dei domini D2 e D3 che comprendono principalmente la zona naturale della Riserva di Bellocchio e per i quali si consiglia l'utilizzo del settaggio modificato per eventuali studi futuri;
- le considerazioni precedenti non influiscono sulle conclusioni relative alle differenze tra SDF ed SDP, le cui differenze risultano trascurabili e imputabili alla sensibilità numerica del codice.

Si rammenta che le considerazioni qui presentate sul basso impatto previsto, sia dal punto di vista delle inondazioni marine, che della perdita volumetrica in condizioni di mareggiata, sono fortemente condizionate dalle politiche di gestione della fascia costiera che verranno portate avanti nel tempo dagli enti preposti.

Il dominio D1, che comprende zone urbanizzate e concessioni balneari, continuerà presumibilmente ad essere soggetto alla politica gestionale attuale, caratterizzata da frequenti ripascimenti. Possibili interventi di protezione nel periodo invernale tramite la costruzione di argini invernali sulla spiaggia, localmente noti come "dune invernali" e non considerati in questo studio, potrebbero alterare la risposta alle mareggiate, addirittura abbassando o annullando l'impatto previsto. Assumendo questo, la previsione dell'impatto della subsidenza indotta genera, in maniera abbastanza affidabile, un effetto trascurabile.

I domini D2 e D3, aldilà della difficoltà nell'ottimizzare il settaggio del codice, presentano sí impatti previsti molto ridotti, ma sono condizionati da una serie di fattori incogniti che potrebbero essere introdotti da un cambio nelle politiche gestionali, quali ad esempio interventi che cambino le dinamiche del trasporto sedimentario lungocosta, come ad esempio una maggiore dinamicità della foce del Gobbino. Rimane infine incognito come l'ormai esaurita riserva sedimentaria della freccia litorale del Reno potrà essere nel tempo rimpiazzata da un'eventuale riattivazione del trasporto solido al fondo da parte del fiume.

## 7. Bibliografia

- Armaroli C., Ciavola P., Perini L., Calabrese L., Lorito S., Valentini A., Masina M., Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 143-144, 34-51, 2012.
- Armaroli C., Grottoli E., Harley M.D., Ciavola P., Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 199, 22-35, 2013.
- Chaudhry, M. H., Open-channel flow. Springer Science & Business Media, 2007.
- Chow, V., Open-channel hydraulics. McGraw-Hill Book Co. New York, 1959
- Ciavola P., Ferreira O., Haerens P., van Koningsveld M., Armaroli C., Lequeux Q., Storm impacts along European coastlines. Part 2: lessons learned from the MICORE project. *Environmental Science and Policy* 14, 924-933, 2011.
- Deserti M., Perini L., Lorito S. (2011). Il clima meteo-marino del bacino adriatico nel settore emiliano romagnolo. Relazione di attività del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, 19 pp.
- Harley M.D., Armaroli C., Ciavola P., Evaluation of Xbeach predictions for a real-time warning system in Emilia-Romagna, Northern Italy. *Journal of Coastal Research* SI 64, 1861-1865, 2011.
- Nordstrom K.F., Armaroli C., Jackson N.L., Ciavola P., Opportunities and constraints for managed retreat on exposed sandy shores: Examples from Emilia-Romagna, Italy. *Ocean & Coastal Management* 104, 11-21, 2015.
- Perini, L., Calabrese, L., Salerno, G., Ciavola, P., & Armaroli, C. (2016). Evaluation of coastal vulnerability to flooding: comparison of two different methodologies adopted by the Emilia-Romagna region (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(1), 181-194
- Roelvink D., Reniers A., A guide to modeling coastal morphology. *World Scientific Publishing Co.*, 274 pp., 2012.
- Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R., Lescinski J., Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56, 1133-1152, 2009.
- Van Rijn, L.C, Walstra, D.J.R, Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., Sierra, J.P., The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and

seasons using process-based Profile models, Coastal Engineering, Volume 47, Issue 3, January 2003, Pages 295-327, ISSN 0378-3839, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5).