

## FIUME PO

# SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA PER LA NAVIGAZIONE CON IMBARCAZIONI DI CLASSE Va NEL TRATTO CASTELMASSA - STIENTA

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE, DEI LAVORI DI "ADEGUAMENTO DELLE CONDIZIONI DI NAVIGABILITÀ DELL'ALVEO DI MAGRA DEL FIUME PO PER NAVI DI CLASSE Va - TRATTO REVERE-FERRARA" FINANZIATO CON LEGGE 413 /98 EMILIA ROMAGNA FE-E-7-N.I. - CUP I81E06000010002 - CIG 68067557EA

*Progetto Definitivo*

Direttore Generale  
Resp. del procedimento  
Direttore operativo

Ing. Luigi Mille  
Ing. Ivano Galvani  
Ing. Ettore Alberani

Oggetto: RELAZIONE IDROLOGICO - IDRAULICA

D.03

02 Revisione

01 Revisione

00 Emissione

Dicembre 2018

Progetto R.T.I.:

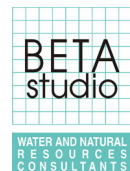
Capogruppo mandataria:

Binini Partners S.r.l.  
via Gazzata,4 tel +39.0522.580.578  
42121 Reggio Emilia C.F. e P.IVA e R.I. 02409150352



**binini**partners

Mandanti:



## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>2</b>
<b>2. CARATTERISTICHE IDROLOGICHE, IDRAULICHE E MORFOLOGICHE DEL FIUME PO .....</b>	<b>3</b>
2.1. PREMESSA .....	3
2.2. CARATTERISTICHE IDROLOGICO-IDRAULICHE DEL TRATTO OGGETTO DEL PRESENTE PROGETTO .....	3
2.3. ANALISI DELLE TENDENZE EVOLUTIVE DEL FONDO ALVEO.....	6
2.4. CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE DEL TRATTO IN STUDIO E TENDENZE EVOLUTIVE IN ATTO RELATIVAMENTE ALLE FORME DI FONDO (BARRE E SPONDE).....	7
2.5. BILANCIO DEL TRASPORTO SOLIDO AL FONDO .....	18
2.6. ANALISI DEI BASSI FONDALI ALLO STATO ATTUALE .....	20
<b>3. MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE A FONDO MOBILE DELL'ASSETTO DI PROGETTO .....</b>	<b>28</b>
3.1. OBIETTIVI DELLA MODELLAZIONE .....	28
3.2. IL MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE A FONDO MOBILE .....	28
3.2.1. <i>Il codice di calcolo MIKE 21C</i> .....	28
3.2.2. <i>La griglia curvilinea e la batimetria</i> .....	31
3.3. DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO E DEI PARAMETRI DI CALCOLO .....	32
3.3.1. <i>Condizioni a contorno idrologiche</i> .....	32
3.3.2. <i>Scabrezza</i> .....	34
3.3.3. <i>Opzioni di calcolo utilizzate e formule di trasporto solido</i> .....	34
3.4. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE A FONDO MOBILE .....	36
3.4.1. <i>Scenario senza nuove opere</i> .....	36
3.4.2. <i>Scenario con opere come da progetto preliminare</i> .....	37
3.4.3. <i>Scenario completo individuato nel progetto definitivo</i> .....	39
3.4.4. <i>Scenario parziale individuato nel progetto definitivo</i> .....	44

R.T.P:

## 1. PREMESSA

Con contratto Rep. N. 4187 del 20 febbraio 2018, l'AIPO, Agenzia Interregionale per il fiume Po, ha affidato all'R.T.I. di progettazione composta da Binini Partners s.r.l. (Capogruppo mandataria), Etatec-Studio Paoletti s.r.l. (mandante), Beta Studio s.r.l. (mandante), Gen-Tech Tecnologie innovative in biologia Animale s.r.l. (mandante) e AR/S Archeosistemi Soc. Coop. (mandante), l'appalto per il "Servizio di progettazione definitiva, esecutiva e coordinamento della sicurezza in fase di progettazione, dei lavori di adeguamento delle condizioni di navigabilità dell'alveo di magra del fiume Po per navi di classe Va nel tratto compreso indicativamente fra Revere e Ferrara".

L'appalto in oggetto rientra nell'ambito dei lavori condotti da A.I.Po per la sistemazione del fiume Po aventi la finalità di garantire le condizioni idraulico-geometriche necessarie alla navigazione delle imbarcazioni commerciali della classe Va secondo la classificazione Europea per le vie navigabili.

Il progetto di sistemazione del Po così detto a corrente libera ha come scopo quello della sistemazione dell'alveo di magra con finalità congiunte di difesa idraulica e di miglioramento delle condizioni di navigabilità.

Per quel che riguarda i bassi fondali e la necessità di garantire la navigazione, a valle di foce Mincio, in particolare nel tronco fino a Pontelagoscuro, lungo 70 km, l'alveo del fiume si presenta generalmente stretto e tale da non consentire al canale attivo divagazioni.

Le opere di sistemazione a corrente libera del fiume Po oggetto della progettazione sono dettagliatamente descritte nella Relazione Generale e negli elaborati grafici "Opere di navigazione".

Il presente Elaborato costituisce la Relazione Idrologico – Idraulica del Progetto Definitivo e si articola nelle seguenti parti:

- caratteristiche idrologiche, idrauliche e morfologiche del Fiume Po;
- descrizione delle elaborazioni modellistiche e dei risultati ottenuti a supporto della progettazione.

R.T.P.:



## 2. CARATTERISTICHE IDROLOGICHE, IDRAULICHE E MORFOLOGICHE DEL FIUME PO

### 2.1. Premessa

Nel presente capitolo vengono riportate le principali caratteristiche idrologiche, idrauliche e morfologiche del fiume Po, con particolare riferimento al tratto oggetto del presente progetto definitivo, compreso tra Castelmassa e Stienta, desunte dagli studi effettuati dall'Autorità di bacino del fiume Po e dagli annali idrologici.

### 2.2. Caratteristiche idrologico-idrauliche del tratto oggetto del presente progetto

Il tratto di fiume Po oggetto del presente progetto è interessato da valori di portate medie annue prossime a 1'500 m<sup>3</sup>/s.

I valori delle portate medie annue lungo l'asta del Po in corrispondenza degli idrometri ufficiali posti internamente o in prossimità del tratto in oggetto sono i seguenti:

- Po a Sermide (superficie del bacino idrografico sotteso pari a 68'724 km<sup>2</sup>): 1'420 m<sup>3</sup>/s;
- Po a Ficarolo: 1'550 m<sup>3</sup>/s;
- Po a Pontelagoscuro (superficie del bacino idrografico sotteso pari a 70'091 km<sup>2</sup>): 1'500 m<sup>3</sup>/s.

Le figure successive riportano le curve di durata delle portate del fiume Po nelle suddette sezioni, ricavate dagli annali idrologici.

R.T.P.:

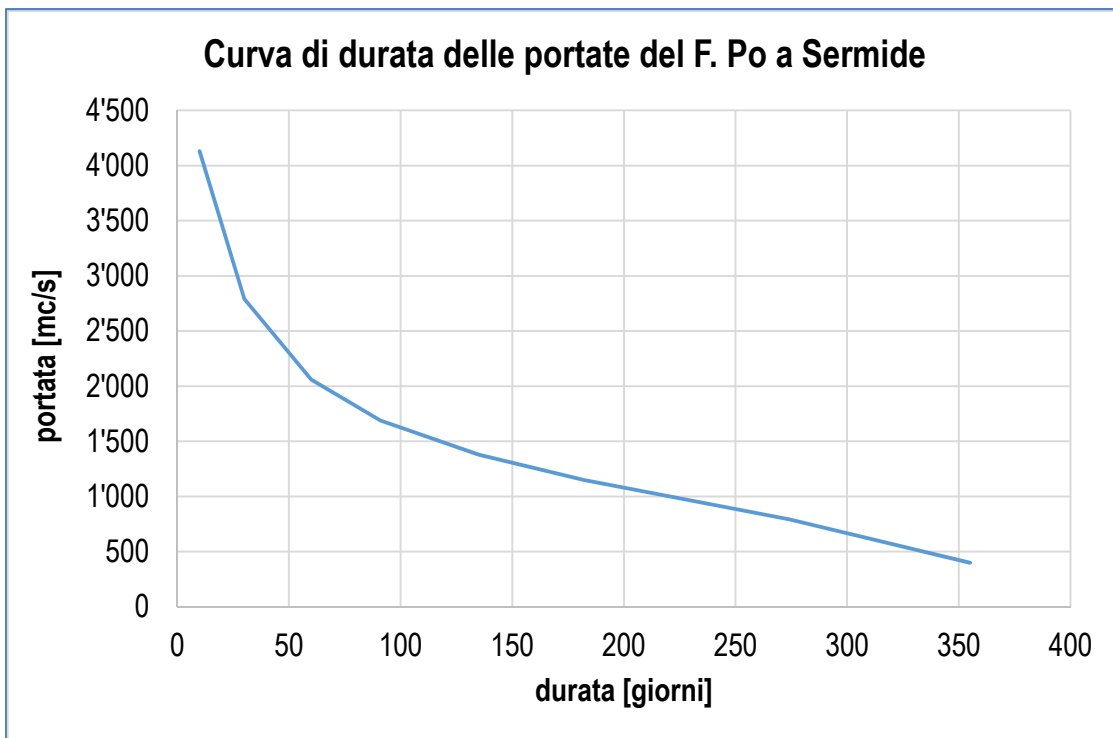


Figura 1 – Curva di durata delle portate del fiume Po a Sermide (1994-2015)

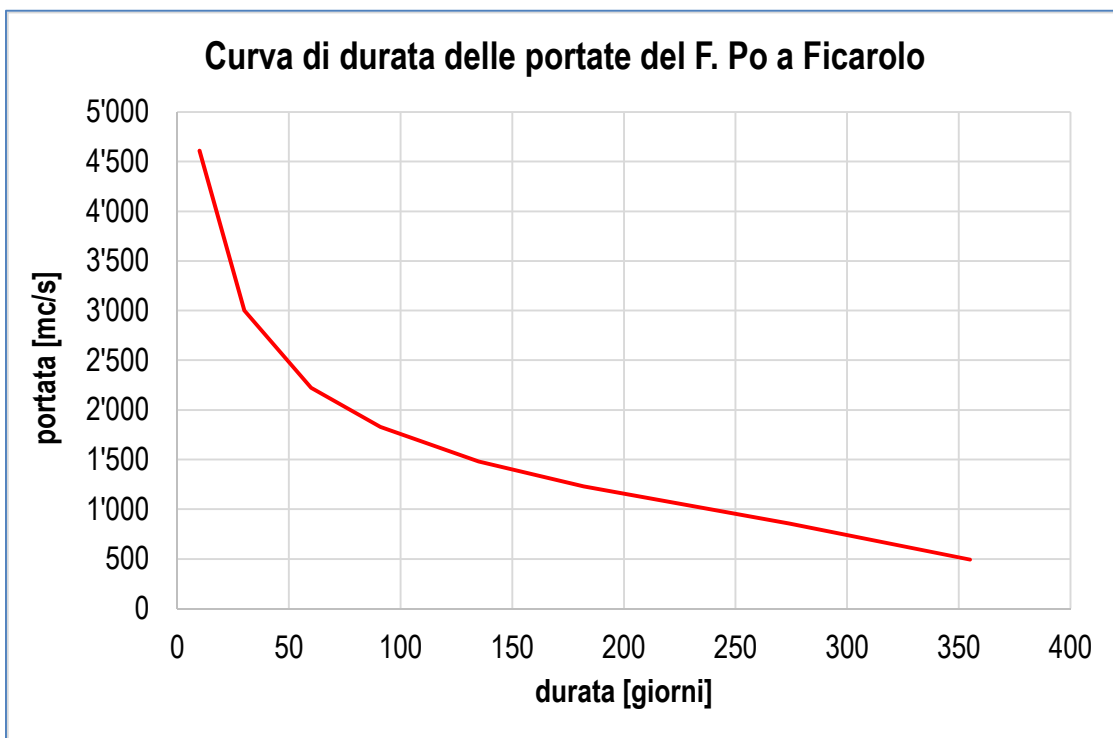


Figura 2 – Curva di durata delle portate del fiume Po a Ficarolo (1992-2015)

R.T.P.:

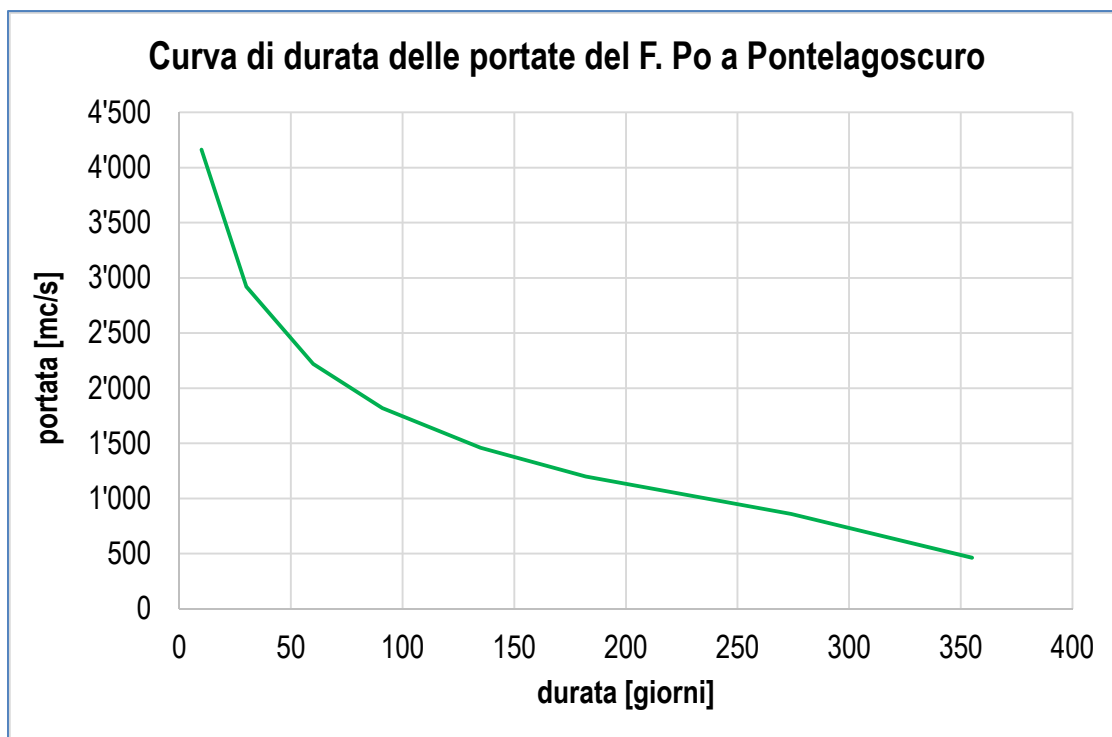


Figura 3 – Curva di durata delle portate del fiume Po a Pontelagoscuro (1923-2015)

Per quanto riguarda, invece, le portate di piena, di seguito si riportano i valori delle portate al colmo per alcuni valori del tempo di ritorno, così come riportate nel PGRA (Piano di Gestione del Rischio Alluvioni). In particolare si evidenzia che la portata di piena dell'evento duecentennale per il tratto in oggetto è di circa 13'000 m<sup>3</sup>/s.

Tab. 4.2: portate di piena per il Po nel tratto da Isola Sant'Antonio (confluenza Tanaro) al Delta

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km <sup>2</sup>	Q20 m <sup>3</sup> /s	Q ott 2000 m <sup>3</sup> /s	Q200 m <sup>3</sup> /s	Q500 m <sup>3</sup> /s	Idrometro Denominazione
		Progr. (km)	Cod.	Denomin.						
Po	Po	264.855	82	Becca	36770	9290	-	13600	15050	Po a Becca
Po	Po	322.250	67	Piacenza	42030	8970	12240	13000	14100	Po a Piacenza
Po	Po	367.640	57	Cremona	50726	10090	-	14300	15870	Po a Cremona
Po	Po	428.545	41	Boretto	55183	9380	11800	13700	14720	Po a Boretto
Po	Po	457.560	36	Borgoforte	62450	9600	11800	13100	14890	Po a Borgoforte
Po	Po	548.805	10	Pontelagoscuro	70091	9470	-	13000	14650	Po a Pontelagoscuro

Figura 4 – Portate di piena del fiume Po (PGRA)

R.T.P:

### 2.3. Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo

L'analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo è stata effettuata nell'ambito degli studi condotti per conto dell'Autorità di bacino del fiume Po utilizzando i rilievi topografici condotti da AIPO in diversi periodi.

Confrontando tra loro le sezioni rilevate negli stessi punti, in anni differenti, è stato possibile analizzare le dinamiche evolutive in atto nel fondo alveo.

Per determinare le linee evolutive che hanno caratterizzato l'evoluzione del fondo alveo lungo il corso del fiume Po, è stata applicata una metodologia basata essenzialmente sul confronto tra i profili di pelo libero di magra in diverse epoche. Questi profili conducono ad una rappresentazione idraulica piuttosto rappresentativa per lo scopo di cui sopra, dal momento che il pelo libero si dispone sempre al di sopra delle diverse irregolarità del fondo e con quote idriche sempre decrescenti verso valle. Per ogni campagna di rilievo si è determinato il profilo di pelo libero associato ad una portata ridotta (100 m<sup>3</sup>/s), ottenuto attraverso un modello di calcolo idrodinamico a fondo fisso del fiume Po (modulo HD del codice di calcolo MIKE 11 del DHI), implementato con le sezioni ricavate dai rilievi AIPO. I profili così individuati sono stati definiti come "profili di fondo medio", in quanto forniscono l'andamento del pelo libero che si forma in funzione della morfologia media del fondo dell'alveo (Figura 5).

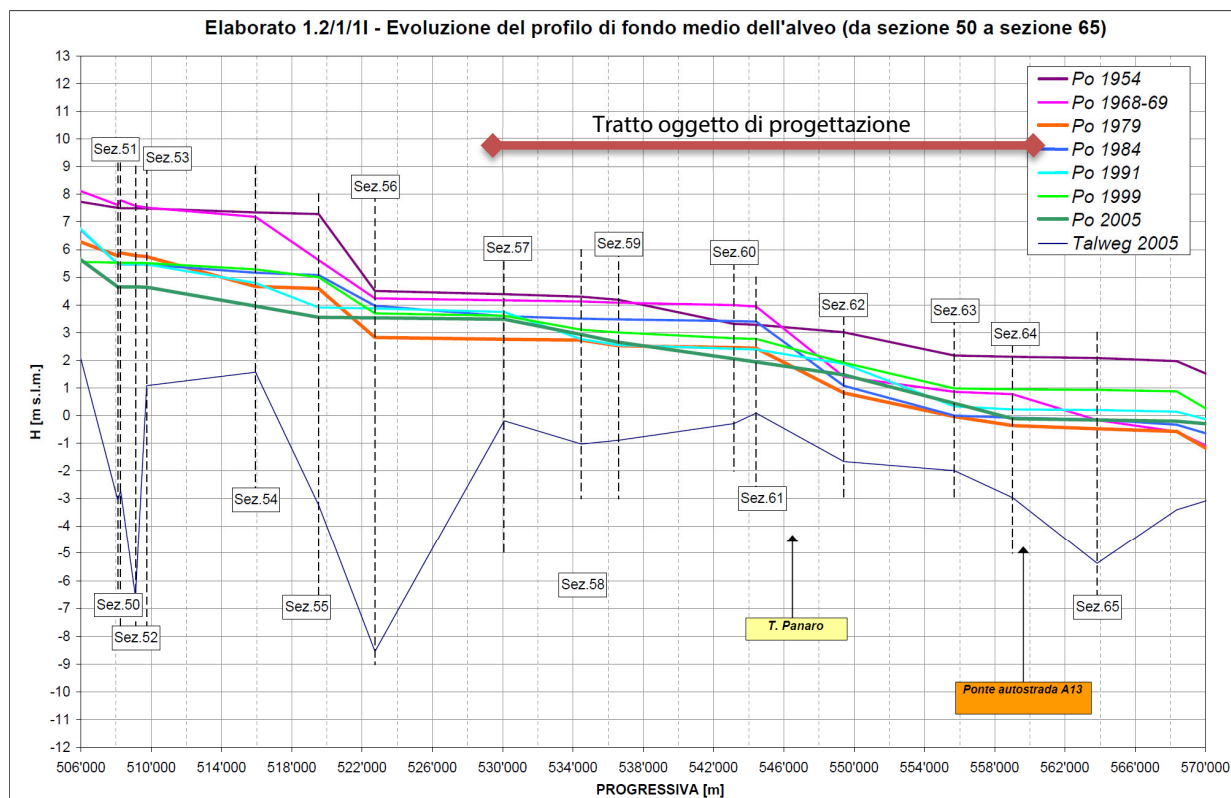


Figura 5 - Profili di fondo medio multitemporali dal 1954 al 2005 (il tratto oggetto del presente progetto è compreso tra le sezioni 57 e 64)

R.T.P:

Dal confronto fra i diversi profili di fondo medio, associati ai diversi passi temporali posti all'interno del periodo di analisi, si è determinata l'evoluzione in atto nel fondo alveo, individuando quindi i tratti che sono soggetti a fenomeni di sovralluvionamento o di erosione, oppure quei tratti che risultano essere sostanzialmente stabili.

Dall'analisi dei profili idraulici ottenuti con la metodologia sopra esposta e riportati nelle figure sottostanti, si deduce che, con riferimento all'intervallo temporale 1979-2005, il tratto oggetto del presente progetto è caratterizzato da condizioni di sostanziale stabilità.

## **2.4. Caratteristiche geomorfologiche del tratto in studio e tendenze evolutive in atto relativamente alle forme di fondo (barre e sponde)**

Nell'ambito dello studio di "Aggiornamento delle analisi morfologiche e del bilancio del trasporto solido dell'asta del fiume Po da confluenza Stura di Lanzo all'incile del delta (periodo 2002 - 2005) e report di valutazione" dell'Autorità di bacino del fiume Po, sono stati effettuati campionamenti ed analisi granulometriche e litologiche dei sedimenti su circa 170 campioni, distribuiti lungo tutto l'alveo. Tali analisi hanno permesso di caratterizzare il sedimento presente lungo il Po con riferimento al fondo alveo, alle barre e alle sponde:

- le forme di fondo (barre) sono costituite prevalentemente da sabbie;
- le sponde sono impostate in depositi sabbiosi molto fini, limosi o in limi sabbiosi (specialmente al piede delle sponde);
- la golena è relativamente ampia e, verso la zona terminale, lievemente pensile.

Lo studio suddetto ha suddiviso l'intero ambito in diversi tratti, dei quali quello che comprende il segmento oggetto del presente progetto si estende dalle confluenze Mincio – Secchia fino a Pontelagoscuro. Tale tratto costituisce la parte di alveo fluviale situato immediatamente a valle del tratto fluviale navigabile "Cremona – foce Mincio" e immediatamente a monte dell'incile del delta. Il corso d'acqua assume progressivamente una configurazione "differenziata" attraverso le seguenti caratteristiche morfologiche:

1. l'alveo di magra tende ad ampliarsi e ad assumere un andamento progressivamente (verso valle) pluricursale, con contestuale formazione di numerose barre longitudinali (isole), alcune delle quali molto estese e persistenti;
2. la presenza locale di pennelli di regimazione ha comportato, nel tempo, la chiusura di alcuni canali laterali "forzando", localmente, una configurazione prevalentemente monocursale;
3. in planimetria l'alveo presenta alternanze di tratti meandrici o sinuosi ad altri rettilinei.

Il bilancio delle forme di fondo (barre e sponde) "erosione – deposito" è positivo (pari a 4.1 Mm<sup>3</sup> nel periodo 1982-2005), ossia le forme di fondo sono complessivamente in erosione, e si inverte il trend di bilancio riscontrato nei tratti precedenti, navigabili, ove il bilancio delle forme di fondo (barre e sponde) è negativo. Si segnala inoltre che il 50% circa del materiale complessivamente eroso dalle sponde e dalle barre, nel periodo 1982-2005, risulta essere stato mobilizzato in condizioni di regime ordinario (32% nel tratto precedente). Considerato che il 57% del volume di erosione è a carico delle forme di fondo (barre),

R.T.P:



tale dato conferma una netta inversione di tendenza rispetto ai tratti precedenti, verso una maggiore sensibilità idraulica in condizioni di regime ordinario, una maggiore dinamicità interna ed una maggiore "naturalità geomorfologica". Le modificazioni delle forme di fondo appaiono infatti condizionate in eguale misura dal regime ordinario e straordinario.

Di seguito si riportano alcuni dettagli relativi all'assetto dell'alveo inciso del fiume Po in diversi periodi e delle modifiche morfologiche che sono intervenute nel corso degli anni, con specifico riferimento alle zone dell'alveo del fiume Po dove sono previste le opere individuate nel seguito della presente relazione. In particolare, per ogni sottotratto, si riportano:

- un estratto della cartografia delle tendenze evolutive in atto nel periodo 1982-2002, redatta nell'ambito del Programma di gestione dei sedimenti del fiume Po;
- analogo estratto relativo al periodo 2002-2005;
- una o due foto aeree (estratte da Google Earth) relative ad anni successivi al 2005.

In ogni immagine sono state inserite anche tutte le opere studiate nell'ambito del presente progetto, al fine di osservare la dinamica evolutiva avvenuta dal 1982 nei pressi delle opere stesse.

R.T.P.:



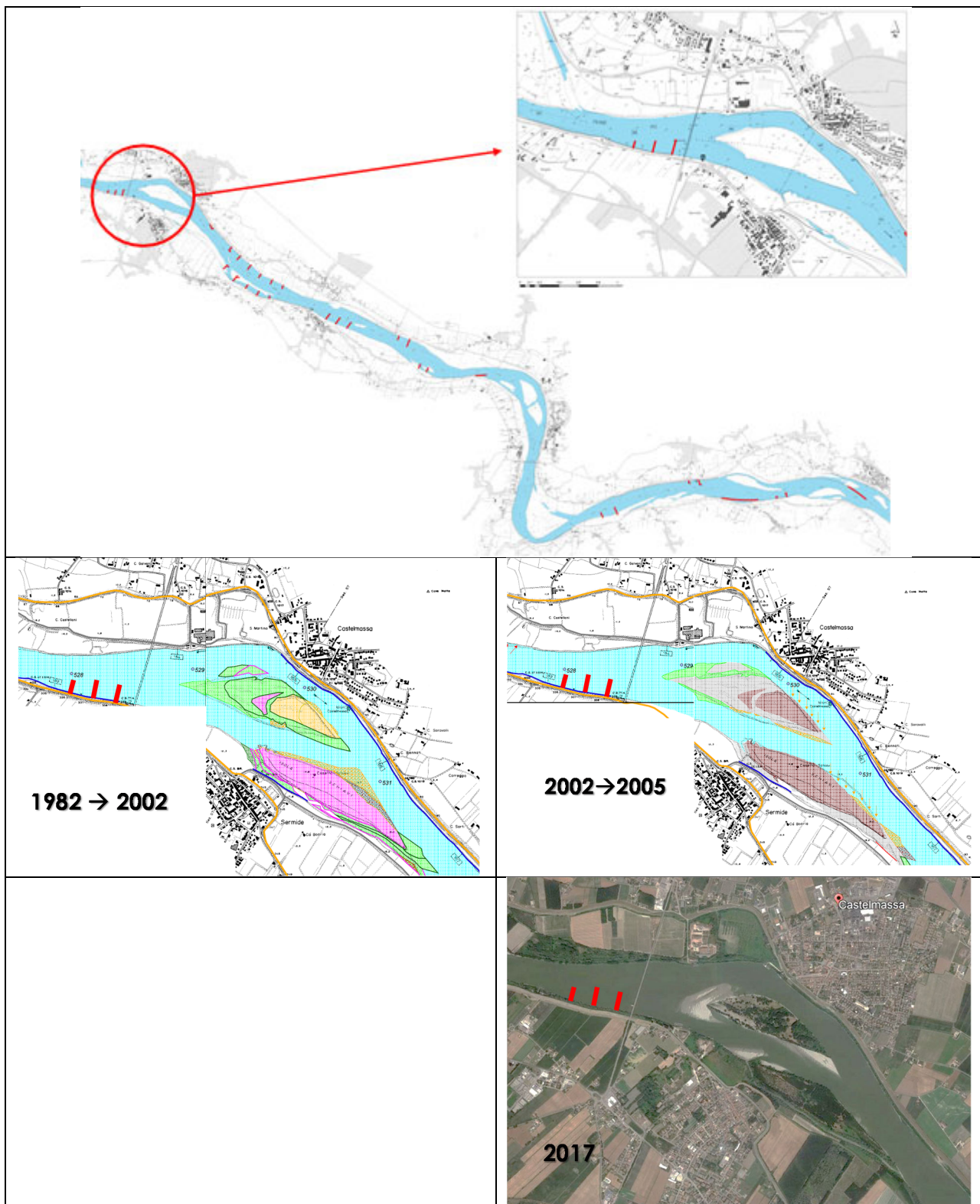


Figura 6 – Analisi tendenze evolutive del tratto nei pressi di Castelmasa

R.T.P:

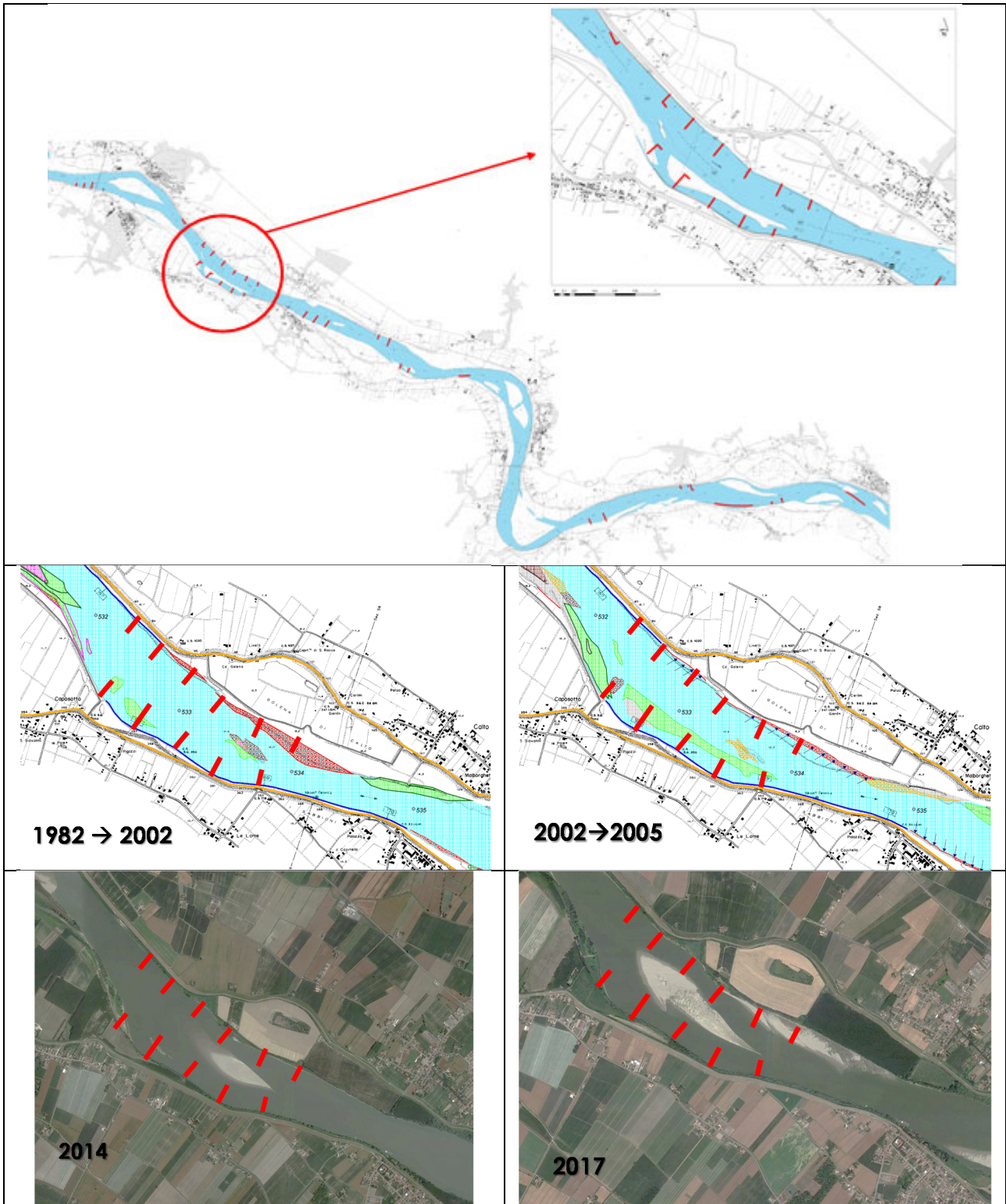


Figura 7 – Analisi tendenze evolutive del tratto a valle di Castelmassa

R.T.P:

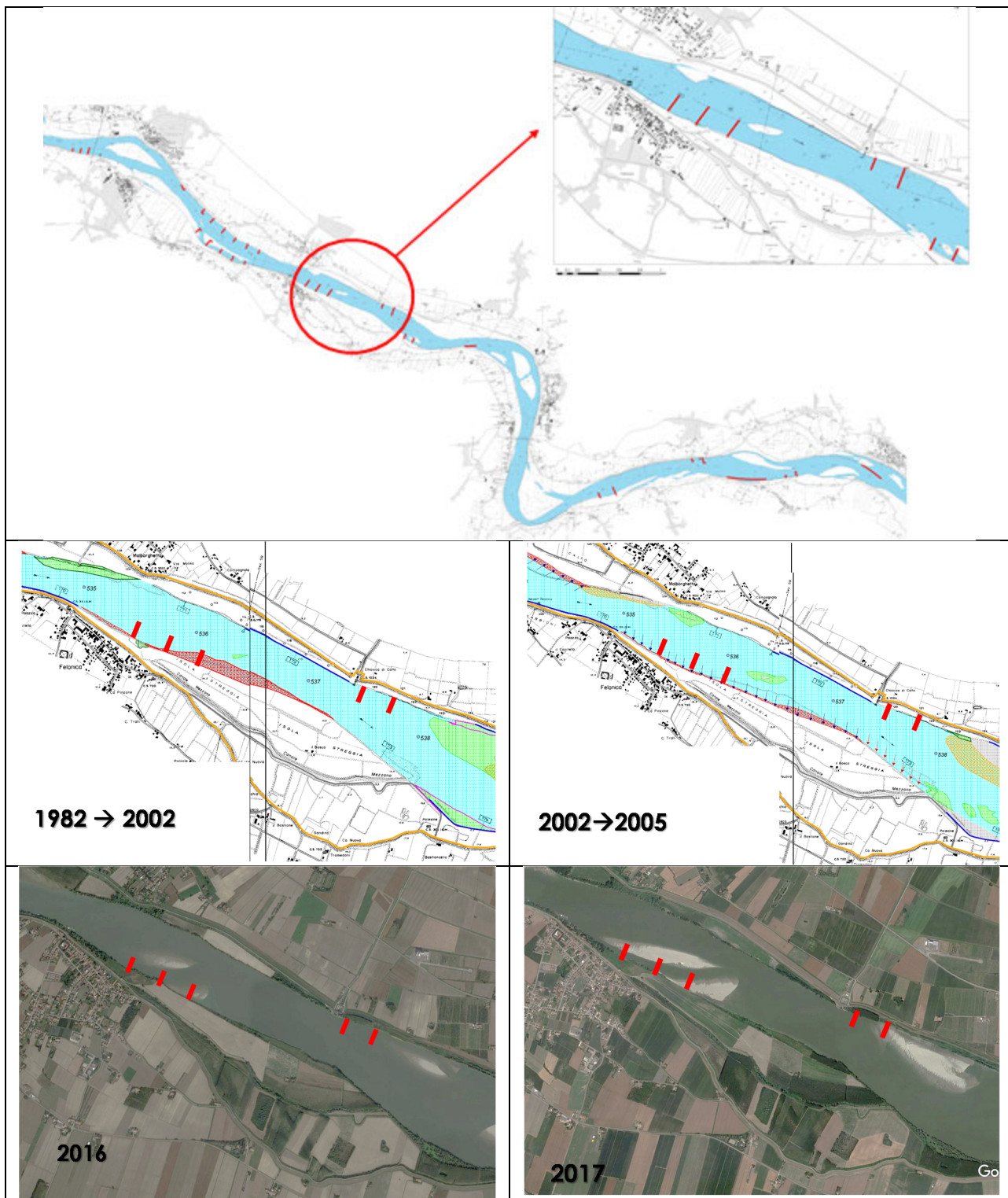


Figura 8 – Analisi tendenze evolutive del tratto a valle di Felonica

R.T.P:

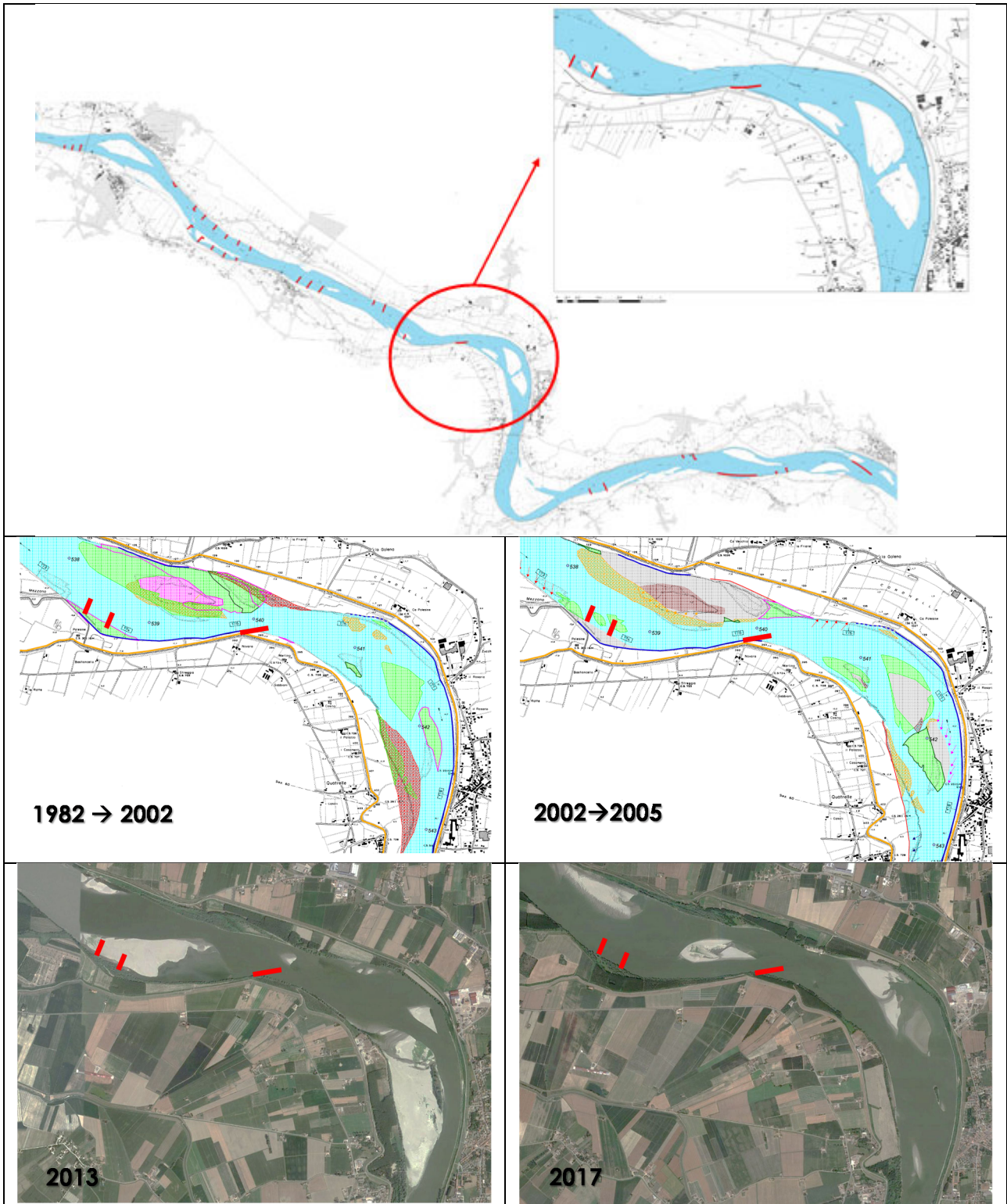


Figura 9 – Analisi tendenze evolutive del tratto a monte di Ficarolo

R.T.P:

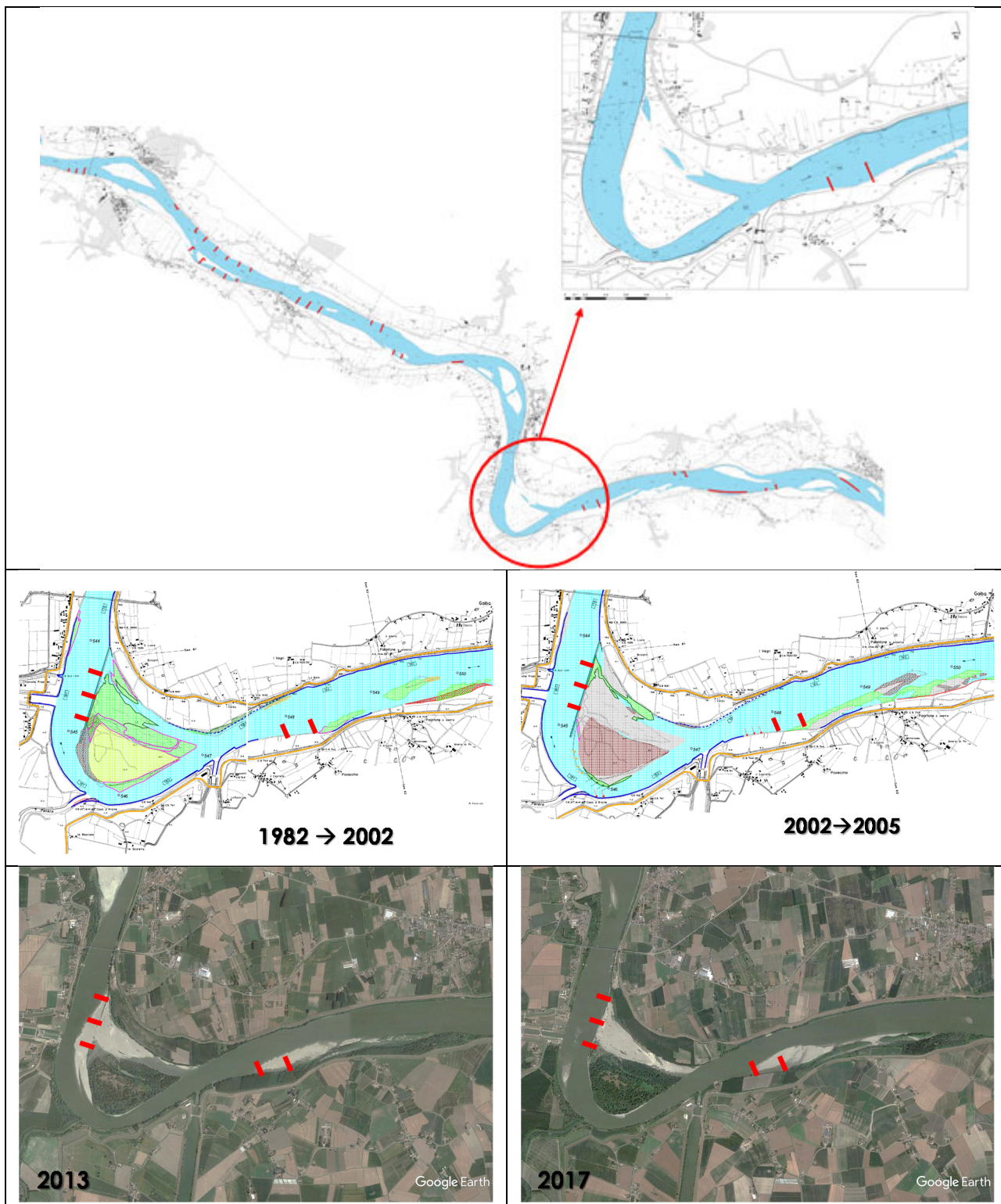


Figura 10 – Analisi tendenze evolutive del tratto nei pressi della confluenza con il F. Panaro

R.T.P:

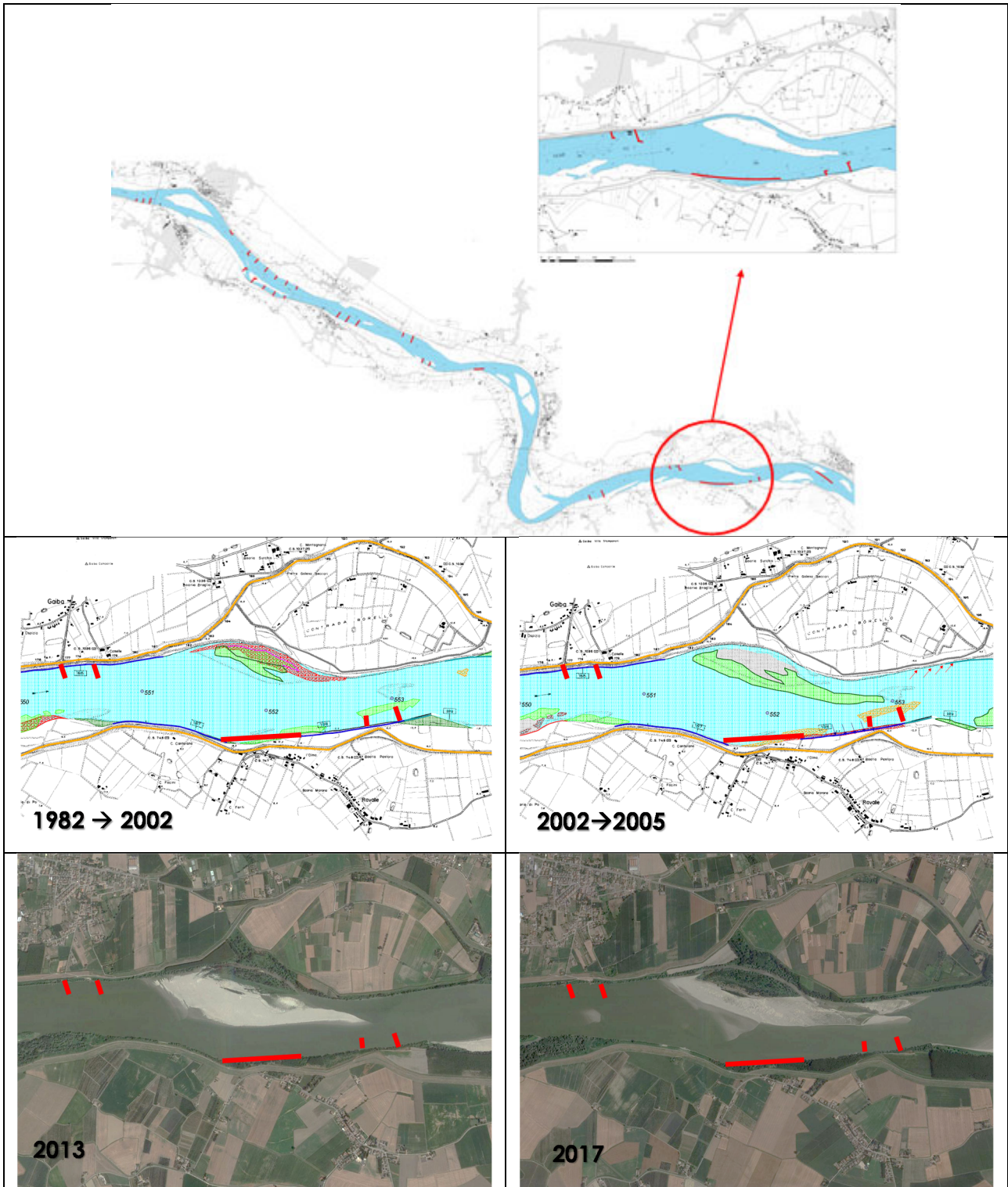


Figura 11 – Analisi tendenze evolutive del tratto nei pressi di Gaiba

R.T.P:

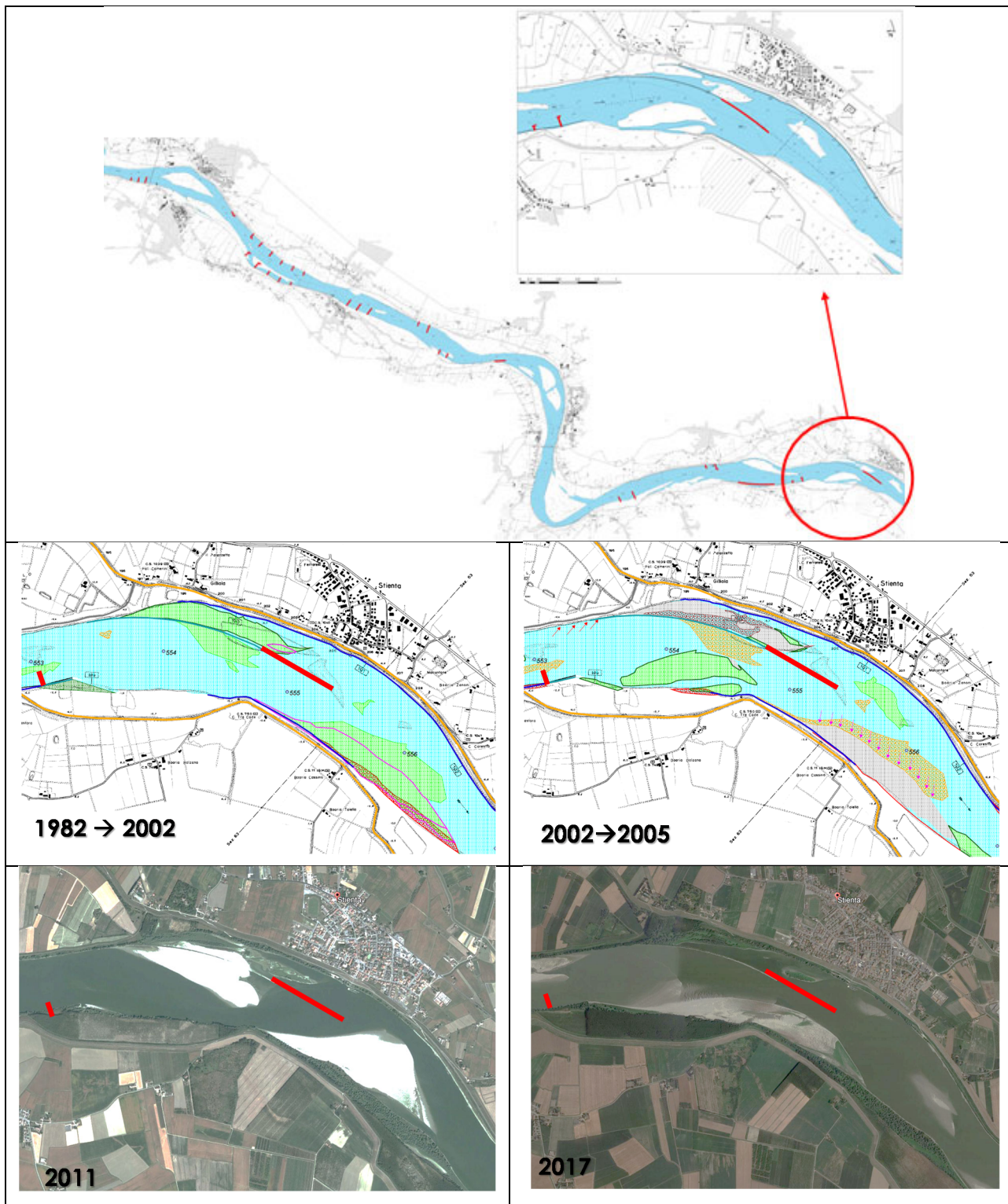


Figura 12 – Analisi tendenze evolutive del tratto nei pressi di Sienta

R.T.P:



Dall'analisi delle immagini riportate nella precedente Figura 6 si osserva che: nel periodo tra il 1982 e il 2005, l'isola posta di fronte a Castelmassa si è accresciuta in seguito a fenomeni di deposito (aree di colore verde nelle cartografie estratte dal Piano di gestione dei sedimenti), sia in sinistra che in destra idraulica. Nel 2017 la situazione risulta abbastanza in linea con gli anni precedenti. In questo tratto i pennelli in progetto sono previsti in una zona sostanzialmente stabile e hanno lo scopo di deviare la corrente verso il ramo posto a sinistra dell'isola, in modo tale da ridurre l'entità dei bassi fondali in esso presenti e consentire il passaggio dei natanti.

Dall'analisi delle immagini riportate nella precedente Figura 7 si osserva che: in destra idraulica nel periodo 1982-2005 era presente una barra prossima alla sponda, mentre nell'ultimo periodo tale barra non è più presente; in sinistra idraulica si è verificata nel periodo 1982-2014 un'importante erosione di sponda, che ha raggiunto l'argine golenale; al centro dell'alveo nel corso degli anni si è formata un'isola sempre più estesa. L'assetto morfologico presente riduce le possibilità di navigazione, pertanto in progetto sono previste delle opere trasversali lungo entrambe le sponde che hanno lo scopo di concentrare il filone principale della corrente verso il centro dell'alveo e di proteggere le sponde da fenomeni erosivi.

Dall'analisi delle immagini riportate nella precedente Figura 8 si osserva che: in sinistra idraulica si ha una situazione stabile nel tempo, con la presenza di una barra a valle della chiavica di Calto; in destra idraulica si è sviluppata nel periodo considerato un'erosione di sponda e la formazione di una barra longitudinale. Per ovviare alla presenza di bassi fondali, nel presente progetto sono previste opere trasversali lungo entrambe le sponde allo scopo di ridurre la larghezza dell'alveo di magra ed impedire il deposito dei sedimenti. Le opere previste in destra idraulica svolgono anche la funzione di protezione della sponda in erosione.

Dall'analisi delle immagini riportate nella precedente Figura 9, che rappresentano l'evoluzione morfologica nei pressi della curva di Ficarolo, si osserva che il tratto è soggetto a continui cambiamenti morfologici: nel periodo 1982-2005 a monte della curva era presente una barra di notevole dimensioni in sinistra idraulica, mentre nel 2013 la barra è presente in destra idraulica e nel 2017, invece, la barra ha assunto una posizione piuttosto centrale. Anche in corrispondenza della curva di Ficarolo le barre presenti continuano a spostarsi con grande velocità (fino al 2005 la barra è centrale, nel 2013 è addossata alla sponda destra e nel 2017 è prossima alla sponda sinistra). Tale instabilità delle forme di fondo crea notevoli problemi alla navigazione di natanti, pertanto nel presente progetto sono previste delle opere con lo scopo di ridurre la mobilità delle forme di fondo e creare un alveo navigabile.

Dall'analisi delle immagini riportate nella precedente Figura 10, che rappresentano l'evoluzione morfologica del tratto di fiume Po a cavallo della confluenza del fiume Panaro, si osserva che le forme di fondo sono sostanzialmente stabili. L'alveo di magra del fiume Po presenta due tratti abbastanza larghi, in cui si verificano bassi fondali: uno è il tratto rettilineo a monte della confluenza del

R.T.P:

Panaro, l'altro è quello appena a valle del Canale Emiliano Romagnolo. Nel progetto definitivo sono previsti in entrambi i tratti delle opere trasversali allo scopo di ridurre la larghezza dell'alveo di magra e consentire il trasporto dei sedimenti all'interno dell'alveo, in modo da ridurre la presenza di bassi fondali. Si osserva che negli ultimi anni (foto aeree del 2013 e del 2017) a valle del CER si è formata una barra, che di fatto ha già ridotto la larghezza dell'alveo di magra rispetto alla configurazione dell'alveo presente nel periodo 1982-2005.

Dall'analisi delle immagini riportate nella precedente Figura 11 Figura 7 si osserva che in sinistra idraulica è presente una barra che si estende verso la sponda destra fino al centro dell'alveo inciso, creando un ostacolo alla navigazione. Allo scopo di migliorare le condizioni di navigabilità commerciale nel tratto in questione, il presente progetto prevede la realizzazione di pennelli lungo la sponda destra in modo tale da convogliare il deflusso verso il centro dell'alveo e rimobilizzare la suddetta barra, creando un corridoio di navigazione. Inoltre, le opere in destra idraulica concorrono alla protezione dell'argine maestro che è posto a tergo dell'attuale sponda.

Dall'analisi delle immagini riportate nella precedente Figura 12 Figura 7 si osserva che il tratto in questione presenta una notevole dinamicità delle forme di fondo, che impediscono la navigazione di imbarcazioni di tipo commerciale; le barre subiscono continui processi di erosione e di deposito, sia a monte che a valle del pennello longitudinale esistente. Per cercare di creare un corridoio utile alla navigazione, il presente progetto prevede di prolungare verso valle il pennello esistente.

R.T.P.:



## 2.5. Bilancio del trasporto solido al fondo

Le analisi condotte dall'Autorità di bacino del fiume Po nell'ambito degli "Studi di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po", hanno portato a determinare il bilancio del trasporto solido al fondo, cioè a stimare il valore del volume che nell'anno medio (all'interno di un determinato periodo di analisi, che nello specifico è compreso tra il 1982 e il 2005) è transitato in una data sezione del corso d'acqua. Senza entrare nel dettaglio degli aspetti metodologici, di seguito si riportano in sintesi i risultati ottenuti, attraverso l'applicazione del bilancio del trasporto solido condotta mediante l'aggregazione lungo la progressiva, secondo lo schema riportato nella figura sottostante, delle determinazioni derivanti dagli studi geomorfologici, idraulici e tenendo conto degli apporti esterni e dei volumi estratti.

In ogni tratto fluviale di lunghezza pari a circa 100 m, il bilancio della portata media di trasporto solido (valutata in termini di volume di trasporto nel periodo di riferimento) è fornito dall'espressione:

$$G_i = G_{i-1} + A_f - Estr + \sum E_{bar} - \sum D_{bar} + \sum E_{sp} - \sum D_{sp} + \sum E_{fondo} - \sum D_{fondo}$$

in cui:

$G_i, G_{i-1}$  = portate solide medie nelle sezioni rispettivamente  $i$  di valle e  $i-1$  di monte del tratto considerato;  
 $A_f$  = portata solida proveniente dagli affluenti e dall'apporto di sedimentazione di materiali veicolati in sospensione;

$Estr$  = portata solida media estratta;

$\sum E_{bar}$  = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di barra;

$\sum D_{bar}$  = sommatoria delle portate solide arrestate nei depositi di barra;

$\sum E_{sp}$  = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di sponda;

$\sum D_{sp}$  = sommatoria delle portate solide arrestate nei depositi di sponda;

$\sum E_{fondo}$  = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di fondo alveo;

$\sum D_{fondo}$  = sommatoria delle portate solide arrestate nei depositi di fondo alveo.

Considerando il tratto in oggetto da Castelmasa a Sermide, (che è parte del tratto H indicato in Figura 13), le analisi condotte mettono in evidenza che il trasporto solido al fondo è sostanzialmente costante in seguito ad un equilibrio dinamico (erosioni = depositi). Ciò deriva dal fatto che il tratto fluviale, caratterizzato da un alveo di magra da monocursale (prevalente) a pluricursale, da rettilineo a sinuoso, localmente meandriforme e con presenza di barre longitudinali (isole) relativamente ben sviluppate, risulta essere non condizionato in modo diffuso da opere di difesa spondale, in assenza di un vero e proprio sistema di opere di navigazione e privo di condizionamenti esterni (assenza di rilevanti apporti esterni e ridotta influenza del mare).

R.T.P:

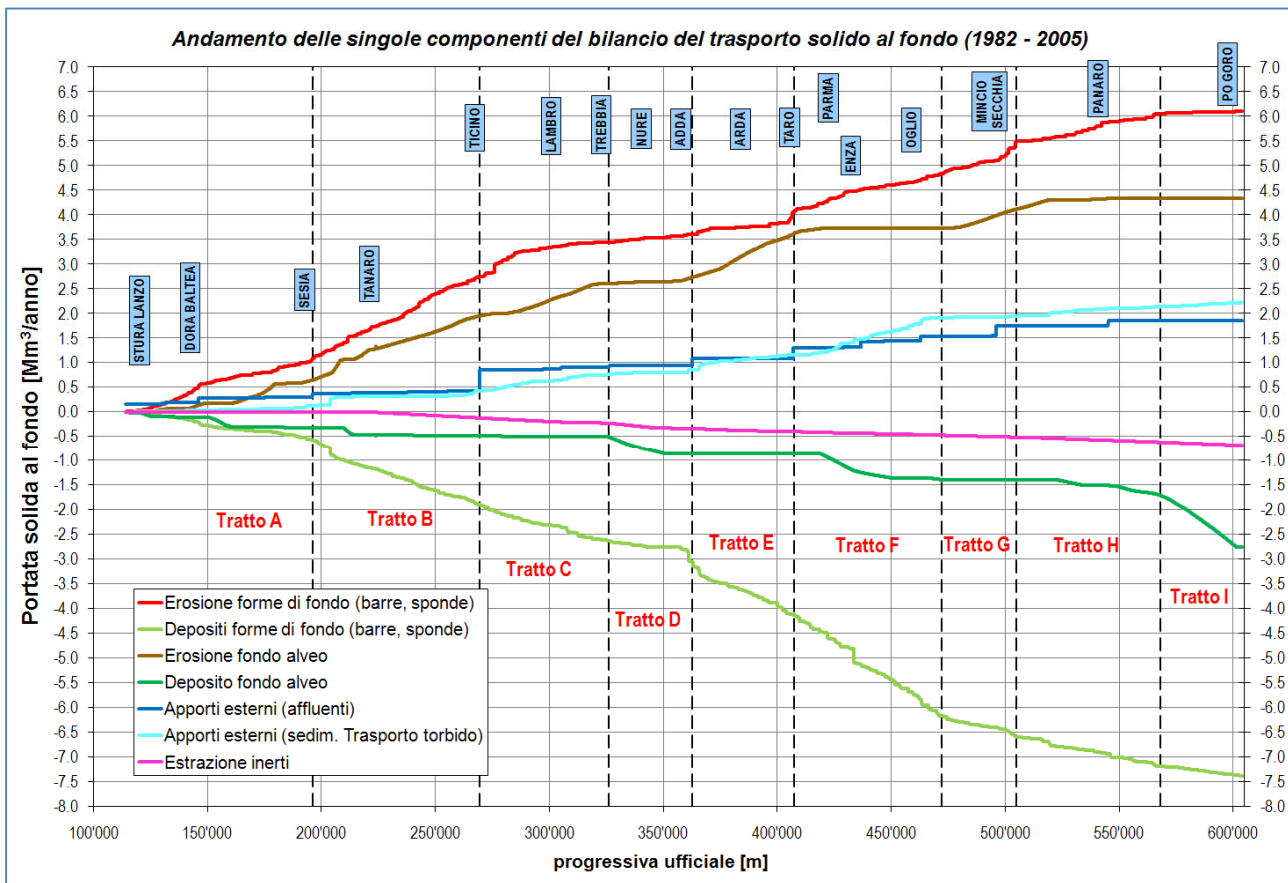
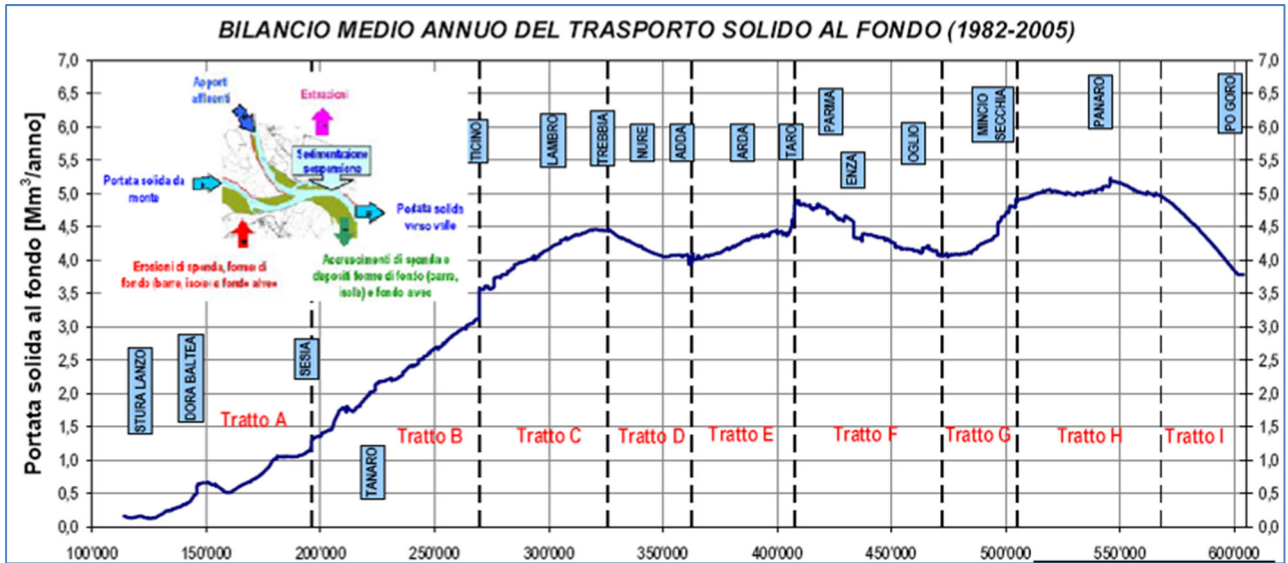


Figura 13 - Bilancio trasporto solido al fondo (sopra) e delle singole componenti (sotto), nel periodo 1982-2005. L'ambito oggetto del presente progetto è posto all'interno del tratto H.

R.T.P.:

## 2.6. Analisi dei bassi fondali allo stato attuale

L'analisi dei bassi fondali è stata condotta al fine di valutare le condizioni di navigabilità del fiume con riferimento in particolare alla regolazione a corrente libera dell'alveo di magra dell'asta fluviale atta a consentire la navigabilità di navigli della classe Va della classificazione Europea C.E.M.T. del 1992.

Il metodo di sistemazione che viene definito "regolazione a corrente libera dell'alveo di magra" consiste in una sistemazione che non ha soltanto funzioni idroviarie, infatti in un alveo dovunque costretto entro argini molto alti, che proteggono popolazioni addensate lungo le sue sponde e beni di grande valore, è indispensabile impedire le divagazioni del tracciato che portano il canale di magra, con la sua capacità erosiva, al piede dei rilevati arginali in punti privi di protezione.

La regolazione dell'alveo di magra del Po è stata studiata dal 1920 ed è stata realizzata con ritmi lentissimi nel tronco tra Cremona e la foce del Mincio, completata oggi al 90% del programma iniziale, pur in un contesto radicalmente mutato. Qui le condizioni di navigabilità sono comunque decisamente migliorate. Mentre prima dei lavori i fondali superiori ai 2 m erano disponibili soltanto per 60 giorni nell'anno medio, oggi essi sono disponibili per 260 giorni. Anche nel tronco a valle di foce Mincio, in seguito alla maggiore efficacia nella sua gestione, i fondali superiori a 2 m sono disponibili per 250 giorni nell'anno medio, pur senza nessuna sistemazione.

In questo tratto i lavori di regolazione sono appena iniziati, anche se in modo non ancora organico e per interventi limitati, ma i risultati non potranno mancare perché qui le condizioni sono sensibilmente più favorevoli. L'intervento richiesto per la regolazione dell'alveo di magra è certamente il più leggero che si possa adottare. E' la scelta che più di ogni altra rispetta i caratteri naturali del fiume e ben si sposa con le esigenze della difesa idraulica. Ciò naturalmente se la stessa regolazione è studiata in modo da non alterare la dinamica morfologica dell'alveo, in particolare evitando che si inducano tendenze all'abbassamento dell'alveo.

E' in questa direzione che l'ARNI, oggi confluita in AIPO Navigazione, ha studiato i più recenti e avanzati progetti, seppure di modesta entità, per la correzione dei punti critici dove si formano i bassi fondali, che mirano a ridurre l'erosione del fondo, a proteggere le arginature maestre, a conservare il canale navigabile e a ridurre sensibilmente gli interventi di manutenzione.

L'individuazione dei punti di basso fondale risulta quindi necessaria a determinare i tratti di fiume in cui effettuare gli interventi di sistemazione che permettano di garantire le condizioni minime di navigabilità. In particolare per quel che riguarda i tiranti le condizioni minime da raggiungere, sulla base di quanto già adottato nell'ambito dei precedenti interventi di sistemazione, vengono indicate secondo i valori elencati di seguito:

- persistenza di un fondale minimo pari a 2,00 metri per almeno 340 giorni all'anno;
- persistenza di un fondale minimo pari a 2,80 metri per almeno 300 giorni all'anno;

Naturalmente la condizione di persistenza del tirante minimo, come sopra riportato, non è sempre garantita a causa della formazione di barre longitudinali o di banche di depositi formati per effetto di

R.T.P:

varie cause: zone di passaggio tra curva e controcurva, eccessiva distanza delle tangenti di due curve successive, raggi di curvatura troppo ampi, irregolarità delle curve (vecchie difese, curve policentriche o varianti al tracciato del progetto) ed il non completamento delle opere di sistemazione (esempio riportato in Figura 14). Nei punti sopra descritti si creano quindi tratti di fiume caratterizzati da bassi fondali i quali possono impedire il transito dei natanti.

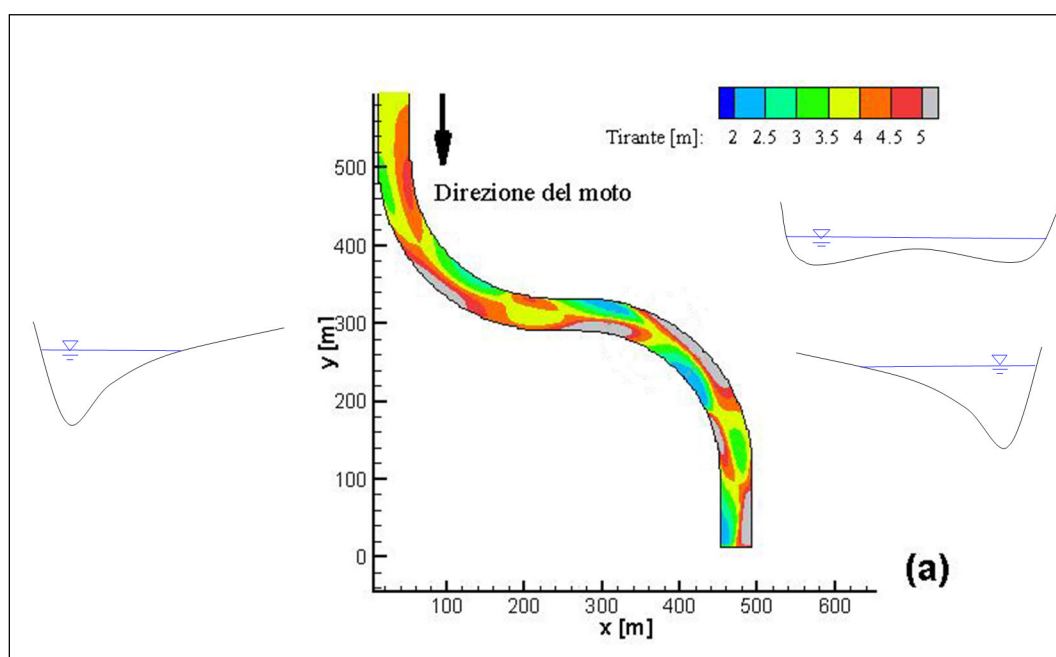


Figura 14 – Esempio di distribuzione dei tiranti lungo un tratto fluviale

L'individuazione dei tratti in cui il tirante idrico risulta insufficiente ai fini della navigazione commerciale è stata condotta analizzando i dati dei rilievi giornalieri eseguiti dai tecnici dell'Ufficio Navigazione Interna di AIPO effettuati nel periodo 1994-2013, per le località caratterizzate dalla presenza di bassi fondali, in particolare nel tratto di fiume Po compreso tra foce Mincio e Po di Goro, che non è ancora stato interessato da interventi di sistemazione atti a realizzare un canale navigabile.

L'analisi è stata condotta sulla base dei dati disponibili, in particolare il dato fornito individua, per ciascuna località presa in considerazione, il numero di giorni annui in cui il tirante idrico risulta inferiore a 2,0 m.

Nelle tabelle successive si riportano, per ognuna delle località disponibili, i valori della persistenza, in giorni, di fondali inferiori a 2,00 metri per ciascun anno del periodo 1994 – 2013.

R.T.P:

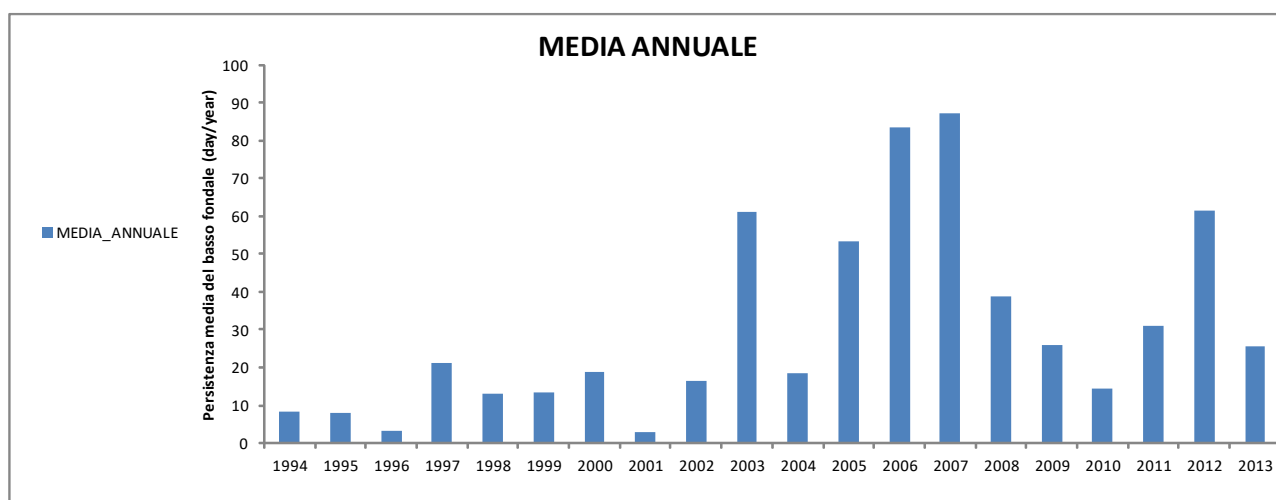


La media annuale del numero di giorni con fondali insufficienti calcolata sull'intero campione delle località disponibili, descrive naturalmente una estrema variabilità del dato, evidenziando però un aumento, negli ultimi anni, del numero di giorni complessivi in cui i fondali non sono sufficienti alla navigazione, con un periodo particolarmente siccitoso fra il 2003 e il 2007 in cui per quasi 1/3 dell'anno il fiume non risultava navigabile nel tratto preso in considerazione.

Tali considerazioni sono illustrate nel grafico successivo da cui risulta evidente quanto precedentemente illustrato.

Oltre ai valori che fanno riferimento a fondali minimi pari a 2 metri, AIPO ha disponibili i valori relativi a fondali minimi pari a 2,5 metri. Naturalmente il numero di giorni in cui i fondali non raggiungono il valore di riferimento aumentano in modo significativo, con punte di oltre 100 giorni all'anno per quelli più siccitosi.

Parametro	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>MEDIA ANNUALE</b>	8	8	3	21	13	13	19	3	17	61	18	53	83	87	39	26	14	31	62	26



**Figura 15 – media annuale del numero di giorni con fondali insufficienti calcolata sull'intero campione delle località disponibili**

Alla luce delle caratteristiche sopra evidenziate si è quindi deciso di valutare differenti scenari per l'analisi del campione di dati come descritto nel seguito.

Per ogni località caratterizzata dalla presenza di bassi fondali sono state calcolate le medie dei seguenti periodi: 1994 – 2013 (campione completo); 2003 – 2013 (ultimo decennio); 2003 – 2007 (condizioni più gravose registrate) e sono quindi stati individuate le località per le quali le medie delle persistenze dei bassi fondali sono maggiori di 25 giorni; inoltre per individuare le località caratterizzate dalle criticità maggiori si è definita una scala cromatica in funzione del grado di persistenza come sotto riportato.

R.T.P:



**Tabella 2 - Valori medi di persistenza dei bassi fondali lungo l'asta del Po a valle di foce Mincio**

COLORE	DESCRIZIONE	GIORNI DI PERSISTENZA DEL FONDALE "G"
	TRATTO A RIDOTTA PERSISTENZA	$0 < G < 25$
	TRATTO A MEDIA PERSISTENZA	$25 < G < 35$
	TRATTO AD ELEVATA PERSISTENZA	$35 < G < 50$
	TRATTO CRITICO	$G > 50$

Nome Località	MEDIA 1994 - 2013	MEDIA 2003 - 2013	MEDIA 2003 - 2007
FOCE MINCIO	17,8	26,5	57,4
FOCE SECCHIA	13,6	24,6	46,6
SABBIONCELLO	29,7	51,8	64,8
BONIFICA SABBIONCELLO	18,5	30,1	40,4
MONTE QUINGENTOLE	51,9	77,7	129,8
VALLE QUINGENTOLE	54,0	89,5	117,8
PEREROLO	18,7	28,4	27,0
MONTE CARLETTE	13,5	22,2	48,8
CARLETTE	46,5	78,9	92,2
FORNACI	41,7	62,8	61,4
PAGLIOTTA	23,6	36,5	55,2
MONTE OSTIGLIA	0,7	1,3	2,8
MONTE P.TE REVERE	5,1	9,3	20,4
RONCHI	17,8	32,0	66,4
BONIZZO	38,4	48,5	74,2
MELARA	62,2	93,2	72,8
VALLE MELARA	35,5	50,3	75,6
PRADONI	42,4	64,6	96,6
MERICONDA	27,8	46,4	71,2
ISOLA CANTUTTI	22,1	22,6	44,8

R.T.P:

Nome Località	MEDIA 1994 - 2013	MEDIA 2003 - 2013	MEDIA 2003 - 2007
VALLE ISOLA CANTUTTI	30,0	49,6	66,4
BARONI	15,0	22,6	33,2
BERGANTINO	10,9	18,2	39,2
CROSSINE	11,5	20,8	43,2
MONTE P.TE	33,3	56,8	88,8
PONTE CASTELMASSA	16,7	28,5	59,4
CASTELMASSA	47,5	75,6	139,6
BOSCO CAPOSOTTO	66,9	90,5	108,8
CALTO	67,3	103,9	113,0
FELONICA	63,6	105,0	127,8
CHIAVICA DI CALTO	60,0	100,9	104,2
ISOLA MALAVASI	56,5	92,3	100,2
MERLINO	28,8	47,7	63,6
CA' POLESINE	31,8	45,5	45,2
FRONTE FICAROLO	32,4	52,9	107,2
CHIAVICA PILASTRESI	40,9	59,2	109,8
FONDO CALZA	9,4	15,5	34,2
GAIBA	20,8	15,9	18,0
VALLE GAIBA	80,5	121,4	134,0
RAVALLE	57,8	89,9	65,4
BONELLO	53,7	72,3	83,2
MONTE STIENTA	18,9	29,5	4,8
STIENTA	43,5	62,2	92,4
CA' PRINELLA	55,9	77,3	84,6
OCCHIOBELLO	21,7	39,2	38,8
MALCANTONE	0,3	0,5	0,8
PONTELAGOSCURO	27,2	49,4	72,0
ISOLA BIANCA	65,9	89,7	78,0
FRANCOLINO	35,6	46,8	70,6
PAVIOLE	59,4	82,4	107,8
BORGO DI PESCARA	38,2	56,6	57,0
GAROFALO	33,6	44,0	56,0
MONTE ZOCCA	7,2	11,4	22,0
PONTE POLESILLA	0,7	0,1	0,2
CRESPINO	55,7	63,9	87,2
PASSETTO	20,7	35,0	76,6
VICENTINA	9,6	13,6	29,8
CANALNUOVO	0,1	0,1	0,0
CA' MATTE	11,1	20,1	44,2
VALLE S. MARIA IN PUNTA	12,6	22,7	48,8
CORBOLA	0,2	0,4	0,0
BOTTRIGHE	1,4	2,5	0,0
MAZZORNO IN DESTRA	29,0	28,7	24,8
MAZZORNO IN SINISTRA	4,2	0,0	0,0
CAVANELLA	0,4	0,0	0,0

Dalle analisi sopra riportate si ha quindi una panoramica della situazione del fiume Po allo stato attuale rispetto alla persistenza dei bassi fondali. Visualizzando in un grafico i tre valori medi analizzati si nota come il periodo 2003-2007 incida in modo particolarmente significativo sui risultati dell'elaborazione statistica essendo questi anni caratterizzati da un prolungato stato di siccità.

R.T.P.:

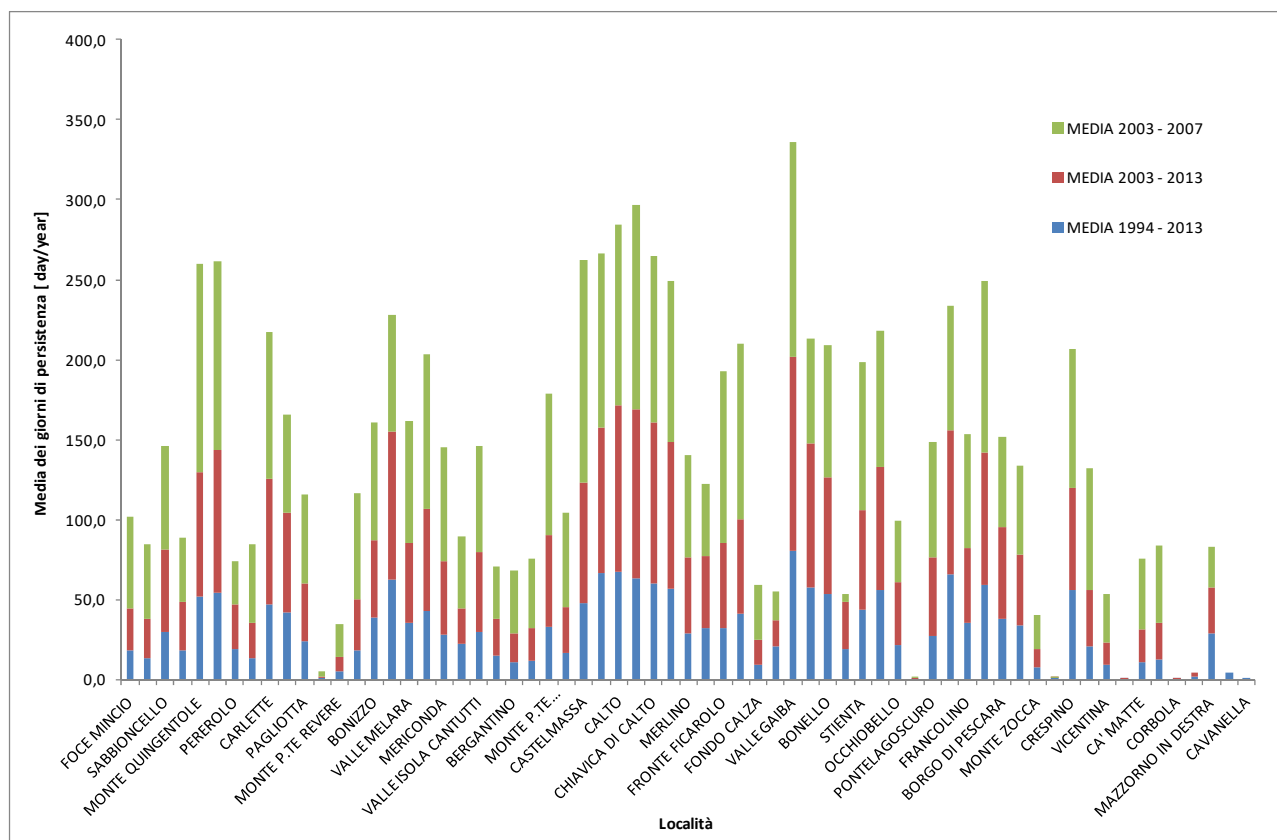


Figura 16 – Media, relativa ai diversi periodi considerati, della persistenza di bassi fondali per le diverse località lungo il fiume Po a valle di foce Mincio

Sulla base dei dati disponibili aggiornati emerge che per l'intero periodo considerato il tirante di 2 metri risulta disponibile mediamente per circa 335 giorni all'anno; la stessa statistica calcolata per i due sottointervalli, porta a valori mediamente inferiori, pari a 320 giorni per l'intervallo 2003-2013 e 305 giorni per l'intervallo 2003-2007.

Sulla base delle analisi precedenti sono state tracciate delle planimetrie dell'intero tratto del fiume oggetto di analisi da foce Mincio a Po di Goro sulle quali, con la medesima scala cromatica indicata nella presente relazione, sono state individuate le località per le quali la persistenza media dei bassi fondali è superiore ai 25 giorni/anno come quelle indicate di seguito a titolo di esempio.

R.T.P:

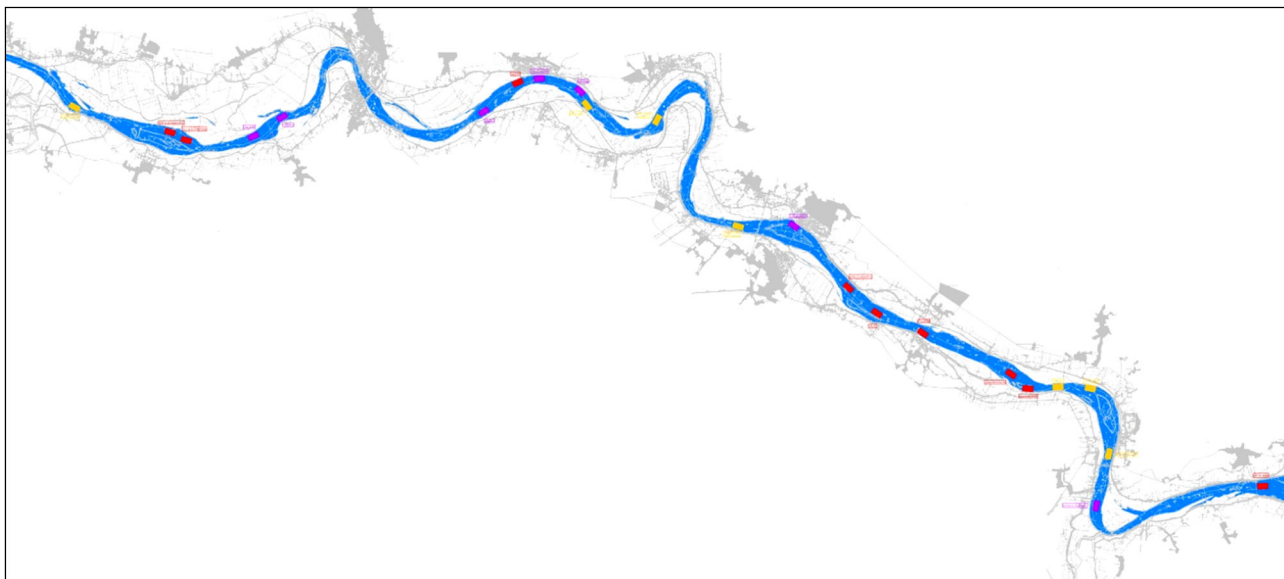


Figura 17 – Bassi fondali (< 2 m) individuati tra Foce Mincio e Valle Gaiba

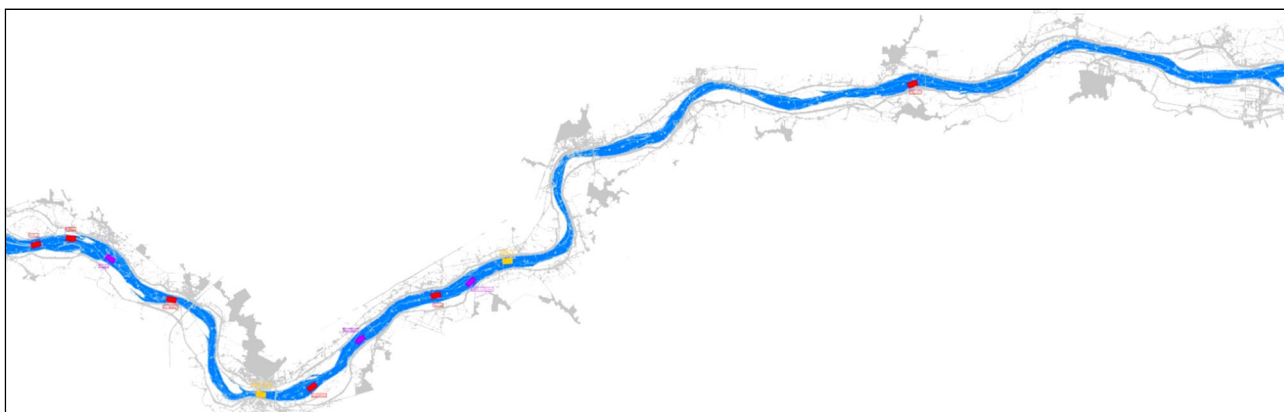


Figura 18 – Bassi fondali (< 2 m) individuati tra Valle Gaiba e Po di Goro

R.T.P:

### **3. MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE A FONDO MOBILE DELL'ASSETTO DI PROGETTO**

Il presente Capitolo descrive le modellazioni numeriche effettuate al fine di dare indicazioni alla progettazione delle opere, confrontando scenari alternativi di intervento.

Il tratto oggetto di sistemazione si estende da Castelmasa a Stienta per un totale di circa 30 chilometri, dalla chilometrica 528 alla chilometrica 558.

Il modello idraulico a fondo mobile si basa sulle informazioni topografiche e batimetriche dei rilievi del 2005, che rappresentano il dato completo più recente disponibile. Il modello richiede infatti una copertura del dato altimetrico completa ed omogenea nel tempo. I dati batimetrici più recenti (rilievo 2018) sono invece stati utilizzati nel presente progetto come confronto con rilievi precedenti, dove si ha sovrapposizione delle informazioni, ed a supporto della definizione delle sezioni di progetto delle opere, sempre dove il dato è disponibile.

L'impostazione modellistica adottata nello studio a supporto del presente progetto definitivo, di seguito descritta, riprende quella adottata nello studio "Sistema idroviario del Po 365 – Progetto Preliminare per migliorare la navigabilità dal porto di Cremona al mare Adriatico – 2012-IT-91076-S. Approfondimento delle analisi di trasporto solido e di sicurezza idraulica relative ai progetti di regimazione e sistemazione a corrente libera del f. Po - Servizio n. 1" (AIPo 2016), di seguito "Studio Po365".

#### **3.1. Obiettivi della modellazione**

Lo sviluppo dello studio idraulico-morfologico del fiume Po nel tratto compreso tra Castelmasa e Stienta costituisce un elemento utile alla valutazione delle dinamiche di evoluzione morfologica e dei potenziali effetti introdotti dagli interventi di sistemazione.

Il modello, pur essendo uno strumento non predittivo ma di supporto alla progettazione, consente infatti, in maniera rapida, di confrontare configurazioni alternative o parziali delle opere, al fine di ottimizzare le soluzioni progettuali.

#### **3.2. Il modello idraulico bidimensionale a fondo mobile**

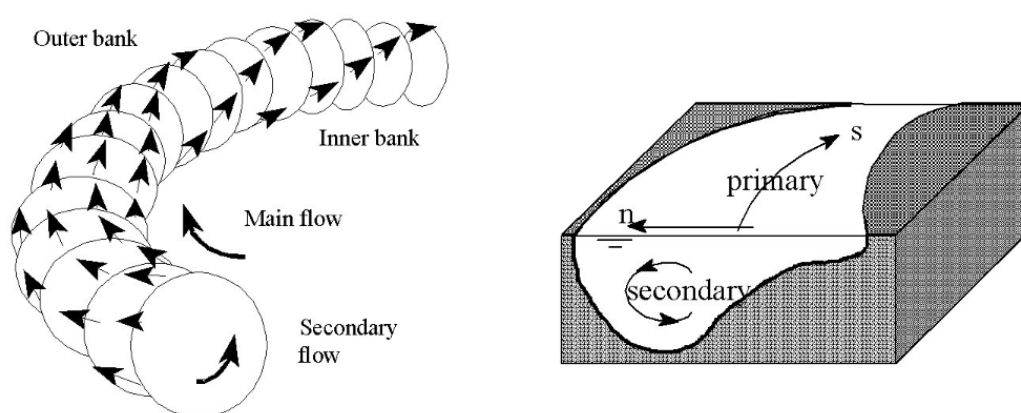
##### **3.2.1. Il codice di calcolo MIKE 21C**

L'attività modellistica è svolta mediante l'applicazione del modello idraulico bidimensionale a fondo mobile MIKE 21C, distribuito dal Danish Hydraulic Institute (DHI), in grado di rappresentare con la necessaria accuratezza le dinamiche morfologiche ed evolutive del corso d'acqua e restituire i risultati per il tratto oggetto di studio in termini idraulici e morfologici.

Il codice di calcolo MIKE 21C (dove la C sta per "Curvilineo") è un modello bidimensionale di tipo "morfologico", che integra su griglia curvilinea le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto alle acque basse e l'equazione convettiva-diffusiva per la simulazione della dinamica del

R.T.P:

materiale sospeso, ma considerando in maniera integrata sulla verticale gli effetti sul trasporto solido del flusso elicoidale (flusso secondario), caratteristica tipicamente tridimensionale [DHI Water & Environment. 2002]. In genere, il flusso elicoidale non ha una forte influenza sui modelli di flusso caratterizzati da alti rapporti larghezza / profondità, ma nei casi come quello in esame può avere una notevole influenza sulla direzione di trasporto dei sedimenti e dei cambiamenti morfologici (Figura 19). La stabilità e l'efficienza della soluzione numerica permettono di rappresentare, con un modello disaccoppiato, il termine di flusso secondario (flusso elicoidale) ed il trasporto solido al fondo ed in sospensione dovuto all'effetto combinato del moto bidimensionale e del flusso secondario: ad ogni passo di calcolo il modello riaggiorna la geometria dei fondali sulla griglia curvilinea e rappresenta, dinamicamente, i processi di erosione e di deposito.



**Figura 19 – Schematizzazione del flusso elicoidale**

Le equazioni di Navier-Stokes specializzate per le acque basse insieme all'equazione convettiva-diffusiva bidimensionale vengono risolte su griglia curvilinea, dove possono essere inserite le opere idrauliche esistenti ed in progetto, che meglio si adatta a morfologie sinuose degli alvei fluviali naturali.

Il modello richiede come dati di input, oltre alle condizioni al contorno idrologiche e dei sedimenti, le caratteristiche granulometriche e le condizioni di scabrezza rappresentative dei diversi ambiti (alveo principale, barre fluviali, golene e aree agricole).

I risultati ottenibili dalle simulazioni, per quanto riguarda la parte idrodinamica, sono costituiti dai livelli e dagli idrogrammi di portata nel corso d'acqua nelle sezioni di interesse, dalla restituzione planimetrica delle aree allagate e delle velocità di deflusso.

Per quanto riguarda la componente di trasporto solido il modello è in grado di rappresentare le variazioni morfologiche della batimetria; può inoltre fornire un'analisi dei volumi di sedimento movimentati e contribuire all'individuazione degli ambiti con comportamento morfologico differente.

Gli scenari d'intervento vengono schematizzati direttamente nella geometria del modello inserendo le opere di regolazione, di difesa (trasversali o longitudinali), in alcuni casi modificando la geometria della griglia di calcolo, al fine di adattarla al meglio alle nuove curve imposte negli scenari di progetto.

R.T.P:

### Discretizzazione spaziale

La griglia curvilinea viene adottata al fine di ridurre gli errori di troncamento nell'approssimazione numerica delle derivate spaziali in prossimità dei contorni curvilinei tipici degli alvei fluviali: ciò è particolarmente importante per simulare correttamente l'erosione spondale ed è comunque auspicabile per meglio seguire le variazioni nella direzione del flusso principale a tutto vantaggio dell'accuratezza del modello numerico [Mosselman E., 1992].

Il MIKE21C utilizza il metodo delle differenze finite su griglia curvilinea, ponendo in corrispondenza biunivoca lo spazio computazionale con la griglia curvilinea su cui viene discretizzato lo spazio del modello.

Per ottenere una soluzione numerica accurata è necessario rispettare alcune regole durante la generazione della griglia curvilinea, evitando ad esempio repentine variazioni delle dimensioni della maglia e dell'inclinazione locale.

### Discretizzazione temporale

La discretizzazione temporale presenta peculiarità tipiche della modellazione dei processi fluviali. Il MIKE21C utilizza l'approccio disaccoppiato per il calcolo dell'idrodinamica e della dinamica morfologica: le variazioni morfodinamiche sono effettivamente molto più lente rispetto all'evoluzione idrodinamica, in ragione delle diverse inerzie che caratterizzano i due processi, tuttavia la relativa interdipendenza dei fenomeni ne richiede la simulazione contemporanea, dunque il processo più veloce condizionerebbe la scelta dell'intervallo di tempo per il calcolo dell'intera evoluzione.

Simulando separatamente l'idrodinamica e la morfodinamica alternandone il processamento così da includere nel risultato il reciproco effetto, è possibile utilizzare time step differenti commisurati ciascuno alla velocità tipica della dinamica rappresentata [DHI Water & Environment. 2002]: il MIKE21C prevede quindi l'indicazione di un time step idrodinamico e di un time step sedimentario maggiore (multiplo di quello idrodinamico).

Al fine di mantenere una buona stabilità numerica, è consigliabile che il time step idrodinamico sia tale da comportare un numero di Courant inferiore a 3÷5, espresso dalla seguente formula:

$$CR_{HD} = \frac{U + \sqrt{g \cdot h}}{\Delta s} \cdot \Delta t < 3 - 5$$

Fissata la spaziatura di griglia  $\Delta s$  e noti velocità e tiranti attesi, è possibile quindi calcolare il time step idrodinamico. Naturalmente la spaziatura di griglia è dettata dalle risoluzioni con cui si vuole rappresentare il modello, tenendo conto dei conseguenti tempi di calcolo.

Sempre nell'intento di ottimizzare i tempi di calcolo il modello prevede anche l'introduzione di un "General time step", multiplo M di quello idrodinamico. Questo espediente, piuttosto efficace nel ridurre i tempi di calcolo, introduce alcune approssimazioni, pertanto la scelta del valore del "General time step" va effettuata sulla base dei tempi caratteristici di propagazione delle perturbazioni nel sistema idraulico.

Le simulazioni effettuate sono caratterizzate da un time step idrodinamico pari a 1 secondo e da un "General time step" di 2 secondi, scelto sulla base di alcuni test iniziali.

R.T.P:

### 3.2.2. La griglia curvilinea e la batimetria

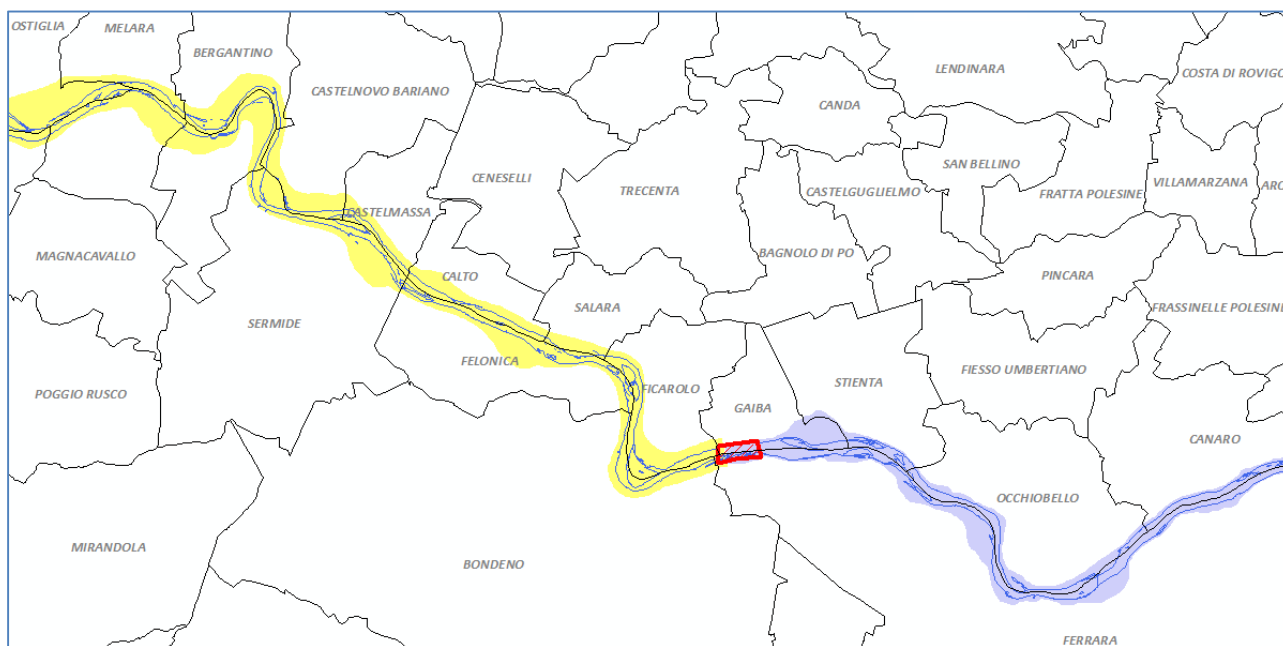
Il grado di risoluzione del dominio di calcolo è proporzionale ai tempi di simulazione: va cercato quindi il giusto compromesso per poter rispondere agli obiettivi dello studio, secondo tempi computazionali accettabili.

Il presente studio riprende le impostazioni di calcolo dello studio Po365.

Vista la lunghezza del tratto da esaminare e la complessità di alcune porzioni di fiume, l'area di studio è suddivisa in due tratti, interrotti a valle di foce Panaro (Figura 20), sufficientemente lunghi da non risentire delle condizioni a contorno di monte e di valle.

La griglia curvilinea per la modellazione dell'alveo e dell'intera area di studio è stata costruita seguendo l'andamento delle linee di flusso della corrente, in modo da simulare in maniera quanto più accurata i moti secondari in curva, e tenendo conto della presenza di golene, argini, opere idrauliche, rilevati, ecc.

Per cogliere l'andamento dell'alveo e schematizzare con cura le variazioni di direzione e di larghezza del corso d'acqua, la griglia è stata costruita per tratti successivi con dimensioni delle celle di calcolo variabili in funzione delle caratteristiche morfologiche del tratto stesso. La larghezza media delle celle che descrivono l'alveo attivo è di circa 10 metri.



**Figura 20 – Suddivisione dell'area di studio in tratti di calcolo per la modellazione: tratto giallo = tratt0 di monte, tratto viola = tratt0 di valle, tratto rosso = tratto di sovrapposizione**

Una volta costruita la griglia curvilinea di calcolo, ad ogni cella è stata assegnata la quota media delle quote della porzione del DTM entro la cella stessa; i rilevati arginali e le opere idrauliche sono inseriti nel modello andando ad assegnare, mediante una procedura in ambiente GIS, le quote esatte alle celle della griglia occupate dalle stesse opere.

R.T.P:



Le quote batimetriche iniziali del calcolo sono state ricavate dal DTM del 2005, mentre per la descrizione plano-altimetrica dell'area da modellare ci si è avvalsi del supporto cartografico costituito da ortofoto e CTR georeferenziate, nonché del hillshade dello stesso DTM del 2005.

Le celle dell'alveo attivo sono state considerate erodibili, assegnando uno spessore dello strato erodibile pari a 7 metri; le isole, le barre vegetate e le golene invece sono state considerate non erodibili, quindi pur essendo parte del dominio di calcolo su tali aree si ammette che possano avvenire solo fenomeni di tipo deposizionale.

La Figura 21 riporta un esempio della griglia di calcolo curvilinea, nel tratto in prossimità di foce Panaro, a valle di Ficarolo, e la batimetria assegnata a partire dal DTM 2005 nello stesso tratto: dalla figura si osserva come la griglia segue le forme morfologiche (canale principale, canali secondari, isole) e discretizza con maggior dettaglio la parte in alveo.

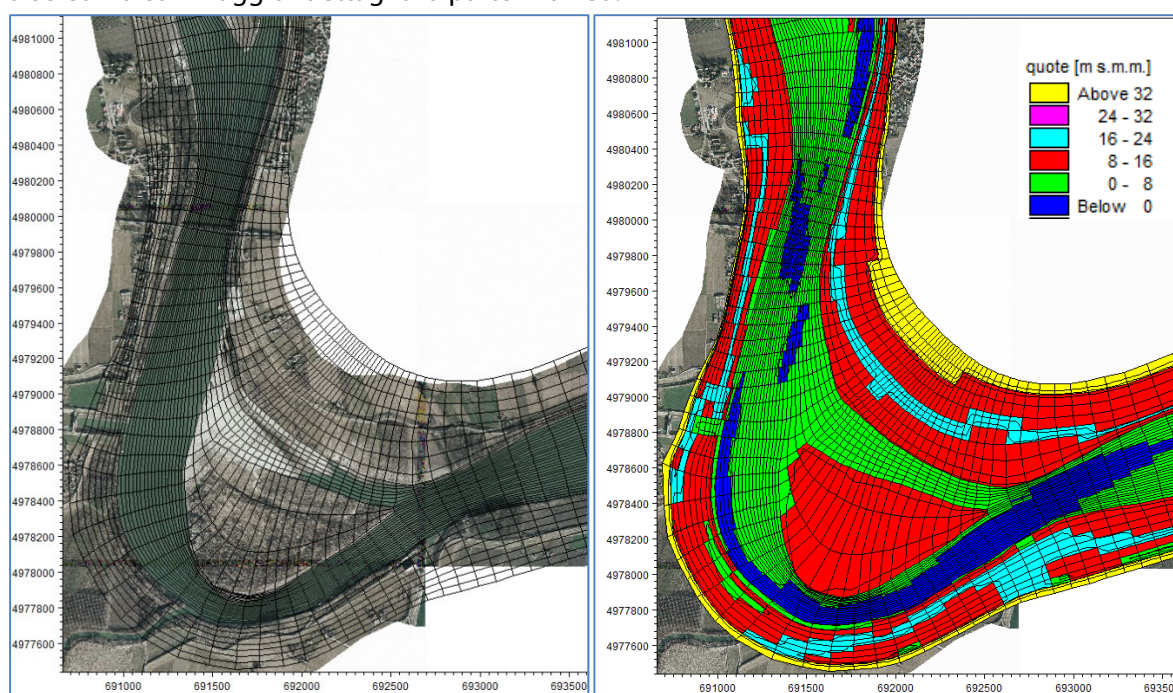


Figura 21 – Esempio di griglia curvilinea ed associata batimetria: tratto tra Ficarolo e foce Panaro.

### 3.3. Definizione delle condizioni al contorno e dei parametri di calcolo

#### 3.3.1. Condizioni a contorno idrologiche

Il modello a fondo mobile richiede come condizione a contorno in ingresso idrogrammi di portata liquida e sedimentogrammi che coprano un periodo sufficiente a simulare l'evoluzione del fondo.

Quali condizioni idrauliche sono stati considerati gli idrogrammi registrati nel biennio 03.07.2007-03.07.2009, che appare significativo dal punto di vista sia idrologico che sedimentologico in quanto caratterizzato da portate inizialmente modeste, utili per avviare e stabilizzare il calcolo, seguite da un regime idraulico "vivace", che consente di verificare con maggior velocità gli effetti delle opere rispetto

R.T.P:

allo stato attuale: oltre ai dati misurati da ARPA, per il fiume Po sono stati utilizzati i dati ufficiali presenti negli annali relativi alle stazioni di Sermide e Ficarolo. Lo stesso periodo fu utilizzato per tarare il modello di calcolo nell'ambito dello Studio Po 365.

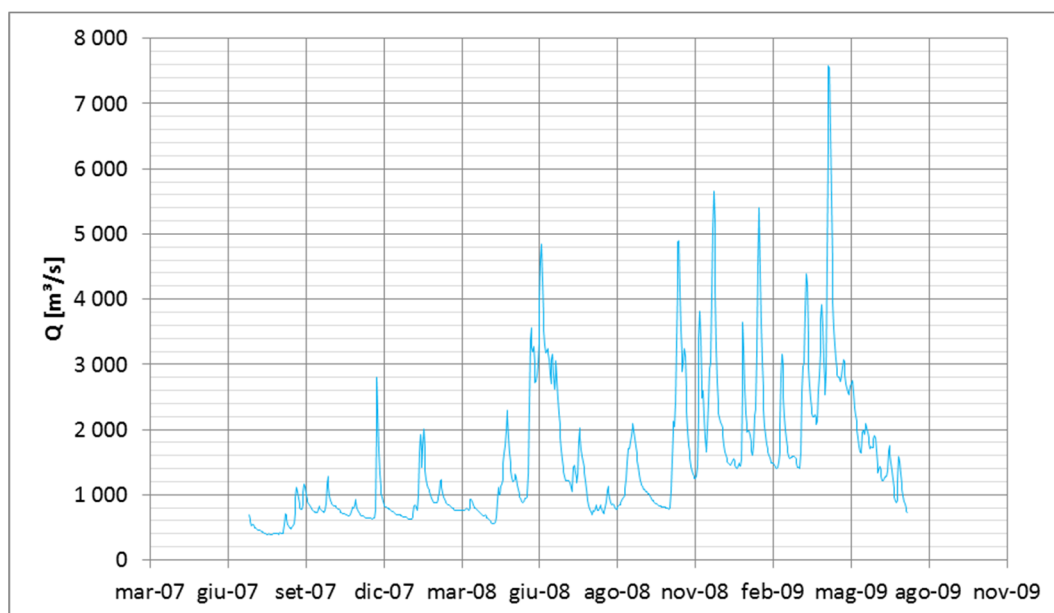


Figura 22 – Serie storica di portate liquide utilizzate nella modellazione (periodo 03.07.2007 – 03.07.2009).

I sedimentogrammi in ingresso al modello sono stati ottenuti dalle elaborazioni dello Studio Po 365, che a partire dalle analisi del PGG5 e loro aggiornamento ha individuato la funzione che consente di determinare la portata solida di fondo giornaliera in funzione della portata liquida nelle sezioni di interesse. La portata solida in ingresso al tratto di studio deriva quindi dall'applicazione dello stesso modello a fondo mobile, tarato sul biennio 2007-2009. La Figura 23 riporta la serie di portate liquide e solide utilizzate nella modellazione: la serie risulta condensata rispetto a quella storica in quanto le portate che non determinano trasporto solido (portate inferiori di  $550 \text{ m}^3/\text{s}$ ) non sono state considerate al fine di ottimizzare quanto possibile i tempi di calcolo, senza inficiare i risultati.

R.T.P.:

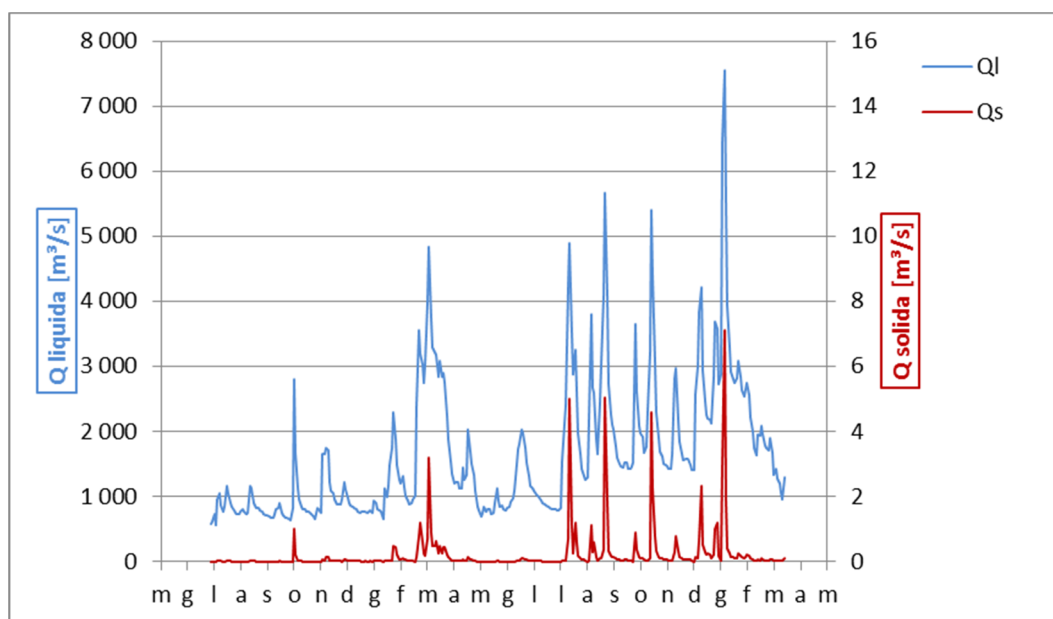


Figura 23 – Serie di portate liquide e solide utilizzate nella modellazione.

### 3.3.2. Scabrezza

Per quanto riguarda le scabrezze, sono stati inseriti nel modello valori che tengono conto delle caratteristiche vegetazionali, di uso del suolo e granulometriche in alveo. In generale si è distinto tra:

- l'alveo di magra;
- le barre sabbiose;
- le barre fluviali vegetate e le aree golenali caratterizzate da vegetazione o colture erbacee;
- le barre fluviali vegetate e le aree golenali caratterizzate da presenza di alberi e arbusti.

I valori di scabrezza sono stati tarati sulla base dei livelli corrispondenti alla piena del 2000, facendo riferimento ai valori riportati nel documento dell'Autorità di Bacino del fiume Po "Aggiornamento catasto arginature del fiume Po da foce Tanaro all'incile del Po di Goro – Riepilogo dati principali (nov. 2004)".

### 3.3.3. Opzioni di calcolo utilizzate e formule di trasporto solido

Lo schema di calcolo morfodinamico si compone di diverse componenti; quelle utilizzate nelle simulazioni sono:

- Helical Flow: il modulo computa il flusso elicoidale in presenza di curve ed i suoi effetti sul trasporto in sospensione;
- Sediment Transport (bed load and/or suspended load): il modulo riguarda il trasporto solido e permette di scegliere i parametri e le formulazioni;
- Alluvial Resistance: questa opzione consente di modificare il coefficiente di scabrezza in funzione dell'altezza d'acqua nella cella e di altri parametri di calcolo – questa componente è stata utilizzata solo nei primi tratti di studio, dove il fiume risulta più sinuoso;
- Morphological Update: calcola le variazioni altimetriche del fondo.

R.T.P:

Il modulo morfodinamico, oltre all'equazione di continuità dei sedimenti, include diverse formule di trasporto solido. In generale, il trasporto al fondo e in sospensione vengono calcolati separatamente:

- il trasporto al fondo (bed load) viene valutato calcolando la capacità di trasporto al fondo in forma esplicita note le grandezze idrodinamiche; il valore viene poi modificato tenendo conto dell'effettiva disponibilità di volume di sedimento rispetto alla capacità calcolata;
- il trasporto in sospensione (suspended load) è valutato risolvendo l'equazione convettiva-diffusiva scritta per la rappresentazione della dinamica sul piano orizzontale della concentrazione  $c$  media sulla verticale.

La formula di Van Rijn è stata utilizzata per avere indicazioni sulla ripartizione tra trasporto al fondo e trasporto in sospensione nei tratti di studio, in quanto questa formula dipende, oltre che dal deflusso e dalle caratteristiche dei sedimenti, anche dalle condizioni critiche di incipiente movimento della fase in sospensione, e permette di calcolare le due componenti separatamente.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando la formulazione di Engelund & Hansen, in cui la ripartizione tra trasporto solido sospeso e al fondo è stata imposta secondo i test preliminari effettuati utilizzando la formula di van Rijn.

La **calibrazione morfodinamica** ha come obiettivi il rispetto dei volumi movimentati e la corretta rappresentazione della morfologia fluviale nel tempo. In MIKE 21C i parametri che si possono regolare a tal fine e che compaiono nelle diverse formulazioni del trasporto solido sono principalmente l'effetto dei flussi elicoidali e delle pendenze del fondo alveo sul trasporto solido al fondo, che controllano entità e direzione dell'attrito al fondo e quindi del trasporto solido in direzione trasversale, e l'intensità delle formule di trasporto.

Il modello tarato nell'ambito dello Studio Po 365 è stato ritenuto adeguato a rispondere agli obiettivi dello studio morfodinamico che è parte del presente progetto. Le attività di calibratura (Po 365) si sono basate sui seguenti aspetti:

- non avendo a disposizione misure batimetriche ante e post un evento significativo, si è fatto riferimento ai dati topografici disponibili (DTM del 2005) ed alle ortofoto disponibili per diversi anni nel periodo considerato (2000, 2005, 2010, 2012);
- la taratura del modello si è basata sui bilanci volumetrici ricavati dal Piano Generale di Gestione Sedimenti (in seguito PGGs);
- la fase di calibrazione del modello ha preso in considerazione diversi aspetti dell'evoluzione morfologica, quali l'evoluzione delle barre durante la simulazione;
- sono stati calibrati i parametri che regolano la componente trasversale del trasporto solido, avvicinando il modello ad un calcolo quasi3D;
- i risultati del modello in termini di modifiche batimetriche (zone in deposito/erosione) hanno mostrato una buona corrispondenza con il dato reale dato dal confronto delle batimetrie rilevate nel 2010 e nel 2005;
- la calibrazione del modello in termini di bilanci volumetrici è avvenuta simulando il biennio 03.07.2007 – 03.07.2009, regolando i parametri che regolano l'intensità delle formule di trasporto; la seguente Tabella 3 mostra i risultati della taratura, ottenuta nello Studio Po 365, in termini di

R.T.P:

bilancio volumetrico dei sedimenti nei due tratti di studio confrontato con i dati del PGSS e delle batimetrie 2005-2010.

**Tabella 3 - Risultati della taratura, ottenuta nello Studio Po 365, in termini di bilancio volumetrico dei sedimenti nei due tratti di studio confrontato con i dati del PGSS e delle batimetrie 2005-2010**

Tratto	affluenti aggiunti in ingresso al tratto	Volume in ingresso medio annuo [Mm <sup>3</sup> ]	Volume in uscita medio annuo [Mm <sup>3</sup> ]	Bilancio annuo modellazione (taratura 2007-2009) [Mm <sup>3</sup> ]	Bilancio annuo PGSS [Mm <sup>3</sup> ]
Monte		6.373	6.276	0.096 (deposito)	0.100 (deposito)
Valle	Panaro	6.405	5.875	0.530 (deposito)	0.417 (deposito)

### 3.4. Risultati della modellazione a fondo mobile

La modellazione morfodinamica ha consentito di determinare le zone in deposito/erosione, la complessiva variazione delle quote del fondo alveo nello scenario di progetto ed i conseguenti tiranti idrici che si instaurano per diverse portate.

I risultati del modello numerico hanno dato indicazioni per individuare successivi affinamenti dello scenario di progetto; modellando in maniera iterativa diverse configurazioni delle opere per numero, posizione, lunghezza ed inclinazione delle stesse.

Complessivamente, le simulazioni effettuate hanno analizzato:

- lo scenario senza nuove opere;
- lo scenario con opere come da progetto preliminare;
- alcuni scenari preliminari del progetto definitivo con una configurazione delle opere via via ottimizzata;
- lo scenario con tutte le opere individuate nel presente progetto definitivo;
- lo scenario con le opere selezionate dallo scenario complessivo, che rientrano nel finanziamento disponibile e possono considerarsi il primo step di realizzazione.

Di seguito si descrivono le considerazioni emerse dalle analisi effettuate ed i relativi estratti cartografici dalle analisi numeriche.

In tutti i casi sono state effettuate dapprima le simulazioni a fondo mobile, sul periodo individuato di due anni; successivamente, si è estrapolata la batimetria finale di calcolo su cui sono state effettuate le verifiche a fondo fisso, per le portate di interesse, ovvero: 530 m<sup>3</sup>/s, ai fini della verifica della risoluzione delle criticità per la navigazione, 800, 1450, 2500 m<sup>3</sup>/s ai fini di verifiche di carattere ambientale.

#### 3.4.1. Scenario senza nuove opere

La simulazione dello scenario che prevede di mantenere lo stato attuale del corso d'acqua, senza introduzione di nuove opere, mostra una presenza diffusa di criticità lungo il tratto in esame.

R.T.P.:

Il modello mostra come il fiume tende in molti casi ad appiattire la sezione d'alveo, pertanto nei tratti più larghi si confermano le criticità dovute alla presenza di bassi fondali. Il modello conferma inoltre l'evoluzione del tratto di Ficarolo: il fiume stringe in destra, accorciando il suo percorso e depositando nella curva esterna (Figura 24).

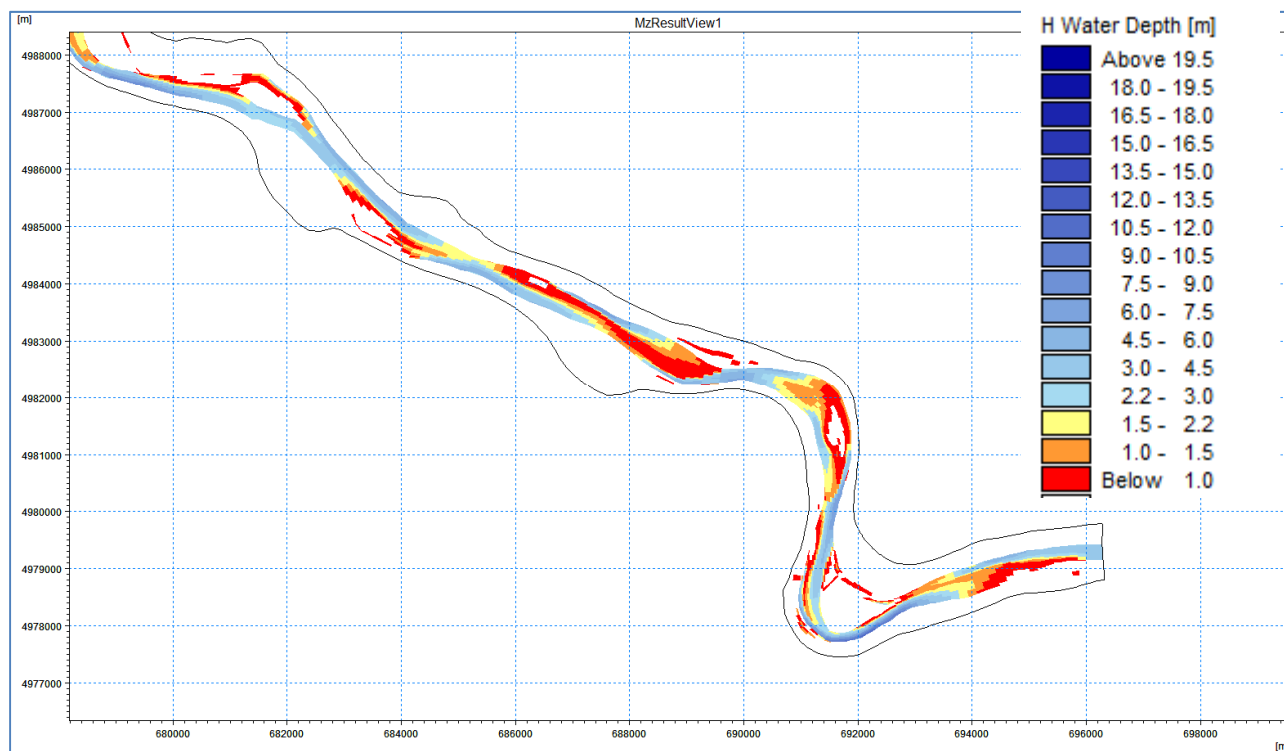


Figura 24 – Simulazione dello scenario senza opere: risultati in corrispondenza del primo tratto in termini di livelli per una portata di 530 m<sup>3</sup>/s.

### 3.4.2. Scenario con opere come da progetto preliminare

L'inserimento nel modello delle opere come da progetto preliminare mostra risultati parzialmente soddisfacenti e criticità che persistono in molti tratti, in termini di tiranti minimi. In particolare i risultati del modello evidenziano come i pennelli definiti a livello preliminare portino ad un eccessivo approfondimento del fondo del fiume localizzato di fronte alle opere, di oltre 5 metri, e la presenza di tratti ancora molto estesi non risolti a Calto, nella curva di Ficarolo, ecc. (Figura 25, Figura 26).

R.T.P:

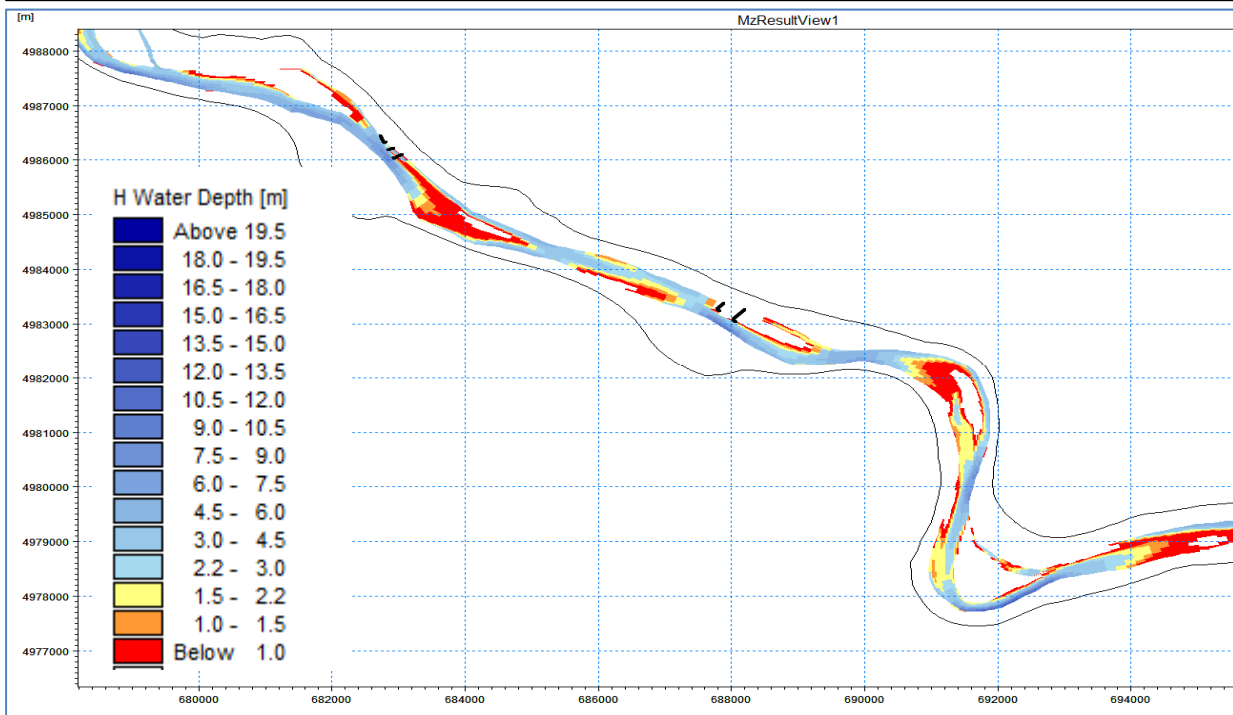
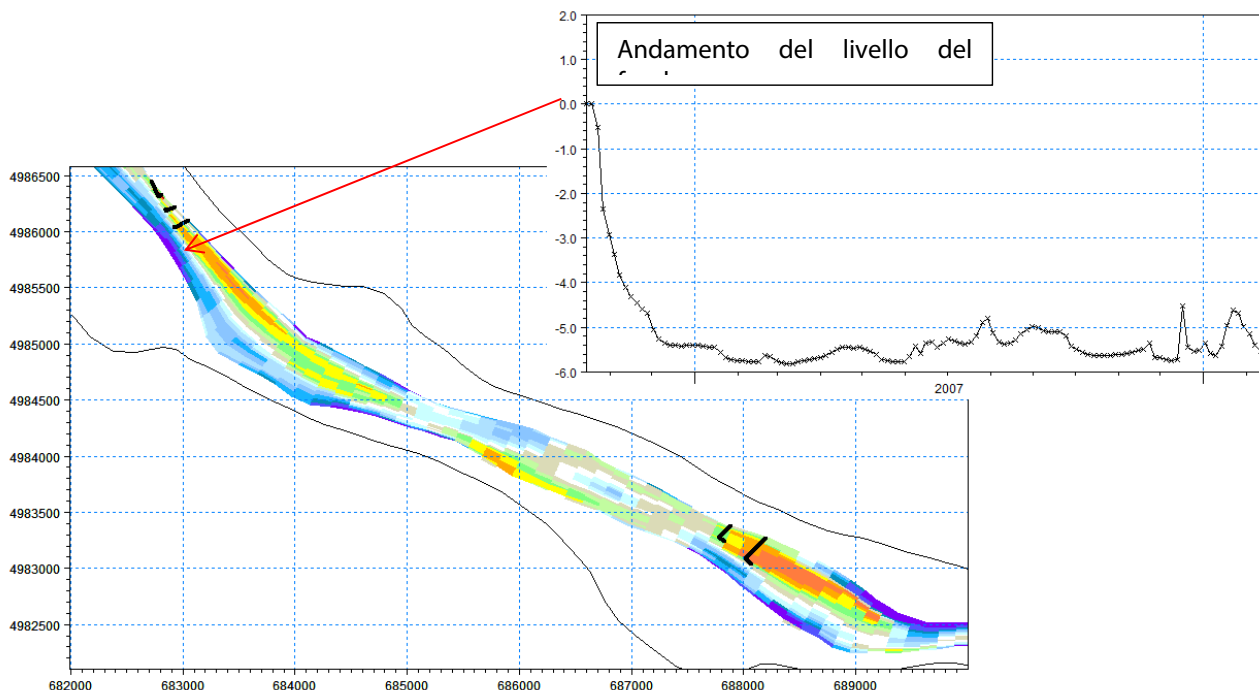


Figura 25 – Simulazione dello scenario con opere previste dal progetto preliminare: risultati in corrispondenza del primo tratto in termini di livelli per una portata di 530 m<sup>3</sup>/s.

R.T.P:



**Figura 26 – Simulazione dello scenario con opere previste dal progetto preliminare: abbassamento del fondo in un tratto di fronte all’opera.**

I risultati ottenuti nel secondo tratto con inserimento delle opere da progetto preliminare sono ritenuti soddisfacenti a soddisfare gli obiettivi progettuali. La configurazione di tali opere è stata pertanto ottimizzata, al fine di ridurre il numero e dimensioni dei pennelli e distribuire le risorse disponibili per risolvere i tratti critici residui a monte.

### 3.4.3. Scenario completo individuato nel progetto definitivo

Il progetto definitivo ha analizzato configurazioni che ottimizzano il raggiungimento degli obiettivi preposti lungo l’intero tratto di analisi. La modellazione numerica ha consentito di affinare per fasi successive la soluzione proposta.

Le opere, le cui finalità sono descritte anche al precedente paragrafo 2.4, consistono in:

- introduzione di ulteriori pennelli rispetto al progetto preliminare distribuiti lungo il tratto di analisi;
- introduzione di un’opera longitudinale a monte della curva di Ficarolo;
- riduzione della lunghezza dei pennelli previsti nel progetto preliminare.

La Figura 27 mostra i risultati ottenuti in termini di livelli per una portata di 530 m<sup>3</sup>/s: si osserva come le opere introdotte determinano un andamento sinuoso ma controllato del fiume e la risoluzione delle criticità in termini di tiranti idrici minime nell’intero tratto.

R.T.P:



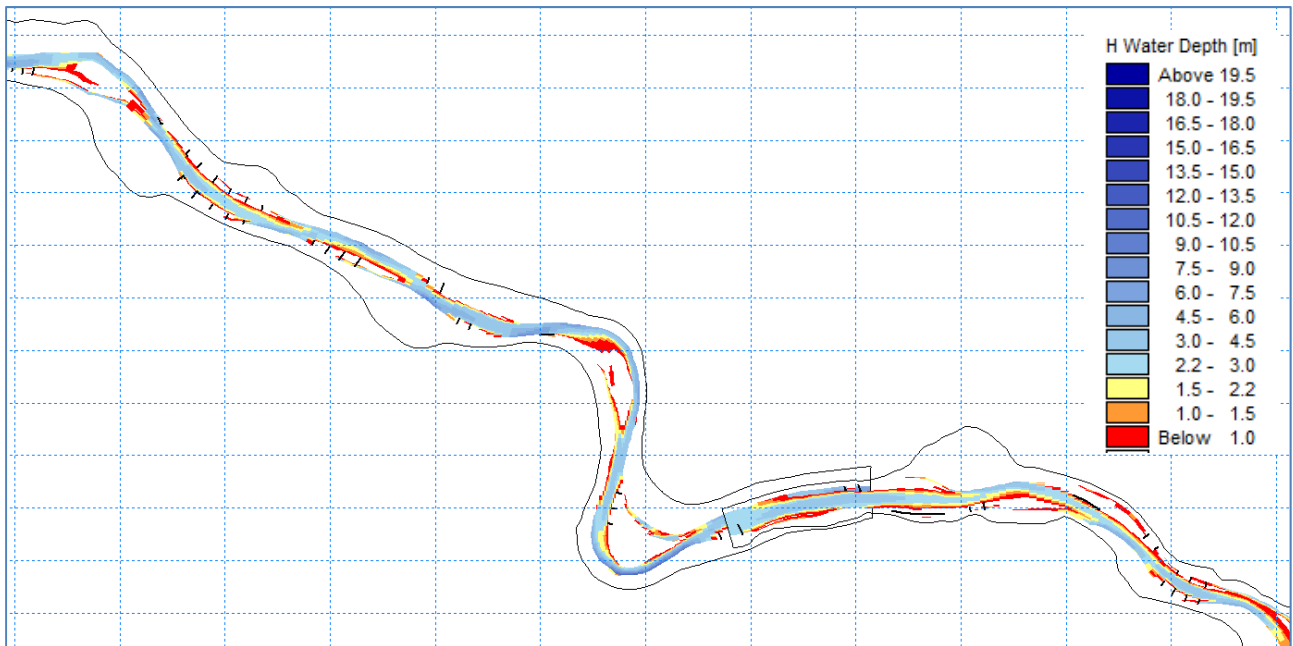
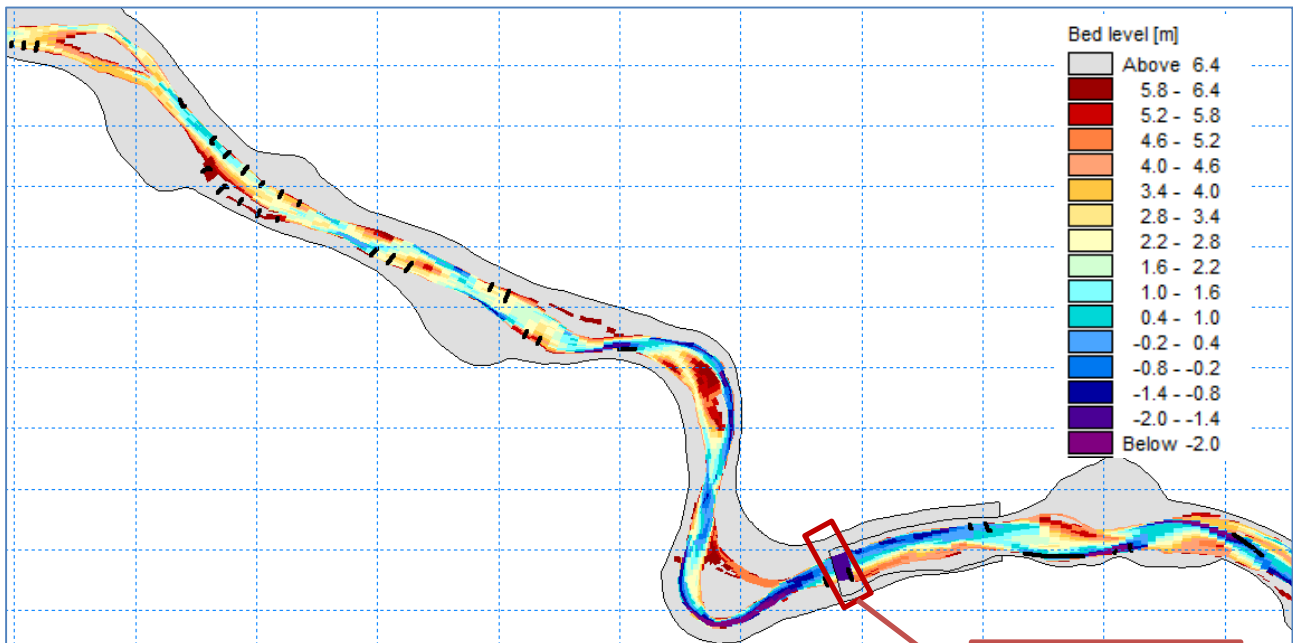


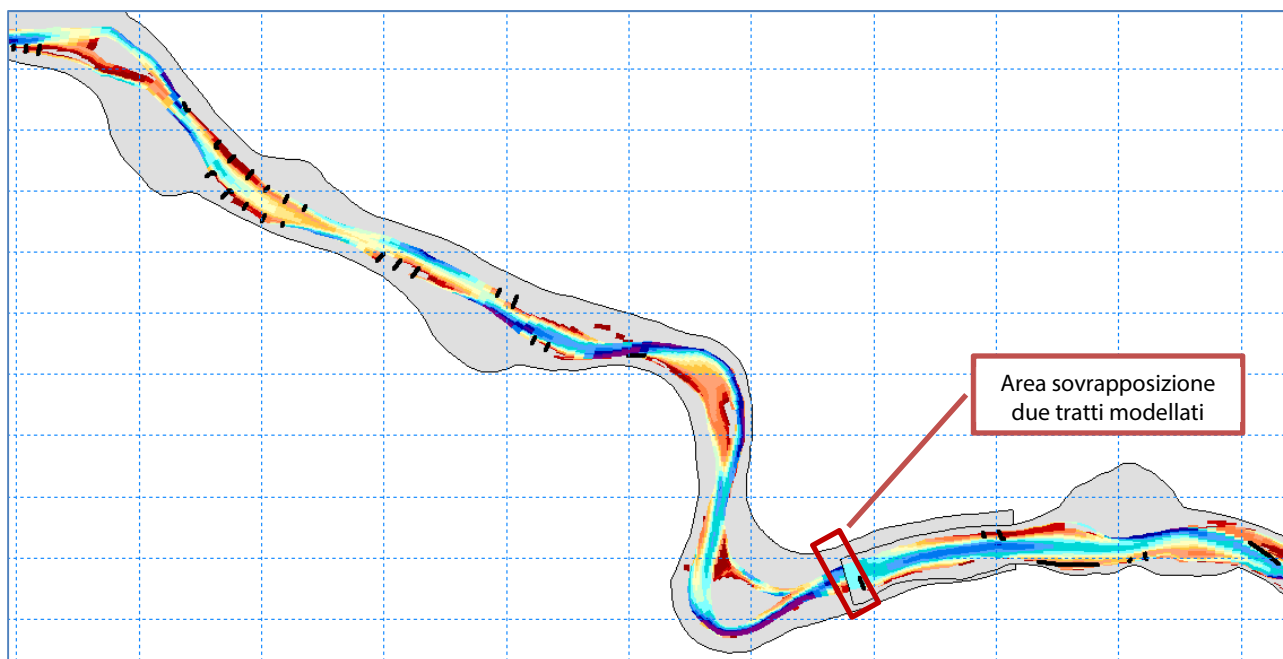
Figura 27 – Simulazione dello scenario con opere previste dal progetto definitivo (trattini neri): risultati in termini di livelli per una portata di 530 m<sup>3</sup>/s.

La Figura 28 riporta le batimetrie ad inizio e fine simulazione: le zone dove sono stati inseriti i pennelli mostrano zone di deposito, zone rosse a tergo dei pennelli, e di erosione fino a creare un canale navigabile piuttosto continuo. Si osserva come l'opera longitudinale in destra a monte di Ficarolo consente di spostare l'alveo di magra in curva. Il modello indica una zona di attenzione a valle della serie dei pennelli di Castelmassa, dove la larghezza del fiume è tale per cui il canale inciso fatica a crearsi.



Area sovrapposizione  
due tratti modellati

R.T.P.:

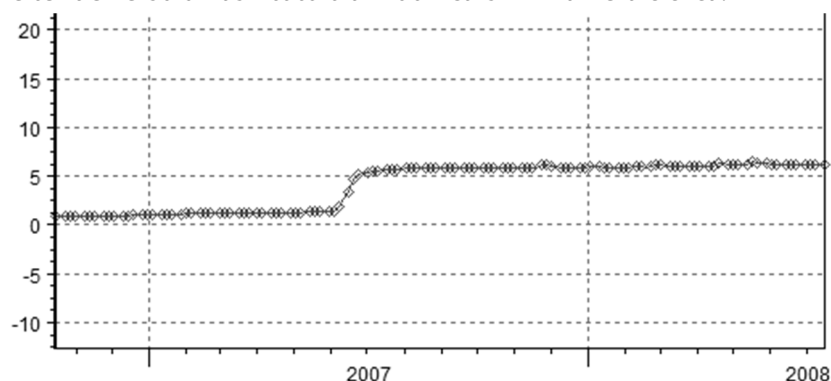


**Figura 28 – Simulazione dello scenario con opere previste dal progetto definitivo (trattini neri): batimetria ad inizio (in alto) e fine simulazione (in basso).**

I pennelli inducono effetti differenziati all'interno dell'alveo mobile, composti da effetti deposizionali nelle aree a tergo dei pennelli ed effetti erosivi nell'alveo canalizzato. Questo non comporta sostanziali differenze nel trasporto solido globale rispetto alla situazione attuale in quanto i due effetti sostanzialmente si compensano reciprocamente.

L'analisi dei risultati del modello numerico mostra che l'altimetria varia generalmente con andamento ciclico, mentre solo alcune zone tendono in maniera progressiva ad erosione o deposito, pur convergendo verso un punto di equilibrio.

A titolo di esempio, la seguente Figura 29 mostra l'andamento della quota di alcune celle lungo il tratto di studio, quota che tende verso un asintoto o a modificarsi in maniera ciclica.



R.T.P:

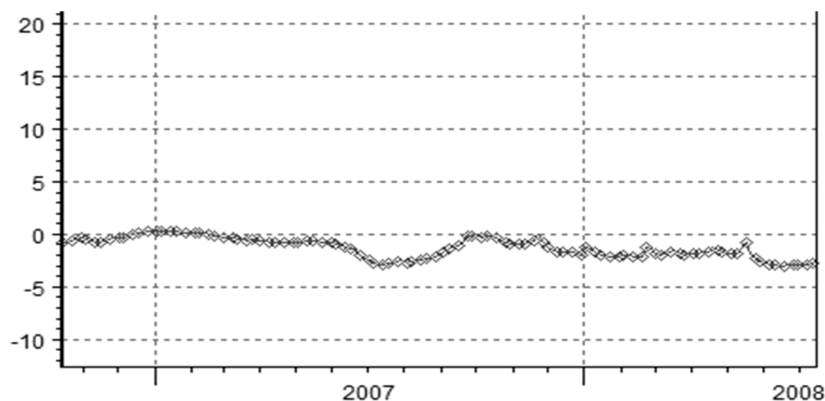


Figura 29 – Andamento della quota di alcune celle lungo il tratto di studio: in alto a tergo di un pennello, in basso in alveo.

I risultati del modello sono stati quindi esportati ed elaborati per individuare, in corrispondenza di condizioni di portata di interesse, livelli e velocità determinati dalle opere. Tali informazioni sono state utilizzate nell'ambito degli studi di carattere ambientale (S.I.A. e V.Inc.A.) del presente progetto.

La Figura 30 mostra l'elaborazione dei risultati in termini di alveo bagnato nello stato di progetto per diverse portate di riferimento. La Figura 31 mostra a titolo di esempio le velocità che si instaurano nel tratto tra Castelmassa e Calto per portate di 800 e 1450 m<sup>3</sup>/s.

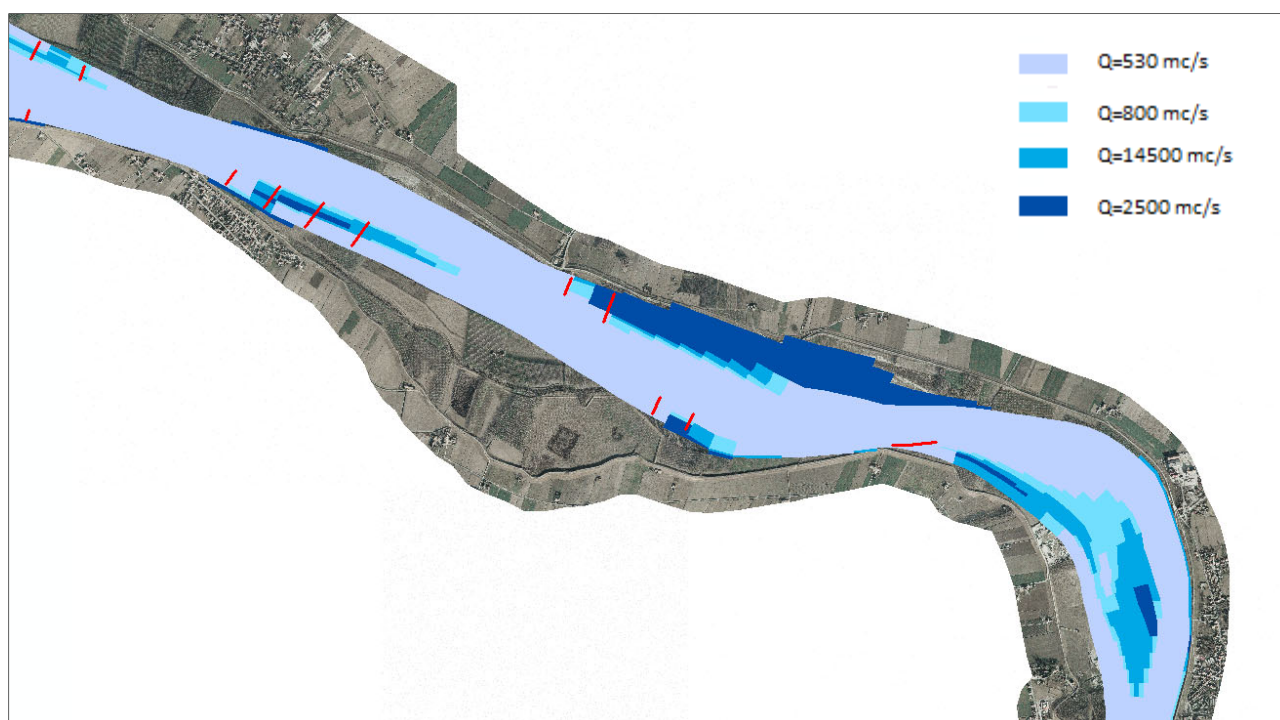


Figura 30 – Elaborazione dei risultati della modellazione: alveo bagnato nello stato di progetto per portate di 530, 800, 1450 e 2500 m<sup>3</sup>/s.

R.T.P:

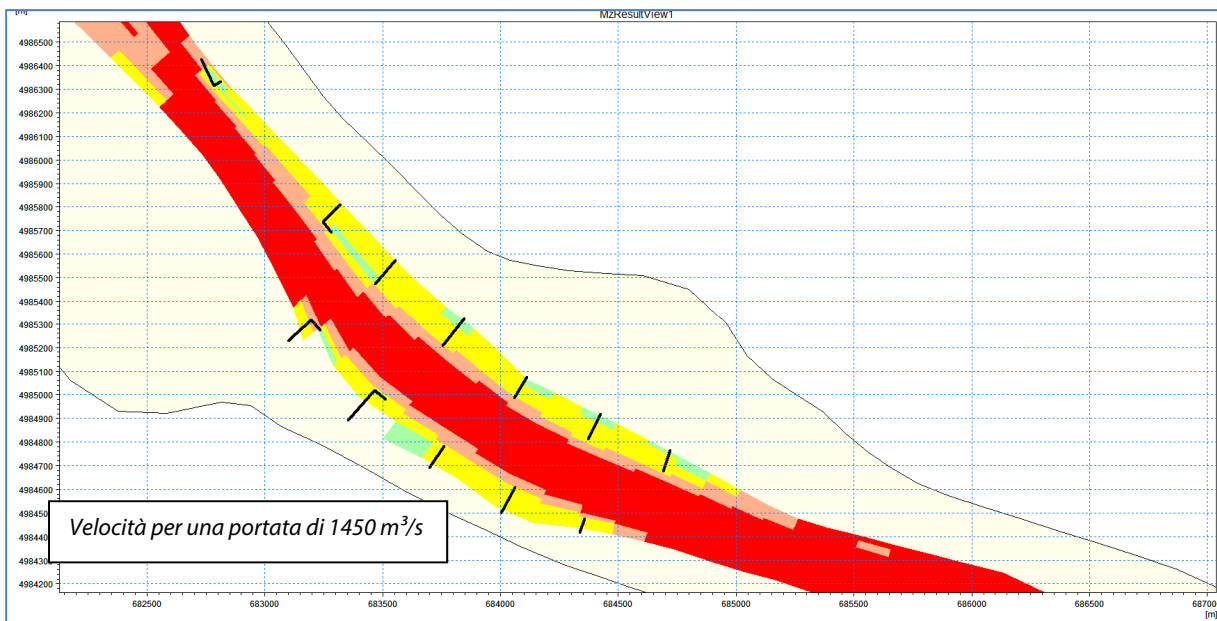
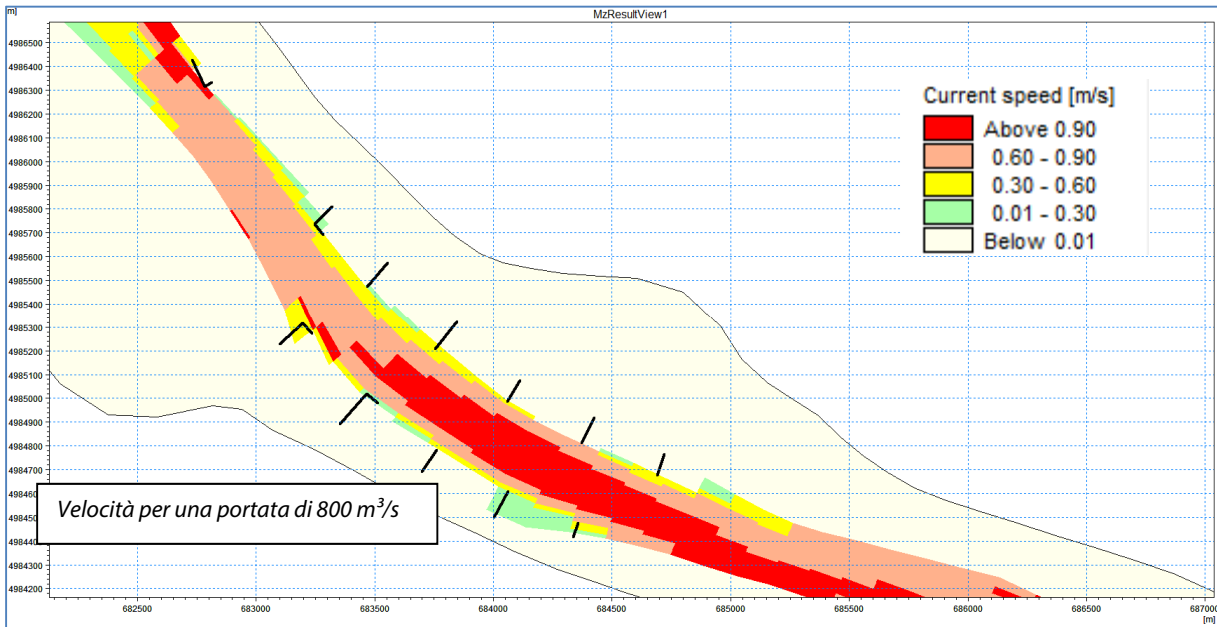


Figura 31 - Velocità nel tratto tra Castelmassa e Calto per portate di 800 e 1450 m<sup>3</sup>/s.

R.T.P.:

### 3.4.4. Scenario parziale individuato nel progetto definitivo

Al fine di progettare le opere per le quali è disponibile un finanziamento, dallo scenario completo sono state individuate alcune opere di sistemazione e che rappresentano la prima fase dell'intervento complessivo (opere indicate in rosso in Figura 32).

Per poterne verificare il funzionamento, le opere sono state inserite nel modello, simulando lo stesso periodo e stesse condizioni idrologiche rispetto ai casi precedenti. I risultati in termini di tiranti sono riportati in Figura 33.



Figura 32 – In rosso: opere selezionate come primo stralcio delle opere complessive individuate nel presente progetto definitivo. In giallo le opere di stralci successivi.

R.T.P:

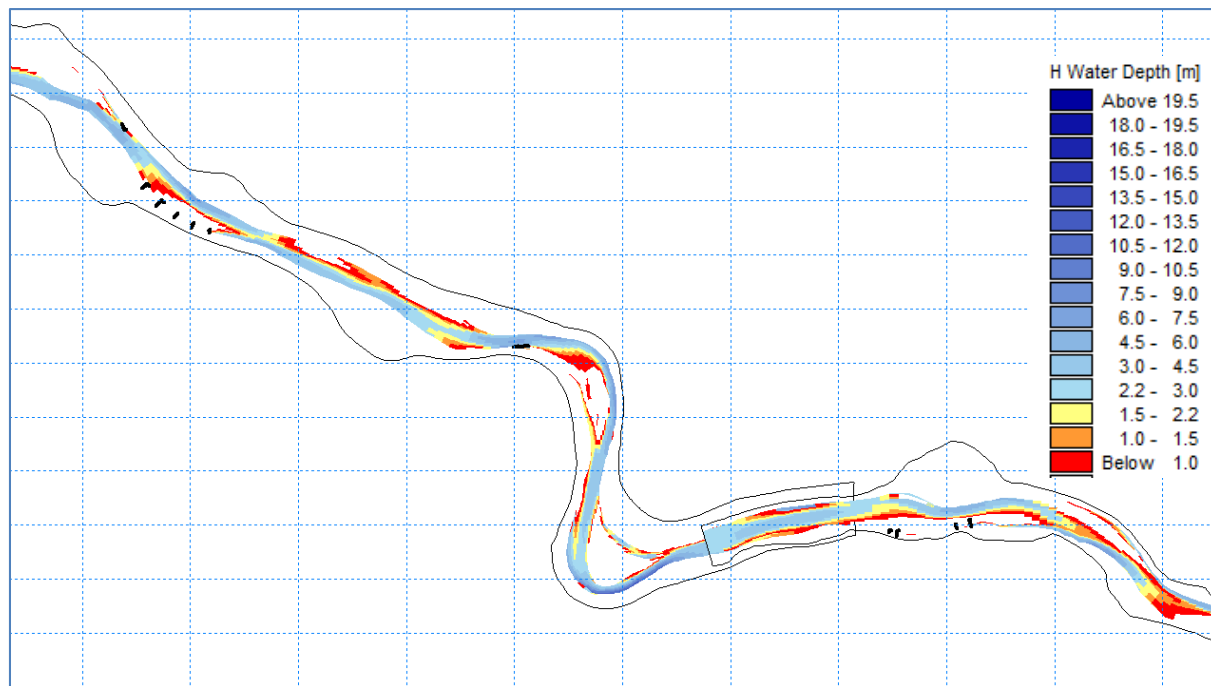


Figura 33 – Simulazione degli effetti delle opere selezionate dallo scenario completo, oggetto della presente progettazione: livelli corrispondenti ad una portata di 530 mc/s.

Dai risultati si osserva quanto segue:

- in questo caso l'andamento dell'alveo risulta meno sinuoso, in quanto le opere lungo una sola sponda fanno sì che il fiume tenda a rettificare il suo percorso;
- l'opera a monte di Ficarolo, in sponda destra, consente di spostare l'alveo di magra in sinistra, in corrispondenza della curva esterna;
- i risultati che si ottengono in termini di tiranti minimi sono comunque soddisfacenti;
- la criticità residua a valle di Stienta permane, in quanto rappresenta l'effetto della stabilizzazione del tratto di monte: alcune simulazioni di studio hanno mostrato che l'inserimento di pennelli oltre il tratto in esame, e più precisamente fino ad Occhiobello, risolve tale criticità e complessivamente il problema dei bassi fondali fino a Pontelagoscuro.

R.T.P.: