



AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO
UFFICIO OPERATIVO DI CREMONA

area Po lombardo - sub area Lombardia orientale
opere idrauliche di 3^ categoria - fiume Adda
(D.P.C.S. 21 aprile 1947 n. 261)

(CR-E-814)

OPERE DI REGIMAZIONE IDRAULICA/REALIZZAZIONE ARGINE
IN SINISTRA ADDA, IN COMUNE DI RIVOLTA D'ADDA (CR)
CUP B43 B12 000 030 001

IMPORTO COMPLESSIVO DI PERIZIA: Euro=1.100.000,00=

PROGETTO ESECUTIVO

elab.n. (rif. CR-E-814)

titolo della tavola

data

1.2

RELAZIONE IDRAULICA

scala

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA
A		
B		
C		
D		

COLLABORATORI PROGETTISTI

CAPO PROGETTO
(dott. ing. Marco LA VEGLIA)

(dott. ing. Isabella BOTTA)

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
(dott. ing. Luigi MILLE)

(geom. Fernando ALTOBELLO)

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO ESPROPRIATIVO
(dott. arch. Lorella TOGLIANI)

(arch. Giuliano BERNI)

(geom. Angelo ZERBINI)

Indice

Indice	1
Indice delle Figure	1
Indice delle Tabelle	2
1 Definizione della portata di progetto	4
1.1 Portate di piena registrate	4
2 Analisi idraulica	5
2.1 Assetto geometrico dell'alveo	5
2.2 Manufatti interferenti	11
2.3 Modalità di deflusso in piena	12
2.3.1 Schema di calcolo e modello idraulico	12
2.3.2 Condizioni al contorno e condizioni iniziali	22
2.3.3 Taratura del modello	23
2.3.4 Condizioni di riferimento	24
3 Verifica idraulica ed effetti degli interventi in progetto	24
3.1 Profilo di inviluppo di piena	24
3.1.1 Stato di fatto	24
3.1.2 Stato di progetto - Configurazione "1"	28
3.1.3 Stato di progetto - Configurazione "2"	33
3.1.4 Stato di progetto - Configurazione "3"	40
3.1.5 Fascia B di progetto da Studio di Fattibilità	46
3.1.6 Confronto tra le simulazioni eseguite	51

Indice delle Figure

Figura 1 - Individuazione della fascia B in corrispondenza del ponte dell'abitato di Rivolta d'Adda	4
Figura 2 - Ondata di piena nella stazione Lodi - novembre 2002	5
Figura 3 - Estratto DTM del tratto in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda	6
Figura 4 - Modellazione delle pile in alveo del ponte sulla S.P. 14	7
Figura 5 - Mesh di calcolo per la simulazione bidimensionale	7
Figura 6 - Confronto DTM stato di fatto e configurazioni di progetto	8
Figura 7 - Carta di uso del suolo in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda	9
Figura 8 - Carta di uso del suolo in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda: Legenda	10
Figura 8 - Rilevato e ponte stradale della S.P. 14	11
Figura 9 - Prospetto e pianta del ponte sul fiume Adda in Comune di Rivolta d'Adda	11

Figura 10 - Briglia in corrispondenza del vecchio ponte stradale di Rivolta d'Adda	12
Figura 11 – Mesh bidimensionale ai volumi finiti: a) Cell centred mesh b) Cell vertex mesh.....	16
Figura 12 – Contorno bagnato dell'elemento di confine con condizione di wall friction	18
Figura 13 – Portata attraverso lo stramazzo	20
Figura 14 - Onda di piena di progetto - T = 200 anni.....	23
Figura 15 – Profilo longitudinale del tratto modellato – Configurazione di stato di fatto	25
Figura 16 – Distribuzione planimetrica dei tiranti idrici in corrispondenza del picco di piena	26
Figura 17 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda (Configurazione di stato di fatto)	27
Figura 18 - Distribuzione planimetrica delle velocità in corrispondenza del picco di piena (Configurazione di stato di fatto).....	27
Figura 19 – Particolare della distribuzione del vettore velocità nello stato di fatto	28
Figura 21 - Planimetria nuovo rilevato arginale di progetto - Configurazione "1".....	29
Figura 22 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo (Configurazione "1").....	30
Figura 23 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda (Configurazione "1").....	31
Figura 24 – Particolare della distribuzione del vettore velocità.....	31
Figura 25 – Aree con incremento del tirante rispetto allo stato di fatto	32
Figura 26 - Confronto tirante (Configurazione "1" < Stato di fatto).....	33
Figura 27 - Planimetria nuovo rilevato arginale di progetto - Configurazione "2".....	34
Figura 28 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda (Configurazione "2").....	35
Figura 29 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo (Configurazione "2").....	36
Figura 31 – Particolare della distribuzione del vettore velocità (Configurazione "2").....	37
Figura 32 - Aree con incremento del tirante rispetto allo stato di fatto	38
Figura 33 - Confronto tirante (Configurazione "2" < Stato di fatto).....	39
Figura 33 - Planimetria nuovo rilevato arginale di progetto - Configurazione "3".....	40
Figura 34 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda (Configurazione "3").....	41
Figura 35 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo (Configurazione "3").....	42
Figura 36 – Particolare della distribuzione del vettore velocità (Configurazione "3").....	43
Figura 37 - Aree con incremento del tirante rispetto allo stato di fatto	44
Figura 38 – Aree con decremento del tirante rispetto allo stato di fatto	45
Figura 39 - Planimetria nuovo rilevato previsto dalla B di progetto da Studio di Fattibilità.....	46
Figura 40 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda ("B di progetto Studio di Fattibilità").....	47
Figura 41 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo ("B di progetto Studio di Fattibilità")	48
Figura 42 – Particolare della distribuzione del vettore velocità ("B di progetto Studio di Fattibilità")	49
Figura 43 - Confronto tra Configurazione "1" e B di progetto Studio di Fattibilità	50
Figura 44 - Confronto tra Configurazione "2" e B di progetto Studio di Fattibilità	50
Figura 45 - Observation points	51

Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Valori dei coefficienti di scabrezza del modello bidimensionale.....	24
--	----



 Studio di Ingegneria	Sede Legale: Via Crocette 26 – Curtatone (MN) Sede Operativa: C.so Garibaldi 79 – Villafranca di Verona (VR) Tel-Fax: 045/2220488 – Mail: eos.ingegneria@gmail.com	 Agenzia Interregionale per il fiume Po
---	--	---

Tabella 2 - Confronto tra i tiranti.....	52
Tabella 3 - confronto tra i livelli.....	52
Tabella 4 - confronto tra i livelli.....	52
Tabella 5 - Confronto tra le portate	53
Tabella 6 - Confronto tra i volumi totali	54

1 Definizione della portata di progetto

Nella determinazione della piena di progetto, il tempo di ritorno utilizzato nelle verifiche idrauliche deve risultare non inferiore, per i corsi d'acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali, a quello assunto per la delimitazione della fascia B.

Si ricorda, come indicato dall'AdBPO nel Piano Stralcio per l'Assetto idrogeologico del fiume Po che, per i corsi d'acqua arginati (arginature esistenti), la Fascia B è fatta coincidere con il piede esterno dell'argine maestro, anche nelle situazioni in cui l'argine maestro sia eventualmente inadeguato al contenimento della piena di riferimento per la fascia stessa (tempo di ritorno 200 anni). Nella Figura 1 si riporta un estratto dell'ortofoto in cui sono evidenziati i limiti della fascia B secondo la classificazione del P.A.I.

Nella presente relazione è stato fatto riferimento al **tempo di ritorno di 200 anni** sia per la scelta della condizione al contorno di monte del modello bidimensionale, sia per la verifica delle quote delle sezioni trasversali del corso d'acqua comprese nel tratto modellato.

I dati utilizzati sono stati ricavati dai documenti ufficiali a disposizione e provenienti dal Piano di Assetto Idrogeologico del fiume Po e dallo "Studio di fattibilità" del fiume Adda.



Figura 1 - Individuazione della fascia B in corrispondenza del ponte dell'abitato di Rivolta d'Adda

1.1 Portate di piena registrate

La piena più recente che ha provocato una parziale inondazione dell'abitato di Rivolta d'Adda, nonché la chiusura temporanea del rilevato sulla S.P. 13 in corrispondenza del ponte sul fiume Adda, fa riferimento all'evento alluvionale del 23-27 novembre 2002. Tale evento ha interessato sia il bacino del fiume Adda che del Lambro a partire dal 12 novembre.

Durante l'evento nelle stazioni di Olginate e di Medolago (bacino dell'Adda sublacuale) si sono registrati complessivamente 279.8 mm e 209.4 mm di pioggia caduta, pari a circa 1/4 delle precipitazioni medie annue; per ampi tratti del bacino del Brembo le precipitazioni hanno superato il tempo di ritorno di 200 anni

L'onda di piena dell'evento ricostruita nella sezione dell'Adda a Lodi presenta una portata massima al colmo stimata in 1575 m³/s. In figura si riporta l'onda di piena di Lodi (fonte: Autorità di Bacino del fiume Po. Rapporto sulla piena del novembre 2002 in Lombardia. Fiumi Lambro e Adda sottolacuale - 2° versione).

Adda a Lodi - Piena novembre 2002

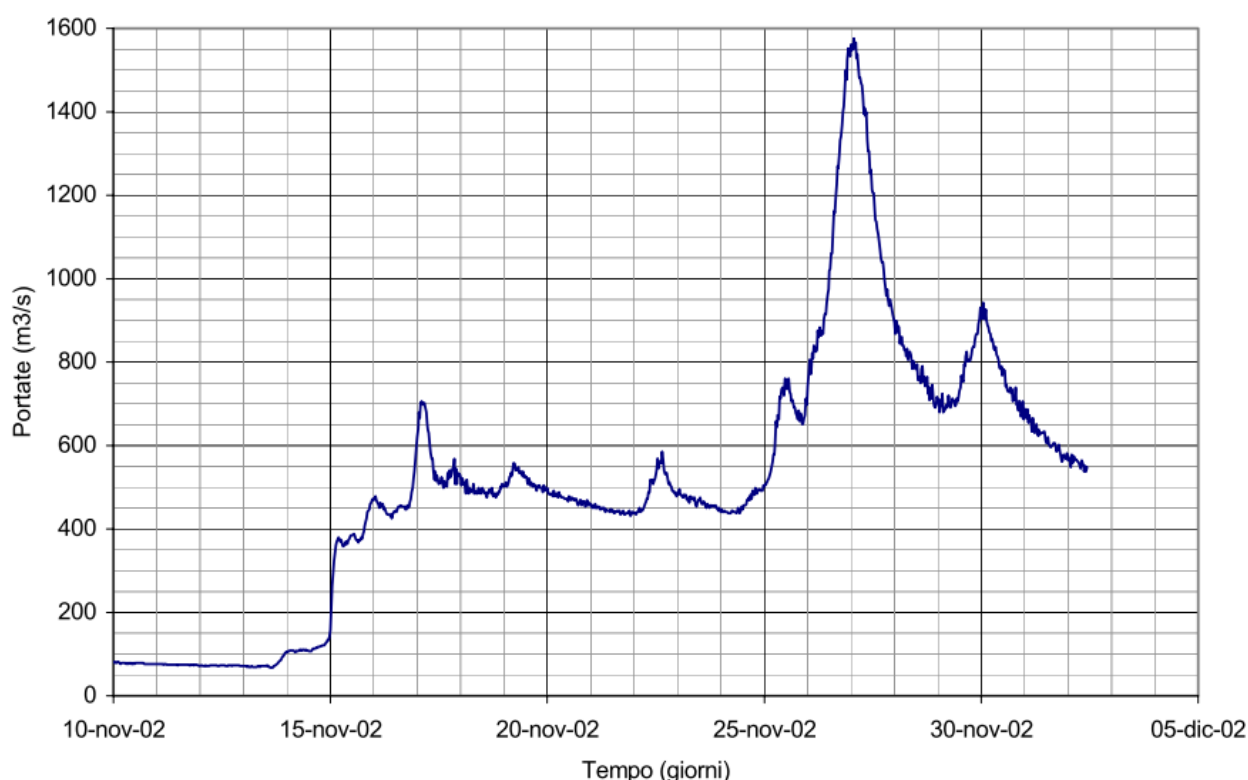


Figura 2 - Onda di piena nella stazione Lodi - novembre 2002

2 Analisi idraulica

2.1 Assetto geometrico dell'alveo

Il tratto su cui è stata estesa l'analisi è compreso tra le sezioni, seguendo la numerazione dello Studio di Fattibilità, 149 a monte e 136 a valle, per un totale di circa 8 km.

In relazione all'estensione del tratto e alle analisi da condurre, si è scelto di utilizzare il modello digitale del terreno (DTM) a maglia regolare pari a 1x1 m ottenuto tramite tecnologia LIDAR e aggiornato al febbraio

2013. Il DTM del tratto di Adda considerato copre tutta la fascia fluviale B ed è stato fornito dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po – Ufficio Operativa di Cremona.

Per simulare con maggiore precisione il tratto, è stata implementata la parte batimetrica non presente nel DTM utilizzato, tramite l'interpolazione lineare planoaltimetrica delle sezioni trasversali più recenti rilevate da AdBPo nell'ambito dello Studio di Fattibilità citato.

Per l'interpolazione è stato utilizzato un sistema di riferimento non cartesiano ma solidale alla direzione longitudinale del corso d'acqua. Ciò ha consentito la corretta distribuzione planimetrica dell'interpolazione effettuata.

Si riporta in Figura 3 un estratto del Modello Digitale del Terreno 2013, già corretto con la parte batimetrica del fiume Adda nel tratto oggetto di modellazione bidimensionale.



Figura 3 - Estratto DTM del tratto in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda

Le pile in alveo del ponte della S.P. 14 sono state simulate mediante una condizione di "wall" invalicabile. La forma delle pile, rettangolare con fronte triangolare, è stata approssimata alla medesima forma geometrica. L'effetto dell'inserimento delle pile su DTM è visibile nella figura seguente.

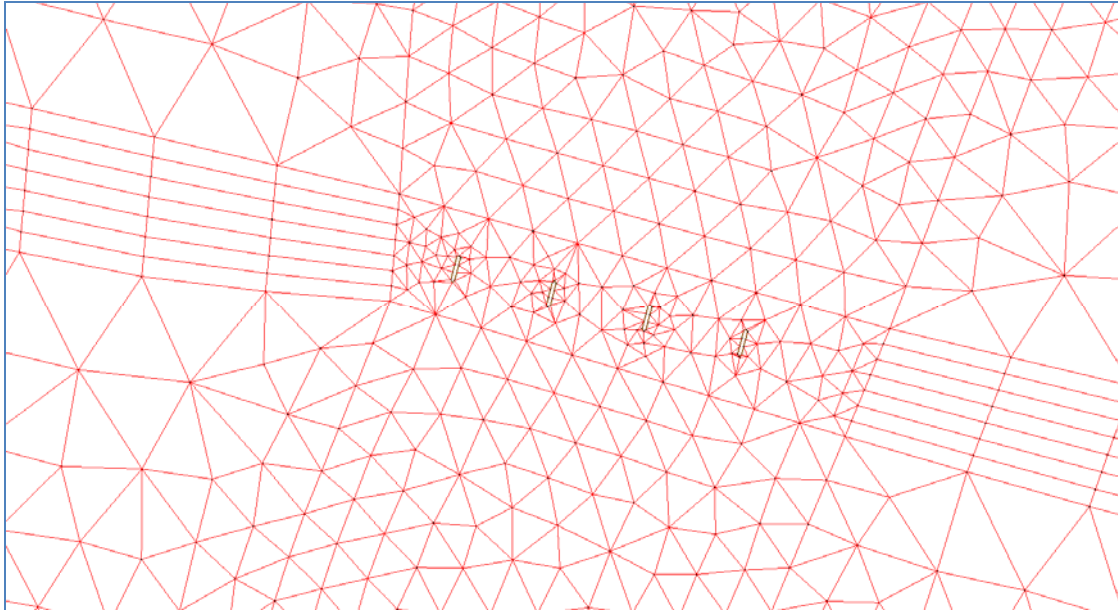


Figura 4 - Modellazione delle pile in alveo del ponte sulla S.P. 14

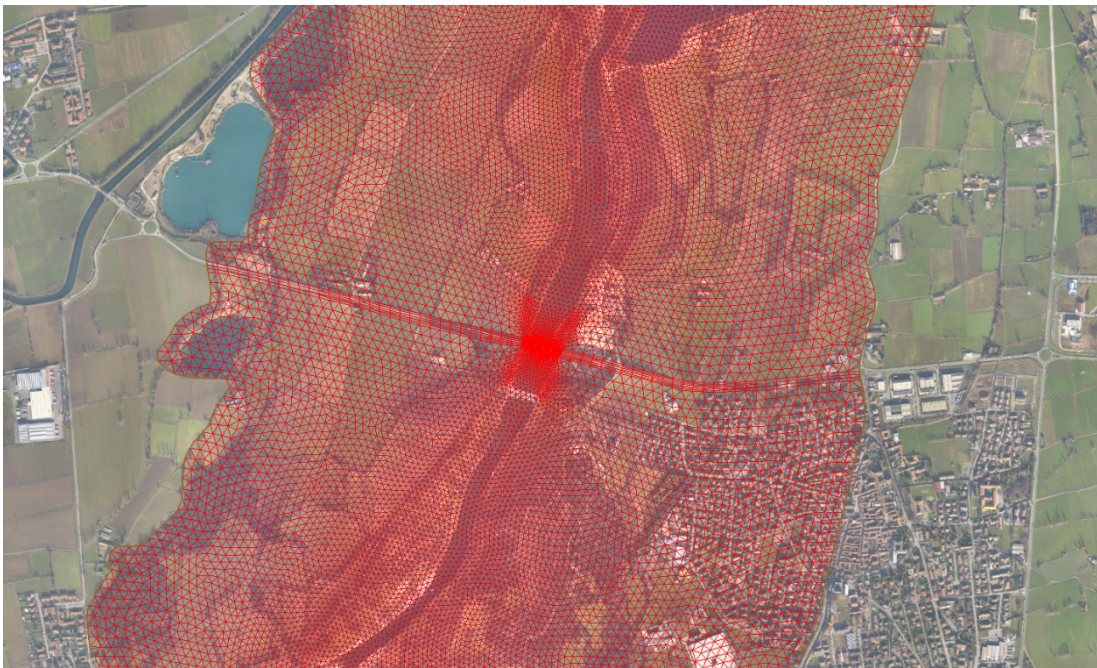
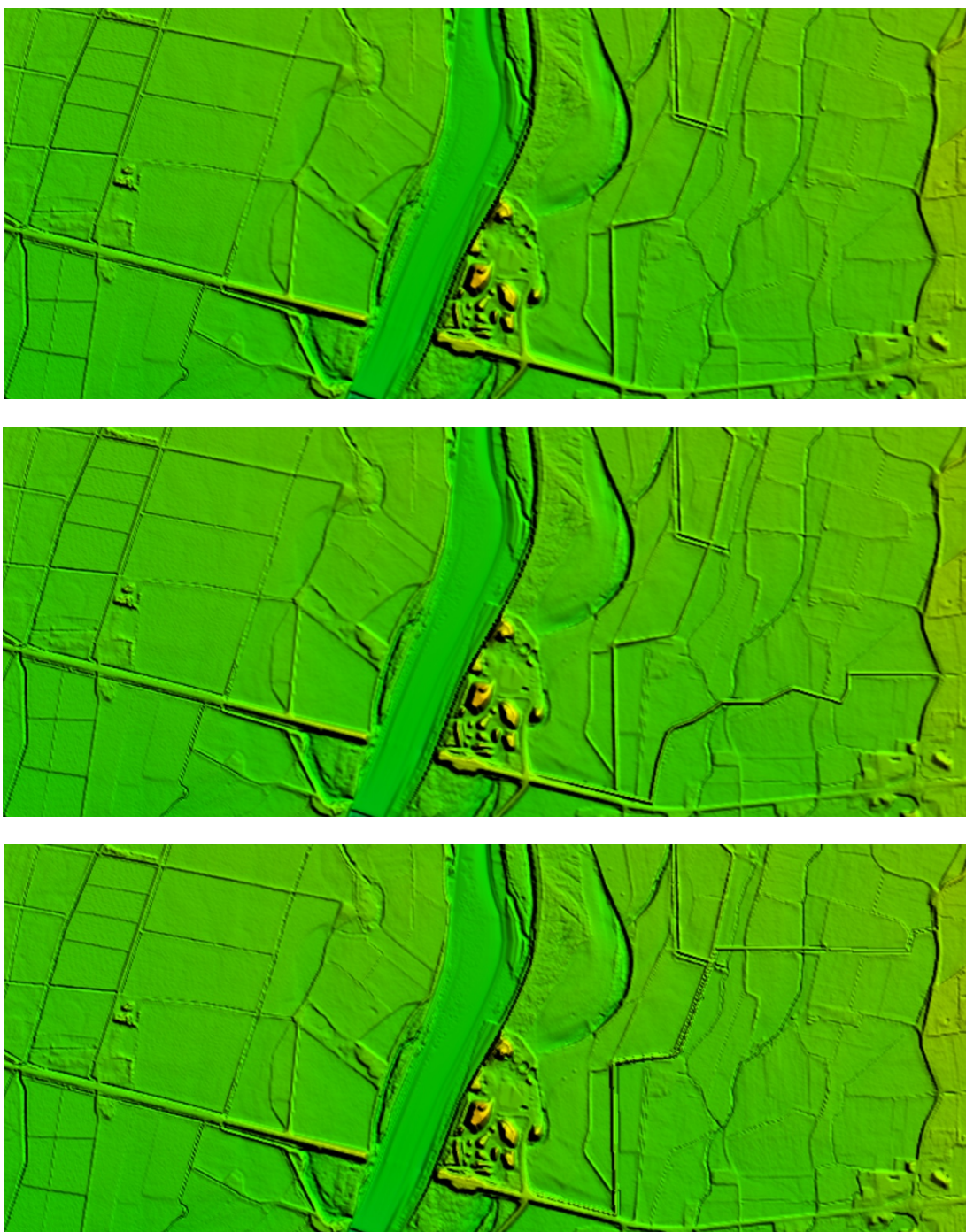


Figura 5 - Mesh di calcolo per la simulazione bidimensionale

Le configurazioni di stato di progetto si sono ottenute a partire dalla configurazione attuale alla quale sono stati inseriti i tracciati degli argini nelle configurazioni 1 e 2.

Nella figura seguente si riporta un estratto del DTM in cui sono presenti gli argini in configurazione di progetto.



**Figura 6 - Confronto DTM stato di fatto e configurazioni di progetto
(stato di fatto: alto - configurazione 1: centro - configurazione 2: basso)**

Per la base del calcolo dei coefficienti di scabrezza totale, si è fatto riferimento alla carta di uso del suolo della Regione Lombardia a partire dalla quale si sono dedotti i valori di alveo inciso e golena poi utilizzati nella modellazione.

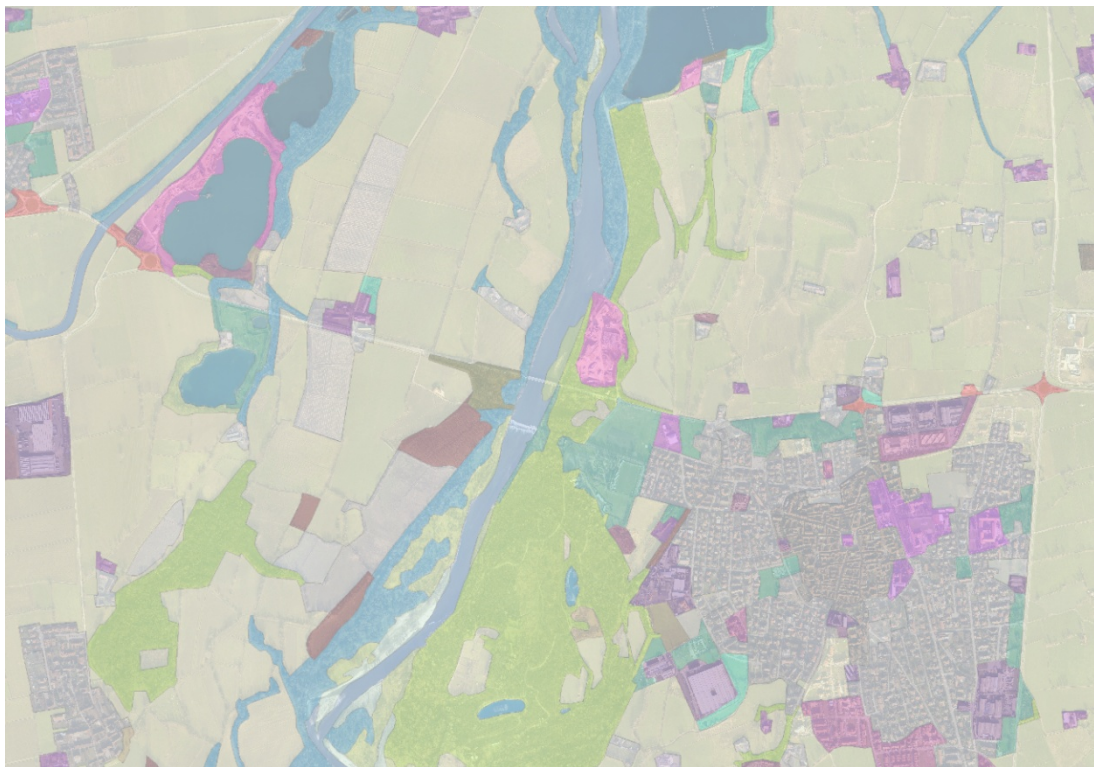


Figura 7 - Carta di uso del suolo in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda

Legenda

Filari e siepi

- Continuo
 - - - Discontinuo

DUSAF21

extra-regione	12124 - Cimiteri	21141 - Colture floro-vivaistiche a pieno campo
extra-regione	12125 - Aree militari obliterate	21142 - Colture floro-vivaistiche protette
1111 - Tessuto residenziale continuo denso (>80% - grandi ed. residenziali)	1221 - Reti stradali e spazi accessori	2115 - Orti familiari
1112 - Tessuto residenziale continuo mediamente denso (>80% - piccoli ed. residenziali)	1222 - Reti ferroviarie e spazi accessori	213 - Risaie
1121 - Tessuto residenziale discontinuo (50 - 80%)	123 - Aree portuali	221 - Vigneti
1122 - Tessuto residenziale rado e nucleiforme (30 - 50%)	124 - Aeroporti ed eliporti	222 - Frutteti e frutti minori
1123 - Tessuto residenziale sparso (10 - 30%)	131 - Cave	223 - Oliveti
11231 - Cascine	132 - Discariche	2241 - Pioppeti
12111 - Insediamenti industriali, artigianali, commerciali	133 - Cantieri	2242 - Altre legnose agrarie
12112 - Insediamenti produttivi agricoli	134 - Aree degradate non utilizzate e non vegetate	2311 - Prati permanenti in assenza di specie arboree ed arbustive
12121 - Insediamenti ospedalieri	1411 - Parchi e giardini	2312 - Prati permanenti con presenza di specie arboree ed arbustive sparse
12122 - Impianti pubblici e privati	1412 - Aree verdi incolte	2313 - Marcite
12123 - Impianti tecnologici	1421 - Impianti sportivi	31111 - Boschi di latifoglie a densità media e alta gov. ceduo
3114 - Castagneti da frutto	1422 - Campeggi e strutture turistiche e ricettive	31112 - Boschi di latifoglie a densità media e alta gov. fustaia
3121 - Boschi conifere a densità media e alta	1423 - Parchi divertimento	31121 - Boschi di latifoglie a densità bassa gov. ceduo
3122 - Boschi di conifere a densità bassa	1424 - Aree archeologiche	31122 - Boschi di latifoglie a densità bassa gov. fustaia
31311 - Boschi misti a densità media e alta gov. ceduo	2111 - Seminativi semplici	3113 - Formazioni ripariali
31312 - Boschi misti a densità media e alta gov. fustaia	2112 - Seminativi arborati	
31321 - Boschi misti a densità bassa gov. ceduo	21131 - Colture orticole a pieno campo	
31322 - Boschi misti a densità bassa gov. fustaia	21132 - Colture orticole protette	
314 - Rimoboschimenti recenti	331 - Spiagge, dune ed alvei ghiaiosi	
3211 - Praterie naturali d'alta quota assenza di specie arboree ed arbustive	332 - Accumuli detritici e affioramenti litoidi privi di vegetazione	
3212 - Praterie naturali d'alta quota con presenza di specie arboree ed arbustive sparse	333 - Vegetazione rada	
3221 - Cespuglieti	335 - Ghiacciai e nevai perenni	
3222 - Vegetazione dei greti	411 - Vegetazione delle aree umide interne e delle torbiere	
3223 - Vegetazione degli argini sopraelevati	511 - Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali	
3241 - Cespuglieti con presenza significativa di specie arbustive alte ed arboree	5121 - Bacini idrici naturali	
3242 - Cespuglieti in aree di agricole abbandonate	5122 - Bacini idrici artificiali	
	5123 - Bacini idrici da attività estrattive interessanti la falda	

Figura 8 - Carta di uso del suolo in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda: Legenda

2.2 Manufatti interferenti

Dall'analisi del tratto su cui è stata condotta la modellazione idraulica, è emersa la presenza di un manufatto che va ad influire sul libero deflusso della corrente in piena, rappresentato dal rilevato stradale della S.P. 4 e dal ponte sul fiume Adda.

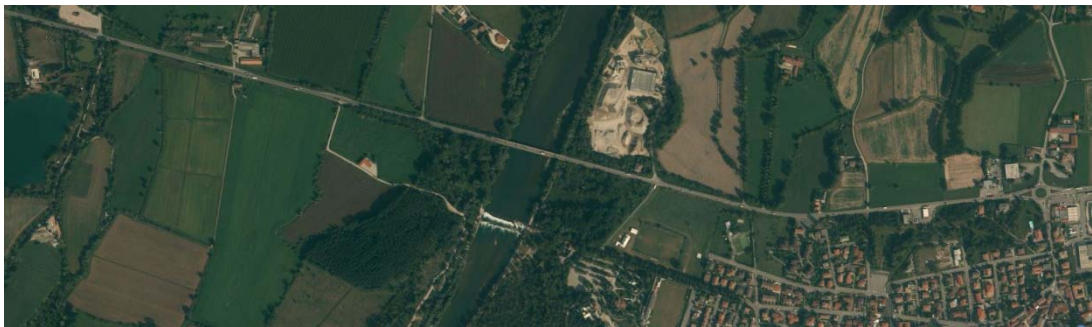


Figura 9 - Rilevato e ponte stradale della S.P. 14

Il ponte stradale della S.P. 4 in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda presenta quattro pile in alveo aventi forma rettangolare e fronte triangolare. Le dimensioni delle pile sono riassumibili come segue (fonte progetto AIPO: "Studio degli effetti di abbassamento della briglia a valle del ponte sul fiume Adda nel Comune di Rivolta d'Adda"):

- Lunghezza: 10.55 m
- Larghezza: 2.85 m

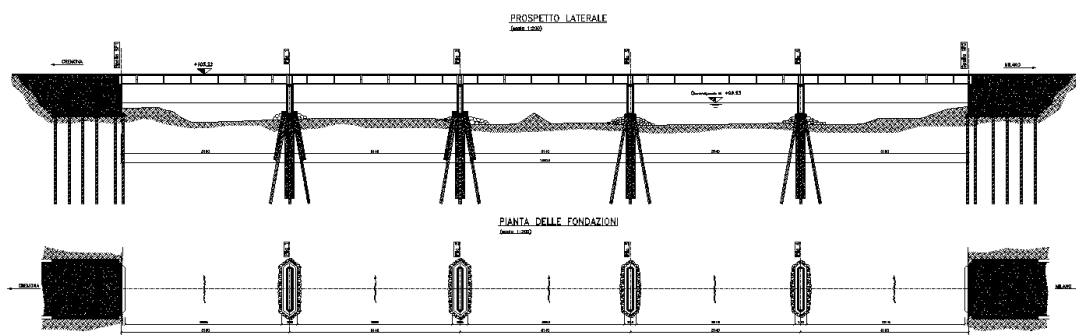


Figura 10 - Prospetto e pianta del ponte sul fiume Adda in Comune di Rivolta d'Adda

A valle del già citato ponte è presente una briglia in corrispondenza del vecchio ponte stradale, oggi ancora parzialmente presente in sponda sinistra.



Figura 11 - Briglia in corrispondenza del vecchio ponte stradale di Rivolta d'Adda

2.3 Modalità di deflusso in piena

L'analisi è finalizzata alla quantificazione delle caratteristiche idrauliche del moto della corrente in condizione di piena, rappresentate dai valori dei livelli idrici e delle velocità della corrente all'interno dell'alveo inciso e delle aree golenali.

Scopo dell'analisi consiste nel determinare i parametri idraulici necessari per dimensionare una nuova arginatura in sinistra idraulica a difesa dell'abitato di Rivolta d'Adda.

Il confronto tra la condizione di deflusso antecedente alla realizzazione delle opere e quella successiva alla realizzazione delle stesse permette di valutare gli effetti idraulici dell'intervento stesso.

L'esecuzione dei calcoli idraulici per la determinazione delle modalità di deflusso in piena considerano i seguenti aspetti di dettaglio:

- a) Schema di calcolo e modello idraulico;
- b) Condizioni al contorno e condizioni iniziali;
- c) Taratura del modello;
- d) Condizioni di riferimento.

2.3.1 Schema di calcolo e modello idraulico

Lo studio del tratto di fiume Adda oggetto della presente relazione è stato condotto ricorrendo al modello di calcolo bidimensionale ai volumi finiti implementato nel software Basement (versione 2.0). Tale software è stato sviluppato dal Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) dell'Università di Zurigo

(ETH). La conformazione dell'area in esame, la presenza di manufatti idraulici per il controllo delle portate e di opere d'arte di rilevante interesse sono tali da richiedere l'utilizzo di un approccio bidimensionale. Tale approccio permette di delineare gli aspetti essenziali dei possibili scenari di piena che possono verificarsi sui tratti di corso d'acqua oggetto dell'analisi, consentendo di definire in maniera fisicamente attendibile i livelli idrometrici nelle sezioni idriche, valutando l'andamento delle stesse per un'assegnata onda di piena con tempo di ritorno fissato. È, quindi, possibile simulare correttamente il campo di moto della corrente, caratterizzato da componenti della velocità locale in due dimensioni.

L'analisi idraulica è stata condotta ricorrendo ad un modello bidimensionale di moto vario, appositamente creato per il tratto in esame con il codice di calcolo Basement in accoppiamento con il software di discretizzazione del dominio di calcolo.

2.3.1.1 Definizione delle equazioni del moto

Il programma Basement, nella versione attuale, implementa l'algoritmo di risoluzione numerica delle equazioni differenziali idrodinamiche che governano il moto di un fluido tramite il metodo ai volumi finiti, sia in condizioni stazionarie (steady state) sia in condizioni di moto vario (unsteady state).

Considerando un volume di fluido infinitesimo in un sistema di riferimento tridimensionale, le equazioni di Navier-Stokes forniscono le grandezze di interesse per descrivere il moto di una superficie libera, quali la distribuzione della pressione, i tiranti idrici e le velocità del flusso lungo le componenti principali. Queste equazioni possono essere risolte solamente per via numerica, mentre esistono soluzioni analitiche solo per applicazioni molto semplificate.

Assumendo la distribuzione delle pressioni come idrostatica (Bousinnesq, 1903) e trascurando la variazione delle grandezze lungo la direzione verticale, le equazioni di Navier-Stokes (mediate secondo Reynolds ed integrate lungo il tirante idrico) consentono di definire le equazioni bidimensionali alle derivate parziali non lineari che esprimono la dinamica delle acque basse (Shallow Water Equations o equazioni di De Saint-Venant delle acque basse), identificate con la sigla SWE. Questo sistema di equazioni fornisce risultati accurati nella riproduzione della dinamica della superficie libera e delle velocità su un piano.

La validità delle SWE si basa, dunque, sulle seguenti ipotesi:

- distribuzione idrostatica delle pressioni, rispettata se la componente verticale delle variazioni di velocità delle particelle del fluido è trascurabile;
- pendenza ridotta del fondo del canale, tale che il coseno dell'angolo compreso tra il fondo e l'orizzontale possa essere assunto circa pari all'unità;
- leggi di resistenza, valide per condizioni di moto uniforme stazionario, applicabili anche in condizioni di moto vario non stazionario.

Sulla base delle precedenti assunzioni, è, pertanto, possibile derivare le equazioni (mediate secondo Reynolds) che governano il flusso di un fluido all'interno di un volume di controllo di altezza pari al tirante idrico. Tali equazioni sono:

- l'equazione di conservazione della massa (continuità);

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} = 0$$

- L'equazione di conservazione del momento o della quantità di moto (lungo le direzioni principali x e y).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} &= -g \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho h} \tau_{Bx} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xx} + D_{xx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xy} + D_{xy})]}{\partial y} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} &= -g \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho h} \tau_{By} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yx} + D_{yx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yy} + D_{yy})]}{\partial y} \end{aligned}$$

dove le grandezze assumono i seguenti significati:


h	[m]	tirante idrico
g	[m/s ²]	accelerazione di gravità
ρ	[kg/m ³]	densità del fluido
\bar{u}	[m/s]	velocità media sul tirante idrico in direzione x
\bar{v}	[m/s]	velocità media sul tirante idrico in direzione y
z_b	[m]	quota del fondo
$\tau_{B,x}, \tau_{B,y}$	[N/m ²]	sforzo di attrito sul fondo rispettivamente in direzione x e y
$\bar{\tau}_{xx}, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yy}, \bar{\tau}_{yx}$	[N/m ²]	sforzi viscosi e turbolenti mediati sul tirante idrico

Queste equazioni forniscono le grandezze medie, qualora si definiscano le relazioni atte ad esprimere le componenti fluttuanti (sforzi turbolenti) tramite le stesse grandezze medie. Sono chiamate di chiusura e i diversi modelli di turbolenza differiscono tra loro a seconda delle assunzioni fatte per definire queste relazioni di natura empirica.

I modelli di chiusura più comuni sono basati sul concetto di viscosità turbolenta di Boussinesq (1877), secondo cui è possibile esprimere gli sforzi turbolenti in funzione delle variazioni di velocità e della viscosità:

$$\tau_{xx} = 2\rho\nu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\rho\nu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xy} = \rho\nu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

dove ν è la viscosità del fluido.

 Studio di ingegneria	Sede Legale: Via Crocette 26 – Curtatone (MN) Sede Operativa: C.so Garibaldi 79 – Villafranca di Verona (VR) Tel-Fax: 045/2220488 – Mail: eos.ingegneria@gmail.com	 Agenzia Interregionale per il fiume Po
---	--	---

Gli sforzi di taglio in corrispondenza del fondo dipendono dalle velocità medie sul tirante (\bar{u}, \bar{v}) secondo una legge quadratica:

$$\tau_{Bx} = \rho \frac{|\mathbf{u}|u}{c_f^2}, \quad \tau_{By} = \rho \frac{|\mathbf{u}|v}{c_f^2}$$

dove $u = \sqrt{u^2 + v^2}$ rappresenta la norma del vettore velocità. Il coefficiente c_f può essere determinato sulla base delle classiche leggi di resistenza.

2.3.1.2 Risoluzione numerica delle equazioni del moto SWE

Il sistema di equazioni sopra definito non può essere risolto con procedure analitiche, ma tramite metodologie numeriche. La soluzione numerica richiede la discretizzazione delle equazioni differenziali in un sistema finito di equazioni algebriche, mediante l'applicazione del metodo ai volumi finiti. Secondo tale metodologia, le equazioni sono integrate considerando il volume individuato dai nodi della griglia della maglia di calcolo (mesh).

Per effetto dell'integrazione sul volume di controllo, le equazioni di continuità e del moto sono presenti in Basement in forma conservativa, preferibile rispetto alla forma non-conservativa nel caso in cui siano attese discontinuità o rapide variazioni nella soluzione, come nel caso dei fenomeni di esondazione (Toro, 2001).

La forma conservativa può essere ottenuta moltiplicando l'equazione di continuità con le grandezze u e v e sommando le equazioni del moto proiettate rispettivamente lungo le direzioni x e y . Il set di equazioni può essere scritto nella seguente forma contratta:

$$\mathbf{U}_t + \nabla(\mathbf{F}, \mathbf{G}) + \mathbf{S} = \mathbf{0}$$

dove \mathbf{U} , $\mathbf{F}(\mathbf{U})$, $\mathbf{G}(\mathbf{U})$ e \mathbf{S} sono rispettivamente il vettore delle variabili, il vettore dei flussi nelle direzioni x e y e il vettore sorgente, di seguito definiti:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 - vh \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - vh \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh - vh \frac{\partial v}{\partial x} \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 - vh \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{Bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{By}) \end{pmatrix}$$

Il termine sorgente (\mathbf{S}) contiene i contributi rappresentati dalla pendenza del fondo e dallo sforzo tangenziale in corrispondenza del fondo. La discretizzazione si applica direttamente alle equazioni scritte in forma conservativa.

È necessario, in primo luogo, distinguere tra discretizzazione spaziale e discretizzazione temporale:

- a) la discretizzazione spaziale del dominio di calcolo (campo di moto) è condotta definendo una griglia non ortogonale e non strutturata formata da celle non sovrapposte. In ogni cella le equazioni di conservazione della massa e del moto sono applicate per determinare le grandezze fisiche in punti discreti della cella, chiamati nodi, tipicamente coincidenti con il centro (cell centred mesh) o con i vertici della cella (cell vertex mesh) (Figura 12).

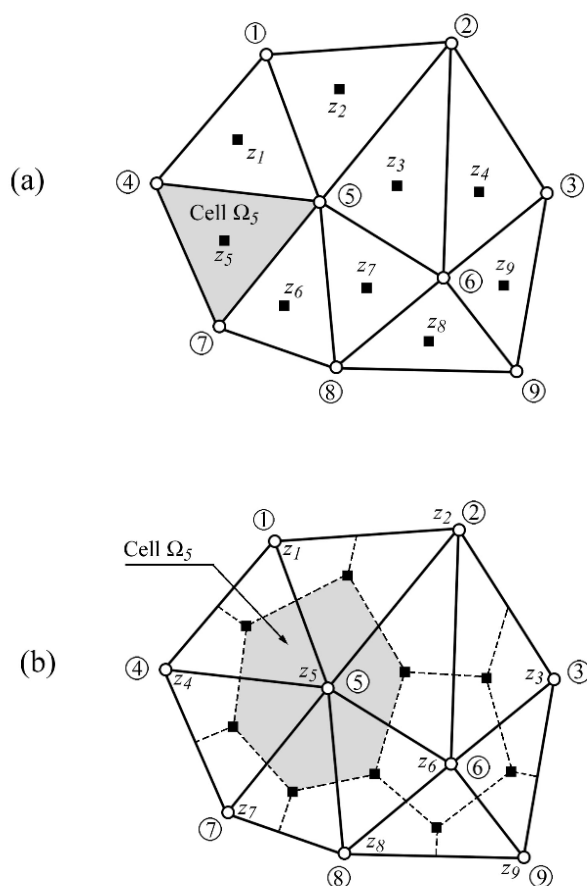


Figura 12 – Mesh bidimensionale ai volumi finiti: a) Cell centred mesh b) Cell vertex mesh

La celle possono assumere forme diverse, triangolari o quadrilatere, in modo tale da produrre una mesh non strutturata, capace di gestire geometrie complesse del campo di moto;

- b) la discretizzazione temporale in Basement si basa sul metodo di Eulero esplicito del primo ordine. Il passo temporale di discretizzazione delle simulazione idrauliche si determina in accordo al limite imposto dal Numero di Courant. Nel caso di modelli bidimensionali, il numero di Courant è definito nel seguente modo:

$$CFL = \frac{(\sqrt{u^2 + v^2} + c) \Delta t}{L} \leq 1$$

dove L è la lunghezza dei lati della cella, che compone la mesh di calcolo, caratterizzati dalle velocità u e v e con $c = \sqrt{gh}$. Generalmente, il numero di Courant deve essere minore di uno.

Il criterio per definire il passo temporale della discretizzazione cambia nel caso si dovesse tener conto dei fenomeni di trasporto solido, qui non considerati.

Nella soluzione del metodo ai volumi finiti uno dei problemi è rappresentato dalla stima del flusso normale attraverso ogni lato della cella. L'algoritmo utilizzato nelle simulazioni per il calcolo dei flussi normali al dominio considerato è il cosiddetto Riemann Solver. Tale procedimento di calcolo, nel metodo ai volumi finiti, è adatto per riprodurre le discontinuità in correnti subcritiche o supercritiche.

La discretizzazione coinvolge anche i termini di sorgente presenti nelle equazioni SWE:

- il calcolo del termine di sorgente dovuto alla scabrezza del fondo e delle pareti viene condotto adottando un metodo di discretizzazione semi-implicito, allo scopo di evitare le instabilità connesse con l'utilizzo del metodo esplicito per valori del tirante idrico dell'ordine di 10^{-2} m. Tale calcolo richiede la definizione del raggio idraulico R_i nell'elemento i -esimo della griglia di calcolo. Il raggio idraulico è posto pari al tirante idrico ottenuto nell'elemento considerato ($R_i = h_i$). Nei casi in cui la cella di calcolo è situata sul confine del dominio (Figura 13), il contributo aggiuntivo della resistenza (wall friction), in corrispondenza della parete, può essere considerato applicando l'approccio suggerito da Brafau e Garcia-Navarro (2000).

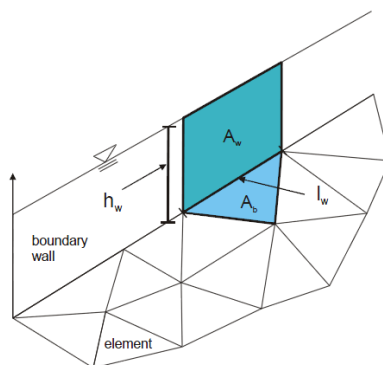


Figura 13 – Contorno bagnato dell'elemento di confine con condizione di wall friction

- il termine sorgente rappresentato dagli sforzi turbolenti e viscosi viene trattato attraverso l'approccio di Mohamadian (2004);
- la discretizzazione del termine sorgente dovuto alla pendenza di fondo è condotta assegnando la quota dei nodi delle celle, così da ottenere un'accurata riproduzione della topografia dell'area in esame. La modellazione numerica della pendenza del fondo è formulata sulla base del metodo di Komaei e Bechteler (2004). La pendenza di fondo in celle di forma triangolare è calcolata assumendo la formulazione agli elementi finiti suggerita da Hinton e Owen (1979). Nel calcolo della pendenza di un elemento quadrilatero, è probabile che i nodi non giacciono su un unico piano e che quindi la pendenza non sia univocamente determinata. In questo caso, la cella viene divisa in quattro triangoli; è possibile, quindi, applicare la metodologia specificata per le celle triangolari separatamente ad ogni triangolo dell'elemento quadrilatero.

La risoluzione delle equazioni SWE con la metodologia sopra descritta comporta la necessità di definire delle condizioni al contorno, ad esempio velocità o tirante idrico, in determinati vertici delle celle del dominio di calcolo. Si distingue tra condizioni al contorno di ingresso (inlet), condizioni al contorno di uscita (outlet) e condizione interne (inner).

a) Condizioni al contorno di ingresso

- Idrogramma: tale condizione è applicata ad una sezione di ingresso impostata dall'utente e definita da una lista di elementi di confine disposti in corrispondenza del limite del dominio. Si assume che la sezione al contorno di ingresso sia trattata come una linea con tirante idrico uniforme (approccio monodimensionale) a cui il vettore velocità risulta ortogonale. La condizione di idrogramma deve essere specificata lungo i vertici della mesh di calcolo sia nel caso di condizioni stazionarie che di moto vario. Per portate in condizioni non stazionarie, l'idrogramma è digitalizzato in Basement con la seguente forma:

$$\begin{matrix} t^1 & Q^1 \\ \dots & \dots \\ t^n & Q^n \\ \dots & \dots \\ t^{end} & Q^{end} \end{matrix}$$

dove Q_n è la portata in ingresso al tempo t_n . L'idrogramma specificato in questo modo, può essere caratterizzato da qualsiasi forma; i valori intermedi vengono interpolati sulla base del tempo corrispondente. La quota della superficie libera è valutata a partire dai valori assunti dalla stessa variabile negli elementi posti sul contorno con riferimento al passo temporale precedente. In caso di condizioni iniziali asciutte o correnti supercritiche nella sezione di immissione, la quota della superficie libera è calcolata in accordo alla portata di ingresso nota. Per il calcolo iterativo delle grandezze h e Q , si assume che il flusso sia normale alla sezione e si assegna alla pendenza del fondo, perpendicolare alla sezione considerata, un valore medio. La portata totale di ingresso così calcolata è distribuita lungo gli elementi del contorno. Se alcuni elementi di contorno giacciono al di sopra della superficie, ad essi si applica la condizione di parete. La portata viene distribuita sul contorno bagnato nell'elemento i -esimo mediante il seguente procedimento:

$$Q_i = K_i Q_{in}$$

Il fattore K_i può essere determinato come media pesata delle aree bagnate di ogni elemento considerato oppure sulla base della capacità di convogliamento della portata, funzione della resistenza, del raggio idraulico e dell'area bagnata di ogni elemento.

b) Condizioni al contorno di uscita

- *Free surface elevation*

Nel caso in cui non si conosca la condizione al contorno da applicare in corrispondenza dell'uscita, è possibile assegnare la condizione al contorno di free surface. Si assume la condizione di gradiente nullo:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} = 0$$

- *Stramazzo (weir)*

Applicando tale condizione al contorno, è possibile determinare la portata in uscita sulla base della legge di efflusso a stramazzo (Chanson, 1999):

$$q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} (h_{up} - h_{weir})^3$$

dove le grandezze assumono il seguente significato:

$$C = 0.611 + 0.08 \frac{h_{up} - h_{weir}}{h_{weir}} ; h_{up} = WSE - z_B \text{ and } h_{weir} = z_{weir} - z_B$$

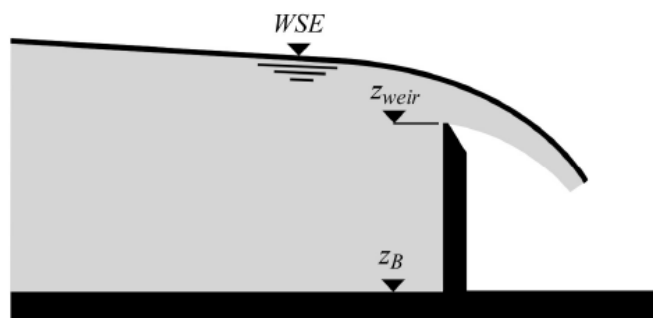


Figura 14 – Portata attraverso lo stramazzo

WSE	[m]	quota della superficie libera in corrispondenza dello stramazzo
z _b	[m]	quota del fondo in corrispondenza dello stramazzo
z _{weir}	[m]	quota della soglia dello stramazzo
h _{weir}	[m]	altezza della soglia dello stramazzo rispetto al fondo
h _{up}	[m]	tirante idrico in corrispondenza dello stramazzo
C		coefficiente di efflusso

Alternativamente al calcolo automatico del coefficiente C, può essere assegnato un valore costante al fattore noto come *Poleni factor*.

- Luce a battente (*gate*)

La portata attraverso luci a battente è valutata applicando la relazione:

$$q = \mu h_{gate} \sqrt{2gh_{up}}$$

Nella formula, h_{up} è la differenza tra la quota della superficie libera a monte della luce e la quota del bordo superiore della luce; h_{gate} rappresenta la differenza tra la quota del bordo superiore della luce e la quota del terreno in corrispondenza del dispositivo; μ rappresenta il coefficiente di efflusso. Il suo valore può essere definito dall'utente. La condizione sopra riportata si attiva se la quota della superficie libera nell'elemento di contorno considerato è maggiore rispetto al bordo superiore della luce (funzionamento in pressione).

- Z hydrograph

Un'altra condizione al contorno prevede di specificare l'andamento temporale della quota della superficie libera (es. portata in uscita da bacini con riempimento noto). Tale condizione deve essere indicata nel seguente modo:

$$\begin{matrix} t^1 & WSE^1 \\ \dots & \\ t^n & WSE^n \end{matrix}$$

c) Condizione al contorno interno

- Stramazzo interno (inner weir)

La condizione interna di stramazzo si distingue leggermente dalla condizione al contorno di stramazzo. Se la soglia dello stramazzo è maggiore della quota della superficie libera, lo stramazzo si comporta come una parete. Se uno o più elementi confinanti presentano un tirante idrico superiore alla soglia dello stramazzo, si applica la seguente relazione per il calcolo della portata in uscita:

$$q = \frac{2}{3} \mu \sigma_{uv} \sqrt{2g(h_{up} - h_{weir})^3}$$

La relazione rappresenta la classica formula di Poleni per uno stramazzo con soglia sottile, in cui è presente il fattore σ_{uv} che tiene conto della riduzione della portata per effetto del funzionamento incompleto dello stramazzo.

- Luce a battente interna (inner gate)


Il comportamento della luce a battente come condizione al contorno interna presenta tre modalità di funzionamento: se il bordo superiore della luce è uguale o inferiore alla quota del terreno, la luce è chiusa e agisce come una parete. Nel caso in cui la quota del bordo superiore sia maggiore della quota del terreno, la luce è considerata aperta. Si realizzano, quindi, due condizioni di funzionamento: finché la superficie libera in corrispondenza del dispositivo rimane al di sotto del bordo superiore, viene applicato l'algoritmo di calcolo Riemann Solver, altrimenti si determina un funzionamento a pressione, in cui la portata viene calcolata sulla base della seguente formula:

$$q = \mu h_{gate} \sqrt{2gh_{up}}$$

dove h_{gate} è la differenza tra la quota del bordo superiore della luce e la quota del terreno in corrispondenza del dispositivo, mentre h_{up} è il valore del tirante idrico a monte della luce. Il coefficiente di efflusso μ si pone generalmente pari a 0.6.

2.3.1.3 Funzionamento del software Basement

Gli strumenti di simulazione del software Basement si suddividono in tre differenti sezioni:

 Studio di ingegneria	Sede Legale: Via Crocette 26 – Curtatone (MN) Sede Operativa: C.so Garibaldi 79 – Villafranca di Verona (VR) Tel-Fax: 045/2220488 – Mail: eos.ingegneria@gmail.com	 Agenzia Interregionale per il fiume Po
---	--	---

- i moduli fisico-matematici fanno riferimento ai parametri connessi con le equazioni idrodinamiche;
- la griglia computazionale rappresenta il dominio discretizzato della geometria;
- i moduli numerici fanno riferimento ai metodi di risoluzione delle equazioni.

L'esecuzione (processing) di tale motore di calcolo richiede l'applicazione delle fasi operative di pre-processing e post-processing.

Il principale obiettivo delle attività di pre-processing consiste nel definire i dati di input (geometria) disponibili e necessari per la definizione degli scenari di simulazione del modello, la scelta del metodo di calcolo e le condizioni iniziali e al contorno.

Il post-processing consente l'elaborazione delle informazioni e dei risultati delle simulazioni ottenute dall'esecuzione del modello di calcolo sulla base degli scenari e delle condizioni definite nella precedente fase di pre-processing.

Il motore di calcolo utilizzato in Basement è composto da differenti sottosistemi:

- BASEchain: rappresenta il modello di calcolo numerico monodimensionale per la determinazione del profilo della superficie libera di un tratto di corso d'acqua (sulla base di sezioni trasversali);
- BASEplane: rappresenta il modello di calcolo numerico bidimensionale per la simulazione del fenomeno di propagazione della piena nell'alveo fluviale e dell'allagamento delle aree golenali (sulla base del modello digitale del terreno – DTM).

Nella simulazione della propagazione della piena nel tratto di fiume Adda si farà riferimento al sottosistema di calcolo bidimensionale BASEplane.

Per la costruzione e la manipolazione delle mesh di calcolo, necessarie come dato di input per le simulazioni condotte da Basement, si è utilizzata un'applicazione esterna (Surface-Water Modeling Syssem) dedicata alla creazione di griglie computazionali per la simulazione della dinamica di propagazione della superficie libera dell'acqua in alvei naturali e nelle aree golenali limitrofe. Alla definizione delle mesh, si aggiunge la possibilità di assegnare le proprietà dei materiali che costituiscono il fondo, in termini di resistenza, e le condizioni al contorno. Tale applicazione è stata utilizzata nella fase di post-processing per la visualizzazione dei risultati ottenuti.

2.3.2 Condizioni al contorno e condizioni iniziali

Le condizioni al contorno da assegnare al modello di calcolo del tratto di Adda interessato sono due: condizione al contorno di monte (sezione 149) e condizione al contorno di valle (sezione 136).

Rispetto alla condizione al contorno di monte posta nella sezione 149 sono stati inseriti:

- il livello di tirante risultante dal modello matematico presente nello "Studio di fattibilità" del fiume Adda (109.81 m slm). Tale dato è stato utilizzato per tarare i parametri del modello bidimensionale.

- le portate dell'onda di piena dello "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica: - del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, - del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda, - del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda" condotto dall'Autorità di Bacino del fiume Po (redazione: 2005) e corrispondenti alla piena con tempo di ritorno $T_r = 200$ anni per la valutazione del confronto tra le condizioni di stato di fatto e di progetto.

Il valore di riferimento della portata con tempo di ritorno 200 anni nella condizione al contorno di monte assunto per la valutazione del confronto delle condizioni progettuali è pari a $1'948.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Tale valore compatibile con quanto già illustrato nello studio idrologico condotto all'interno dello "Studio di fattibilità", è stato indicato dagli uffici AIPO territorialmente competenti.

In Figura 15 si riporta l'onda di piena dello "Studio di fattibilità" utilizzata nel calcolo.

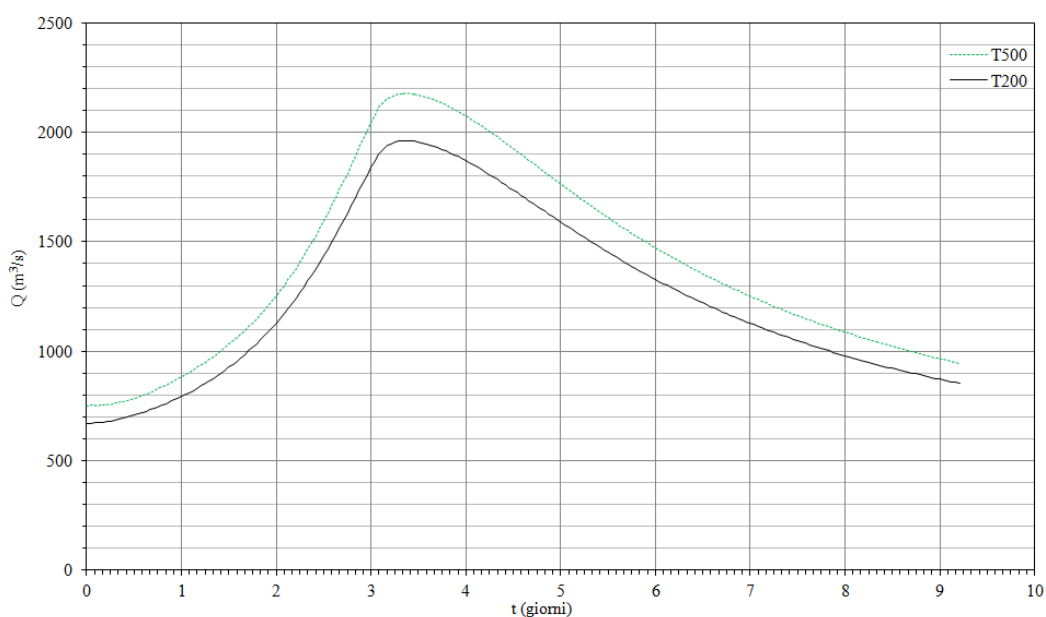


Figura 15 - Onda di piena di progetto - T = 200 anni

Per la condizione al contorno di valle posta nella sezione 136 sono stati inseriti:

- il livello di tirante risultante dal modello matematico presente nello "Studio di fattibilità" del fiume Adda (94.75 m s.l.m.). Tale dato è stato utilizzato per tarare i parametri del modello bidimensionale.
- La relazione di moto uniforme con una pendenza di fondo, tarata tenendo conto della parte batimetrica, pari a 1.2 ‰, nelle simulazioni di stato di fatto e nelle due configurazioni di progetto con portata con tempo di ritorno $T_r = 200$ anni.

2.3.3 Taratura del modello

Al fine di utilizzare il modello bidimensionale con le condizioni al contorno corrispondenti alla piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni, si è provveduto alla taratura dei parametri di scabrezza utilizzando i dati a disposizione dello studio di fattibilità.

Le simulazioni condotte hanno permesso di tarare i vari parametri idraulici utilizzati all'interno dello schema risolutivo del modello bidimensionale.

In particolare la taratura ha permesso di definire i valori di scabrezza, secondo Manning, come indicato nella Tabella 1.

Uso del suolo	Coefficienti di scabrezza secondo Manning [$m^{-1/3} s$]	Coefficienti di scabrezza secondo Strickler [$m^{1/3} s^{-1}$]
Alveo inciso	0.040	25
Golena	0.055	18
Viabilità	0.010	100

Tabella 1 - Valori dei coefficienti di scabrezza del modello bidimensionale

2.3.4 Condizioni di riferimento

I calcoli idraulici sono stati condotti per le seguenti configurazioni di riferimento denominate:

- Stato di fatto: presenza dell'opera in condizioni attuali;
- Stato di progetto: configurazione "1".
- Stato di progetto: configurazione "2".
- Stato di progetto: configurazione "3".
- Stato con "Fascia B di progetto" da Studio di Fattibilità

Dal punto di vista idraulico, lo stato di fatto prevede la simulazione con l'attuale configurazione planoaltimetrica; lo stato di progetto (configurazioni "1", "2" e "3") prevede l'utilizzo del Modello Digitale del Terreno modificato con l'inserimento del nuovo rilevato arginale in sponda sinistra a protezione dell'abitato di Rivolta d'Adda.

Nella simulazione condotta con la "Fascia B di progetto" da Studio di Fattibilità è stato introdotto un limite di esondazione in corrispondenza della suddetta fascia.



Per la verifica delle configurazioni analizzate si è utilizzata l'onda di piena con tempo di ritorno 200 anni, secondo quanto previsto dalla già citata Direttiva dell'Autorità di Bacino del Fiume Po.

3 Verifica idraulica ed effetti degli interventi in progetto

3.1 Profilo di involucro di piena

3.1.1 Stato di fatto

Il modello bidimensionale ha simulato l'onda di piena proposta nello studio condotto da Autorità di Bacino del fiume Po il cui picco fornisce una portata pari a $1'958.8 m^3/s$ corrispondente ad un tempo di ritorno di

 Studio di Ingegneria	Sede Legale: Via Crocette 26 – Curtatone (MN) Sede Operativa: C.so Garibaldi 79 – Villafranca di Verona (VR) Tel-Fax: 045/2220488 – Mail: eos.ingegneria@gmail.com	 Agenzia Interregionale per il fiume Po
---	--	---

200 anni secondo quanto previsto dal "*Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)*". L'estensione del dominio bidimensionale è stata scelta considerando la delimitazione della fascia fluviale B indicata all'interno del PAI e facendo riferimento allo studio condotto sul fiume Adda da parte di AdBPo.

La condizione al contorno di monte utilizzata nel modello è quella di "hydrograph". E' stato fornito, quindi, l'idrogramma di piena che fornisce, in corrispondenza del colmo, una portata pari a $1'948.8 \text{ m}^3/\text{s}$ nella sezione 149. La pendenza del fondo, per la simulazione dell'onda di piena con tempo di ritorno di 200 anni, è stata determinata mediante il calcolo della cadente dell'energia per un tratto di circa 2 km a valle della sezione. Il valore di pendenza trovato è 1.68 ‰.

La condizione al contorno di valle, imposta nella sezione 136, è quella di moto uniforme: il modello, quindi, calcola direttamente la relazione tra tirante e portata sulla base di un valore di pendenza del fondo imposto e dei valori di scabrezza ricavati dalla taratura. Tale valore di pendenza è stato ricavato, analogamente al caso di monte, mediante il calcolo della cadente dell'energia. Il valore di pendenza trovato è 1.2 ‰.

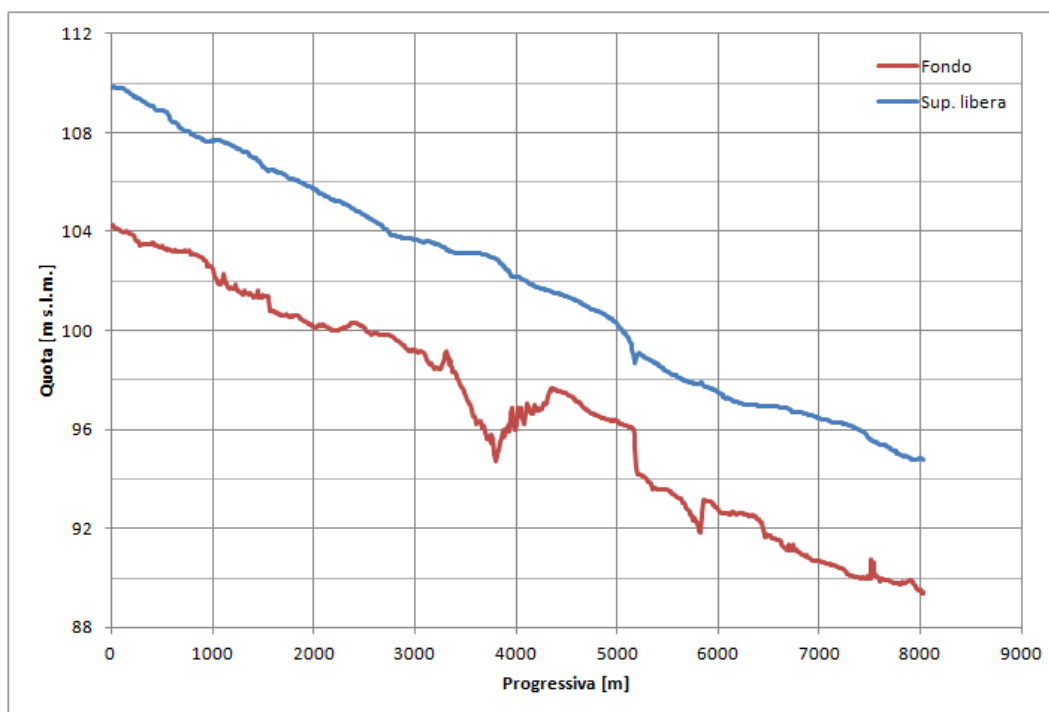


Figura 16 – Profilo longitudinale del tratto modellato – Configurazione di stato di fatto

Si riporta in Figura 16 l'andamento del profilo di superficie libera lungo il tratto di Adda oggetto della modellazione bidimensionale.

Si riporta in Figura 17 la distribuzione dei tiranti idrici nel tratto di fiume analizzato.

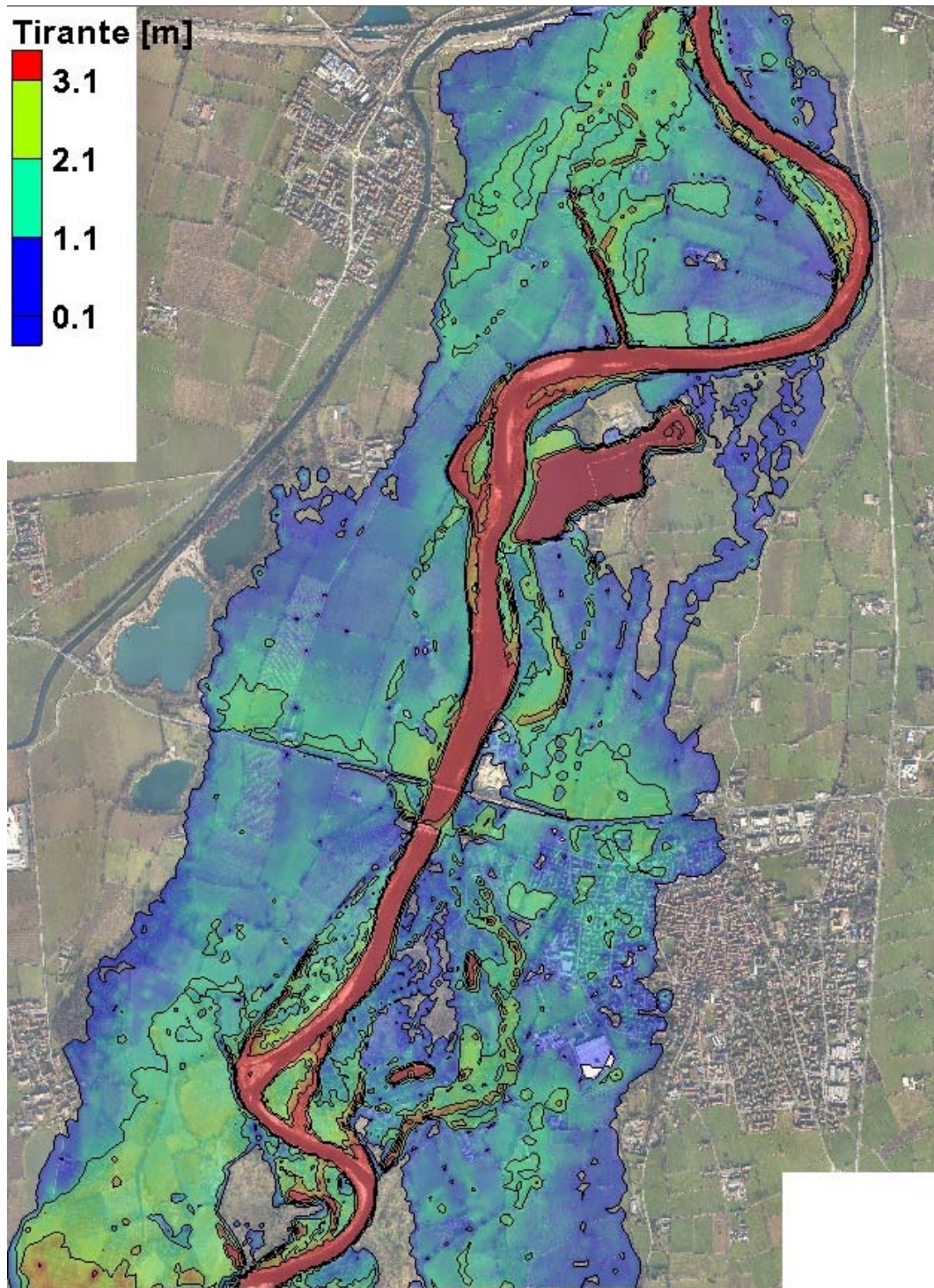


Figura 17 – Distribuzione planimetrica dei tiranti idrici in corrispondenza del picco di piena

Al fine di consentire un'agevole confronto tra lo stato di fatto e le diverse configurazioni progettuali previste si è deciso di determinare le grandezze idrauliche in corrispondenza della sezione del ponte di attraversamento della SP .14.

Dai risultati della modellazione dello stato di fatto si evidenzia che la **quota massima** del pelo libero in corrispondenza di tale sezione è pari a **100.31 m s.l.m.**.

Rispetto a tale quota si verificano le seguenti condizioni:

- la quota della rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in destra idraulica è pari a 100.19 m s.l.m. La rampa risulta essere sommersa per circa 0.12 m;
- la quota della rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in sinistra idraulica è pari a 99.82 m s.l.m. La rampa risulta essere sommersa per circa 0.49 m;
- l'intradosso del ponte stradale della S.P. 14, pari a 102.92 m s.l.m., risulta superiore di 2.61 m rispetto al profilo di piena.

Si riporta in Figura 18 la distribuzione planimetrica dei tiranti nell'istante di transito del picco. In Figura 19 è riportata la distribuzione planimetrica delle velocità nel tratto fluviale analizzato.

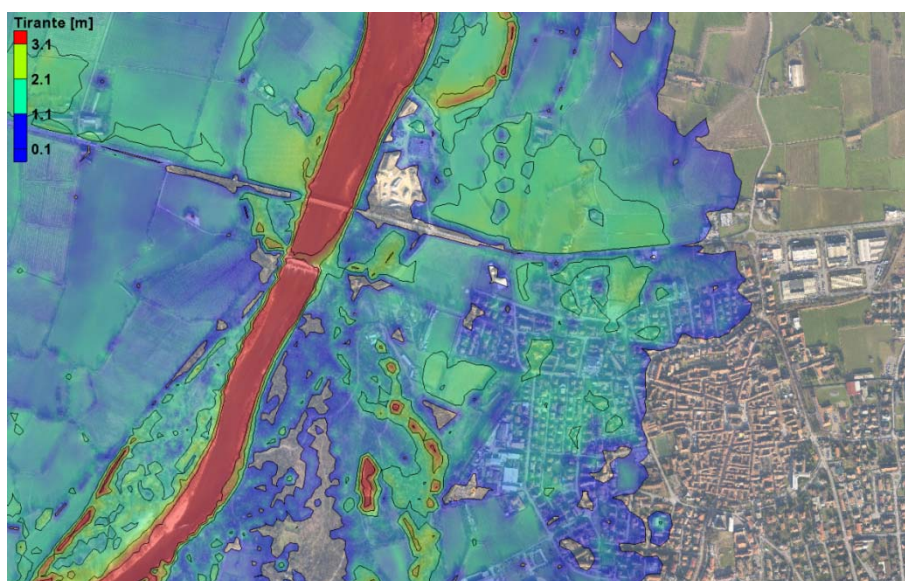


Figura 18 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda (Configurazione di stato di fatto)

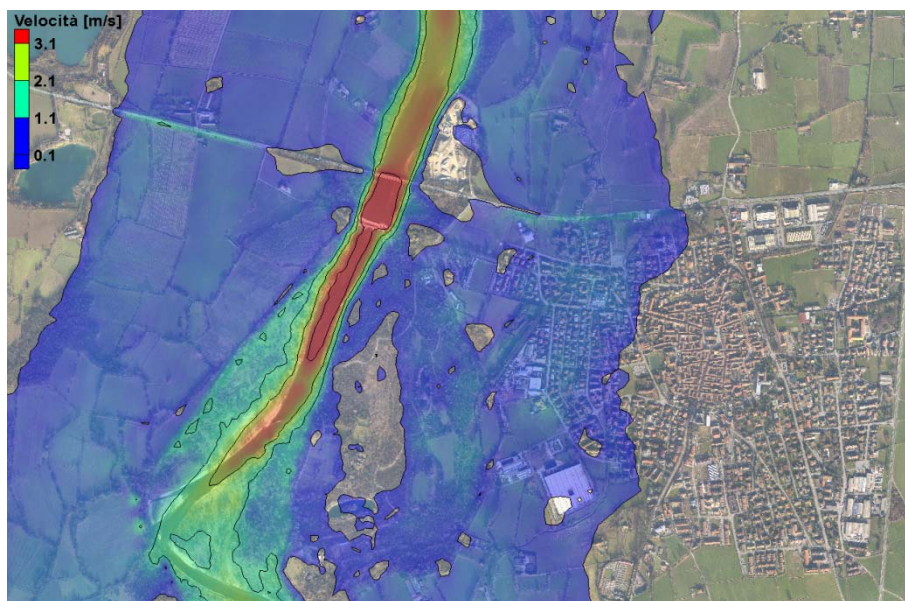


Figura 19 - Distribuzione planimetrica delle velocità in corrispondenza del picco di piena (Configurazione di stato di fatto)

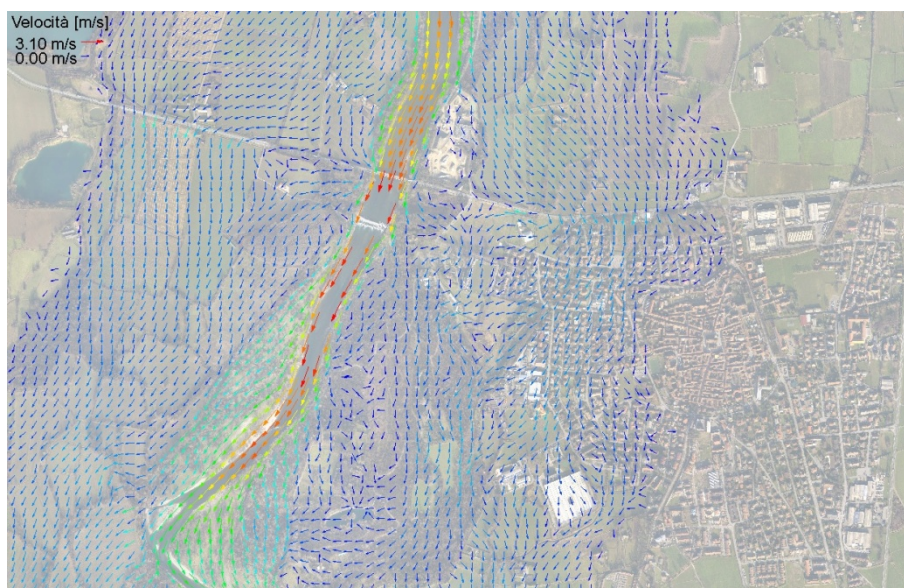


Figura 20 – Particolare della distribuzione del vettore velocità nello stato di fatto

In Figura 20 sono evidenziate le velocità della corrente (circa 0.3-0.5 m/s) associate al deflusso della portata al colmo di piena con tempo di ritorno di 200 anni in prossimità del centro abitato.

In corrispondenza del ponte della S.P. 4 si registra in condizioni di stato di fatto una portata massima transitante attraverso le spalle del ponte di 1'613 m³/s.

3.1.2 Stato di progetto - Configurazione "1"

Le condizioni al contorno di monte e di valle e le condizioni iniziali utilizzate nella configurazione di stato di progetto - Configurazione "1" sono le medesime dello stato di fatto, descritte nel paragrafo precedente; lo stesso vale per le caratteristiche di scabrezza dell'alveo inciso e delle aree golenali limitrofe, che rimangono inalterate.

Al fine di determinare con maggior grado di dettaglio l'andamento del deflusso in corrispondenza del centro abitato di Rivolta d'Adda, si è modificata la mesh di calcolo descritta nei paragrafi precedenti nei seguenti aspetti:

- infittimento del reticolo di calcolo, passando da 40 m a 20 m;
- introduzione della condizione di "wall" invalicabile in corrispondenza degli edifici maggiori dell'abitato e dei maggiori quartieri presenti.

Nella Configurazione "1", la geometria dell'area oggetto dello studio è modificata, per effetto dell'inserimento della nuova arginatura in sinistra idraulica.

Il nuovo rilevato arginale a difesa dell'abitato di Rivolta d'Adda si estende per una lunghezza di circa 1'200 m dalle vicinanze della spalla sinistra del ponte sull'Adda, fino all'innesto con la Strada per Cassano.

Il rilevato è stato ipotizzato avere una quota di sommità costante per tutto il tratto e pari a 102.00 m s.l.m..

In Figura 21 si riporta un estratto planimetrico della configurazione "1" del nuovo rilevato arginale di progetto.



Figura 21 - Planimetria nuovo rilevato arginale di progetto - Configurazione "1"

Si riportano in Figura 22 e in Figura 23 rispettivamente la distribuzione dei tiranti nel tratto analizzato e in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda.

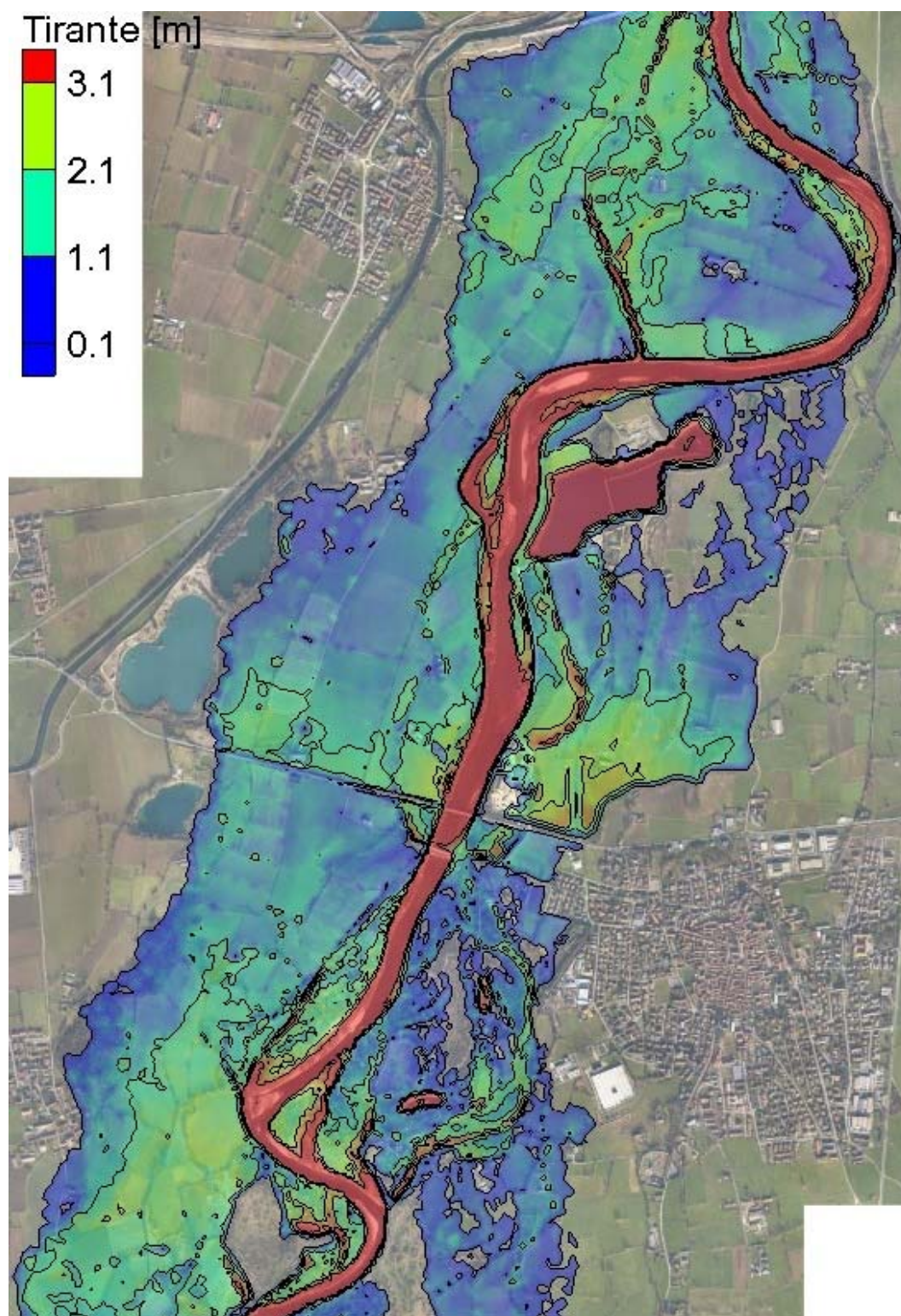


Figura 22 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo (Configurazione "1")

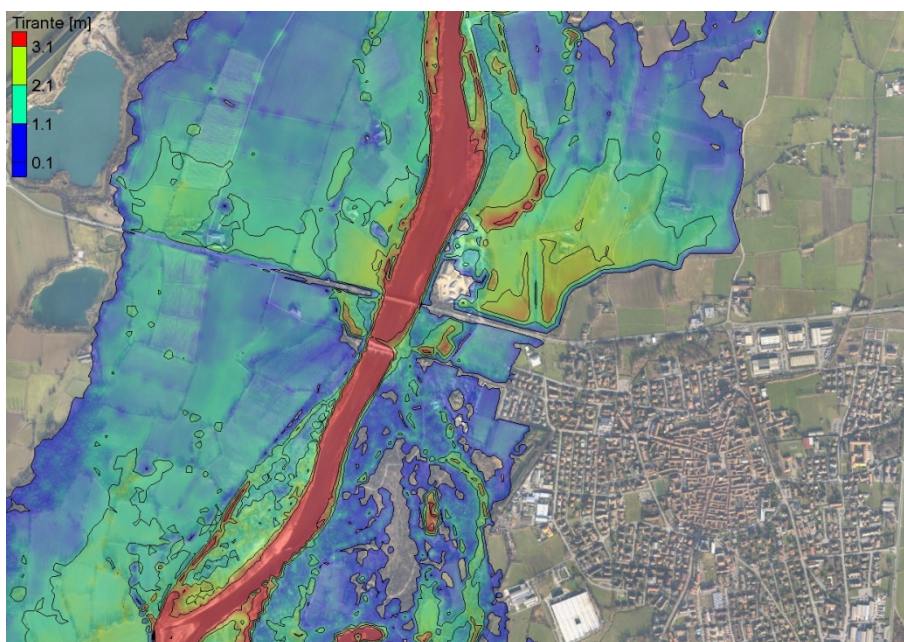


Figura 23 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda (Configurazione "1")



Figura 24 – Particolare della distribuzione del vettore velocità

In Figura 24 sono evidenziate le velocità della corrente (circa 0.3-0.5 m/s) associate al deflusso della portata al colmo di piena con tempo di ritorno di 200 anni in prossimità del centro abitato e della nuova arginatura ipotizzata.

La nuova configurazione del campo di moto determinata dalla presenza del nuovo rilevato arginale differisce dalla condizione di stato di fatto nel tratto di valle: il nuovo argine infatti protegge l'abitato di Rivolta d'Adda impedendo il deflusso dell'onda di piena all'interno dello stesso.

Dal punto di vista idraulico, l'introduzione del rilevato arginale genera una differente configurazione di deflusso della piena, incrementando il tirante idrico in corrispondenza del nuovo fronte arginale.

Si riportano in Figura 25 le aree allagate in cui il tirante incrementa rispetto allo stato di fatto a causa dell'introduzione della nuova arginatura.

Configurazione 1 – Stato di fatto [m]

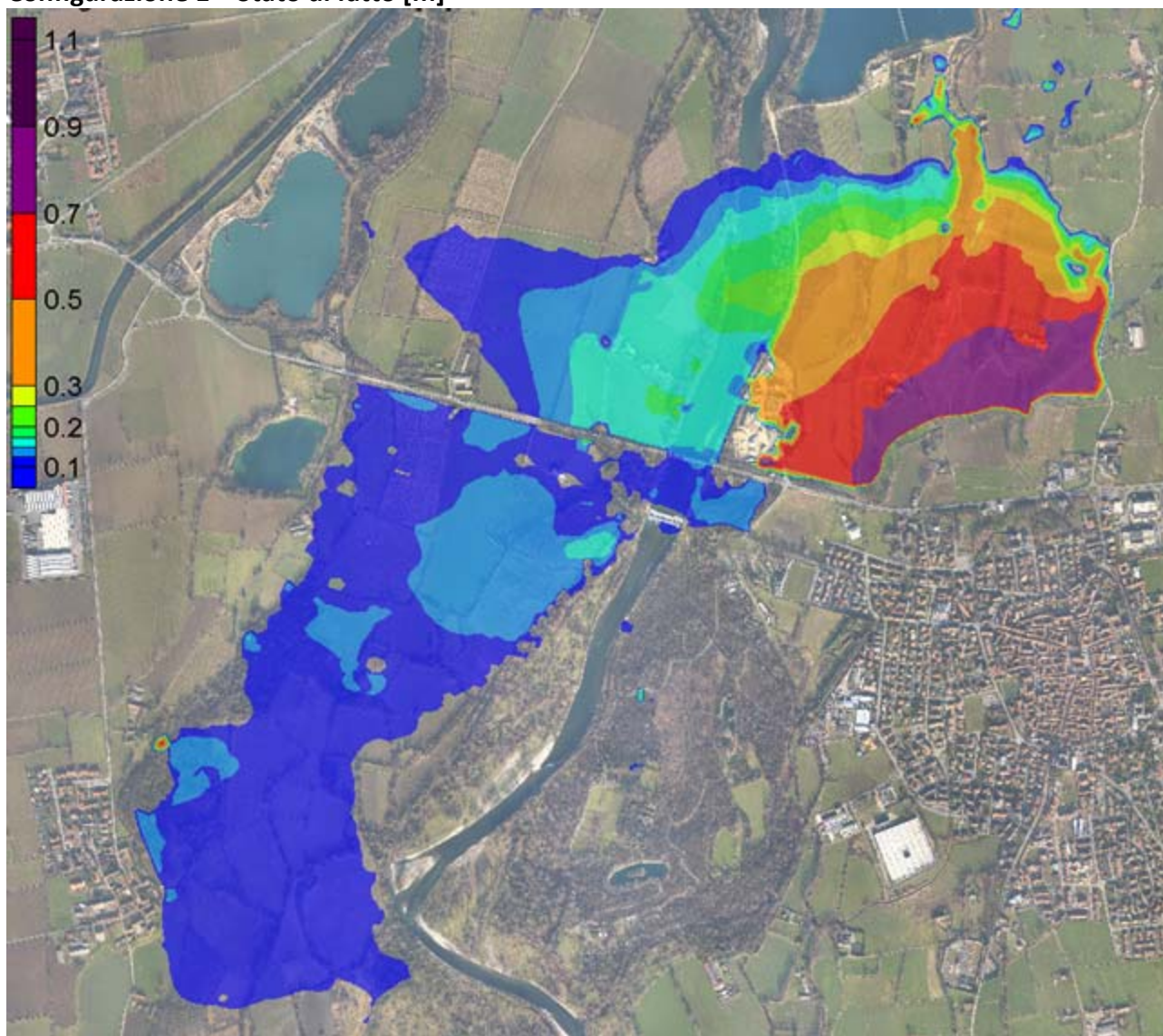
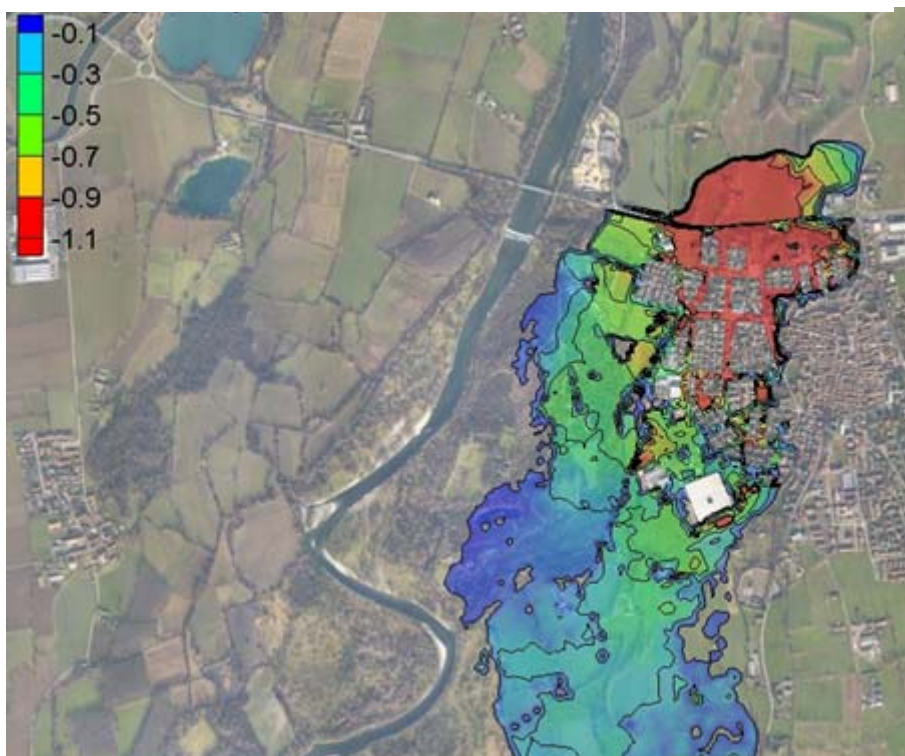


Figura 25 – Aree con incremento del tirante rispetto allo stato di fatto

Si evidenzia dall'analisi dell'immagine sopra riportata che gli incrementi maggiori si hanno in prossimità del piede della nuova arginatura in progetto.

In Figura 26 si riportano le aree che subiscono un azzeramento o un decremento del tirante rispetto allo stato di fatto grazie alla protezione della nuova arginatura.

Quota configurazione 1 – Quota stato di fatto < 0 [m]**Figura 26 - Confronto tirante (Configurazione "1" < Stato di fatto)**

Dall'immagine sopra riportata si evince che tutto l'abitato di Rivolta d'Adda risulta essere protetto dalla nuova arginatura e al contempo si hanno sensibili diminuzioni del tirante anche a valle dell'abitato stesso.

Dai risultati della modellazione dello stato di progetto Configurazione "1" si evidenzia che la **quota massima del pelo libero in corrispondenza del ponte della S.P. 4 è di 100.46 m s.l.m. rispetto ai 100.31 m s.l.m. dello stato di fatto (incremento del profilo di piena di 0.15 m).**

Rispetto allo stato di fatto la Configurazione "1" in corrispondenza della sezione del ponte della SP14 presente le seguenti caratteristiche:

- la quota della rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in destra idraulica, pari a 100.19 m s.l.m. subisce un allagamento di circa 0.27 m con un incremento di 15 cm;
- la rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in sinistra idraulica, a differenza dello stato di fatto, non viene interessata da fenomeni di allagamento in quanto protetta dal nuovo rilevato arginale.

In corrispondenza del ponte della S.P. 4 si registra in condizioni di stato di progetto **Configurazione "1" una portata massima transitante attraverso le spalle del ponte di 1'736 m³/s con un incremento del deflusso pari a 123 m³/s rispetto allo stato di fatto, il che viene spiegato dal fatto che la strettoia del ponte risulta l'unica via di comunicazione monte-valle della S.P. 4, a causa dell'impedita possibilità di tracimazione dovuta alla realizzazione dell'arginatura.**

3.1.3 Stato di progetto - Configurazione "2"

Le condizioni al contorno di monte e di valle e le condizioni iniziali utilizzate nella configurazione di stato di progetto - Configurazione "2" sono le medesime dello stato di fatto e della Configurazione "1"; lo stesso

vale per le caratteristiche di scabrezza dell'alveo inciso e delle aree golenali limitrofe, che rimangono inalterate.

Nella Configurazione "2", la geometria dell'area oggetto dello studio è modificata, per effetto dell'inserimento della nuova struttura arginale prevista in sinistra idraulica.

Il nuovo rilevato arginale a difesa dell'abitato di Rivolta d'Adda si estende per una lunghezza di circa 1'530 m dalle vicinanze della spalla sinistra del ponte sull'Adda, fino all'innesto con la Strada per Cassano.

Rispetto alla Configurazione "1" il tracciato planimetrico della nuova arginatura è stato mantenuto più in aderenza all'alveo inciso del fiume Adda consentendo la protezione di alcune abitazioni presenti nelle immediate vicinanze della strada provinciale.

Il rilevato è stato ipotizzato avere una quota di sommità costante per tutto tratto e pari a 102.00 m s.l.m..

In Figura 27 si riporta un estratto planimetrico della Configurazione "2" del nuovo rilevato arginale di progetto.



Figura 27 - Planimetria nuovo rilevato arginale di progetto - Configurazione "2"

Si riportano in Figura 28 e in Figura 29 rispettivamente la distribuzione dei tiranti nel tratto analizzato e in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda.

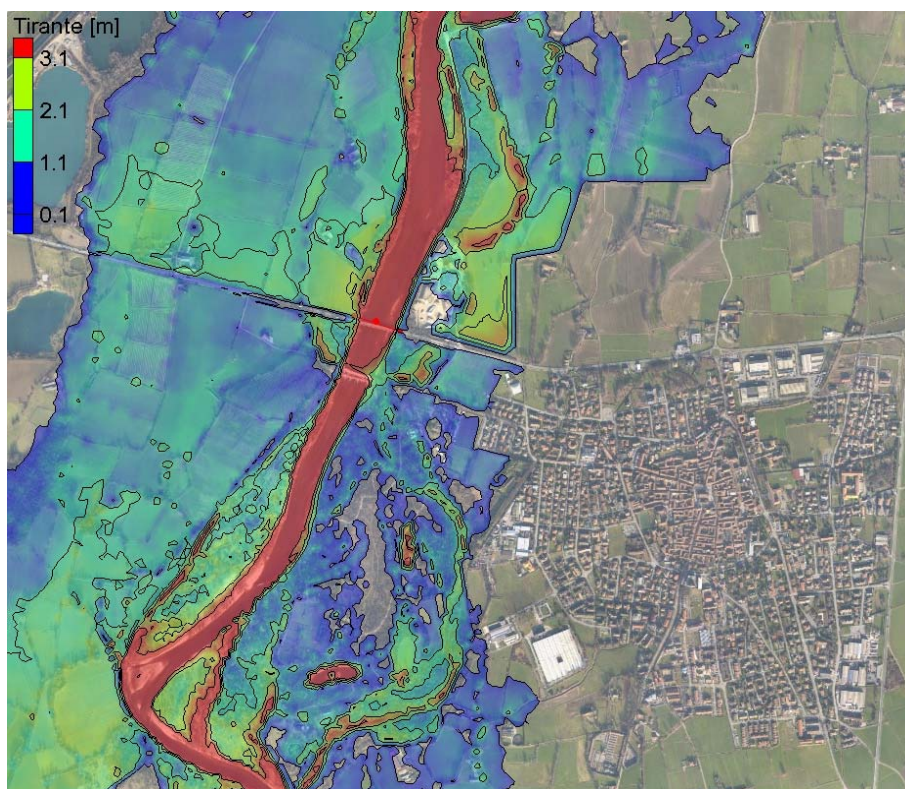


Figura 28 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda (Configurazione "2")

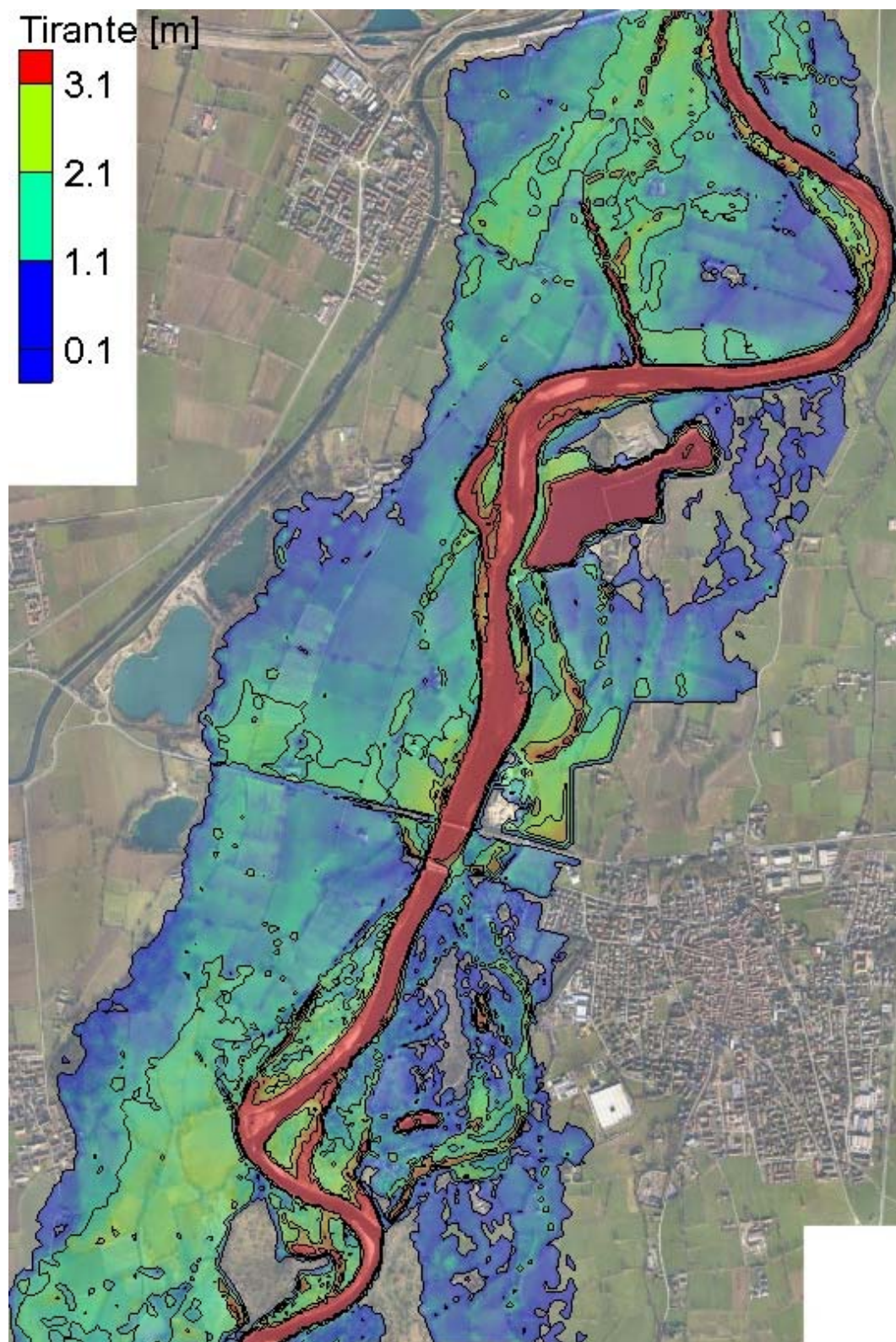


Figura 29 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo (Configurazione "2")

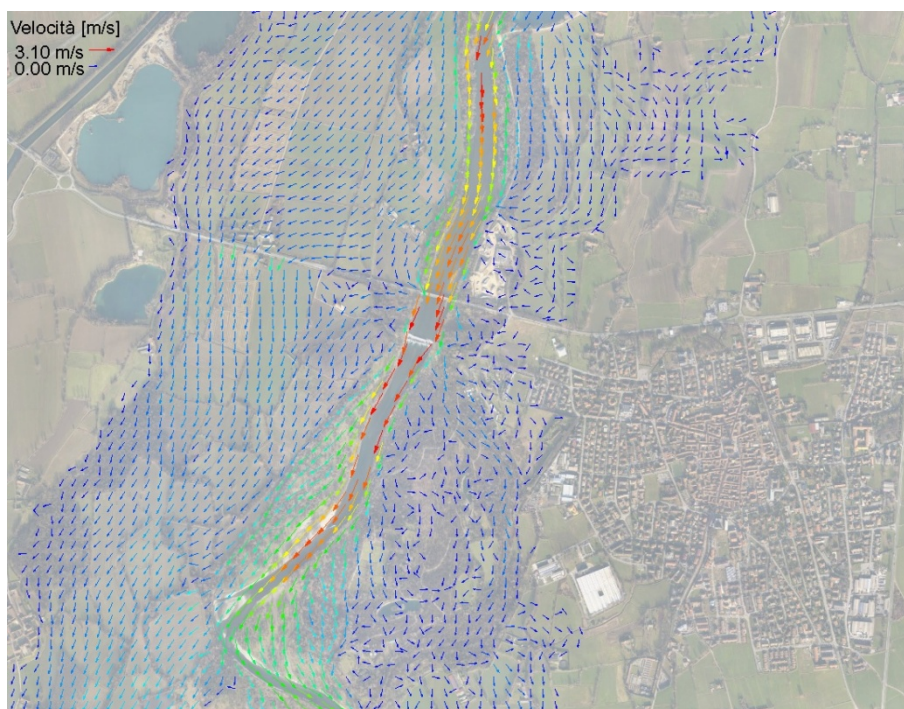


Figura 30 – Particolare della distribuzione del vettore velocità (Configurazione "2")

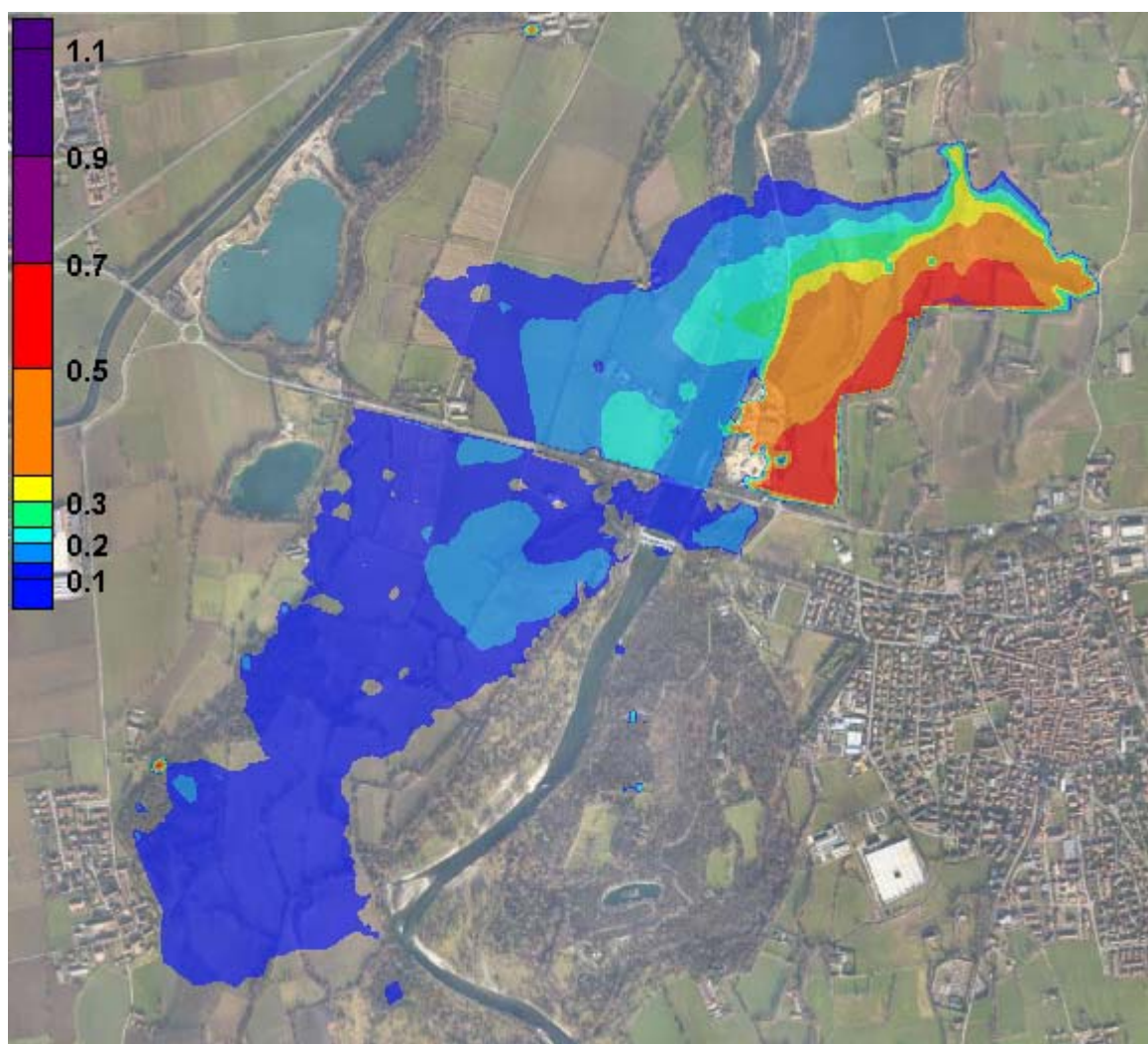
In Figura 30 sono evidenziate le velocità della corrente (circa 0.3-0.5 m/s) associate al deflusso della portata al colmo di piena con tempo di ritorno di 200 anni in prossimità dell'arginatura.

Anche in questa configurazione il nuovo argine protegge l'abitato di Rivolta d'Adda impedendo il deflusso dell'onda di piena all'interno dell'abitato stesso riducendo il rischio idraulico in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda.

Dal punto di vista idraulico, l'introduzione del rilevato arginale genera una differente configurazione di deflusso della piena, andando ad incrementare il tirante idrico in corrispondenza del nuovo fronte arginale.

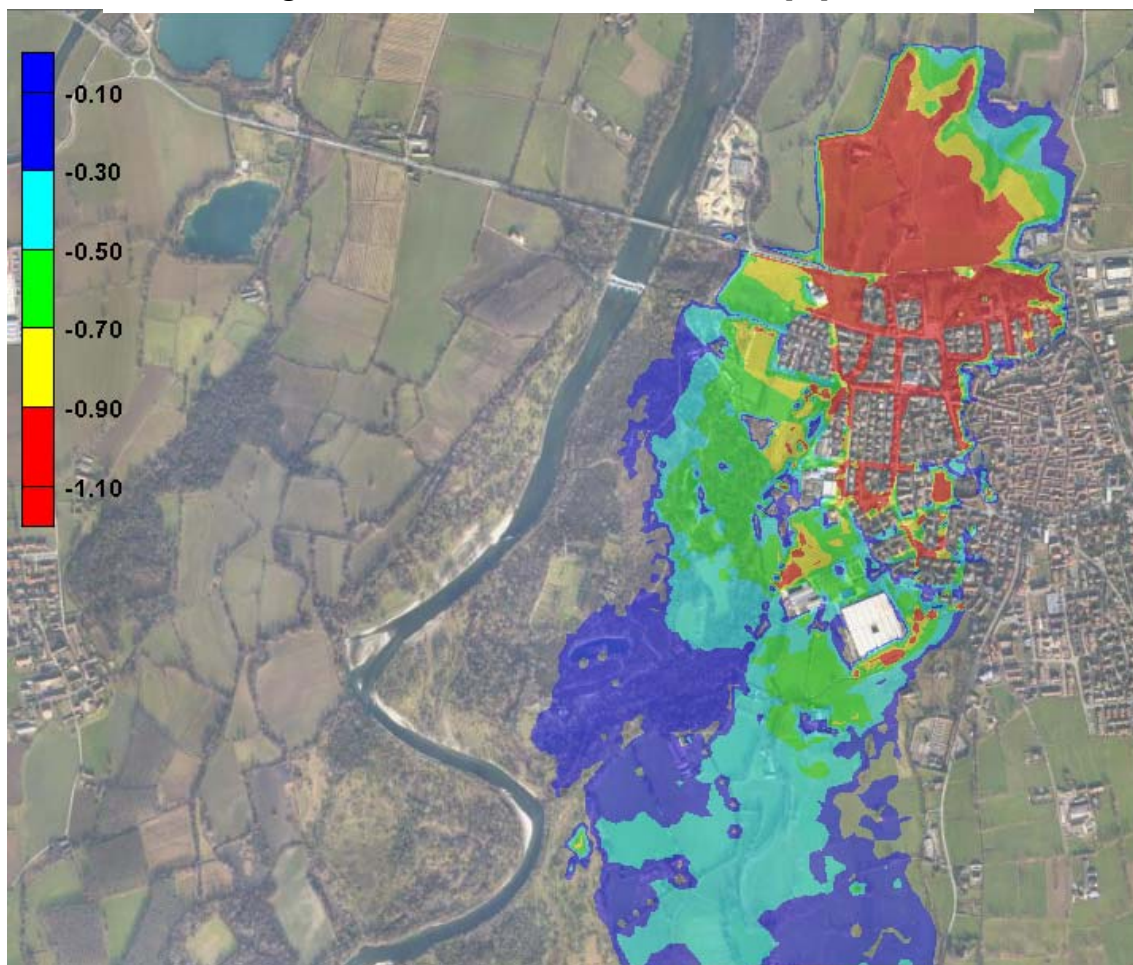
Al fine di determinare con maggior grado di dettaglio l'andamento del deflusso in corrispondenza del centro abitato di Rivolta d'Adda, si è modificata la mesh di calcolo come già descritto per la Configurazione "1".

Si riportano in Figura 31 le aree allagate in cui il tirante incrementa rispetto allo stato di fatto a causa dell'introduzione della nuova arginatura.

Quota Configurazione 2 – Quota stato di fatto > 0 [m]**Figura 31 - Aree con incremento del tirante rispetto allo stato di fatto**

Si evidenzia dall'analisi dell'immagine sopra riportata che gli incrementi maggiori si hanno in prossimità del piede della nuova arginatura in progetto come peraltro già riscontrato anche per la Configurazione "1".

In Figura 32 si riportano le aree che subiscono un azzeramento o un decremento del tirante rispetto allo stato di fatto grazie alla protezione della nuova arginatura.

Quota Configurazione 2 – Quota stato di fatto < 0 [m]**Figura 32 - Confronto tirante (Configurazione "2" < Stato di fatto)**

Dall'immagine sopra riportata si evince che tutto l'abitato di Rivolta d'Adda risulta essere protetto dalla nuova arginatura e al contempo si hanno sensibili diminuzioni del tirante anche a valle dell'abitato stesso.

Dai risultati della modellazione dello stato di progetto Configurazione "2" si evidenzia che la **quota massima del pelo libero in corrispondenza del ponte della S.P. 4 è di 100.56 m s.l.m. rispetto ai 100.31 m s.l.m. dello stato di fatto (incremento del profilo di piena di 0.25 m).**

Rispetto allo Stato di fatto la Configurazione "2" risulta essere del tutto identica alla Configurazione "1" ed in particolare in corrispondenza della sezione del ponte della SP14 presente le seguenti caratteristiche:

- la quota della rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in destra idraulica, pari a 100.19 m s.l.m. subisce un allagamento di circa 0.27 m con un incremento di 15 cm;
- la rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in sinistra idraulica, a differenza dello stato di fatto, non viene interessata da fenomeni di allagamento in quanto protetta dal nuovo rilevato arginale.

In corrispondenza del ponte della S.P. 4 si registra in condizioni di stato di progetto **Configurazione "2" una portata massima transitante attraverso le spalle del ponte di 1'736 m³/s con un incremento del deflusso pari a 123 m³/s rispetto allo stato di fatto ed un incremento nullo rispetto alla Configurazione "1", il che**

viene spiegato dal fatto che la strettoia del ponte risulta l'unica via di comunicazione monte-valle della S.P. 4, a causa dell'impedita possibilità di tracimazione dovuta alla realizzazione dell'arginatura.

3.1.4 Stato di progetto - Configurazione "3"

Le condizioni al contorno di monte e di valle e le condizioni iniziali utilizzate nella configurazione di stato di progetto - Configurazione "3" sono le medesime dello stato di fatto e della Configurazione "1"; lo stesso vale per le caratteristiche di scabrezza dell'alveo inciso e delle aree golenali limitrofe, che rimangono inalterate.

Nella Configurazione "3", la geometria dell'area oggetto dello studio riprende quella della Configurazione "2" nei punti di attacco del nuovo argine e parzialmente nella planimetria. La differenza consiste in un aumento dell'area difesa di circa 30'000 m².

Il nuovo rilevato arginale secondo quanto previsto in Configurazione "3" si estende, come per la Configurazione "2", per una lunghezza di circa 1'530 m dalle vicinanze della spalla sinistra del ponte sull'Adda, fino all'innesto con la Strada per Cassano.

Il rilevato è stato ipotizzato avere una quota di sommità costante per tutto tratto e pari a 102.00 m s.l.m..

In Figura 33 si riporta un estratto planimetrico della Configurazione "2" del nuovo rilevato arginale di progetto.



Figura 33 - Planimetria nuovo rilevato arginale di progetto - Configurazione "3"

Si riportano in Figura 34 e in Figura 35 rispettivamente la distribuzione dei tiranti nel tratto analizzato e in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda.

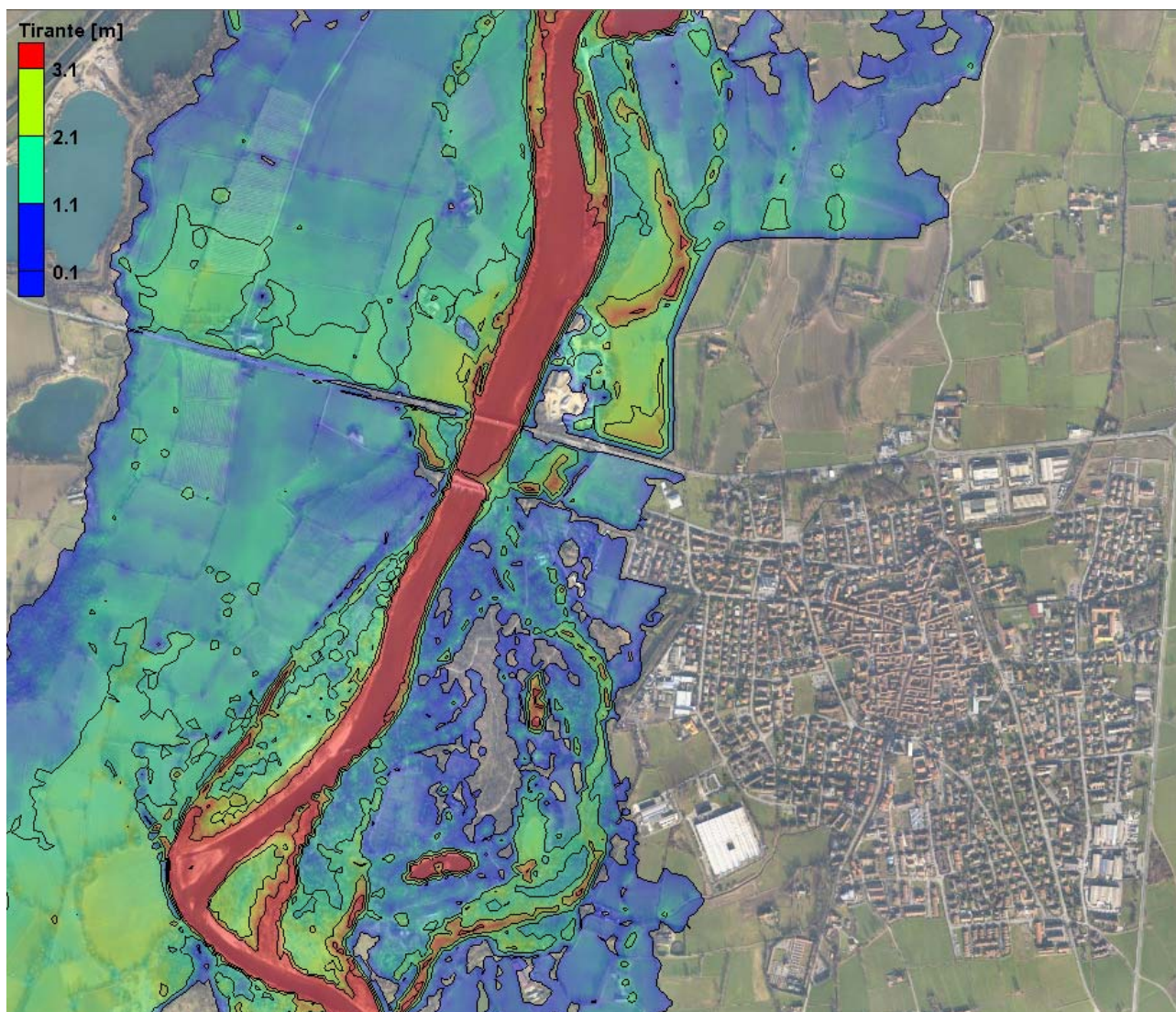


Figura 34 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda (Configurazione "3")

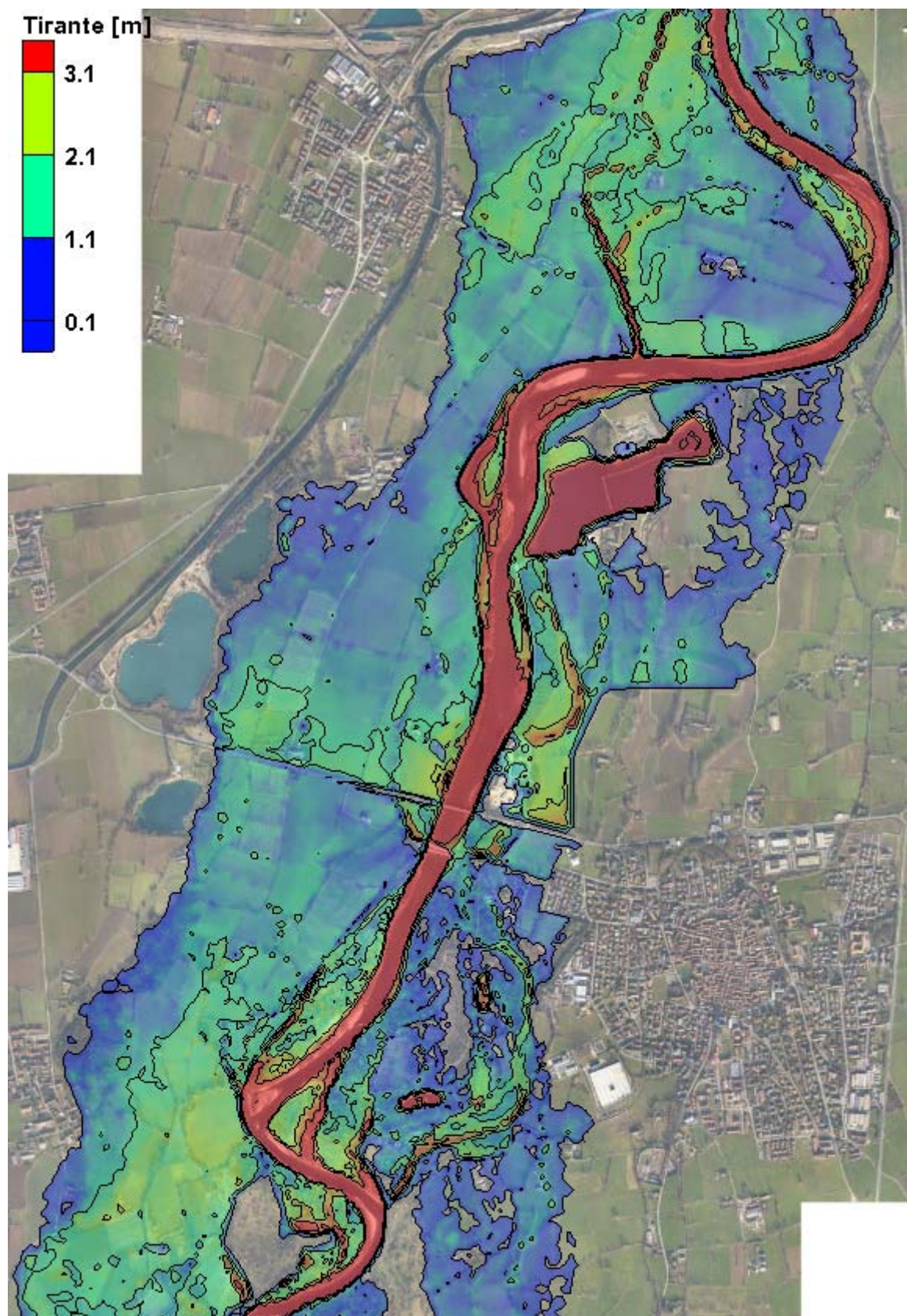


Figura 35 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo (Configurazione "3")



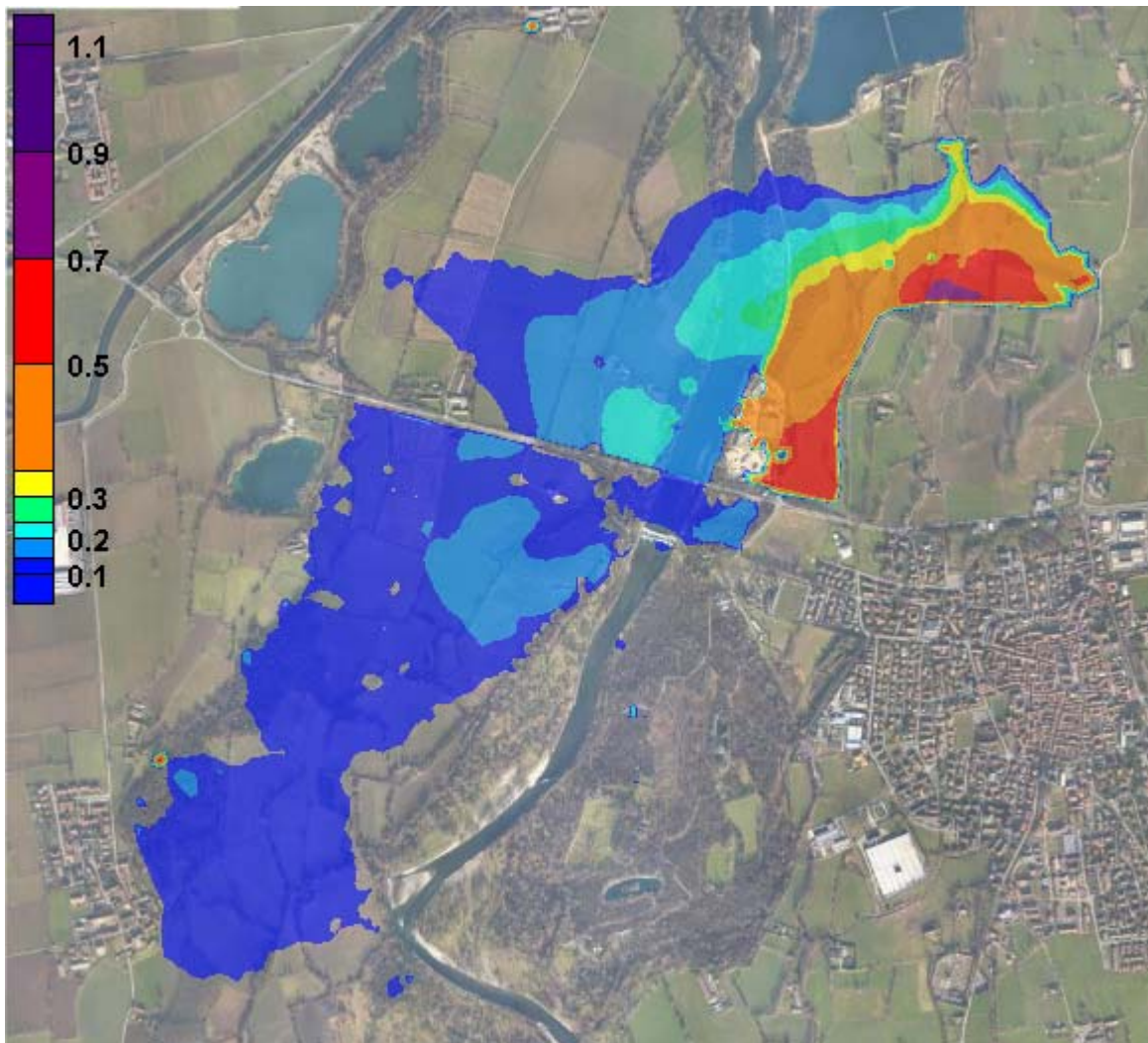
Figura 36 – Particolare della distribuzione del vettore velocità (Configurazione “3”)

In Figura 36 sono evidenziate le velocità della corrente (circa 0.3-0.5 m/s) associate al deflusso della portata al colmo di piena con tempo di ritorno di 200 anni in prossimità dell’arginatura.

Come in Configurazione “2”, anche in questa configurazione il nuovo argine protegge l’abitato di Rivolta d’Adda impedendo il deflusso dell’onda di piena all’interno dell’abitato stesso riducendo il rischio idraulico in corrispondenza dell’abitato di Rivolta d’Adda; dal punto di vista idraulico, l’introduzione del rilevato arginale genera una differente configurazione di deflusso della piena, andando ad incrementare il tirante idrico in corrispondenza del nuovo fronte arginale.

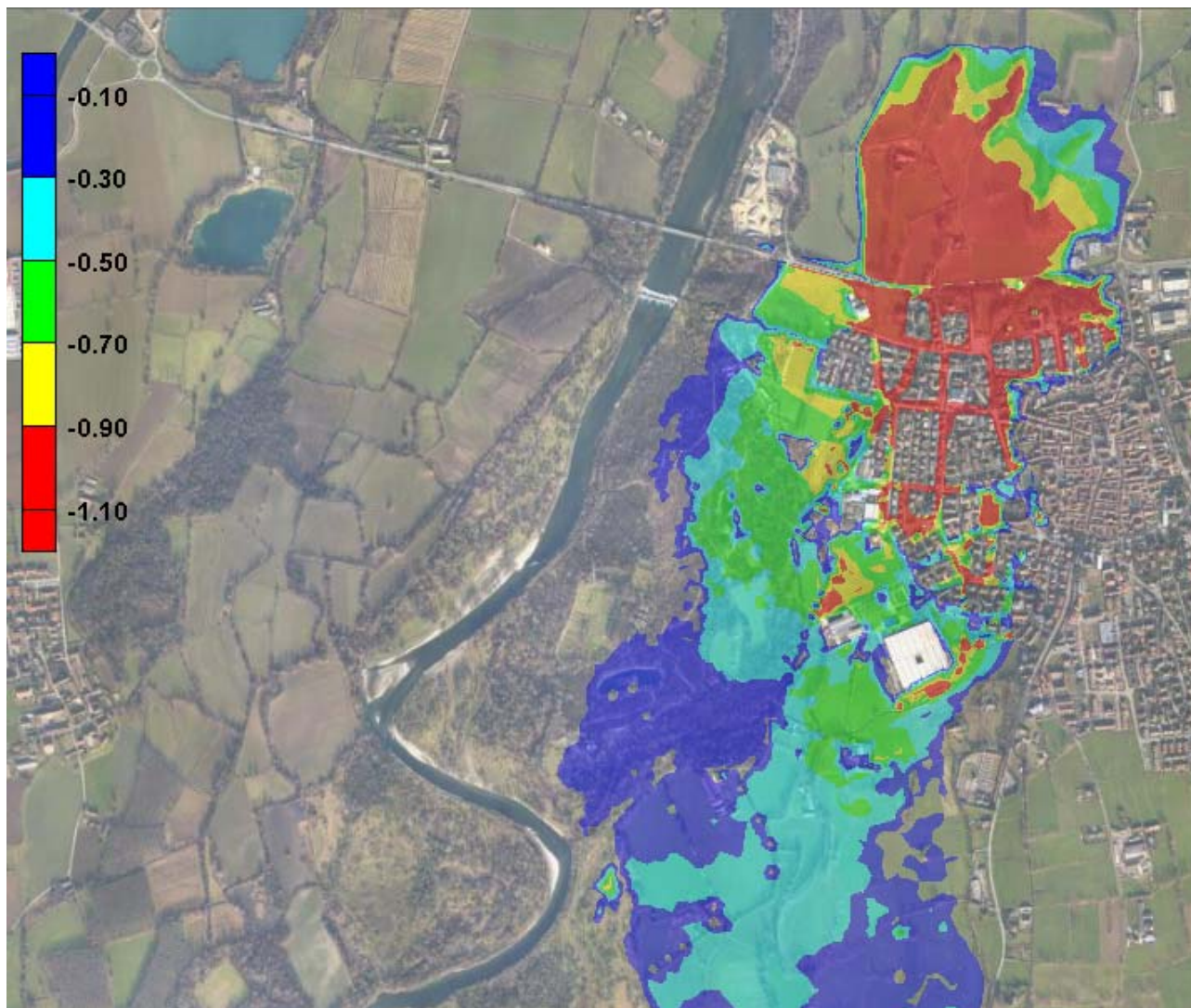
Al fine di determinare con maggior grado di dettaglio l’andamento del deflusso in corrispondenza del centro abitato di Rivolta d’Adda, si è modificata la mesh di calcolo come già descritto per la Configurazione “1”.

Si riportano in Figura 31 le aree allagate in cui il tirante incrementa rispetto allo stato di fatto a causa dell’introduzione della nuova arginatura.

Quota Configurazione 3 – Quota stato di fatto > 0 [m]**Figura 37 - Aree con incremento del tirante rispetto allo stato di fatto**

Si evidenzia dall'analisi dell'immagine sopra riportata che gli incrementi maggiori si hanno in prossimità del piede della nuova arginatura in progetto come peraltro già riscontrato anche per le precedenti Configurazioni.

In Figura 38 si riportano le aree che subiscono un azzeramento o un decremento del tirante rispetto allo stato di fatto grazie alla protezione della nuova arginatura.

Quota Configurazione 3 – Quota stato di fatto < 0 [m]**Figura 38 – Aree con decremento del tirante rispetto allo stato di fatto**

Dall'immagine sopra riportata si evince che tutto l'abitato di Rivolta d'Adda risulta essere protetto dalla nuova arginatura e al contempo si hanno sensibili diminuzioni del tirante anche a valle dell'abitato stesso.

Dai risultati della modellazione dello stato di progetto Configurazione "3" si evidenzia che la **quota massima del pelo libero in corrispondenza del ponte della S.P. 4 è di 100.56 m s.l.m. rispetto ai 100.31 m s.l.m. dello stato di fatto (incremento del profilo di piena di 0.25 m).**

Rispetto allo Stato di fatto la Configurazione "3" risulta essere del tutto identica alla Configurazione "1" ed in particolare in corrispondenza della sezione del ponte della SP14 presenta le seguenti caratteristiche:

- la quota della rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in destra idraulica, pari a 100.20 m s.l.m. subisce un allagamento di circa 0.28 m con un incremento di 16 cm;

- la rampa di accesso al ponte della S.P. 4 in sinistra idraulica, a differenza dello stato di fatto, non viene interessata da fenomeni di allagamento in quanto protetta dal nuovo rilevato arginale.

In corrispondenza del ponte della S.P. 4 si registra in condizioni di stato di progetto **Configurazione "3" una portata massima transitante attraverso le spalle del ponte di 1'736 m³/s con un incremento del deflusso pari a 123 m³/s rispetto allo stato di fatto ed un incremento nullo rispetto alle Configurazioni "1" e "2".**

3.1.5 Fascia B di progetto da Studio di Fattibilità

A titolo di verifica complementare si riporta di seguito la simulazione bidimensionale condotta utilizzando i dati della B di progetto attualmente in vigore nel tratto di studio.

Le condizioni al contorno di monte e di valle e le condizioni iniziali utilizzate nella configurazione Fascia B di progetto P.A.I. sono le medesime dello Stato di fatto e delle due Configurazioni di progetto "1" e "2"; lo stesso vale per le caratteristiche di scabrezza dell'alveo inciso e delle aree golenali limitrofe, che rimangono inalterate.

Nella presente configurazione la geometria dell'area oggetto dello studio è modificata, per effetto dell'inserimento della nuova struttura arginale prevista in sinistra idraulica in corrispondenza del rilevato della S.P. 4.



Rispetto alle due configurazioni di progetto, il tracciato planimetrico della "Fascia B di progetto" da Studio di Fattibilità è in aderenza al rilevato della S.P. 4 e, nella modellazione condotta, è stato ipotizzato avere una quota di sommità costante per tutto tratto e pari a 102.00 m s.l.m..

In Figura 39 si riporta un estratto planimetrico del rilevato arginale della B di progetto da Studio di fattibilità.



Figura 39 - Planimetria nuovo rilevato previsto dalla B di progetto da Studio di Fattibilità

Si riporta in Figura 40 e in Figura 41 la distribuzione dei tiranti nel tratto analizzato e in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda.

	<p>Sede Legale: Via Crocette 26 – Curtatone (MN)</p> <p>Sede Operativa: C.so Garibaldi 79 – Villafranca di Verona (VR) Tel-Fax: 045/2220488 – Mail: eos.ingegneria@gmail.com</p>	
---	--	---

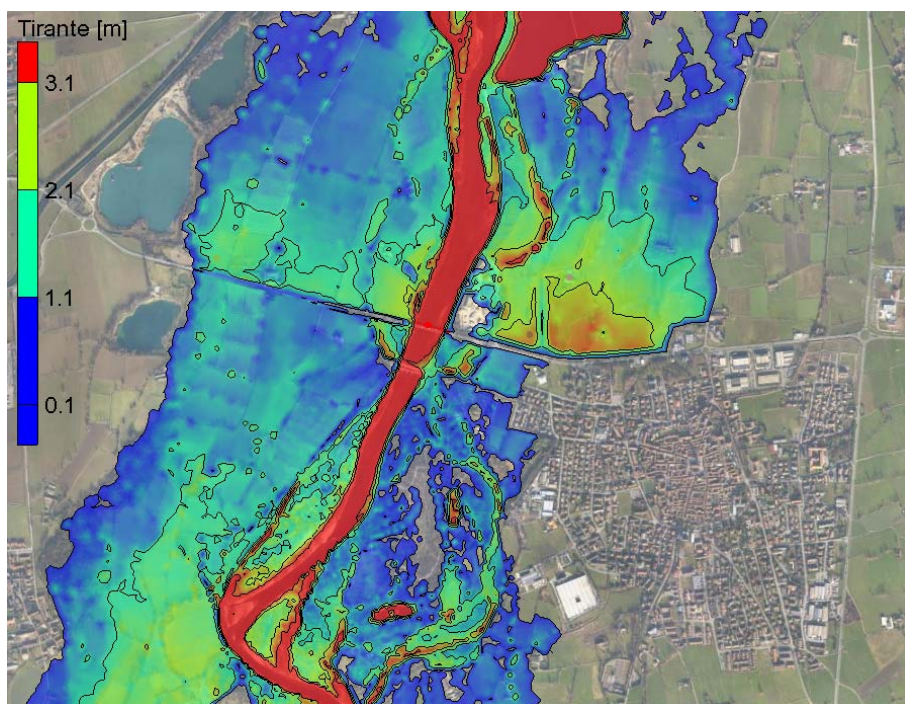


Figura 40 - Distribuzione planimetrica del tirante idrico a Rivolta d'Adda ("B di progetto Studio di Fattibilità")

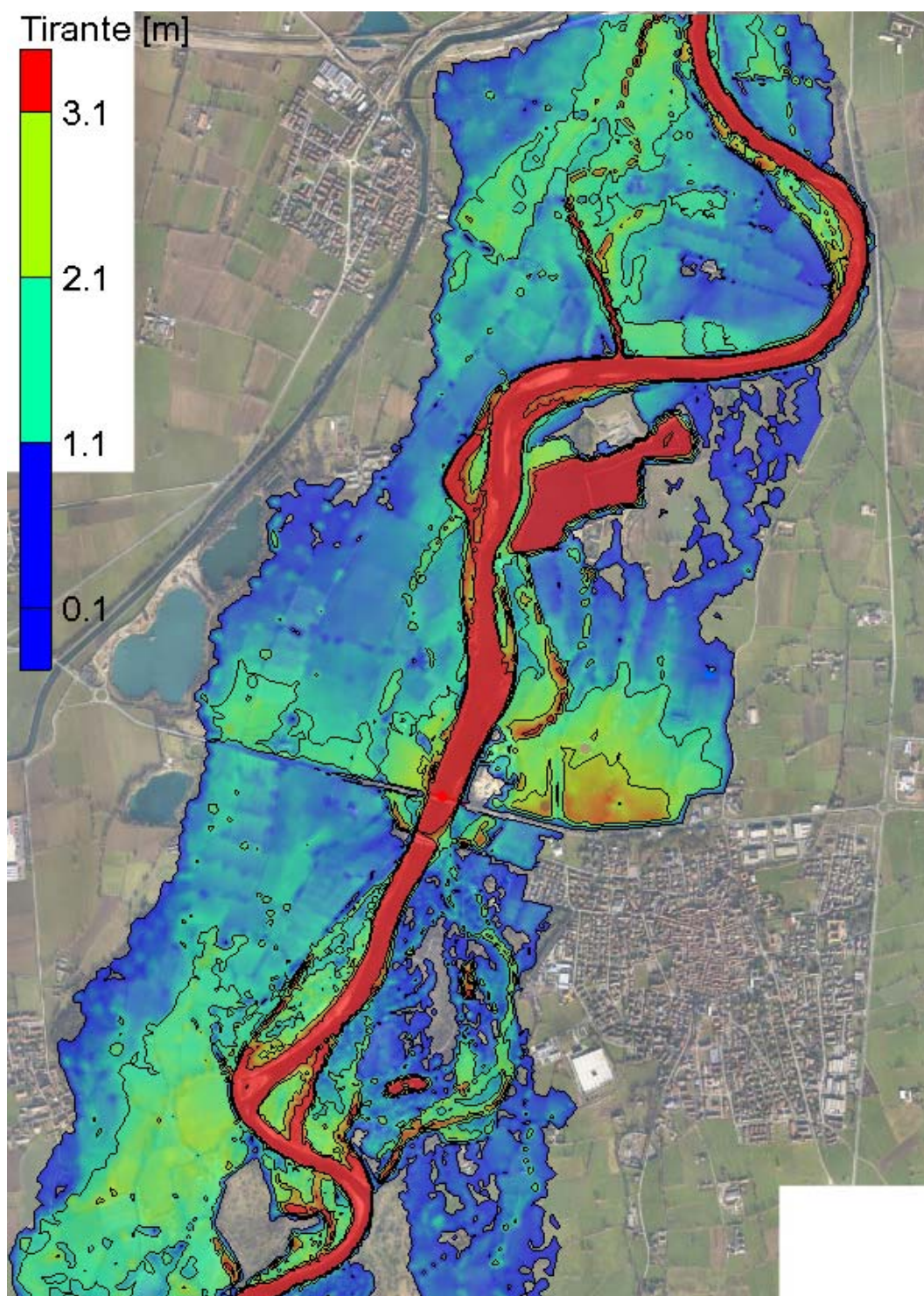


Figura 41 - Distribuzione del tirante idrico nel dominio di calcolo ("B di progetto Studio di Fattibilità ")

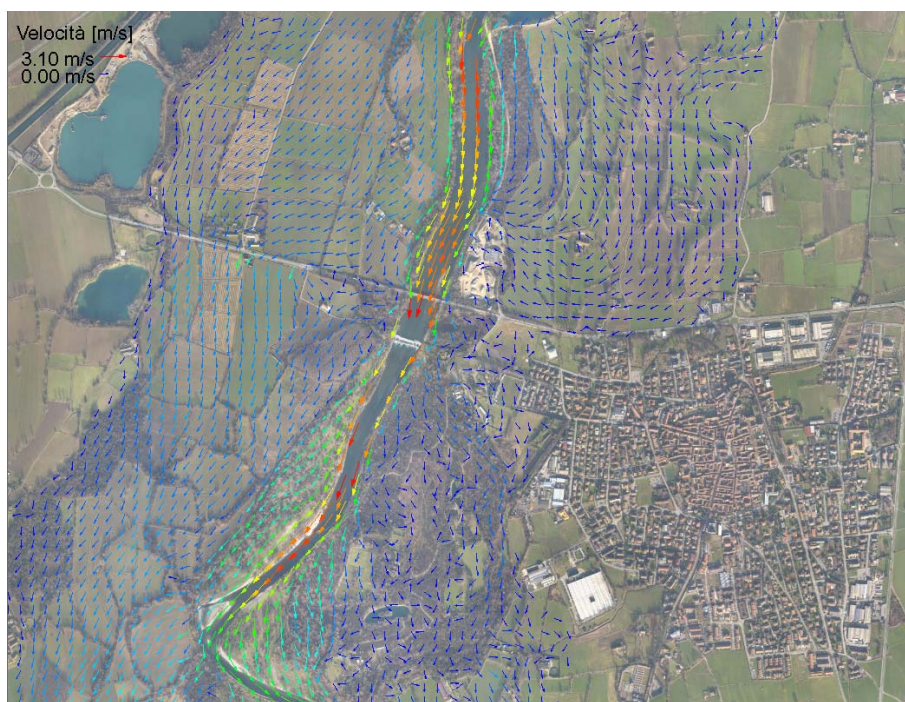


Figura 42 – Particolare della distribuzione del vettore velocità ("B di progetto Studio di Fattibilità")

In Figura 42 sono evidenziate le velocità della corrente (circa 0.3-0.5 m/s) associate al deflusso della portata al colmo di piena con tempo di ritorno di 200 anni in prossimità della Fascia B di progetto.

Nella configurazione prevista dalla Fascia B di progetto il nuovo argine protegge l'abitato di Rivolta d'Adda impedendo il deflusso dell'onda di piena all'interno dell'abitato stesso riducendo il rischio idraulico in corrispondenza dell'abitato di Rivolta d'Adda.

Dal punto di vista idraulico, la presenza del rilevato arginale genera una differente configurazione di deflusso della piena, andando ad incrementare il tirante idrico in corrispondenza del nuovo fronte arginale, ma non va a togliere volume di deflusso alla corrente in quanto adeso al rilevato stradale esistente. Tale configurazione non impedisce, al contrario delle due ipotesi di progetto indagate precedentemente, l'allagamento delle cascine presenti in sinistra idraulica poste subito a monte del rilevato stradale.

Si riportano nel seguito le differenze di tirante tra la configurazione di "B di progetto di Studio Fattibilità" e le prime due configurazioni di progetto ipotizzate.

Configurazione 1 – Studio di fattibilità [m]**Figura 43 - Confronto tra Configurazione “1” e B di progetto Studio di Fattibilità****Configurazione 2 – Studio di fattibilità [m]****Figura 44 - Confronto tra Configurazione “2” e B di progetto Studio di Fattibilità**

Dall'analisi delle figure riportate emerge chiaramente che le simulazioni condotte non presentano differenze significative se non nelle aree che vengono protette dalle stesse arginature. La Configurazione “3” risulta del tutto equivalente alla Configurazione “2”.

Dai risultati della modellazione della Fascia B di progetto si evidenzia che la **quota massima del pelo libero in corrispondenza del ponte della S.P. 4 è di 100.56 m s.l.m. rispetto ai 100.31 m s.l.m. dello stato di fatto (incremento del profilo di piena di 0.25 m).**

3.1.6 Confronto tra le simulazioni eseguite

Alla luce dell'invarianza delle grandezze idrauliche tra le simulazioni effettuate, per un confronto diretto tra le configurazioni planimetriche della nuova arginatura, sono stati identificati degli ulteriori punti specifici nell'area di intervento, come mostrato in Figura 45:

➤ Punto 1:

localizzato in sinistra idraulica in corrispondenza del piede della nuova arginatura nella Configurazione "2";

➤ Punto 2:

localizzato in sinistra idraulica in corrispondenza del piede della nuova arginatura nella Configurazione "1";

➤ Punto 3:

localizzato in sinistra idraulica, in prossimità del rilevato stradale;

➤ Punto 4:

localizzato in destra idraulica, in prossimità del rilevato stradale;

➤ Punto 5:

localizzato in corrispondenza della sezione del ponte sulla S.P. 4.



Figura 45 - Observation points

	Quota	Tirante [m]				
	[m slm]	Stato di fatto	Studio di Fattibilità	Config. "1"	Config. "2"	Config. "3"
Punto n. 1	101.66	-	0.27	0.17	0.24	0.25
Punto n. 2	100.17	1.00	1.72	1.72	-	-
Punto n. 3	99.28	1.80	2.36	2.36	2.36	2.36
Punto n. 4	99.18	1.26	1.34	1.33	1.34	1.34
Punto n. 5	96.38	4.04	4.18	4.08	4.18	4.18

Tabella 2 - Confronto tra i tiranti

Nella tabella sottostante si riportano, in riferimento ai punti di indagine numero 1 e 2, i valori di quota dei livelli di piena per le diverse simulazioni eseguite.

	Quota Terreno	Quota profilo di piena [m slm]				
	[m slm]	Stato di fatto	Studio di Fattibilità	Config. "1"	Config. "2"	Config. "3"
Punto n. 1	101.66	-	101.93	101.83	101.90	101.91
Punto n. 2	100.17	101.17	101.89	101.89	-	-

Tabella 3 - confronto tra i livelli

Ponendo la sommità della nuova arginatura ad una quota di 102.00 m s.l.m. nella Configurazione "1" si ottiene il contenimento della piena con un franco di 17 cm nel punto 1 e di 11 cm nel punto 2.

Nella Configurazione "2" e nella Configurazione "3" il punto 1 risulta contenere la piena con un franco di circa 10 cm e il punto 2 non risulta essere interessato da allagamenti. La configurazione "1" risulta equivalente alla simulazione condotta con la Fascia B di progetto Studio di Fattibilità.

Nella tabella sottostante vengono riportati gli ulteriori punti indagati.

	Quota Terreno	Quota profilo di piena [m slm]				
	[m slm]	Stato di fatto	Studio di Fattibilità	Config. "1"	Config. "2"	Config. "3"
Punto n. 3	99.28	101.08	101.64	101.64	101.64	101.64
Punto n. 4	99.18	100.44	100.52	100.51	100.52	100.52
Punto n. 5	96.38	100.42	100.56	100.46	100.56	100.56

Tabella 4 - confronto tra i livelli

Dalla Tabella 4 appare importante evidenziare come non vi sia sostanzialmente differenza in termini di incremento dei livelli tra la Configurazione "2" e la Configurazione "3" e che le soluzioni di progetto

proposte sono equivalenti o migliorative rispetto alla situazione prevista dalla Fascia B di progetto Studio di Fattibilità.

Si riporta in Tabella 5 il confronto delle massime portate transitanti durante l'onda di piena T200 nelle due sezioni di controllo rispettivamente:

- ponte della S.P. 4;
- condizione al contorno di valle del dominio di calcolo bidimensionale.

	Portata [m ³ /s]				
	Stato di fatto	Studio di Fattibilità	Config. "1"	Config. "2"	Config. "3"
Ponte S.P. 4	1'613.4	1'735.6	1'735.9	1'736.1	1'736.1
Sez. Valle dominio	1'948.1	1'947.8	1'947.8	1'947.9	1'947.9

Tabella 5 - Confronto tra le portate

Dalla tabella si evince un incremento della portata in corrispondenza del ponte della S.P. 4 passando dalla configurazione di stato di fatto alle configurazioni in cui si prevede la costruzione dell'arginatura a difesa dell'abitato di Rivolta d'Adda. Analizzando nello specifico il confronto tra la simulazione condotta con la Fascia B Studio di Fattibilità e le tre configurazioni di progetto (1, 2 e 3), emerge una sostanziale invarianza in termini di portata transitante, in entrambe le sezioni di controllo.

Per il calcolo dell'area d'invaso sottratta si è considerata la sola parte compresa tra il rilevato della S.P. 4 e i nuovi rilevati arginali nelle due configurazioni di progetto.

Dal punto di vista del volume di laminazione, sono state calcolate le superfici che vengono sottratte alla naturale espansione del corso d'acqua per la presenza della nuova arginatura.

- Fascia B di progetto Studio di Fattibilità - Area di espansione idraulicamente non più attiva: 0 m²;
- Configurazione "1" – Area di espansione idraulicamente non più attiva: 151'400 m²;
- Configurazione "2" – Area di espansione idraulicamente non più attiva: 432'600 m²;
- Configurazione "3" – Area di espansione idraulicamente non più attiva: 463'100 m².

Il corrispondente volume sottratto alla laminazione, considerando la massima quota di invaso 102.00 m slm, corrisponde a circa:

- Fascia B di progetto Studio di Fattibilità: 0 m³;
- Configurazione "1": 246'800 m³;
- Configurazione "2": 705'100 m³;
- Configurazione "3": 754'800 m³.

Si riporta in Tabella 6 il confronto dei volumi totali transitanti considerando l'onda di piena T200 nella condizione al contorno di valle del dominio di calcolo bidimensionale.

	Volumi [m ³]				
	Stato di fatto	Studio di Fattibilità	Config. "1"	Config. "2"	Config. "3"
Sez. Valle dominio	148'996'500	149'006'400	149'273'400	149'636'800	149'664'700
Variazione di volume rispetto allo stato di fatto	-	+ 9'900	+ 276'900	+ 640'300	+ 668'200

Tabella 6 - Confronto tra i volumi totali

Rispetto al volume totale di piena dello stato di fatto, tali valori rappresentano rispettivamente:

- +0.19 % per la Configurazione "1";
- +0.43 % per la Configurazione "2";
- +0.45 % per la Configurazione "3".