

## INDICE

1. Caratteristiche fisiche del bacino .....	3
2. Studi preliminari: modellazione idrologia del fiume Tanaro – generazione sintetica di eventi.....	4
3. Studi preliminari: Il modello idrodinamico 1D a fondo fisso .....	6
3.1. Portate massime nel tratto Alba- Alessandria.....	8
3.2. Portate massime a valle confluenza fiume Bormida.....	11
4. Progetto preliminare. modello numerico del nodo idraulico per la valutazione di fattibilità degli interventi.....	12
5. Progetto definitivo .....	15
5.1. Modello idrodinamico bidimensionale a fondo fisso .....	15
5.2. Progetto definitivo: il modello fisico a fondo fisso del tratto di fiume Tanaro compreso tra ponte ferroviario a monte e ponte Forlanini a valle.....	32
6. Conclusioni.....	35
7. Allegato 1 – Modello 2D proiezione di livelli e velocità nelle sezioni significative .....	38
8. Bibliografia essenziale.....	37

## INDICE FIGURE

Figura 1: Inquadramento territoriale del bacino del Tanaro .....	3
Figura 2 – Bacino idrografico del Fiume Tanaro.....	4
Figura 3: Distribuzione spaziale delle massime portate.....	8
Figura 4: Distribuzione spaziale dei massimi valori di portata/QPAI .....	9
Figura 5: Qmax UNIGE/QT200 PAI.....	12
Figura 6 Planimetria generale dell'area di studio con indicazione delle sezioni di restituzione dei risultati..	17
Figura 7 Mesh di calcolo.....	19
Figura 8 Inquadramento della zona interessata dalla modellazione numerica bidimensionale .....	20
Figura 9 : Livelli registrati presso la stazione idrometrica di Montecastello lungo il Tanaro .....	23
Figura 10: Livelli misurati lungo il Tanaro durante l'evento di piena dell'aprile 2009 .....	24
Figura 11: Livelli misurati lungo il Bormida durante l'evento di piena dell'aprile 2009.....	25
Figura 12: Livelli misurati lungo il Fiume Tanaro durante l'evento di piena dell'aprile 2009 .....	26
Figura 13: Livelli calcolati in corrispondenza della confluenza – SDF TR 200 Tanaro .....	27
Figura 14: Livelli calcolati in corrispondenza della confluenza – SDF TR 200 Tanaro .....	28
Figura 15: Livelli calcolati sul tratto di monte del Bormida – SDF TR 200 Bormida .....	29
Figura 16: Livelli calcolati sul tratto di monte del Bormida – SDF TR 200 Bormida .....	30
Figura 17 – Zona indagata nelle prove su modello fisico .....	32
Figura 18 – Porzione del modello fisico nella configurazione a fondo fisso.....	33

## INDICE TABELLE

Tabella 1- Valori di portata al colmo, per diversi tempi di ritorno, in corrispondenza a differenti sezioni disposte lungo l'asta del fiume Tanaro tra gli abitati di Alba e Montecastello (Al), sezione di chiusura del bacino .....	6
Tabella 2 - eventi caratterizzati da portata duecentennale in almeno una delle sezioni principali .....	7
Tabella 3: massimi valori di QT200 ad Alessandria .....	9
Tabella 5: Portate utilizzate come condizioni al contorno a monte .....	22
Tabella 6: Analisi granulometrica .....	24
Tabella 7: valori della superficie libera per QT200 (prove modello fisico) .....	34

## 1. CARATTERISTICHE FISICHE DEL BACINO

Il bacino del fiume Tanaro (Figura 1, Figura 2), chiuso a Montecastello, è caratterizzato da un'estensione di 7.985 km<sup>2</sup> ed è situato nel Piemonte meridionale in zona prevalentemente appenninica e collinare ubicata a sud-est di Torino. Il fiume Tanaro, con i suoi 276 km di lunghezza, rappresenta il secondo fiume della regione.

La lunghezza del corso d'acqua, l'ampiezza del bacino imbrifero e l'eterogeneità dei territori attraversati attribuiscono al fiume Tanaro particolari caratteristiche che lo differenziano dai principali corsi d'acqua alpini e appenninici: esso presenta, infatti, magre estive notevoli ed eventi di piena nei periodi primaverili ed autunnali piuttosto intensi

I principali affluenti sono: il torrente Stura di Demonte (l'unico affluente che contribuisce di modesti apporti nivo-glaciali durante la stagione estiva), il Bobore e il Versa che convogliano i deflussi delle zone collinari del Monferrato, il Belbo e il Tiglione, il fiume Bormida a valle di Alessandria e il torrente Orba che raccolgono le acque delle Langhe e dell'Appennino Ligure.

Normalmente il Tanaro presenta una portata media di circa 130 m<sup>3</sup>/sec. Il fiume ha tuttavia un massimo di portata nel mese di maggio ed un altro in novembre di origine esclusivamente pluviale.

Nei mesi autunnali, infatti, il Tanaro è stato spesso caratterizzato da piene eccezionali come quella verificatasi nel novembre del 1994, quando il fiume raggiunse una portata di oltre 4.000 m<sup>3</sup>/sec.

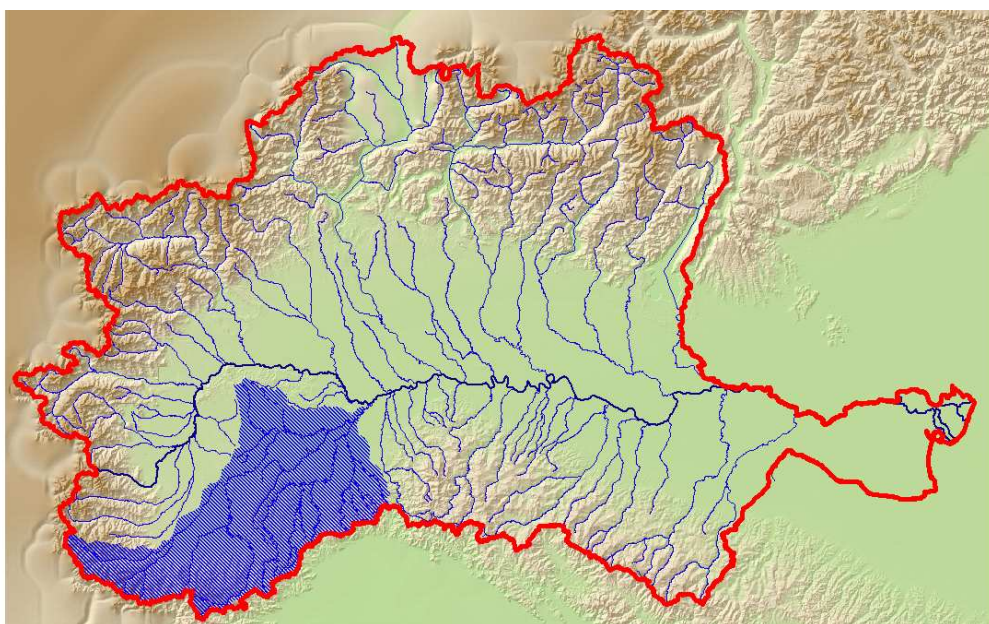


Figura 1: Inquadramento territoriale del bacino del Tanaro



Figura 2 – Bacino idrografico del Fiume Tanaro

## 2. STUDI PRELIMINARI: MODELLAZIONE IDROLOGIA DEL FIUME TANARO – GENERAZIONE SINTETICA DI EVENTI

*L'identificazione di eventi con assegnato tempo di ritorno in un bacino di grandi dimensioni, punto di partenza di qualsiasi pianificazione o procedura progettuale, richiede non solo l'individuazione della frequenza con cui si presentano eventi di durata e intensità tali da interessare l'intero bacino, ma anche la frequenza caratteristica delle strutture spazio-temporali di precipitazione che sollecitano il bacino.*

Con riferimento al bacino del Fiume Tanaro (chiuso a Montecastello – estensione di circa  $8000 \text{ km}^2$ ), nell'ambito delle attività previste dalla convenzione di collaborazione scientifica stipulata tra l'Agenzia e il Centro Interdipartimentale di Idrologia Dino Tonini dell'Università degli Studi di Padova (contratto rep n. 46 del 28.01.04), è stato sviluppato un modello idrologico fondato su presupposti geomorfologici.

Per maggiori approfondimenti si rimanda alla relazione finale dell'Ottobre 2005.

A tale scopo sono stati utilizzati strumenti di analisi di informazioni spazialmente distribuite, tra i quali tecniche di telerilevamento per la caratterizzazione dell'uso del suolo, modelli di estrazione della rete di drenaggio mediante mappe digitali di elevazione del terreno, metodi di interpolazione geostatistica delle precipitazioni.

I processi di infiltrazione e di produzione di deflusso sono stati trattati attraverso un modello semplificato alla Green & Ampt, mentre il modello di risposta idrologica era basato sull'impostazione lagrangiana del trasporto per tempi di residenza.

La calibrazione del modello è stata svolta sull'evento che ha interessato il bacino del fiume Tanaro nell'ottobre del 2000.

Per la successiva fase di validazione sono stati utilizzati gli eventi del luglio 2002, del novembre 2002 (caratterizzato da due successivi eventi meteorici particolarmente intensi verificatisi nel corso di 15 giorni) e del novembre-dicembre 2003. In fase di validazione, il modello è stato applicato in modalità interamente predittiva, mantenendo cioè costanti i valori dei parametri determinati nella calibrazione. L'esito della validazione, fondato sul confronto fra idrogrammi di piena modellati e idrogrammi misurati in numerose stazioni idrometriche, per eventi di diversa intensità e caratteristiche, si è rivelato positivo malgrado la presenza di fattori di incertezza, quali il malfunzionamento di strumenti nel corso delle piene, la variabilità di scale delle portate in sezioni non stabili, ecc...

Accertata la sufficiente aderenza del modello ai processi idrologici dominanti, è stato possibile, quindi, valutare i tempi di ritorno di eventi di piena del Tanaro sulla base di un metodo Montecarlo, che richiede la generazione sintetica di diverse realizzazioni di campi di precipitazione sul bacino di interesse e la modellazione della sua risposta idrologica con un dettaglio temporale inferiore al tempo caratteristico di risposta del sistema. I modelli stocastici di precipitazione, anche ove si disponga di una sequenza di registrazioni storiche limitata, permettono di generare una serie di eventi, con assegnate proprietà statistiche, tali da ricoprire un intervallo temporale arbitrario molto più ampio. Date le notevoli dimensioni del bacino in studio e la sua eterogeneità orografica e pluviometrica, è stato necessario implementare un modello originale di generazione stocastica della precipitazione nello spazio e nel tempo, rispettoso dei caratteri statistici osservati per mezzo di una fitta rete pluviometrica: è noto, infatti, che in un bacino di grandi dimensioni sarebbe inappropriato assumere precipitazioni uniformi o distribuzioni disomogenee nello spazio ma costanti nel tempo. *L'insorgere di condizioni di criticità risulta strettamente legato all'evoluzione temporale delle modalità con le quali i campi di precipitazione si distribuiscono sul dominio di interesse.*

Il modello stocastico di precipitazione predisposto è stato utilizzato per generare l'equivalente di 3600 anni di eventi di precipitazione caratteristici del periodo autunnale, simulando per ciascuno di essi la risposta idrologica del sistema e permettendo quindi di calcolare i tempi di ritorno delle portate al colmo e dei volumi transitati in corrispondenza di diverse sezioni significative. In particolare, nella Tabella 1 vengono riportati alcuni valori significativi di portata al colmo, per diversi tempi di ritorno, in corrispondenza di differenti sezioni disposte lungo l'asta del fiume Tanaro tra gli abitati di Alba e Montecastello (Al), sezione di chiusura del bacino.

	Portate idrologiche				Q PAI
	Q <sub>20</sub> [m³/s]	Q <sub>50</sub> [m³/s]	Q <sub>100</sub> [m³/s]	Q <sub>200</sub> [m³/s]	Q <sub>200</sub> [m³/s]
Alba	1500	2000	2280	2350	3050
Asti	1600	2100	2350	2550	3199
Alessandria	2200	2700	3200	3600	3800
Montecastello	4300	5000	5800	6600 (*)	4350

Tabella 1- Valori di portata al colmo, per diversi tempi di ritorno, in corrispondenza a differenti sezioni disposte lungo l'asta del fiume Tanaro tra gli abitati di Alba e Montecastello (Al), sezione di chiusura del bacino

Non meravigli il valore molto elevato delle portate previste a Montecastello (\*). Esse sono originate da due cause distinte: i) la probabilità non nulla che un evento meteorico abbia intensità e distribuzione spazio-temporale tali da rendere concomitante e paragonabili i picchi di piena alla confluenza Bormida – Tanaro; ii) l'adozione di uno schema semplificato nei modelli idrologici per la propagazione della piena nelle aste principali. Ciò vale in particolare per il contributo della Bormida che risulta presumibilmente sovrastimato dal presente modello. A tali limiti sopprime il modello idraulico di propagazione che verrà trattato al successivo paragrafo 3.

Un rilevante vantaggio del modello Montecarlo sviluppato è costituito dal fatto che esso rende disponibili non solo i valori della portata al colmo per tempi di ritorno assegnati, bensì gli interi idrogrammi di piena per gli eventi corrispondenti.

### 3. STUDI PRELIMINARI: IL MODELLO IDRODINAMICO 1D A FONDO FISSO

Nell'ambito delle attività previste dalla convenzione di collaborazione scientifica stipulata tra l'Agenzia e il Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università degli Studi di Genova (contratto rep n. 45 del 28.01.04), è stato sviluppato lo studio della propagazione nell'asta principale del Tanaro di eventi di piena statisticamente significativi generati nell'ambito della convenzione di cui al precedente paragrafo

Tale modello idrodinamico non-stazionario monodimensionale a fondo fisso è stato applicato al calcolo del profilo della corrente idrica associato ad eventi sintetici caratterizzati da assegnato periodo di ritorno.

Il tronco del fiume Tanaro in esame (da Ceva a confluenza Po) è stato sottoposto alle seguenti condizioni e ipotesi:

- portate liquide caratterizzate da un tempo di ritorno duecentennale valutate in base allo studio idrologico realizzato dall'Università di Padova nell'ambito del contratto di ricerca rep. N. 46/2004
- profilo altimetrico del fondo alveo ricostruito in base a rilievi topografici eseguiti nel 2002 e 2006

- nella sezione terminale del tronco in esame (confluenza Tanaro-Po, sez. n. 2) è stata imposta una scala di deflusso nella forma:

$$h = 71,6 + 0,068 Q^{3/5}$$

- nella sezione iniziale del tronco in esame (Ceva) e nelle sezioni di confluenza dei principali affluenti, per ognuno degli eventi simulati, è stato imposto l'idrogramma di piena ottenuto dalle simulazioni idrologiche realizzate dall'Università di Padova

- valori di conduttanza locali per l'alveo inciso: nel tratto Ceva-Alba è stato utilizzato un coefficiente di Strickler  $k_s = 22 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ; nel tratto Alba-Asti  $k_s$  linearmente crescente da 22 a  $28 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ; nel tratto Asti-Po  $k_s = 28 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$

- valori di conduttanza locali per le aree golenali: si è adottato un valore di  $k_s = 10 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$

Per maggiori approfondimenti si rimanda alla relazione intermedia n. 16/06 del dicembre 2006.

Sono state effettuate tutte le simulazioni degli eventi caratterizzati da un periodo di ritorno duecentennale in alcune delle principali sezioni del tratto vallivo del corso d'acqua (Alba, Asti, Alessandria e confluenza Po – vedi tabella 2).

Sezione in cui la portata è duecentennale	Sigla dell'evento
Alba	02815
	03996
	09531
	11638
Tratto Alba- Alessandria	00587
Alessandria	04302
	05848
	08391
	09389
Montecastello	02238
	03408
	05738
	07836
	08017
	11472
	12030
	12809

Tabella 2 - eventi caratterizzati da portata duecentennale in almeno una delle sezioni principali

### 3.1. PORTATE MASSIME NEL TRATTO ALBA- ALESSANDRIA

In Figura 3 è riportata la distribuzione spaziale delle massime portate che si realizzano durante la propagazione di tutti gli eventi simulati nel tratto del fiume Tanaro compreso tra Ceva e confluenza con il fiume Po.

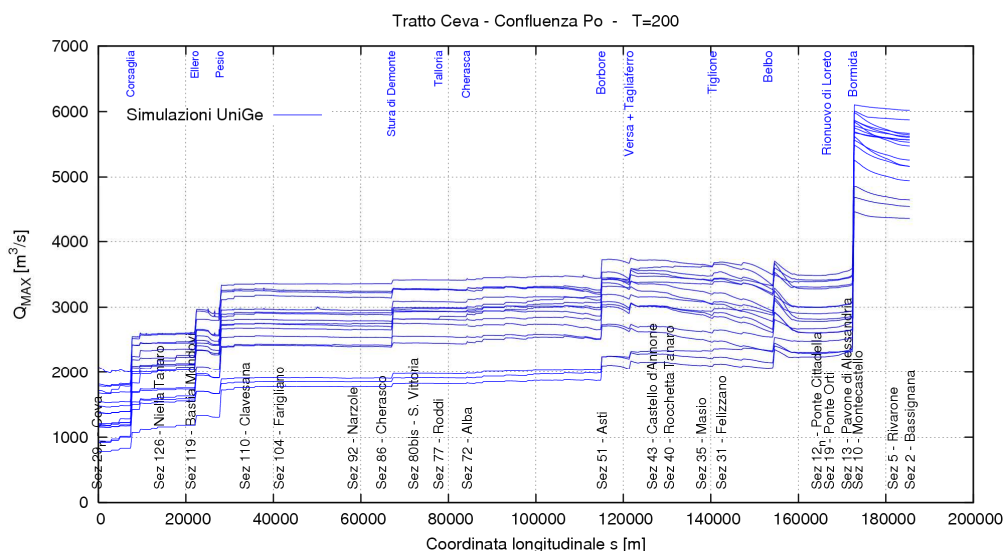


Figura 3: Distribuzione spaziale delle massime portate

Appare subito evidente come il contributo in termini di portata dovuto al fiume Bormida sia di gran lunga superiore a quello degli altri affluenti e nella quasi totalità degli eventi sia molto prossimo al valore della portata transitante in Tanaro. Questo effetto, inoltre, si risente in tutto il tratto compreso tra Montecastello e la confluenza Tanaro-Po, conducendo a valori di portata decisamente superiori al valore previsto nel PAI a Montecastello pari a 4.350 mc/s

Tale valore appare fortemente sottostimato e ciò ha suggerito l'opportunità di estendere il modello idraulico di propagazione anche alle aste dei fiumi Bormida e Orba..



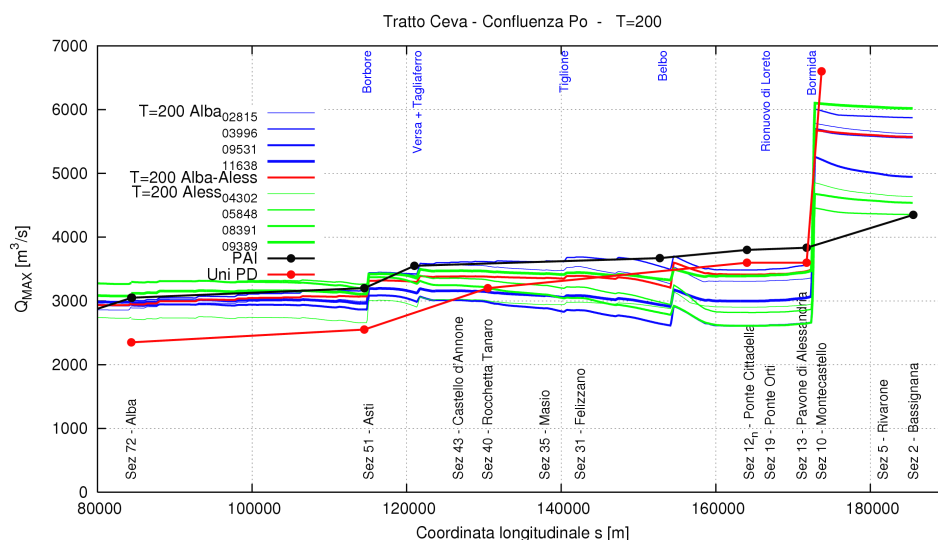


Figura 4: Distribuzione spaziale dei massimi valori di portata/QPAI

In Figura 4 è riportata la distribuzione spaziale dei massimi valori di portata per questi ultimi eventi, a cui sono stati sovrapposti i valori delle portate duecentennali previste dal P.A.I. in diverse sezioni.

Il confronto tra l'involuppo delle portate massime relative ai diversi eventi e i valori previsti nel P.A.I. mostra un buon accordo, particolarmente confortante viste le diverse modellazioni (idrologica-idraulica la prima, puramente idrologica la seconda), utilizzate per la stima dei valori di portata duecentennale.

I maggiori scostamenti si osservano nel tratto compreso tra la confluenza del Torrente Belbo e la stazione di Pavone di Alessandria, dove è visibile un marcato effetto di laminazione associabile alla forte espansione della corrente in aree golenali. Questo effetto, peraltro difficilmente stimabile attraverso modelli idrologici limita l'entità della portata massima ad Alessandria che in nessuno degli eventi analizzati ha superato i 3.485 m<sup>3</sup>/s.

In particolare in corrispondenza di Alessandria si è ottenuto (si riportano, tra tutti, solo gli eventi che hanno fornito i valori massimi di portata)

	Q(T=200) m <sup>3</sup> /s Alba (evento n. 03996)	Q(T=200) m <sup>3</sup> /s Alessandria (evento n. 00587)
<b>Alessandria</b>	<b>3.485</b>	<b>3.414</b>

Tabella 3: massimi valori di QT200 ad Alessandria

La portata con tempo di ritorno “idrologico” T=200 ad Alba, propagata col modello numerico alla sezione di Alessandria, produce ad Alessandria una portata “idraulica” pari a 3.485 m<sup>3</sup>/s. Il tempo di ritorno di tale portata alla sezione di Alessandria, potrebbe quindi essere superiore a 200 anni

La portata con tempo di ritorno “idrologico e idraulico” T=200 anni ad Alessandria è invece inferiore, anche se di poco, e risulta pari a 3.414 m<sup>3</sup>/s.

Ciò è spiegabile con la diversa distribuzione del campo della precipitazione (diverso contributo degli affluenti) nell’intero bacino in corrispondenza dei due eventi.

Le portate stimate ottenute dall’uso congiunto dei modelli idrologico ed idraulico, risultano scientificamente basate e quindi adottabili nell’ambito della futura pianificazione e protezione idraulica di bacino.

A favore di sicurezza e tenendo conto delle approssimazioni dei modelli numerici, è plausibile utilizzare una portata di progetto duecentennale pari a 3.500 m<sup>3</sup>/s per la città di Alessandria a monte di confluenza Bormida.

SEZIONE	FONDO	Qmax	hmax	ARGINE	
	m	m <sup>3</sup> /s	m	sx (m)	dx (m)
31 - Felizzano fm	90,13	3.689	100,67	102,11	103,00
31 fv	90,13	3.688	101,02	102,11	103,00
30	86,69	3.677	100,14	101,80	102,69
29	86,07	3.647	99,34	101,28	100,00
28	85,97	3.618	98,13	96,11	99,21
26	86,98	3.531	97,89	97,94	95,54
25	84,97	3.665	97,37	97,94	99,73
24	84,83	3.504	97,32	95,96	95,59
23 fm	84,46	3.486	97,05	95,45	99,00
23 fv	84,46	3.486	97,03	95,45	99,00
18_n - Ponte Ferrovia f	85,73	3.485	95,30	95,18	95,16
18_n fv	85,73	3.485	95,29	94,22	94,64
16_n fm	84,86	3.485	95,15	94,04	94,39
15_n fv	84,86	3.485	94,99	94,00	94,26
14_n	84,98	3.485	94,71	93,92	93,70
13_n	85,24	3.485	94,44	93,88	93,77
12_n - Ponte Cittadella	84,96	3.485	94,37	93,85	93,90
11_n fv	82,50	3.485	94,64	94,20	94,39
10_n	82,45	3.485	94,26	94,33	94,33
9_n	82,06	3.485	93,79	93,55	94,11
8_n	77,09	3.485	93,63	93,26	93,95
7_n	81,03	3.487	93,40	92,76	92,31
6_n	81,21	3.487	93,34	92,66	92,20
5_n	80,32	3.487	93,23	92,56	92,30
20	80,05	3.487	93,17	92,50	92,26
4_n	80,29	3.487	93,10	92,47	92,35
3_n	79,89	3.488	92,99	92,58	92,27
2_n - Ponte ANAS - fm	81,11	3.491	92,82	92,50	92,23
1_n fv	80,42	3.495	92,71	92,50	92,07
19 im	79,60	3.499	93,09	92,50	92,20
19 - Ponte Orti - fm	79,60	3.500	92,65	95,09	94,97
19 fv	79,60	3.501	92,26	95,09	94,97

SEZIONE	FONDO	Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> /s	h <sub>max</sub> m	ARGINE	
	m			sx (m)	dx (m)
18	81,94	3.501	92,49	91,85	90,23
17	81,38	3.515	91,54	91,77	90,55
16	79,67	3.531	90,96	91,77	92,08
14	79,27	3.551	90,43	91,77	90,85
13 - Pavone di Alessandria	77,88	3.552	90,01	93,29	94,47
13 fv	77,88	3.552	89,94	93,29	94,47
12	79,47	3.583	90,01	90,00	95,00
11	78,83	5.005	89,84	88,70	96,42
10 - Montecastello	76,88	5.982	89,21	88,83	88,48
8	76,96	5.923	88,63	93,98	87,29
7	76,80	5.903	87,92	93,15	87,29
6	75,46	5.895	87,13	95,00	86,60
5 - Rivarone	73,77	5.887	85,98	98,67	86,69
4	71,92	5.884	85,53	96,00	86,75
3	72,45	5.877	84,93	87,00	83,96

**Tabella 3**

### 3.2. PORTATE MASSIME A VALLE CONFLUENZA FIUME BORMIDA

Analogamente alle modellazioni idrologiche/idrauliche eseguite nel tratto del bacino del Fiume Tanaro a monte della confluenza con il F. Bormida, è stata eseguita la propagazione di eventi intensi (identificati attraverso scenari idrologici relativi all'intero bacino del Fiume Tanaro e caratterizzati da tempo di ritorno duecentennale a Montecastello. Eventi cod. 02238, 03408, 05738, 07836, 08017, 11472, 12030, 12809) attraverso l'implementazione di un modello di moto vario a fondo fisso che comprende le aste principali del Tanaro, Bormida e Orba.

Sulla base degli esiti del modello idraulico, che nella fase di progettazione preliminare erano ancora in corso di perfezionamento, i valori della portata massima defluente a Montecastello risultano compresi tra un minimo di 4300 m<sup>3</sup>/s e un massimo di 5400 m<sup>3</sup>/s, inferiori rispetto ai valori ottenuti attraverso la modellazione della propagazione delle piene lungo la sola asta del Tanaro (valore massimo di 5950 m<sup>3</sup>/s per l'evento 12030) e decisamente più contenuti rispetto al valore di 6600 m<sup>3</sup>/s identificato dallo studio idrologico dell'Università di Padova.

Confrontando l'involuppo delle portate massime relative al tratto alessandrino e al tratto finale del Tanaro con i valori indicati dal P.A.I. (Figura 5) è possibile osservare come, mentre nel tratto cittadino di Alessandria i risultati suggeriscano una sovrastima del valore massimo della portata da parte del P.A.I., nel tratto a valle della confluenza con il Fiume Bormida le portate P.A.I. risultano inferiori rispetto a quelle qui ottenute (4350 m<sup>3</sup>/s contro 5412 m<sup>3</sup>/s). Risulta peraltro evidente come quest'ultimo risultato vada ascritto alla possibile contemporaneità degli eventi e alla ridotta laminazione che avviene lungo il Bormida e l'Orba

Alla luce di quanto sopra esposto si è assunta una portata duecentennale di progetto a valle della confluenza con il T. Bormida pari a **5.400 m<sup>3</sup>/s** (valore che nella fase di progettazione preliminare, si era assunta pari a 5.100 m<sup>3</sup>/s, non essendosi ancora conclusi gli approfondimenti idraulici sui due affluenti Orba e Bormida)

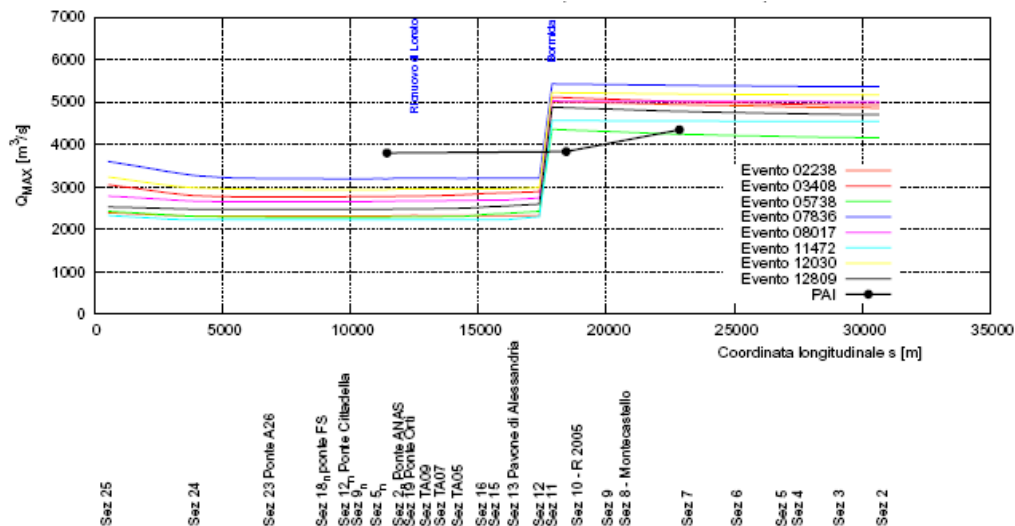


Figura 5: Qmax UNIGE/QT200 PAI

#### 4. PROGETTO PRELIMINARE. MODELLO DEL NODO IDRAULICO PER LA VALUTAZIONE DI FATTIBILITÀ DEGLI INTERVENTI

L'analisi idraulica si è basata sul modello, già predisposto dall'Università di Genova nel corso degli studi citati, opportunamente limitato nell'intorno d'interesse (dalla foce in Po a Solero) e modificato nella geometria per ipotizzare i possibili scenari di intervento.

In particolare si sono mantenute le medesime sezioni trasversali di calcolo, distanze relative e scabrezze, modificando per i vari scenari esclusivamente le sezioni trasversali interessate dai proposti interventi di ricalibratura delle sponde e/o abbassamenti del fondo alveo.

Per il calcolo si è utilizzato il codice HEC RAS dell'US Army Corps of Engineers, modello numerico che si basa sulla risoluzione di equazioni in moto permanente o vario delle correnti a pelo libero, secondo una schematizzazione monodimensionale.

Ritenendo trascurabili nell'intorno d'interesse i fenomeni di laminazione in linea del corso d'acqua si è ritenuto adeguato procedere con analisi in moto permanente (comunque a favore di sicurezza l'assunzione)

Le verifiche sono state eseguite assumendo come portata di progetto, quella relativa a tempo di ritorno 200 anni pari a 5.100 m<sup>3</sup>/s a valle della confluenza Bormida e 3.500 m<sup>3</sup>/s a monte della stessa.

Le modifiche introdotte sulla configurazione geometrica attuale sono consistite essenzialmente in:

1. eliminazione del ponte della Cittadella ed eliminazione della soglia di valle dello stesso con contestuale ricalibratura del fondo a pendenza costante fino al ponte FS;

2. ricalibratura in sponda destra del tratto d'alveo da valle del ponte Cittadella fino oltre il ponte Forlanini (area golenale antistante il quartiere Orti);
3. inserimento delle arginature nei tratti tuttora sprovvisti.

Le diverse ipotesi d'intervento sono state simulate in sequenza al fine di comprenderne le relative e successive influenze, fino ad ottenere la soluzione ideale per limitare i livelli idrici in tutto il tratto a monte del ponte Forlanini (Orti) considerando un volume di ricalibratura coerente con le necessità di materiale per i rilevati arginali da adeguare.

Dalla simulazione finale si sono quindi estratti i profili longitudinali in corrispondenza delle arginature ed individuati di conseguenza i tratti più critici in cui si rendono comunque necessari gli adeguamenti.

#### *Interventi nel tratto ponte Cittadella – ponte FS*

Come già evidenziato negli studi dell'Università di Genova l'eliminazione del ponte della Cittadella (e la sua sostituzione con un manufatto idoneo per quota ed avente minimo effetto di rigurgito) insieme all'abbassamento della soglia a valle dello stesso (di almeno 3 m), provoca un notevole miglioramento nelle condizioni di deflusso nel tratto di monte ed in particolare in quello fino al ponte FS.

Tale effetto si manifesta in una diminuzione di quota del pelo libero, media nel tratto Cittadella-FS, di circa 40 cm.

La schematizzazione dell'intervento nel modello consiste nell'abbassamento del fondo su tutte le sezioni che vanno dalla soglia di valle del ponte Cittadella, dove l'abbassamento è massimo e pari a 3m, fino a risalire, con pendenza costante, alla quota di fondo inalterata al ponte FS. Così modificata la pendenza media del fondo risulta dello 0.40 %.

La stabilità di tale configurazione, non facilmente determinabile per via numerica, dovrà essere provata su modello fisico al fine di stabilire l'eventuale necessità di opere di stabilizzazione del fondo e/o delle sponde, per garantirne l'invariabilità nel tempo.

#### *Interventi nel tratto a fronte del quartiere Orti*

L'analisi planimetrica di questo tratto fluviale manifesta chiaramente una ridotta larghezza dell'alveo inciso se comparata con quelli limitrofi, l'eventualità di un allargamento dello stesso era già stata avanzata nei primi studi effettuati sul nodo di Alessandria e riproposta anche negli scenari d'intervento ipotizzati dall'Università di Genova.

L'ipotesi originale d'intervento formulata dall'Università di Genova è stata in questo contesto ottimizzata, uniformando il tratto in questione agli altri tratti posti a monte (oggetto di interventi di allargamento dell'alveo) ed in misura ancora maggiore a valle, dove gli interventi iniziati nel 1996 hanno condotto ad una sezione composta per l'alveo inciso della larghezza massima di circa 180 m che viene interamente interessata soltanto per le piena maggiori.

Tale configurazione, applicabile soltanto nei tratti in cui l'ampiezza delle golene lo consente, ha il pregio di limitare le divagazioni d'alveo in quanto mantiene le portate di magra all'interno dell'alveo inciso originale, interessando gli ampliamenti soltanto per le portate maggiori.

L'ampliamento proposto, realizzato interamente in sponda destra, porta la parte superiore dell'alveo inciso ad un'ampiezza che va dai 150 ai 170 m, lasciando una parte inalterata dell'alveo con una profondità media di circa 5 m.

Tale intervento si raccorda a monte con gli ampliamenti a tutt'alveo realizzati contestualmente agli interventi di rialzo/realizzazione dei muri/rilevati arginali per circa un km a valle del ponte Cittadella ed a valle con gli interventi di ricalibratura a sezione composta, realizzati su sponde alternate, che hanno interessato la zona che va da valle del ponte Forlanini fino a Montecastello – confluenza Bormida.

L'intervento comporterà un allargamento in sommità che andrà dai 30 ai 60 m, mentre la golena bassa che si andrà a formare avrà una pendenza longitudinale dello 0.1% al fine di consentire il corretto deflusso delle acque senza tuttavia provocare erosione. Le analisi su modello fisico di cui al paragrafo seguente sono state condotte al fine di determinarne la validità sotto il profilo del trasporto solido e di valutarne la stabilità morfologica nel tempo .

#### *Risultati del modello preliminare*

Dalla modellazione effettuata la combinazione dei primi due interventi sopra descritti avrà un effetto di limitazione dei livelli idrici di piena che va dai 55 ai 75 cm sulla portata duecentennale assunta ( $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ), la successiva verifica con la portata duecentennale stabilita attualmente dal P.A.I. ( $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ha dimostrato la possibilità di transito della stessa nel centro di Alessandria seppure con franco ridotto (25-30 cm).

#### *Indicazioni sugli ulteriori approfondimenti necessari per la progettazione definitiva*

Le valutazioni fatte in fase preliminare col modello monodimensionale appena descritto, ritenute sufficienti in tale fase per la valutazione di massima delle dimensioni arginali, non possono ritenersi del tutto soddisfacenti la valutazione di tutte le dinamiche connesse con il dimensionamento definitivo dei manufatti arginali e per il loro ottimale inserimento/adeguamento. Infatti le semplificazioni introdotte dallo schema monodimensionale a fondo fisso non consentono di tener conto delle problematiche di **trasporto solido**, molto importanti nel tratto cittadino in cui è ipotizzato l'abbassamento della soglia del ponte Cittadella, e di quelle **idrodinamiche** prettamente **bidimensionali** del tratto che va da valle della città fin oltre la confluenza, caratterizzato ad una geometria che rende sicuramente non trascurabili le componenti di moto non parallele all'alveo inciso, sia per geometria propria della confluenza sia per la presenza di rilevati stradali (tangenziale di AL e A21) e arginali golenali su più ordini e direzioni.

Si è pertanto ritenuto di procedere, nell'attuale fase di progettazione definitiva, a ricavare gli elementi essenziali nei vari tratti analizzati attraverso la **modellazione fisica** del tratto dal ponte FS al ponte Forlanini e attraverso una **modellazione bidimensionale** a fondo fisso nel tratto di confluenza e sul tratto interessato dalle opere sul Bormida.

5.

## 6. PROGETTO DEFINITIVO

Sulla base dei parametri idrologici ed idraulici discussi ai paragrafi 2 e 3, e in base alle indicazioni di necessità di adeguamento del sistema difensivo contenute nel progetto preliminare, si è proceduto ad una definizione dei profili della superficie libera da assumere per l'adeguamento definitivo del nodo idraulico di Alessandria oggetto del presente progetto.

In particolare per il tratto di monte – tratto del F. Tanaro a valle dell'ex- ponte della Cittadella a monte e del Ponte della Tangenziale – si sono assunti i profili della superficie libera ottenuti nell'ambito delle sperimentazioni a fondo fisso (v. Paragrafo 6.2), mentre per la zona di confluenza a valle e per il tratto di F. Bormida fino al ponte FS, si sono assunti i valori ottenuti nell'ambito della modellazione 2D di cui si tratta nel paragrafo 6.1. Le modellazioni hanno assunto gli stessi parametri di progetto in termini di portate, scabrezze e parametri geometrici.

### 6.1. MODELLO NUMERICO IDRODINAMICO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO

#### *Premesse*

L'AIPO ha conferito alla società Idrostudi Srl l'incarico di consulenza tecnico-scientifica per la “Modellazione numerica bidimensionale del tratto di confluenza tra i fiumi Bormida e Tanaro in comune di Alessandria” con disciplinare d'incarico 11.06.2010 N. Rep. 86.

L'obiettivo dello studio è quello di valutare, attraverso una modellazione numerica di tipo bidimensionale, l'andamento del campo di velocità e la distribuzione dei livelli idrici per portate associate a tempi di ritorno di 200 anni in corrispondenza del nodo idraulico Tanaro – Bormida. In particolare lo studio si propone di valutare le quote da imporre alle arginature in progetto a difesa della città di Alessandria a valle del ponte Forlanini e di valutare il funzionamento del sistema di argini golenali che caratterizza la zona della confluenza.

Si espongono dunque le procedure adottate, l'analisi dei dati pregressi, le simulazioni numeriche eseguite ed i risultati ottenuti.

#### *Introduzione*

Ciò premesso, di particolare interesse risulta l'accurata valutazione dei livelli idrici che si instaurano nei fiumi in esame al fine di individuare con maggior precisione le zone caratterizzate da sistemi arginali inadeguati con particolar riferimento alla zona compresa tra la città di Alessandria e la confluenza tra i Fiumi Tanaro e Bormida (Figura 6).

E' da osservare che i livelli idrici che si instaurano in questa zona risultano fortemente condizionati dal funzionamento idraulico del nodo di confluenza Tanaro – Bormida, del quale è, pertanto, necessario effettuare uno studio ad hoc che sia in grado di descrivere i fenomeni idrodinamici che si instaurano in dipendenza di una geometria particolarmente complessa che caratterizza la confluenza stessa e le aree golenali adiacenti.

Allo scopo risultano particolarmente utili i modelli numerici di tipo bidimensionale che, in tali condizioni, permettono di ottenere con un certo grado di accuratezza le grandezze idrauliche di interesse in funzione delle condizioni al contorno imposte: portate a monte e livelli a valle.

Attraverso un modello matematico di tipo bidimensionale sono quindi stati valutati i livelli idrici ed il campo di velocità relativi a portate con tempo di ritorno pari a 200 anni sia per il fiume Tanaro che per il Bormida. Lo studio ha consentito, inoltre, di studiare più in dettaglio il funzionamento del nodo idraulico mettendo in evidenza il funzionamento dei diversi ordini di argini golenali.

A completamento dello studio è stata effettuata anche una simulazione che tiene conto delle arginature rialzate al fine di valutare l'eventuale incremento dei livelli idrici indotto dall'intervento.

#### *Descrizione della zona di studio*

Il territorio oggetto del presente studio si estende per circa 4 km a valle della confluenza tra il Fiume Tanaro ed il Fiume Bormida e per circa 8 km a monte su entrambi i corsi d'acqua, in corrispondenza della città di Alessandria. In Figura 6 è riportata la zona interessata dalla modellazione matematica.

Il tratto di Fiume Tanaro oggetto dello studio presenta le tipiche caratteristiche di un corso d'acqua di pianura, caratterizzato da un andamento monocursale marcatamente meandriforme e da modeste pendenze medie che si attestano nell'ordine dello 0.45 %. Il Fiume Bormida, nel tratto studiato, presenta una pendenza media pari a circa lo 0.6% e si configura con un andamento planimetrico pressoché rettilineo, avendo abbandonato la tendenza meandriforme poco a monte dell'area analizzata.

Il Fiume Tanaro, nella parte iniziale del tratto di studio e, precisamente, in corrispondenza della città di Alessandria, è caratterizzato da un alveo inciso di larghezza variabile, compresa tra i 60 e i 120 m, delimitato da arginature. In questo tratto si osserva anche la presenza di un salto di fondo superiore ai 3 m di altezza, e di tre ponti e precisamente, da monte a valle: il ponte ferroviario, il ponte di via Tiziano Vecellio e il ponte Cittadella,,,. A valle della città, il corso d'acqua, delimitato in sinistra idraulica dal rilevato autostradale ed in destra da quello della SR 10, è caratterizzato dalla presenza di zone di espansione golenale di larghezza variabile, adibite per lo più ad uso agricolo.

A valle del centro abitato di Alessandria si osservano tre ulteriori attraversamenti: il ponte della strada regionale SR 10 (localmente tangenziale di AL), il ponte della Strada Carlo Forlanini e il ponte dell'autostrada A21.

Sul Fiume Bormida, all'altezza di Alessandria, è presente il ponte della strada regionale SR10 e più a valle quello dell'autostrada A21. Anche il Bormida si presenta con un alveo di magra e delle zone di espansione golenale di larghezza variabile adibite per lo più ad uso agricolo, delimitate da arginature sia in destra che in



sinistra idraulica. In questo tratto la sezione del Bormida presenta una larghezza variabile tra i 50 ed i 100 m circa.

Con particolar riferimento alla zona della confluenza, si osserva la presenza di un sistema di arginature minori all'interno delle zone golenali che ne condizionano le dinamiche di allagamento.

A valle della confluenza il Tanaro continua il suo corso con un andamento meandriforme delimitato da arginature continue in destra.

In Figura 6 è mostrata la zona di studio e le sezioni di riferimento per la restituzione grafica dei risultati ottenuti con le simulazioni numeriche.

Nella figura sono mostrate inoltre le sezioni che saranno utilizzate per l'analisi dei risultati e per la definizione dei livelli idrici raggiunti con le diverse condizioni al contorno considerate.

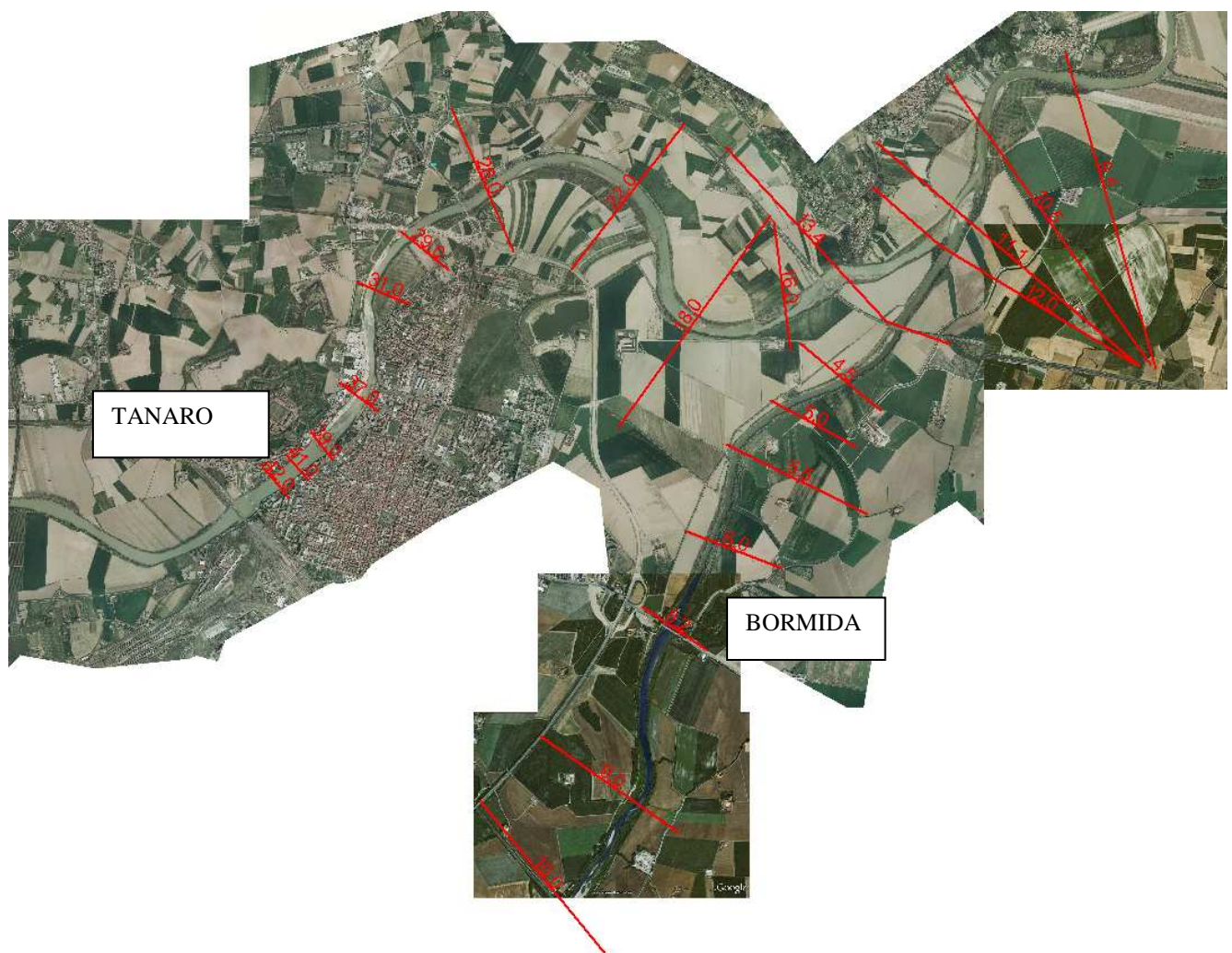


Figura 6 Planimetria generale dell'area di studio con indicazione delle sezioni di restituzione dei risultati.

### *Mesh di calcolo*

L'esecuzione di un modello numerico bidimensionale si basa su una accurata descrizione della geomorfologia della zona interessata.

Nel caso specifico, per descrivere il tratto di fiume oggetto dell'analisi è stato utilizzato un DTM ottenuto da un rilievo laser che ricopriva quasi interamente la zona di interesse. In aggiunta sono stati utilizzati dei rilievi topografici da terra delle arginature e dell'alveo di magra dei due corsi d'acqua al fine di descrivere in modo più accurato il profilo arginale esistente e la morfologia del fondo alveo. Nelle zone non coperte da DTM ci si avvalsi delle sezioni topografiche esistenti integrate per la parte golenale con la carta tecnica regionale del Piemonte.

Va precisato, che le sole sezioni trasversali a disposizione non erano sufficienti a generare una mesh di calcolo tale da permettere un'adeguata descrizione della morfologia dell'alveo; per questo motivo è stato necessario interpolarli in modo opportuno.

In questo modo è stato possibile ottenere una *mesh* ad elementi triangolari a tre nodi con lati di lunghezza variabile tra i 5 m ed i 60-70 m in dipendenza dei gradienti locali plano-altimetrici del fondo alveo e di velocità. Le dimensioni così assegnate permettono una descrizione sufficientemente accurata del campo di velocità e della distribuzione dei tiranti e rendono i risultati indipendenti dalla dimensione della *mesh*.

La *mesh* così definita ed utilizzata nella simulazione numerica è costituita da, mediamente, 32000 nodi e 63000 elementi (Figura 7).

Al fine di descrivere la scabrezza del fondo, parametro fondamentale per la risoluzione del campo di moto, la geometria è stata suddivisa in diverse zone rappresentanti, rispettivamente, l'alveo di magra e le zone golenali; tali zone sono state individuate con precisione grazie all'utilizzo delle foto aeree



Figura 7 Mesh di calcolo

In Figura 8 è mostrata l'area complessiva modellata. Quest'area risulta ben più estesa rispetto all'area di studio. Tale estensione è congruente con le condizioni al contorno da assegnare al modello in modo da rendere la soluzione del modello indipendente dall'incerta conoscenza del livello idrico da imporre al contorno di valle del modello.

Per questo motivo la condizione al contorno di valle è stata posta ad una distanza pari a circa 3 km dall'area di studio, in modo da rendere indipendente la distribuzione dei livelli idrici nell'area di interesse dalle approssimazioni insite nell'assegnazione dei tiranti idrici lungo la sezione di contorno a valle.

Le sezioni di chiusura di monte lungo i Fiumi Tanaro e Bormida sono state scelte in corrispondenza dell'attraversamento della linea ferroviaria.





Figura 8 Inquadramento della zona interessata dalla modellazione numerica bidimensionale

Al fine di valutare gli effetti sui livelli idrici e sulla distribuzione delle velocità degli interventi di adeguamento delle arginature, oltre alla mesh rappresentante lo stato di fatto è stata sviluppata quella dello stato di progetto, andando ad inserire e/o rialzare le arginature in corrispondenza dei tratti carenti.

#### Modello numerico

Il modello numerico utilizzato per valutare il campo di moto è di tipo bidimensionale basato sulla risoluzione delle equazioni di continuità e quantità di moto mediate lungo la verticale ossia:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho h}$$

(Eq. 1)

dove:  $h$  rappresenta il tirante,  $u$  e  $v$  le componenti della velocità lungo le direzioni  $x$  ed  $y$ ,  $t$  il tempo,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $\eta$  la quota del livello idrico,  $\rho$  la densità,  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$  e  $\tau_{yx}$  gli tensioni di *Reynolds* mentre  $\tau_{bx}$  e  $\tau_{by}$  rappresentano le tensioni tangenziali di parete

Le tensioni tangenziali alla parete sono calcolate nel seguente modo:

$$\tau_{bx} = \rho c_f u |\vec{V}| \quad (\text{Eq.2})$$

$$\tau_{by} = \rho c_f v |\vec{V}|$$

dove:  $|\vec{V}|$  è il modulo del vettore velocità,  $c_f = g n^2 / h^{1/3}$  e  $n$  il numero di *Manning* rappresentante la scabrezza del fondo.

Le tensioni di *Reynolds*, invece, sono modellate adottando l'ipotesi di *Boussinesq*, ossia:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\rho \nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yx} = \tau_{xy} &= \rho \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{yy} &= 2\rho \nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned} \quad (\text{Eq.3})$$

dove  $\nu_t$  rappresenta la viscosità turbolenta.

Il sistema di equazioni così descritto è risolto mediante la tecnica degli elementi finiti mediante discretizzazione del dominio di calcolo con elementi triangolari opportune dimensioni variabili nel campo di moto, in grado di interpretare le caratteristiche peculiari del campo di moto stesso.

La chiusura del sistema di equazioni (Eq.1) necessita l'assegnazione di due insiemi di parametri: la viscosità turbolenta ( $\nu_t$ ) e la scabrezza del fondo ( $n$  di *Manning*).

È evidente l'importanza di una corretta assegnazione di tali parametri per una accurata rappresentazione del campo di moto; a tale merito diversi sono i lavori presenti in letteratura, fra i quali si citano: Zanichelli, Caroni e Fiorotto, *J.Hydr.Eng.*, 2002, Rodi, *Turbulence models and their application in hydraulics—A state of the art review*, IAHR, 1993, Shiono e Knight, *JFM*, 1991, Magistrato per il Po, Studio SIMPO, 1980, King e Norton, *Finite elements in water resources II*, 1978 e Chow, *Open channel hydraulics*, 1959.

#### *Definizione delle condizioni al contorno e simulazioni numeriche*

Le simulazioni numeriche sono state condotte imponendo in corrispondenza delle due sezioni di chiusura a monte le portate in ingresso sul Fiume Tanaro e sul Fiume Bormida.

In Tabella 4 sono riportate le due diverse condizioni al contorno imposte a monte, espresse in termini di portate.

	TR200 (Tanaro) [m <sup>3</sup> /s]	TR 200 (Bormida) [m <sup>3</sup> /s]
F. Tanaro (monte confluenza)	3500	3640
F. Bormida (monte confluenza)	1900	1760
F. Tanaro (valle confluenza)	5400	5400

Tabella 4: Portate utilizzate come condizioni al contorno a monte

Le portate relative al TR 200 (Tanaro) sono state desunte dalla sintesi degli studi realizzati dalle Università di Genova e Padova secondo i quali la portata due centennale sul Tanaro a monte della confluenza è pari a 3500 m<sup>3</sup>/s mentre a valle della confluenza è di 5400 m<sup>3</sup>/s.

Le portate relative al TR 200 (Bormida) sono state invece desunte dal Piano per l'Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Po secondo il quale a monte della confluenza si ha per il Bormida una portata duecentennale di 3640 m<sup>3</sup>/s, assumendo analogamente a quanto fatto per lo scenario di piena sul Tanaro una portata a valle della confluenza sempre di 5400 m<sup>3</sup>/s.

Nell'ambito del presente studio sono quindi state effettuate tre simulazioni numeriche differenti: due sono state effettuate con la geometria dello stato di fatto per entrambe le condizioni di portata indicate nella Tabella 4 mentre la terza è stata effettuata con la geometria dello stato di progetto solamente per la prima condizione di portata mostrata in tabella.

La condizione al contorno di valle è stata desunta dal modello numerico monodimensionale che si estende fino alla confluenza con il Fiume Po dove è disponibile una scala di deflusso utilizzata come condizione al contorno.

Al fine di rendere indipendente la distribuzione dei livelli idrici nell'area di interesse dalle approssimazioni insite nell'assegnazione dei tiranti idrici lungo la sezione di chiusura a valle, la condizione al contorno di valle è stata posta ad una distanza pari a circa 3-4 km dall'inizio dell'area di studio.

Con l'obiettivo di valutare la distribuzione dei livelli idrici e della velocità, sono state eseguite delle simulazioni numeriche in condizioni di moto permanente. Tale scelta, in favore di sicurezza con riferimento ai massimi tiranti idrici, trova una giustificazione nel fatto che i tempi di persistenza delle onde di piena risultano mediamente superiori al tempo di propagazione.

La Figura 9 riportata l'andamento nel tempo dei livelli registrati sul Tanaro presso Montecastello in occasione dell'evento di piena verificatosi nell'aprile del 2009. Dall'analisi della figura si osserva che la persistenza del colmo si può stimare nell'ordine del giorno. Il tempo di propagazione dell'onda di piena lungo il tratto di interesse compreso tra la città di Alessandria e di Montecastello, con una lunghezza complessiva misurata lungo l'asta del fiume pari a circa 11 km, risulta invece dell'ordine dell'ora.

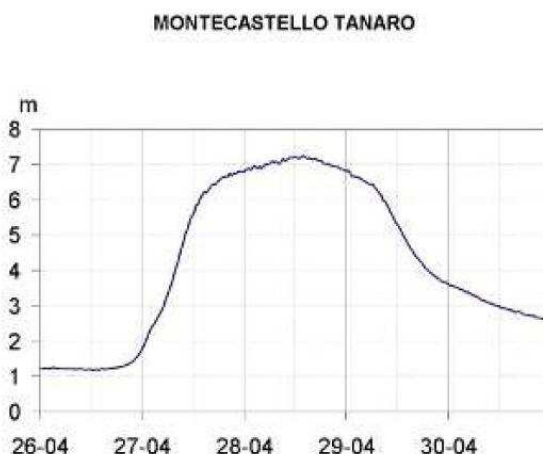


Figura 9 : Livelli registrati presso la stazione idrometrica di Montecastello lungo il Tanaro  
durante l'evento di aprile 2009

Le simulazioni in condizioni di moto permanente, infine, consentono di svincolarsi da una particolare forma di onda di piena ottenendo, in favore di sicurezza, delle valutazioni con valenza più generale, non vincolate da un particolare evento.

#### *Validazione del modello numerico*

La validazione del modello numerico implementato è stata effettuata sulla base dell'evento verificatosi nell'aprile del 2009. In questa occasione sono state effettuate delle picchettature dei livelli raggiunti nella zona di interesse.

L'attendibilità dei risultati di un modello numerico è, in generale, strettamente correlata ad una corretta stima dei coefficienti di taratura. Nel caso specifico di primaria importanza risulta la valutazione del coefficiente di scabrezza la cui valutazione non può essere fatta con il solo riferimento allo stato dell'alveo (granulometria, stato del suolo, vegetazione, ostacoli, ecc), ma deve anche considerare le dissipazioni legate a strutture idrodinamiche coerenti generate da variazioni piano altimetriche del corso d'acqua di più difficile definizione.

La valutazione del coefficiente di scabrezza da adottare è stata basata inizialmente facendo riferimento all'analisi granulometrica effettuata nella zona di interesse. L'analisi ha messo in evidenza i valori riportati nella Tabella 5

sez.	D <sub>90</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>16</sub> (mm)
29	29.8	15.1	0.5
9	41.1	0.9	0.3



Tabella 5: Analisi granulometrica

Sulla base dei valori riportati una prima stima del coefficiente di scabrezza (secondo Gaukler – Strickler) può essere ottenuta mediante la nota formulazione:

$$K_s = 26/d_{90}^{1/6}$$

dalla quale, assumendo un  $d_{90}$  pari a 0.041 m, si ottiene un  $k_s$  pari a  $44 \text{ m}^{1/3} / s$ .

Come già osservato, nella valutazione del coefficiente di scabrezza e' necessario considerare anche tutti quei fenomeni localizzati legati alla geometria dell'alveo responsabili della dissipazione di energia che un modello 2 D non è in grado di simulare.

Per questo motivo, è stato assunto, cautelativamente, un coefficiente di scabrezza all'interno dell'alveo di magra pari a  $35 \text{ m}^{1/3} / s$ .

Dall'analisi delle orto foto disponibili si desume che le zone golenali sono caratterizzate da limitate aree boscate (in genere ripariali) e, per lo più, dalla presenza di campi coltivati intervallati da abitazioni, strade campestri, canali, ecc.. Di conseguenza, in questo caso, sono stati assunti valori di scabrezza variabili tra i 10 ed i  $25 \text{ m}^{1/3} / s$  a seconda delle caratteristiche delle singole zone.

La validazione del modello numerico è stata quindi effettuata mediante confronto tra il livelli misurati e quelli calcolati per il medesimo evento.

Nelle Figura 10 e Figura 11 sono riportati in rosso i livelli idrici misurati durante l'evento verificatosi nell'aprile del 2009 mentre in violetto sono riportati i livelli idrici calcolati per il medesimo evento.

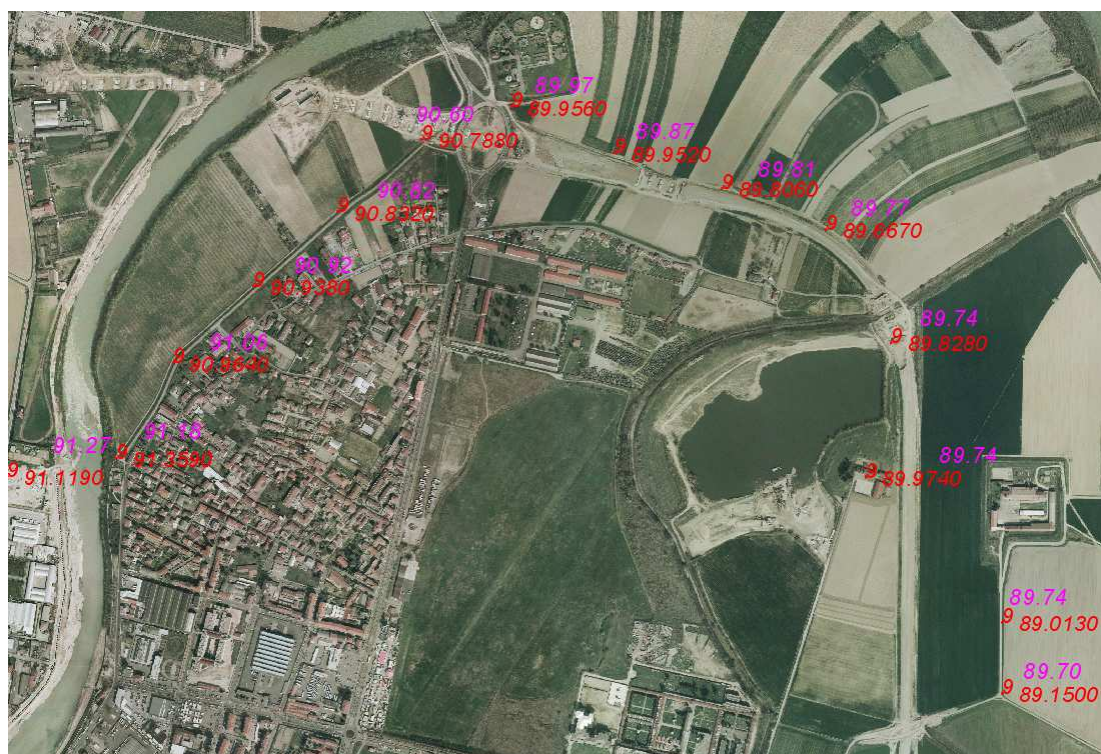


Figura 10: Livelli misurati lungo il Tanaro durante l'evento di piena dell'aprile 2009



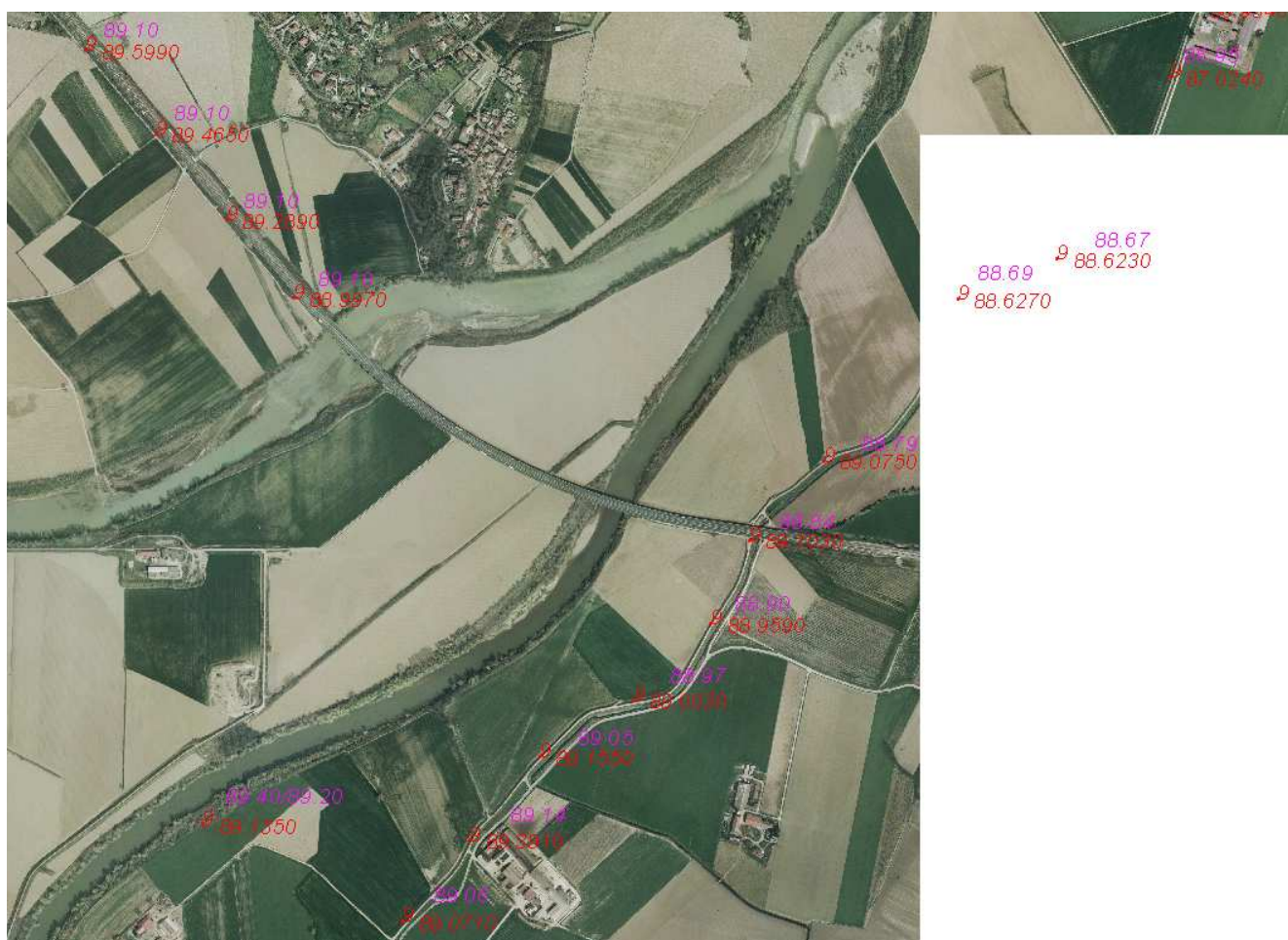


Figura 11: Livelli misurati lungo il Bormida durante l'evento di piena dell'aprile 2009

Dall'analisi delle figure si evidenzia come vi sia una buona corrispondenza tra i valori misurati e quelli calcolati. Si osservano infatti differenze contenute nell'ordine dei 10-20 cm, accettabili considerando sia le inevitabili incertezze che si hanno nei picchettamenti dei livelli di piena sia le approssimazioni che è necessario introdurre nei modelli numerici.

#### *Simulazioni numeriche e analisi dei risultati*

Costruita la mesh di calcolo, definiti i parametri ed imposte le condizioni al contorno si sono integrate, numericamente, le eq. 1 - 3.

Complessivamente sono state condotte tre simulazioni distinte. Due sono caratterizzate da identiche condizioni al contorno ed in particolare la TR 200 (Tanaro), (vedi Tabella 4) ma geometrie diverse, corrispondenti una allo stato di fatto ed una a quello di progetto. La terza simulazione ha riguardato la condizione dello stato di fatto ma con la condizione al contorno TR 200 (Bormida), (vedi Tabella 4).

I risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche sono riportati nelle tavole grafiche allegate: in esse sono rappresentati rispettivamente i livelli idrici e le velocità nelle zone oggetto dello studio.

Per una maggior comprensione del fenomeno, specialmente ai fini della corretta progettazione delle opere, si riporta l'andamento dei livelli idrici e delle velocità anche in corrispondenza delle sezioni indicate nella

planimetria riportata in Figura 6; queste permettono di definire con maggior dettaglio il grado di insufficienza delle arginature.

#### Stato di fatto: piena Tr 200 (Tanaro)

Attraverso la simulazione nelle condizioni attuali del corso d'acqua, è stato possibile sia mettere in evidenza i punti di criticità esistenti che valutare in prima approssimazione, mediante confronto, gli effetti degli interventi progettuali.

Benchè lo scopo della presente modellazione sia quello di indagare il funzionamento idraulico a valle si ha comunque conferma di quanto già noto in corrispondenza della città di Alessandria e cioè che i livelli idrici che si instaurano lungo il Fiume Tanaro, nell'attuale configurazione: senza l'abbassamento della soglia né ulteriore ricalibratura d'alveo a valle del ponte Cittadella, superano il livello delle arginature sia in destra che in sinistra idraulica come messo in evidenza in Figura 12, dove sono evidenziate le zone soggette ad allagamento che interessano la città di Alessandria stessa.



Figura 12: Zone soggette ad allagamento per QTR200 nel tratto cittadino

Procedendo verso valle si osserva che in corrispondenza del rilevato autostradale A21 (in sinistra idraulica), non sono sempre rispettati adeguati franchi (1m) con particolar riferimento alle sezioni 22 e 26 (vedi Allegato).

Procedendo ancora verso valle, si osserva, in corrispondenza della confluenza, un allagamento generalizzato delle aree di espansione golenale.



Come ben messo in evidenza in Figura 13, che riporta l'andamento dei livelli idrici che si instaurano in corrispondenza della confluenza, si osserva la presenza di argini minori all'interno delle aree golenali che, presentando alcuni punti di discontinuità vengono localmente sormontati allagando le aree da essi difese, confermando quindi il giusto dimensionamento nei confronti della massima piena che, correttamente, li sormonta.



Figura 13: Livelli calcolati in corrispondenza della confluenza – SDF TR 200 Tanaro

La presenza di tali discontinuità è ben messa in evidenza in Figura 14 dove è riportato il campo di velocità nella zona della confluenza. Dall'immagine si osservano dei punti localizzati di sormonto che danno origine all'allagamento delle aree a monte. Si osserva, inoltre, che tali arginature non si estendono per tutta l'area golenale ma si interrompono in corrispondenza di una cascina.



Figura 14: Campo di velocità in corrispondenza della confluenza – SDF TR 200 Tanaro

Per quanto riguarda il Bormida, con queste condizioni di portata (pari a  $1760 \text{ m}^3/\text{s}$ ), non si segnalano particolari criticità, essendo i livelli idrici sempre al disotto della sommità arginale.

Le velocità che si instaurano nei due corsi d'acqua si attestano tra i 2.5 e i 3.5 m/s all'interno dell'alveo di magra, per scendere a valori compresi tra 0.5 m/s e 0 m/s nelle zone di espansione golenale.

#### Stato di progetto: piena Tr 200 anni (Tanaro)

La geometria dello stato di progetto prevede l'innalzamento delle arginature in corrispondenza della città di Alessandria. In questo modo è possibile verificare eventuali innalzamenti dei livelli idrici che si potrebbero verificare anche a valle in conseguenza a tali interventi.

Dall'analisi delle sezioni non si osservano particolari differenze dei livelli idrici rispetto alla situazione dello stato di fatto.

Sensibili variazioni si osservano invece nei valori delle velocità che si attestano su valori massimi superiori di circa il 10% rispetto allo stato di fatto, con particolare riferimento all'alveo inciso.

#### Stato di fatto: piena Tr 200 anni (Bormida)

Le simulazioni effettuate con la portata duecentennale sul fiume Bormida non mettono in evidenza particolari punti di criticità, come mostrato in Figura 15 dove sono riportati i livelli idrici nel tratto di monte del Bormida.



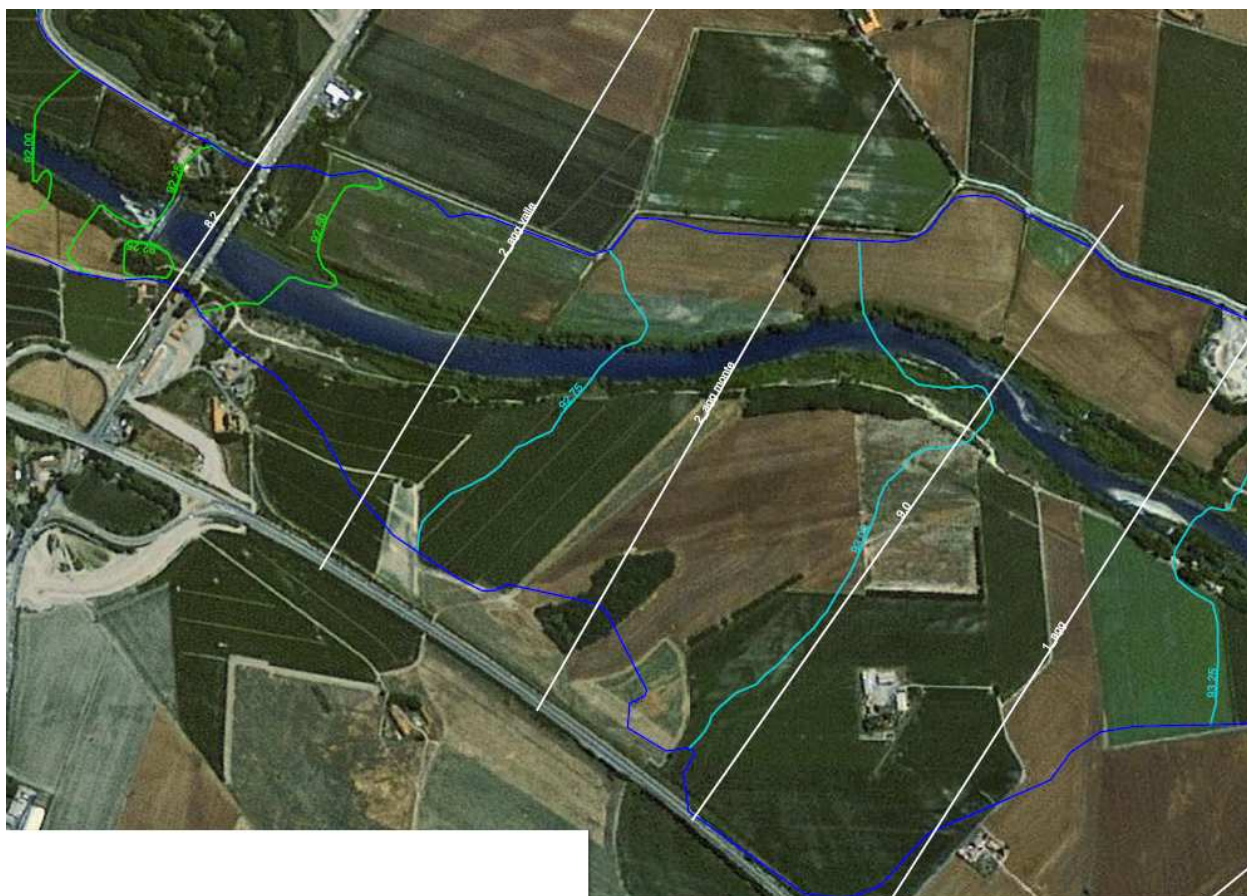


Figura 15: Livelli calcolati sul tratto di monte del Bormida – SDF TR 200 Bormida

In particolare si osserva, come messo in evidenza nelle sezioni 9, 1\_agg, 2\_agg monte e 2\_agg valle, che con riferimento alle arginature recentemente rialzate in sinistra idraulica a monte dell'attraversamento della SR 10, sono rispettati i franchi arginali.

In corrispondenza della confluenza, poco a monte dell'attraversamento autostradale, come messo in evidenza in Figura 16, si osserva la presenza di un argine golenale in sinistra, in grado di contenere i tiranti idrici all'interno del corso d'acqua, sebbene le zone a monte vengano allagate comunque ad opera del Fiume Tanaro.



Figura 16: Livelli calcolati sul tratto di monte del Bormida – SDF TR 200 Bormida

A valle della confluenza, non essendo mutata la portata complessiva, non si riscontrano particolari differenze rispetto alla simulazione dello stato di fatto con TR 200 sul Tanaro.

Per quanto riguarda le velocità, anche in questo caso sull'alveo di magra si attestano sull'ordine di 2.5 – 3.5 m/s.

### *Conclusioni del Modello 2D*

Nel presente studio sono state effettuate delle simulazioni numeriche bidimensionali del nodo idraulico Tanaro-Bormida al fine di valutare l'andamento dei livelli idrici che si instaurano per diverse condizioni di portata e definire, di conseguenza le quote da assegnare alle arginature con adeguato franco idraulico. Benché il modello 2D sia esteso dal ponte FS fin oltre la confluenza i risultati di tale modellazione saranno assunti soltanto nella zona a valle della città caratterizzata da più elevata bi-dimensionalità del campo di moto in massima piena e sull'asta del Bormida, in quanto per il tratto cittadino del Tanaro si terrà conto delle risultanze del modello fisico a fondo fisso opportunamente integrate con quelle del modello a fondo mobile compiutamente descritte al capitolo successivo.

L'analisi dei risultati dello stato di fatto del nodo Tanaro-Bormida a valle della città mette in evidenza alcuni punti di criticità già conosciuti, seppure con differenti gradi di rischio. Quest'ultima circostanza, dovuta alla migliore rappresentazione fisica dei fenomeni insita nello schema di modellazione, ha permesso di limitare in parte l'entità degli adeguamenti arginali rispetto a quanto previsto in linea di massima nel progetto preliminare.

Permangono comunque nelle zone a valle della città, in particolare dove il rilevato dell'autostrada A21 funge da contenimento, alcuni tratti con insufficienze arginali dovute al non rispetto del franco di sicurezza di 1 m. L'analisi delle zone golenali in corrispondenza della confluenza, fa osservare allagamenti generalizzati delle zone di espansione, testimoniando quindi una sufficiente funzionalità anche nelle aree difese da arginature secondarie che presentando dei punti di discontinuità, vengono sormontati e in alcuni casi aggirati dalla corrente allagando le zone spalle retrostanti con funzione di laminazione. Vista l'ampiezza delle sezioni di deflusso di piena dal confronto tra le due simulazioni (stato di fatto e di progetto) caratterizzate da portate con tempo di ritorno di 200 anni sul Tanaro, non emergono sostanziali differenze nella distribuzione dei livelli idrici a causa dell'innalzamento delle arginature.

Riguardo il Bormida infine, le situazioni criticità nella simulazione caratterizzata da portate con un tempo di ritorno di 200 anni non destano particolare preoccupazione, risultando limitate a due tratti di arginatura in sinistra, che saranno adeguati col presente intervento ed a, discontinua per entità, carenza di franco in destra che sarà opportunamente corretta mediante corrispondente rialzo.



## 6.2. PROGETTO DEFINITIVO: IL MODELLO FISICO A FONDO FISSO DEL TRATTO DI FIUME TANARO COMPRESO TRA PONTE FERROVIARIO A MONTE E PONTE FORLANINI A VALLE

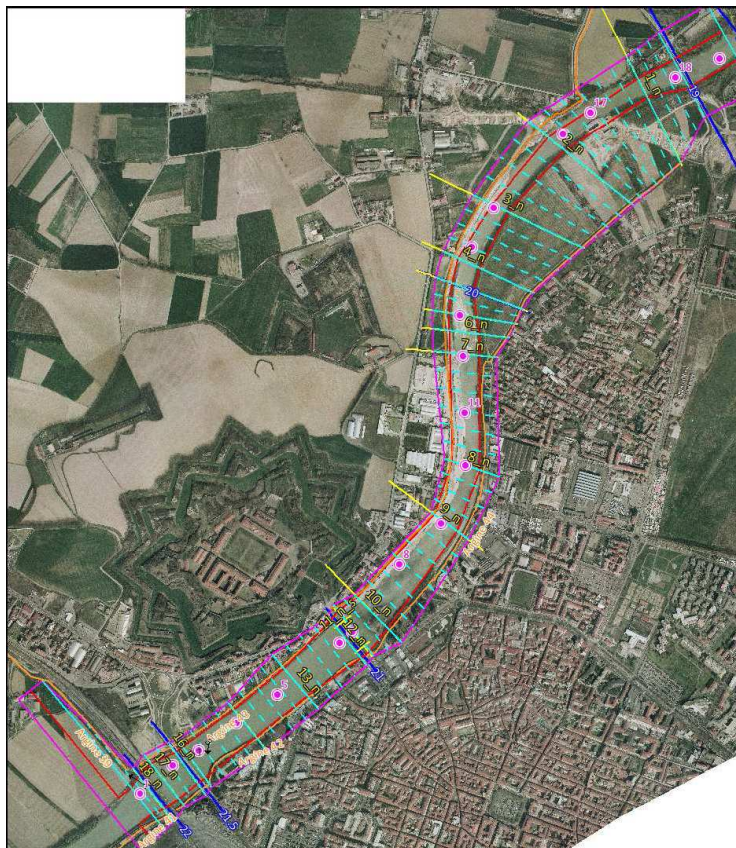


Figura 17 – Zona indagata nelle prove su modello fisico

### *Premessa*

Il modello fisico del Tanaro (in scala geometrica indistorta circa 1:60 e in condizioni di similitudine di Froude) è stato realizzato nel laboratorio di idraulica del polo scientifico AIPo di Boretto (RE).

La Figura 17 mostra una planimetria del modello con l'indicazione delle 19 sezioni in cui è stata localizzata una sonda di livello che consente di rilevare la quota della superficie libera.

I lavori di costruzione del modello sono iniziati nei primi mesi del 2009 per concludersi nel mese di luglio 2009. Le prove a fondo fisso si sono concluse nel dicembre 2009 (per maggiori dettagli si rimanda alla relazione dal DICAT, dicembre 2009). I lavori di preparazione per le prove a fondo mobile sono iniziati nel mese di gennaio 2010 e le relative sperimentazioni si concluderanno entro le prossime settimane (in Figura 18) è riportata un'immagine del modello in corrispondenza dell'ex Ponte della Cittadella).





Figura 18 – Porzione del modello fisico nella configurazione a fondo fisso

### *Finalità delle prove a fondo fisso*

Le prove a fondo fisso originariamente progettate si proponevano di accertare la capacità di deflusso del Tanaro nel tratto Alessandrino in due configurazioni dell'alveo: quella esistente nel 2007, successiva alla serie di interventi realizzati dopo l'alluvione del 1994 ma precedente la rimozione del Ponte della Cittadella e quella successiva ad una sua eventuale rimozione. Il confronto tra le due La decisione recente di abbattere il Ponte della Cittadella e la sua esecuzione hanno rovesciato il ruolo delle prove relative alle due configurazioniserie di prove ha consentito di accertare i vantaggi ottenuti con la rimozione del Ponte della Cittadella e di verificare l'adeguatezza degli interventi finora eseguiti a consentire il deflusso delle piene eccezionali del Tanaro in condizioni di sicurezza.

Gli effetti, relativamente alle condizioni di sicurezza del tratto di monte, di un eventuale abbassamento della quota della soglia a valle dell'ex- ponte Cittadella - o della sua totale rimozione - saranno esaminati nell'ambito delle sperimentazioni a fondo mobile.

*Risultati delle prove a fondo fisso: quote della superficie libera per la progettazione delle opere di adeguamento nel tratto compreso tra Ponte Cittadella e Ponte Tangenziale.*

Le principali indicazioni emerse dalle sperimentazioni a fondo fisso possono riassumersi nella Tabella 6 ove sono indicati i livelli della superficie libera (al netto del franco di 1 m e per  $k_p = 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) per il valore della portata pari a  $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$  nella configurazione attuale (senza ponte della Cittadella) con portata T200 pari a  $5400 \text{ m}^3/\text{s}$  nel tratto a valle della confluenza con il Fiume Bormida

<i>Sonda</i>	<i>Posizione (nome sezione modello idraulico)</i>	<i>Posizione (nome sezione elaborati progettuali)</i>	<i>H (m) profilo superficie libera</i>
1	Monte ferrovia		95.02
2	Monte ponte Tiziano		94.44
3	Valle ponte Tiziano		94.16
4	Sez 14_N		93.98
5	Sez 014		93.73
6	Monte Ponte Cittadella		93.67
7	Valle Ponte Cittadella		93.51
8	Sez 025		93.41
9	Sez 09_N		93.10
10	Sez 08_N		92.84
11	Sez 035		92.66
12	Sez 07_N		92.70
13	Sez 05_N		92.67
14	Sez 044		92.63
15	Sez 03_N		92.43
16	Monte ponte Tangenziale		92.62 (*)
17	Valle ponte tangenziale		92.30
18	Monte ponte Orti (Forlanini)		91.88

Tabella 6: valori della superficie libera per QT200 (prove modello fisico)

(\*) valore assunto anche per la progettazione delle opere in corrispondenza del Rio Loreto (chiavica).

## 7. CONCLUSIONI

L'attuale fase progettuale definitiva ha il privilegio di poter sfruttare ed attingere a fonti modellistiche fra le più estese e complete oggi a disposizione. Si ritiene pertanto di poter affermare come ogni aspetto idrologico ed idraulico delle problematiche connesse alla messa in sicurezza del nodo idraulico di Alessandria sia stato sviscerato con adeguata metodologia ed approfondimento commisurato all'entità del problema.

I risultati che ne conseguono portano ad evidenziare le seguenti criticità e relative necessità di adeguamento delle opere che possono brevemente essere riassunte come segue:

<i>SPONDA DESTRA TANARO</i>		<i>SPONDA SINISTRA TANARO</i>	
<i>Località</i>	<i>Sopralzo [m]</i>	<i>Località</i>	<i>sopralzo [m]</i>
Muri a valle ex-p.te Cittadella	0,6-1,05m	Muri a valle ex-p.te Cittadella	0,6-1,05m
TRATTO A ( ex-p.te Cittadella Orti)	rialzo 1,0-1,5m più raccordi a tutt'altezza 4,0 m	TRATTO B (ex-p.te Cittadella – ponte Tg.ziale)	0,9 – 1,8m
Tg.ziale Est	chiusura varchi	ponte Tg.ziale – A21 TRATTO C TRATTO D (A21)	1,0-2,5m 1,5-2,0m

<i>SPONDA DESTRA BORMIDA</i>		<i>SPONDA SINISTRA BORMIDA</i>	
<i>Località</i>	<i>Sopralzo [m]</i>	<i>Località</i>	<i>Sopralzo [m]</i>
ponte FS – confluenza	1,1-0m	ponte FS – Tg.ziale Est	1,8-4,5m

La risoluzione di tali criticità rappresenta un decisivo passo verso l'adeguamento del sistema arginale di difesa della città di Alessandria nei confronti della piena di riferimento.

I numerosi e coordinati studi compiuti, oltre ad essere alla base delle considerazioni e conclusioni cui è giunta l'attuale fase progettuale, indirizzano altrettanta attenzione verso il mantenimento ed eventuale miglioramento delle condizioni di deflusso. Tale attività deve essere basata sul monitoraggio e periodico intervento manutentivo dell'alveo e delle sponde sia nei tratti centrali che a valle della città, al fine limitare o rimuovere gli eventuali accumuli, barre di sedimenti od ostacoli che possono formarsi e consolidarsi in un tratto fluviale che ormai, similmente a numerosi altri tratti fluviali di svariate città, ha perso le proprie caratteristiche di naturalità e la possibilità di autodeterminazione.

Parma,

Il Coordinatore del gruppo di Progettazione  
(Dott. Ing. Gianluca Zanichelli)

Il Progettista  
(Dott. Ing. Federica Pellegrini)

## 8. BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Chow V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

Falcomer L., Fiorotto V. e Cartagine P. (1999) Sulla sistemazione del nodo idraulico Tagliamento-Cavrato, *atti del convegno Giornate di Studio su La difesa del Territorio, Trieste 23-24 settembre 1999*

King I. P., and Norton W. R. (1978). "Recent application of RMA's finite element models for twodimensional hydrodynamic and water quality". *Finite elements in Water Resources II*, Pentech Press, London, 2.81-2.99.

Rodi W. (1993), "Turbulence models and their application in hydraulics - A state of the art Review". *International Association for Hydraulic Research*.

Shioni K., and Knight D. W. (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel". *J. Fluid. Mech.*, 222, 617-646.

Zanichelli G., Caroni e Fiorotto V.(2004) On parameter selection in 2D numerical modeling of a River bifurcation, *ASCE Journal of hydraulics engineering*, vol. 130 n.3

“Modello matematico della risposta idrologica del fiume Tanaro (chiuso ad Alessandria)”, Università degli Studi di Padova, Centro Interdipartimentale di Ricerca Centro Internazionale di Idrologia D. Tonini (conv. AIPo n. 46/2004, relazione finale ottobre 2005)

Convenzione di collaborazione scientifica per il modello fisico a fondo mobile dei deflussi nel Fiume Tanaro in corrispondenza dell’attraversamento della città di Alessandria”. Studio della propagazione nell’asta principale del Tanaro di eventi di piena statisticamente significativi”. Università degli Studi di Genova, DICAT, (conv. AIPo n. 45/2004, relazione intermedia dicembre 2006)

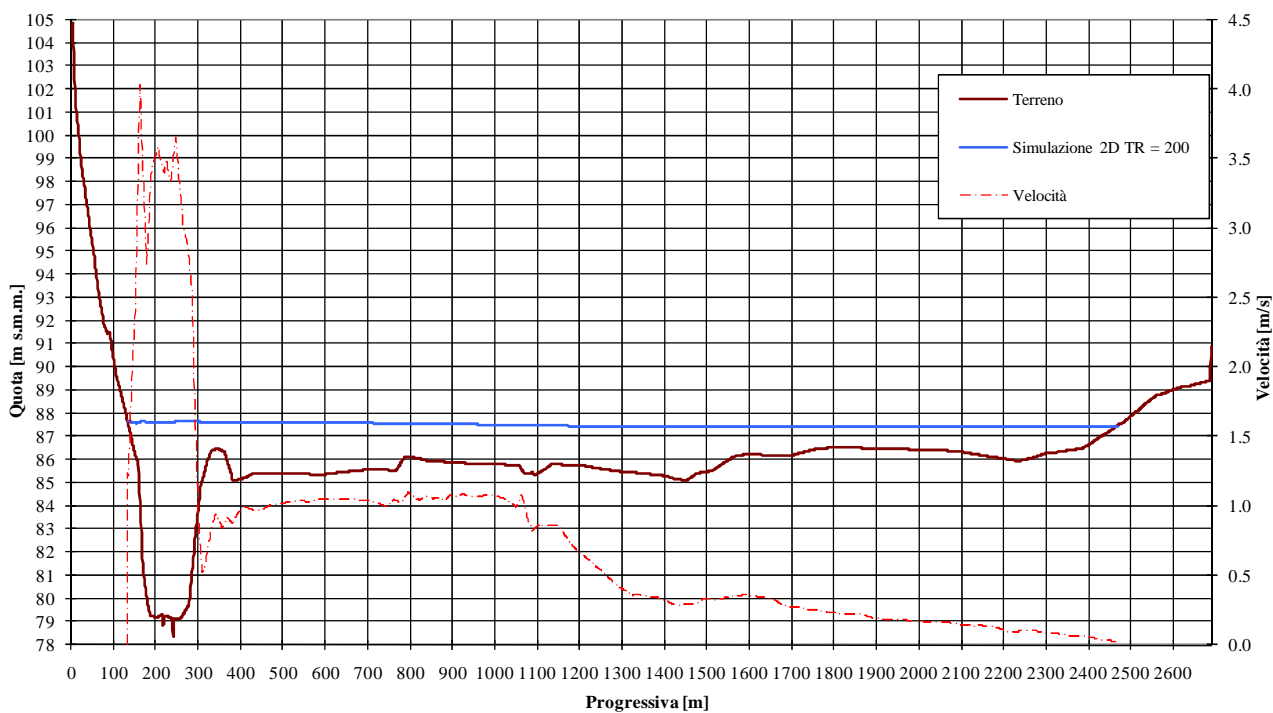
“Studio idraulico funzionale alla sistemazione del fiume Bormida da Acqui a confluenza Tanaro e del torrente Orba nel tratto fasciato da Rocca Grimalda a confluenza Bormida con definizione dei possibili scenari di intervento”, Università degli Studi di Genova, DICAT, (conv. AIPo n. 324/2006, relazione finale novembre 2009)

“Convenzione di collaborazione scientifica per il modello fisico a fondo mobile dei deflussi nel Fiume Tanaro in corrispondenza dell’attraversamento della città di Alessandria”. Risultati delle prove a fondo fisso. Università degli Studi di Genova, DICAT, (conv. AIPo n. 45/2004, relazione intermedia dicembre 2009)

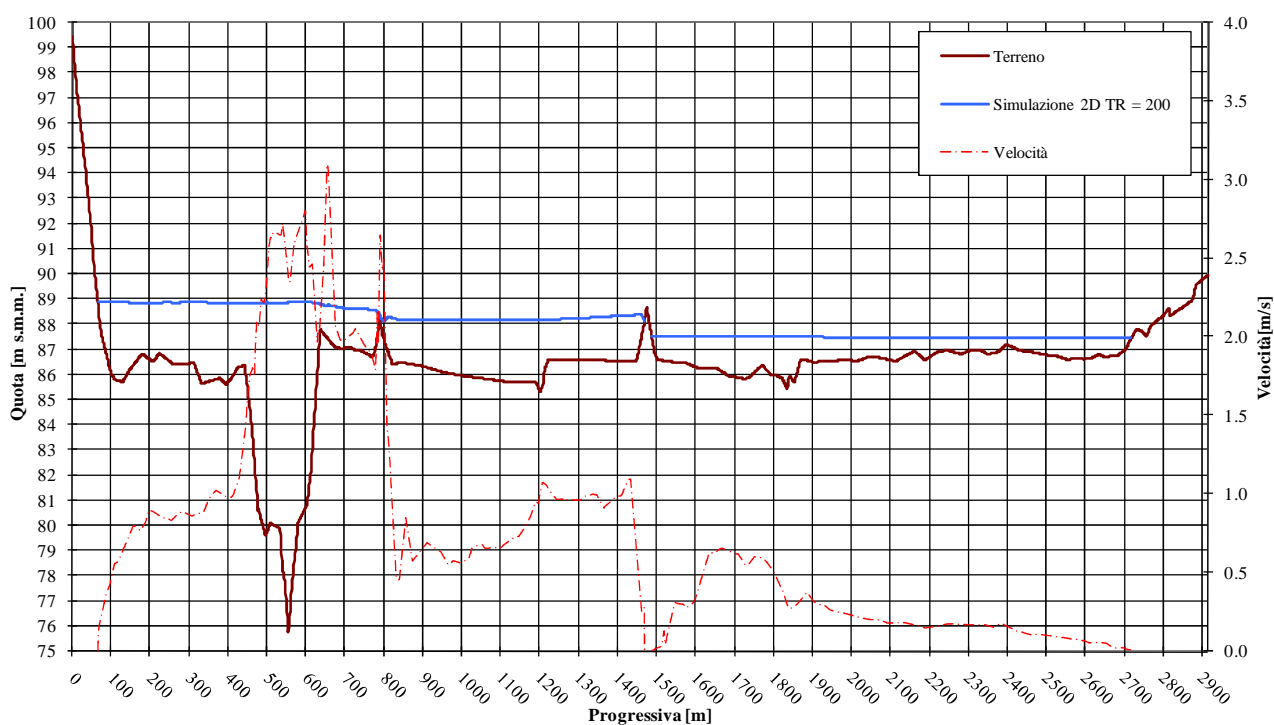
**9. ALLEGATO 1 – MODELLO 2D PROIEZIONE DI LIVELLI E VELOCITÀ NELLE SEZIONI SIGNIFICATIVE**

SEZIONI STATO DI FATTO - TR 200 TANARO

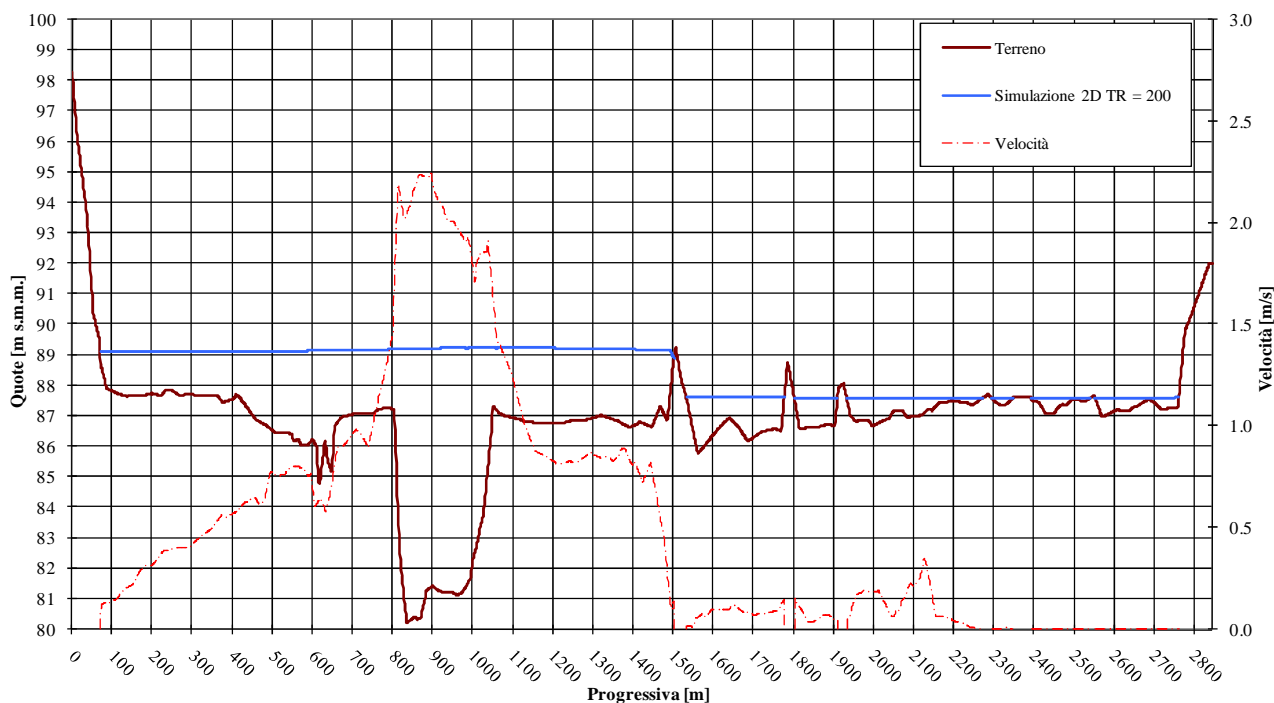
**Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 9.5**



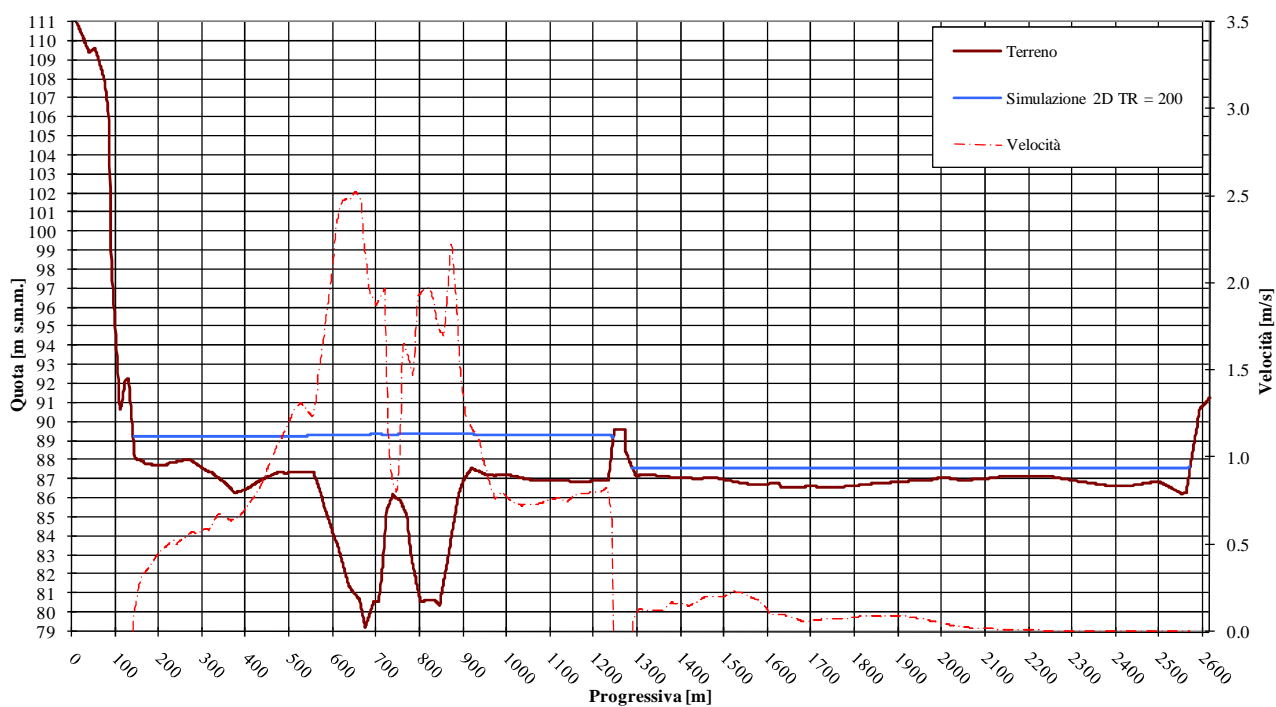
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 10.5



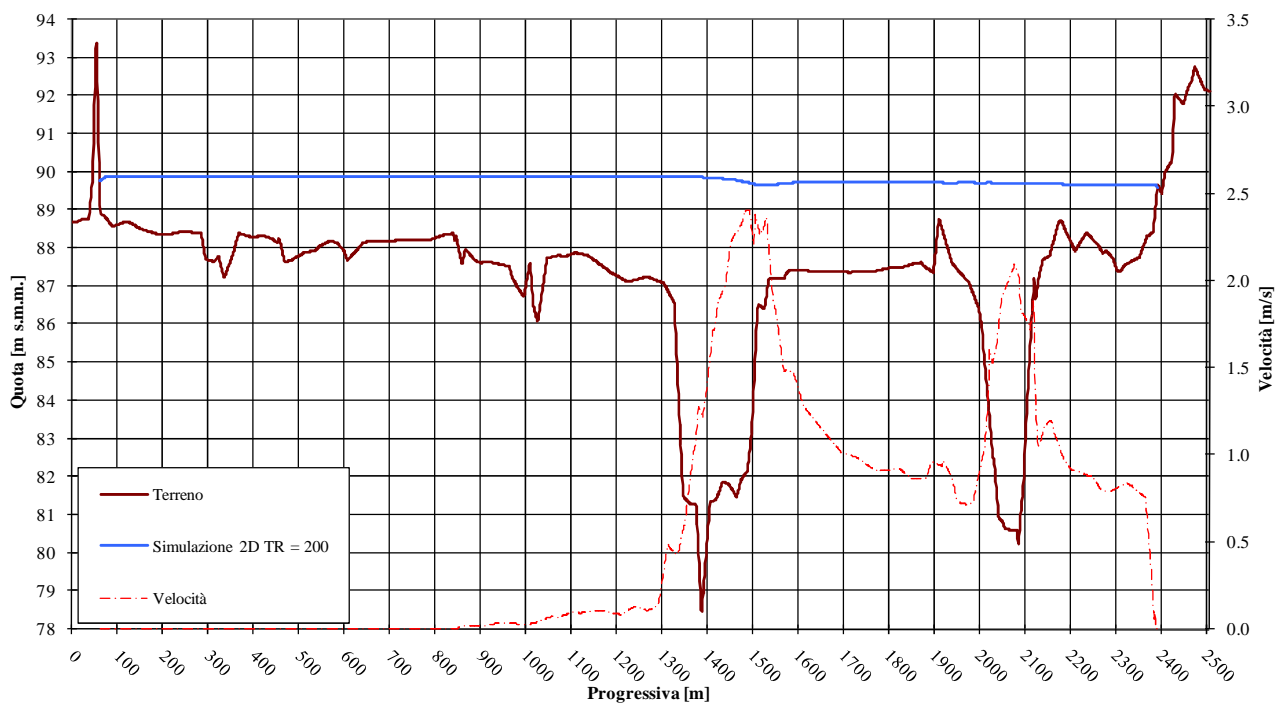
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 11.1



### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 12

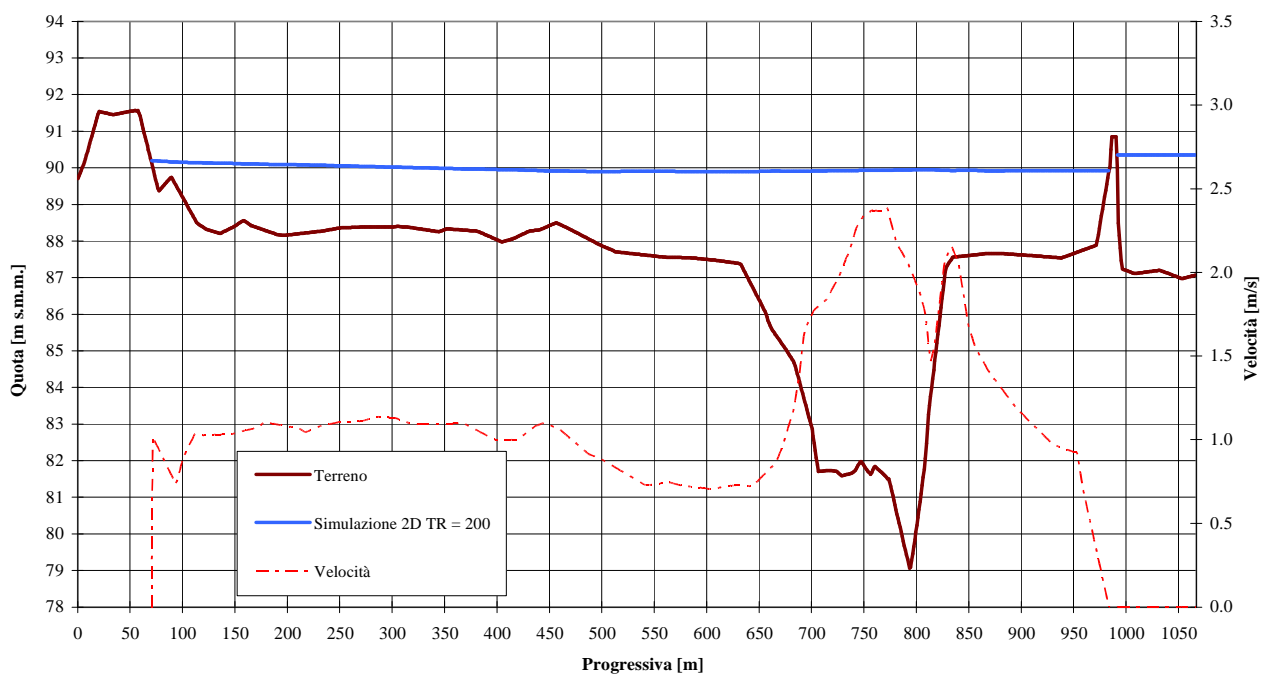


### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 13.4

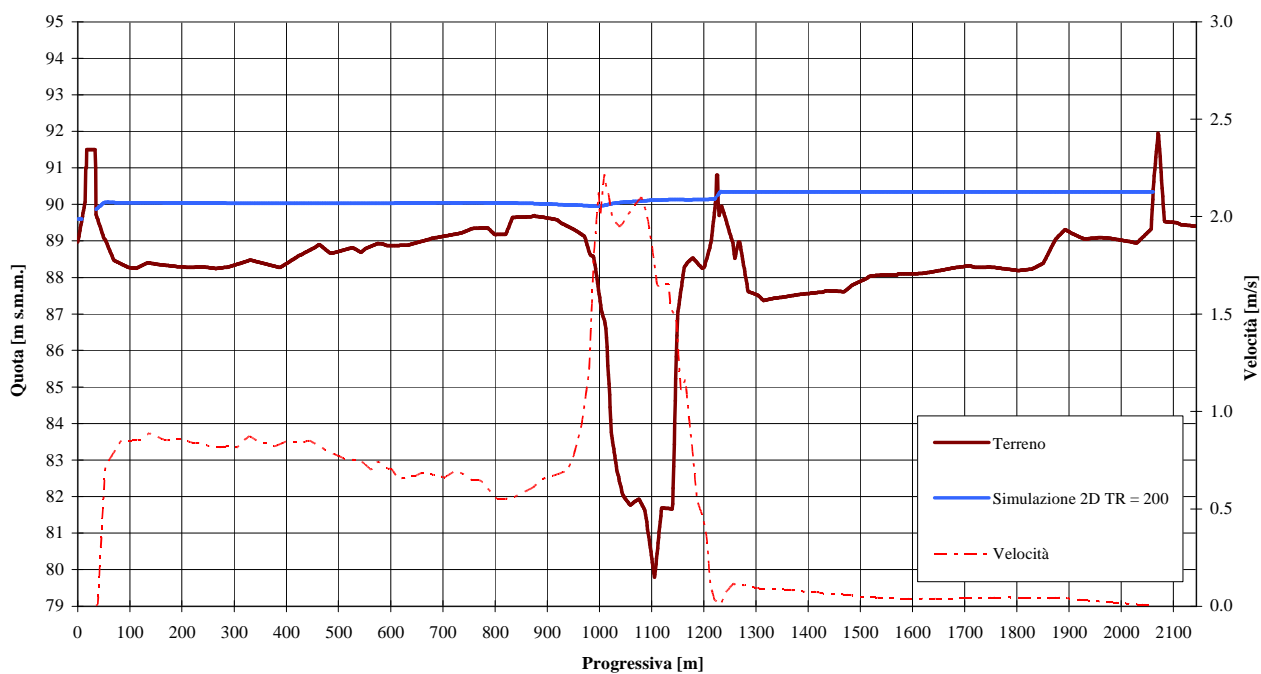




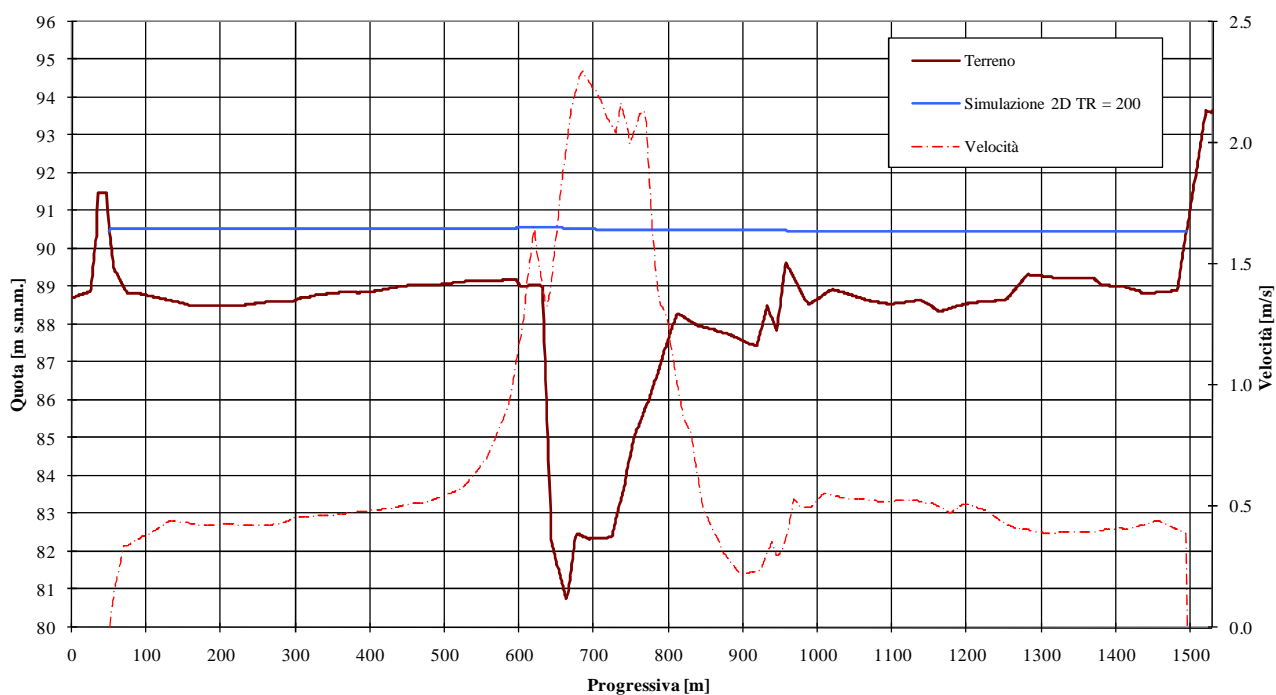
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 16



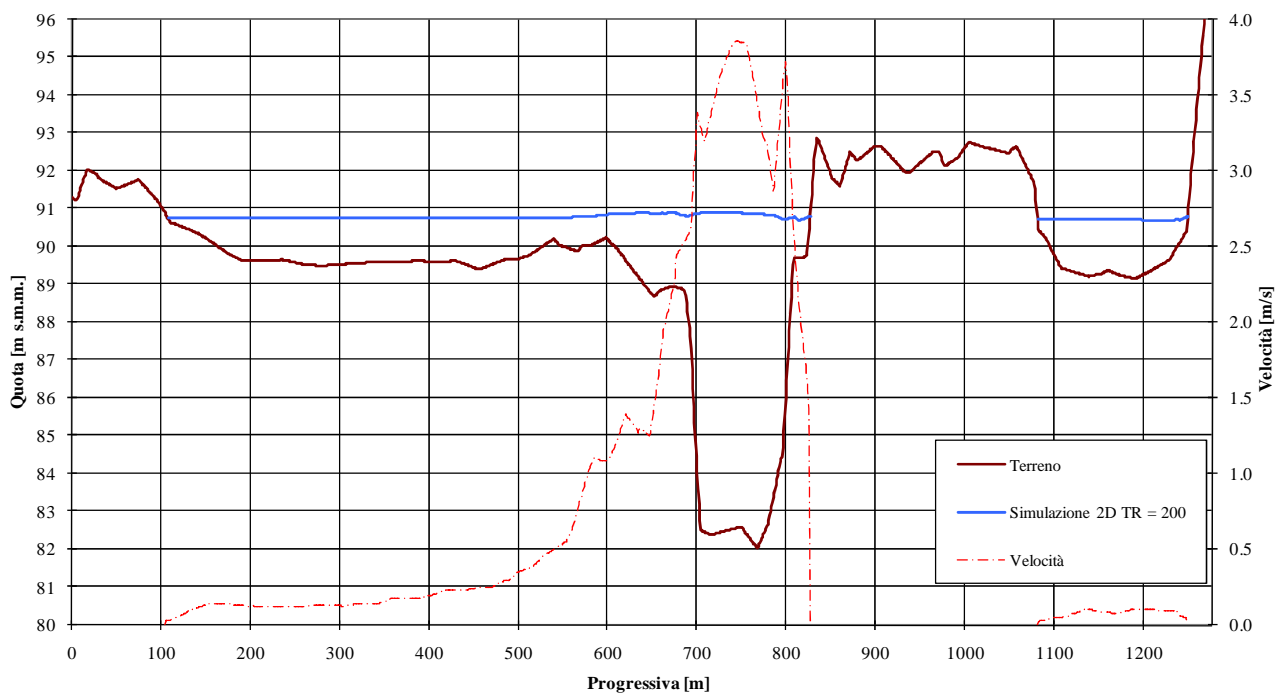
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 18



## Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 22

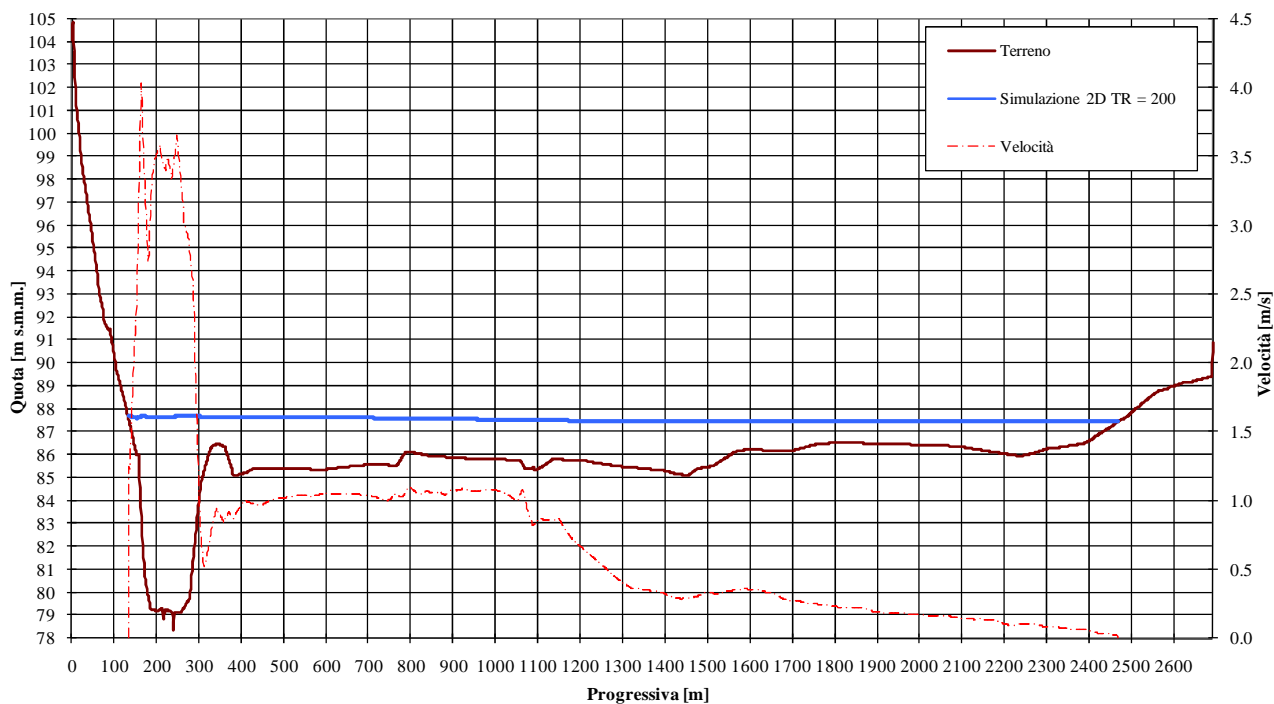


## Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 26

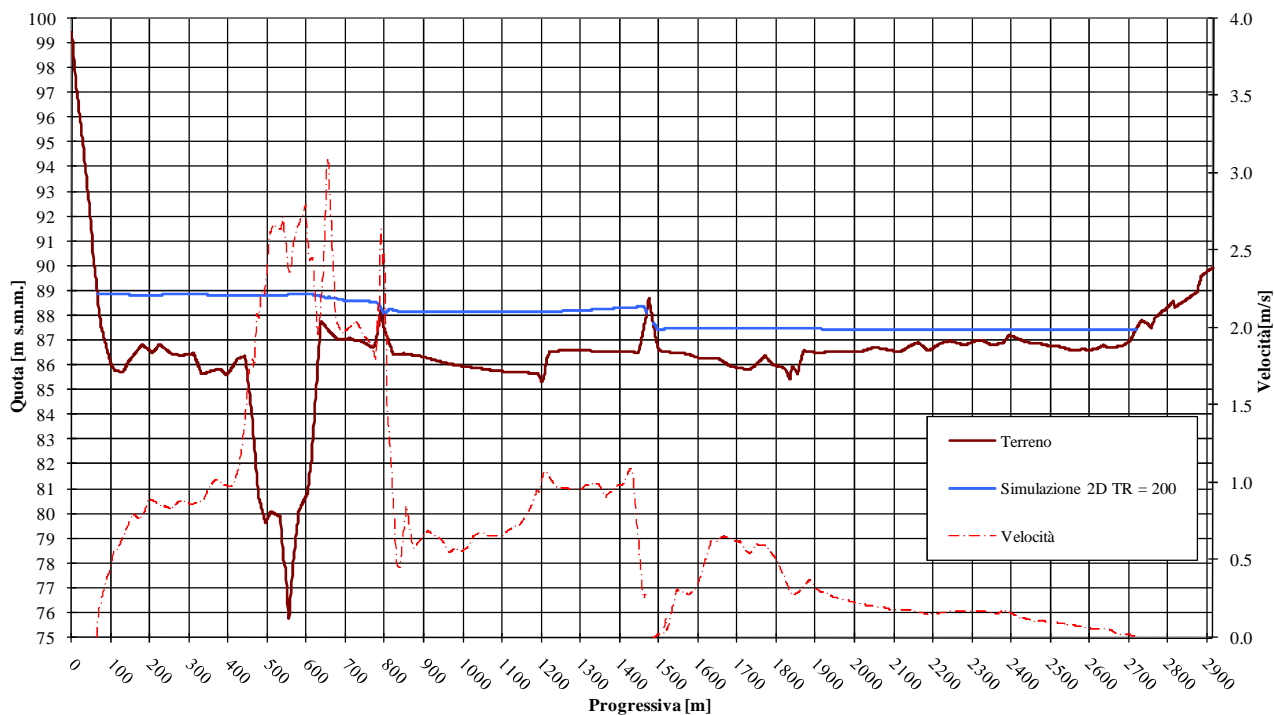


## SEZIONI STATO DI PROGETTO - TR 200 TANARO

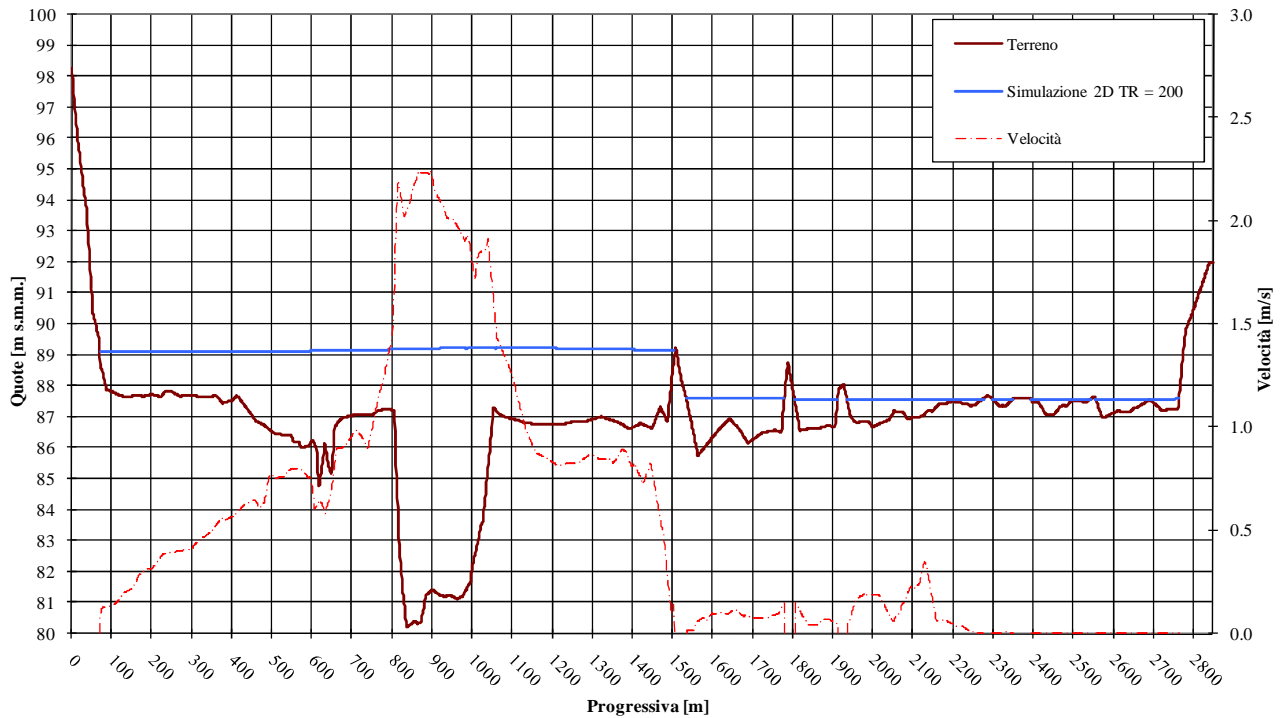
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 9.5



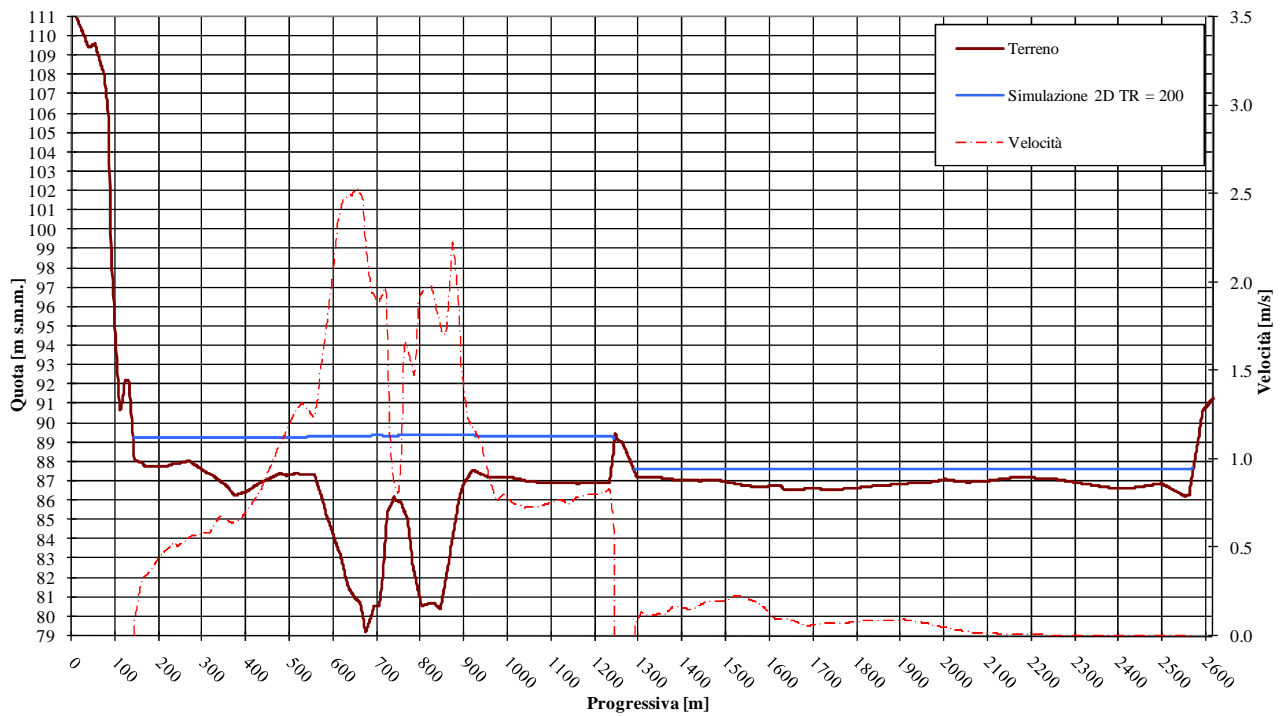
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 10.5



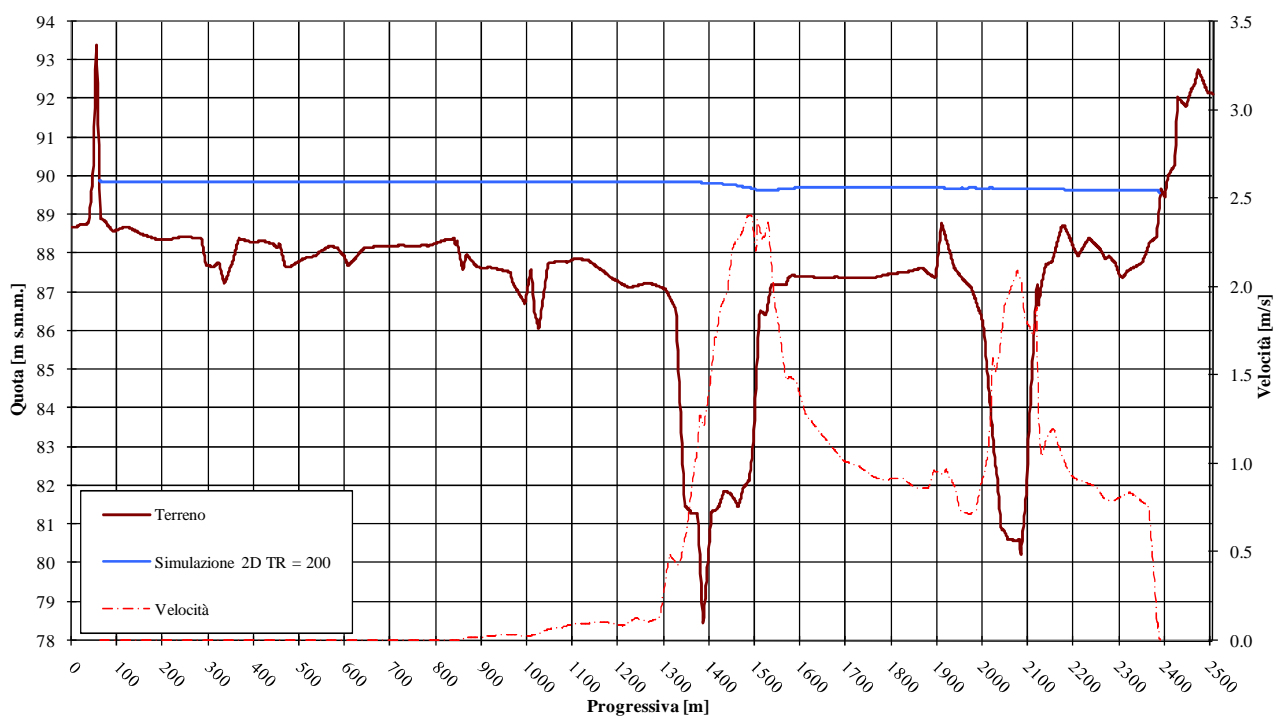
## Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 11.1



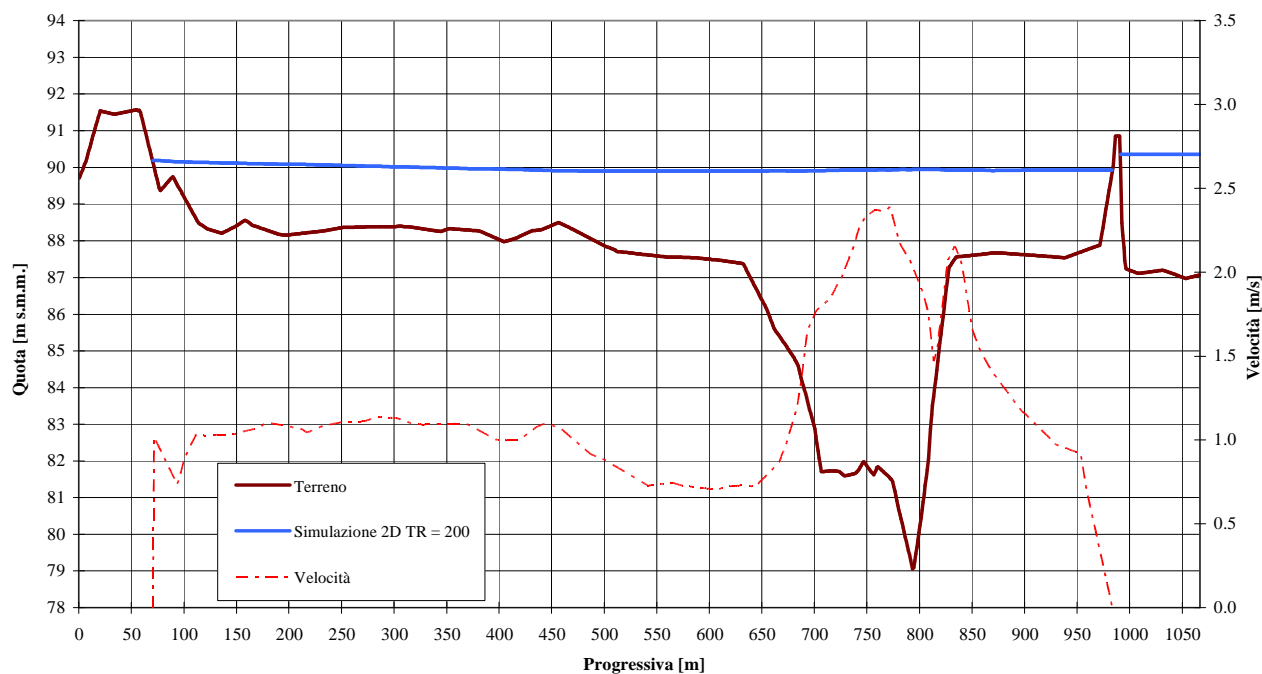
## Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 12



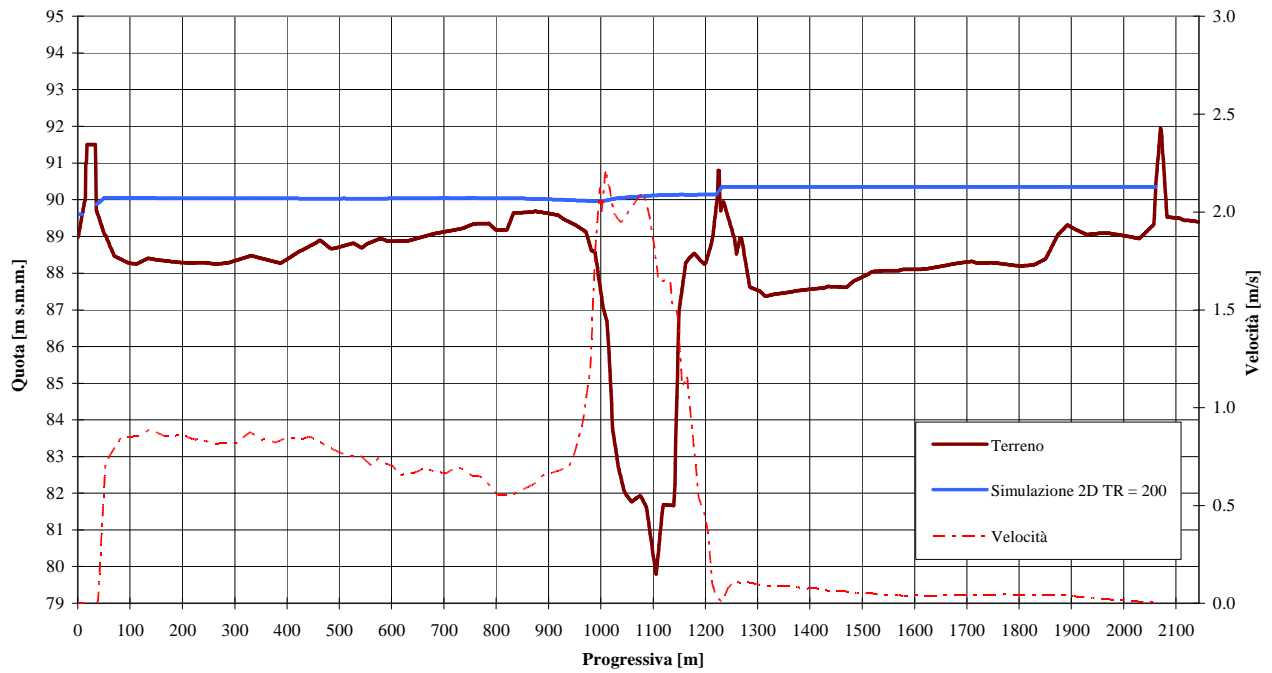
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 13.4



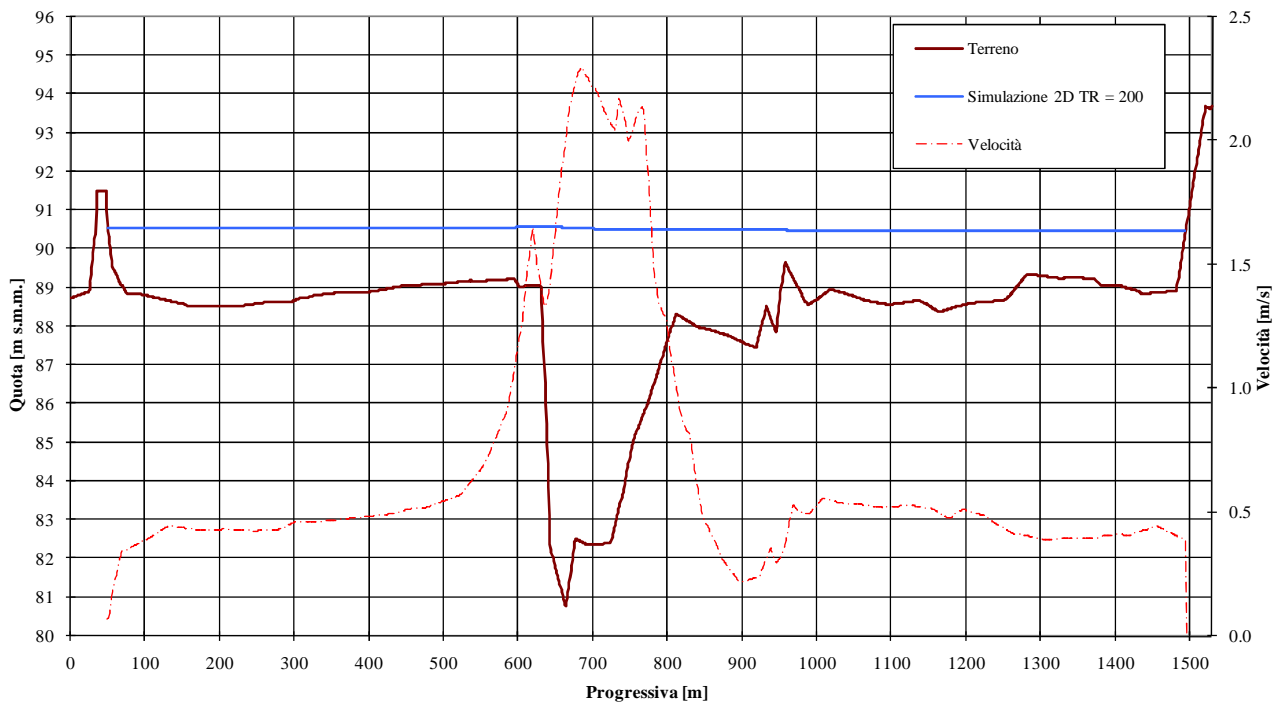
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 16



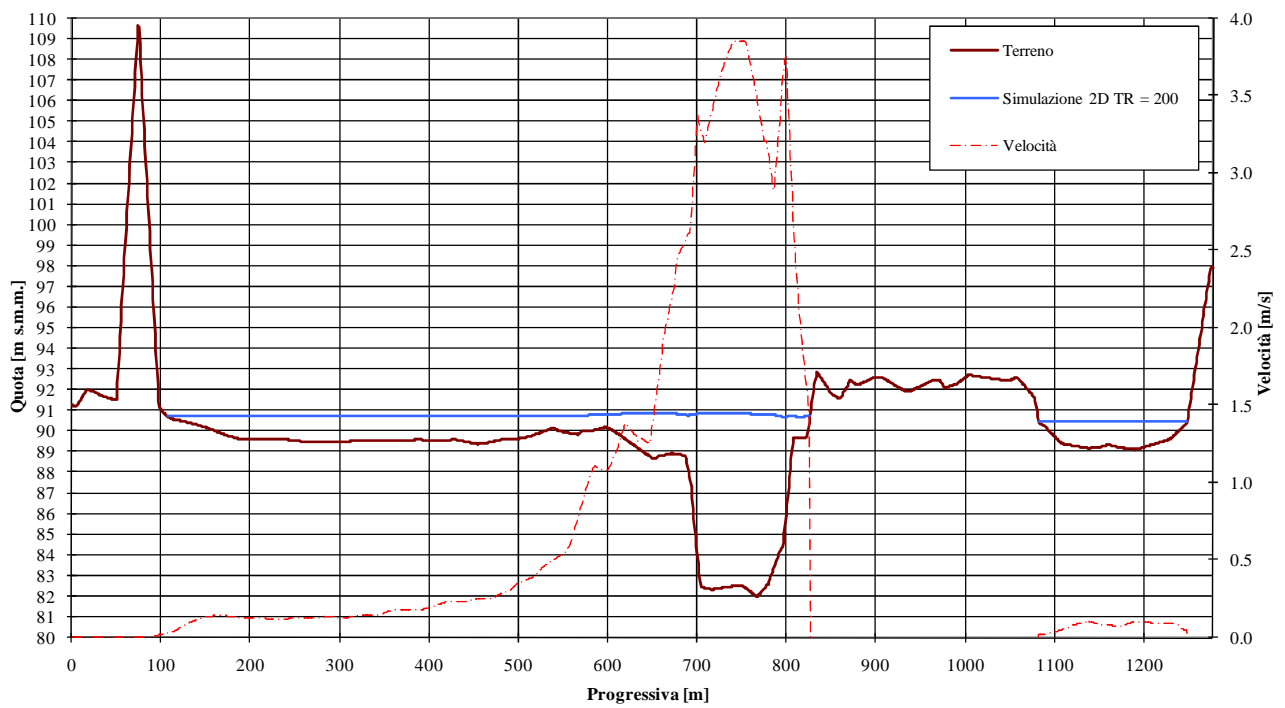
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 18



### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 22

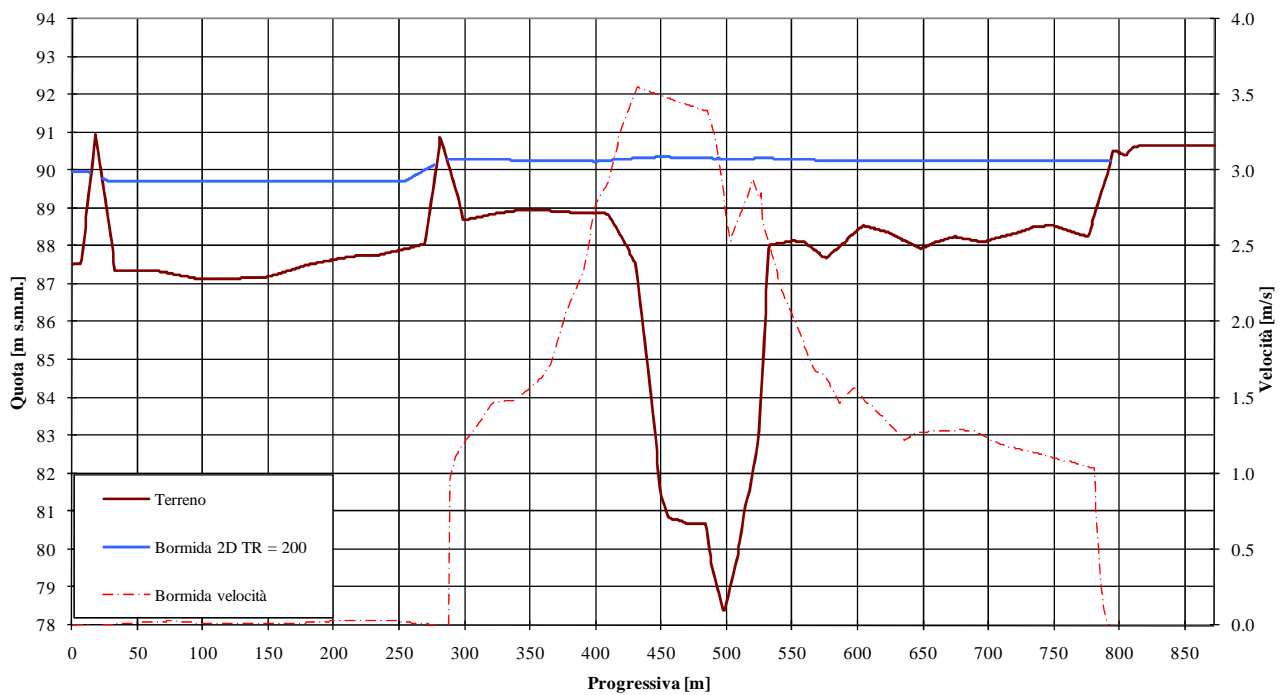


## Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 26

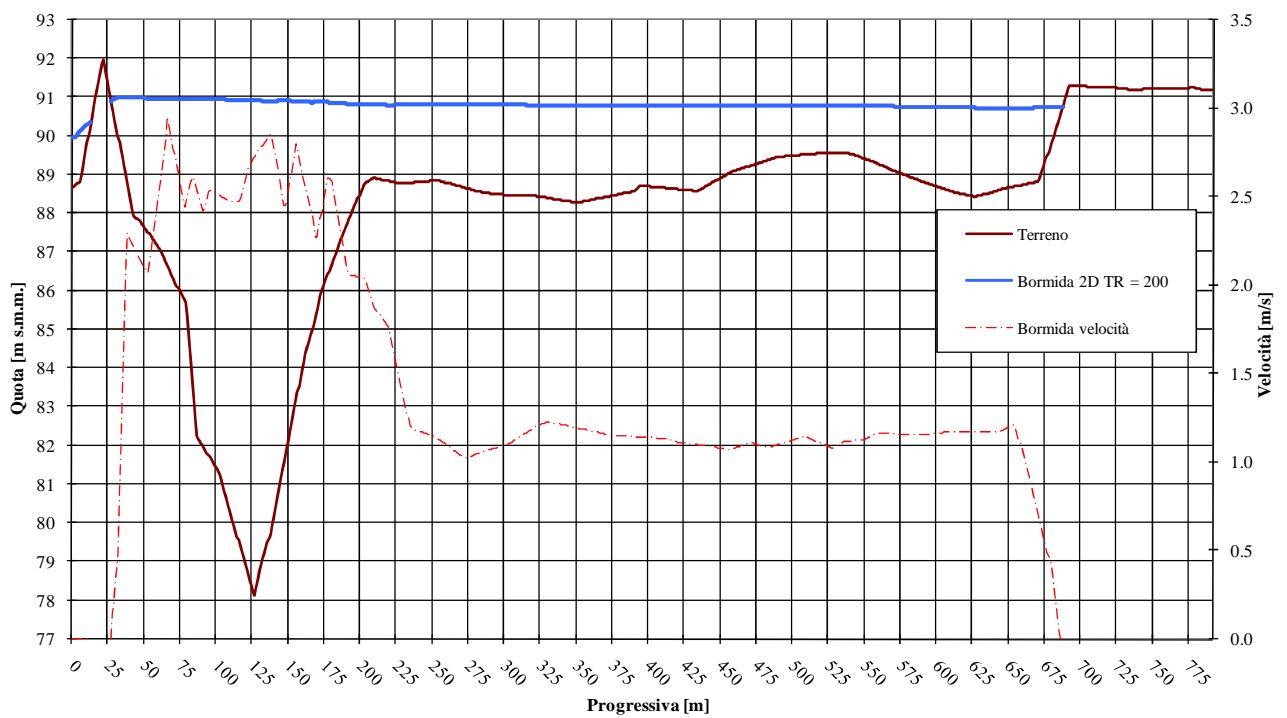


## SEZIONI STATO DI FATTO - TR 200 BORMIDA

### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 4.5

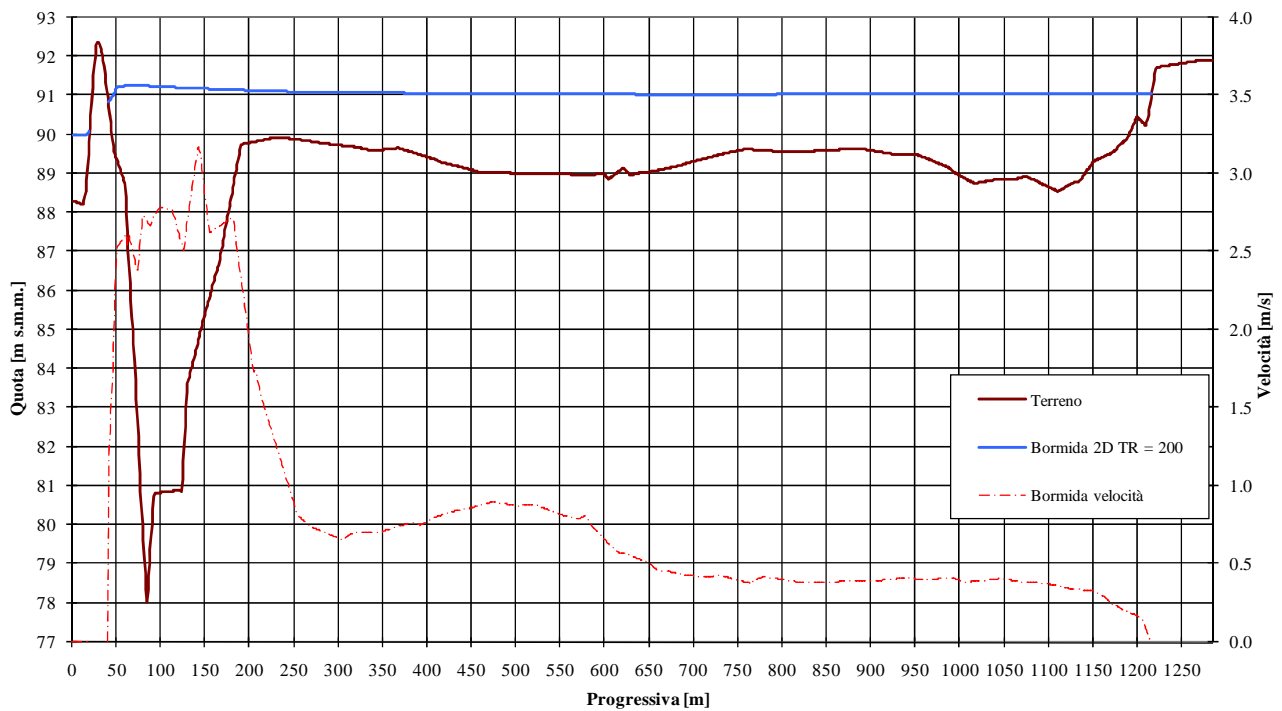


### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 5

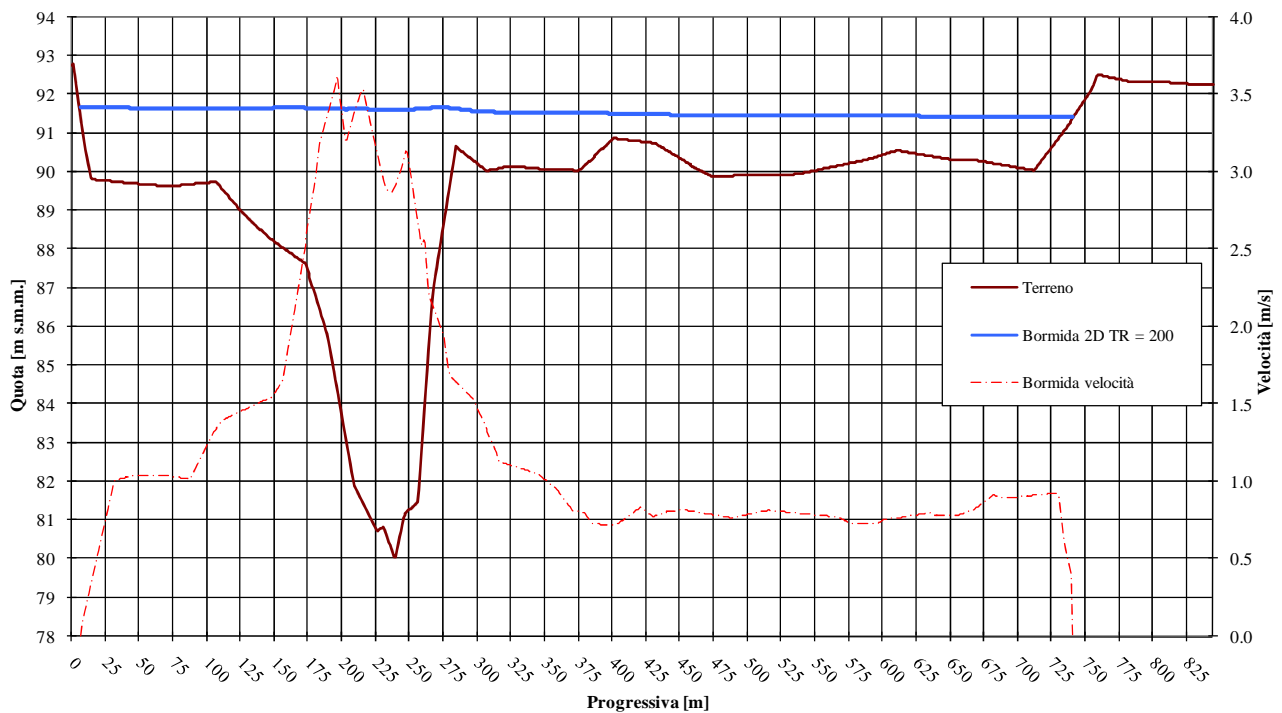




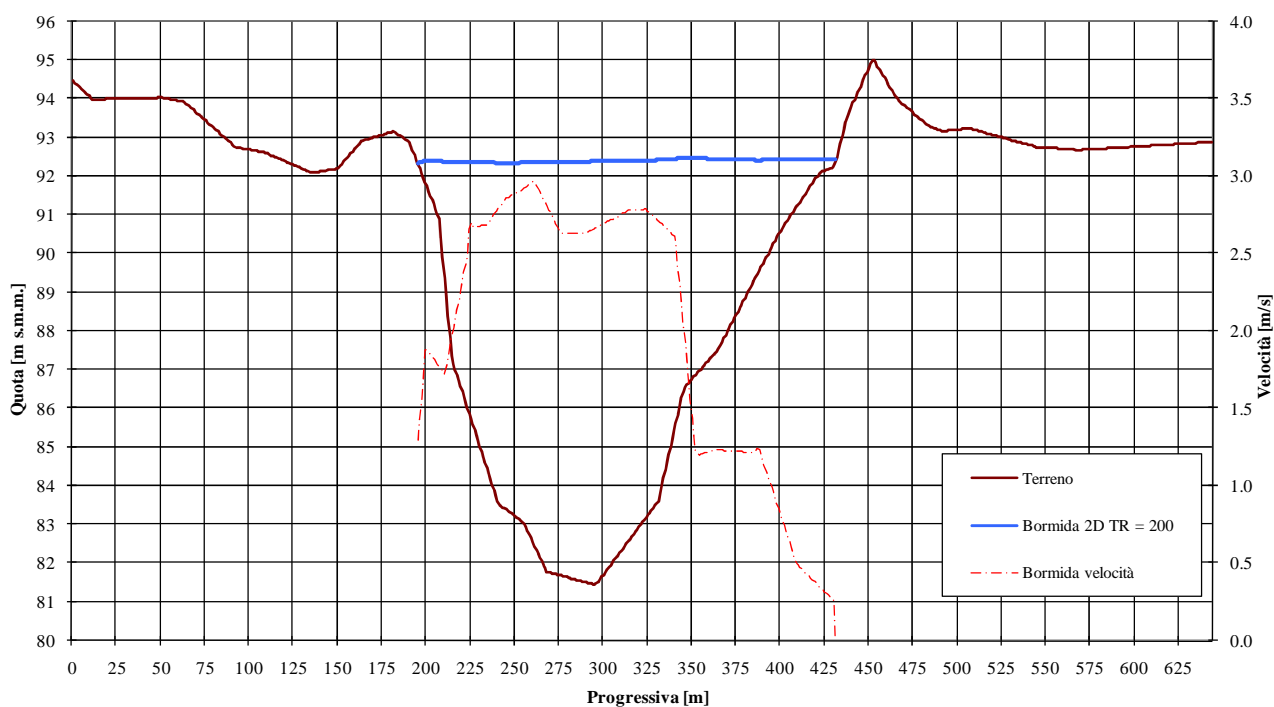
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 5.5



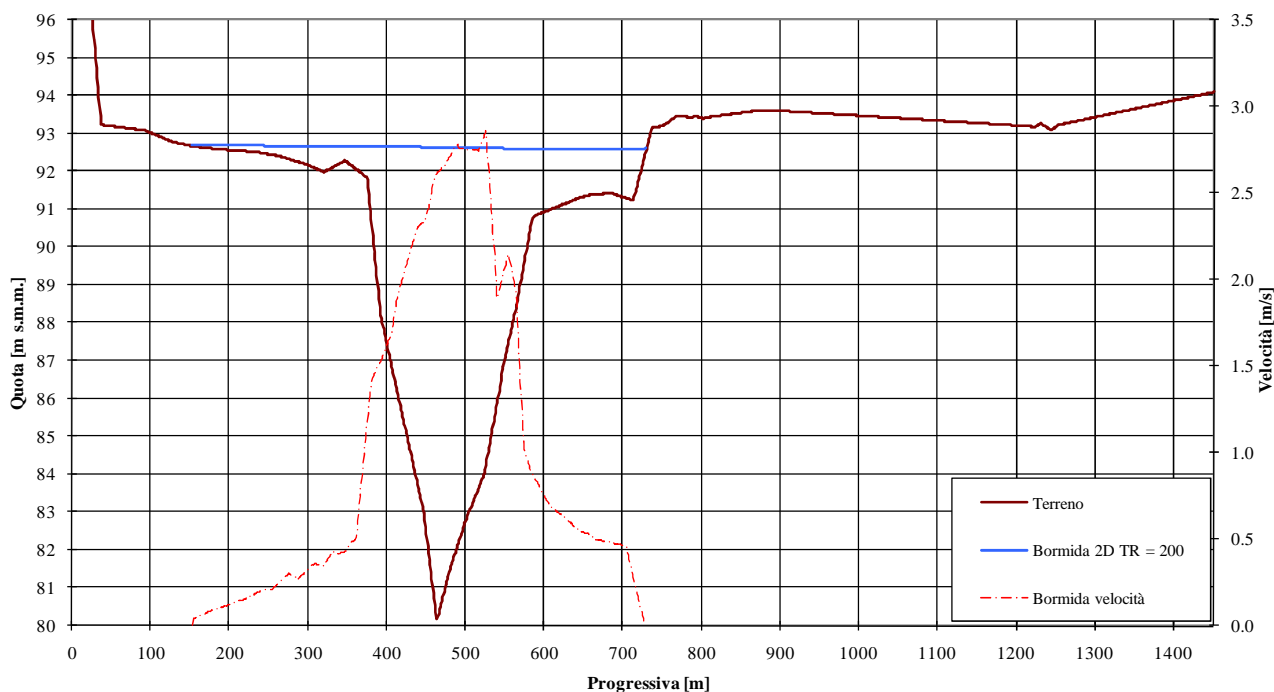
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 6



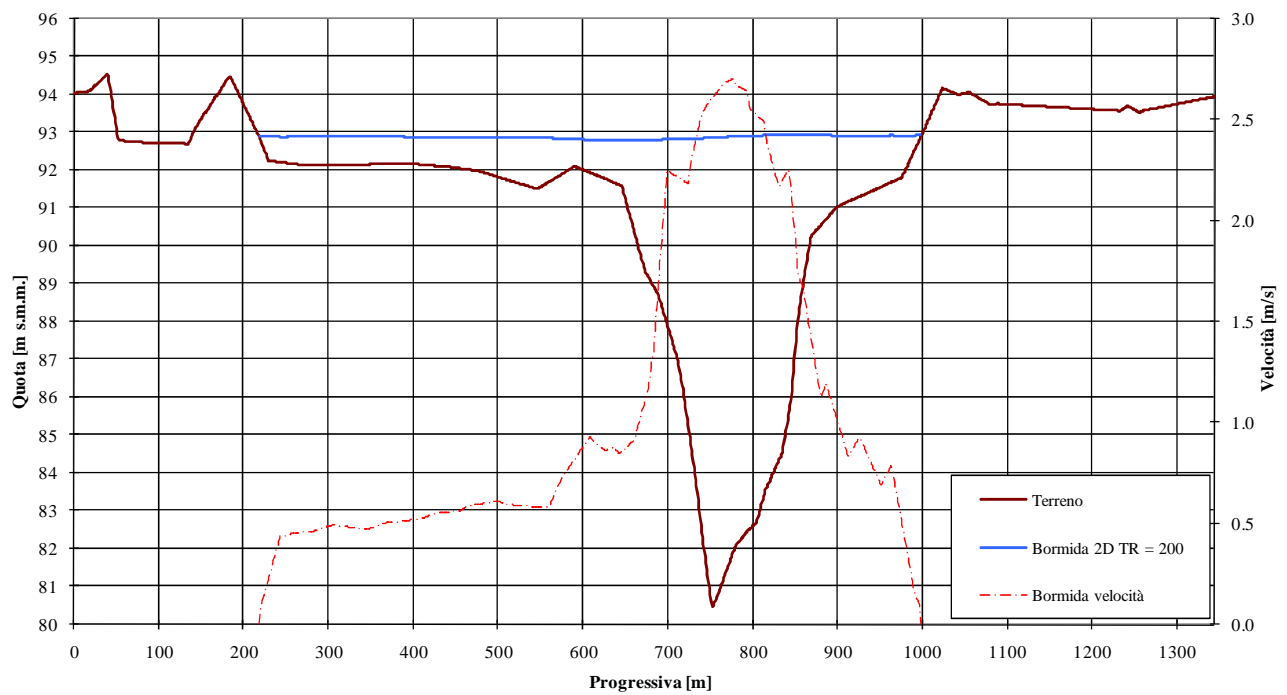
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 8.2



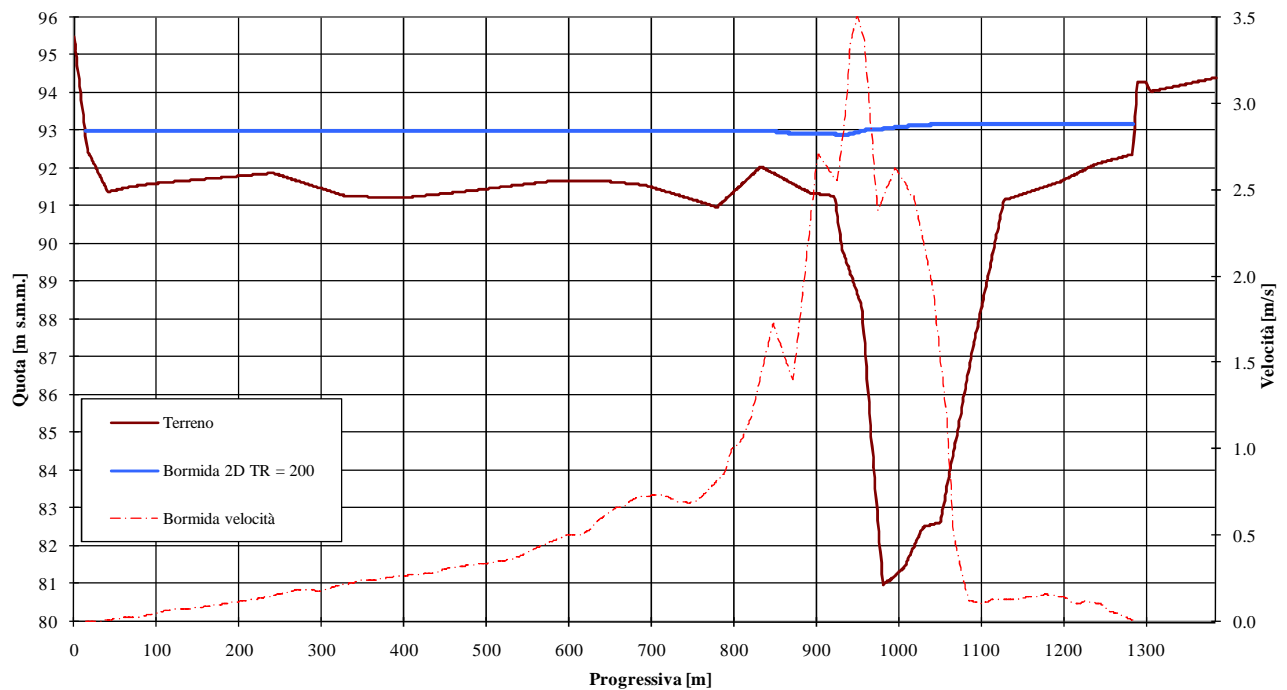
### Stato di fatto - Tr = 200 anni sul Bormida - Fiume Bormida - Sezione 2\_agg valle



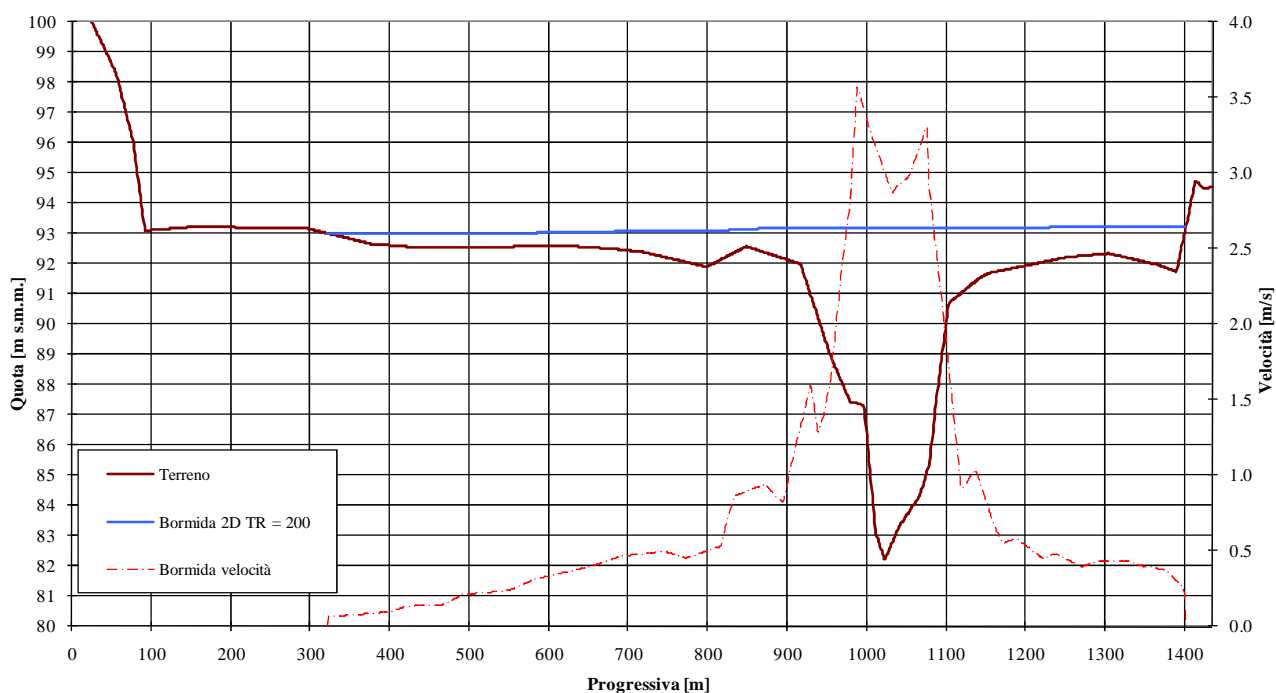
### Stato di fatto - Tr = 200 anni sul Bormida - Fiume Bormida - Sezione 2\_agg monte



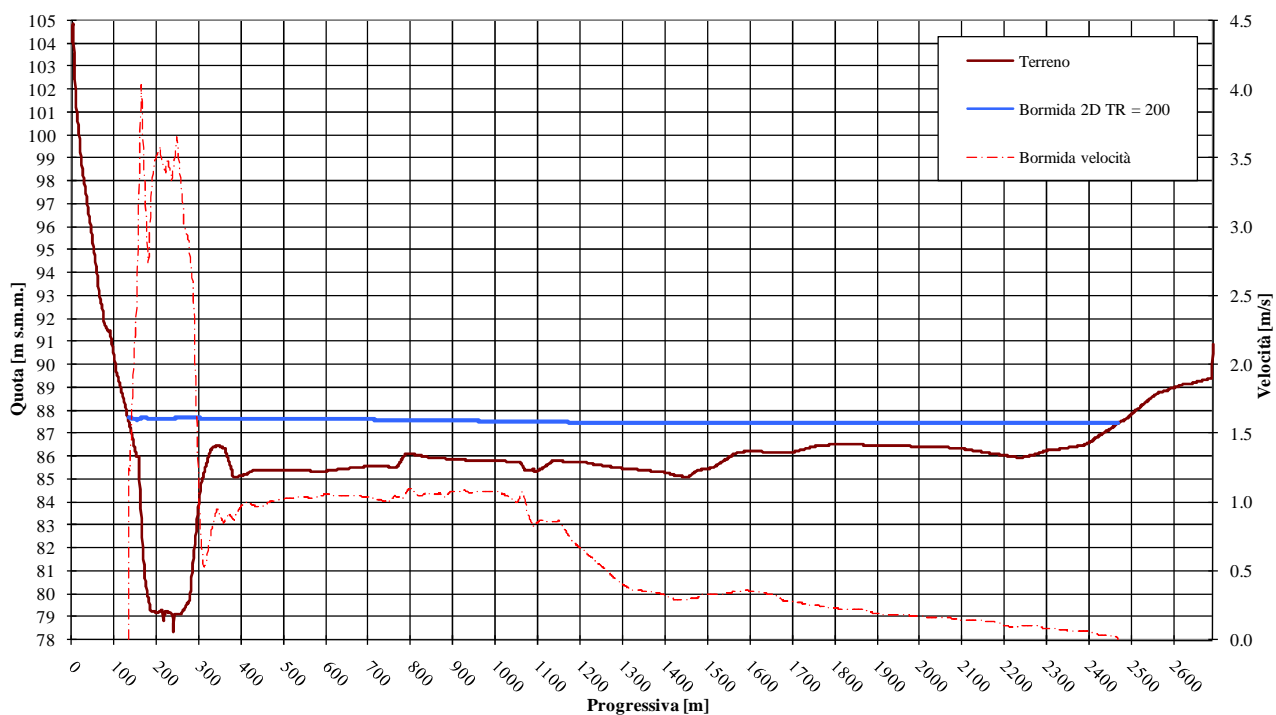
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 9



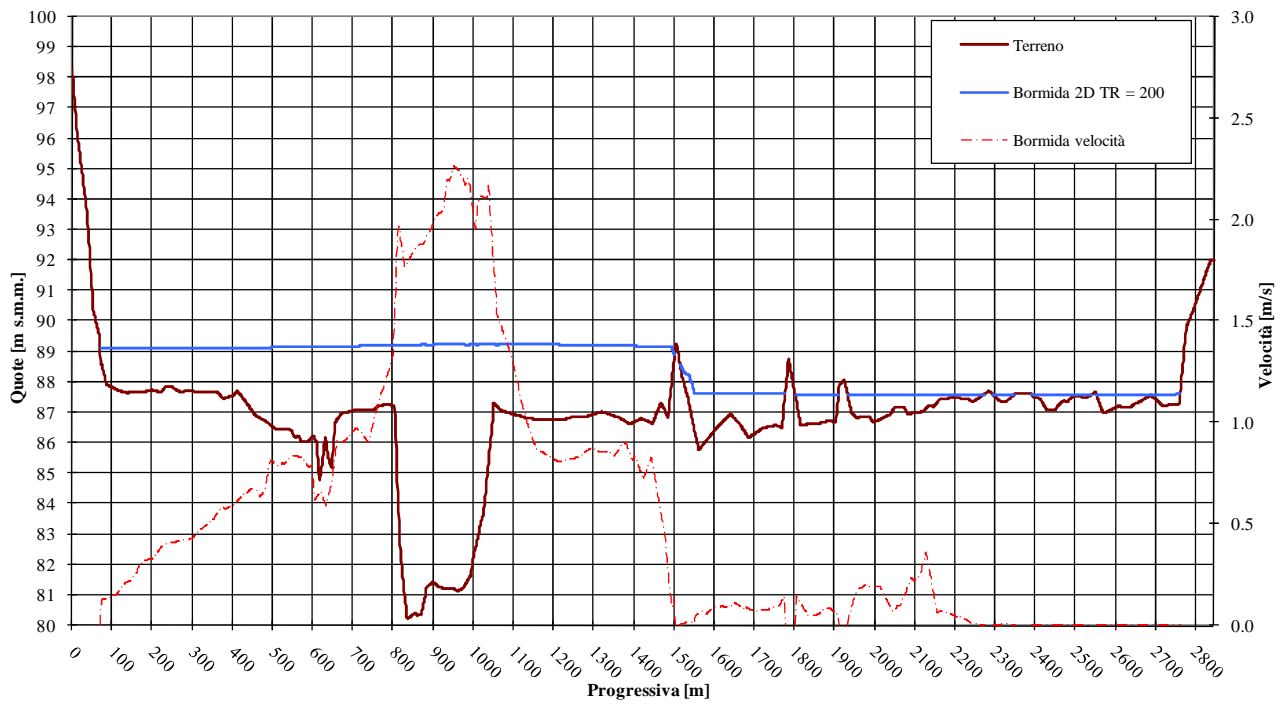
### Stato di fatto - Tr = 200 anni sul Bormida - Fiume Bormida - Sezione 1\_agg



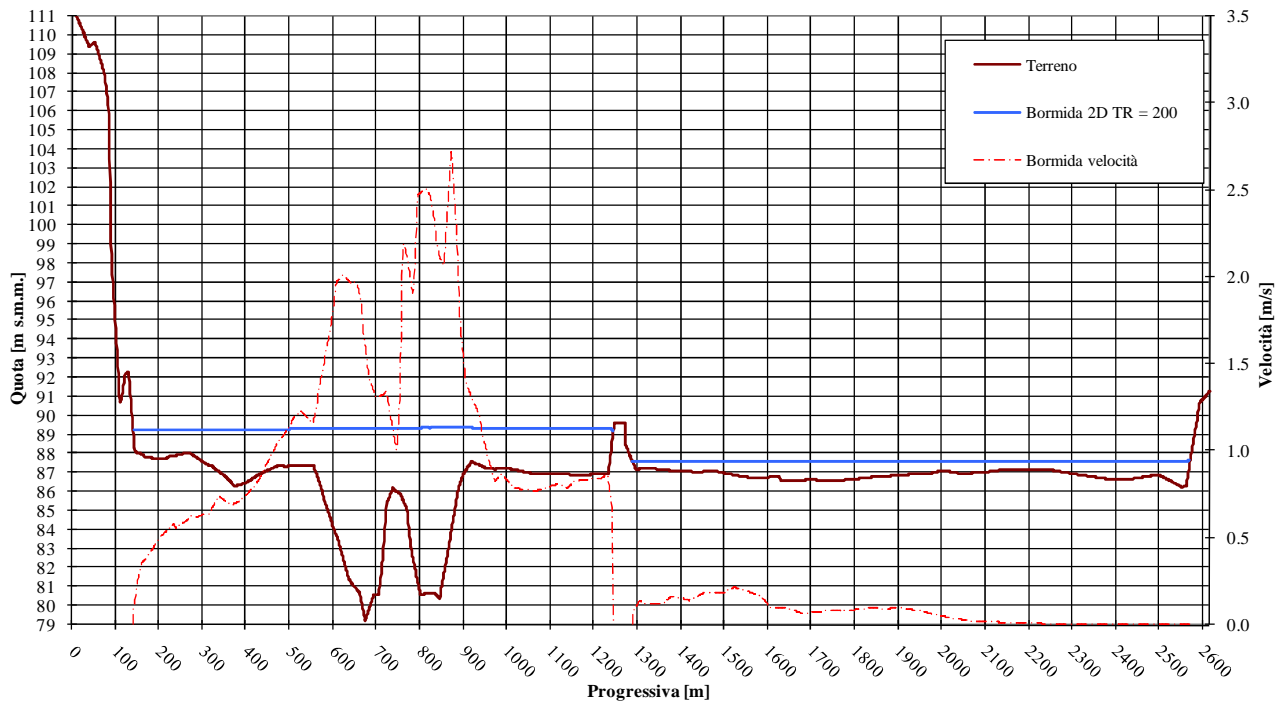
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 9.5



### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 11.1

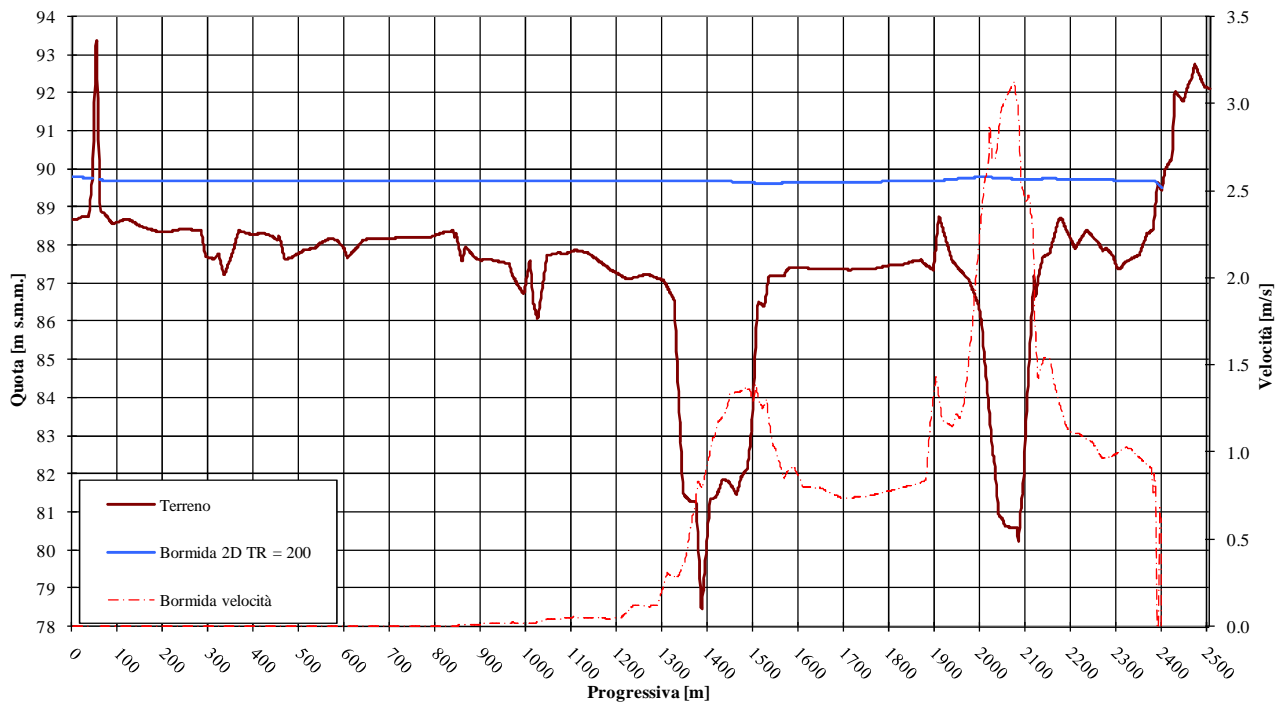


### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 12

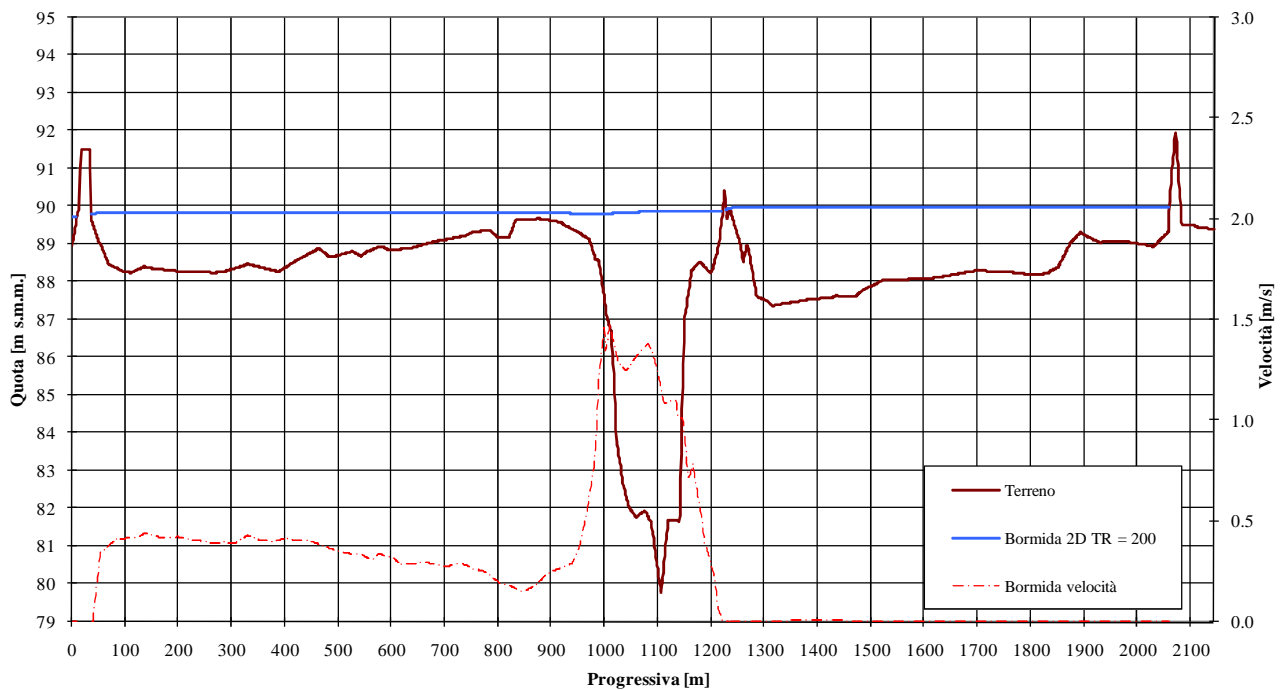




### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 13.4



### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 18



## Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 26

