



**Città della Spezia**  
Medaglia d'oro al Merito Civile  
Medaglia d'argento al Valor Militare

**Studio idrologico e idraulico per la definizione delle fasce di esondazione dei principali torrenti, fossi e canali ricadenti nel Comune della Spezia**

**Aggiornamento e integrazione con definizione di possibili interventi di mitigazione del rischio idraulico relativi ad alcune specifiche criticità puntuali**



**Relazione idraulica e di analisi della pericolosità**

**Bacino 05: Melara**

 **ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI GENOVA**  
**A1721** Dott. Ing. Luca Aldo Remo Dutto

3636	-	0	4	-	0	0	4	0	0	DOC		3.4
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	--	-----

00	LUG.21	M. CERRINA	L. DUTTO	L. DUTTO								
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE								MODIFICHE



## INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE	4
3.	ALLESTIMENTO DEI MODELLI NUMERICI	5
3.1	Approccio metodologico modellistico	5
3.2	Schema del modello	6
3.2.1	Modello MIKE11	6
3.2.2	Modello MIKE21	10
4.	CONDIZIONI AL CONTORNO	12
4.1	Scenari per tempo di ritorno assegnato sul sistema idrodinamico del Melara	14
5.	RISULTATI	16
5.1	Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)	17
5.2	Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)	27
5.3	Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)	35
5.4	Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	44
6.	ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ	46

## ALLEGATI

ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo MIKE11 - HD

ALLEGATO 2 – Descrizione del codice di calcolo MIKE21 - HD

ALLEGATO 3 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale.



## 1. PREMESSA

Il Comune della Spezia ha affidato nel maggio 2019 all'Associazione Temporanea di Imprese (nel seguito ATI) tra Hydrodata S.p.A. (capogruppo mandataria) e ART Ambiente Risorse e Territorio S.r.l. (mandante) il servizio di *redazione di uno studio idrologico e idraulico per la definizione delle fasce di esondazione dei principali torrenti, fossi e canali ricadenti nel Comune della Spezia, con particolare riferimento all'area del levante cittadino, a supporto delle attività di protezione civile e del Piano Urbanistico Comunale* (CIG 7515291652 - CUP G44C18000080001).

A seguito della consegna dello studio (dicembre 2019) e del successivo iter di revisione, è emersa l'opportunità di aggiornare l'analisi di stato attuale per alcuni corpi idrici in relazione alla disponibilità di nuove informazioni e rilievi di dettaglio, oltre a predisporre una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica sull'area di studio. In relazione al generale ampliamento di queste ultime rispetto a quanto precedentemente perimetrato nel Piano di Bacino vigente, a causa delle analisi condotte su tratti di reticolo idrografico precedentemente non studiati dal punto di vista dell'assetto idraulico, è apparso inoltre opportuno identificare già da subito possibili interventi di mitigazione del rischio idraulico relativi a specifiche criticità puntuali.

È stato dunque conferito incarico dal Comune alla scrivente Hydrodata S.p.A. (CIG ZC92FBBB86 – CUP G44C18000080001) per il presente studio integrativo con le finalità sopra descritte.

Per omogeneità e semplicità di consultazione si è provveduto a una riemissione completa dello studio pregresso, anche nelle parti che non hanno subito modifiche; il presente aggiornamento sostituisce quindi integralmente lo studio pregresso.

Tale studio è strutturato in 4 fasi operative principali:

1. caratterizzazione dell'assetto attuale dei corsi d'acqua;
2. analisi idrologica;
3. analisi idrauliche e definizione delle fasce di esondabilità attuali;
4. sintesi dello studio e indicazione di possibili interventi per la mitigazione del rischio.

Il presente documento, relativo alla fase 3, descrive l'assetto idraulico di stato attuale e l'estensione delle aree di possibile esondazione delle portate di piena di riferimento per il bacino 05 - Melara (cfr. relazione 3636-02-00100, *Caratterizzazione dell'assetto attuale dei corsi d'acqua*, per l'inquadramento dei corpi idrici in studio e la relativa numerazione).

Nei capitoli che seguono si descrivono le attività svolte e i risultati ottenuti per la rappresentazione delle dinamiche di propagazione degli eventi di piena nel bacino del Melara, mediante allestimento di modellistica numerica con schema bidimensionale.

In funzione delle aree di esondazione risultanti dall'analisi idraulica è stata tracciata una proposta di ripermimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica A, B e C (rispettivamente pericolosità molto elevata, media e bassa) come definite all'art.12, comma 2 delle Norme di Attuazione (NTA) del vigente Piano di Bacino.

Contestualmente sono stati anche definiti gli ambiti normativi di fascia B, con riferimento alle *aree individuate a minor pericolosità in relazione a modesti tiranti idrici e a ridotte velocità di scorrimento* di cui all'art.15 delle

NTA, delimitando in particolare gli ambiti "B0" e "BB" ai sensi della DGR 91/2013, aggiornamento normativo della precedente DGR 250/2005.

Le fasce così definite sono restituite su base cartografica in scala 1:2.500 nell'elaborato grafico annesso 3636-04-01100.

Si evidenzia come nel presente studio le analisi idrodinamiche per la definizione delle aree potenzialmente esondabili siano state condotte a scala di intero ambito idrografico (ambito 20 – Golfo della Spezia).

Pertanto, nonostante l'approccio scrupoloso, l'elevato dettaglio spaziale della modellistica e l'attenzione posta nella corretta ricostruzione della geometria dei corsi d'acqua, particolarmente per gli elementi individuati come maggiormente critici nell'ambito dei sopralluoghi eseguiti, per l'allestimento dei modelli idraulici si è necessariamente fatto riferimento a basi topografiche estese sull'intero territorio, prevalentemente il DTM da rilievo LiDAR del MATTM per la descrizione delle aree esterne all'alveo inciso, e a documentazione pregressa (studi precedenti, disegni di progetto anche "storici") per la ricostruzione dei tratti di accesso difficoltoso o non possibile (prevalentemente tombinature, ma anche alcuni tratti ubicati in aree industriali, portuali, ferroviarie, ecc.). Si rimanda all'elaborato 3636-02-00100 per la descrizione della documentazione acquisita e utilizzata per ciascun corso d'acqua.

Il DTM LiDAR in particolare è riferibile all'assetto del territorio degli anni 2007-2008; esso è stato aggiornato nella batimetria dei modelli per alcune aree direttamente interferenti o limitrofe agli alvei dei corpi idrici in esame, sulla base di disegni di progetto e/o rilievi in campo, ma nelle spesso ampie aree di propagazione delle esondazioni potrebbero sussistere delle (limitate) discrepanze tra il modello del terreno e lo stato effettivo attuale dei luoghi.

Sulla base della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 e della Carta Tecnica Comunale in scala 1:2.000 sono state inserite nel modello le sagome degli edifici o fabbricati esistenti, con alcuni aggiornamenti conseguenti ai sopralluoghi o all'esame di foto aeree recenti. Non si può escludere tuttavia la presenza di eventuali elementi sul territorio non descritti correttamente dal LiDAR (muri, locali variazioni delle quote del piano campagna) che potrebbero parzialmente influenzare le modalità di propagazione dell'esondazione, soprattutto nelle aree in cui le altezze d'acqua si riducono a valori modesti (dell'ordine della decina di cm), peraltro meno significativi dal punto di vista dell'effettiva pericolosità idraulica.

Si precisa tuttavia come la normativa vigente richieda di evitare, per quanto possibile, ripermetrazioni delle aree esondabili che dipendano esclusivamente da fattori urbanistico-edilizi, ossia da opere (quali muretti, recinzioni, manufatti edilizi, ecc.) la cui eventuale modifica non sia direttamente vincolata da espressione di parere idraulici.

Per maggior chiarezza si riporta quanto indicato a tal proposito dalla DGR 16/2007.

*"In particolare quando il moto ed il deflusso risulti condizionato da situazioni non rappresentate da opere idrauliche (quali ad esempio allagamento tramite sottopassi, aperture o discontinuità nelle opere esistenti, ovvero presenza di "muretti" o recinzioni, etc.), e pertanto legato a situazioni che possono rivelarsi contingenti, in quanto derivanti da motivi e condizioni di tipo urbanistico-edilizio, deve essere garantito che le ipotesi poste a base dello studio non abbiano a venir meno né siano influenzate e modificate da eventuali interventi antropici, in quanto questi interventi non risultano soggetti a pareri ed autorizzazioni da parte delle autorità idrauliche competenti.*

*In assenza delle garanzie suddette devono essere assunte perimetrazioni che prendano contemporaneamente in considerazione le diverse ipotesi di dinamica dell'evento di esondazione, attraverso l'involuppo dei diversi possibili scenari di pericolosità idraulica o una loro opportuna combinazione sulla base della loro probabilità di evenienza.*

*In tal senso vanno evitate, di norma, ripermetrazioni che dipendono esclusivamente da fattori urbanistico-edilizi.*

*Le fasce di inondabilità sono infatti delle zone a valenza normativa derivanti dalle aree inondabili e non possono presentare morfologie a "isola" in corrispondenza di manufatti edilizi o blocchi di manufatti o interi isolati. A meno che tale morfologia non risulti suffragata da particolari conformazioni topografiche, evidenziate dalla planimetria e dai transetti, tale morfologia non è consentita anche qualora la tipologia e conformazione degli edifici, dei blocchi o degli isolati li renda protetti da barriere impermeabili.*

*Le eventuali protezioni edilizie corrispondono, infatti, non ad una "messa in sicurezza" areale della zone, ma piuttosto ad accorgimenti tecnico-costruttivi, attivabili nelle zone a rischio, al fine di proteggere passivamente gli insediamenti dagli allagamenti e di non aumentare il rischio attuale. Proprio perché tali interventi non rappresentano opere idrauliche con obbligo di controllo e manutenzione, né sono soggetti a polizia idraulica né sono di proprietà demaniale, essi non sono soggetti ad alcuna autorizzazione di tipo idraulico in occasione di modifiche degli elementi edilizi in questione. Di conseguenza, le aree protette da strumenti di difesa passiva a scala locale non possono essere tenuti in considerazione ai fini della perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica di cui si tratta".*

Nel presente studio, visto l'elevato grado di antropizzazione delle aree esterne ai corsi d'acqua e dei corsi d'acqua stessi, per la rappresentazione delle aree allagabili si è ritenuto opportuno tenere in considerazione alcuni elementi fisici di particolare rilevanza, quali ad esempio muri di cinta continui in calcestruzzo o in pietra di rilevante altezza, talora costituenti per lunghi tratti la sponda di un corpo idrico, considerando però alla stregua di "varchi" completamente aperti eventuali cancellate o vie di accesso, per quanto chiusi da portoni o pannelli amovibili. Sono invece stati generalmente trascurati gli elementi di rilevanza secondaria (muretti, marciapiedi, recinzioni, ecc.).

In conclusione, i risultati del presente studio, esposti nel seguito del documento, costituiscono un aggiornamento e affinamento di maggior dettaglio delle valutazioni di pericolosità idraulica contenute nel vigente Piano di Bacino, e potranno fungere da base per la ridefinizione delle stesse alla scala territoriale d'ambito, a supporto delle attività di protezione civile e del Piano Urbanistico Comunale.

Per quanto sopra osservato, non si può tuttavia escludere la possibilità di ulteriori affinamenti/aggiustamenti a scala locale a seguito di studi di maggiore dettaglio, congruamente con quanto previsto dalle Norme di Piano all'art.15, comma 7bis. Tali studi dovranno ottemperare a quanto indicato dalla DGR n.16/2007 (allegato 2); per il caso specifico si evidenzia come essi dovranno soddisfare i seguenti requisiti minimi:

- basarsi su un rilievo topografico celerimetrico (piano quotato) in grado di descrivere in dettaglio l'effettiva morfologia del territorio, che come detto potrebbe differire localmente dal DTM LiDAR adottato nel presente studio;
- adottare una schematizzazione idraulica di tipo bidimensionale per la valutazione della propagazione delle portate di esondazione sulle aree esterne all'alveo inciso;
- fare riferimento a valori di portata congruenti con l'analisi idrologica presentata nel presente studio, o svilupparne un ulteriore aggiornamento sulla base di nuovi dati.

Approfondimenti potenzialmente meritevoli di nuove analisi idrauliche per verificare l'eventuale necessità di un affinamento della perimetrazione possono essere costituiti dal rilievo, video - ispezione o comunque dalla definizione su base certa della geometria di tratti di corso d'acqua risultati inaccessibili per il presente studio, e ricostruiti per le finalità di quest'ultimo sulla base del DTM LiDAR o di documentazione pregressa. L'eventuale diversa definizione del tracciato di tratti tominati potrebbe modificare anche la ripartizione di aree di bacino contribuente tra diversi rami di uno stesso corso d'acqua.

In virtù delle analisi svolte tuttavia si ritiene che gli eventuali studi di cui sopra non possano apportare modifiche macroscopiche alla caratterizzazione dell'assetto di vulnerabilità idraulica derivante dal presente studio, da ritenersi affidabile per l'impostazione della pianificazione territoriale a livello comunale.

## 2. STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE

Il vigente Piano di Bacino identifica sull'asta del fosso Melara aree di pericolosità idraulica elevata (fascia A), come rappresentato in Figura 1, contigue e parzialmente sovrapposte alle omologhe relative alle esondazioni dell'adiacente Canale Fossamastra (cfr. anche relazione 3636-04-00300 relativa a tale corso d'acqua).

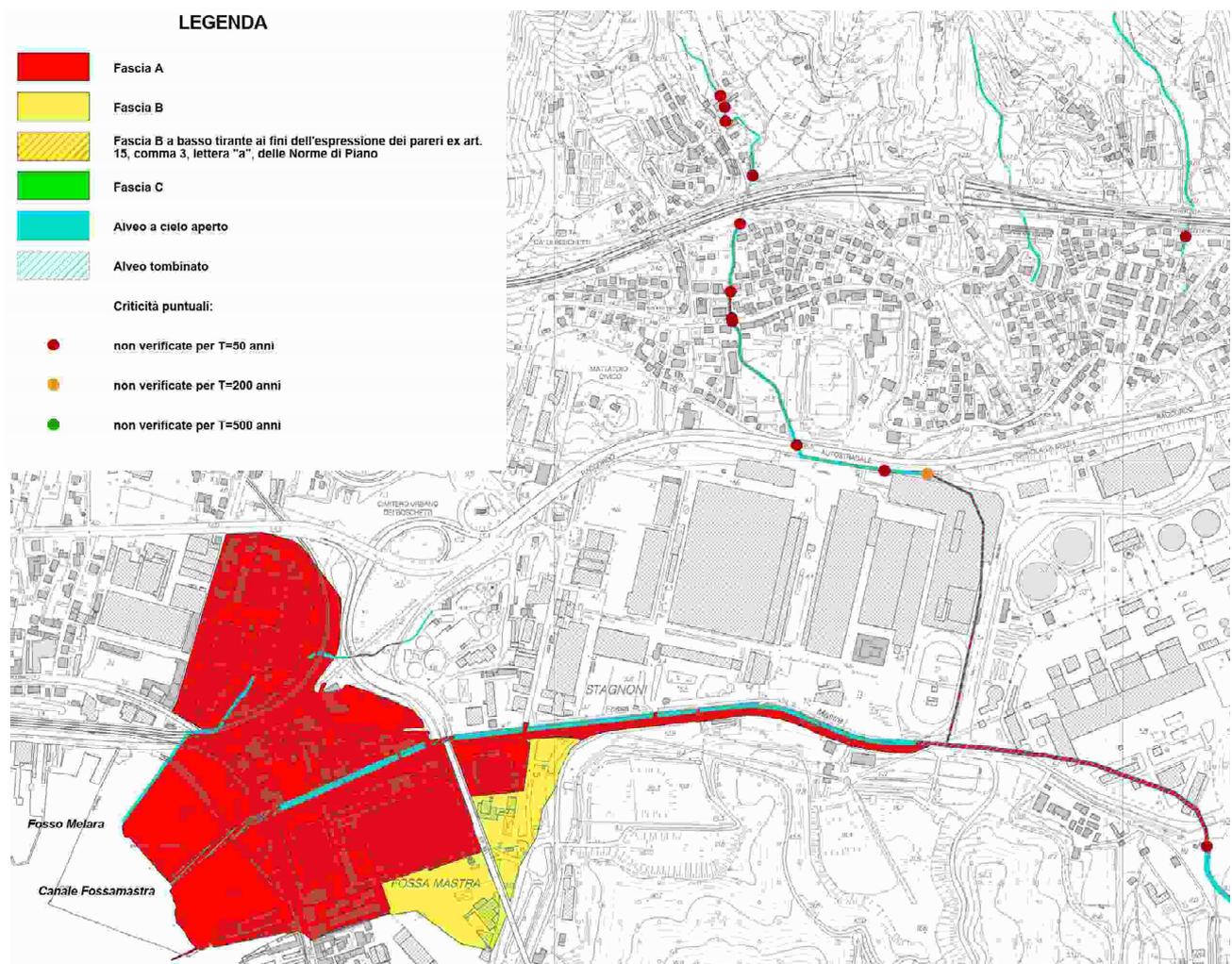


Figura 1 – Aree di pericolosità idraulica (fasce fluviali) da Piano di Bacino vigente.

### **3. ALLESTIMENTO DEI MODELLI NUMERICI**

Le analisi idrauliche per la caratterizzazione dell'idrodinamica di piena del fosso Melara sono state condotte mediante la messa a punto e applicazione di modelli numerici idrodinamici bidimensionali in moto vario, dinamicamente accoppiati a modelli monodimensionali descrittivi del deflusso all'interno dell'alveo inciso.

Per descrivere la morfologia del terreno nelle aree di esondazione e propagazione dell'onda di piena è stato utilizzato il modello digitale del terreno (DTM) da volo LiDAR acquisito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Al fine della caratterizzazione geometrica dell'alveo inciso e delle opere di attraversamento / tombature presenti sono state integrate le informazioni geometriche derivanti dal DTM citato, dai rilievi in campo eseguiti per il presente studio, dalle indicazioni geometriche riportate nel PdB e dalla documentazione relativa a studi o progetti pregressi che è stato possibile acquisire, come meglio descritto nell'elaborato 3636-02-00100.

In particolare sono risultati di fondamentale importanza per ricostruire la geometria degli ampi tratti inaccessibili (tombati e a cielo aperto) della porzione terminale del rio gli elaborati progettuali delle sistemazioni eseguite da Autorità Portuale (1998), Ferrovie dello Stato (1999, 2001), SALT (1999).

I tratti di monte del rio, tombati, sono di difficile individuazione e definizione geometrica, per cui è stata fornita la ricostruzione più verosimile per le finalità di definizione dei bacini contribuenti sottesi ai vari rami, limitando però la rappresentazione modellistica idrodinamica alle porzioni di corso d'acqua per le quali è stato possibile conoscere con adeguata affidabilità le caratteristiche dimensionali.

Per maggiori dettagli in merito all'assetto attuale dei corsi d'acqua e alle informazioni disponibili si rimanda allo specifico elaborato 3636-02-00100.

#### **3.1 Approccio metodologico modellistico**

A partire dalle informazioni topografiche precedentemente citate è stato allestito un modello numerico idraulico utilizzato per l'analisi di stato attuale delle dinamiche di propagazione della piena nell'area oggetto di studio.

In particolare è stato utilizzato il codice di calcolo MIKE Flood del DHI, che combina l'approccio monodimensionale e quello bidimensionale, eseguendo simulazioni condotte per diversi tempi di ritorno (50, 200 e 500 anni), con riferimento agli idrogrammi di piena di progetto definiti nell'ambito dell'analisi idrologica (v. elaborato 3636-03-00100).

MIKE Flood è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE11 e quello bidimensionale MIKE21 (per una descrizione sintetica dei codici si vedano rispettivamente ALLEGATO 1 e ALLEGATO 2). Esso consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE11 e di MIKE21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso modello l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie: MIKE11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo, ecc; MIKE21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso coperte dal DTM (modello digitale del terreno).

MIKE Flood è caratterizzato dal fatto che MIKE11 e MIKE21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto e nell'input-output, mentre una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci per gli interscambi di portata e di quantità di moto e per la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

Il modello MIKE Flood è stato messo a punto nel modo seguente:

- modello MIKE21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree allagabili esterne alle aree fluviali;
- modello MIKE11 monodimensionale dell'alveo inciso dei corsi d'acqua;
- connessione dinamica dei modelli MIKE21 e MIKE11.

Le restituzioni dei risultati ottenuti con i diversi modelli allestiti, presentate nei capitoli che seguono, sono esposte:

- per le parti di modello monodimensionale sotto forma di profili longitudinali di livello e tabelle contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione, riferiti al valore massimo registrato nel corso dell'evento simulato;
- per le parti di modello bidimensionale (aree allagate), sotto forma di mappe dei tiranti idrici e velocità di scorrimento relative sia all'inviluppo dei massimi valori raggiunti che ad alcuni istanti temporali dell'evento significativi, ai fini della definizione delle dinamiche di allagamento delle aree urbanizzate del comune di La Spezia.

In allegato si fornisce rappresentazione di tutte le sezioni implementate nel modello monodimensionale, con indicazione del massimo livello di piena risultante per l'evento di piena associato a TR=200 anni.

## **3.2 Schema del modello**

### **3.2.1 Modello MIKE11**

Il modello monodimensionale schematizzato nel codice MIKE11 HD (modulo idrodinamico) è costituito da 48 sezioni trasversali, che rappresentano la geometria degli alvei incisi dei due rami del fosso Melara.

Esse sono distribuite in 3 aste, di seguito descritte.

- Ramo di Melara di levante, caratterizzato da una lunghezza complessiva di simulazione pari a 870,50 m; in particolare l'inizio del modello corrisponde al breve tratto a cielo aperto in corrispondenza dell'area produttiva di via degli Stagnoni (circa 45 m a monte dell'imbocco della tombinatura al di sotto dell'area dell'impianto di depurazione). Su questo ramo, indicato come principale per le finalità della schematizzazione del network del modello, sono presenti 35 sezioni che descrivono geometricamente il corso d'acqua fino allo sbocco in mare.
- Ramo di Melara di ponente, che confluisce nel precedente a valle della linea ferroviaria, dopo averla attraversata con un tombino; il tratto rappresentato (a valle tombino) si sviluppa a cielo aperto per un'estensione pari a circa 156 m e viene descritto geometricamente con 7 sezioni trasversali.
- Asta del fosso minore che confluisce nel Melara (di levante) a monte della linea ferroviaria; esso si sviluppa a cielo aperto per un'estensione pari a circa 152 m (corrispondente alla prosecuzione dell'asse del ramo di ponente a monte tombino) e viene descritto geometricamente con 6 sezioni trasversali.

- Nel modello si è inoltre inserito il tratto terminale dell'alveo del Fossamastra, al fine di rappresentare più correttamente il collettamento e trasferimento a mare della eventuale portata di esondazione del Melara che si propagasse fino a interessare l'alveo di questo corso d'acqua.

In Figura 2 e Tabella 1 si riporta l'estensione del modello (traccia dell'asse e delle sezioni utilizzate) su base foto aerea recente (2018, Google), in coordinate UTM 32 WGS84, e l'anagrafica delle sezioni trasversali. Nel caso delle sezioni chiuse proprie delle tombinature la quota di sommità spondale è unica e rappresenta l'intradosso del manufatto).

Le sezioni trasversali inserite nel modello sono frutto del confronto e dell'integrazione delle geometrie rilevate durante i sopralluoghi, dalla base dati fornita dal DTM LiDAR e dagli elaborati dei progetti pregressi precedentemente citati, al fine di rappresentare accuratamente lo stato attuale dell'alveo e delle aree circostanti.

In corrispondenza di attraversamenti e tombinature sono state inserite nel modello specifiche strutture di tipo "culvert" e "weir", che riproducono le reali condizioni di deflusso di tali manufatti in condizioni di moto a pelo libero, in pressione e di eventuale sormonto dell'impalcato, calcolando opportunamente le perdite di carico che si manifestano. Per i salti di fondo (soglie e briglie) si sono inserite analogamente strutture di tipo "weir". Per la localizzazione e descrizione delle caratteristiche dei manufatti riprodotti nel modello numerico si rimanda alla relazione descrittiva d'insieme (cfr. elaborato 3636-02-00100).

Ramo	Descrizione	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Intradosso
-	-	-	m	m s.m.	m s.m.
Melara		1	0,00	1,25	
Melara		2	4,99	1,20	
Melara		3	24,38	0,74	
Melara		4	37,04	0,55	
Melara	imbocco ME_C1	5	44,47	0,53	2,53
Melara	ME_C1	6	94,63	0,36	
Melara	sbocco ME_C1	7	152,30	0,18	
Melara	imbocco ME_C2	8	157,80	0,16	2,71
Melara	ME_C2	9	175,64	0,10	
Melara	sbocco ME_C2	10	195,23	0,04	
Melara		11	208,96	-0,01	
Melara		12	241,74	-0,11	
Melara		13	257,46	-0,16	
Melara		14	287,91	-0,26	
Melara	imbocco ME_C3.1	14.1	309,41	-0,33	2,67
Melara	ME_C3.1	15	311,41	-0,34	
Melara	sbocco ME_C3.1	16	341,38	-0,43	
Melara	imbocco ME_C3.2	17	346,51	-0,45	1,63
Melara	sbocco ME_C3.2	18	376,77	-0,45	
Melara	imbocco ME_C3.3	19	380,92	-0,45	1,30
Melara	sbocco ME_C3.3	20	402,54	-0,45	

Ramo	Descrizione	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Intradosso
-	-	-	m	m s.m.	m s.m.
Melara	inizio vasca	21	403,93	-0,45	
Melara	fine vasca	22	410,85	-0,45	
Melara	imbocco ME_C4	22.1	411,56	-0,45	1,55
Melara	ME_C4	23	412,56	-0,45	
Melara	sbocco ME_C4	24	557,75	-0,52	
Melara		25	566,82	-0,53	
Melara		26	586,66	-0,53	
Melara	monte ME_P1	27	606,22	-0,54	0,61
Melara	valle ME_P1	28	613,17	-0,55	
Melara	imbocco ME_C5	29	620,38	-0,55	1,60
Melara	ME_C5	30	659,55	-0,62	
Melara	ME_C5	31	708,16	-0,71	
Melara	ME_C5	32	741,98	-0,77	
Melara	sbocco ME_C5	33	870,50	-1,01	
Afluente dx a monte ferrovia		34	0,00	0,50	
Afluente dx a monte ferrovia		35	27,34	0,47	
Afluente dx a monte ferrovia		36	70,46	0,42	
Afluente dx a monte ferrovia		37	105,84	0,39	
Afluente dx a monte ferrovia		38	139,44	0,35	
Afluente dx a monte ferrovia	afflusso in vasca imbocco manufatto ME_C3.3	39	152,39	-0,45	
Melara ramo ponente		34	0,00	0,50	
Melara ramo ponente		35	24,99	0,47	
Melara ramo ponente		36	64,26	0,43	
Melara ramo ponente		37	97,10	0,40	
Melara ramo ponente		38	128,23	0,36	
Melara ramo ponente		39	140,40	0,35	
Melara ramo ponente	afflusso in vasca sbocco manufatto ME_C3.3	40	155,58	-0,45	

**Tabella 1 – Anagrafica delle sezioni inserite nel modello numerico.**

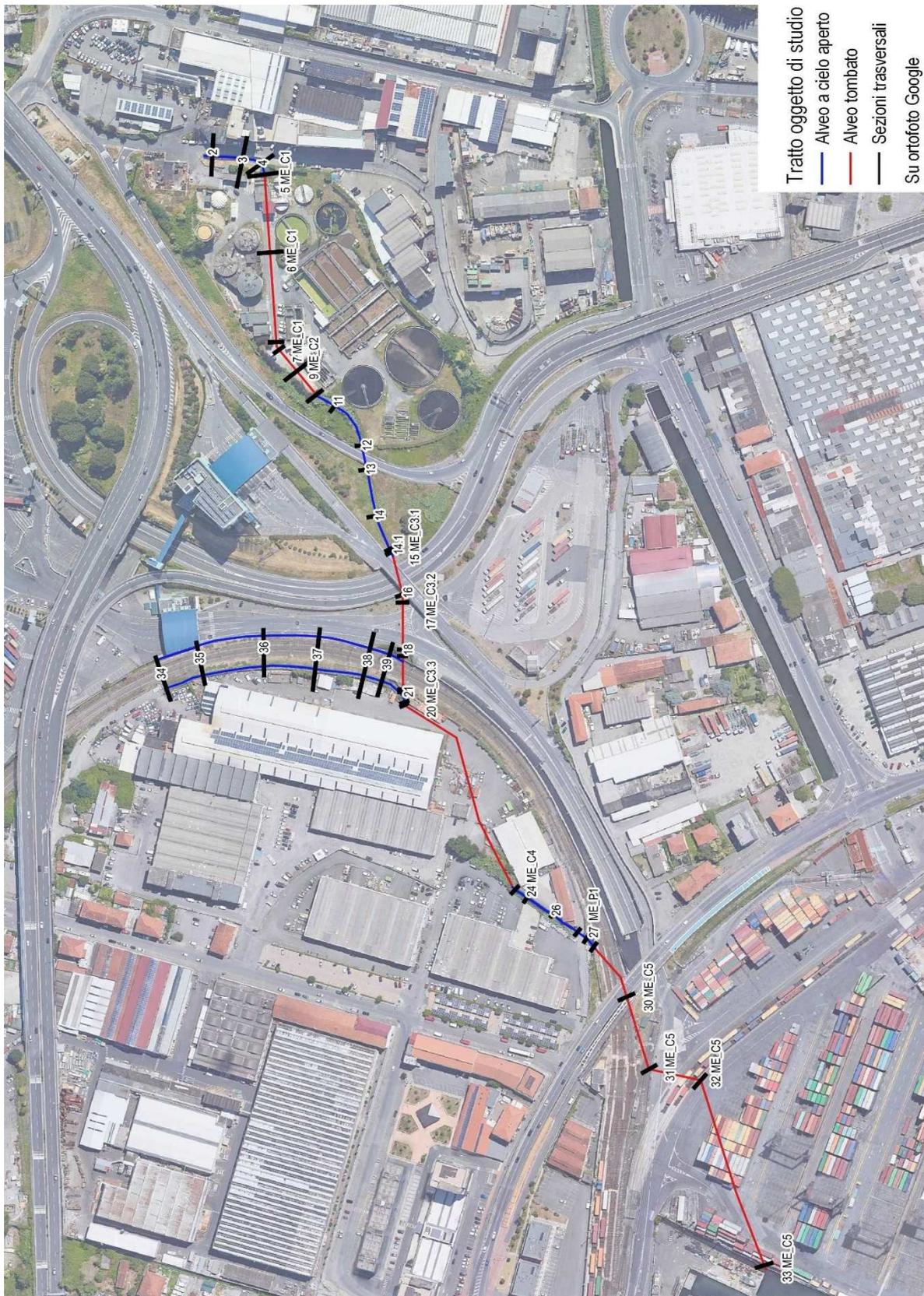


Figura 2 – Network del modello MIKE11 allestito per il sistema idrodinamico del Melara.

### 3.2.2 Modello MIKE21

Come già anticipato, per l'analisi della propagazione della piena dei corsi d'acqua esaminati è stato allestito un modello MIKE Flood che accoppia dinamicamente il modello monodimensionale MIKE11 utilizzato per rappresentare la geometria dell'alveo con il modello bidimensionale MIKE21 rappresentante le aree esterne di esondazione.

Nel modello bidimensionale alle differenze finite MIKE21 la descrizione geometrica del terreno è rappresentata definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato mediante tecniche di interpolazione, stabilendo una dimensione di cella a partire dalle basi topografiche disponibili. Nel caso in esame si è eseguita una ulteriore elaborazione dei dati topografici LiDAR, approntando il modello con una risoluzione spaziale 2,0 x 2,0 m.

La definizione della dimensione del passo spaziale della griglia, da utilizzare per la messa a punto del modello, è un passaggio fondamentale nella sua realizzazione ed influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. Aumentando le dimensioni del passo della griglia diminuiscono i tempi di calcolo, ma diminuisce anche l'accuratezza dei risultati. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze.

Nel caso in esame la scelta è condizionata dalla necessità di rappresentare con sufficiente dettaglio la geometria delle aree allagabili, delle strade, delle strutture interferenti e delle possibili vie di deflusso conseguenti a fenomeni di esondazione. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo piuttosto fitta, a maglia 2,0 x 2,0 m, composta da 500 righe e 967 colonne (483.500 punti di calcolo).

Nella Figura 3 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello.

In colore fucsia sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili o perché ricadenti all'interno dei rami di alveo inciso appartenenti al dominio del modello monodimensionale MIKE11 (il contributo di tali celle al deflusso della piena infatti viene già descritto da quest'ultimo modello).

Si noti come nella batimetria sia escluso anche l'alveo inciso del Fossamastra, che trasferisce a mare l'eventuale portata di esondazione proveniente dalla sinistra idraulica del Melara. La sua geometria è rappresentata anche in questo caso da un tratto di modello monodimensionale collegato al modello bidimensionale tramite strutture di sfioro localizzate lungo le sponde. La geometria adottata è quella del tratto terminale del modello utilizzato per l'analisi di questo corso d'acqua (cfr. relazione 3636-04-00300).

Inoltre è stata inserita la geometria dei fabbricati presenti all'esterno all'alveo modificando la quota delle celle della batimetria che ricadono all'interno della loro impronta (per le finalità della modellazione la quota edifici è stata imposta a 119 m s.m.).

Per poter fornire una rappresentazione il più possibile aderente all'effettivo assetto di stato attuale dei luoghi, l'analisi dei fabbricati presenti è stata condotta sulla base di foto aerea recente (Google, 2018).

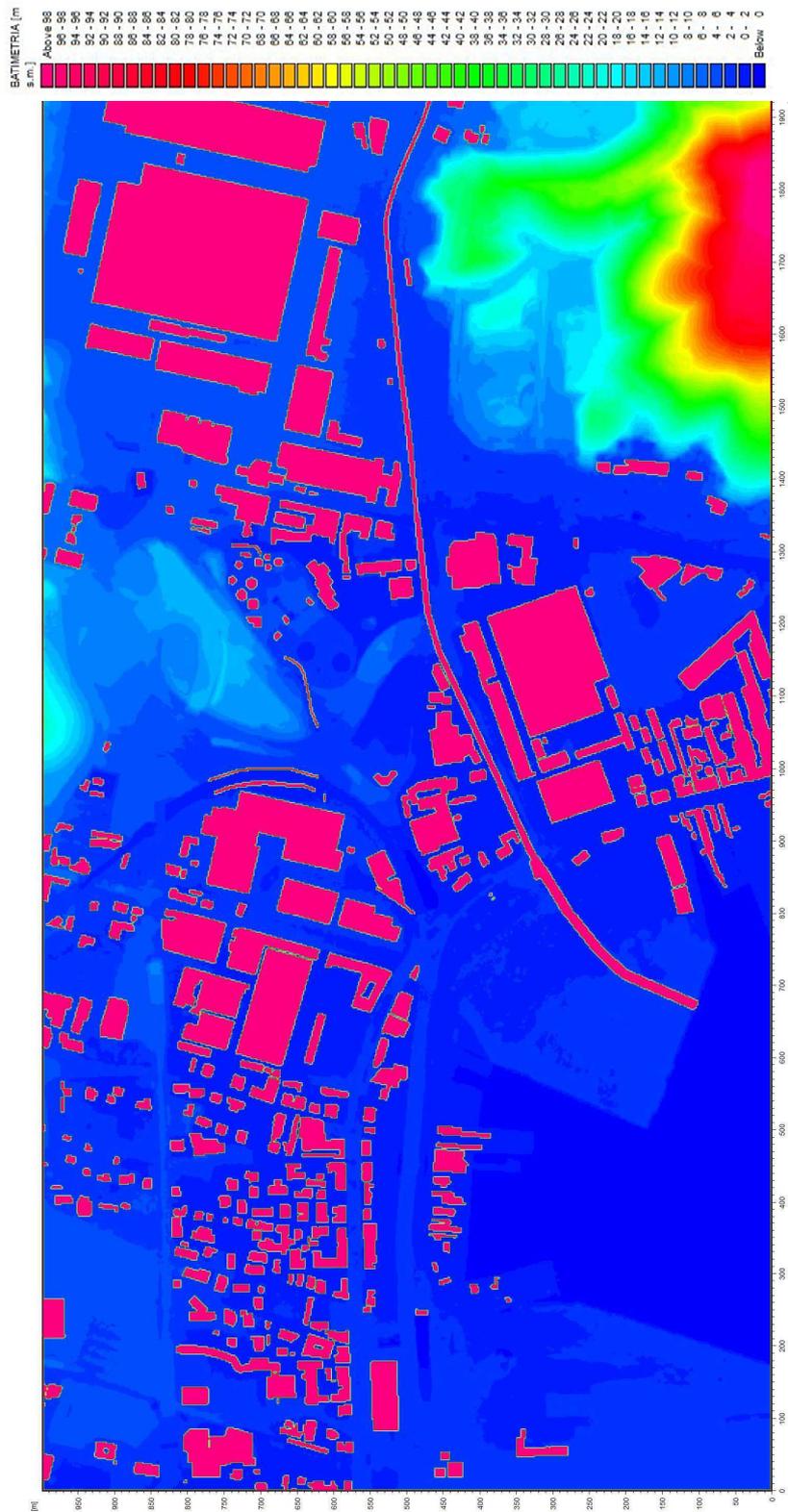


Figura 3 – Batimetria del modello 2D del sistema idrodinamico del fosso Melara a maglia 2,0x2,0 m (dominio di calcolo complessivo).

#### 4. CONDIZIONI AL CONTORNO

Il modello di simulazione, oltre alla descrizione geometrica, necessita della definizione delle condizioni al contorno idrodinamiche e di una serie di parametri quali: passo temporale di integrazione del sistema, coefficiente di resistenza distribuita (scabrezza) e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni di moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dei canali di deflusso. In particolare, la scabrezza imposta nel calcolo idrodinamico è stata differenziata tra alveo inciso (e quindi modellazione monodimensionale) e aree golenali (modellazione bidimensionale).

I sopralluoghi effettuati sull'asta del corso d'acqua e la documentazione progettuale disponibile hanno fornito gli elementi necessari per la definizione dei valori di scabrezza da associare al tratto oggetto di studio. Tali valori sono stati definiti considerando in primis le Norme di Attuazione (NTA) del vigente Piano di Bacino (Tabella 2), e successivamente, come riscontro, valori tipici di riferimento riscontrabili in letteratura tecnica (Tabella 3).

In accordo con i valori prescritti dalle NTA (allegato 3) si è adottato per i modelli monodimensionali un valore del coefficiente di scabrezza  $K_s$  di Gauckler-Strickler pari a 30  $m^{1/3}/s$  lungo i tratti di alveo naturale e di 45  $m^{1/3}/s$  lungo i tratti rivestiti in calcestruzzo, coperti (manufatti di attraversamento viario e ferroviario e tombinature) o a cielo aperto.

Per quanto riguarda l'area esterna all'alveo, modellata con schema bidimensionale, si è provveduto alla differenziazione su due classi di scabrezza in modo da tenere in considerazione la presenza dei principali elementi che possono influenzare la propagazione della piena: linee di deflusso principali (strade), aree urbane pavimentate e aree vegetate. In particolare alle aree vegetate è stato applicato un coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler di 30  $m^{1/3}/s$ , mentre a quelle pavimentate un coefficiente di 50  $m^{1/3}/s$ .

Si precisa a tal proposito come in un modello bidimensionale i coefficienti di scabrezza da considerare risultino normalmente maggiori di circa un 20÷30% di quelli comunemente impiegati nei modelli monodimensionali, per tenere conto del fatto che in un modello 2D sono già in tutto, o almeno in gran parte, direttamente considerati nelle equazioni del moto gli effetti di resistenza secondari indotti dalle condizioni di moto non-monodimensionali (moti trasversali e vorticosi, sinuosità dell'alveo), che nel modello 1D sono invece da includere forfettariamente nel coefficiente di scabrezza.

Descrizione corso d'acqua	Coeff. di scabrezza di Gauckler Strickler $K_s$ [ $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ ]
Tratti di corso d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25 ÷ 30
Corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30 ÷ 35
Tratti urbanizzati di corso d'acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato	35 ÷ 40
Corsi d'acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti (tubi, cavi, ecc.) o discontinuità interferenti con le acque	40 ÷ 45

Tabella 2 – Coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso indicati nelle NTA del vigente Piano di Bacino.

Natura della superficie	Scabrezza omogenea equivalente $\epsilon$ (mm) [mm]	Bazin $\gamma$ [m <sup>1/2</sup> ]	Kutter $m$ [m <sup>1/2</sup> ]	Manning $n$ [m <sup>-1/3</sup> *s]	Gauckler Strickler $K_s$ [m <sup>1/3</sup> *s <sup>-1</sup> ]
Pareti di cemento perfettamente liscio. Pareti di legno piallato. Pareti metalliche, senza risalti nei giunti	0,15 ÷ 0,2	0,06	0,12	0,011	100 ÷ 90
Idem, ma con curve	0,2 ÷ 0,4	0,1	0,18	0,012	90 ÷ 85
Pareti di cemento non perfettamente liscio. Muratura di mattoni molto regolare. Pareti metalliche con chiodatura ordinaria	0,4 ÷ 1,0	0,16	0,20 ÷ 0,25	0,013	85 ÷ 75
Pareti di cemento in non perfette condizioni. Muratura ordinaria più o meno accurata. Pareti di legno grezzo, eventualmente con fessure.	2 ÷ 5	0,23 ÷ 0,36	0,35 ÷ 0,55	0,014 ÷ 0,015	70 ÷ 65
Pareti di cemento solo in parte intonacate; qualche deposito sul fondo. Muratura irregolare (o di pietrame). Terra regolarissima senza vegetazione.	8	0,46	0,55 ÷ 0,75	0,018	60
Terra abbastanza regolare. Muratura vecchia, in condizione non buone, con depositi di limo al fondo.	15 ÷ 30	0,60 ÷ 0,85	0,75 ÷ 1,25	0,020 ÷ 0,022	50
Terra con erba sul fondo. Corsi d'acqua naturali regolari.	70	1,30	1,50	0,025	40
Terra in cattive condizioni. Corsi d'acqua naturale con ciottoli e ghiaia.	120 ÷ 200	1,75	2,00	0,030	35
Canali in abbandono con grande vegetazione. Corsi d'acqua con alveo in ghiaia e movimento di materiale sul fondo, oppure scavati in roccia con sporgenze.	300 ÷ 400	2,0 ÷ 2,3	3,00	0,035	30

**Tabella 3 – Valori tipici di riferimento da letteratura tecnica dei coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso.**

Come passo temporale di integrazione è stato necessario utilizzare, per ragioni di stabilità numerica legate al numero di Courant della corrente, un valore pari a 0,25 secondi.

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di eddy viscosity. Nei casi in esame al coefficiente è stato assegnato un valore costante pari a 1,0 m<sup>2</sup>/s sull'intera estensione del modello; tale parametro risulta comunque di minore rilevanza in quanto simulando deflussi di esondazione con scorrimento superficiale gli aspetti legati alla formazione di vortici sono senza dubbio trascurabili rispetto ai prevalenti termini di resistenza idraulica al moto per attrito sul fondo e presenza di ostacoli.

Le condizioni al contorno imposte sono costituite da input di portata a monte e internamente al modello e da una condizione di valle rappresentata dal livello di mare.

Per il modello del Melara l'analisi idraulica è stata svolta in funzione degli scenari idrologici caratterizzati da tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni, i cui idrogrammi di piena sono stati assegnati in modo concentrato o

distribuito nelle sezioni di chiusura dei sottobacini contribuenti significativi, in relazione all'estensione dei tratti di corso d'acqua simulati (v. elaborato 3636-03-00100 - *Analisi idrologica*);

La condizione idrodinamica di valle per i tutti gli scenari simulati, sia con i modelli accoppiati che puramente bidimensionali, è costituita dal livello idrico massimo di mare riferibile a un evento di mareggiata con determinato tempo di ritorno (generalmente inferiore a quello di verifica idraulica del corso d'acqua, trattandosi di eventi non correlati, così da non sovrapporre eventi a bassa probabilità di accadimento).

L'effetto di sovrizzo del livello di medio mare all'occorrere di un evento meteomarinico intenso è generalmente dato dalla somma dei seguenti fenomeni:

- la marea astronomica;
- la variazione del livello di medio mare dovuto alle condizioni di tempesta (storm surge), eventualmente suddivisibile tra la componente attribuibile al vento (wind set-up) e quella relativa alle variazioni di pressione atmosferica (barometro inverso);
- il sovrizzo dovuto al frangimento (wave set-up).

Il Melara sbocca nel Golfo di La Spezia, protetto all'imbocco da una diga foranea e con morfologia tale da modificare localmente (attutendolo) l'effetto di sovrizzo.

Nella quasi totalità degli studi pregressi acquisiti per le finalità del presente studio, e particolarmente in quelli predisposti per l'Autorità Portuale, è definito un medesimo valore di riferimento per il livello idrico massimo da assumere all'interno del Golfo, che risulta pari a **0,50 m s.m.** Tale valore (assunto costante per tutti i tempi di ritorno indagati) è stato anche adottato, per coerenza, nell'ambito del presente studio.

#### **4.1 Scenari per tempo di ritorno assegnato sul sistema idrodinamico del Melara**

In questi scenari, simulati con il modello accoppiato 1D+2D, sono stati assegnati in input lungo le aste fluviali costituenti il sistema idrodinamico del Melara gli idrogrammi per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni generati dai sottobacini elementari definiti nell'analisi idrologica. Nelle simulazioni idrodinamiche eseguite i valori al colmo, la forma ed il volume di tali idrogrammi si modificano lungo la loro propagazione lungo le aste, principalmente in ragione dei fenomeni di esondazione verso le aree esterne all'alveo.

Per le finalità della rappresentazione modellistica è necessario far incrementare le portate inserite in testa ai rami modellizzati in modo da ottenere all'estremità di valle un idrogramma teorico congruente con quello definito per tali sezioni idrologiche (considerando i tempi di traslazione dell'onda e al netto di eventuali volumi fuoriusciti per esondazione laterale). Sono stati pertanto definiti degli idrogrammi caratterizzanti il bacino residuo che sommati a quelli di input a monte potessero restituire quello calcolato per le sezioni di valle, non considerando gli effetti di modificazione della forma d'onda di cui sopra, ma ipotizzando una traslazione rigida dell'idrogramma in input.

- Condizioni al contorno sull'asta di levante del fosso Melara:
  - portate in ingresso nella sezione di monte (sezione 1) secondo l'idrogramma di riferimento generato dal bacino afferente ME-B per gli scenari a tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni. Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 5,38 m<sup>3</sup>/s, 6,40 m<sup>3</sup>/s, 7,07 m<sup>3</sup>/s;

- portate per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni generate del bacino residuo (compreso tra le sezioni di chiusura idrologiche ME-B e ME-A), determinate secondo il criterio descritto in precedenza e assegnate nel modello idrodinamico come uniformemente distribuite nel tratto d'asta compreso tra le sezioni trasversali 11 e 26 (che coincidono rispettivamente con lo sbocco della tombinatura ME\_C2 e il filo di monte dell'attraversamento ad arco ME\_P1), funzionali a ottenere, nella sovrapposizione teorica senza effetti di laminazione, i valori al colmo nella sezione idrologica ME-A rispettivamente pari a 13,46 m<sup>3</sup>/s, 16,26 m<sup>3</sup>/s, 18,10 m<sup>3</sup>/s.
- Condizione al contorno sull'asta di ponente del Melara, confluyente a valle della linea ferroviaria: portate in ingresso nella sezione di monte del modello (sezione 34) secondo l'idrogramma di riferimento generato dal bacino afferente ME\_C per gli scenari a tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni. In considerazione della limitata capacità di deflusso del tombino a monte del tratto modellizzato, tale portata è stata suddivisa al 70% sul presente ramo e al 30% sulla sua prosecuzione sul lato di monte (Est) della linea ferroviaria. Le portate al colmo assegnate al presente ramo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 4,19 m<sup>3</sup>/s, 4,96 m<sup>3</sup>/s, 5,48 m<sup>3</sup>/s.
- Condizione al contorno sull'asta del fosso minore che confluisce da destra a monte della linea ferroviaria: portate in ingresso nella sezione di monte del modello (sezione 34) pari al 30% dell'idrogramma di riferimento generato dal bacino afferente ME\_C per gli scenari a tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni. Le portate al colmo assegnate per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 1,79 m<sup>3</sup>/s, 2,13 m<sup>3</sup>/s, 2,35 m<sup>3</sup>/s.
- Condizione al contorno sull'asta del Fossamastra assegnata in termini di portata costante di valore trascurabile (0,2 m<sup>3</sup>/s per tutti gli eventi simulati); questa condizione corrisponde a una configurazione di alveo pressoché asciutto del Fossamastra e quindi tale da poter trasferire a mare l'eventuale portata di esondazione in arrivo dal Melara. Si trascura cioè l'eventuale prosecuzione dell'esondazione a valle del Fossamastra, per sormonto della sponda Sud, che potrebbe avvenire in caso di canale già pieno: sia per non sovrapporre gli eventi di piena dei due bacini, caratterizzati da tempi di corrivazione piuttosto differenti, sia perché l'esondazione dal canale Fossamastra (relativa a portate di un ordine di grandezza maggiori di quelle del Melara) è già compiutamente descritta nella relativa analisi idraulica (elaborato 3636-04-00300).
- Condizione al contorno di valle in corrispondenza della foce nel mar Ligure sull'asta del Melara e del Fossamastra: livello idrico costante durante tutta la durata dell'evento di valore pari a 0,50 m s.m.
- Condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE11 e MIKE21: in corrispondenza di tutte le celle lungo la sponda destra e sinistra dei tratti scoperti degli alvei del Melara e affluenti e del Fossamastra; in questi collegamenti vengono applicate le equazioni tipiche dello stramazzo a larga soglia, con le quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello bidimensionale e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni dell'alveo del modello monodimensionale opportunamente interpolate.

A titolo di esempio si riportano nella seguente Figura 4 gli idrogrammi idrologici per tempo di ritorno 200 anni, assegnati in input lungo le aste fluviali del sistema idrodinamico del Melara.

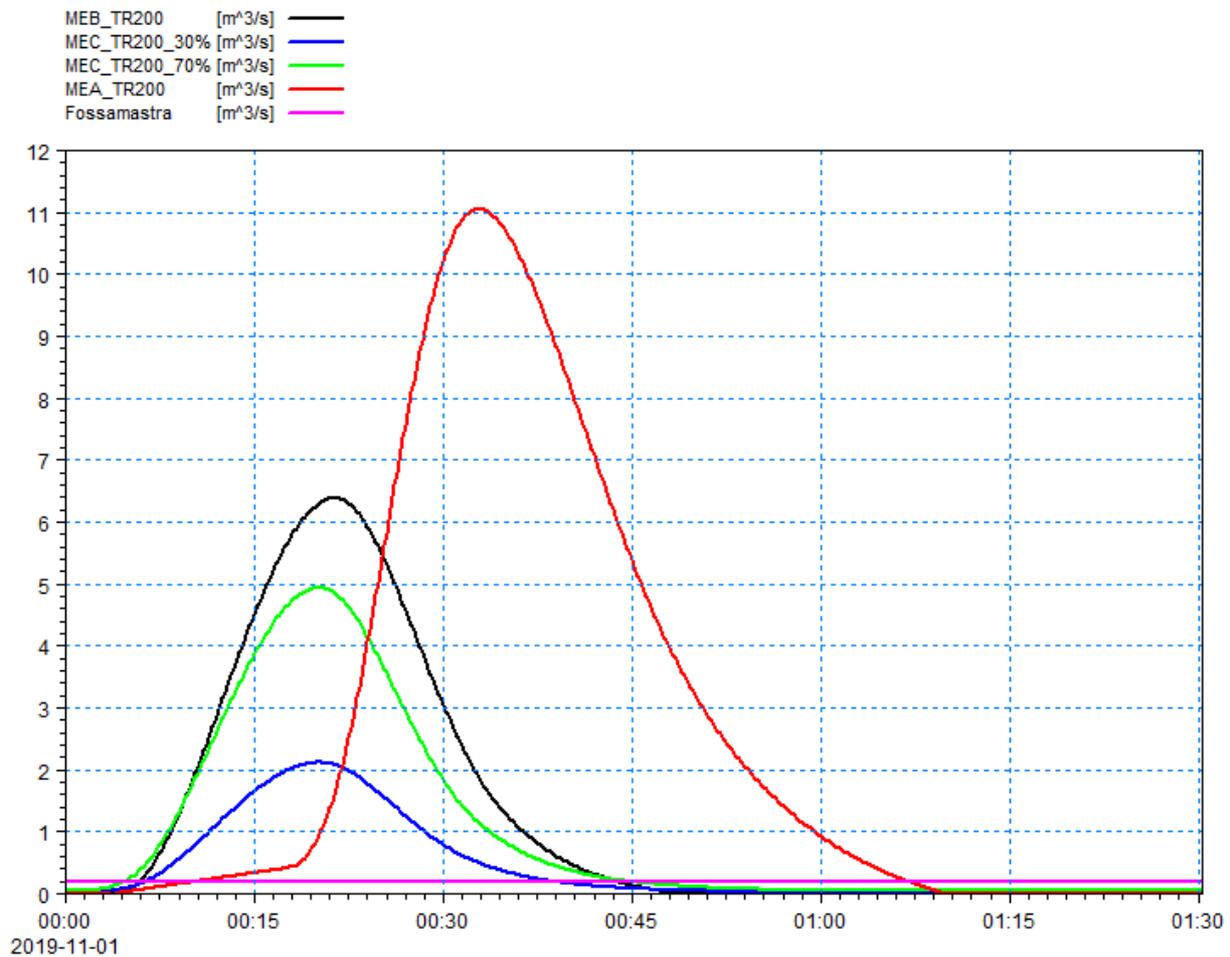


Figura 4 – Idrogrammi in input sulle aste fluviali del modello del Melara per tempo di ritorno 200 anni.

## 5. RISULTATI

I risultati delle simulazioni effettuate con i modelli integrati mono-bidimensionali sono illustrati nei capitoli seguenti mediante l'ausilio di rappresentazioni grafiche esplicative quali:

- mappe delle aree di esondazione con rappresentazione dei valori massimi di inviluppo delle altezze idriche e velocità sul piano campagna;
- profili longitudinali di inviluppo dei massimi livelli idrici lungo l'alveo inciso dei corsi d'acqua.

I parametri idraulici non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici monodimensionali (quali attraversamenti, tombini o salti di fondo); per queste si fa riferimento alla sezione immediatamente a monte (con riferimento alla quale, ad esempio, vengono definiti il livello idrico e il carico cinetico per la valutazione del franco idraulico di un attraversamento).

Non sono restituiti i risultati sulle sezioni interpolate (introdotte unicamente per migliorare l'integrazione delle equazioni del moto ottimizzando il passo spaziale).

I risultati esposti fanno riferimento ai seguenti 3 scenari di simulazione:

- TR50 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 50 anni;
- TR200 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni;
- TR500 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 500 anni.

## 5.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)

Nella Tabella 4 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del sistema idrodinamico del Melara (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 5, Figura 6 e Figura 7 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
		-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m <sup>3</sup> /s	m/s	-
Melara		1	0,00	1,25	1,46	2,71	2,73	5,36	0,69	0,18
Melara		2	4,99	1,20	1,51	2,71	2,73	5,34	0,68	0,18
Melara		3	24,38	0,74	1,97	2,71	2,73	4,73	0,59	0,14
Melara		4	37,04	0,55	2,16	2,71	2,71	0,69	0,10	0,02
Melara	imbocco ME_C1	5	44,47	0,53	2,18	2,71	2,71	4,43	0,28	0,06
Melara	ME_C1	6	94,63	0,36	2,07	2,43	2,53	4,43	1,40	0,31
Melara	sbocco ME_C1	7	152,30	0,18	2,11	2,29	2,39	4,43	1,40	0,31
Melara	imbocco ME_C2	8	157,80	0,16	2,13	2,29	2,35	4,43	1,04	0,23
Melara	ME_C2	9	175,64	0,10	2,19	2,29	2,34	4,43	1,01	0,22
Melara	sbocco ME_C2	10	195,23	0,04	2,24	2,28	2,33	4,43	0,99	0,21
Melara		11	208,96	-0,01	2,29	2,28	2,32	4,43	0,92	0,20
Melara		12	241,74	-0,11	2,38	2,27	2,31	4,44	0,85	0,18
Melara		13	257,46	-0,16	2,43	2,27	2,30	4,44	0,82	0,17
Melara		14	287,91	-0,26	2,52	2,26	2,29	4,44	0,76	0,15
Melara	imbocco ME_C3.1	14.1	309,41	-0,33	2,58	2,25	2,28	4,44	0,73	0,15
Melara	ME_C3.1	15	311,41	-0,34	2,59	2,25	2,28	4,45	0,77	0,15
Melara	sbocco ME_C3.1	16	341,38	-0,43	2,65	2,22	2,26	4,45	0,84	0,16
Melara	imbocco ME_C3.2	17	346,51	-0,45	2,67	2,22	2,23	4,45	0,53	0,10
Melara	sbocco ME_C3.2	18	376,77	-0,45	2,66	2,21	2,22	4,45	0,53	0,10
Melara	imbocco ME_C3.3	19	380,92	-0,45	2,66	2,21	2,22	4,58	0,44	0,09
Melara	sbocco ME_C3.3	20	402,54	-0,45	2,65	2,20	2,21	4,56	0,43	0,09
Melara	inizio vasca	21	403,93	-0,45	2,65	2,20	2,21	4,61	0,50	0,10
Melara	fine vasca	22	410,85	-0,45	2,64	2,19	2,20	4,62	0,50	0,10
Melara	imbocco ME_C4	22.1	411,56	-0,45	2,64	2,19	2,20	4,83	0,52	0,10
Melara	ME_C4	23	412,56	-0,45	2,59	2,14	2,18	4,85	0,91	0,18
Melara	sbocco ME_C4	24	557,75	-0,52	1,50	0,98	1,34	6,68	2,65	0,69

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
		-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m <sup>3</sup> /s	m/s	-
Melara		25	566,82	-0,53	1,37	0,84	0,89	7,02	1,00	0,27
Melara		26	586,66	-0,53	1,33	0,80	0,86	7,25	1,06	0,29
Melara	monte ME_P1	27	606,22	-0,54	1,31	0,77	0,83	7,25	1,07	0,30
Melara	valle ME_P1	28	613,17	-0,55	1,22	0,67	0,74	7,25	1,16	0,33
Melara	imbocco ME_C5	29	620,38	-0,55	1,23	0,68	0,71	7,25	0,74	0,21
Melara	ME_C5	30	659,55	-0,62	1,26	0,64	0,67	7,25	0,72	0,20
Melara	ME_C5	31	708,16	-0,71	1,33	0,62	0,64	7,26	0,68	0,19
Melara	ME_C5	32	741,98	-0,77	1,36	0,59	0,61	7,26	0,67	0,18
Melara	sbocco ME_C5	33	870,50	-1,01	1,51	0,50	0,52	7,26	0,60	0,16
Affluente dx a monte ferrovia		34	0,00	0,50	1,71	2,21	2,22	1,78	0,43	0,10
Affluente dx a monte ferrovia		35	27,34	0,47	1,74	2,21	2,22	1,77	0,48	0,12
Affluente dx a monte ferrovia		36	70,46	0,42	1,79	2,21	2,22	1,73	0,31	0,08
Affluente dx a monte ferrovia		37	105,84	0,39	1,82	2,21	2,22	1,68	0,33	0,08
Affluente dx a monte ferrovia		38	139,44	0,35	1,86	2,21	2,21	1,61	0,28	0,06
Affluente dx a monte ferrovia	afflusso in vasca imbocco manufatto ME_C3.3	39	152,39	-0,45	2,66	2,21	2,21	1,45	0,13	0,03
Melara di ponte a valle ferrovia		34	0,00	0,50	1,69	2,19	2,21	4,16	0,60	0,15
Melara di ponte a valle ferrovia		35	24,99	0,47	1,72	2,19	2,20	3,88	0,51	0,12
Melara di ponte a valle ferrovia		36	64,26	0,43	1,76	2,19	2,20	3,26	0,34	0,08
Melara di ponte a valle ferrovia		37	97,10	0,40	1,79	2,19	2,20	2,63	0,34	0,08
Melara di ponte a valle ferrovia		38	128,23	0,36	1,83	2,19	2,19	2,07	0,28	0,07
Melara di ponte a valle ferrovia		39	140,40	0,35	1,84	2,19	2,19	1,96	0,24	0,06
Melara di ponte a valle ferrovia	afflusso in vasca sbocco manufatto ME_C3.3	40	155,58	-0,45	2,64	2,19	2,19	1,83	0,17	0,03

**Tabella 4 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.**

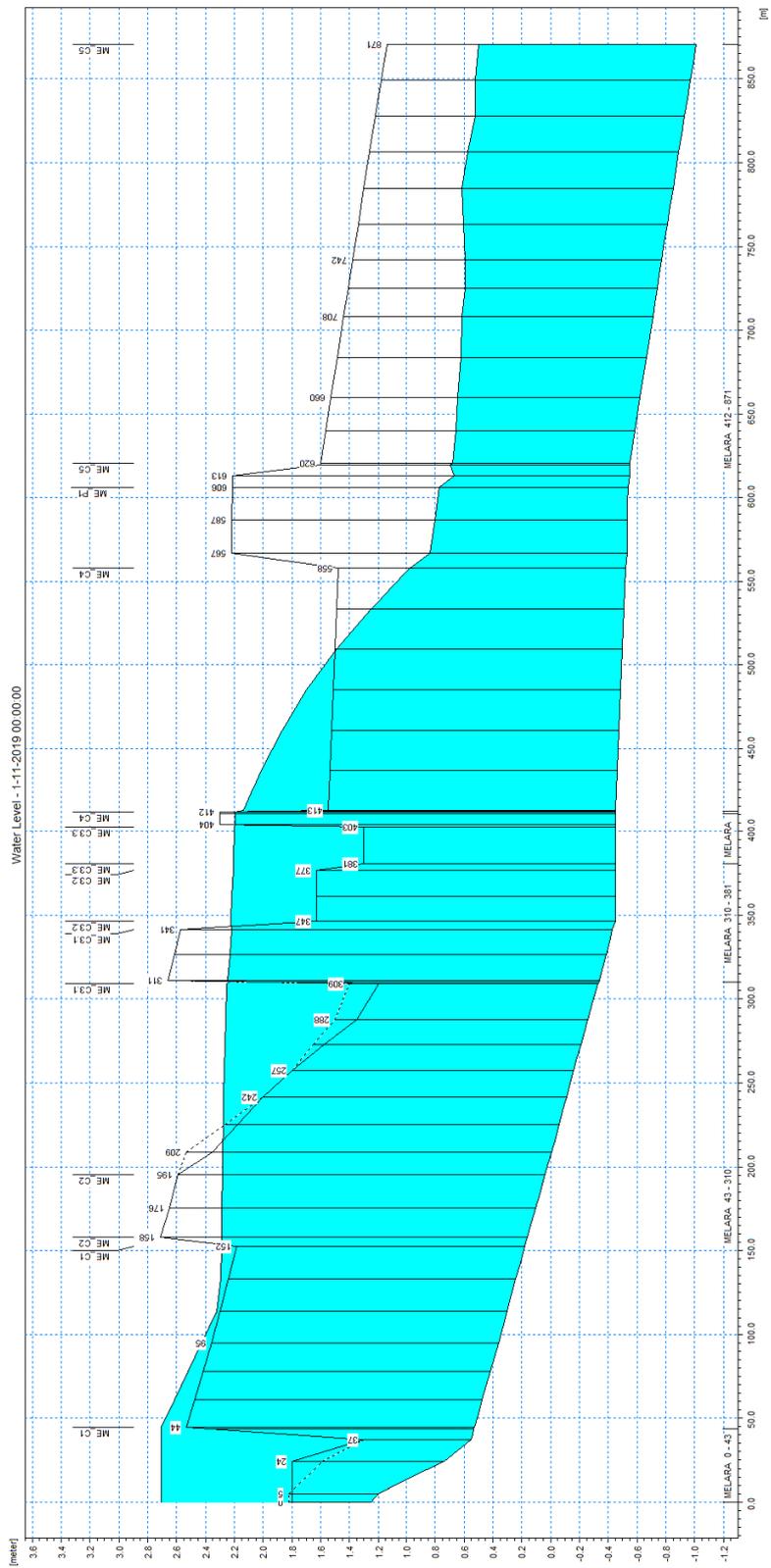


Figura 5 – Profilo longitudinale di corrente del ramo di levante del fosso Melara (TR50).

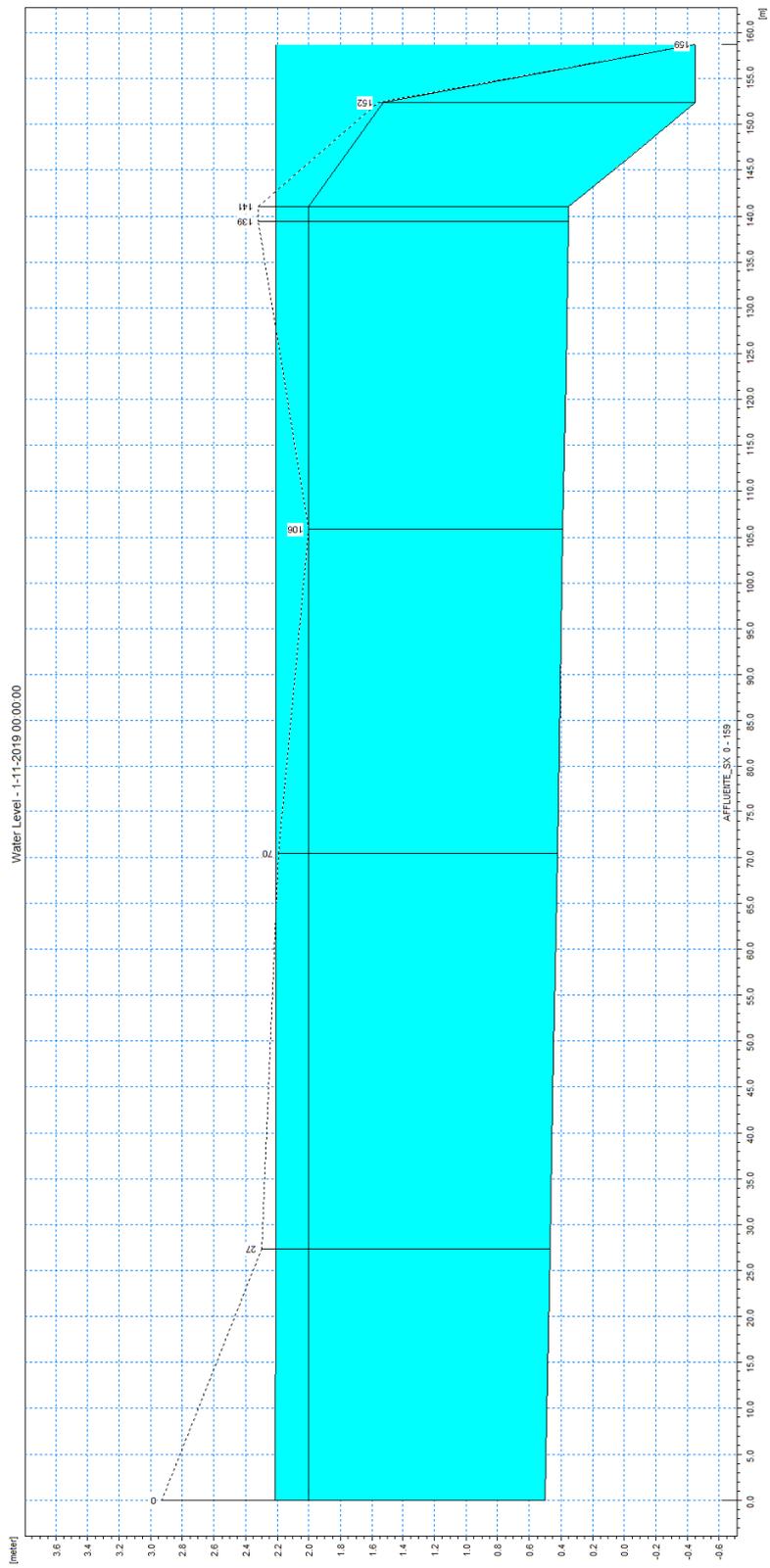


Figura 6 – Profilo longitudinale di corrente del fosso affluente in destra a monte ferrovia (TR50).

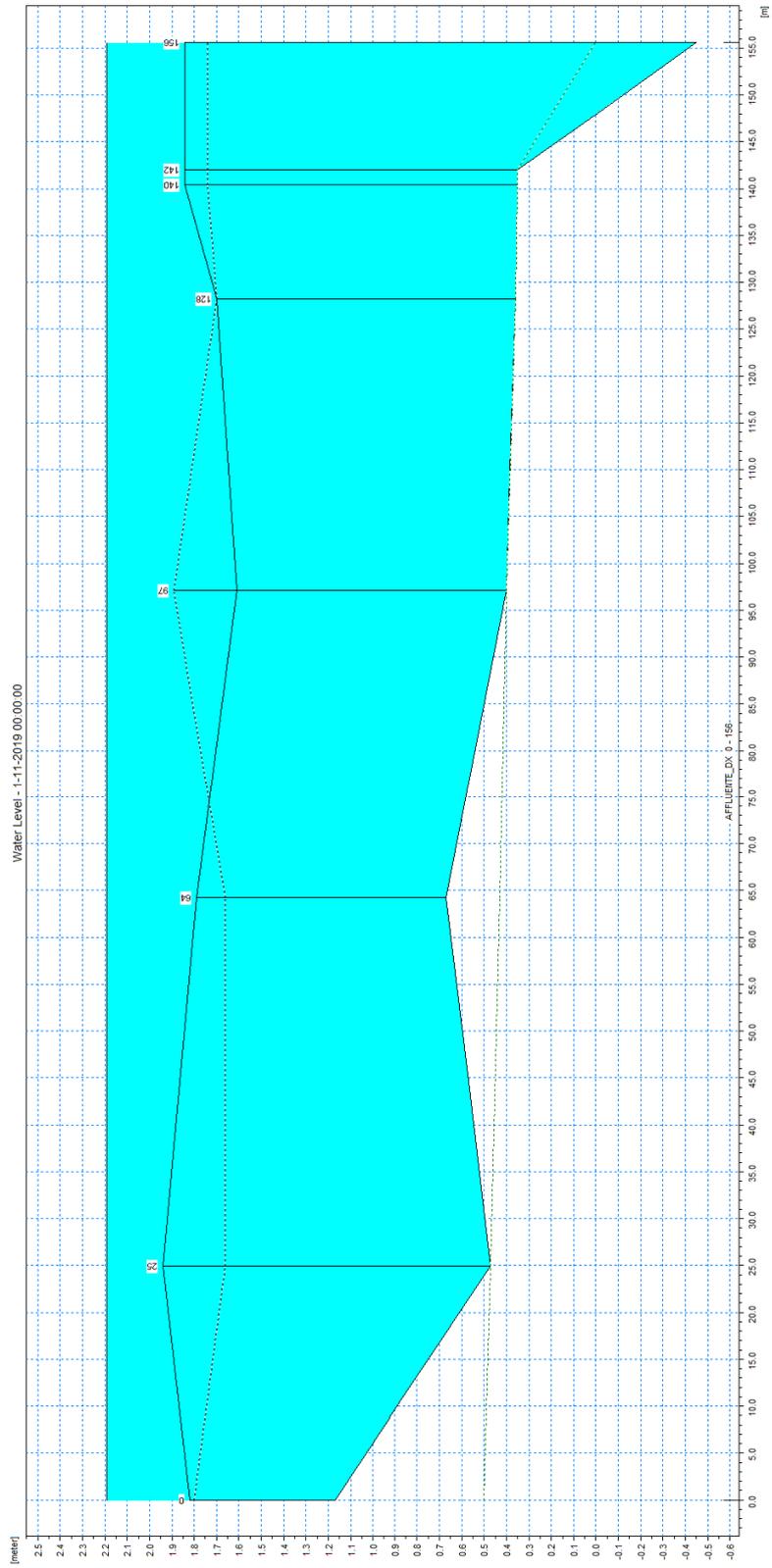


Figura 7 – Profilo longitudinale di corrente del ramo di ponente del Melara, affluente a valle ferrovia (TR50).

Per il fosso Melara si può riscontrare come tutti i tratti di tombinatura presenti siano significativamente inadeguati idraulicamente, ad eccezione di quello al di sotto dell'area portuale (da viale S. Bartolomeo a valle).

Un elemento generale di criticità di tutto il tratto è costituito dalle limitatissime pendenze longitudinali: l'imbocco della tombinatura a inizio modello ha una quota di fondo circa pari al livello di mare imposto come condizione di valle (circa 0,5 m s.m.). Più a valle, l'intero tratto sistemato dall'imbocco dell'attraversamento della A15 fino allo sbocco di quello ferroviario ha un fondo orizzontale posto a quota -0,45 m s.m.; lo sbocco a mare si ha con fondo a quota -1,0 m s.m.

Tale inadeguatezza induce esondazioni diffuse nelle aree oggetto di simulazione.

- Nel tratto a cielo aperto a monte del tombino al di sotto dell'impianto di depurazione si riscontrano fuoriuscite di portata rilevanti, a causa sia della modesta capacità di smaltimento del manufatto, sia a fenomeni di rigurgito da valle (nodo di confluenza dei diversi rami presso l'attraversamento ferroviario). La portata esondata allaga via degli Stagnoni propagandosi nell'area produttiva prevalentemente verso Sud, fino a riversarsi nell'alveo del Canale Fossamastra, giungendo anche a lambire l'area dello stabilimento industriale Leonardo, nel cui perimetro entra (marginalmente) attraverso il varco di accesso in via privata OTO.  
L'esondazione si attesta contro il rilevato dell'autostrada A15 della Cisa. Gli allagamenti circondano l'area del depuratore, posta a quota più elevata, interessando solo una porzione limitata a Nord, e rientrano parzialmente in alveo a valle dello sbocco della tombinatura. Parte della portata esondata rientra anche in alveo nel tratto a cielo aperto su via degli Stagnoni, al decrescere dei livelli idrici di valle.
- Nel tratto d'alveo a cielo aperto a monte della A15 i livelli idrici sono maggiori delle quote di sponda della sezione rivestita, ma a causa delle ripide scarpate in terra soprastanti gli allagamenti sono piuttosto limitati.
- A valle della A15 si ha l'attraversamento ferroviario, realizzato mediante tre canne parallele; a valle di esso si ha la confluenza del ramo di ponente del Melara, a monte quella del fosso minore (continuazione del ramo di levante a valle del tombino posto più a monte). Questo nodo risulta fortemente critico in quanto nettamente rigurgitato dalla tubazione di uscita (ME\_C4) dalla "vasca di calma" a valle dell'attraversamento. Si tratta in particolare di un collettore circolare di diametro 1,80 m, decisamente inferiore come capacità di deflusso alle sezioni di monte.  
Il carico idraulico che si instaura a monte di esso risulta superiore alle quote di sponda dei canali che si sviluppano su entrambi i lati della linea ferroviaria, provocando l'allagamento del piano dei binari. In virtù delle limitate pendenze tale allagamento si estende anche a monte fino a via Carducci, mentre a valle defluirebbe verso sinistra andando a invadere anche la galleria subalvea (tale analisi non considera la presenza di muri perimetrali in quanto non è nota la loro adeguatezza a contenere i livelli idrici di piena).

Nel tratto a valle dell'area artigianale la portata residua (ridotta a causa delle esondazioni di monte a un colmo di circa 7,3 m<sup>3</sup>/s rispetto al valore idrologico di circa 13,5 m<sup>3</sup>/s) è contenuta nell'alveo e transita attraverso il ponticello ad arco al di sotto della ferrovia e nella tombinatura di attraversamento dell'area portuale senza generare un funzionamento in pressione, con franchi idraulici compresi tra 0,7 m e 1,0 m (il valore minore è indotto, nella sezione terminale, dal livello idrico imposto a valle).

In Figura 8 sono rappresentati gli idrogrammi di portata osservati nel corso dell'evento simulato in alcune sezioni significative del modello monodimensionale sull'asta del ramo di levante del Melara, che evidenziano i rilevanti effetti indotti dai fenomeni di esondazione.

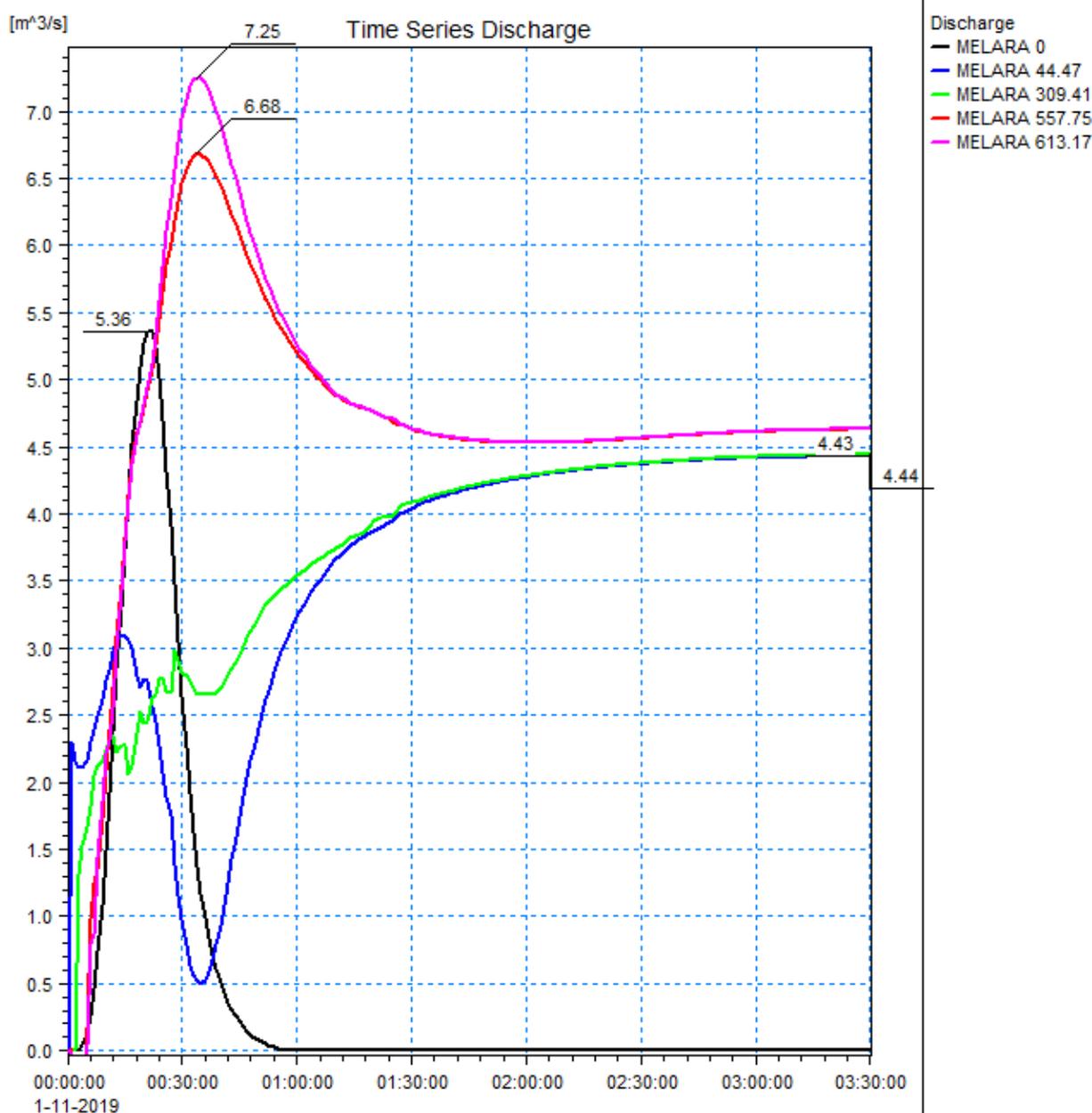


Figura 8 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul fosso Melara.

A fronte dell'idrogramma immesso nella sezione di monte (linea nera), l'andamento nel tempo delle portate che defluiscono nella tombinatura al di sotto dell'area del depuratore (linea blu) mostrano un picco quasi dimezzato, una successiva riduzione dovuta al contestuale innalzamento dei livelli di valle, e infine - al riabbassarsi di questi ultimi - una nuova crescita della portata smaltita conseguente al rientro di parte dei

volumi esondati e al contributo dell'idrogramma distribuito assegnato lungo il tratto simulato (analogo per TR50 alla curva rossa -relativa a TR200- in Figura 4).

Analogo comportamento si riscontra a monte dell'imbocco dell'attraversamento della A15 (linea verde), con minore riduzione della portata smaltibile per la possibilità di generare un maggiore carico idraulico sull'imbocco del manufatto.

La curva rossa rappresenta la portata che defluisce nella tubazione ME\_C4 in uscita dalla vasca di calma (valore massimo di circa 6,7 m<sup>3</sup>/s). La portata massima recapitata a mare (attraverso il tratto terminale tombinato) è un poco maggiore (linea fucsia) a causa dell'ulteriore contributo distribuito che viene considerato confluire in alveo nel tratto a cielo aperto.

In Figura 9 e Figura 10 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno cinquantennale. Le aree interne all'alveo inciso non sono rappresentate perché il loro contributo al deflusso viene considerato nell'ambito del modello MIKE11.

In Figura 9 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 10 la colorazione blu indica le velocità minori mentre quella rossa le maggiori.

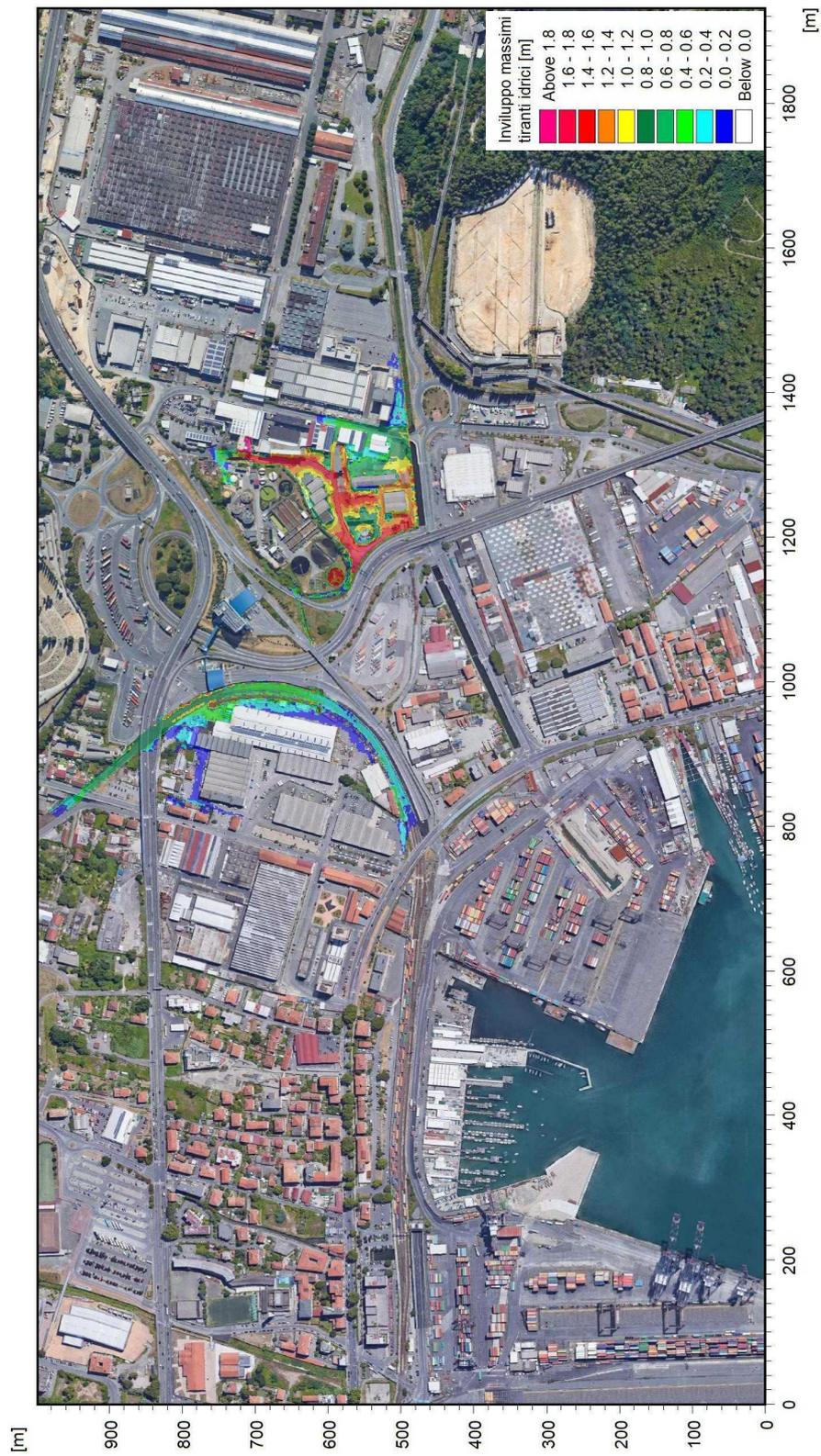


Figura 9 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=50 anni.

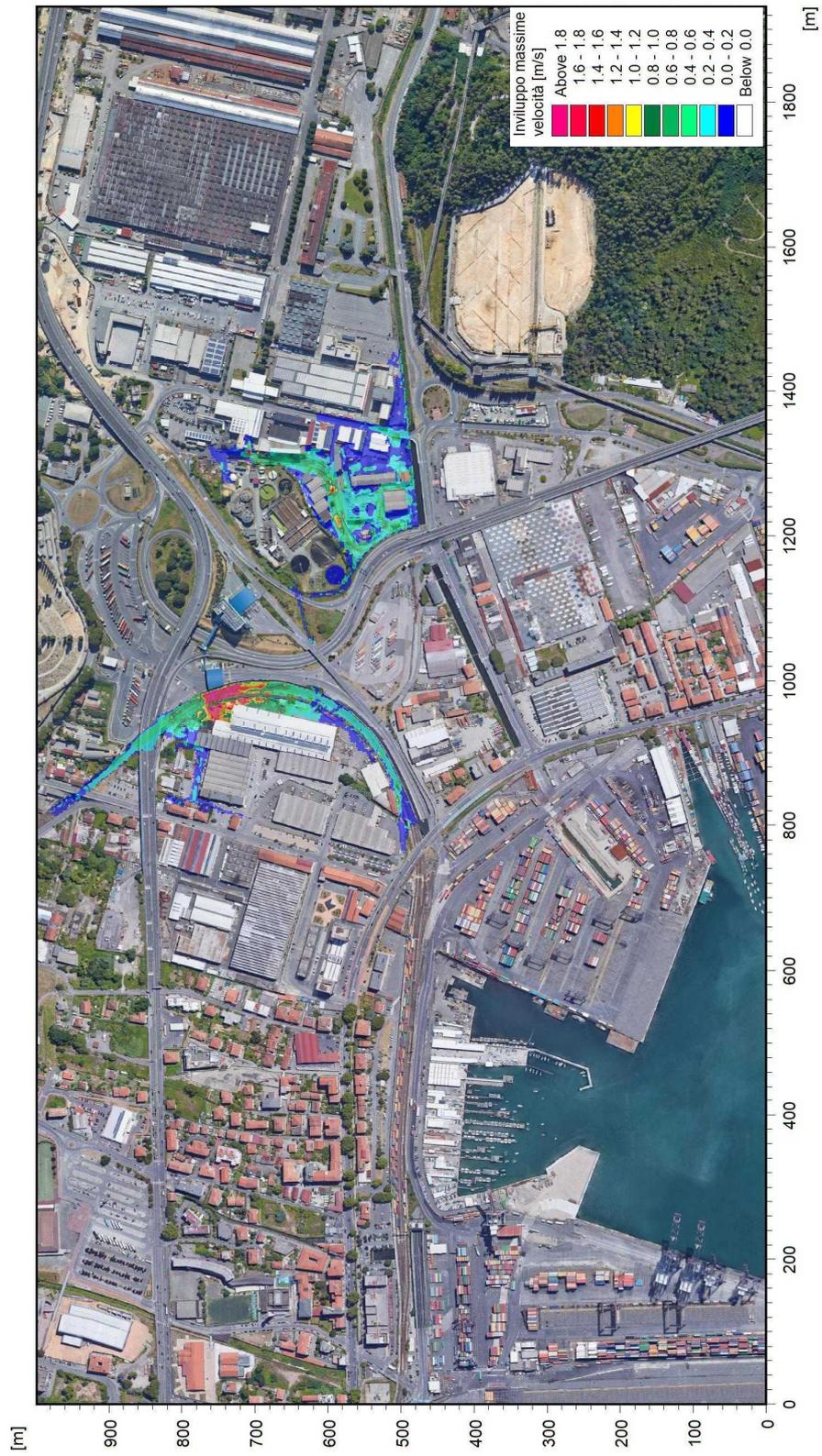


Figura 10 – Distribuzione involuppo delle massime velocità di flusso per TR=50 anni.

## 5.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)

Nella Tabella 5 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del sistema idrodinamico del Melara (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come involucro dei valori massimi.

In Figura 11, Figura 12 e Figura 13 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m <sup>3</sup> /s	m/s	-
Melara		1	0,00	1,25	1,48	2,73	2,76	6,38	0,80	0,21
Melara		2	4,99	1,20	1,53	2,73	2,76	6,35	0,79	0,20
Melara		3	24,38	0,74	1,99	2,73	2,76	5,75	0,71	0,16
Melara		4	37,04	0,55	2,18	2,73	2,73	1,12	0,15	0,03
Melara	imbocco ME_C1	5	44,47	0,53	2,20	2,73	2,73	4,53	0,28	0,06
Melara	ME_C1	6	94,63	0,36	2,08	2,44	2,54	4,53	1,43	0,32
Melara	sbocco ME_C1	7	152,30	0,18	2,20	2,38	2,48	4,53	1,42	0,31
Melara	imbocco ME_C2	8	157,80	0,16	2,22	2,38	2,43	4,53	1,02	0,22
Melara	ME_C2	9	175,64	0,10	2,28	2,38	2,43	4,53	1,00	0,21
Melara	sbocco ME_C2	10	195,23	0,04	2,34	2,38	2,43	4,53	0,97	0,20
Melara		11	208,96	-0,01	2,38	2,37	2,41	4,53	0,90	0,19
Melara		12	241,74	-0,11	2,48	2,37	2,40	4,53	0,82	0,17
Melara		13	257,46	-0,16	2,52	2,36	2,39	4,53	0,79	0,16
Melara		14	287,91	-0,26	2,61	2,35	2,38	4,52	0,73	0,15
Melara	imbocco ME_C3.1	14.1	309,41	-0,33	2,68	2,35	2,38	4,52	0,71	0,14
Melara	ME_C3.1	15	311,41	-0,34	2,68	2,34	2,37	4,52	0,76	0,15
Melara	sbocco ME_C3.1	16	341,38	-0,43	2,74	2,31	2,34	4,52	0,82	0,16
Melara	imbocco ME_C3.2	17	346,51	-0,45	2,77	2,32	2,34	4,52	0,54	0,10
Melara	sbocco ME_C3.2	18	376,77	-0,45	2,74	2,29	2,31	4,70	0,56	0,11
Melara	imbocco ME_C3.3	19	380,92	-0,45	2,74	2,29	2,30	4,98	0,47	0,09
Melara	sbocco ME_C3.3	20	402,54	-0,45	2,74	2,29	2,30	4,88	0,46	0,09
Melara	inizio vasca	21	403,93	-0,45	2,73	2,28	2,29	4,89	0,51	0,10
Melara	fine vasca	22	410,85	-0,45	2,73	2,28	2,29	4,97	0,52	0,10
Melara	imbocco ME_C4	22.1	411,56	-0,45	2,73	2,28	2,29	4,90	0,51	0,10
Melara	ME_C4	23	412,56	-0,45	2,68	2,23	2,27	4,96	0,93	0,18
Melara	sbocco ME_C4	24	557,75	-0,52	1,55	1,03	1,41	7,16	2,74	0,70
Melara		25	566,82	-0,53	1,41	0,88	0,94	7,58	1,04	0,28
Melara		26	586,66	-0,53	1,38	0,85	0,91	7,87	1,11	0,30
Melara	monte ME_P1	27	606,22	-0,54	1,35	0,81	0,87	7,87	1,13	0,31
Melara	valle ME_P1	28	613,17	-0,55	1,24	0,69	0,77	7,87	1,23	0,35
Melara	imbocco ME_C5	29	620,38	-0,55	1,25	0,70	0,73	7,87	0,79	0,22
Melara	ME_C5	30	659,55	-0,62	1,28	0,66	0,69	7,87	0,77	0,22
Melara	ME_C5	31	708,16	-0,71	1,33	0,62	0,65	7,87	0,74	0,20
Melara	ME_C5	32	741,98	-0,77	1,36	0,59	0,62	7,87	0,72	0,20
Melara	sbocco ME_C5	33	870,50	-1,01	1,51	0,50	0,52	7,88	0,65	0,17

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m <sup>3</sup> /s	m/s	-
Affluente dx a monte ferrovia		34	0,00	0,50	1,80	2,30	2,31	2,12	0,48	0,11
Affluente dx a monte ferrovia		35	27,34	0,47	1,83	2,30	2,31	2,07	0,53	0,12
Affluente dx a monte ferrovia		36	70,46	0,42	1,88	2,30	2,31	2,01	0,34	0,08
Affluente dx a monte ferrovia		37	105,84	0,39	1,91	2,30	2,31	1,96	0,36	0,08
Affluente dx a monte ferrovia		38	139,44	0,35	1,95	2,30	2,30	1,86	0,30	0,07
Affluente dx a monte ferrovia	afflusso in vasca imbocco manufatto ME_C3.3	39	152,39	-0,45	2,75	2,30	2,30	1,64	0,14	0,03
Melara di ponente a valle ferrovia		34	0,00	0,50	1,78	2,28	2,30	4,94	0,66	0,16
Melara di ponente a valle ferrovia		35	24,99	0,47	1,81	2,28	2,30	4,56	0,55	0,13
Melara di ponente a valle ferrovia		36	64,26	0,43	1,85	2,28	2,29	3,47	0,34	0,08
Melara di ponente a valle ferrovia		37	97,10	0,40	1,88	2,28	2,29	2,71	0,33	0,08
Melara di ponente a valle ferrovia		38	128,23	0,36	1,92	2,28	2,28	2,16	0,27	0,06
Melara di ponente a valle ferrovia		39	140,40	0,35	1,93	2,28	2,28	2,01	0,23	0,05
Melara di ponente a valle ferrovia	afflusso in vasca sbocco manufatto ME_C3.3	40	155,58	-0,45	2,73	2,28	2,28	1,86	0,16	0,03

**Tabella 5 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.**

Il deflusso della portata duecentennale induce esondazioni diffuse in corrispondenza delle medesime aree per cui si è riscontrato allagamento in occasione dell'evento cinquantennale. Esse sono solo poco più estese di queste ultime, soprattutto in relazione al fatto che la gran parte della maggior portata in arrivo da monte (nel ramo di levante) esonda a monte del tombino al di sotto del depuratore e defluisce verso Sud, finendo intercettata dal canale Fossamastra che la recapita in mare.

Le dinamiche di esondazione sono le medesime già descritte per lo scenario TR50, ma con maggiore intensità in relazione alle portate più elevate. Il nodo di confluenza presso l'attraversamento ferroviario risulta sempre critico e provoca l'allagamento del sedime della linea ferroviaria e della galleria subalvea.

Nel tratto a valle di viale S. Bartolomeo nuovamente la portata è contenuta completamente nell'alveo tombato (principalmente poiché l'idrogramma subisce una significativa laminazione per effetto degli allagamenti di monte) e transita senza generare un funzionamento in pressione, con franchi compresi tra circa 0,6 e 1,0 m..

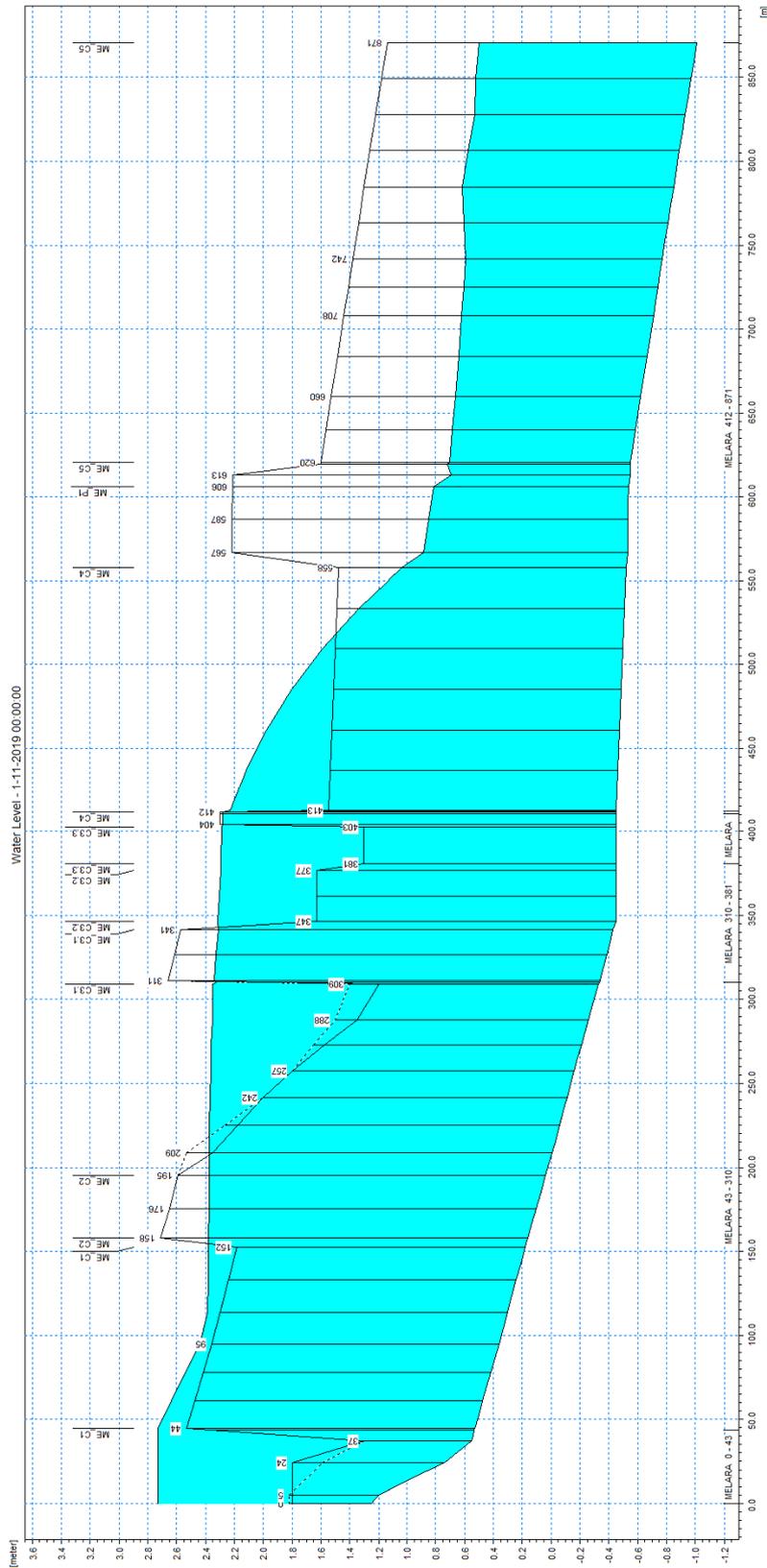


Figura 11 – Profilo longitudinale di corrente del ramo di levante del fosso Melara (TR200).

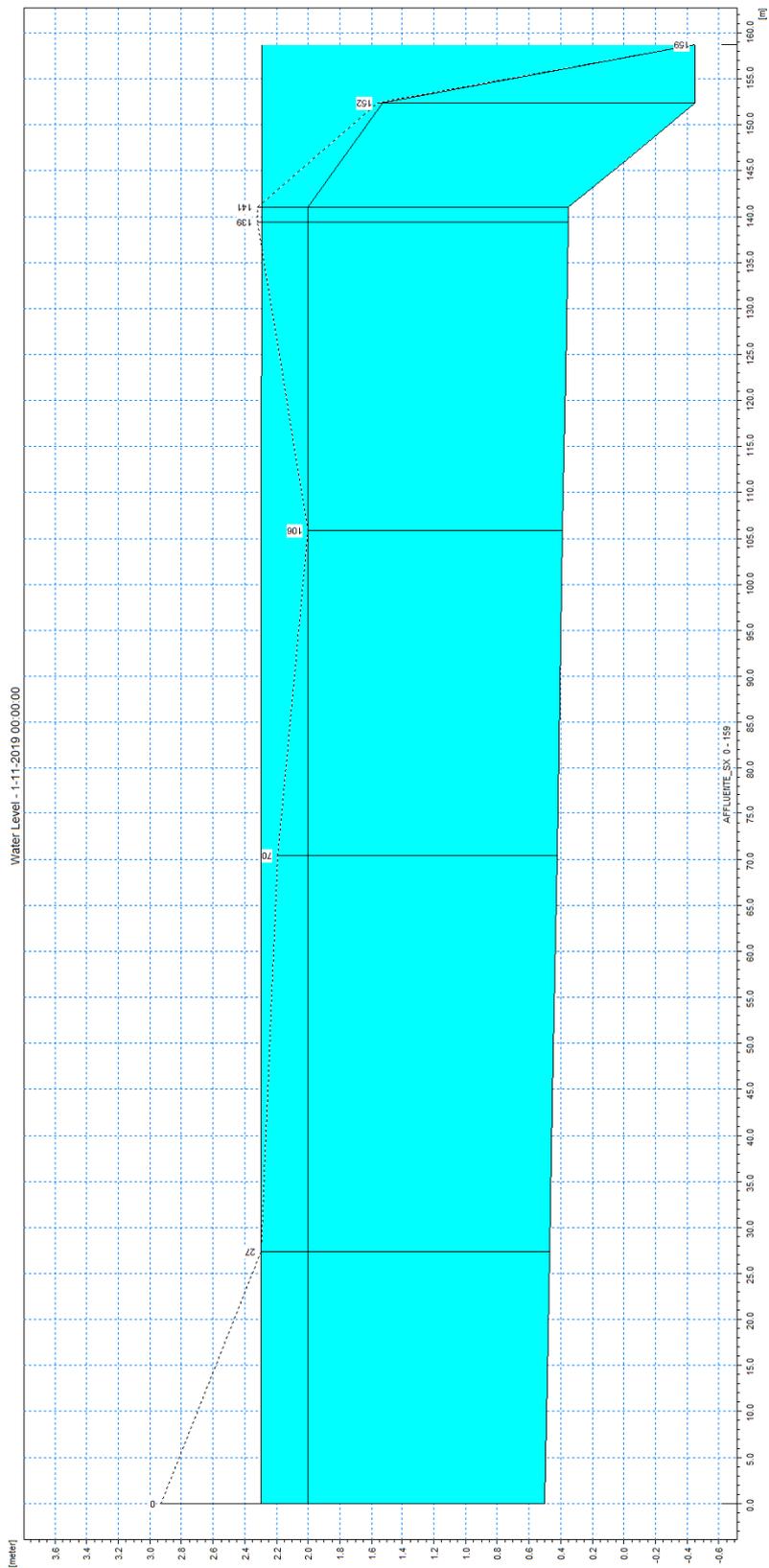


Figura 12 – Profilo longitudinale di corrente del fosso affluente in destra a monte ferrovia (TR200).

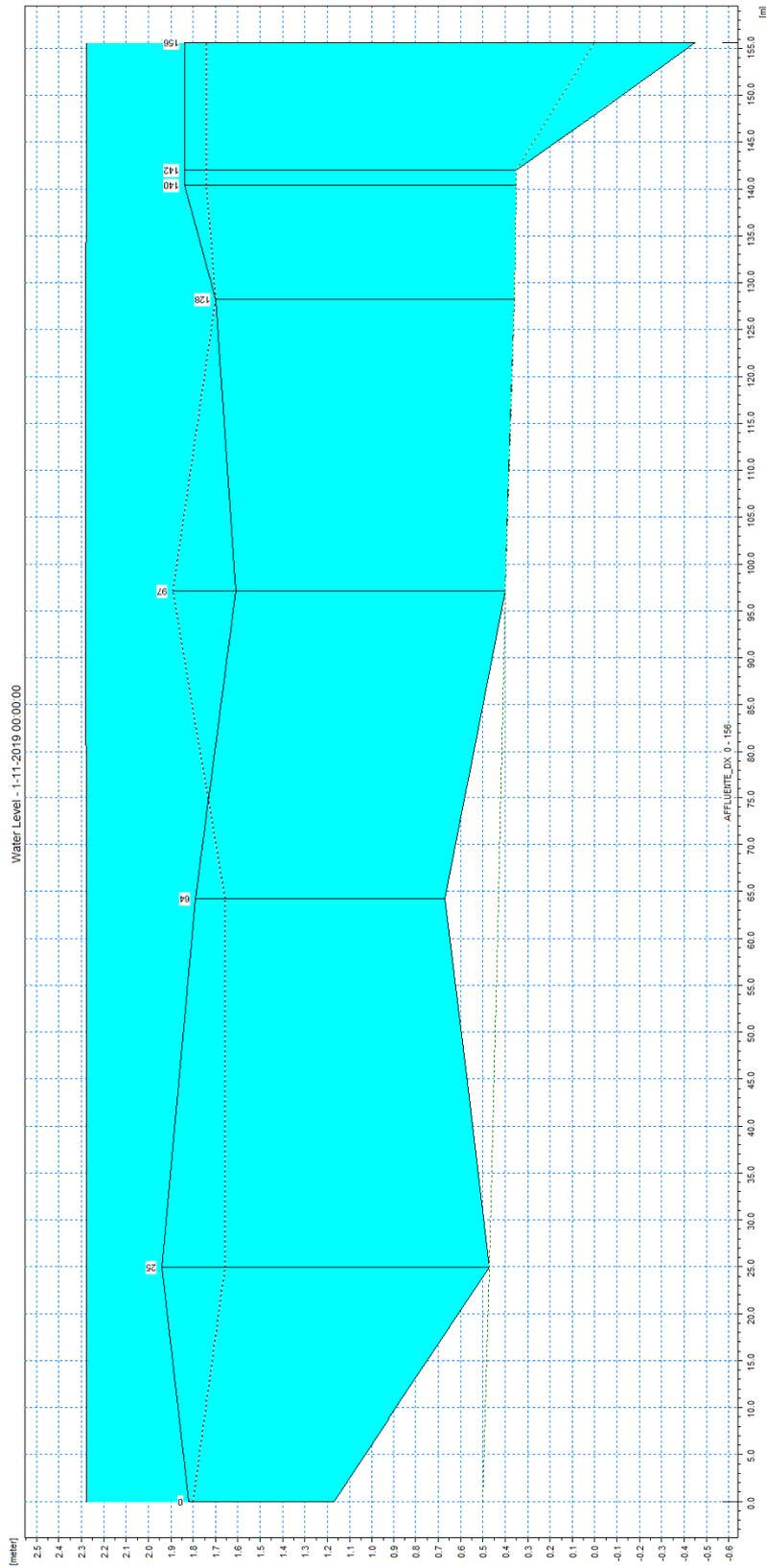


Figura 13 – Profilo longitudinale di corrente del ramo di ponte del Melara, affluente a valle ferrovia (TR200).

In Figura 14 sono rappresentati gli idrogrammi di portata osservati nel corso dell'evento simulato in alcune sezioni significative del modello monodimensionale sull'asta del ramo di levante del Melara, che evidenziano i rilevanti effetti indotti dai fenomeni di esondazione.

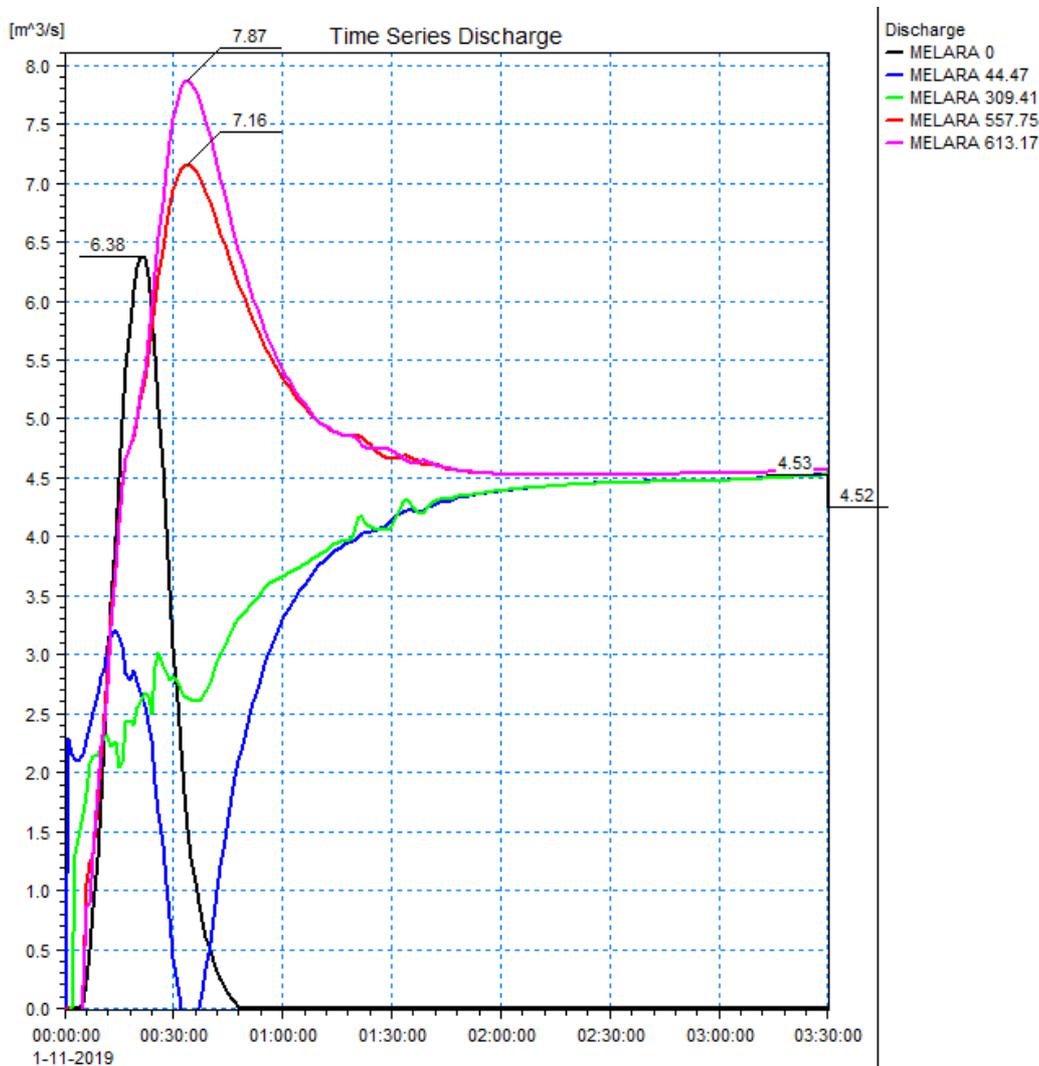


Figura 14 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul fosso Melara.

Valgono le medesime considerazioni già espresse per lo scenario TR50, pur con effetti di maggiore intensità. Si evidenzia come la portata defluente attraverso il tombino al di sotto del depuratore risulti brevemente negativa: il carico di valle è tale da produrre un flusso verso monte.

Nella sezione di imbocco della tombinatura terminale (linea fucsia) la portata al colmo risulta di 7,87 m³/s a fronte del valore teorico determinato nell'analisi idrologica, pari a circa 16,30 m³/s.

In Figura 15 e Figura 16 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno duecentennale.

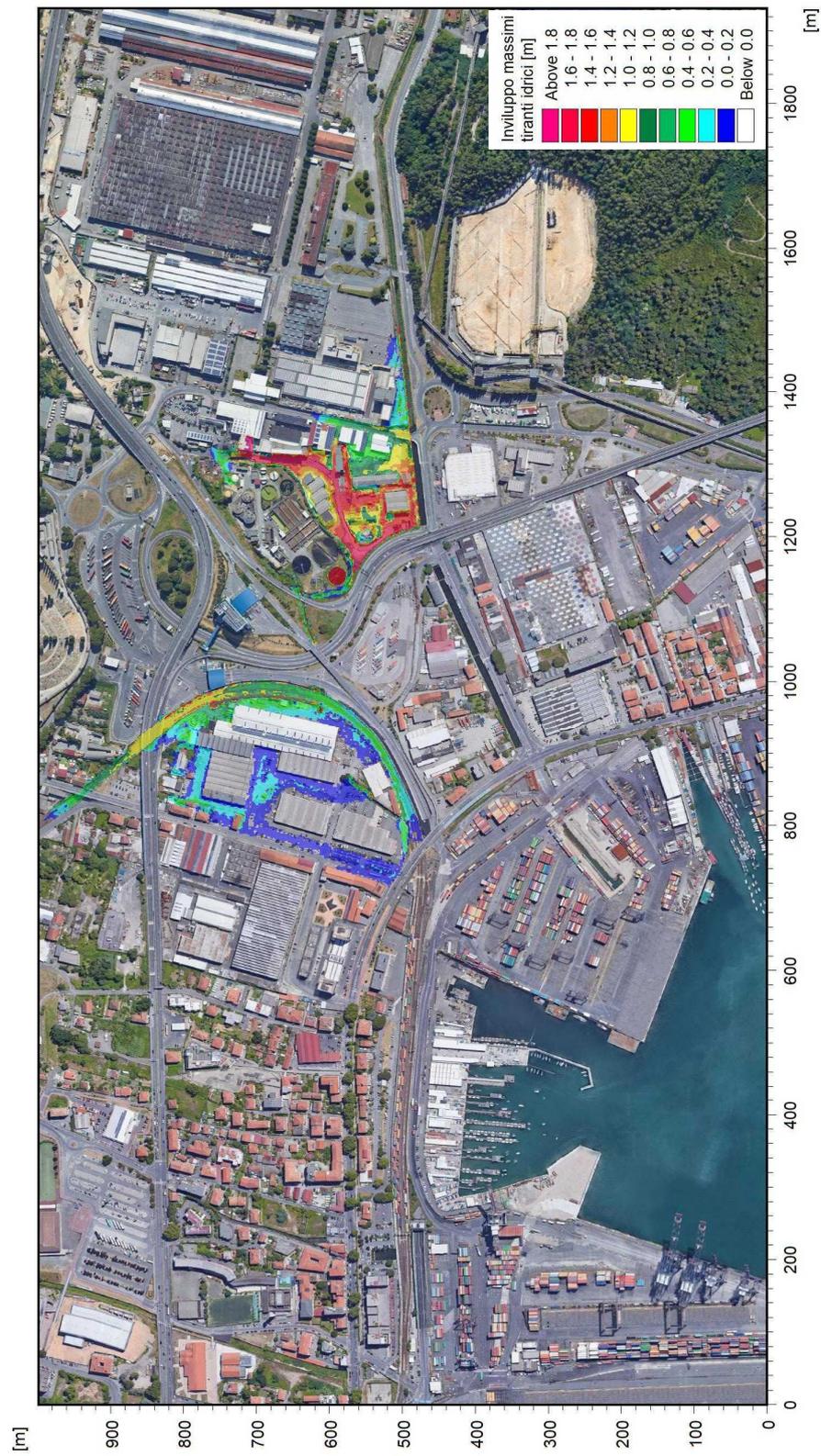


Figura 15 – Distribuzione involuppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=200 anni.

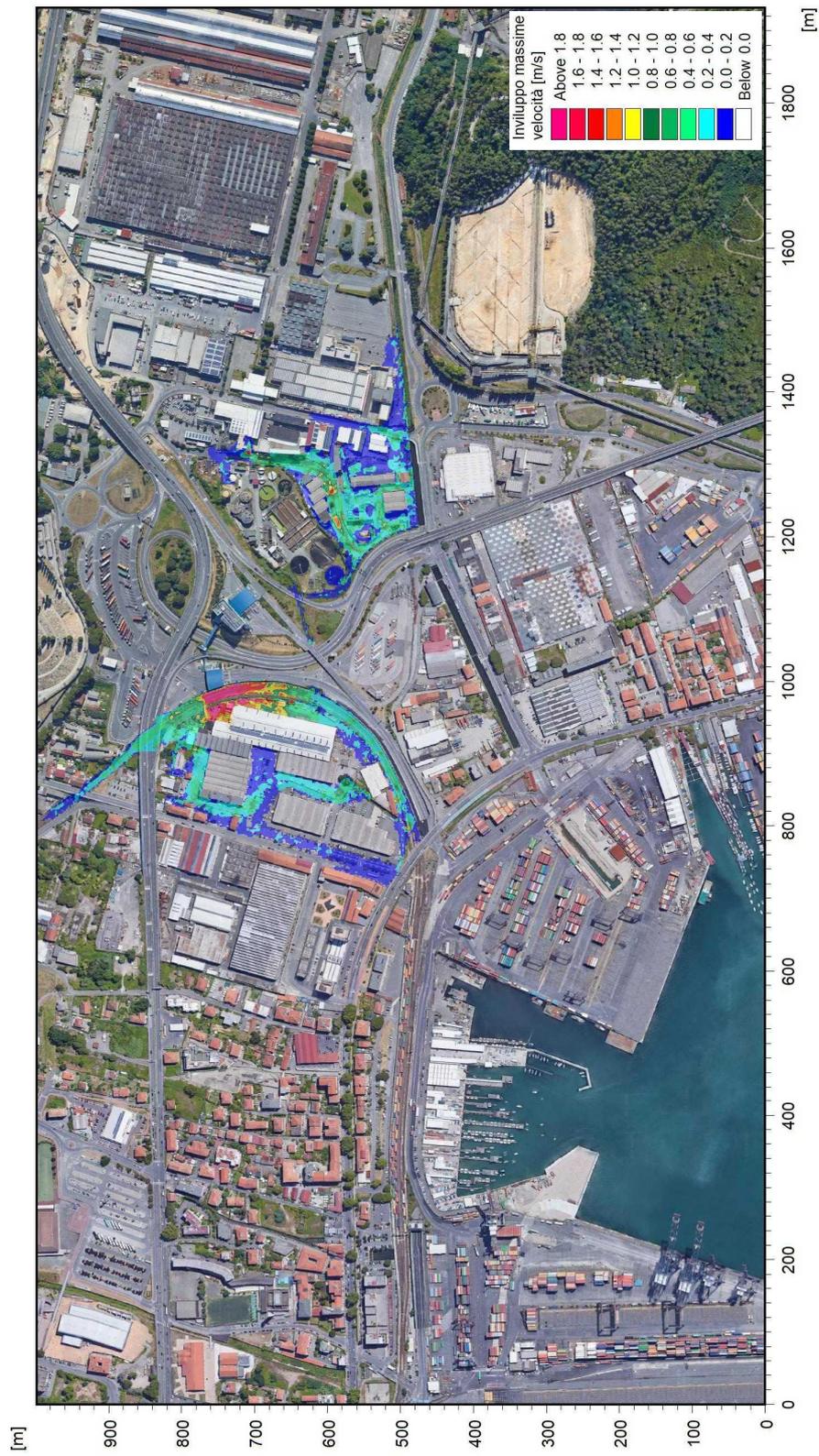


Figura 16 – Distribuzione involucro delle massime velocità di flusso per TR=200 anni.

### 5.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)

Nella Tabella 6 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del sistema idrodinamico del Melara (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come involucro dei valori massimi.

In Figura 17, Figura 18 e Figura 19 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m <sup>3</sup> /s	m/s	-
Melara		1	0,00	1,25	1,50	2,75	2,79	7,05	0,87	0,23
Melara		2	4,99	1,20	1,55	2,75	2,79	7,01	0,86	0,22
Melara		3	24,38	0,74	2,01	2,75	2,78	6,41	0,79	0,18
Melara		4	37,04	0,55	2,20	2,75	2,75	1,48	0,20	0,04
Melara	imbocco ME_C1	5	44,47	0,53	2,22	2,75	2,75	4,58	0,29	0,06
Melara	ME_C1	6	94,63	0,36	2,09	2,45	2,56	4,58	1,44	0,32
Melara	sbocco ME_C1	7	152,30	0,18	2,26	2,44	2,55	4,58	1,44	0,30
Melara	imbocco ME_C2	8	157,80	0,16	2,28	2,44	2,49	4,58	1,00	0,21
Melara	ME_C2	9	175,64	0,10	2,34	2,44	2,49	4,58	0,98	0,20
Melara	sbocco ME_C2	10	195,23	0,04	2,40	2,44	2,49	4,58	0,95	0,20
Melara		11	208,96	-0,01	2,45	2,44	2,48	4,58	0,87	0,18
Melara		12	241,74	-0,11	2,55	2,44	2,47	4,58	0,80	0,16
Melara		13	257,46	-0,16	2,59	2,43	2,46	4,58	0,77	0,15
Melara		14	287,91	-0,26	2,68	2,42	2,45	4,58	0,72	0,14
Melara	imbocco ME_C3.1	14.1	309,41	-0,33	2,74	2,41	2,43	4,58	0,70	0,13
Melara	ME_C3.1	15	311,41	-0,34	2,74	2,40	2,43	4,58	0,75	0,14
Melara	sbocco ME_C3.1	16	341,38	-0,43	2,80	2,37	2,40	4,58	0,82	0,16
Melara	imbocco ME_C3.2	17	346,51	-0,45	2,83	2,38	2,40	4,58	0,55	0,10
Melara	sbocco ME_C3.2	18	376,77	-0,45	2,80	2,35	2,37	5,07	0,61	0,12
Melara	imbocco ME_C3.3	19	380,92	-0,45	2,80	2,35	2,36	5,40	0,51	0,10
Melara	sbocco ME_C3.3	20	402,54	-0,45	2,79	2,34	2,35	5,15	0,49	0,09
Melara	inizio vasca	21	403,93	-0,45	2,79	2,34	2,35	5,17	0,53	0,10
Melara	fine vasca	22	410,85	-0,45	2,79	2,34	2,35	5,27	0,54	0,10
Melara	imbocco ME_C4	22.1	411,56	-0,45	2,78	2,33	2,34	4,94	0,51	0,10
Melara	ME_C4	23	412,56	-0,45	2,74	2,29	2,34	5,02	0,94	0,18
Melara	sbocco ME_C4	24	557,75	-0,52	1,59	1,07	1,47	7,50	2,80	0,71
Melara		25	566,82	-0,53	1,45	0,92	0,98	7,99	1,07	0,28

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	-
Melara		26	586,66	-0,53	1,41	0,88	0,95	8,32	1,14	0,31
Melara	monte ME_P1	27	606,22	-0,54	1,39	0,85	0,92	8,32	1,17	0,32
Melara	valle ME_P1	28	613,17	-0,55	1,26	0,71	0,79	8,32	1,28	0,36
Melara	imbocco ME_C5	29	620,38	-0,55	1,27	0,72	0,75	8,32	0,82	0,23
Melara	ME_C5	30	659,55	-0,62	1,30	0,68	0,71	8,32	0,80	0,22
Melara	ME_C5	31	708,16	-0,71	1,34	0,63	0,66	8,33	0,78	0,21
Melara	ME_C5	32	741,98	-0,77	1,37	0,60	0,63	8,33	0,76	0,21
Melara	sbocco ME_C5	33	870,50	-1,01	1,51	0,50	0,52	8,34	0,69	0,18
Affluente dx a monte ferrovia		34	0,00	0,50	1,86	2,36	2,37	2,34	0,51	0,12
Affluente dx a monte ferrovia		35	27,34	0,47	1,89	2,36	2,37	2,29	0,53	0,12
Affluente dx a monte ferrovia		36	70,46	0,42	1,93	2,35	2,36	2,20	0,36	0,08
Affluente dx a monte ferrovia		37	105,84	0,39	1,96	2,35	2,36	2,14	0,38	0,09
Affluente dx a monte ferrovia		38	139,44	0,35	2,00	2,35	2,36	2,07	0,32	0,07
Affluente dx a monte ferrovia	afflusso in vasca imbocco manufatto ME_C3.3	39	152,39	-0,45	2,80	2,35	2,35	1,72	0,15	0,03
Melara di ponente a valle ferrovia		34	0,00	0,50	1,83	2,33	2,35	5,45	0,70	0,17
Melara di ponente a valle ferrovia		35	24,99	0,47	1,86	2,33	2,35	4,99	0,58	0,14
Melara di ponente a valle ferrovia		36	64,26	0,43	1,91	2,34	2,35	3,74	0,35	0,08
Melara di ponente a valle ferrovia		37	97,10	0,40	1,94	2,34	2,35	2,88	0,33	0,08
Melara di ponente a valle ferrovia		38	128,23	0,36	1,98	2,34	2,34	2,49	0,30	0,07
Melara di ponente a valle ferrovia		39	140,40	0,35	1,99	2,34	2,34	2,34	0,25	0,06
Melara di ponente a valle ferrovia	afflusso in vasca sbocco manufatto ME_C3.3	40	155,58	-0,45	2,79	2,34	2,34	2,15	0,18	0,03

Tabella 6 – Risultati di sintesi per lo scenario TR500.

Nuovamente, il deflusso della portata cinquecentennale induce esondazioni diffuse in corrispondenza delle medesime aree per cui si è riscontrato allagamento in occasione degli eventi cinquantennale e duecentennale. Esse sono solo poco più estese, soprattutto in relazione al fatto che la gran parte della maggior portata in arrivo da monte (nel ramo di levante) esonda a monte del tombino al di sotto del depuratore e defluisce verso Sud, finendo intercettata dal canale Fossamastra che la recapita in mare.

Le dinamiche di esondazione sono le medesime già descritte per gli scenari precedenti, ma con maggiore intensità in relazione alle portate più elevate. Il nodo di confluenza presso l'attraversamento ferroviario risulta sempre critico e provoca l'allagamento del sedime della linea ferroviaria e della galleria subalvea.

Nel tratto a valle di viale S. Bartolomeo nuovamente la portata è contenuta completamente nell'alveo tombato (principalmente poiché l'idrogramma subisce una significativa laminazione per effetto degli allagamenti di monte) e transita senza generare un funzionamento in pressione, con franchi compresi tra circa 0,6 e 1,0 m..

In Figura 20 sono rappresentati gli idrogrammi di portata osservati nel corso dell'evento simulato in alcune sezioni significative del modello monodimensionale sull'asta del ramo di levante del Melara, che evidenziano i rilevanti effetti indotti dai fenomeni di esondazione

Valgono le medesime considerazioni già esposte per lo scenario TR200, pur con effetti di maggiore intensità. Anche in questo caso la portata defluente attraverso il tombino al di sotto del depuratore risulta brevemente negativa: il carico di valle è tale da produrre un flusso verso monte.

Nella sezione di imbocco della tombinatura terminale (linea fucsia) la portata al colmo risulta di 8,32 m<sup>3</sup>/s a fronte del valore teorico determinato nell'analisi idrologica, pari a circa 18,14 m<sup>3</sup>/s.

In Figura 21 e Figura 22 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno duecentennale.

In Figura 21 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. Figura 22 la colorazione blu indica le velocità minori mentre quella rossa le maggiori.

Le aree interne all'alveo inciso non sono rappresentate perché, come già detto, il loro contributo al deflusso viene considerato nell'ambito del modello MIKE11.

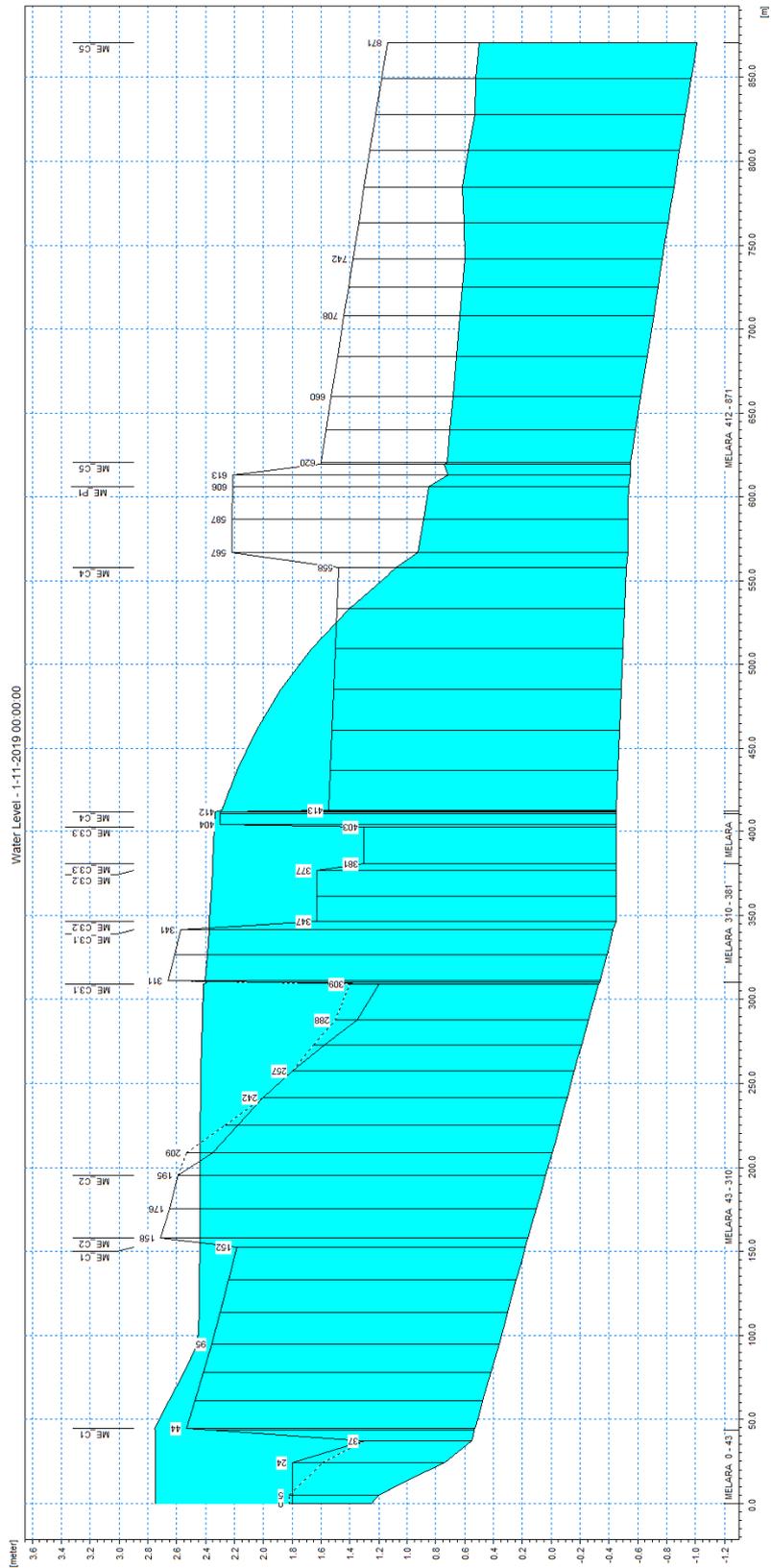


Figura 17 – Profilo longitudinale di corrente del ramo di levante del fosso Melara (TR500).

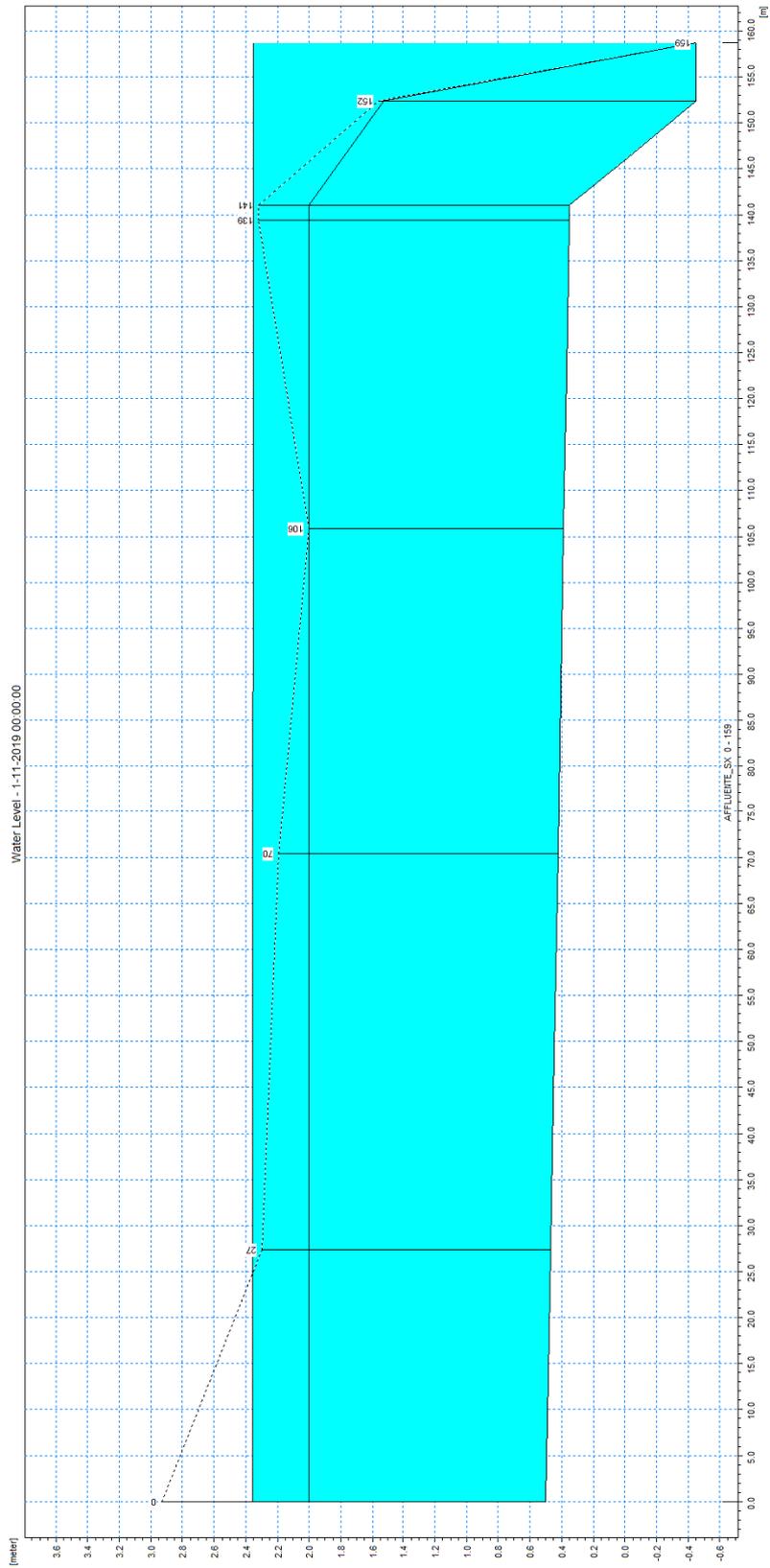


Figura 18 – Profilo longitudinale di corrente del fosso affluente in destra a monte ferrovia (TR500).

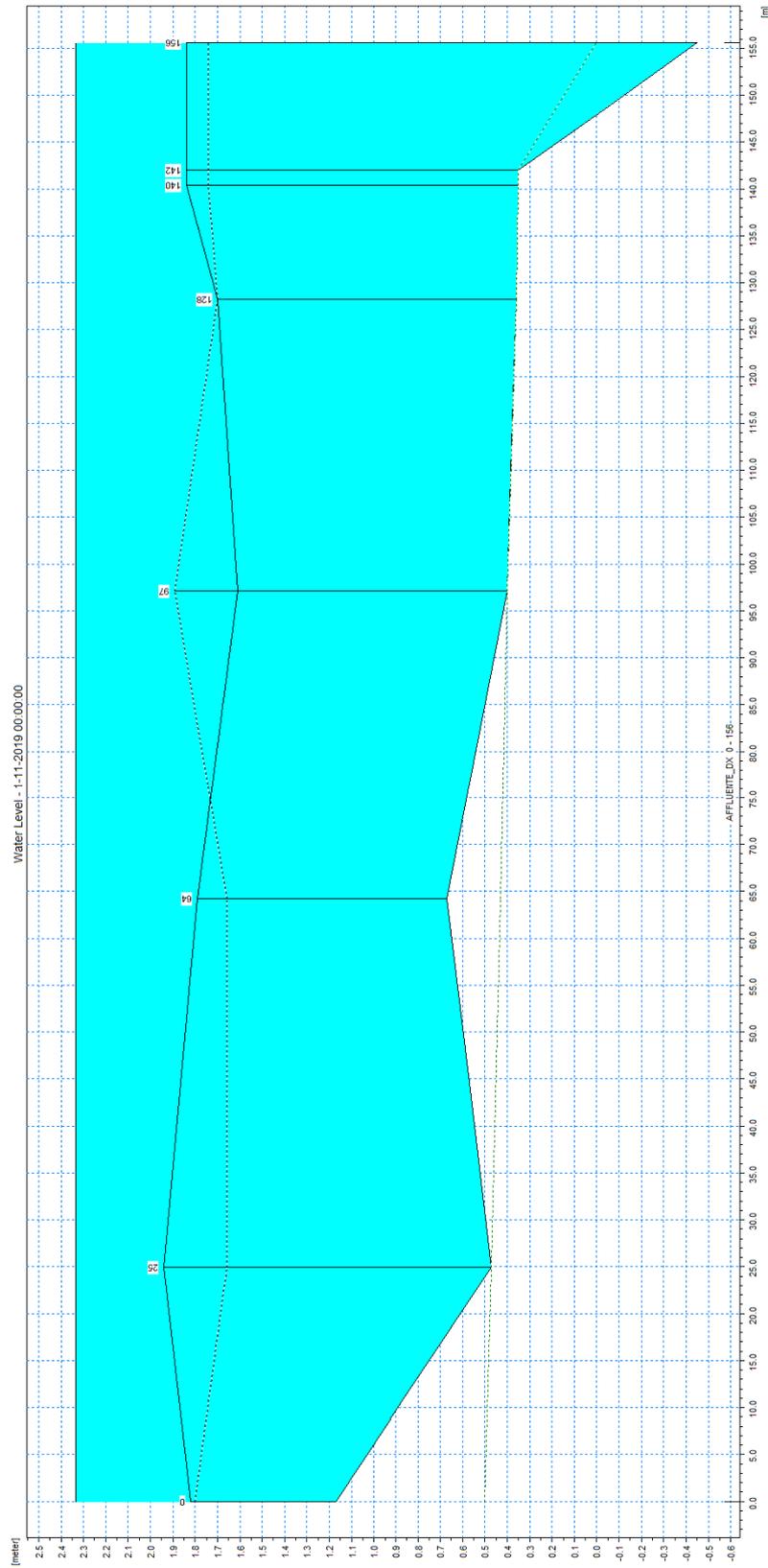


Figura 19 – Profilo longitudinale di corrente del ramo di ponte del Melara, affluente a valle ferrovia (TR500).

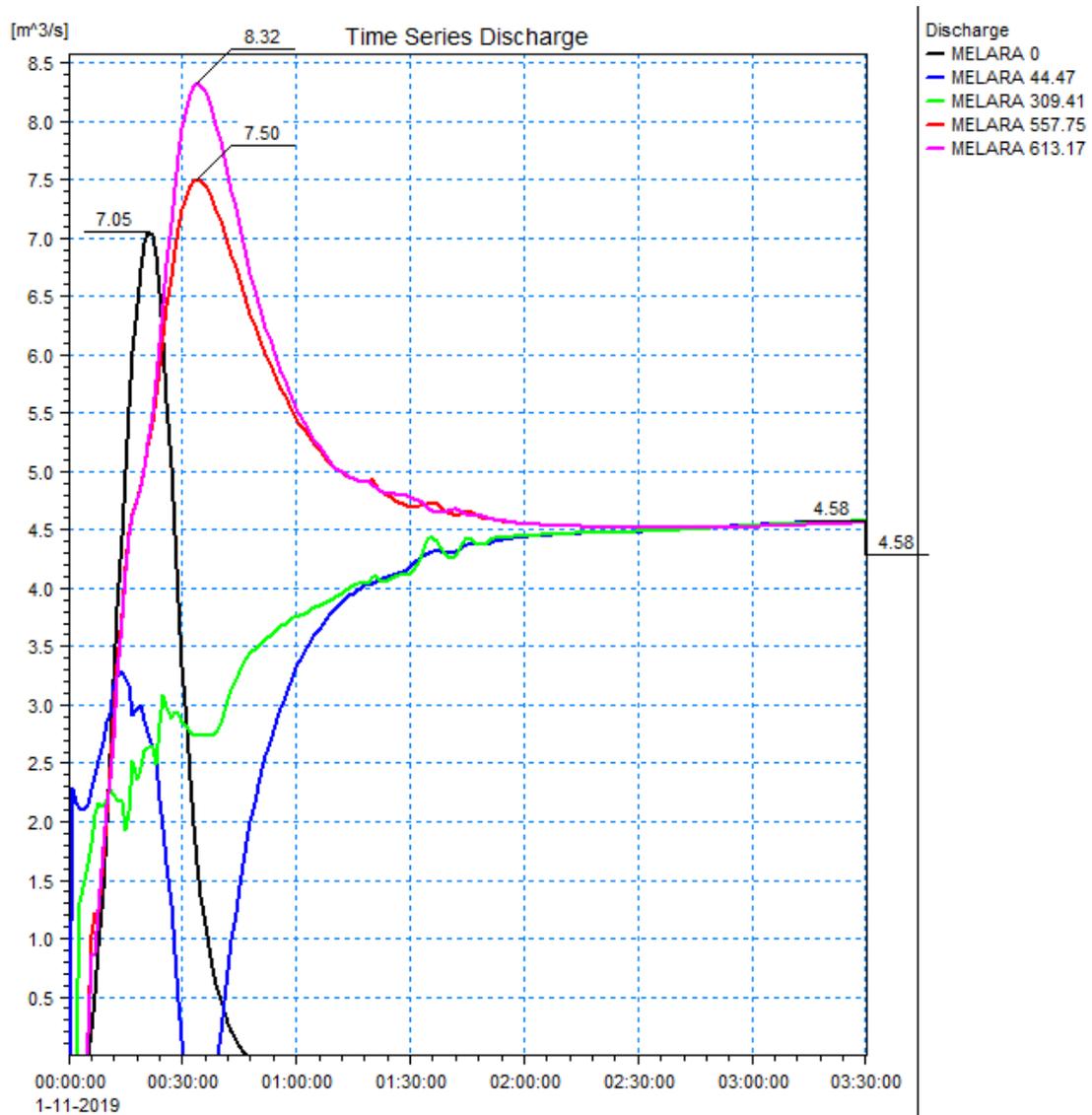


Figura 20 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul fosso Melara.

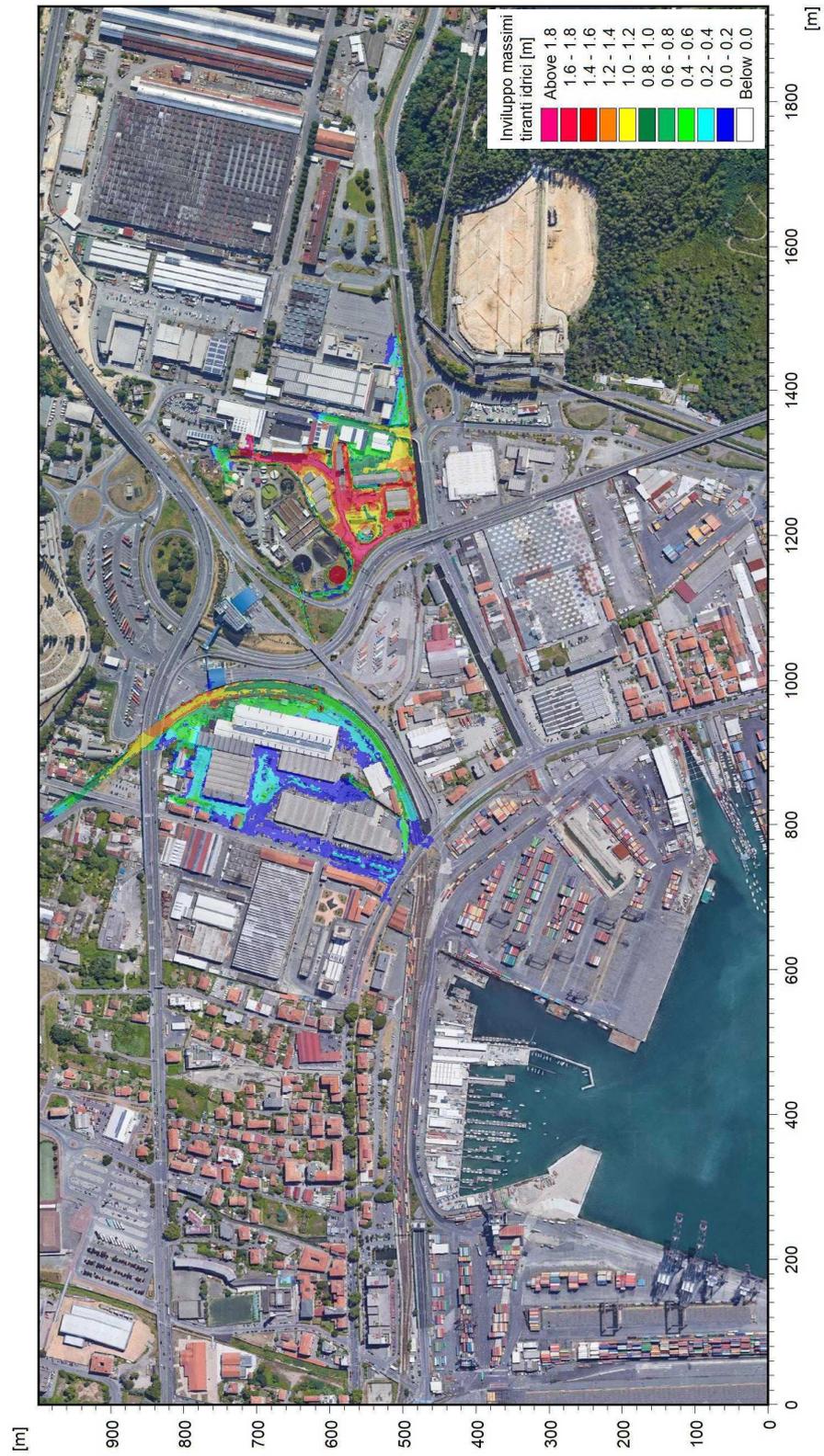


Figura 21 – Distribuzione involuppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=500 anni.

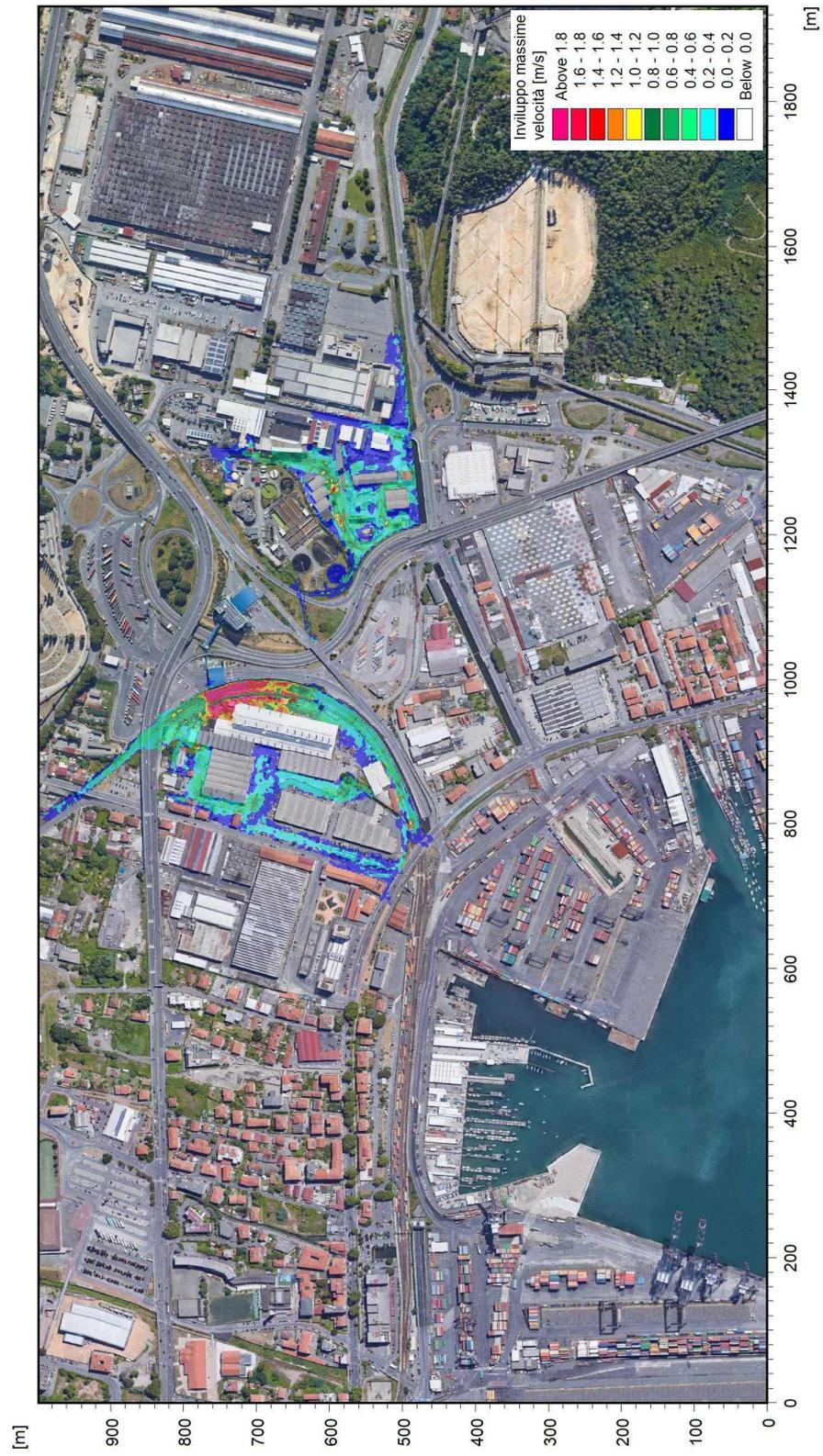


Figura 22 – Distribuzione involuppo delle massime velocità di flusso per TR=500 anni.

## 5.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 7 sono sintetizzati i franchi minimi di sicurezza rispetto alle quote di intradosso degli attraversamenti, estratti dai risultati dei tre scenari simulati. Essi sono indicati con valore negativo nel caso in cui il moto sia in pressione; nel caso delle tombinature identificano la differenza tra le altezze del cielo del tombino e le altezze piezometriche del tratto.

I franchi idraulici di sicurezza non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici; per queste si è fatto riferimento alla sezione posta immediatamente a monte.

Corso d'acqua	Codice	Codice PdB	Intradosso	Franco idraulico di sicurezza TR50	Franco idraulico di sicurezza TR200	Franco idraulico di sicurezza TR500
-	-	-	m s.m.	m	m	m
Melara	ME_C1		2,53	-0,18	-0,20	-0,22
Melara	ME_C2		2,71	0,42	0,33	0,27
Melara	ME_C3.1	MEMECP03	2,67	0,42	0,32	0,26
Melara	ME_C3.2	MEMECP03	1,63	-0,59	-0,69	-0,75
Melara	ME_C3.3	MEMECP03	1,30	-0,91	-0,99	-1,05
Melara	ME_C4	MEMECP02	1,55	-0,64	-0,73	-0,78
Melara	ME_P1		0,61	-0,16	-0,20	-0,24
Melara	ME_C5 (imbocco)	MEMECP01	1,60	0,92	0,90	0,88
	ME_C5 (sbocco)		1,15	0,65	0,65	0,65

**Tabella 7 – Franco disponibile dalla quota del pelo libero simulato (per gli scenari TR50, TR200 e TR500) alla quota di intradosso degli attraversamenti viari e ferroviari sul sistema idrodinamico del Melara.**

Il vigente Piano di Bacino definisce le caratteristiche idrauliche che le opere di ritenuta e gli attraversamenti puntuali o i tratti tombinati devono possedere per poter essere considerati adeguati al deflusso della piena di riferimento a tempo di ritorno 200 anni; in particolare sono definiti i franchi idraulici di sicurezza che devono essere rispettati in funzione della dimensione del bacino del corso d'acqua interferito (Tabella 8).

Le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC2018), applicabili però ai ponti di nuova costruzione, definiscono inoltre vincoli sui franchi idraulici maggiormente stringenti (1,5 m rispetto all'evento di piena duecentennale); in questo caso gli attraversamenti e le tombinature sul fosso Melara rientrerebbero nelle disposizioni specifiche per i "tombini" ai sensi di quanto indicato dalla Circolare esplicativa del C.S.LL.PP. n.7/2019, in ragione della portata massima inferiore a 50 m<sup>3</sup>/s. Essendo tali norme meno stringenti di quelle definite nel PdB, si fa riferimento a queste ultime.

Franco idraulico: valore maggiore tra (a) e (b)			
		Reticolo principale e secondario	Reticolo minore
<b>(a)</b>		$U^2/2g_s$	$0,5 U^2/2g_s$
<b>(b)</b>	I) argini e difese spondali	cm. 50/100	cm 50
	II) ponti e strutture di attraversamento fino a estensioni longitudinali di m. 12	cm. 100/150	cm 75
	III) coperture o tombinature (ove ammesse), ponti e strutture di attraversamento di estensione oltre m. 12	cm. 150/200	cm 100

**Tabella 8 – Franchi idraulici di sicurezza che devono essere rispettati in funzione della dimensione del bacino del corso d'acqua interferito (Piano di Bacino Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico – Ambito 20 – Golfo della Spezia).**

I due valori del range definito per il reticolo principale e quello secondario corrispondono rispettivamente a bacini poco dissestati con previsione di modesto trasporto solido ed a bacini molto dissestati con previsione di forte trasporto solido in caso di piena, e/o a bacini di maggiore o minore estensione; in particolare il reticolo principale e secondario viene definito in base alla seguente dimensione di bacino.

- a. I corsi d'acqua di primo livello o principali sono le aste fluviali con bacino sotteso > 1 km<sup>2</sup>;
- b. I corsi d'acqua di secondo livello o secondari sono le aste fluviali con bacino sotteso compreso tra 1 e 0,25 km<sup>2</sup>;
- c. corsi d'acqua di terzo livello o minori sono le aste fluviali con bacino sotteso compreso tra 0,25 e 0,1 km<sup>2</sup>, con l'aggiunta delle aste con bacini inferiori a 0,1 km<sup>2</sup> con fasce di inondabilità perimetrate nel Piano.

Il Fosso Melara presenta un bacino sotteso complessivo di estensione pari a circa 0,6 km<sup>2</sup> e quindi, secondo il PdB, ricadono nell'ambito del reticolo secondario. Essendo il corso d'acqua artificializzato e prevalentemente tombato, drenante aree urbane, il bacino può essere considerato poco dissestato, con previsione di contenuto trasporto solido in caso di piena, per cui si ritiene applicabile il valore minimo tra quelli indicati in Tabella 8.

Come già anticipato, quasi tutti gli attraversamenti riportati in Tabella 7 denunciano un funzionamento in pressione già per l'evento TR50 e sono pertanto inadeguati idraulicamente. La copertura ME\_C2 (tratto di valle del tombino sotto al depuratore, che presenta sezione scatolare di maggiore capacità di deflusso) e il primo tratto di monte della ME\_C3 (attraversamento svincolo A15) presentano franchi risicati (circa 30 cm per TR200), che si tradurrebbero però in un moto in pressione qualora l'intera portata in ingresso da monte potesse defluire oltre l'imbocco della tombinatura al di sotto del depuratore.

Maggiormente adeguata risulta invece la tombinatura terminale al di sotto dell'area portuale, per quanto anche in questo caso sia necessario considerare come la portata considerata sia inferiore al valore idrologico di

riferimento, a causa della limitata capacità di trasporto dell'alveo a monte. Si evidenzia comunque come il solo livello di mare imposto come condizione di valle, riscontrabile nella sezione di foce, sia già tale da ridurre il franco a un valore scarsamente adeguato (0,65 m).

## **6. ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ**

Lo studio idraulico di dettaglio descritto nel presente documento ha consentito di ricostruire con accuratezza l'effettiva estensione degli allagamenti attesi in relazione al deflusso delle piene associate a un tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni per il corso d'acqua in esame, rappresentandone i diversi rami per la sola estensione in cui è stato possibile definire con sufficiente affidabilità le caratteristiche geometriche.

In relazione ai risultati ottenuti è stata effettuata una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica definite nel vigente Piano di Bacino (cfr. capitolo 2).

Quest'ultimo definisce aree di pericolosità idraulica elevata (fascia A) solo nell'area compresa tra la ferrovia (inclusa) e via del Molo; si precisa come le aree indicate siano unite a quelle conseguenti alle esondazioni del Canale Fossamastra.

Nel presente studio è stata condotta un'analisi idrodinamica di dettaglio descrivendo anche i rami più a monte. La problematica generale risulta essere la modesta (talvolta nulla) pendenza dell'asta principale, in ragione dei minimi dislivelli delle aree drenate rispetto alla foce. Vi sono comunque anche rilevanti elementi di criticità puntuale.

Particolarmente critico in particolare risulta il tombino di attraversamento dell'area del depuratore (Figura 24), che induce rilevanti esondazioni nell'area produttiva presso via degli Stagnoni, propagandosi prevalentemente verso Sud fino a riversarsi nell'alveo del Canale Fossamastra, giungendo anche a lambire l'area dello stabilimento industriale Leonardo nel cui perimetro entra (marginalmente) attraverso il varco di accesso in via privata OTO. L'esondazione si attesta contro il rilevato dell'autostrada A15 della Cisa; gli allagamenti circondano l'area del depuratore, interessandone limitate porzioni a Nord e Sud-Ovest.

Un secondo punto critico è costituito dalla tubazione di diametro 1,80 m in uscita dalla "vasca di calma" posta a valle dell'attraversamento ferroviario (Figura 24), decisamente inferiore come capacità di deflusso alle sezioni di monte. Il carico idraulico che si instaura all'imbocco di essa risulta superiore alle quote di sponda dei canali che si sviluppano su entrambi i lati della linea ferroviaria, provocando l'allagamento del piano dei binari. In virtù delle limitate pendenze tale allagamento si estende anche a monte fino a via Carducci, mentre a valle defluirebbe verso sinistra andando a invadere anche la galleria subalvea (l'analisi non ha considerato la presenza di muri perimetrali in quanto non è nota la loro adeguatezza a contenere i livelli idrici di piena).

Secondo i criteri definiti dal Piano di Bacino e dalla specifica normativa vigente, il tracciamento delle fasce A, B e C è stato condotto considerando l'inviluppo delle aree interessate da allagamenti per tempi di ritorno rispettivamente di 50, 200 e 500 anni. I risultati ottenuti sono rappresentati in Figura 23 e negli elaborati grafici annessi (codice 3636-04-01100).



Figura 23 – Estensione delle fasce A, B e C proposte per l'insieme dei rami del Fosso Melara.



Figura 24 - Imbocco tombinatura ME\_C01 al di sotto del depuratore (sx); vasca di calma a valle dell'attraversamento ferroviario vista da valle (dx).

La fascia A proposta interessa un'ampia area attorno a via degli Stagnoni originariamente non perimetrata nel PdB, come precedentemente descritto. Di minore estensione, presumibilmente grazie agli interventi di sistemazione realizzati, appare invece la fascia A a valle dell'autostrada A15, dove gli allagamenti risultano interessare prevalentemente il sedime ferroviario. Analogamente al PdB la fascia non è stata estesa a valle nella galleria subalvea, ma occorre considerarne l'allagamento in occasione degli eventi di piena in esame.

Le fasce B e C risultano di poco più ampie rispetto alla A, ma non perfettamente sovrappose come nel PdB.

Per immediato riscontro delle variazioni introdotte rispetto alle perimetrazioni del vigente PdB, si riporta in Figura 25 una sovrapposizione di queste ultime con gli ambiti di pericolosità definiti dal presente studio (rappresentati in colore nero).

Sono state infine determinate le *aree individuate a minor pericolosità* degli ambiti normativi di fascia B, facendo riferimento a quanto previsto dalla DGR 91/2013, evoluzione della precedente DGR 250/2005 con la quale erano *“stati approvati dalla giunta regionale, nella sua qualità di organo dell'autorità di bacino regionale, i criteri per la definizione dei cosiddetti “ambiti normativi delle fasce di inondabilità in funzione di tiranti idrici e velocità di scorrimento”, finalizzati in particolare ad individuare, nell'ambito delle fasce di inondabilità ad assegnati tempi di ritorno (fasce a e b) aree a “minor pericolosità relativa” tali da consentire diverse possibilità edificatorie”*.

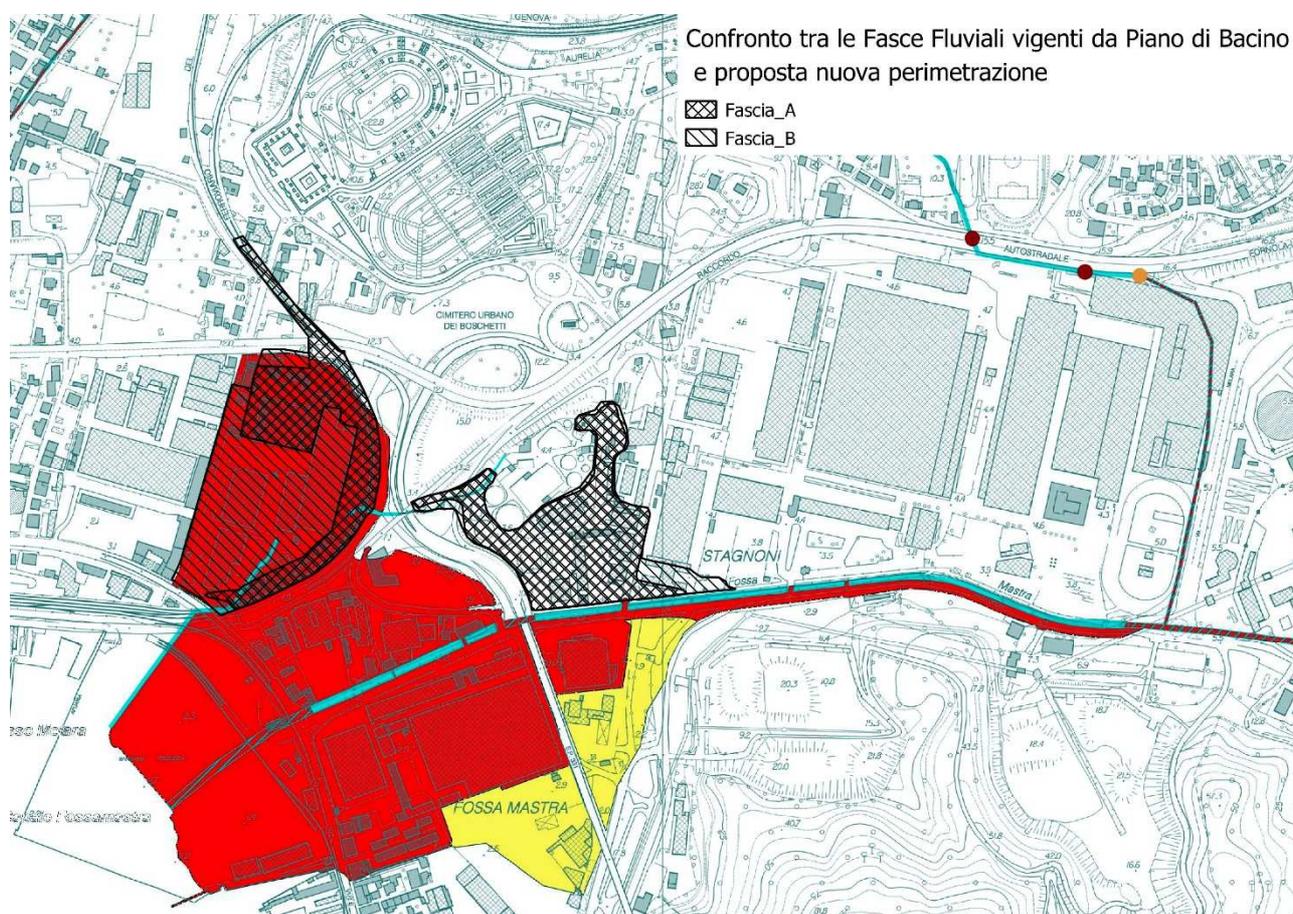
L'aggiornamento normativo effettuato con la DGR 91/2013 riporta che: *“A seguito degli eventi alluvionali dell'autunno 2010 e 2011, per alcuni aspetti più intensi e frequenti degli eventi precedentemente occorsi, si è resa opportuna una valutazione dell'adeguatezza e dell'attualità dei criteri ex DGR 250/2005, con analisi di eventuali modifiche od integrazioni da apportare agli stessi. In particolare, è stato ritenuto necessario che per la fascia A, corrispondente alle aree a più alta pericolosità idraulica in quanto inondabili a TR=50 anni, debba essere sempre applicata la normativa ordinaria di fascia A, di cui al testo integrato dei criteri ex DGR 265/2011. È stata pertanto prevista l'eliminazione della possibilità di individuazione di aree a minor pericolosità nella fascia A, tali da consentire una riclassificazione della stessa a fascia B, come previsto dalla DGR 250/2005.*

*Si è ritenuto inoltre necessario aggiornare il criterio tecnico di “minor pericolosità” da applicarsi in fascia B, sulla base dei criteri vigenti dal 2001, nell'obiettivo di privilegiare gli studi di dettaglio a scala di bacino o*

*riguardanti tratti significativi di corso d'acqua, in quanto maggiormente affidabili rispetto a studi locali finalizzati alle singole edificazioni. Il presente documento rappresenta l'aggiornamento dei criteri ex DGR 250/2005, che si intendono pertanto superati".*

In continuità con quanto previsto nei criteri ex DGR 250/2005, le aree B0 (a minor pericolosità relativa) e BB sono individuate con il criterio di cui alla Figura 26.

Gli ambiti "B0" e "BB" per l'area di studio del Fosso Melara sono rappresentati in Figura 27; le aree perimetrate in fascia B risultano prevalentemente associabili a un ambito BB nell'area degli Stagnoni, e a un ambito B0 nell'area artigianale a Ovest della linea ferroviaria.



**Figura 25 - Fasce A, B e C proposte a confronto con quelle vigenti da Piano di Bacino (che comprendono anche quelle relative al Canale Fossamastra).**

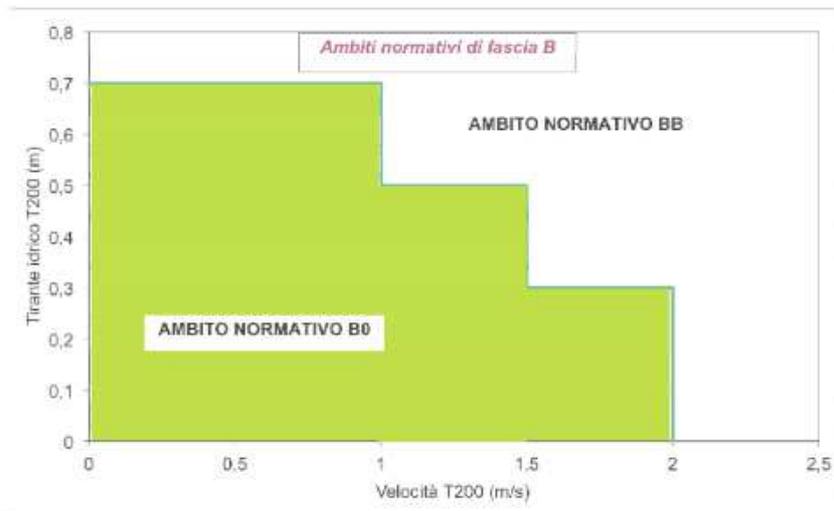


Figura 26 – Definizione delle fasce fluviali BB e B0 ai sensi della DGR 91/2013.



Figura 27 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B per il Fosso Melara.

**ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo MIKE11 - HD**



## PREMESSA

Il programma MIKE 11 è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM 11 che dal 1972, anno della sua messa a punto, ad oggi, è stato usato in un grande numero di applicazioni in tutto il mondo con ottimi risultati e riconoscimenti.

MIKE 11 è un programma generale per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, fiumi, sistemi di irrigazione e simili corpi idrici. MIKE 11 simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. E' possibile tenere conto di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

L'adozione del programma di simulazione DHI\MIKE 11, consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

## 2. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.

Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito.

Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati sia reti idrauliche con maglie chiuse.

## 3. EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11 mediante il terzo tipo di formulazione risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- a) Il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità.
- b) La pendenza del fondo è piccola.

- c) Le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

dove:

A = area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup>s<sup>-1</sup>);

g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);

h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q = portata (m<sup>3</sup>/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m<sup>2</sup>/s).

#### 4. SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

## 5. APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare tutti i termini legati alla quantità di moto nelle equazioni generali di De Saint Venant:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine  $\partial h/\partial x$ . Per ragioni di stabilità questo termine nella soluzione viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

## 6. DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. In MIKE 11 la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua.

### Tipi di strutture simulate

#### Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

#### Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

#### Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso. Deve essere inserita una relazione Q-h che contempli tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

#### Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

### Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

### Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

## **7. RESISTENZA D'ATTRITO**

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ |Q|}{C^2 AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ |Q|}{M^2 AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

## **8. CONDIZIONI INIZIALI**

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

## **9. METODO DI SOLUZIONE**

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

## 10. CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

## 11. DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

### 1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d + V}}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

- Cr = numero di Courant;
- d = altezza d'acqua media;
- V = velocità media della corrente;
- g = accelerazione di gravità;
- Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ( $Fr < 1$ ), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

### 2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V *Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt, Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx, vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno.

In osservanza ai sovracitati criteri è possibile definire unicamente intervalli di valori per Dx e Dt e non valori univoci per ogni simulazione.

**ALLEGATO 2 – Descrizione del codice di calcolo MIKE21 - HD**



Il codice di calcolo MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile approssimare il comportamento con l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei: il numero "21" che contraddistingue il codice sta proprio ad indicare la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il modulo idrodinamico risolve le equazioni complete del moto di de St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fV V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

- $h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;
- $\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;
- $p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;
- $C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;
- $g$  = accelerazione di gravità;
- $f(V)$  = fattore d'attrito del vento;
- $V, V_x, V_y(x,y,t)$  = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
- $\Omega(x,y)$  = parametro di Coriolis;
- $p_a(x,y,t)$  = pressione atmosferica;

$\rho_w$	= densità dell'acqua;
$x, y$	= coordinate spaziali;
$t$	= tempo;
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	= componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
$S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$	= componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio  $\tau$  che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni  $x$  e  $y$ . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro  $E$  "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

tali due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente  $E$  può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale  $u$  e  $v$  sono le componenti della velocità locale,  $\Delta$  è la dimensione spaziale della griglia e  $c_s$  è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse  $x$ ) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} hE \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ( $m^3/s/m$ ) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva ( $m^3/s$ ) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizioni iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore

assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



**ALLEGATO 3 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale**



