



# 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 04: Fossamastra



3636	-	0	4	-	0	0	3	0	0	.	DOC		
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	--	--

3.3

00	GIU.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	12
4. CONDIZIONI AL CONTORNO	14
4.1 Scenari di esondazione effettiva nel bacino del Fossamastra	17
4.2 Scenari in assenza di laminazione (tratto di Fossamastra a valle del Calcinara)	19
4.3 Scenari idrodinamici per il modello 2D dell'area Sud	21
5. RISULTATI	22
5.1 Scenari di esondazione effettiva sull'intero ambito di studio	22
5.1.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)	22
5.1.1.1 Dinamiche di allagamento dell'area della centrale ENEL per l'evento TR50	39
5.1.1.2 Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest per l'evento TR50	46
5.1.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)	55
5.1.2.1 Dinamiche di allagamento dell'area della centrale ENEL nel corso dell'evento TR200	71
5.1.2.2 Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest per l'evento TR200	76
5.1.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)	84
5.1.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	98
5.2 Simulazioni sul Canale Fossamastra in assenza di laminazioni a monte	100
5.2.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)	100
5.2.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)	107
5.2.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)	113
5.2.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	119
5.3 Propagazione delle esondazioni nell'area a Sud del Fossamastra (Darsena Pagliari)	119
5.4 Simulazioni in moto permanente per il tratto terminale del Canale Fossamastra	127
5.4.1 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	132
6. ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ	133

## 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 rimissione completa dello studio pregresso, anche nelle parti che non hanno subito modifiche; il presente aggiornamento sostituisce quindi integralmente lo studio pregresso.

Lo 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 04 - Fossamastra (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 Fossamastra, mediante allestimento di modellistica numerica con schema bidimensionale.

In funzione delle aree di esondazione risultanti dall'analisi idraulica è stata tracciata una proposta di riperimetrazione 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, riperimetrazioni 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'inviluppo 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, riperimetrazioni 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, congruentemente 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 tombati 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 (PdB) identifica sulla sola asta del canale Fossamastra nel tratto terminale (da valle della confluenza del Fosso Calcinara alla foce in mare) aree di pericolosità idraulica elevata (fascia A) e moderata (fascia B), come rappresentato in Figura 1. Si noti come in figura, stralciata dalle tavole di Piano, le aree a pericolosità idraulica elevata siano rappresentate unitamente a quelle relative all'adiacente fosso Melara, non oggetto della presente relazione (cfr. elaborato 3636-04-00400).

Per le aree più a monte, nel PdB sono state eseguite (con analisi in moto uniforme delle condizioni di deflusso nella sezione) verifiche di adeguatezza idraulica di una serie di attraversamenti, prevalentemente sul Fosso Calcinara, che risultano tutti inadeguati al deflusso della piena cinquantennale (colore rosso). La sezione di imbocco della tombinatura terminale del Calcinara è stata anche verificata con la stessa metodologia ed è risultata inadeguata al deflusso della piena duecentennale (colore arancione).

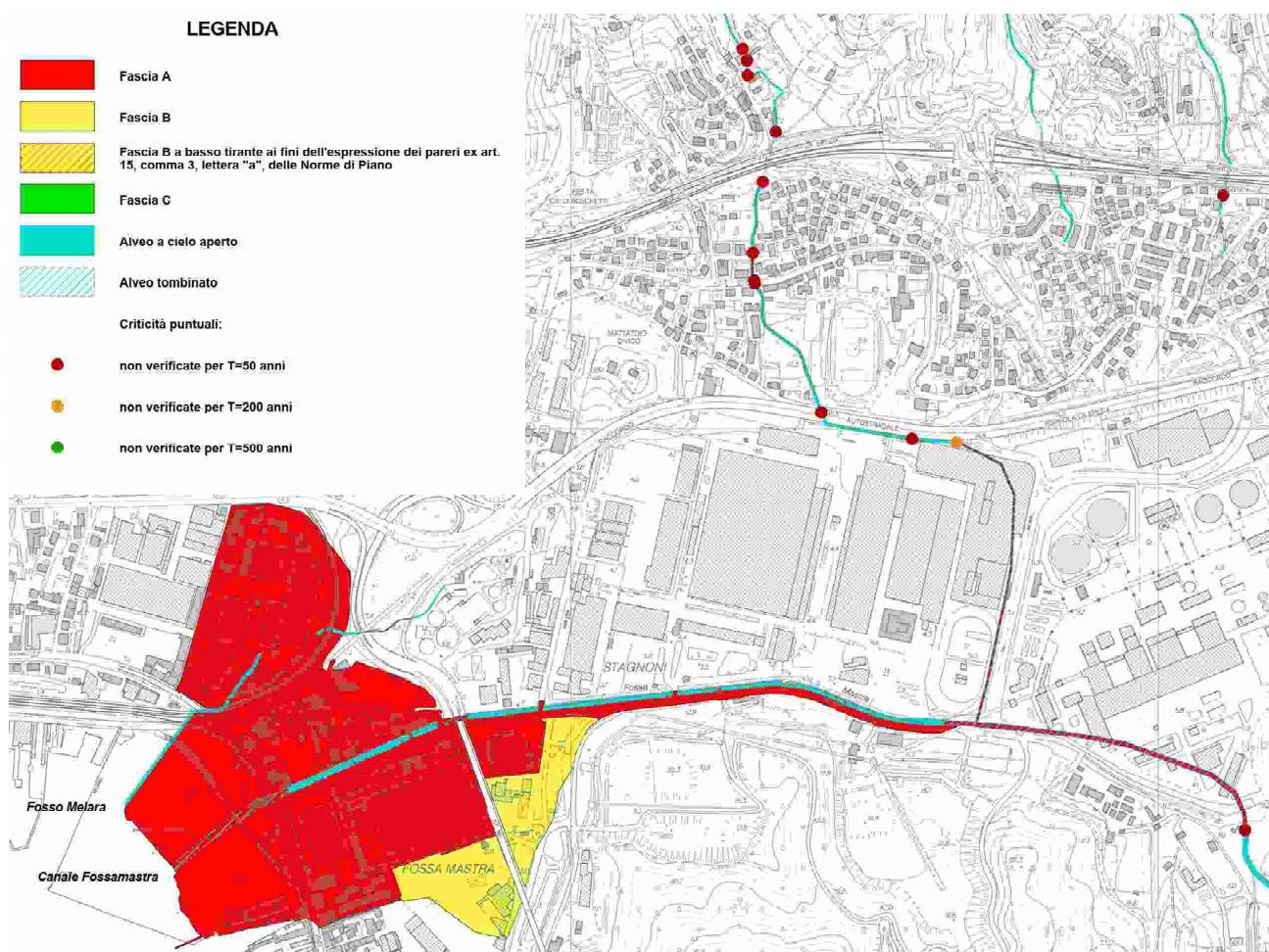


Figura 1 – Aree di pericolosità idraulica (fasce fluviali) da Piano di Bacino vigente.

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

Le analisi idrauliche per la caratterizzazione dell'idrodinamica di piena dei corsi d'acqua in studio nel bacino del Fossamastra 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 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 per gli attraversamenti oggetto di verifica puntuale e dalla documentazione relativa a studi o progetti pregressi che è stato possibile acquisire, come meglio descritto nell'elaborato 3636-02-00100.

In particolare per la geometria del tratto terminale oggetto di recente sistemazione idraulica la geometria considerata deriva dagli elaborati di progetto di quest'ultima (Comune della Spezia, 2010; Autorità Portuale, 2016), mentre la rappresentazione del tratto più a monte fino alla confluenza del Calcinara si basa sul recente rilievo eseguito nell'ambito degli studi predisposti da Leonardo S.p.A. (2018-2019). Di grande utilità per la ricostruzione della geometria dei tratti tombati e a cielo aperto del tratto terminale del Fosso di Calcinara, del canale Fossamastra a monte della confluenza di quest'ultimo e del Fosso Tombone sono risultati gli elaborati progettuali "storici" relativi a interventi di sistemazione eseguiti da ENEL (1971). Le risultanze di una videoispezione eseguita da privati ha inoltre consentito di ricostruire la geometria del tratto terminale tombato del rio Colombiera.

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 in alcuni istanti temporali dell'evento significativi ai fini della definizione della dinamica 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 145 sezioni trasversali, che rappresentano la geometria degli alvei incisi del canale Fossamastra e dei fossi Calcinara, Tombone e Colombiera.

Le sezioni trasversali che rappresentano i corsi d'acqua costituenti il sistema idrodinamico del Fossamastra sono suddivise in 4 rami di modello.

- Il ramo principale del canale Fossamastra, caratterizzato da una lunghezza complessiva di sezioni effettive pari a circa 2573 m. In particolare l'inizio del modello si localizza ad una distanza pari a circa 500 m a monte del piazzale ove è ubicato il terminal ENEL per poi estendersi fino alla confluenza nel Mar Ligure; su questo ramo sono presenti 63 sezioni che descrivono il tratto a cielo aperto di monte, il tratto tombinato a doppia canna di via Valdilocchi in corrispondenza della centrale termoelettrica e il tratto terminale (in parte a cielo aperto e in parte tombato), che dallo stabilimento Leonardo si estende fino allo sbocco in mare.
- Il ramo del Fosso Calcinara, caratterizzato da una lunghezza complessiva di simulazione pari a 1902 m. In particolare il modello si estende a partire dal Bioasilo di Carpanedo (localizzato a circa 515 m a monte dell'attraversamento della Linea Ferroviaria) fino alla confluenza nel canale di Fossamastra; su questo

ramo sono presenti 57 sezioni trasversali che descrivono i tratti a cielo aperto e tombati, questi ultimi presenti nella parte terminale del fosso Calcinara, da poco a monte della confluenza del rio Colombiera fino alla confluenza nel Fossamastra.

- Il ramo del fosso Colombiera, caratterizzato da una estensione di simulazione pari a 288 m, rappresenta il tratto tombato di questo corso d'acqua fino alla sua confluenza nel Calcinara; questo ramo è descritto con 9 sezioni trasversali.
- Il ramo del fosso Tombone, caratterizzato da una lunghezza complessiva di simulazione pari a circa 830 m. In particolare il modello si estende a partire da valle dell'attraversamento di via Valdilocchi fino alla confluenza in Calcinara ed è costituito da 16 sezioni trasversali che ne descrivono i tratti a cielo aperto e tombinati.

NOTA: il Fosso Tombone è stato oggetto di una specifica analisi<sup>1</sup> delle condizioni di pericolosità idraulica, eseguita da chi scrive e annessa al presente studio in virtù di specifico accordo tra F.i.l.s.e. S.p.A. e il Comune, riguardante il tratto più a monte di quello indagato nello studio del 2019 (dall'incrocio tra via delle Pianazze e via Soggiano fino alla confluenza in Calcinara). Le risultanze di tale studio sono state considerate nel presente elaborato per la proposta di perimetrazione delle fasce di pericolosità.

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. Per attraversamenti e tombinature viene fornita anche la quota di 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).

---

<sup>1</sup> F.i.l.s.e. S.p.A. – Città di La Spezia – Analisi delle condizioni di pericolosità idraulica dell'area ex ENEL in località Pianazze. HYDRODATA S.p.A., elab.3636-01-00100, dicembre 2020.



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

Ramo	Descrizione	Sezione	Progressiva m	Fondo alveo m s.m.	Intradosso m s.m.	Intradosso canna 2 m s.m.
-	-	-	-	-	-	-
Fossamastra		1	0,00	12,81		
Fossamastra		2	50,00	13,57		
Fossamastra		3	100,00	10,86		
Fossamastra		4	150,00	11,87		
Fossamastra		5	200,00	11,49		
Fossamastra		6	250,00	10,26		
Fossamastra		7	300,00	9,48		
Fossamastra		8	350,00	8,99		
Fossamastra		9	400,00	8,99		
Fossamastra		10	450,00	7,59		
Fossamastra		10.5	497,00	7,00		
Fossamastra	vasca	11	500,00	7,00		
Fossamastra	FM_C1 - imbocco culvert	12	505,00	7,00	8,50	8,42
Fossamastra	sbocco culvert inizio pennelli	14	1096,30	2,00	4,70	4,70
Fossamastra	fine pennelli	15	1105,96	2,02		
Fossamastra		16	1111,79	2,20		
Fossamastra		17	1221,75	1,83		
		17.1	1334,73	1,76		
Fossamastra	monte FM_P5	18	1339,51	1,76	3,30	
Fossamastra	valle FM_P5	19	1345,51	1,76		
		19.1	1350,00	1,76		
Fossamastra		20	1468,39	1,18		
		20.1	1529,00	0,45		
Fossamastra	monte FM_P4	21	1533,13	0,41	2,60	
Fossamastra	valle FM_P4	22	1545,35	0,28		
		22.1	1548,90	0,24		
Fossamastra		23	1647,31	0,24		
Fossamastra		24	1747,18	0,29		
		24.1	1749,18	-1,52		
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	2,90	
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55		
Fossamastra		27	1783,34	-1,57		
Fossamastra		28	1806,14	-1,63		
Fossamastra		29	1816,64	-1,64		
Fossamastra		30	1829,79	-1,67		
Fossamastra		31	1839,44	-1,69		
Fossamastra		32	1854,29	-1,72		
Fossamastra		33	1867,54	-1,76		
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	2,75	
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93		
Fossamastra		36	1958,50	-1,93		
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	2,88	
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96		
Fossamastra		38	1998,21	-2,01		
Fossamastra		39	2033,21	-2,08		
Fossamastra		40	2074,01	-2,16		
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	2,57	
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20		
Fossamastra		42	2101,66	-2,22		
Fossamastra		43	2118,29	-2,25		

Ramo	Descrizione	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Intradosso	Intradosso canna 2
			m	m s.m.	m s.m.	m s.m.
Fossamastra		44	2171,60	-2,35		
Fossamastra		45	2208,50	-2,43		
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	1,30	
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53		
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83		
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95		
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12		
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70		
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30		
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96		
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65		
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35		
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00		
Tombone		57	0,00	9,30		
Tombone		58	94,12	7,55		
Tombone		59	110,10	7,24		
Tombone		60	176,32	5,95		
Tombone		61	195,66	5,57		
Tombone	FM_P12	61,1	211,66	5,26	6,81	
Tombone	FM_P12	61,1	217,66	5,22		
Tombone		61,2	220,00	5,10		
Tombone		62	283,39	3,87		
Tombone		62,5	328,72	3,68		
Tombone	imbocco FM_C5	63	331,72	3,67	5,52	
Tombone	FM_C5	64	346,94	3,59		
Tombone	FM_C5	65	360,33	3,53		
Tombone	FM_C5	66	375,49	3,45		
Tombone	FM_C5	67	561,79	3,29		
Tombone	FM_C5	68	596,41	3,26		
Tombone	FM_C5	69	649,23	3,21		
Tombone	FM_C5	70	678,60	3,18		
Tombone	sbocco FM_C5	71	829,38	3,05		
Calcinara		109	0,00	23,28		
Calcinara		108	21,90	22,68		
Calcinara		107	36,63	22,79		
Calcinara		106	66,90	22,66		
Calcinara		105	105,08	21,37		
Calcinara		104	141,40	19,40		
Calcinara		103	205,63	18,26		
Calcinara	monte FM_P11	102	233,90	17,75	18,55	
Calcinara	valle FM_P11	101	240,22	17,75		
Calcinara	monte FM_P10	100	246,35	17,71	18,23	
Calcinara	valle FM_P10	99	252,87	17,68		
Calcinara	monte FM_P9	98	271,63	17,61	19,01	
Calcinara	valle FM_P9	97	277,90	17,60		
Calcinara		96	306,41	16,83		
Calcinara		95	329,80	16,58		
Calcinara		94	355,94	15,61		
Calcinara		93	380,74	15,14		
Calcinara		92	410,60	14,60		

Ramo	Descrizione	Sezione	Progressiva m	Fondo alveo m s.m.	Intradosso m s.m.	Intradosso canna 2 m s.m.
-	-	-				
Calcinara	monte FM_C8	91	428,80	13,63	15,13	
Calcinara	valle FM_C8	90	516,30	13,00		
Calcinara	monte briglia	89	520,79	12,94		
Calcinara	valle briglia	88,3	522,79	12,34		
Calcinara		88,2	555,31	12,05		
Calcinara		88,1	595,11	11,61		
Calcinara		88	626,75	11,43		
Calcinara	monte FM_C9	87,2	643,27	11,30	12,30	
Calcinara	valle FM_C9	87,1	678,72	10,80		
Calcinara	monte FM_P8	87	686,30	10,25	12,30	
Calcinara	valle FM_P8	86	698,74	10,24		
Calcinara		85,3	715,35	10,02		
Calcinara		85,2	737,60	9,73		
Calcinara		85,1	754,43	9,51		
Calcinara		85	770,17	9,31		
Calcinara		84,3	781,39	9,26		
Calcinara		84,2	806,66	9,15		
Calcinara		84,15	833,10	8,68		
Calcinara		84,1	860,63	8,20		
Calcinara		84,05	898,11	7,74		
Calcinara		84	922,87	7,44		
Calcinara	monte briglia	83	943,09	7,37		
Calcinara	valle briglia	82,1	944,09	6,37		
Calcinara	monte FM_P7	82	949,69	6,30	8,40	
Calcinara	valle FM_P7	81	959,69	6,20		
Calcinara		80	989,94	5,80		
Calcinara	monte FM_P6	79	1145,09	4,67	6,77	
Calcinara	valle FM_P6	78,2	1151,09	4,66		
Calcinara		78,1	1194,39	4,60		
Calcinara		78,05	1198,39	4,50		
Calcinara	monte FM_C7	78	1200,39	4,50	6,75	
Calcinara	confluenza scatolare	77,1	1397,94	3,42		
Calcinara	valle FM_C7	77	1460,85	3,08		
Calcinara		76	1465,35	3,07		
Calcinara	confl. Tombone	75	1601,52	2,77		
Calcinara		74	1715,79	2,52		
Calcinara		73,5	1725,79	2,50		
Calcinara	monte FM_C4	73	1727,79	2,49	6,90	
Calcinara	valle FM_C4	72	1902,35	2,20		
Colombiera		110	0,00	6,00		
Colombiera		111	2,80	5,98		
Colombiera	imbocco FM_C6	112	3,80	5,97	7,27	
Colombiera	FM_C6	113	23,30	5,84		
Colombiera	FM_C6	114	141,30	5,02		
Colombiera	FM_C6	115	212,18	4,53		
Colombiera	FM_C6	116	233,10	4,39		
Colombiera	FM_C6	117	267,40	4,15		
Colombiera	sbocco FM_C6	118	288,00	4,01		

Tabella 1 – Anagrafica delle sezioni inserite nel modello numerico.

### 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 (descritto nel capitolo precedente), 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 utilizzata come base topografica di partenza il modello digitale del terreno da volo LiDAR acquisito dal MATTM, ad una risoluzione spaziale di circa 1,0 x 1,0 m.

La definizione della dimensione del passo spaziale della griglia rettangolare, 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.

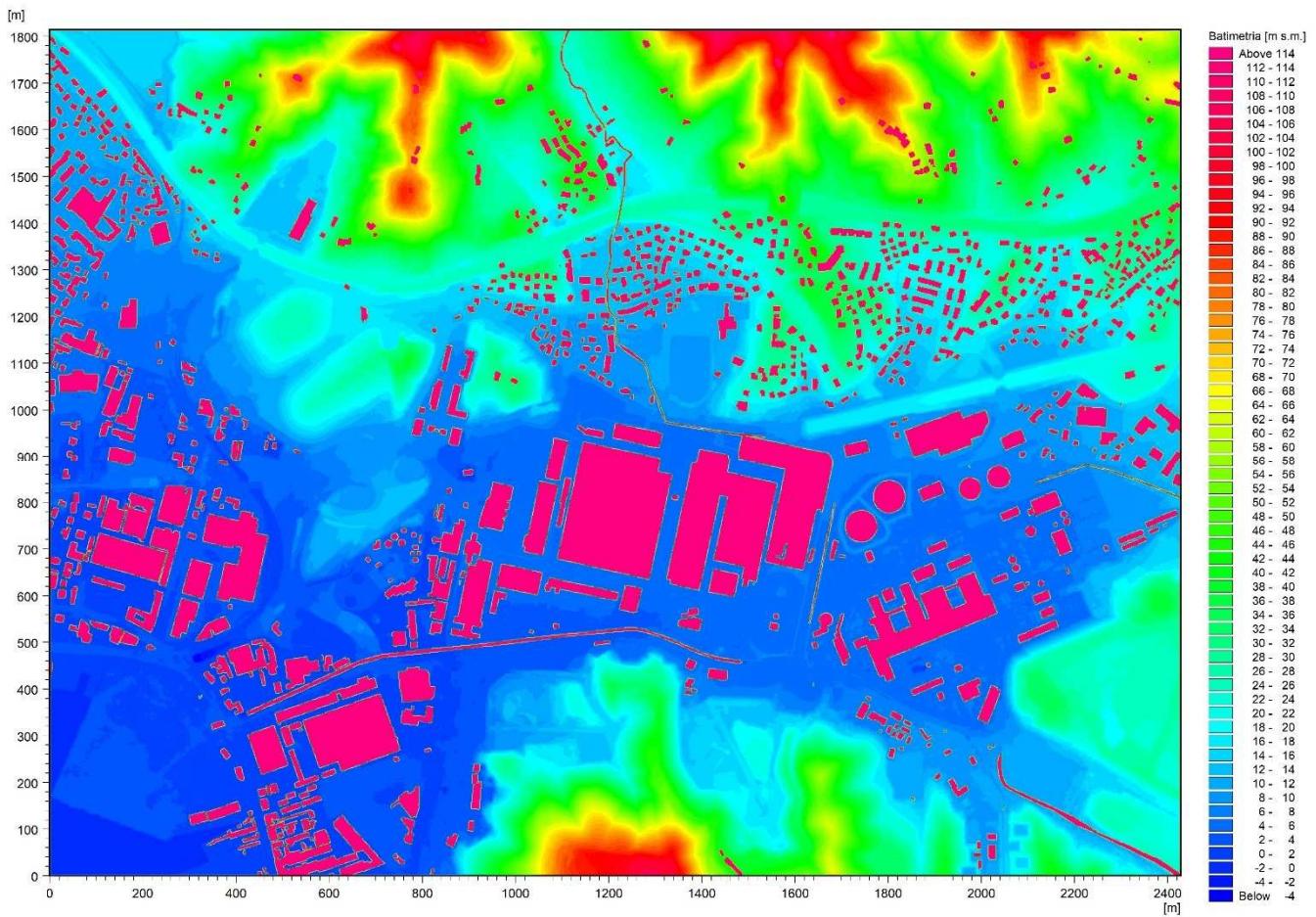
Nel caso in esame la scelta è condizionata dalla necessità di rappresentare con sufficiente dettaglio la geometria delle aree allagabili, delle strade, delle strutture interferenti e delle possibili vie di deflusso conseguenti a fenomeni di esondazione. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo piuttosto fitta, a maglia 2,0 x 2,0 m, composta da 908 righe e 1215 colonne (1.103.220 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 (aree con quote superiori ai 119 m s.m.) 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).

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 della foto aerea più recente disponibile (Google, 2018).



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

Poiché dalle simulazioni eseguite è risultata la presenza di rilevanti flussi di portata in uscita dal dominio del modello 2D verso Sud (come rappresentato in dettaglio nei capitoli che seguono), è risultato necessario, per completare la descrizione degli allagamenti conseguenti alle esondazioni del Canale Fossamastra, estendere la rappresentazione modellistica anche a quest’area.

È stato quindi allestito un ulteriore modello 2D indipendente dal precedente, la cui batimetria, definita secondo le medesime modalità già descritte, è rappresentata in Figura 4. In colore grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili.

Tale modello non è accoppiato a un modello monodimensionale, bensì riceve l’input di portata direttamente dal confine Nord del dominio di calcolo, equivalente alla fuoriuscita dal confine Sud del modello precedentemente descritto; la simulazione eseguita in questo caso è puramente bidimensionale.

La batimetria del modello “Sud” presenta la medesima dimensione della griglia di calcolo (2,0x2,0 m) ed è estesa fino alle aree fluviali di pertinenza del Fosso Pagliari, includendo anche la Darsena di recente realizzazione. Per la definizione di quest’ultima è stato necessario modificare il DTM LiDAR sulla base delle geometrie desumibili dai disegni di progetto, come più dettagliatamente descritto nella relazione idraulica relativa al Fosso Pagliari (bacino 03; v. elaborato 3636-04-00200).

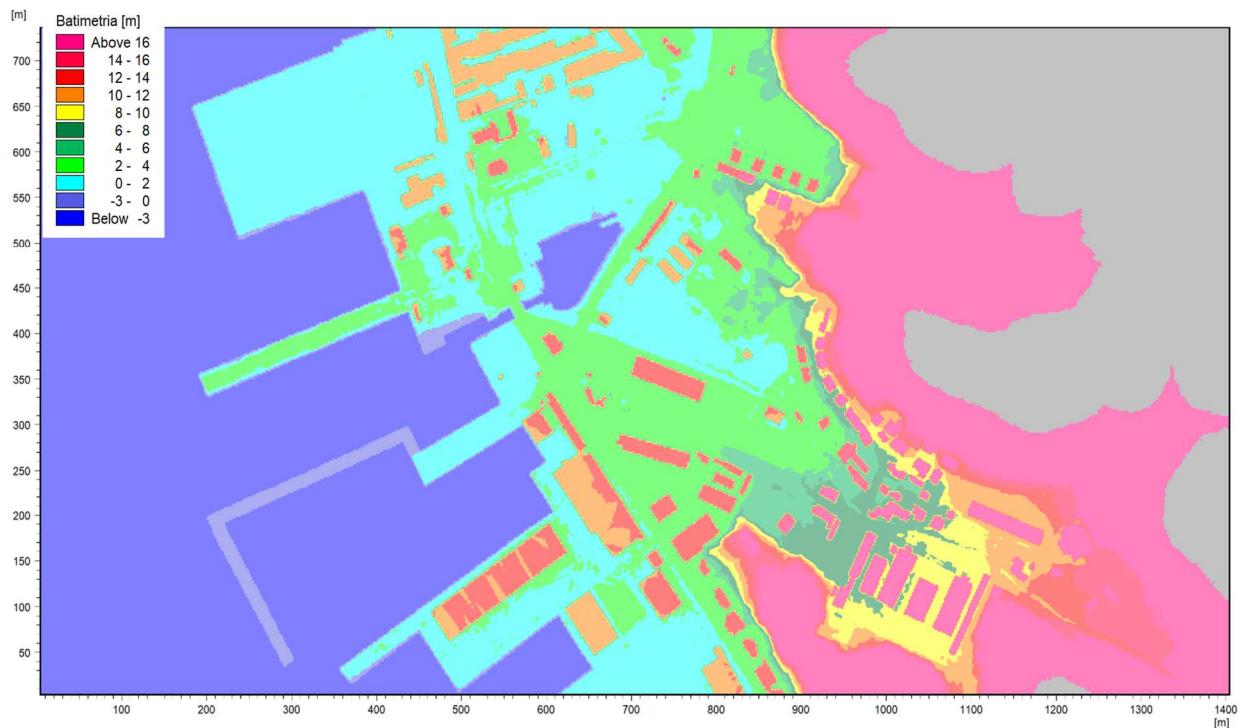


Figura 4 – Batimetria del modello 2D dell’area a Sud del Fossamastra a maglia 2,0x2,0 m (dominio di calcolo complessivo).

#### 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 applicata ai modelli è stata differenziata tra alveo inciso (e quindi modellazione monodimensionale) e aree goleinali (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 3), e successivamente, come riscontro, valori tipici di riferimento riscontrabili in letteratura tecnica (Tabella 2).

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*s</sup> ]	Gauckler Strickler Ks [m <sup>1/3*s<sup>-1</sup>]</sup>
Pareti di cemento perfettamente lisciato. 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 lisciato. 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 orinaria 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 ci 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 2 – Valori tipici di riferimento da letteratura tecnica dei coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso.

Descrizione corso d'acqua	Coeff. di scabrezza di Gauckler Strickler Ks [m <sup>1/3*s<sup>-1</sup>]</sup>
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 3 – Coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso indicati nelle NTA del vigente Piano di Bacino.

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  $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  lungo i tratti di alveo naturale e di  $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  lungo i tratti rivestiti, 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  $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , mentre a quelle pavimentate un coefficiente di  $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

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.

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  $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$  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 sistema idrodinamico del Fossamastra l'analisi idraulica è stata svolta in funzione:

1. degli scenari idrologici "reali" (dinamiche di esondazione effettive) 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);
2. degli scenari idrologici "teorici" caratterizzati da tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni in assenza degli effetti di laminazione dovuti agli allagamenti occorsi più a monte; questi scenari sono relativi al tratto d'asta terminale del canale Fossamastra da valle della confluenza del Calcinara allo sbocco in mare.

Per il modello 2D di estensione a Sud dell'area indagata, l'analisi idraulica è avvenuta considerando come condizione al contorno in input gli idrogrammi di portata (per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni) in uscita dal lato Sud del dominio di calcolo del modello 2D principale, estratto dalle simulazioni omologhe (con riferimento al più gravoso punto 2 del precedente elenco). L'input è stato inserito sulle singole celle del modello, coincidenti con quelle di uscita del modello principale.

La condizione idrodinamica di valle per tutti gli scenari simulati, sia con i modelli accoppiati che per quello puramente bidimensionale, è costituita dal livello idrico massimo di mare riferibile a un evento di mareggiate 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 sovralzo del livello di medio mare all'occorrere di un evento meteomarino 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 sovralzo dovuto al frangimento (wave set-up).

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

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 di esondazione effettiva nel bacino del Fossamastra

In questi scenari, simulati con il modello accoppiato 1D+2D e maggiormente gravosi per i rami di monte, sono stati assegnati in input lungo le aste fluviali costituenti il sistema idrodinamico del Fossamastra gli idrogrammi per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni generati dai sottobacini elementari definiti dall'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 principali (Calcinara, Fossamastra) 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 modifica della forma d'onda di cui sopra, ma ipotizzando una traslazione rigida dell'idrogramma in input.

- Condizioni al contorno sull'asta del Fosso Calcinara:
  - portate in ingresso nella sezione di monte (sezione 109) secondo l'idrogramma di riferimento generato dal bacino afferente FM\_CA-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 13,44 m<sup>3</sup>/s, 15,90 m<sup>3</sup>/s, 17,52 m<sup>3</sup>/s;
  - portate per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni generate dal bacino residuo (compreso tra le sezioni di chiusura idrologiche FM\_CA-B e FM\_CA-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 109 e 78, funzionali a ottenere, nella sovrapposizione teorica senza effetti di laminazione, i valori al colmo nella sezione idrologica FM\_CA-A rispettivamente pari a 23,21 m<sup>3</sup>/s, 28,13 m<sup>3</sup>/s, 31,35 m<sup>3</sup>/s.
  - portata concentrata inserita a valle della sezione trasversale 78 (nel tratto tombinato) generata dal bacino minore FM\_A2-A, immediatamente a monte della confluenza del fosso Colombiera; le

portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 11,54 m<sup>3</sup>/s, 13,95 m<sup>3</sup>/s, 15,52 m<sup>3</sup>/s.

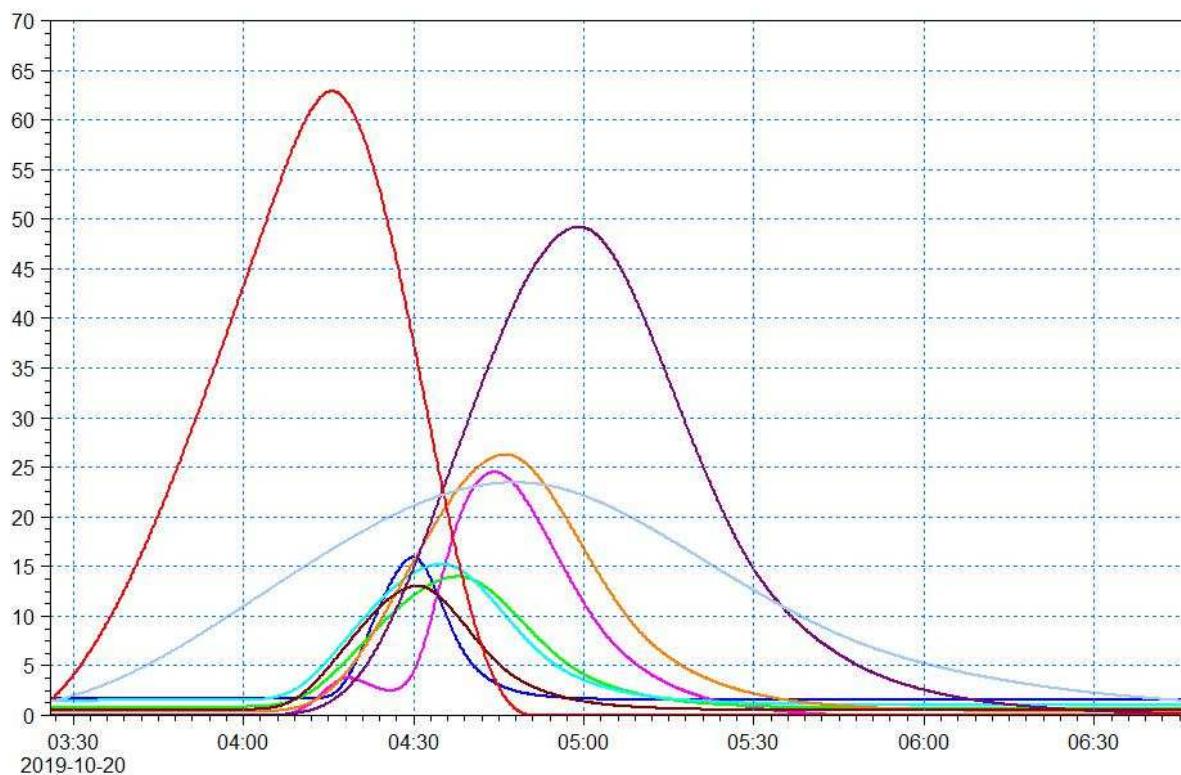
- Condizione al contorno sull'asta del rio Colombiera: portate in ingresso nella sezione di monte del modello (sezione 110) secondo l'idrogramma di riferimento generato dal bacino afferente FM\_CO-A per gli scenari a tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni. Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 12,60 m<sup>3</sup>/s, 15,19 m<sup>3</sup>/s, 16,89 m<sup>3</sup>/s.
- Condizione al contorno sull'asta del Fosso Tombone: portate in ingresso nella sezione di monte del modello (sezione 57) secondo l'idrogramma di riferimento generato dal bacino afferente FM\_TO-A per gli scenari a tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni. Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 21,61 m<sup>3</sup>/s, 26,25 m<sup>3</sup>/s, 29,30 m<sup>3</sup>/s.

NOTA: tali portate sono i valori al colmo idrologici per il tratto terminale del Fosso; nella specifica analisi idraulica già citata (studio Fi.l.s.e. 2020 annessa al presente studio – elab. 3636-01-00100) è stato analizzato il tratto più a monte, mostrando come si verifichino esondazioni già in quest'ultimo, per cui la portata effettiva afferente al tratto in studio risulta in realtà inferiore. Lo scenario in esame per il Fosso Tombone risulta quindi più propriamente riferibile a condizioni “in assenza di laminazione”.

- Condizioni al contorno sull'asta del Canale Fossamastra:
  - portate in ingresso nella sezione di monte (sezione 1) secondo l'idrogramma di riferimento generato dal bacino afferente FM-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 40,43 m<sup>3</sup>/s, 49,19 m<sup>3</sup>/s, 54,97 m<sup>3</sup>/s;
  - portata concentrata inserita a valle della sezione trasversale 12 (nella canna di sinistra del tratto combinato a valle della vasca di ripartizione) generata dal bacino minore FM\_A1-A; le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 10,82 m<sup>3</sup>/s, 13,00 m<sup>3</sup>/s, 14,42 m<sup>3</sup>/s;
  - portate per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni generate dal bacino residuo (compreso tra le sezioni di chiusura idrologiche FM-B e FM-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 15 e 45 (che coincidono rispettivamente con l'inizio del tratto a cielo aperto a valle della confluenza del Calcinara e l'inizio del tratto combinato di attraversamento dell'area portuale, a valle di Viale S. Bartolomeo) funzionali a ottenere, nella sovrapposizione teorica senza effetti di laminazione, i valori al colmo nella sezione idrologica FM-A rispettivamente pari a 91,50 m<sup>3</sup>/s, 132,30 m<sup>3</sup>/s, 159,20 m<sup>3</sup>/s. Tali input di portata sono forniti come due idrogrammi separati: uno derivante dalla differenza tra gli idrogrammi di calcolo nelle sezioni FM-A e FM-B, più un contributo integrativo (come definito nella relazione idrologica) per ottenere valori di portata di piena di progetto coerenti con quelli definiti dalla pianificazione vigente.
- Condizione al contorno di valle in corrispondenza della foce nel mar Ligure sull'asta del Fossamastra (nel modello MIKE11): livello idrico costante durante tutta la simulazione, 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 Fossamastra e affluenti. 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 in Figura 5 gli idrogrammi idrologici per tempo di ritorno di 200 anni, assegnati in input come precedentemente descritto.



**Figura 5 – Idrogrammi in input sulle aste fluviali del modello del Fossamastra per tempo di ritorno di 200 anni.**

#### 4.2 Scenari in assenza di laminazione (tratto di Fossamastra a valle del Calcinara)

In questi scenari, simulati con il modello accoppiato 1D+2D e più gravosi per la porzione di modello di valle, si è rappresentato il funzionamento idrodinamico della sola asta del canale Fossamastra nel suo tratto terminale, compreso tra lo sbocco della tominatura a valle della confluenza del Fosso Calcinara e la foce nel mar Ligure.

In input in testa al tratto si sono cautelativamente assegnati gli idrogrammi idrologici teorici definiti alla sezione di foce (bacino FM-A) per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni, trascurando quindi gli effetti di laminazione e l'effettiva capacità di portata dei rami più a monte (Figura 6).

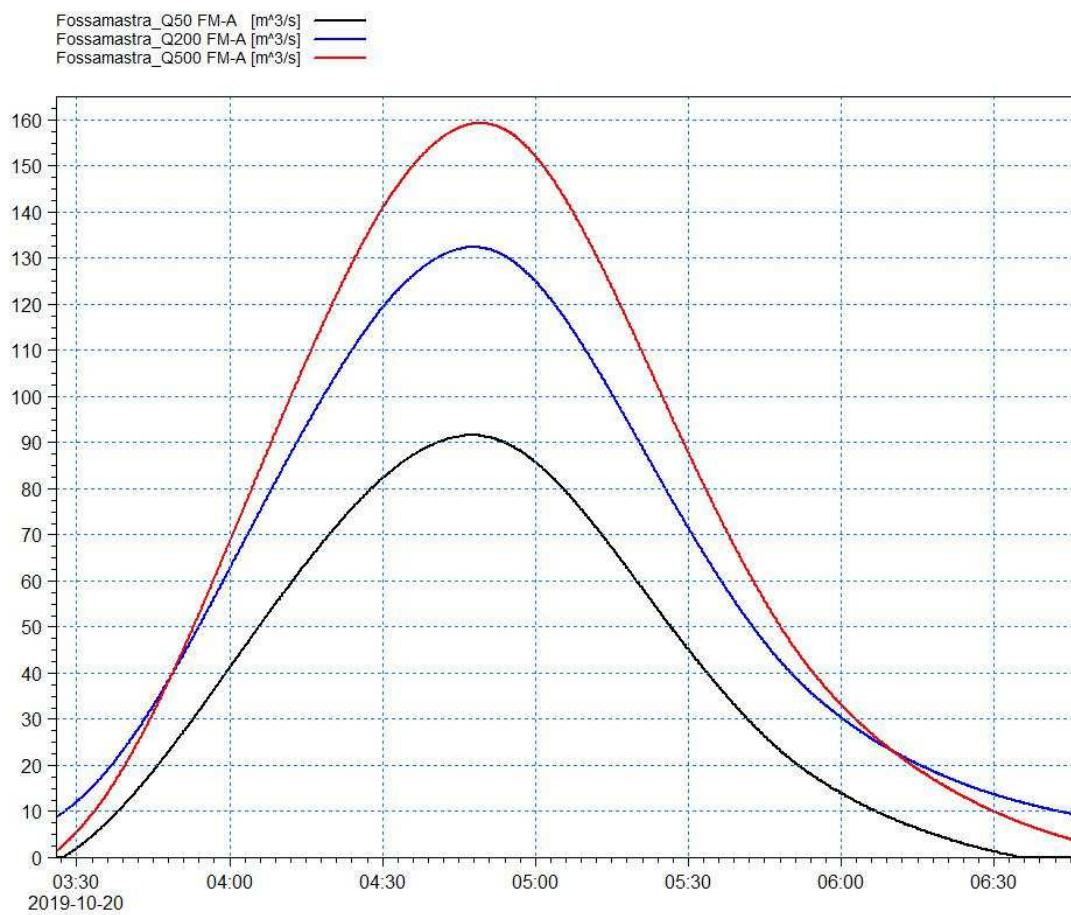


Figura 6 – Idrogrammi idrologici a tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni assegnati per l’analisi del tratto terminale del Fossamastra (sezione 15).

- Condizioni al contorno sull’asta del canale Fossamastra:
  - portate per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni generate del bacino chiuso nella sezione idrologica FM-A aventi valori al colmo rispettivamente pari a 91,50 m<sup>3</sup>/s, 132,30 m<sup>3</sup>/s, 159,20 m<sup>3</sup>/s;
  - in corrispondenza della foce nel mar Ligure: 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 dell’alveo scoperto 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.

Poiché nel tratto non interessato dai recenti interventi di sistemazione, compreso tra lo sbocco della tombinatura e l’attraversamento della strada privata OTO (sezione 24.1), si verificano rilevanti fenomeni di esondazione, sono state condotte ulteriori analisi in moto permanente per la verifica dell’adeguatezza idraulica del tratto terminale sistemato (fino alla foce - sezione 56) nell’ipotesi di deflusso dell’intero colmo di piena

idrologico. In questo caso la simulazione è stata condotta con il solo modello MIKE11, senza collegamenti esterni.

#### 4.3 Scenari idrodinamici per il modello 2D dell'area Sud

Per il modello 2D di estensione a Sud dell'area indagata, l'analisi idraulica è avvenuta come già detto considerando come condizione al contorno in input gli idrogrammi di portata (per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni) in uscita dal lato Sud del dominio di calcolo del modello 2D principale, estratto dalle simulazioni omologhe (con riferimento agli scenari del capitolo 4.2).

In particolare tali idrogrammi sono stati estratti sulla linea che congiunge tutte le celle bagnate (interessate da flusso in direzione Sud) subito a monte del confine del dominio di calcolo del modello principale. Essi sono rappresentati in Figura 7.

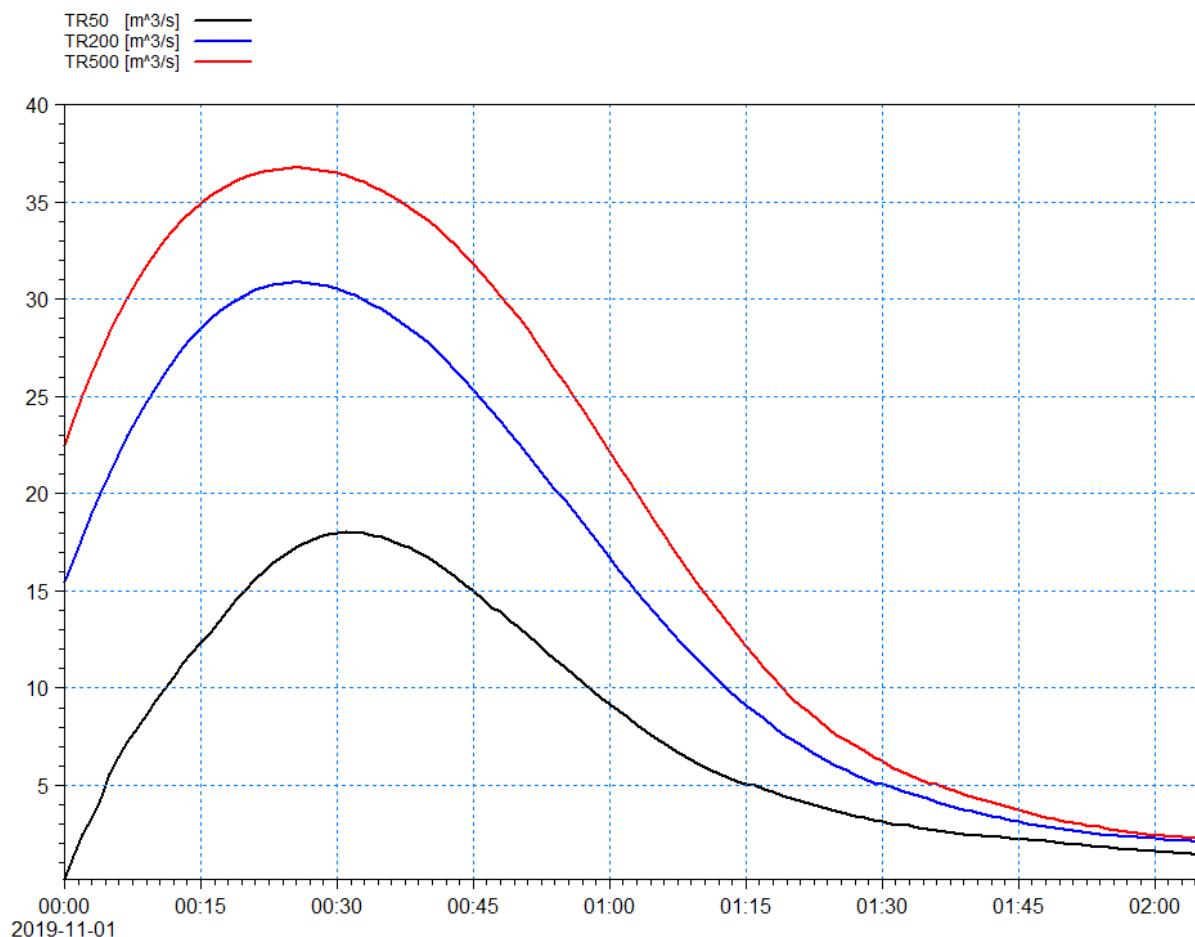


Figura 7 – Idrogrammi in input al modello 2D dell'area “Sud” per tempo di ritorno assegnato.

I valori al colmo degli idrogrammi sopra rappresentati, per tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni, sono caratterizzati rispettivamente da valori al colmo di circa 18, 31 e 37 m<sup>3</sup>/s.

Analogamente agli altri scenari si è assunta come condizione al contorno di mare un valore di livello idrico costante (imposto sulle celle “marine” al confine del dominio di calcolo del modello 2D) pari a 0,5 m s.m.

## 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 Scenari di esondazione effettiva sull’intero ambito di studio

I risultati di seguito esposti fanno riferimento agli scenari di simulazione in cui come input di portata sono stati inseriti nei vari tratti gli idrogrammi di portata generati dai diversi sottobacini considerati nell’analisi idrologica (rif. capitolo 4.1).

Tali scenari rappresentano quindi un assetto idraulico “realistico” delle aree indagate, ovvero effettivo (il deflusso nei tratti di valle tiene conto della capacità di portata dei tratti più a monte: le portate al colmo effettive sono inferiori a quelle teoriche in ragione dei fenomeni di esondazione e laminazione che si verificano a monte).

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

Nella Tabella 4 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico del bacino del Canale Fossamastra (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

Nelle immagini da Figura 8 a Figura 13 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Note</b>	<b>Sezione</b>	<b>Progressiva</b>	<b>Fondo alveo</b>	<b>Tirante</b>	<b>Livello idrico</b>	<b>Carico Totale</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità</b>	<b>Froude</b>
-	-	-	<b>m</b>	<b>m s.m.</b>	<b>m</b>	<b>m s.m.</b>	<b>m s.m.</b>	<b>m3/s</b>	<b>m/s</b>	-
Fossamastra		1	0,00	12,81	2,03	14,84	15,40	40,43	3,31	0,74
Fossamastra		2	50,00	13,57	0,79	14,36	15,09	40,43	3,79	1,36
Fossamastra		3	100,00	10,86	2,69	13,55	13,79	40,42	2,17	0,42
Fossamastra		4	150,00	11,87	1,48	13,35	13,78	40,41	2,90	0,76
Fossamastra		5	200,00	11,49	1,42	12,91	13,74	39,27	4,05	1,08
Fossamastra		6	250,00	10,26	1,57	11,83	11,97	38,71	1,65	0,42
Fossamastra		7	300,00	9,48	2,22	11,70	11,96	39,80	2,24	0,48
Fossamastra		8	350,00	8,99	2,21	11,20	11,88	40,31	3,65	0,78
Fossamastra		9	400,00	8,99	1,58	10,57	11,37	40,31	3,97	1,01
Fossamastra		10	450,00	7,59	2,21	9,80	10,33	40,31	3,22	0,69
Fossamastra		10.5	497,00	7,00	2,47	9,47	9,95	40,38	3,07	0,62
Fossamastra	vasca	11	500,00	7,00	2,56	9,56	9,78	40,39	2,06	0,41
Fossamastra	FM_C1 - imbocco culvert	12	505,00	7,00	2,54	9,54	9,73	40,39	1,94	0,39
Fossamastra	sbocco culvert inizio pennelli	14	1096,30	2,00	4,98	6,98	7,10	20,11	1,54	0,22
Fossamastra	fine pennelli	15	1105,96	2,02	3,38	5,40	6,87	72,59	5,37	0,93
Fossamastra		16	1111,79	2,20	3,16	5,35	5,92	72,86	3,35	0,60
Fossamastra		17	1221,75	1,83	3,21	5,04	5,81	68,51	3,88	0,69
		17.1	1334,73	1,76	3,14	4,90	5,26	55,59	2,65	0,48
Fossamastra	monte FM_P5	18	1339,51	1,76	3,22	4,98	5,25	50,85	2,31	0,41
Fossamastra	valle FM_P5	19	1345,51	1,76	2,42	4,18	4,64	45,39	3,01	0,62
		19.1	1350,00	1,76	2,40	4,16	4,63	45,81	3,05	0,63
Fossamastra		20	1468,39	1,18	2,53	3,71	4,40	60,16	3,67	0,74
		20.1	1529,00	0,45	2,89	3,34	3,96	62,82	3,49	0,66
Fossamastra	monte FM_P4	21	1533,13	0,41	2,92	3,33	3,95	62,71	3,50	0,65
Fossamastra	valle FM_P4	22	1545,35	0,28	2,94	3,22	3,89	63,07	3,63	0,68
		22.1	1548,90	0,24	2,96	3,20	3,88	63,41	3,66	0,68
Fossamastra		23	1647,31	0,24	2,84	2,84	3,44	61,83	3,42	0,65
Fossamastra		24	1747,18	0,29	2,25	2,54	3,28	55,68	3,81	0,81
		24.1	1749,18	-1,52	2,66	1,14	1,74	55,67	3,44	0,67
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	2,82	1,30	1,53	56,06	2,13	0,41
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	2,73	1,18	1,43	56,12	2,21	0,43
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	2,76	1,19	1,41	56,30	2,07	0,40
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	2,80	1,17	1,38	56,37	2,04	0,39
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	2,80	1,16	1,37	56,33	2,04	0,39
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	2,82	1,15	1,36	56,27	2,03	0,39
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	2,83	1,14	1,35	56,25	2,02	0,38
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	2,84	1,12	1,33	56,44	2,02	0,38
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	2,87	1,11	1,32	56,60	2,01	0,38
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	2,82	1,01	1,31	57,61	2,42	0,46

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	-
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	2,87	0,94	1,25	57,63	2,45	0,46
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	2,91	0,98	1,18	57,20	1,96	0,37
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	2,94	0,99	1,17	57,55	1,87	0,35
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	2,95	0,99	1,17	58,58	1,89	0,35
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	2,87	0,86	1,05	57,66	1,91	0,36
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	2,94	0,86	1,04	57,50	1,86	0,35
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	3,00	0,84	1,03	57,97	1,93	0,36
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	3,05	0,87	1,03	57,81	1,79	0,33
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	3,07	0,87	1,03	57,98	1,78	0,32
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	3,09	0,87	1,03	58,71	1,77	0,32
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	3,12	0,87	1,03	60,33	1,77	0,32
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	3,15	0,80	0,98	62,23	1,88	0,34
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,24	0,81	0,98	62,69	1,84	0,33
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,27	0,82	0,96	62,57	1,65	0,29
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,36	0,83	0,96	62,75	1,61	0,28
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,61	0,78	0,84	62,87	1,09	0,18
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,70	0,75	0,81	62,93	1,06	0,18
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,83	0,71	0,76	63,01	1,03	0,17
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,32	0,62	0,66	63,30	0,92	0,14
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,93	0,63	0,66	63,68	0,81	0,12
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,54	0,58	0,61	64,29	0,73	0,10
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,22	0,57	0,59	64,63	0,65	0,08
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,92	0,57	0,59	64,97	0,59	0,07
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,52	65,10	0,54	0,06
Tombone		57	0,00	9,30	1,86	11,16	11,99	21,60	4,04	0,95
Tombone		58	94,12	7,55	1,88	9,43	10,24	21,58	3,97	0,93
Tombone		59	110,10	7,24	1,92	9,16	9,93	21,58	3,90	0,90
Tombone		60	176,32	5,95	2,17	8,12	8,72	21,58	3,43	0,74
Tombone		61	195,66	5,57	2,38	7,95	8,44	21,58	3,11	0,64
Tombone	FM_P12	61.1	211,66	5,26	2,73	7,99	8,24	18,29	2,23	0,43
Tombone	FM_P12	61.1	217,66	5,22	2,47	7,69	8,07	20,04	2,72	0,55
Tombone		61.2	220,00	5,10	2,50	7,60	8,05	21,20	2,99	0,60
Tombone		62	283,39	3,87	3,44	7,31	7,59	21,16	2,33	0,40
Tombone		62.5	328,72	3,68	3,81	7,49	7,58	14,53	1,36	0,22
Tombone	imbocco FM_C5	63	331,72	3,67	3,77	7,44	7,58	14,52	1,64	0,27
Tombone	FM_C5	64	346,94	3,59	3,84	7,43	7,57	14,52	1,64	0,27
Tombone	FM_C5	65	360,33	3,53	3,89	7,42	7,56	14,52	1,64	0,26
Tombone	FM_C5	66	375,49	3,45	3,96	7,41	7,55	14,52	1,64	0,26
Tombone	FM_C5	67	561,79	3,29	3,99	7,28	7,42	14,52	1,64	0,26
Tombone	FM_C5	68	596,41	3,26	4,00	7,26	7,40	14,51	1,63	0,26
Tombone	FM_C5	69	649,23	3,21	4,01	7,22	7,36	14,51	1,63	0,26
Tombone	FM_C5	70	678,60	3,18	4,02	7,20	7,34	14,51	1,63	0,26
Tombone	sbocco	71	829,38	3,05	4,04	7,09	7,23	14,50	1,63	0,26

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Note</b>	<b>Sezione</b>	<b>Progressiva</b>	<b>Fondo alveo</b>	<b>Tirante</b>	<b>Livello idrico</b>	<b>Carico Totale</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità</b>	<b>Froude</b>
-	-	-	<b>m</b>	<b>m s.m.</b>	<b>m</b>	<b>m s.m.</b>	<b>m s.m.</b>	<b>m3/s</b>	<b>m/s</b>	-
	FM_C5									
Calcinara		109	0,00	23,28	1,27	24,55	25,23	13,44	3,64	1,03
Calcinara		108	21,90	22,68	1,29	23,97	24,30	13,28	2,54	0,71
Calcinara		107	36,63	22,79	1,04	23,83	24,20	12,95	2,71	0,85
Calcinara		106	66,90	22,66	0,92	23,58	24,19	12,87	3,45	1,15
Calcinara		105	105,08	21,37	1,10	22,47	23,47	13,49	4,44	1,35
Calcinara		104	141,40	19,40	1,42	20,82	21,29	13,67	3,03	0,81
Calcinara		103	205,63	18,26	1,94	20,20	20,66	13,40	3,02	0,69
Calcinara	monte FM_P11	102	233,90	17,75	2,14	19,89	19,98	10,42	1,36	0,30
Calcinara	valle FM_P11	101	240,22	17,75	1,87	19,62	19,72	9,18	1,38	0,32
Calcinara	monte FM_P10	100	246,35	17,71	1,90	19,61	19,72	9,17	1,48	0,34
Calcinara	valle FM_P10	99	252,87	17,68	1,53	19,21	19,44	10,21	2,13	0,55
Calcinara	monte FM_P9	98	271,63	17,61	1,65	19,26	19,31	9,76	0,99	0,25
Calcinara	valle FM_P9	97	277,90	17,60	0,86	18,46	18,73	9,51	2,31	0,80
Calcinara		96	306,41	16,83	1,34	18,17	18,66	12,37	3,11	0,86
Calcinara		95	329,80	16,58	1,08	17,66	18,63	14,12	4,36	1,34
Calcinara		94	355,94	15,61	1,27	16,88	17,29	14,39	2,84	0,81
Calcinara		93	380,74	15,14	1,41	16,55	17,16	14,69	3,46	0,93
Calcinara		92	410,60	14,60	1,36	15,96	16,50	14,87	3,25	0,89
Calcinara	monte FM_C8	91	428,80	13,63	2,04	15,67	15,91	15,20	2,19	0,49
Calcinara	valle FM_C8	90	516,30	13,00	1,23	14,23	15,18	15,49	4,31	1,24
Calcinara	monte briglia	89	520,79	12,94	1,23	14,17	14,54	13,20	2,70	0,78
Calcinara	valle briglia	88.3	522,79	12,34	1,60	13,94	14,17	12,40	2,10	0,53
Calcinara		88.2	555,31	12,05	1,69	13,74	14,07	14,12	2,54	0,62
Calcinara		88.1	595,11	11,61	1,71	13,32	13,66	14,95	2,57	0,63
Calcinara		88	626,75	11,43	1,63	13,06	13,41	14,23	2,63	0,66
Calcinara	monte FM_C9	87.2	643,27	11,30	1,71	13,01	13,17	13,43	1,78	0,43
Calcinara	valle FM_C9	87.1	678,72	10,80	1,94	12,74	12,85	12,31	1,50	0,34
Calcinara	monte FM_P8	87	686,30	10,25	2,49	12,74	12,85	12,36	1,46	0,30
Calcinara	valle FM_P8	86	698,74	10,24	1,64	11,88	12,13	12,43	2,23	0,56
Calcinara		85.3	715,35	10,02	1,51	11,53	12,12	12,72	3,41	0,89
Calcinara		85.2	737,60	9,73	1,55	11,28	12,00	11,40	3,76	0,97
Calcinara		85.1	754,43	9,51	1,57	11,08	11,51	9,89	2,89	0,74
Calcinara		85	770,17	9,31	1,73	11,04	11,36	9,58	2,49	0,61
Calcinara		84.3	781,39	9,26	1,69	10,95	11,32	9,83	2,70	0,66
Calcinara		84.2	806,66	9,15	1,47	10,62	11,01	10,08	2,75	0,73
Calcinara		84.15	833,10	8,68	1,60	10,28	10,74	10,09	2,99	0,76
Calcinara		84.1	860,63	8,20	1,77	9,97	10,38	11,68	2,83	0,68
Calcinara		84.05	898,11	7,74	1,47	9,21	10,15	14,82	4,28	1,13
Calcinara		84	922,87	7,44	1,19	8,63	8,97	15,36	2,58	0,76
Calcinara	monte briglia	83	943,09	7,37	1,14	8,51	8,89	15,53	2,72	0,81
Calcinara	valle briglia	82.1	944,09	6,37	1,58	7,95	8,15	15,59	1,98	0,50

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	-
Calcinara	monte FM_P7	82	949,69	6,30	1,64	7,94	8,15	17,23	2,02	0,50
Calcinara	valle FM_P7	81	959,69	6,20	1,69	7,89	8,15	19,35	2,27	0,56
Calcinara		80	989,94	5,80	2,07	7,87	8,00	17,49	1,63	0,36
Calcinara	monte FM_P6	79	1145,09	4,67	3,12	7,79	7,85	17,13	1,05	0,19
Calcinara	valle FM_P6	78.2	1151,09	4,66	3,12	7,78	7,84	17,44	1,07	0,19
Calcinara		78.1	1194,39	4,60	3,16	7,76	7,83	17,97	1,16	0,21
Calcinara		78.05	1198,39	4,50	3,27	7,77	7,83	17,78	1,11	0,20
Calcinara	monte FM_C7	78	1200,39	4,50	3,23	7,73	7,83	19,36	1,40	0,25
Calcinara	confluenza scatolare	77.1	1397,94	3,42	4,03	7,45	7,63	20,75	1,88	0,30
Calcinara	valle FM_C7	77	1460,85	3,08	4,02	7,10	7,44	28,51	2,58	0,41
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,11	7,18	7,28	28,51	1,42	0,22
Calcinara	confi. Tombone	75	1601,52	2,77	4,32	7,09	7,18	28,45	1,36	0,21
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,51	7,03	7,18	38,67	1,74	0,26
Calcinara		73.5	1725,79	2,50	4,54	7,04	7,18	38,61	1,69	0,25
Calcinara	monte FM_C4	73	1727,79	2,49	4,54	7,03	7,18	38,61	1,74	0,26
Calcinara	valle FM_C4	72	1902,35	2,20	4,78	6,98	7,12	38,24	1,65	0,24
Colombiera		110	0,00	6,00	2,21	8,21	8,90	12,59	3,67	0,79
Colombiera		111	2,80	5,98	2,23	8,21	8,45	7,51	2,17	0,46
Colombiera	imbocco FM_C6	112	3,80	5,97	2,24	8,21	8,45	5,43	2,15	0,46
Colombiera	FM_C6	113	23,30	5,84	2,29	8,13	8,37	5,43	2,15	0,45
Colombiera	FM_C6	114	141,30	5,02	2,84	7,86	8,10	5,43	2,15	0,41
Colombiera	FM_C6	115	212,18	4,53	3,19	7,72	7,96	5,43	2,15	0,38
Colombiera	FM_C6	116	233,10	4,39	3,29	7,68	7,92	5,43	2,15	0,38
Colombiera	FM_C6	117	267,40	4,15	3,52	7,67	7,72	5,41	0,99	0,17
Colombiera	sbocco FM_C6	118	288,00	4,01	3,44	7,45	7,72	12,16	2,28	0,39

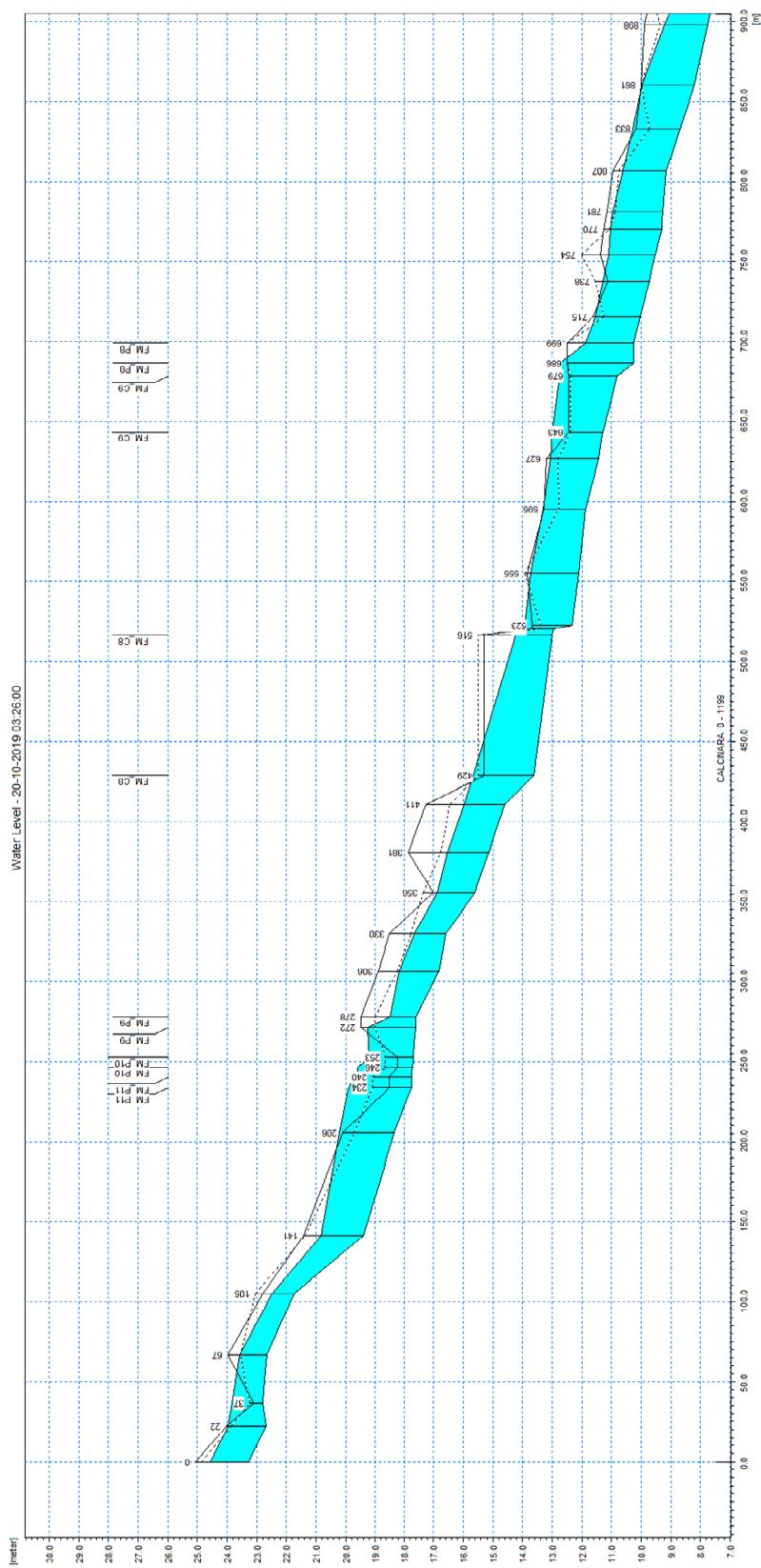
Tabella 4 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

Dall'analisi dei risultati ottenuti con il modello monodimensionale si evince quanto nel seguito descritto.

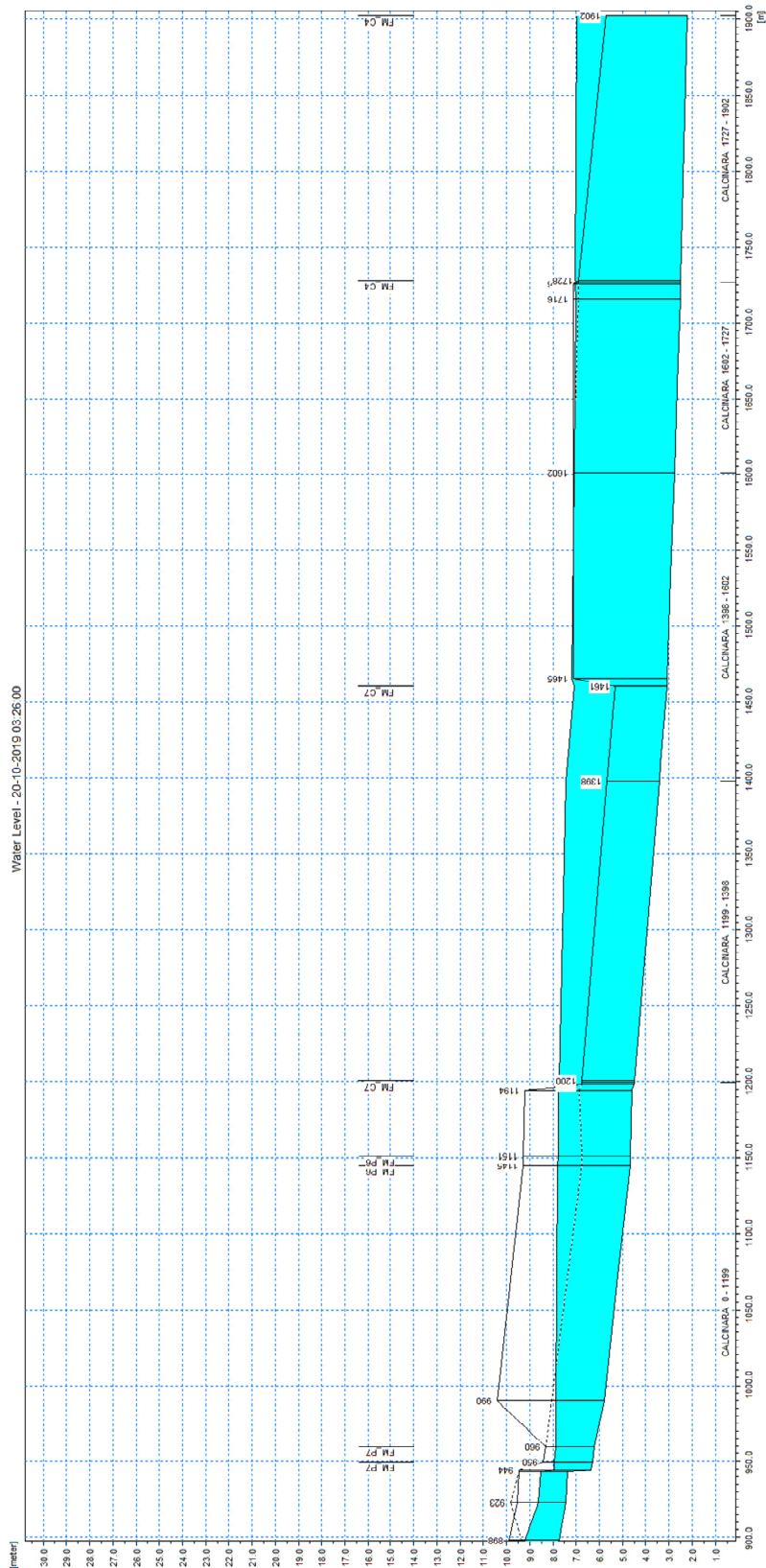
- Fosso Calcinara.

- Nel tratto di monte del modello si riscontra il sormonto delle sponde dell'alveo inciso nella porzione compresa tra le sezioni 102 e 97, prevalentemente per effetto dell'inadeguatezza idraulica dei manufatti di attraversamento presenti (FM-P11, FM-P10 e FM-P9) che generano un elevato rigurgito. Le esondazioni sono comunque piuttosto limitate e non si estendono a significativa distanza dall'alveo, in relazione alla morfologia locale.
- Esondazioni localizzate si riscontrano in corrispondenza dell'imbocco della tombinatura di sottopasso dell'attraversamento ferroviario FM-C8 (sezione 91, progressiva 428,80 m), di dimensioni inadeguate e con presenza di briglia selettiva a monte che ostruisce parte della sezione.

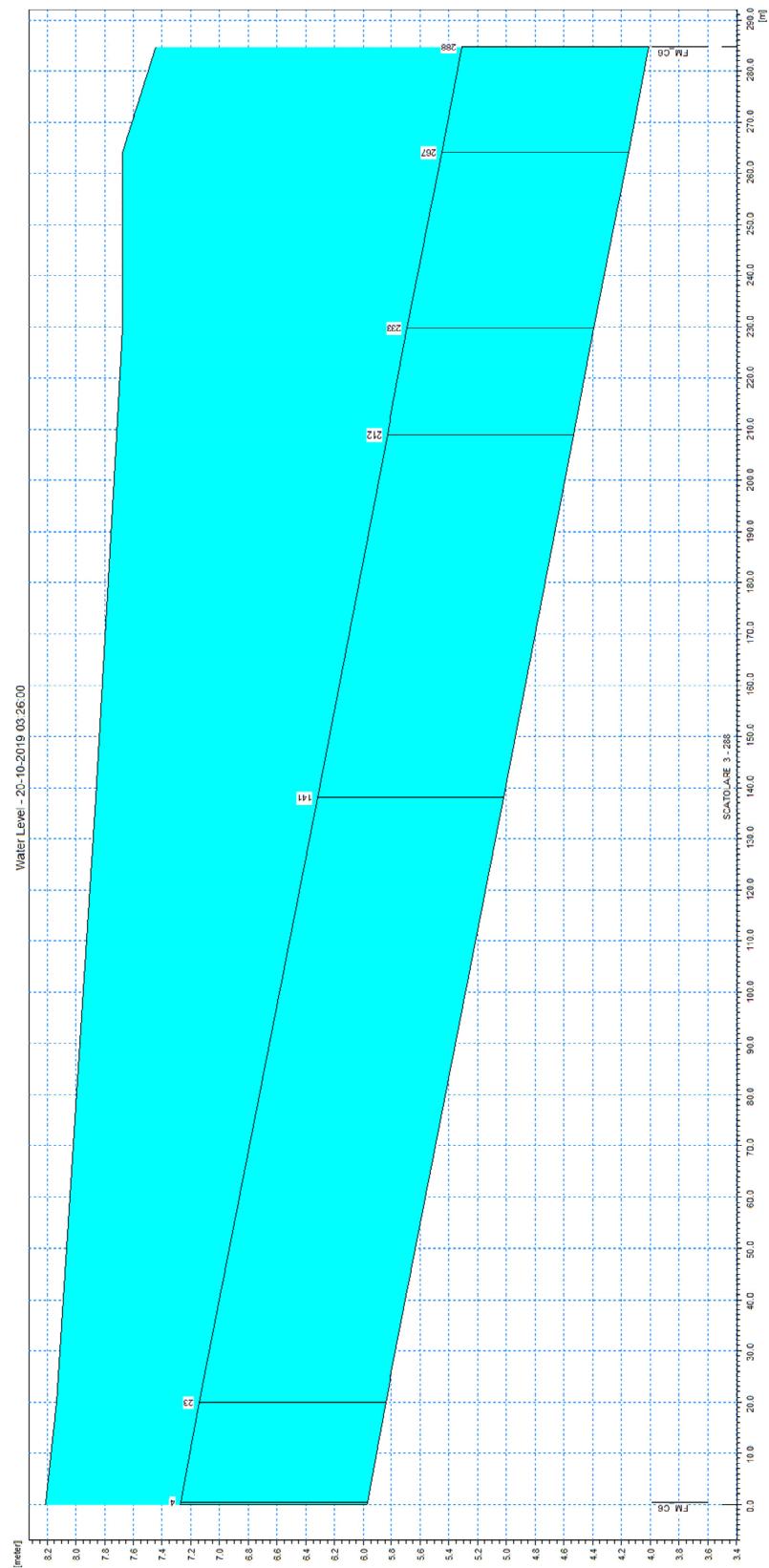
- Poco a valle dello sbocco dell'attraversamento ferroviario si riscontra un sormonto della sponda sinistra; inoltre vi sono esondazioni nel tratto a monte della via Aurelia, compreso tra le sezioni 88.2 e 86 (rispettivamente a progressive 555,31 m e 698,74 m), principalmente indotte dall'attraversamento della stessa via Aurelia e del tratto tombato più a monte (FM-C9 e FM-P8);
  - A valle della via Aurelia l'alveo, caratterizzato da geometrie delle sezioni molto variegate, con presenza di muri e arginelli in terra, mostra una generale inadeguatezza idraulica che è causa di esondazioni a carattere diffuso nell'area a monte di via Melara.
  - Nel tratto più a valle che si sviluppa parallelo a quest'ultima si verificano anche sormonti della sponda sinistra (verso il sedime di via Melara) a monte dell'imbocco della combinatura FM-C7; i livelli idrici in questo tratto sono condizionati significativamente dal rigurgito provocato dal funzionamento in pressione della combinatura stessa, in cui confluiscono le portate del rio Colombiera e dell'affluente più a monte.
  - nel tratto a cielo aperto compreso tra le sezioni 74 e 73 (lungo il perimetro della centrale termoelettrica ENEL) la portata di piena transita con franco residuo di pochi centimetri rispetto alle sommità spondali.
- Il fosso Colombiera, nel tratto tombato rappresentato nel modello, non è in grado di smaltire la portata di piena cinquantennale, che fuoriesce dal nodo di confluenza dei due rami di monte in cui la sezione è a cielo aperto. I carichi idraulici nel tratto tombato sono superiori al piano campagna.
- Il fosso Tombone presenta analogamente un assetto idraulico inadeguato al deflusso della piena cinquantennale, anche per effetto del rigurgito indotto dai livelli idrici che si instaurano nel Calcinara nel tratto di confluenza (prossimi alle sponde). Nel modello non si è considerata la possibilità di fuoriuscite di portata nel tratto tombato (ovvero all'interno dell'area della centrale ENEL), non disponendo di informazioni in merito alla presenza di eventuali pozzetti di ispezione o caditoie. I carichi idraulici sono comunque superiori alla quota del terreno soprastante. La portata esonda pertanto in corrispondenza dell'imbocco della combinatura, e si propaga da Est verso il sito della centrale.
- Il Canale Fossamastra nel tratto a monte della combinatura è sostanzialmente in grado di veicolare la portata di piena cinquantennale; si riscontrano dal profilo sormonti delle sponde, ma le esondazioni sono limitate a porzioni di terreno limitrofo ancora associabili all'area fluviale attiva (tratto compreso tra le sezioni 1 e 7). Il tratto tombato costituito dallo scatolare a doppia canna denuncia un funzionamento in pressione, ma non produce esondazioni all'imbocco.
- Il Canale Fossamastra nel tratto terminale, dalla confluenza del Calcinara alla foce in mare, risulta inadeguato nel tratto compreso tra le sezioni 14 (sbocco della combinatura FM-C1) e 24 (inizio del tratto oggetto di recenti interventi di sistemazione, presso via privata OTO). La limitata capacità di smaltimento delle sezioni del Canale è aggravata dalla presenza dell'attraversamento ferroviario dismesso FM-P5 (ponte in ferro a 2 campate localizzato in corrispondenza di un accesso dismesso allo stabilimento) che risulta fortemente inadeguato idraulicamente. Le esondazioni avvengono sulla sponda sinistra, in quanto in destra i livelli sono contenuti dal muro di recinzione continuo dello stabilimento Leonardo. Tale manufatto è stato considerato alla stregua di un muro arginale per le finalità del presente studio, ma in corrispondenza dei portoni di accesso sono stati inseriti dei varchi, attraverso i quali possono verificarsi ingeressioni di portata.  
Il successivo tratto oggetto di sistemazione da parte del Comune e dell'Autorità Portuale (compreso tra le sezioni 24 e 56) risulta invece idraulicamente adeguato, con franchi superiori al metro.



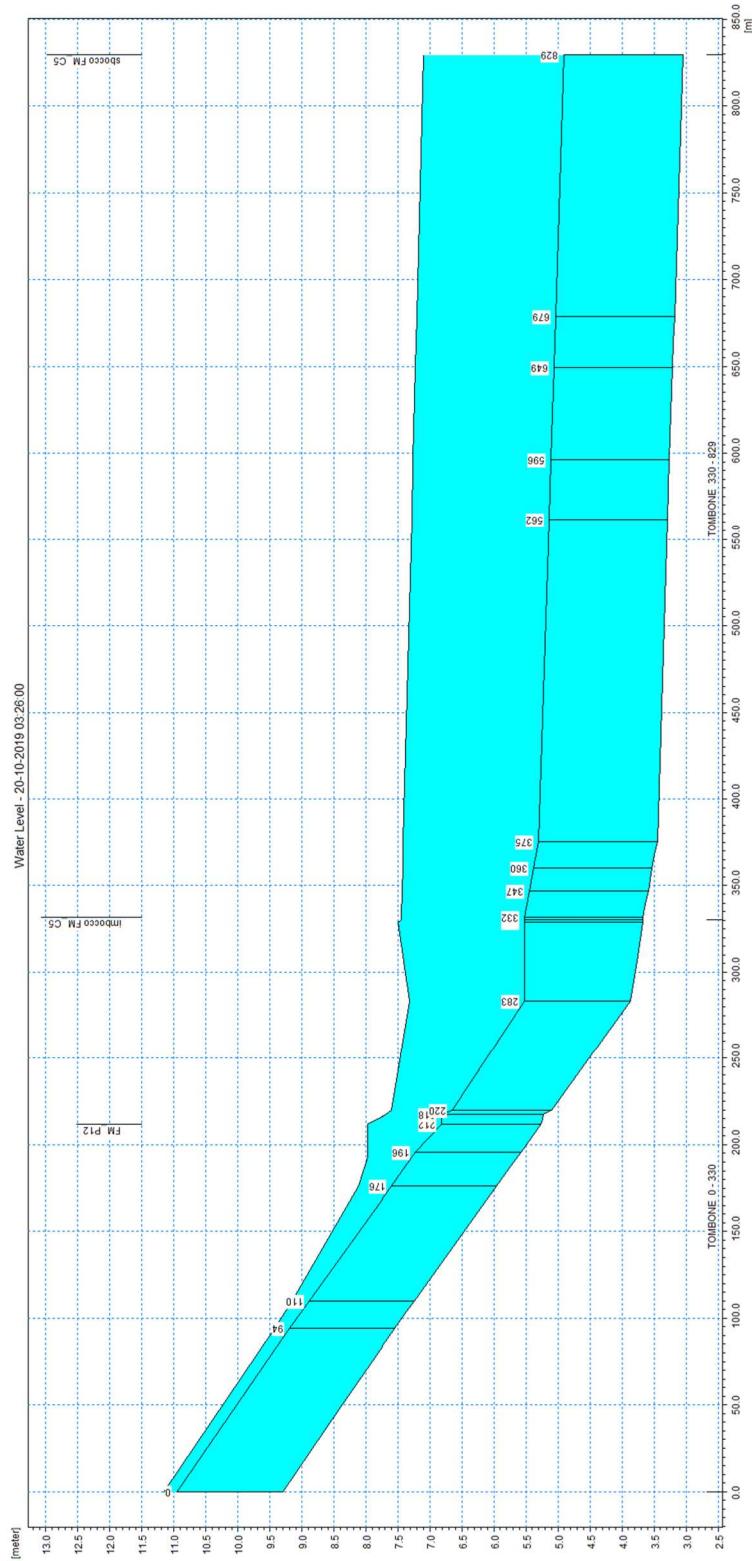
**Figura 8 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Calcinara per TR50 (tratto di monte).**



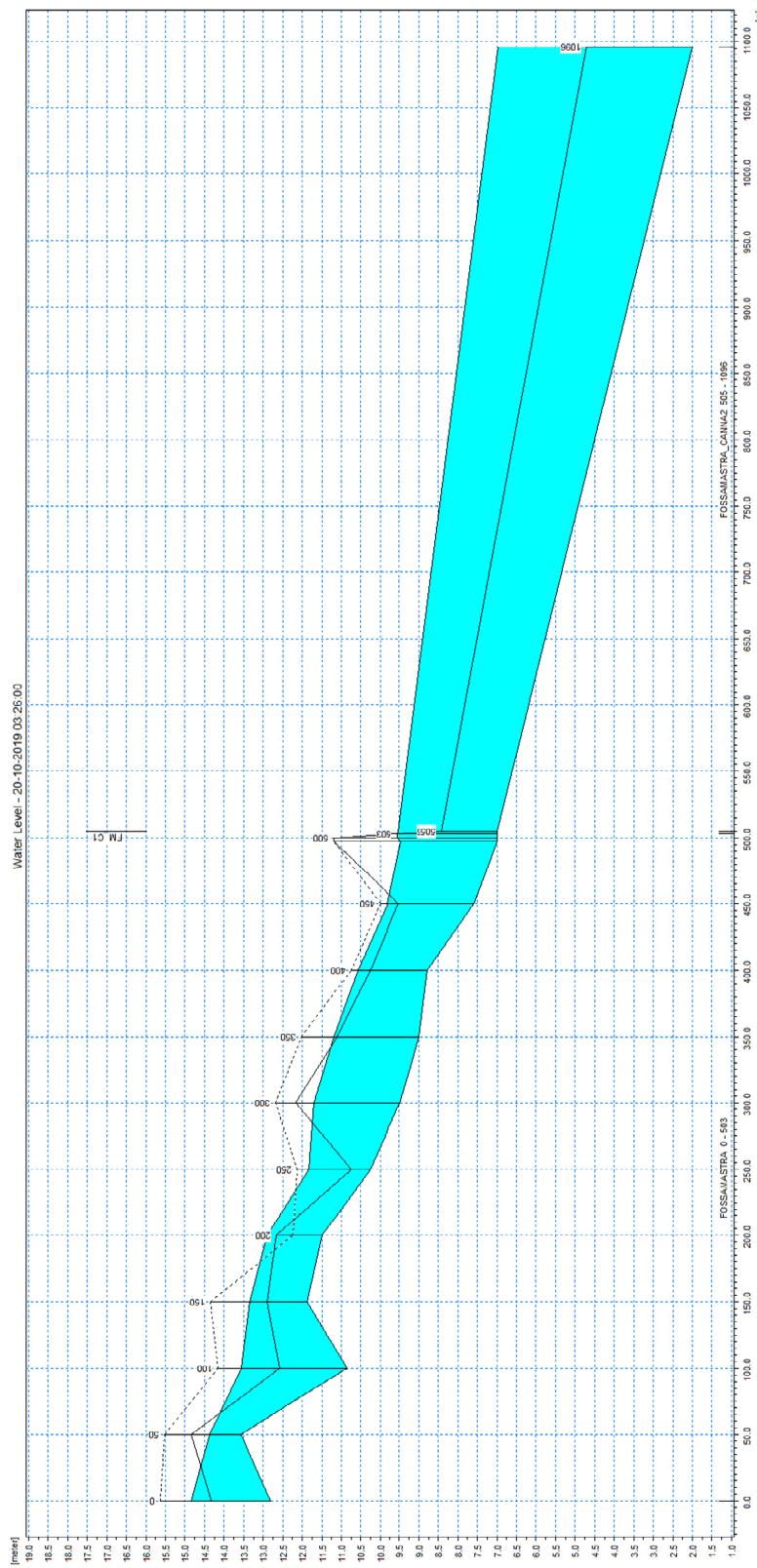
**Figura 9 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Calcinara per TR50 (tratto di valle).**



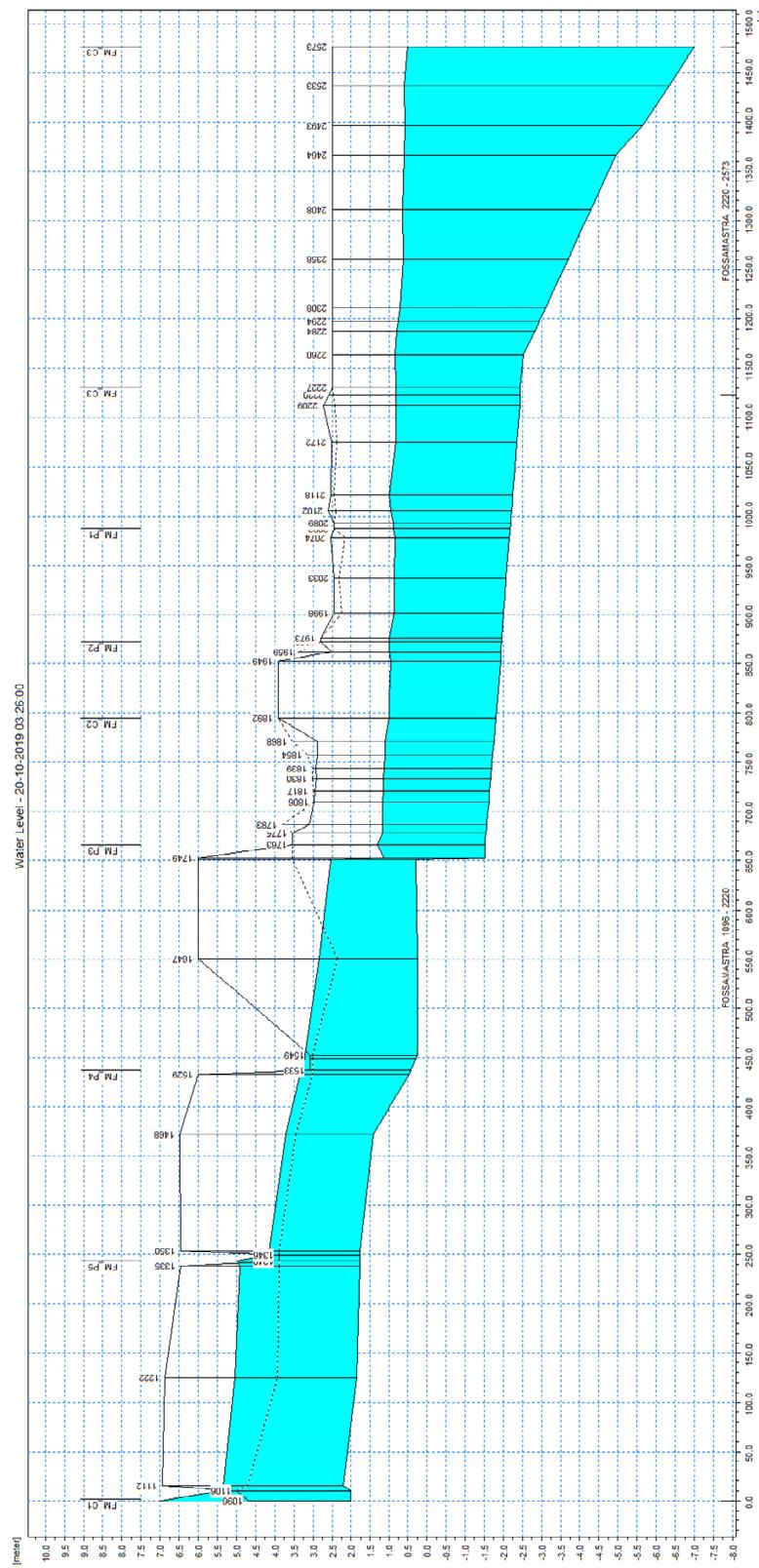
**Figura 10 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Colombiera TR50.**



**Figura 11 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone TR50.**

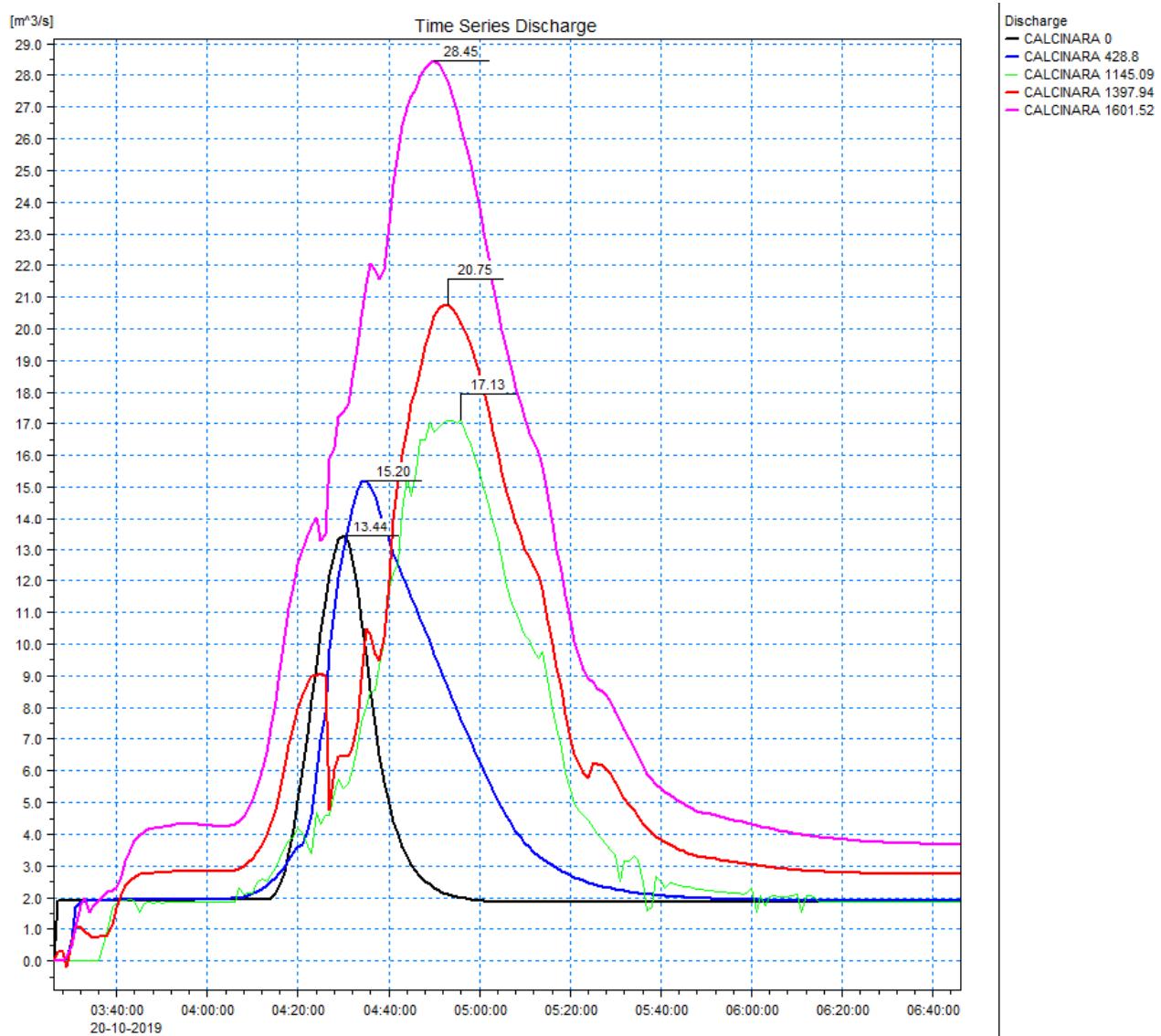


**Figura 12 – Profilo longitudinale di corrente TR50 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 1 a cielo aperto e la sezione 14 in cui termina lo scatolare FM-C1.**



**Figura 13 – Profilo longitudinale di corrente TR50 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 14 di sbocco dello scatolare FM-C1 e la sezione 56 di foce.**

In Figura 14 e Figura 15 sono rappresentati gli idrogrammi di portata osservati nel corso dell'evento simulato in alcune sezioni significative dei modelli monodimensionali sulle aste rispettivamente del Calcinara e del Fossamastra.



**Figura 14 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul fosso Calcinara.**

Per il Calcinara l'idrogramma in colore verde (progr.1145) rappresenta la portata in ingresso a monte della tombinatura presso via Melara: a causa delle esondazioni di monte il colmo è laminato a circa  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  rispetto ai circa  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  dell'idrogramma teorico. A valle della tombinatura (idrogramma rosso, progr.1398; somma dell'apporto di monte e di quelli del rio Colombiera e dell'altro affluente nel tratto tombato) la portata veicolata dall'alveo è poco superiore (circa  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ); gran parte delle portate in arrivo da monte esondano dal rio Colombiera a Nord della centrale ENEL e a monte dell'imbocco della tombinatura del Calcinara.

L'idrogramma rosa (progr.1601) mostra la portata complessiva recapitata al Fossamastra, a valle dell'immissione del Tombone: il colmo di piena è pari a circa  $28,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

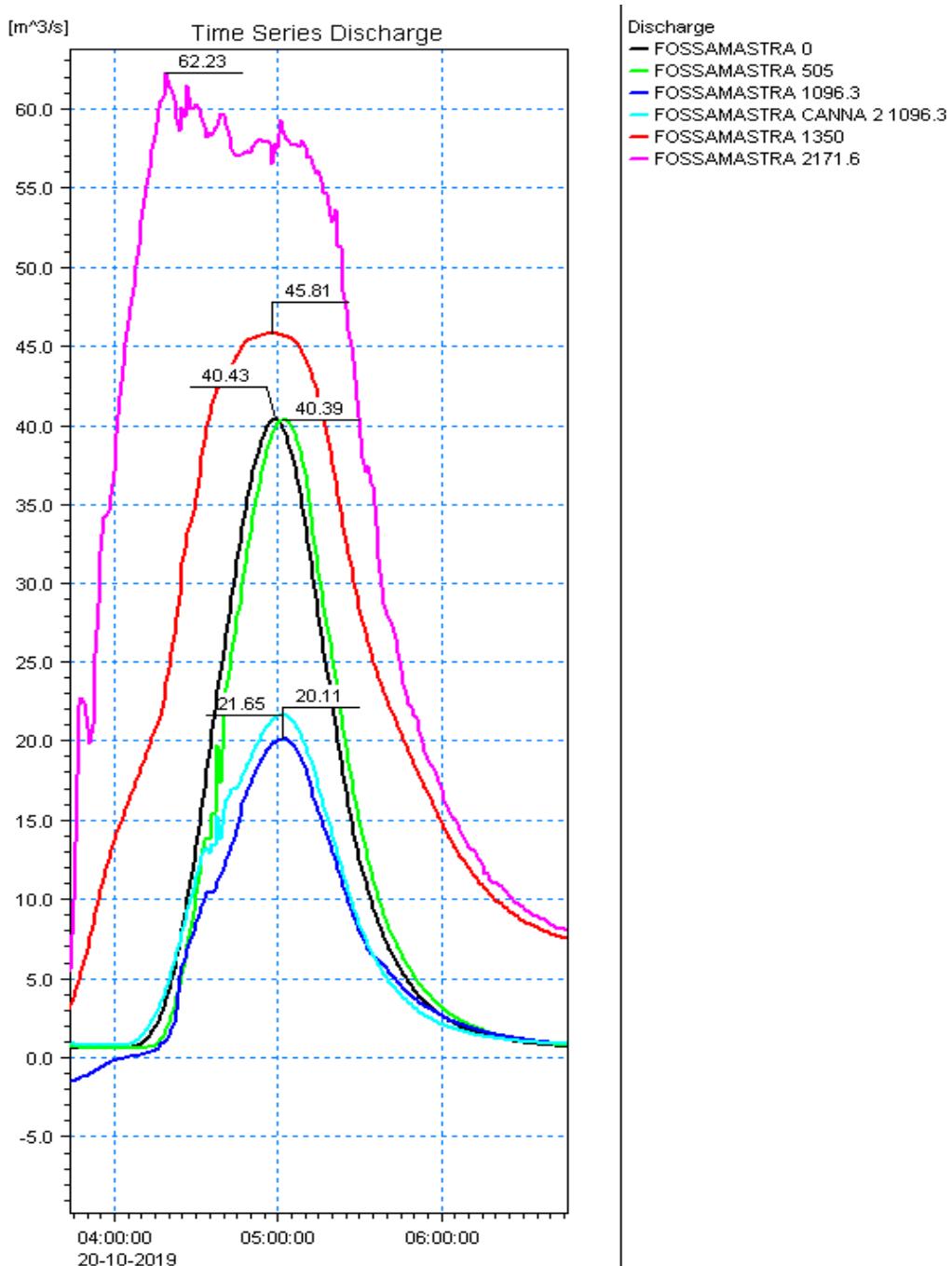


Figura 15 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul canale Fossamastra.

Per quanto riguarda l'asta del Fossamastra, nel tratto di monte non si verifica nessun effetto percepibile di laminazione: la portata resta sostanzialmente contenuta in alveo. Nella tominatura il deflusso si divide quasi

al 50% tra le due canne (idrogrammi in blu e azzurro in Figura 15, progr. 1096); la canna “2” (più a Sud) riceve anche l’apporto di un affluente (non in fase con il picco di piena proveniente da monte) e mostra un valore al colmo un poco superiore.

L’idrogramma in colore rosso è relativo alla sezione subito a valle del ponte ferroviario dismesso di accesso al sito Leonardo (sez. 19.1); la portata residua in alveo è pari a circa 46 m<sup>3</sup>/s. Per effetto del contributo di portata distribuito del tratto di valle (tra le sezioni 15 e 45) e delle ulteriori esondazioni che si verificano nel tratto non sistemato, la portata complessiva recapitata alla tominatura terminale presenta un valore massimo di circa 62 m<sup>3</sup>/s, a fronte di un valore idrologico teorico di 91,5 m<sup>3</sup>/s.

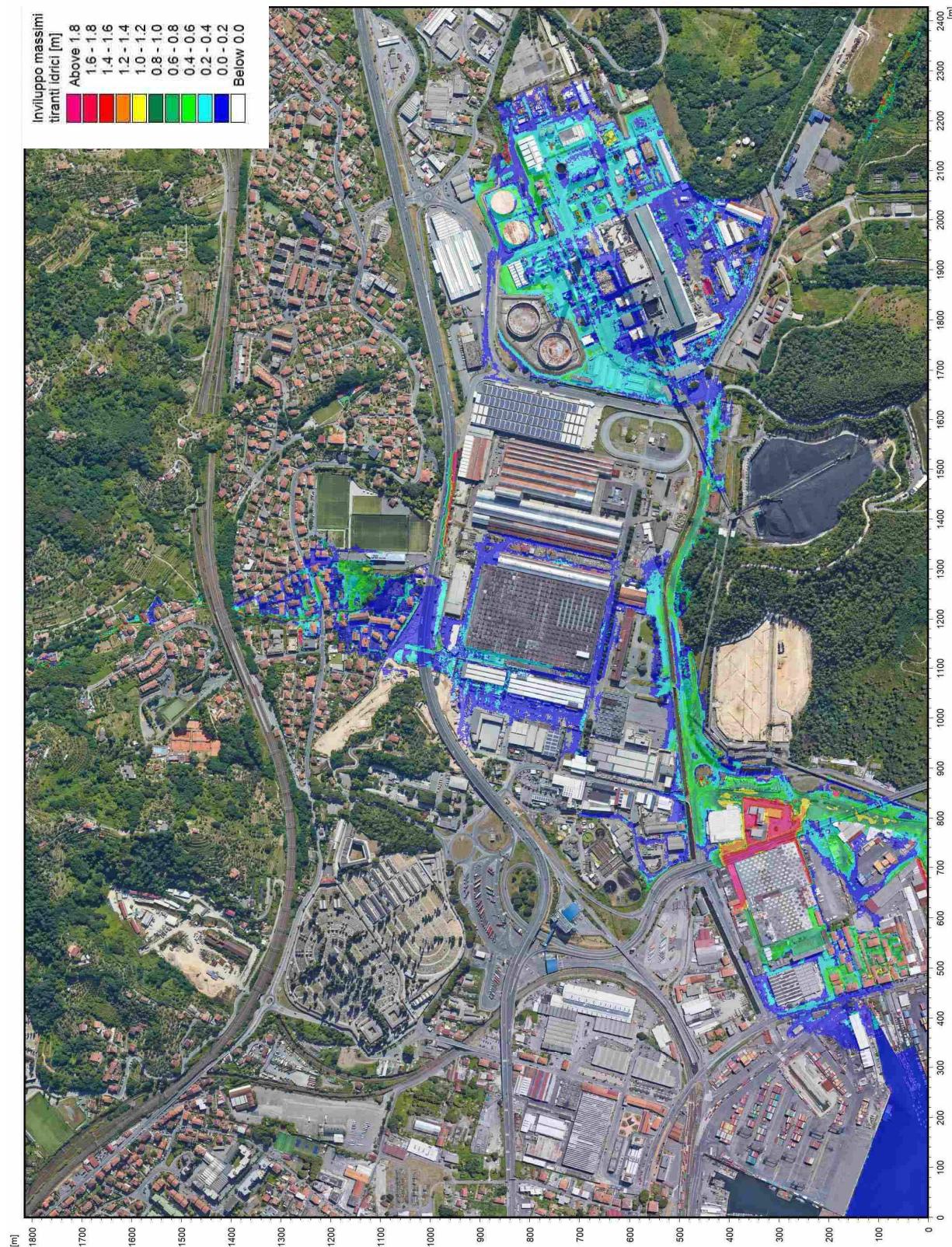
In Figura 16 e Figura 17 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d’acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell’evento con tempo di ritorno cinquantennale.

In Figura 16 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 17 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.

Le mappe di allagamento ottenute con il modello bidimensionale mostrano la presenza di aree di esondazione significativamente estese, che riguardano particolarmente i tre ambiti di seguito descritti; sono inoltre presenti limitate aree di esondazione sul Fosso Calcinara a monte della linea ferroviaria.

- La porzione Sud-Ovest dell’area di indagine (aree comprese indicativamente tra via Valdilocchi, viale S. Bartolomeo, via privata Oto) è interessata da allagamenti provenienti da esondazioni dirette dal Fossamastra nel tratto non sistemato a valle dello sbocco della tominatura. Tali allagamenti risultano di maggiore estensione rispetto a quanto perimetrato nella pianificazione vigente; in particolare si riscontra un flusso che prosegue ulteriormente verso Sud lungo via privata OTO verso l’area della Darsena Pagliari. La propagazione di tale flusso non è stata indagata per il presente scenario, ma unicamente per quello descritto nel capitolo 5.2 che risulta maggiormente gravoso.  
Si riscontra anche un’ingressione di portata nel sito Leonardo, attraverso i due varchi nel muro perimetrale (il quale funge da muro arginale destro del corso d’acqua) costituiti dai portali di accesso in corrispondenza dei due attraversamenti (Figura 18). I relativi allagamenti si mantengono prossimi al perimetro Sud dello stabilimento.
- Il Fosso di Calcinara è responsabile di esondazioni significative nel tratto a valle della via Aurelia, le quali si propagano sul piano campagna oltrepassando via Melara e interessando da Nord l’area industriale. Tali aree di allagamento non sono considerate nella pianificazione vigente in quanto le analisi alla base di quest’ultima non comprendevano il Fosso Calcinara (per il quale erano fornite solo alcune verifiche puntuali sugli attraversamenti). Per meglio comprendere le dinamiche di esondazione in quest’area si rimanda al capitolo 5.1.1.2.



**Figura 16 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=50 anni.**

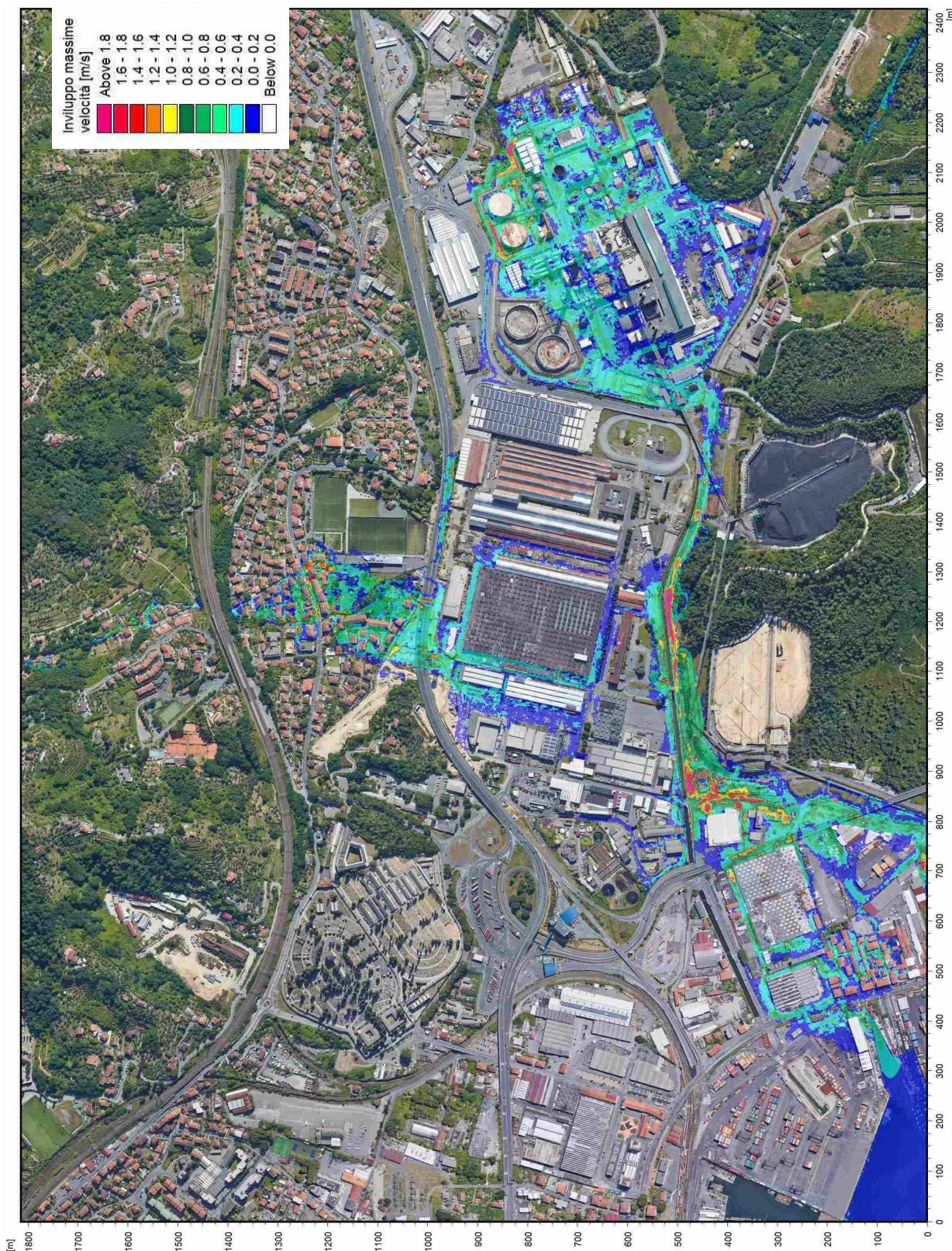


Figura 17 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di flusso per TR=50 anni.

- Le portate di esondazione degli affluenti da Est del rio Calcinara, particolarmente il Fosso Tombone e il rio Colombiera, sono responsabili di ulteriori aree di allagamento (non previste dal PdB vigente) nella porzione Est dell'area di studio, ovvero prevalentemente l'area della centrale termoelettrica ENEL. Anche in questo caso le analisi idrauliche alla base del PdB non comprendevano questi corsi d'acqua. Per meglio comprendere le dinamiche di esondazione in quest'area si rimanda al capitolo 5.1.1.1.



Figura 18 – Varco di accesso al sito Leonardo da via Valdilocchi in corrispondenza del ponte ferroviario dismesso (sx); tratto del Canale Fossamastra compreso tra i due attraversamenti di accesso al sito Leonardo, visto da valle (dx).

#### *5.1.1.1 Dinamiche di allagamento dell'area della centrale ENEL per l'evento TR50*

Nelle figure che seguono sono rappresentati (in termini di distribuzione delle altezze d'acqua sul piano campagna, o tiranti idrici) alcuni istanti della simulazione dell'evento di piena cinquantennale per quanto riguarda l'area Est del dominio di calcolo, su cui insiste la centrale termoelettrica ENEL.

Si riscontrano inizialmente fuoruscite di portata dal rio Colombiera (Figura 25) che vanno ad allagare la stradina laterale perimetrale al sito della centrale, che in questo tratto forma una “corda molle”; i livelli sono in prima battuta contenuti dal muretto di recinzione. Le prime ingressioni nell'area ENEL si verificano presso l'intersezione della stradina con via delle Pianazze, dove il muretto è assente, e dal varco di accesso a Est delle cisterne, in prossimità dell'imbocco della tominatura del Fosso Tombone (Figura 26).

Col proseguire dell'evento anche da quest'ultimo corso d'acqua inizia a fuoriuscire portata, che si aggiunge a quella relativa al rio Colombiera e in relazione alle quote del terreno si propaga quasi interamente all'interno del sito, a meno di un piccolo rivolo che interessa il sedime stradale di via delle Pianazze (con altezze d'acqua inferiori ai 20 cm e velocità inferiori a 0,4 m).

La propagazione prosegue con direzione Sud-Ovest andando a interessare la quasi totalità del sito; la portata residua al netto dei volumi man mano invasati nelle depressioni locali fuoriesce dal varco di accesso su via Valdilocchi e si propaga lungo quest'ultima in direzione Ovest.

I deflussi sul piano campagna non si propagano lungo via Melara sul lato Ovest del sito, in quanto contenuti dal muro di recinzione che coincide per un'ampia parte con il muro spondale sinistro del tratto a cielo aperto

del Fosso Calcinara. Quest'ultimo non produce esondazioni ma presenta franchi idraulici pressochè nulli (pochi centimetri).

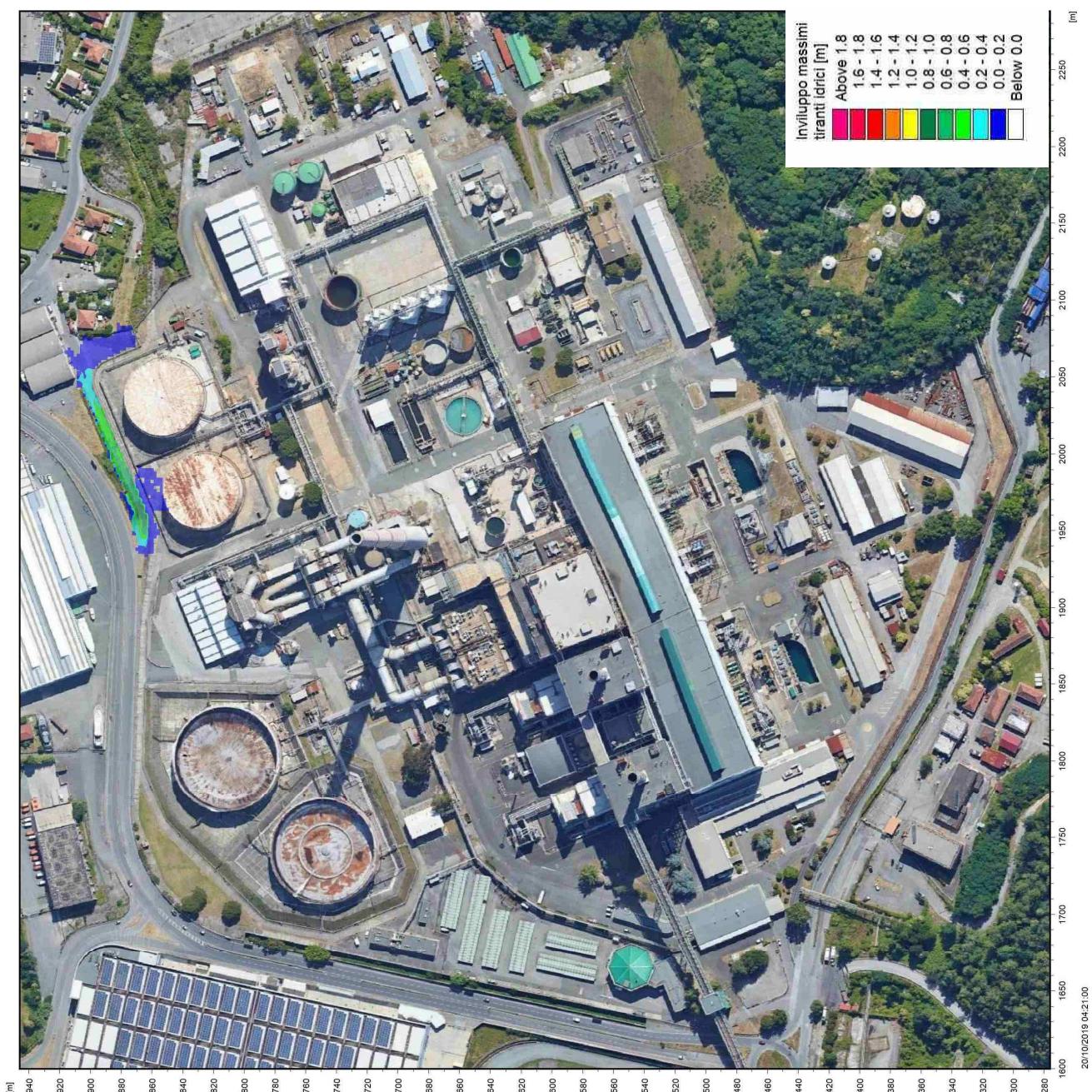
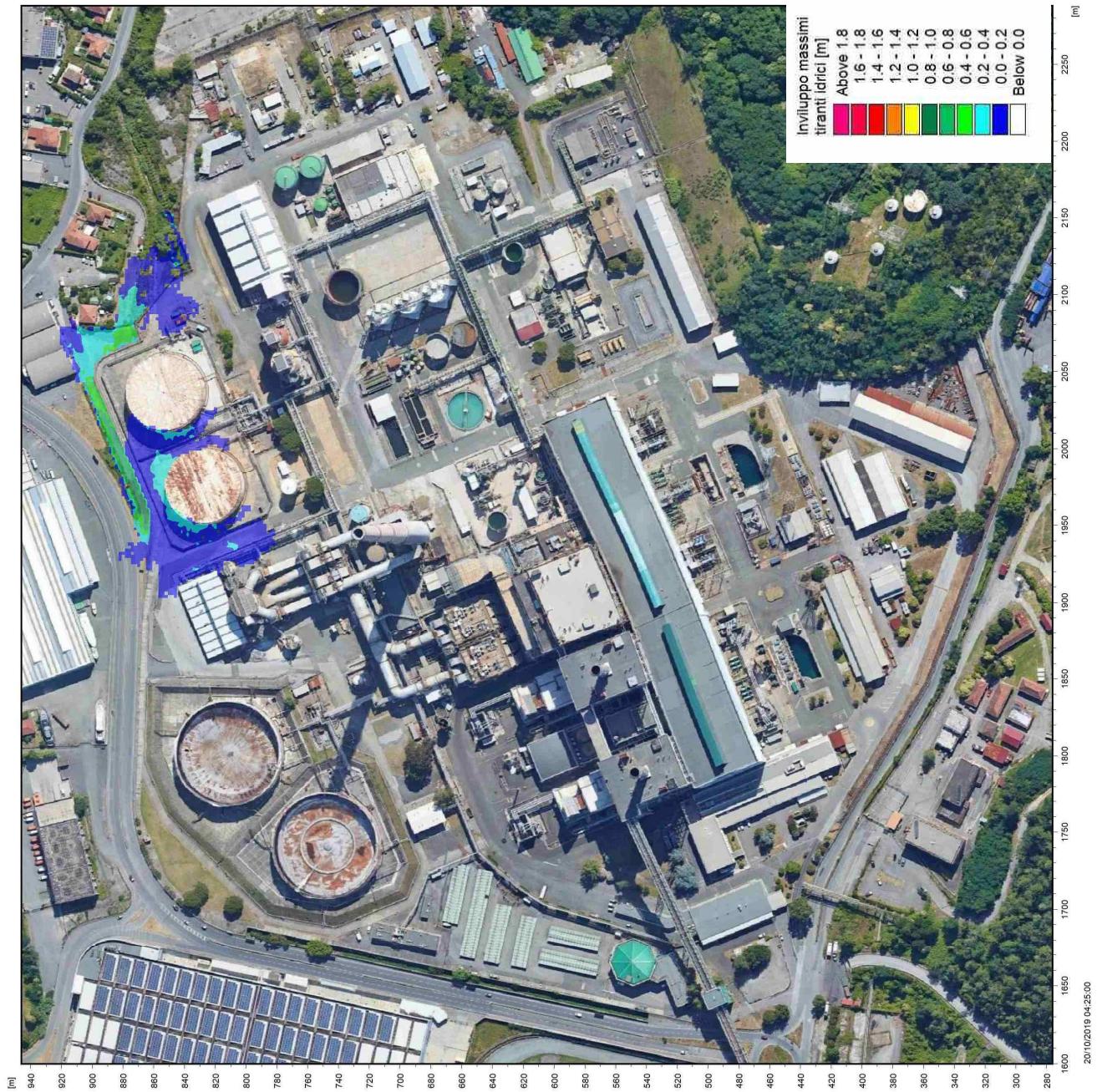
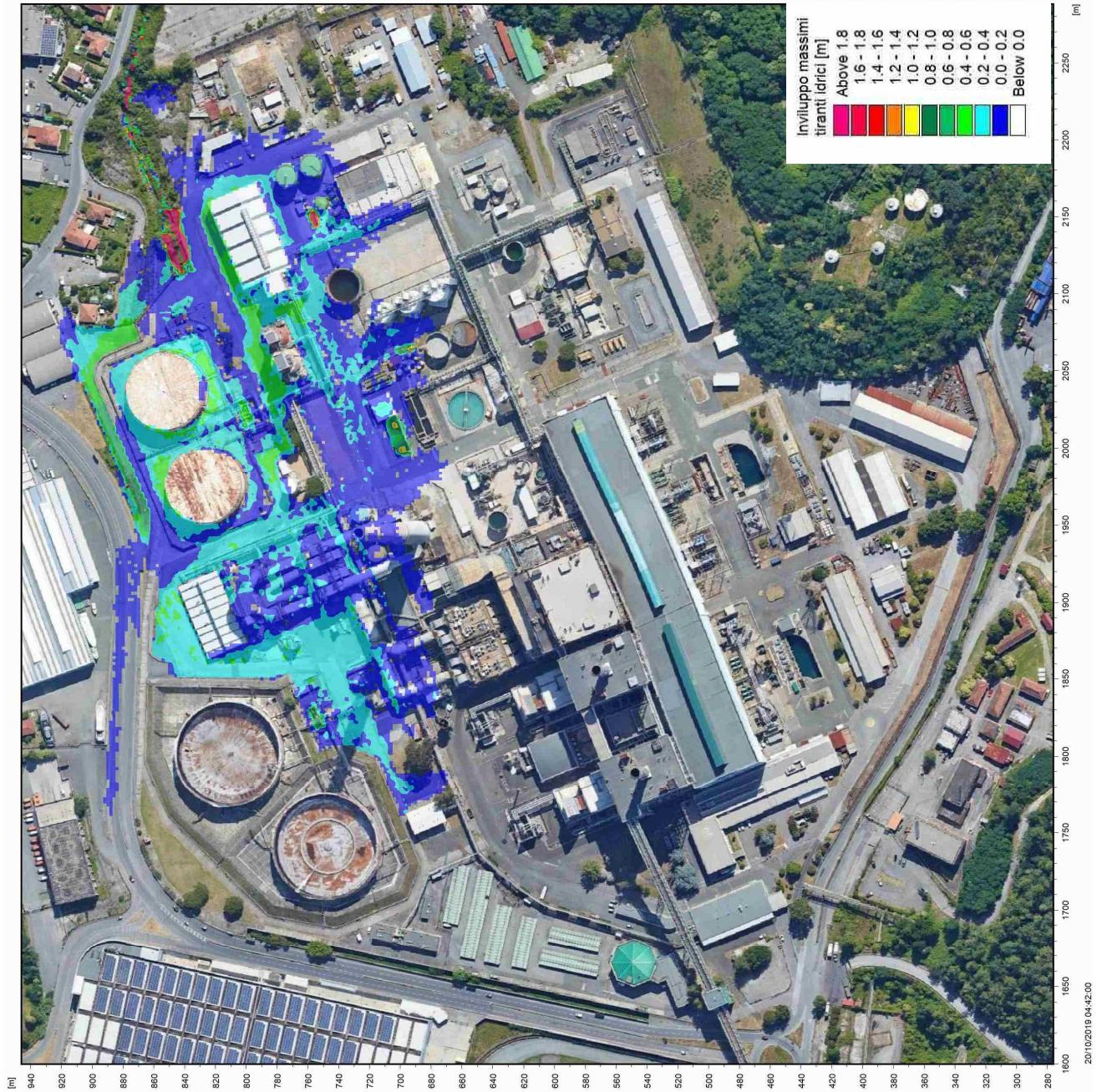


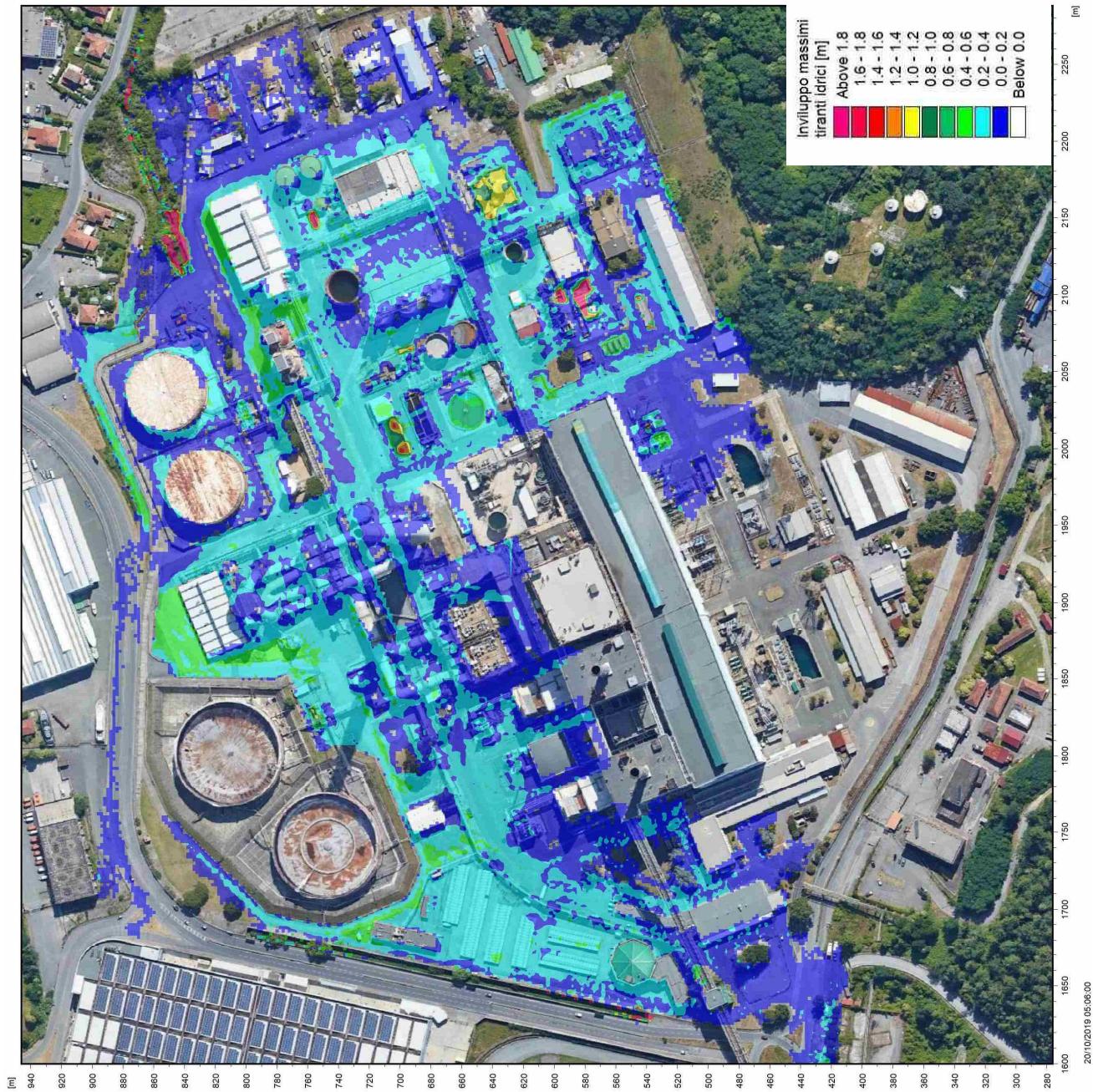
Figura 19 – Dinamiche di esondazione dell'area della centrale ENEL, TR50 – istante 1



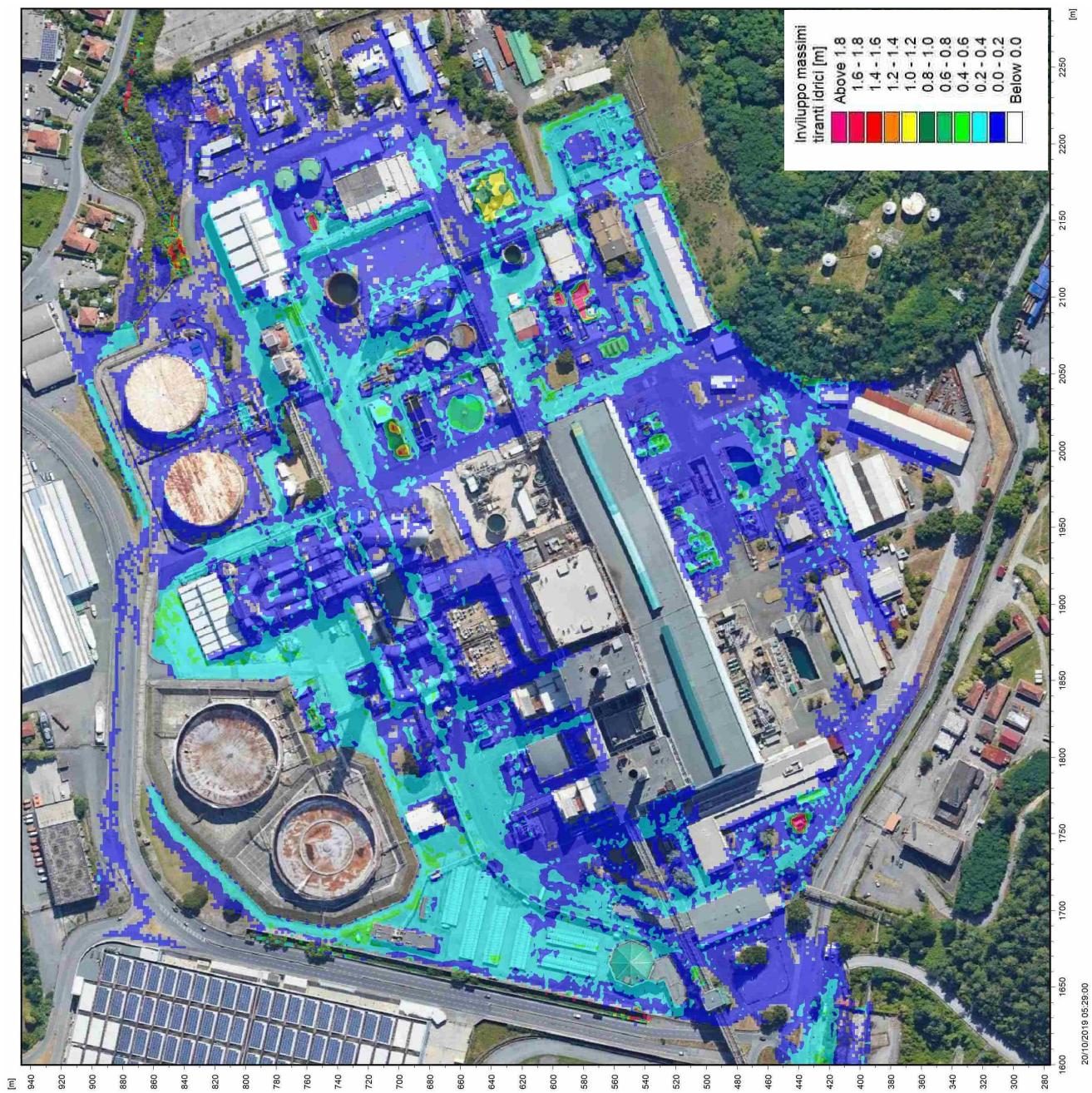
**Figura 20 – Dinamiche di esondazione dell’area della centrale ENEL, TR50 – istante 2**



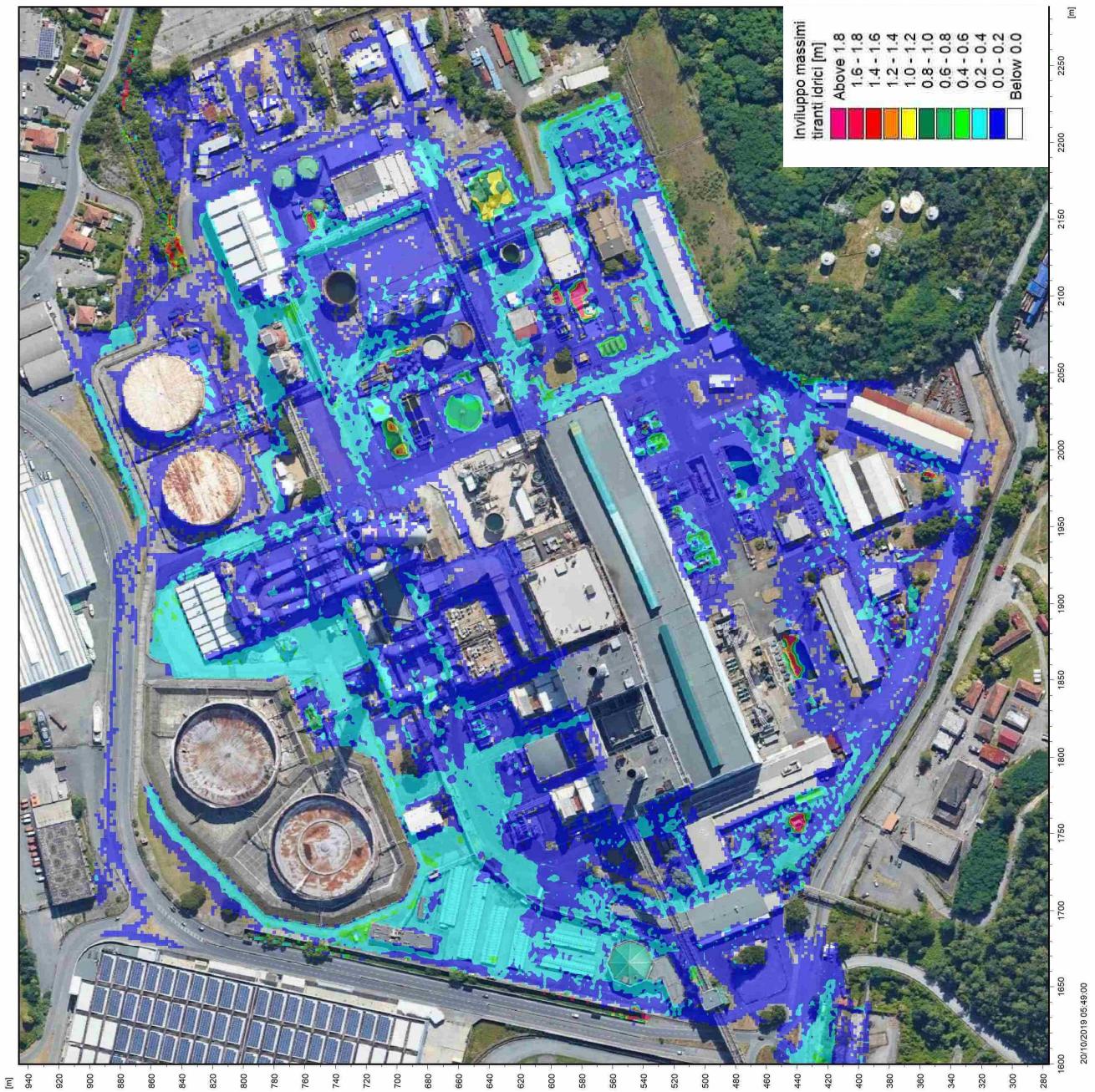
**Figura 21 – Dinamiche di esondazione dell'area della centrale ENEL, TR50 – istante 3**



**Figura 22 – Dinamiche di esondazione dell'area della centrale ENEL, TR50 – istante 4**



**Figura 23 – Dinamiche di esondazione dell’area della centrale ENEL, TR50 – istante 5**



**Figura 24 – Dinamiche di esondazione dell’area della centrale ENEL, TR50 – istante 6**



Figura 25 – Nodo scoperto di confluenza dei due rami di monte del rio Colombiera, visto da valle (sx); area dove si verificano le prime ingeressioni di portata entro il sito della centrale ENEL (dx, attraverso la recinzione a destra nella foto che fiancheggia la stradina che viene allagata dal rio Colombiera).



Figura 26 – Area presso l’imbocco della tominatura del Fosso Tombone da cui si ha immissione di portata verso il sito ENEL (sx). Varco di accesso da via Valdilocchi da cui fuoriesce la portata residua (dx).

#### *5.1.1.2 Dinamiche di allagamento dell’area industriale Ovest per l’evento TR50*

Nelle figure che seguono sono rappresentati (in termini di distribuzione delle altezze d’acqua sul piano campagna, o tiranti idrici) alcuni istanti della simulazione dell’evento di piena cinquantennale per quanto riguarda l’area industriale Ovest, estesa indicativamente tra via Melara, via Valdilocchi e via privata OTO.

Le prime esondazioni che si riscontrano sono lungo via Valdilocchi e dipendono dall’attraversamento ferroviario dismesso FM-P5 (sez. 18-19) originariamente a servizio del sito industriale, di sezione inadeguata. Ulteriori esondazioni si verificano anche nel tratto a valle fino a via privata OTO, per inadeguatezza della sezione stessa del corso d’acqua. Come riscontrato nei capitoli precedenti, la massima capacità di portata del tratto risulta infatti pari a 60-65 m<sup>3</sup>/s.

Oltre a invadere completamente via Valdilocchi, con tiranti idrici e velocità significative, e propagarsi anche verso Sud lungo via privata OTO, si riscontra anche l’ingressione del sito industriale attraverso i due varchi nel

muro perimetrale costituiti dai portali di accesso. Tali portate si propagano verso Ovest mantenendosi prossime al perimetro Sud dello stabilimento; un flusso residuo fuoriesce dal portone di accesso da via privata OTO poco a Nord dell'attraversamento (Figura 35) e si propaga con modeste altezze d'acqua e velocità nell'area artigianale adiacente, verso via degli Stagnoni.

Contestualmente si osserva da Nord la propagazione di allagamenti dovuti a esondazioni del Fosso Calcinara, provenienti:

- dall'imbocco della tombinatura FM-C7 (portata non smaltita dal tratto tombato che riceve anche gli apporti del rio Colombiera e dell'altro affluente); i deflussi si propagano verso monte contenuti dal muro perimetrale Nord del sito industriale, e tendono poi a rientrare in alveo al Fosso nella fase decrescente dell'idrogramma;
- dal piano campagna a monte di via Melara, la quale viene oltrepassata, con propagazione nell'area di cantiere a valle fino al muro perimetrale del sito industriale (Figura 27).

Quest'ultimo flusso si propaga verso Ovest inizialmente contenuto dal muro, entrando poi parzialmente nell'area dello stabilimento attraverso il varco di accesso carrabile in prossimità del sottopasso della A15 (Figura 35). Una quota parte della portata si propaga invece verso Sud interessando l'area artigianale limitrofa.

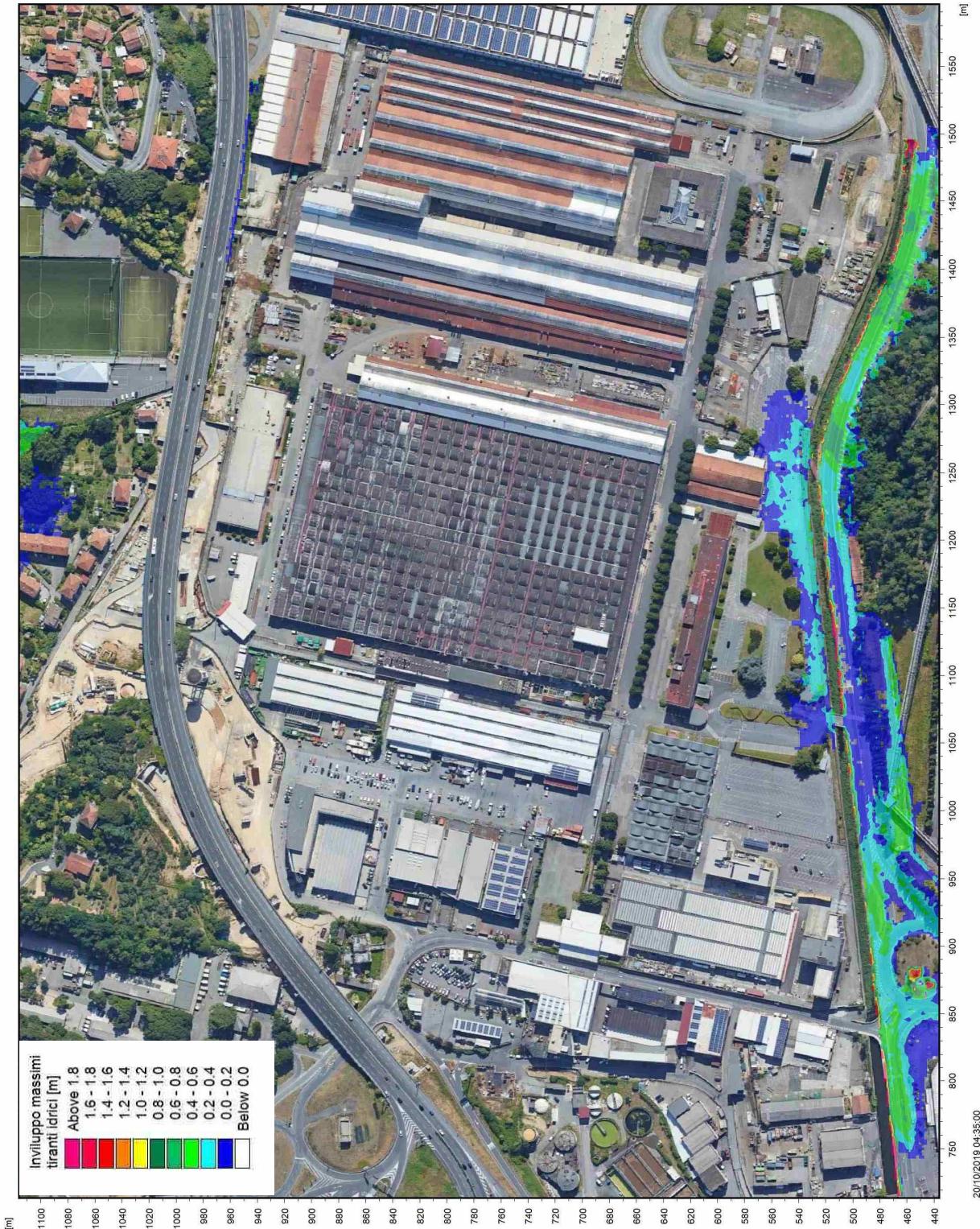
All'interno del sito la portata si propaga lungo le viabilità interne in funzione delle quote altimetriche, andando poi a ricongiungersi con i flussi di esondazione provenienti dal Canale Fossamastra.



Figura 27 – Sx: area da cui provengono le portate di esondazione del Fosso Calcinara che si propagano verso il sito industriale (direzione delle acque da destra nella foto); dx: vista da monte delle aree in cui si propagano tali flussi, fino al muro perimetrale dello stabilimento Leonardo (sullo sfondo)



Figura 28 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest – istante 1



**Figura 29 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest – istante 2**

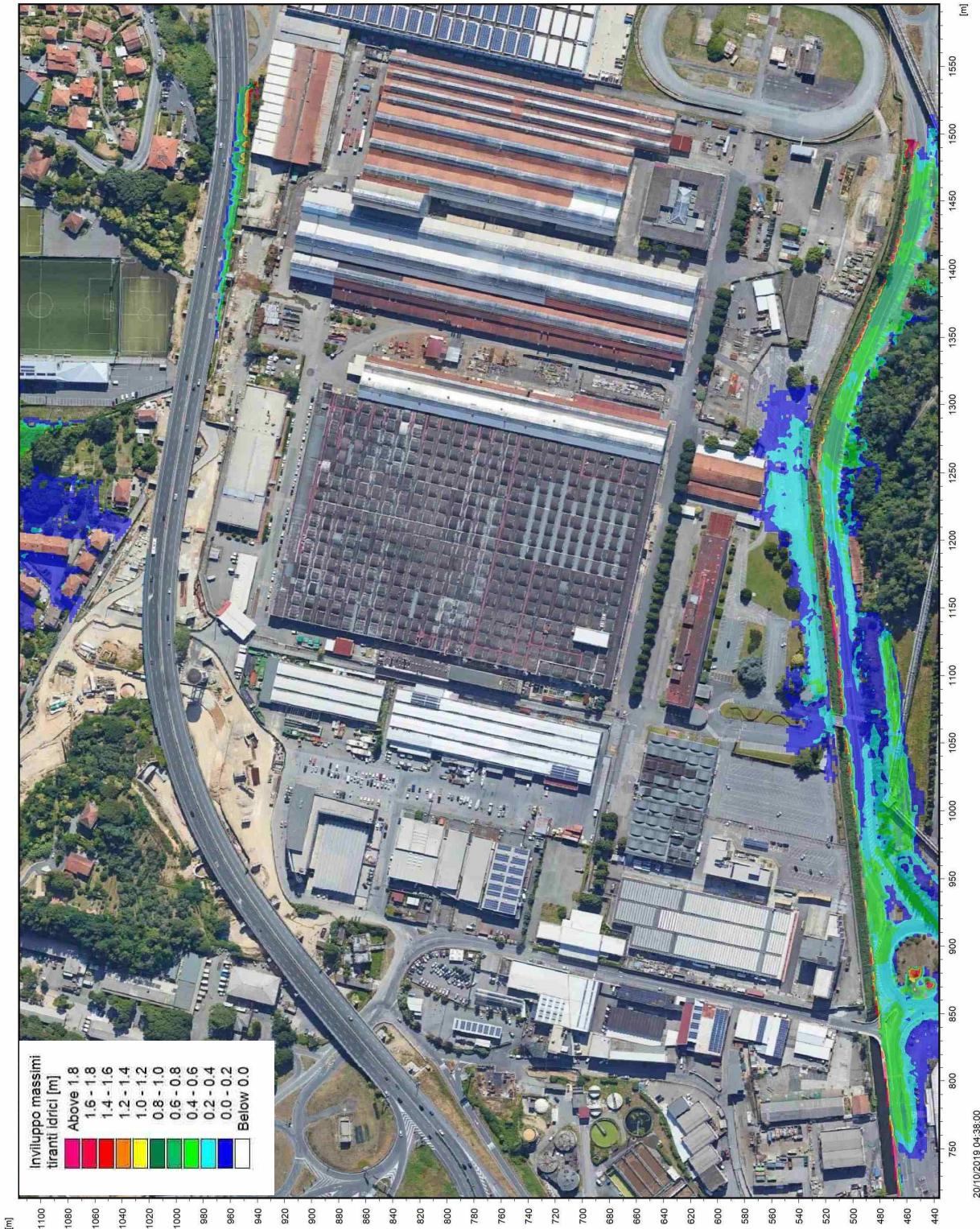


Figura 30 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest – istante 3

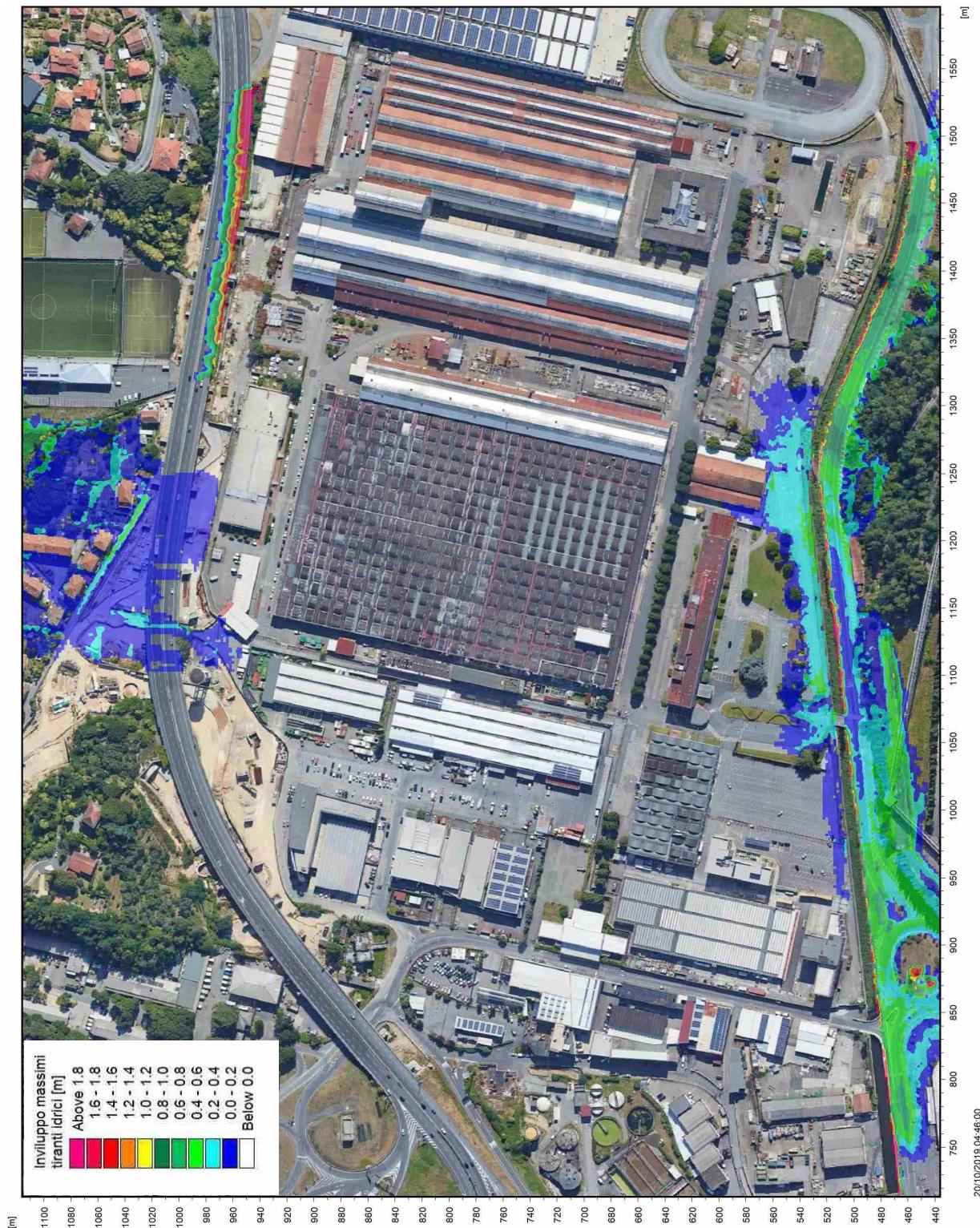


Figura 31 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest – istante 4

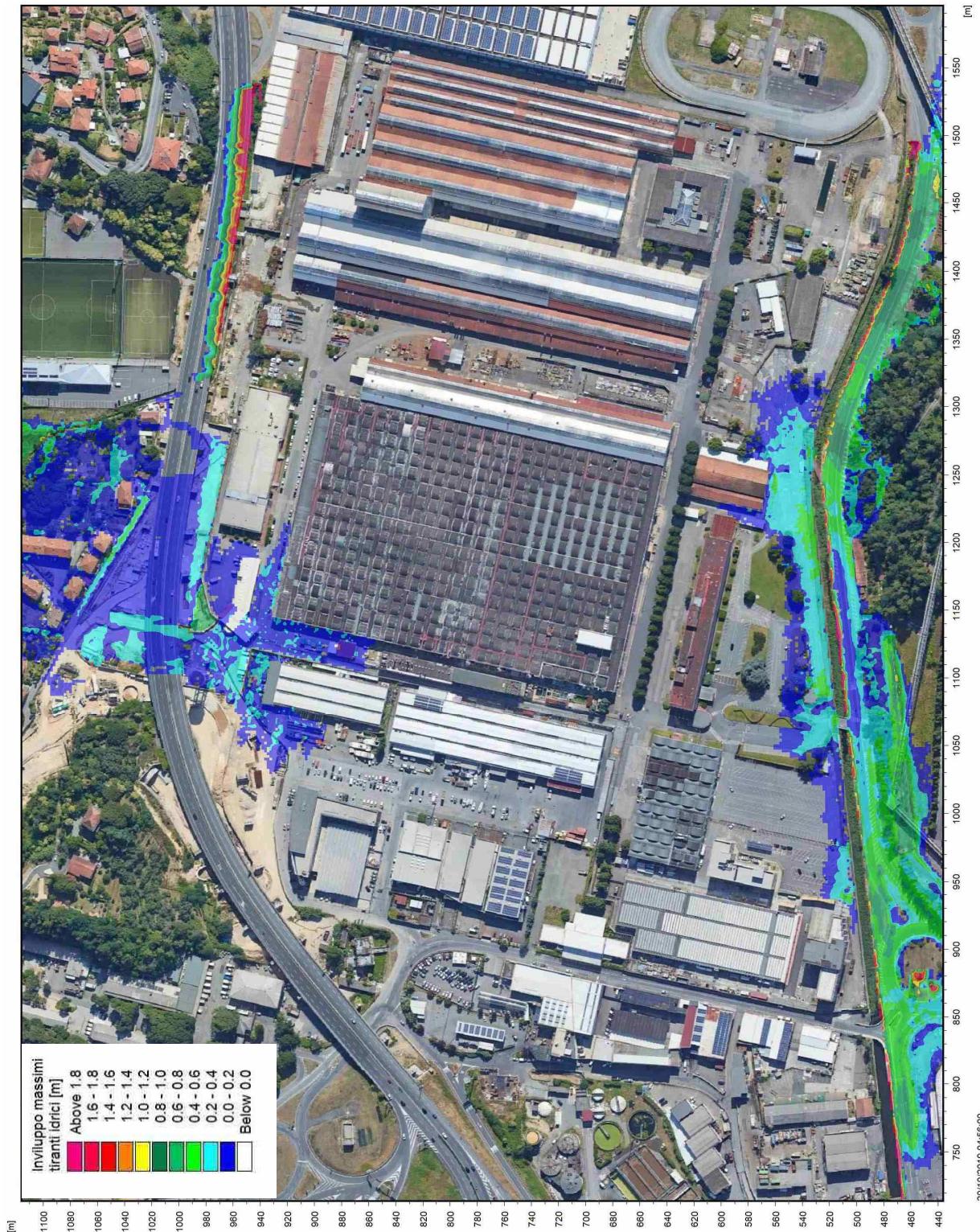


Figura 32 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest – istante 5

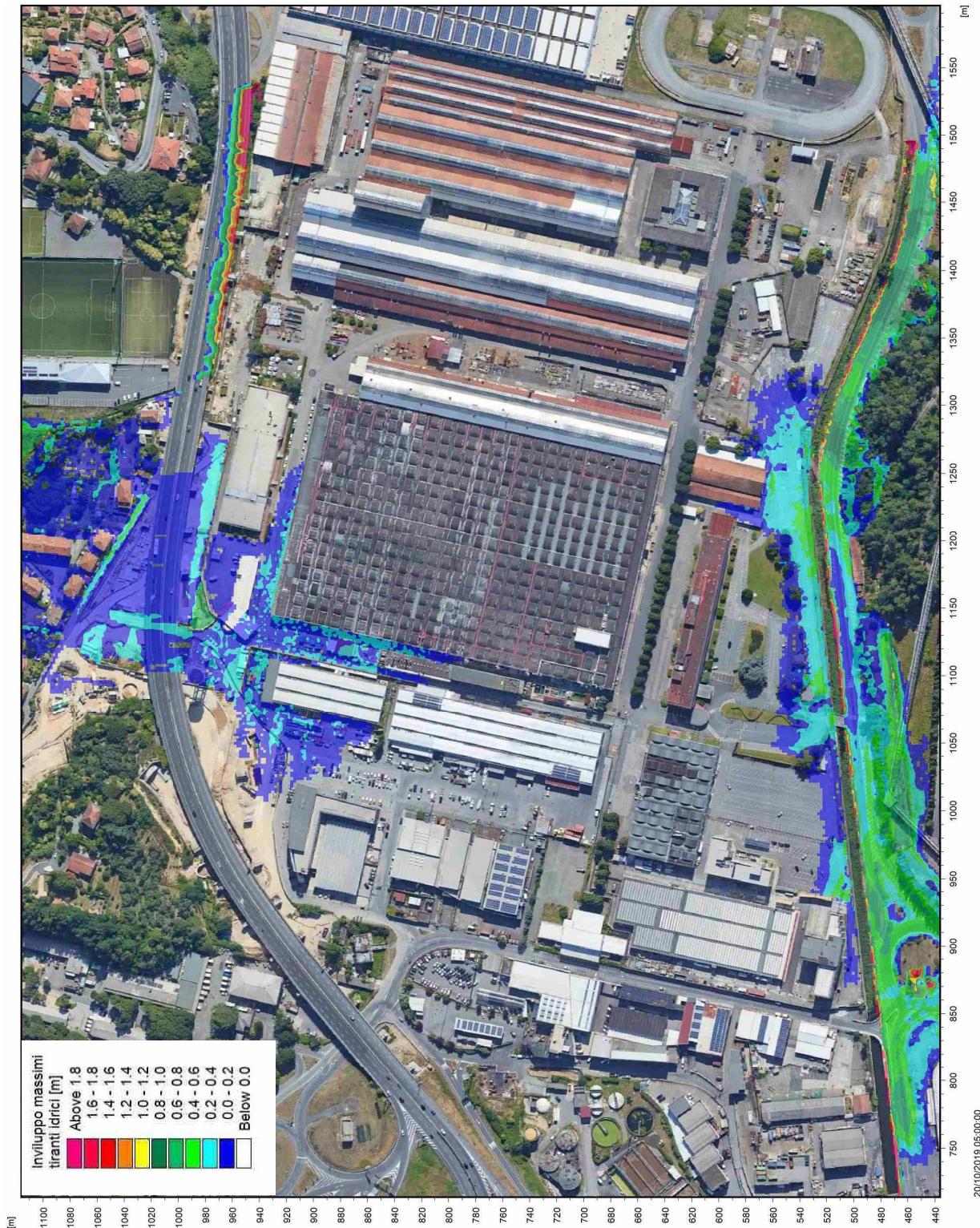


Figura 33 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest – istante 6

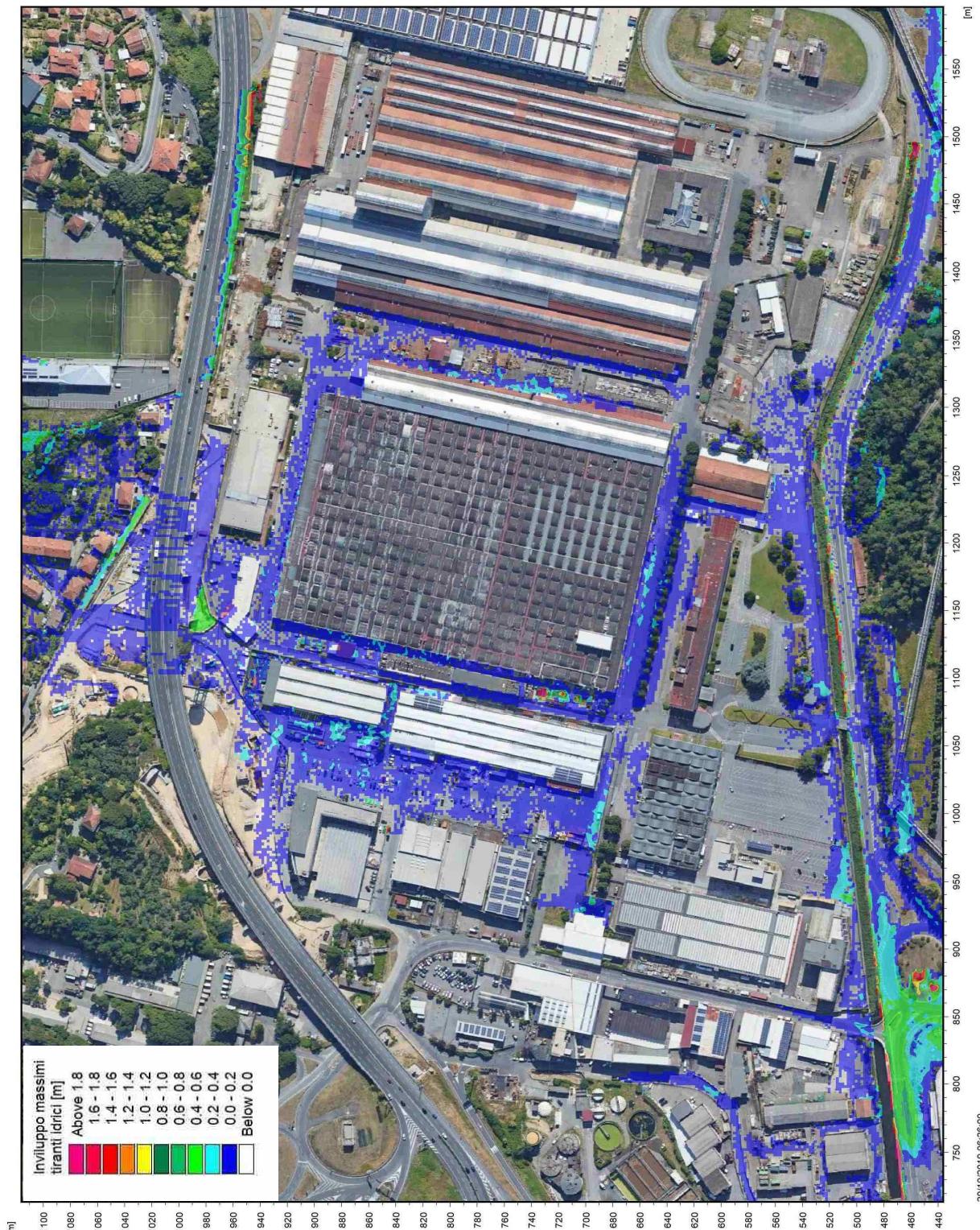


Figura 34 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest – istante 7



Figura 35 – Sx: Varco di accesso al sito Leonardo presso il sottopasso dall'A15; portale di accesso da via privata OTO (dx).

### 5.1.2 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 Fossamastra (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. Nelle immagini da Figura 36 a Figura 41 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	-
Fossamastra		1	0,00	12,81	2,20	15,01	15,66	49,19	3,56	0,77
Fossamastra		2	50,00	13,57	0,94	14,51	15,33	49,19	4,00	1,32
Fossamastra		3	100,00	10,86	2,85	13,71	14,01	49,18	2,43	0,46
Fossamastra		4	150,00	11,87	1,65	13,52	14,01	49,18	3,12	0,77
Fossamastra		5	200,00	11,49	1,57	13,06	13,98	47,55	4,24	1,08
Fossamastra		6	250,00	10,26	1,76	12,02	12,18	46,66	1,76	0,42
Fossamastra		7	300,00	9,48	2,44	11,92	12,18	48,23	2,25	0,46
Fossamastra		8	350,00	8,99	2,42	11,41	12,15	49,08	3,81	0,78
Fossamastra		9	400,00	8,99	1,84	10,83	11,64	48,77	3,98	0,94
Fossamastra		10	450,00	7,59	2,62	10,21	10,64	48,58	2,92	0,58
Fossamastra		10.5	497,00	7,00	3,11	10,11	10,43	45,52	2,52	0,46
Fossamastra	vasca	11	500,00	7,00	3,20	10,20	10,37	45,31	1,85	0,33
Fossamastra	FM_C1 - imbocco culvert	12	505,00	7,00	3,19	10,19	10,37	45,31	1,87	0,33
Fossamastra	sbocco culvert inizio pennelli	14	1096,30	2,00	5,04	7,04	7,19	22,30	1,70	0,24
Fossamastra	fine pennelli	15	1105,96	2,02	3,47	5,49	6,93	73,60	5,31	0,91
Fossamastra		16	1111,79	2,20	3,26	5,45	6,01	74,62	3,31	0,59
Fossamastra		17	1221,75	1,83	3,28	5,11	5,89	71,15	3,91	0,69
		17.1	1334,73	1,76	3,22	4,98	5,36	58,77	2,73	0,49

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Note</b>	<b>Sezione</b>	<b>Progressiva</b>	<b>Fondo alveo</b>	<b>Tirante</b>	<b>Livello idrico</b>	<b>Carico Totale</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità</b>	<b>Froude</b>
-	-	-	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m/s</b>	-
Fossamastra	monte FM_P5	18	1339,51	1,76	3,30	5,06	5,35	53,57	2,37	0,42
Fossamastra	valle FM_P5	19	1345,51	1,76	2,49	4,25	4,72	47,58	3,03	0,61
		19.1	1350,00	1,76	2,46	4,22	4,72	48,73	3,14	0,64
Fossamastra		20	1468,39	1,18	2,61	3,79	4,53	65,02	3,82	0,75
		20.1	1529,00	0,45	2,96	3,41	4,05	65,90	3,55	0,66
Fossamastra	monte FM_P4	21	1533,13	0,41	2,99	3,40	4,04	65,55	3,54	0,65
Fossamastra	valle FM_P4	22	1545,35	0,28	3,02	3,30	3,97	65,58	3,64	0,67
		22.1	1548,90	0,24	3,04	3,28	3,95	66,51	3,63	0,66
Fossamastra		23	1647,31	0,24	2,93	2,93	3,54	65,37	3,47	0,65
Fossamastra		24	1747,18	0,29	2,35	2,64	3,42	59,62	3,90	0,81
		24.1	1749,18	-1,52	2,84	1,32	1,92	59,76	3,44	0,65
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	3,02	1,50	1,73	60,09	2,14	0,39
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	3,02	1,47	1,70	60,34	2,15	0,39
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	3,05	1,48	1,69	60,70	2,02	0,37
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	3,10	1,47	1,67	61,10	2,00	0,36
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	3,09	1,45	1,66	61,37	2,02	0,37
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	3,11	1,44	1,65	61,71	2,02	0,37
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	3,11	1,42	1,63	62,02	2,02	0,37
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	3,12	1,40	1,61	62,35	2,03	0,37
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	3,15	1,39	1,60	62,74	2,02	0,36
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	3,09	1,28	1,59	64,94	2,46	0,45
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	2,90	0,97	1,36	65,73	2,77	0,52
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	2,95	1,02	1,28	66,24	2,25	0,42
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	2,95	1,00	1,23	66,08	2,13	0,40
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	2,95	0,99	1,22	66,51	2,15	0,40
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	2,91	0,90	1,16	68,43	2,24	0,42
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	2,97	0,89	1,15	70,26	2,25	0,42
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	3,04	0,88	1,14	71,76	2,25	0,41
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	3,09	0,91	1,14	73,79	2,11	0,38
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	3,11	0,91	1,13	74,49	2,06	0,37
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	3,13	0,91	1,11	73,39	1,98	0,36
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	3,16	0,91	1,11	74,95	1,97	0,35
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	3,17	0,82	1,09	77,29	2,32	0,42
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,23	0,80	1,07	78,27	2,31	0,41
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,26	0,81	1,03	78,29	2,07	0,37
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,36	0,83	1,03	78,44	1,98	0,34
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,63	0,80	0,89	78,46	1,35	0,23
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,73	0,78	0,87	78,49	1,32	0,22
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,86	0,74	0,82	78,49	1,27	0,21

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Note</b>	<b>Sezione</b>	<b>Progressiva</b>	<b>Fondo alveo</b>	<b>Tirante</b>	<b>Livello idrico</b>	<b>Carico Totale</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità</b>	<b>Froude</b>
-	-	-	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m/s</b>	-
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,32	0,62	0,69	78,38	1,13	0,17
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,92	0,62	0,67	78,74	1,00	0,14
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,54	0,58	0,62	79,03	0,89	0,12
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,22	0,57	0,60	78,91	0,79	0,10
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,92	0,57	0,60	78,95	0,71	0,09
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,52	79,07	0,66	0,08
Tombone		57	0,00	9,30	2,03	11,33	12,35	26,25	4,48	1,00
Tombone		58	94,12	7,55	2,07	9,62	10,60	26,21	4,38	0,97
Tombone		59	110,10	7,24	2,11	9,35	10,29	26,21	4,29	0,94
Tombone		60	176,32	5,95	2,40	8,35	9,07	26,22	3,76	0,78
Tombone		61	195,66	5,57	2,62	8,19	8,81	26,51	3,48	0,69
Tombone	FM_P12	61,1	211,66	5,26	3,01	8,27	8,59	22,61	2,51	0,46
Tombone	FM_P12	61,1	217,66	5,22	2,68	7,90	8,52	28,09	3,49	0,68
Tombone		61,2	220,00	5,10	2,70	7,80	8,49	30,49	3,67	0,71
Tombone		62	283,39	3,87	3,49	7,36	7,86	25,79	3,13	0,54
Tombone		62,5	328,72	3,68	3,88	7,56	7,65	15,02	1,36	0,22
Tombone	imbocco FM_C5	63	331,72	3,67	3,83	7,50	7,64	14,54	1,64	0,27
Tombone	FM_C5	64	346,94	3,59	3,89	7,48	7,62	14,54	1,64	0,27
Tombone	FM_C5	65	360,33	3,53	3,94	7,47	7,61	14,54	1,64	0,26
Tombone	FM_C5	66	375,49	3,45	4,01	7,46	7,60	14,54	1,64	0,26
Tombone	FM_C5	67	561,79	3,29	4,18	7,47	7,60	14,55	1,64	0,26
Tombone	FM_C5	68	596,41	3,26	4,20	7,46	7,60	14,55	1,64	0,26
Tombone	FM_C5	69	649,23	3,21	4,22	7,43	7,57	14,56	1,64	0,25
Tombone	FM_C5	70	678,60	3,18	4,23	7,41	7,55	14,56	1,64	0,25
Tombone	sbocco FM_C5	71	829,38	3,05	4,20	7,25	7,39	14,56	1,64	0,26
Calcinara		109	0,00	23,28	1,36	24,64	25,40	15,90	3,85	1,05
Calcinara		108	21,90	22,68	1,37	24,05	24,44	15,72	2,76	0,75
Calcinara		107	36,63	22,79	1,11	23,90	24,35	15,31	2,96	0,90
Calcinara		106	66,90	22,66	0,97	23,63	24,32	14,90	3,68	1,19
Calcinara		105	105,08	21,37	1,18	22,55	23,59	15,31	4,52	1,33
Calcinara		104	141,40	19,40	1,54	20,94	21,43	15,95	3,12	0,80
Calcinara		103	205,63	18,26	2,05	20,31	20,84	15,44	3,22	0,72
Calcinara	monte FM_P11	102	233,90	17,75	2,26	20,01	20,12	12,03	1,47	0,31
Calcinara	valle FM_P11	101	240,22	17,75	1,97	19,72	19,83	10,54	1,50	0,34
Calcinara	monte FM_P10	100	246,35	17,71	2,00	19,71	19,83	10,35	1,56	0,35
Calcinara	valle FM_P10	99	252,87	17,68	1,58	19,26	19,53	11,37	2,29	0,58
Calcinara	monte FM_P9	98	271,63	17,61	1,70	19,31	19,36	10,66	1,04	0,25
Calcinara	valle FM_P9	97	277,90	17,60	0,93	18,53	18,80	10,40	2,29	0,76
Calcinara		96	306,41	16,83	1,43	18,26	18,78	14,27	3,21	0,86
Calcinara		95	329,80	16,58	1,17	17,75	18,77	16,69	4,48	1,32
Calcinara		94	355,94	15,61	1,40	17,01	17,44	17,06	2,89	0,78
Calcinara		93	380,74	15,14	1,56	16,70	17,34	17,37	3,54	0,90

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Note</b>	<b>Sezione</b>	<b>Progressiva</b>	<b>Fondo alveo</b>	<b>Tirante</b>	<b>Livello idrico</b>	<b>Carico Totale</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità</b>	<b>Froude</b>
-	-	-	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m/s</b>	-
Calcinara		92	410,60	14,60	1,52	16,12	16,66	17,50	3,25	0,84
Calcinara	monte FM_C8	91	428,80	13,63	2,22	15,85	16,13	18,04	2,35	0,50
Calcinara	valle FM_C8	90	516,30	13,00	1,37	14,37	15,45	18,61	4,60	1,25
Calcinara	monte briglia	89	520,79	12,94	1,36	14,30	14,71	15,51	2,82	0,77
Calcinara	valle briglia	88,3	522,79	12,34	1,70	14,04	14,30	14,46	2,28	0,56
Calcinara		88,2	555,31	12,05	1,79	13,84	14,20	16,69	2,67	0,64
Calcinara		88,1	595,11	11,61	1,78	13,39	13,79	17,48	2,81	0,67
Calcinara		88	626,75	11,43	1,71	13,14	13,53	15,85	2,77	0,68
Calcinara	monte FM_C9	87,2	643,27	11,30	1,78	13,08	13,25	14,50	1,83	0,44
Calcinara	valle FM_C9	87,1	678,72	10,80	2,06	12,86	12,97	12,99	1,47	0,33
Calcinara	monte FM_P8	87	686,30	10,25	2,58	12,83	12,94	12,99	1,48	0,29
Calcinara	valle FM_P8	86	698,74	10,24	1,70	11,94	12,21	13,14	2,28	0,56
Calcinara		85,3	715,35	10,02	1,55	11,57	12,21	13,63	3,54	0,91
Calcinara		85,2	737,60	9,73	1,57	11,30	12,09	12,15	3,93	1,00
Calcinara		85,1	754,43	9,51	1,59	11,10	11,55	10,27	2,97	0,75
Calcinara		85	770,17	9,31	1,74	11,05	11,38	9,89	2,54	0,62
Calcinara		84,3	781,39	9,26	1,70	10,96	11,35	10,17	2,76	0,68
Calcinara		84,2	806,66	9,15	1,48	10,63	11,02	10,16	2,75	0,72
Calcinara		84,15	833,10	8,68	1,63	10,31	10,75	10,14	2,95	0,74
Calcinara		84,1	860,63	8,20	1,85	10,05	10,44	12,18	2,77	0,65
Calcinara		84,05	898,11	7,74	1,57	9,31	10,30	16,63	4,41	1,12
Calcinara		84	922,87	7,44	1,28	8,72	9,09	17,35	2,71	0,76
Calcinara	monte briglia	83	943,09	7,37	1,24	8,61	9,02	17,56	2,84	0,82
Calcinara	valle briglia	82,1	944,09	6,37	1,94	8,31	8,48	17,67	1,83	0,42
Calcinara	monte FM_P7	82	949,69	6,30	1,86	8,16	8,38	19,91	2,06	0,48
Calcinara	valle FM_P7	81	959,69	6,20	1,94	8,14	8,37	22,18	2,15	0,49
Calcinara		80	989,94	5,80	2,30	8,10	8,25	20,39	1,70	0,36
Calcinara	monte FM_P6	79	1145,09	4,67	3,36	8,03	8,11	21,29	1,22	0,21
Calcinara	valle FM_P6	78,2	1151,09	4,66	3,36	8,02	8,10	21,73	1,24	0,22
Calcinara		78,1	1194,39	4,60	3,40	8,00	8,09	22,17	1,33	0,23
Calcinara		78,05	1198,39	4,50	3,50	8,00	8,08	22,07	1,29	0,22
Calcinara	monte FM_C7	78	1200,39	4,50	3,46	7,96	8,08	25,24	1,56	0,27
Calcinara	confluenza scatolare	77,1	1397,94	3,42	4,40	7,82	8,07	26,87	2,19	0,33
Calcinara	valle FM_C7	77	1460,85	3,08	4,26	7,34	7,87	35,46	3,21	0,50
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,30	7,37	7,51	35,53	1,68	0,26
Calcinara	confl. Tombone	75	1601,52	2,77	4,49	7,26	7,36	30,87	1,41	0,21
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,63	7,15	7,30	38,59	1,70	0,25
Calcinara		73,5	1725,79	2,50	4,69	7,19	7,30	38,53	1,44	0,21
Calcinara	monte FM_C4	73	1727,79	2,49	4,68	7,17	7,29	38,53	1,54	0,23
Calcinara	valle FM_C4	72	1902,35	2,20	4,84	7,04	7,17	37,62	1,60	0,23

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	-
Colombiera		110	0,00	6,00	2,35	8,35	9,24	15,19	4,17	0,87
Colombiera		111	2,80	5,98	2,34	8,32	8,58	8,14	2,24	0,47
Colombiera	imbocco FM_C6	112	3,80	5,97	2,36	8,33	8,57	5,46	2,16	0,45
Colombiera	FM_C6	113	23,30	5,84	2,43	8,27	8,51	5,46	2,16	0,44
Colombiera	FM_C6	114	141,30	5,02	3,06	8,08	8,32	5,46	2,16	0,39
Colombiera	FM_C6	115	212,18	4,53	3,49	8,02	8,26	5,46	2,16	0,37
Colombiera	FM_C6	116	233,10	4,39	3,62	8,01	8,25	5,46	2,16	0,36
Colombiera	FM_C6	117	267,40	4,15	3,88	8,03	8,09	6,78	1,13	0,18
Colombiera	sbocco FM_C6	118	288,00	4,01	3,81	7,82	8,07	17,43	2,22	0,36

Tabella 5 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.

I risultati ottenuti con il modello monodimensionale mostrano modalità di deflusso della piena analoghe a quelle già descritte per l'evento cinquantennale, ma caratterizzate da maggiore intensità dei fenomeni (in termini di portate esondate e livelli idrici massimi), in relazione alle maggiori portate afferenti.

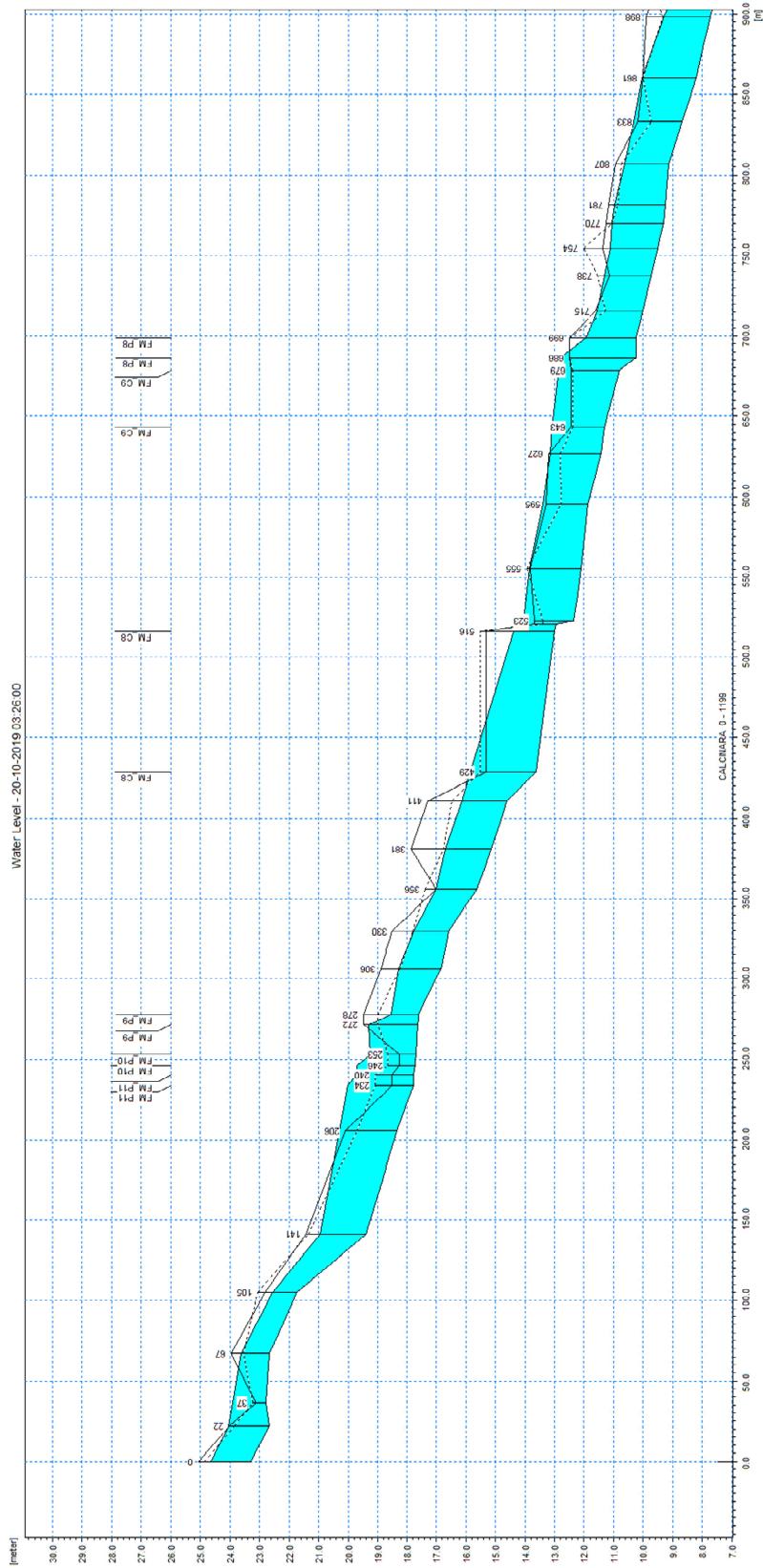
Per il fosso Calcinara il comportamento è simile a quello già descritto, con l'eccezione di un sormonto delle sponde (dell'ordine di 10-20 cm) anche nel tratto a cielo aperto che si sviluppa lungo via Melara in adiacenza al perimetro Ovest del sito della centrale termoelettrica. Sia la sede stradale (che in questo tratto presenta una "corda molle") che l'area della centrale sono interessati da esondazioni.

Per quanto riguarda il Canale Fossamastra si riscontrano maggiori esondazioni nel tratto di monte, anche a causa di un più marcato funzionamento in pressione della tominatura a doppia canna che induce il sormonto delle sponde a monte dell'imbocco. Anche via Valdilocchi nel tratto di monte è interessata da questi allagamenti; la portata si propaga verso valle congiungendosi con i flussi esondati dal Calcinara e proseguendo verso Ovest.

Nel tratto a lato dello stabilimento Leonardo le dinamiche sono analoghe a quelle già descritte; più a valle nel tratto oggetto di recente sistemazione si riscontrano invece adeguati franchi idraulici (superiori al metro), per quanto la portata massima defluente in alveo sia assai ridotta rispetto al valore idrologico di riferimento.

Come mostrato dagli idrogrammi di Figura 42, il valore del colmo di piena in corrispondenza di viale San Bartolomeo risulta infatti pari a circa 77 m<sup>3</sup>/s a fronte di quello teorico determinato nell'analisi idrologica pari a circa 132 m<sup>3</sup>/s.

Nel tratto più a monte lungo via Valdilocchi si confermano sostanzialmente i valori di capacità di portata dell'alveo già riscontrati per lo scenario TR50, con una leggera maggiorazione dovuta ai maggiori carichi idraulici (che comportano anche più pronunciate esondazioni). A valle del ponte ferroviario la portata massima in alveo è poco inferiore a 49 m<sup>3</sup>/s, mentre a monte della tominatura si riscontra un modesto effetto di laminazione del colmo a causa delle più significative esondazioni.



**Figura 36 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Calcinara per TR200 (tratto di monte).**

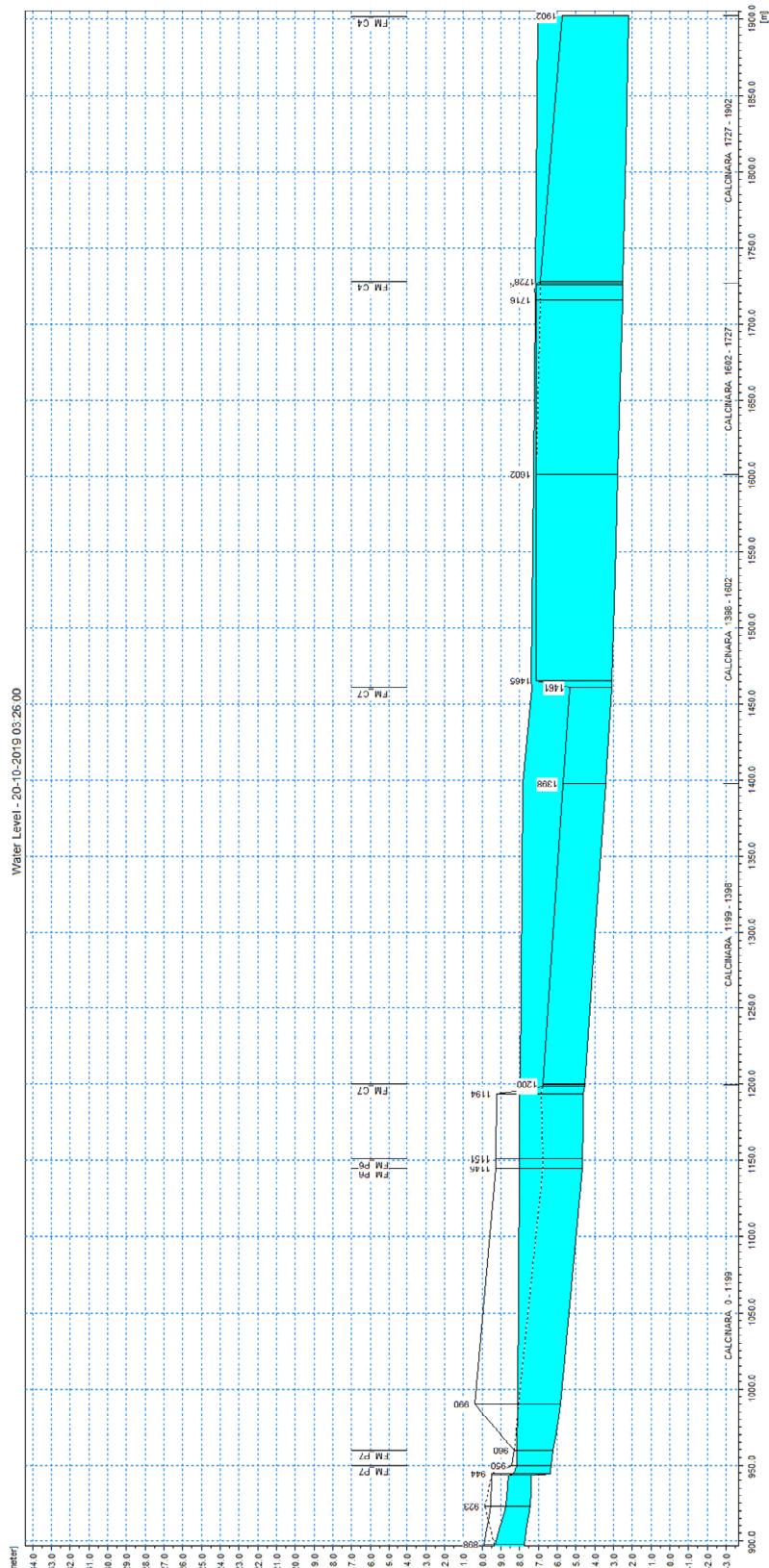


Figura 37 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Calcinara per TR200 (tratto di valle).

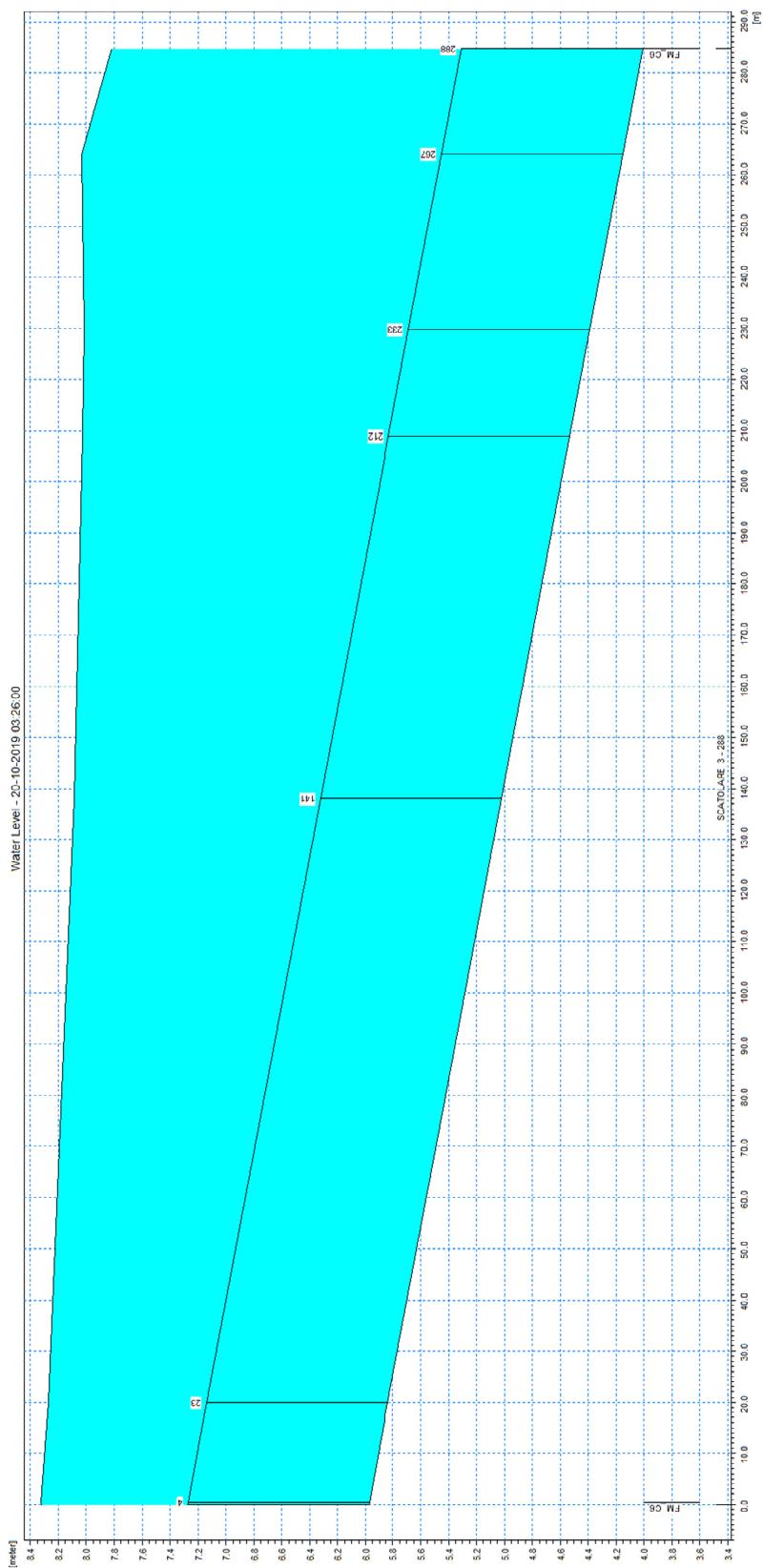


Figura 38 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Colombiera TR200.

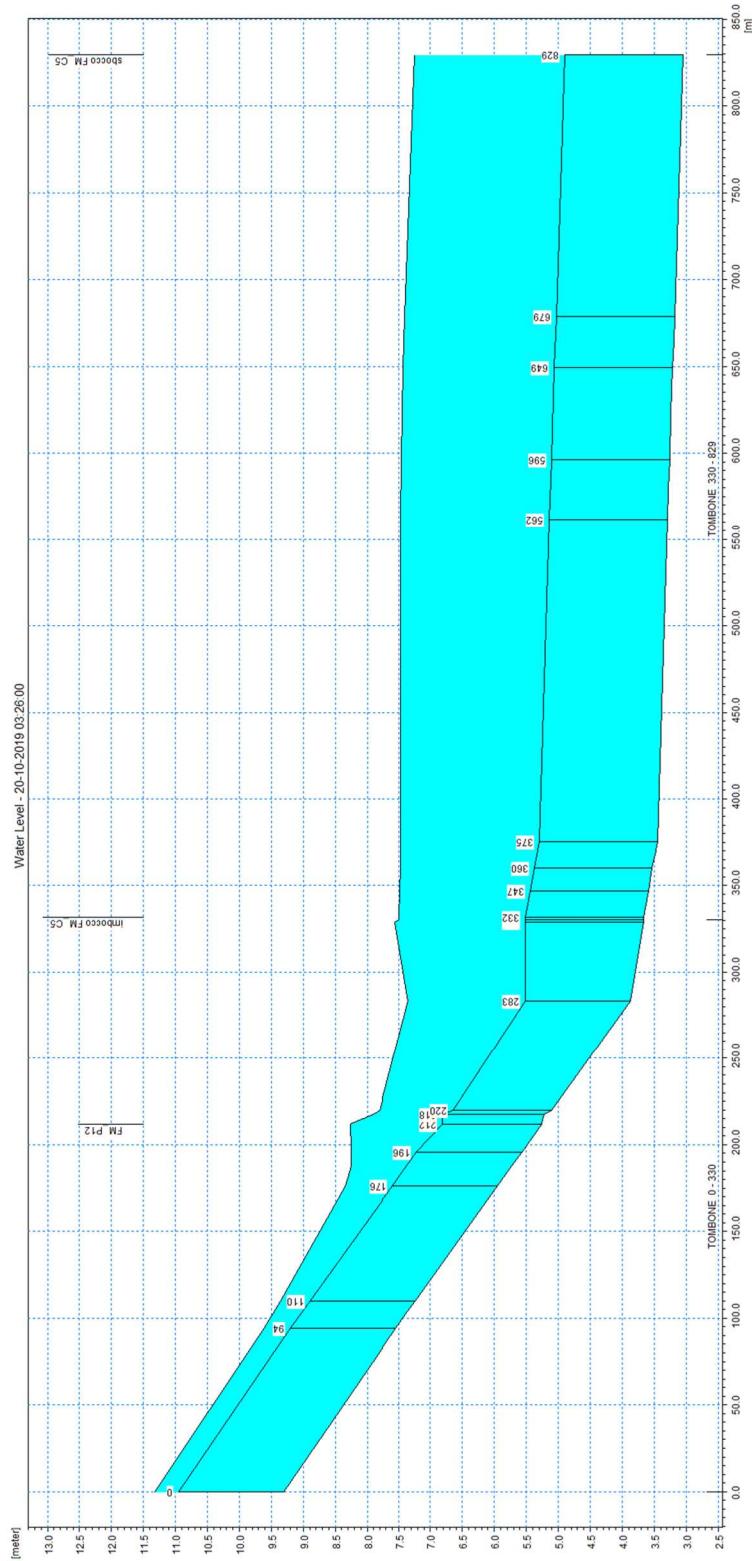


Figura 39 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone TR200.

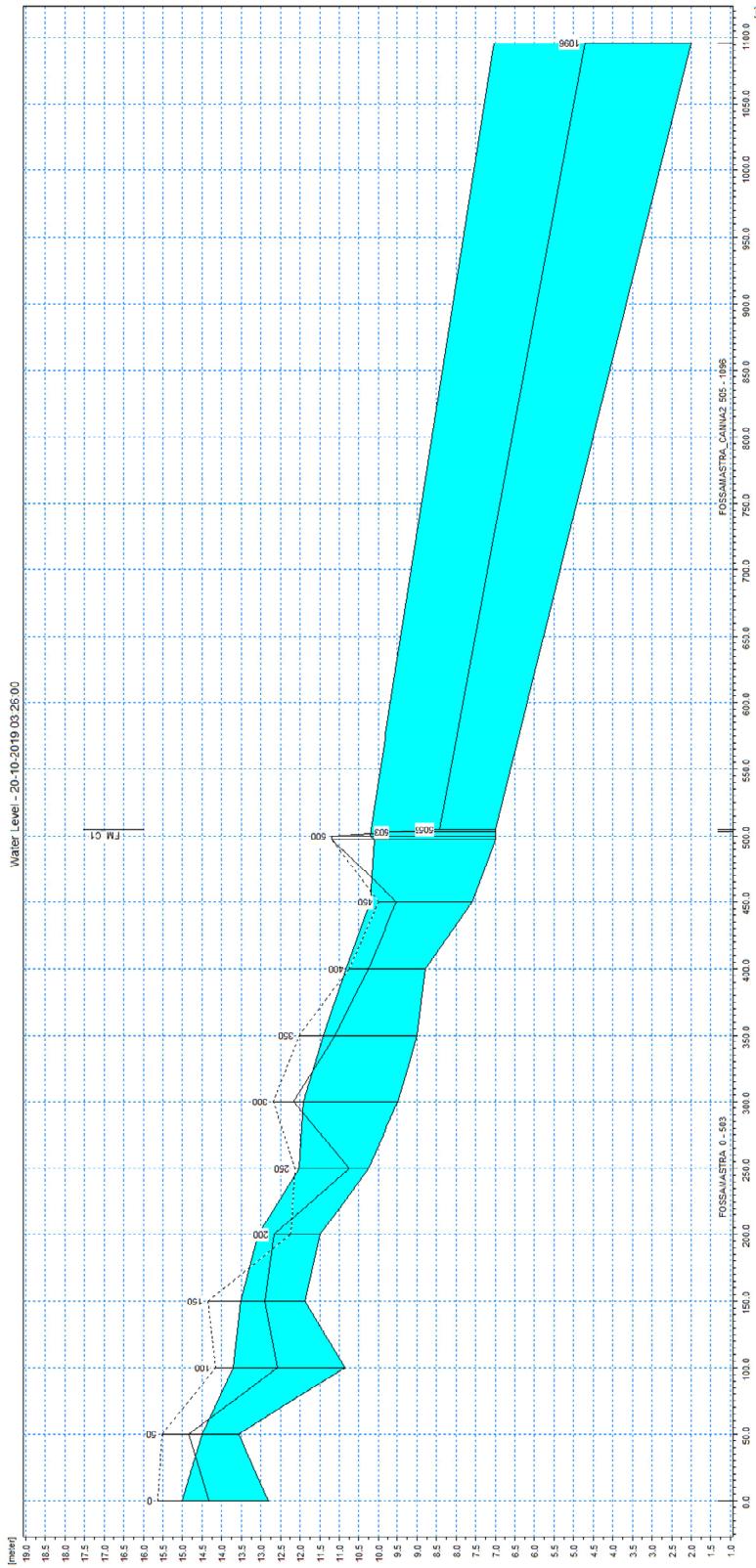
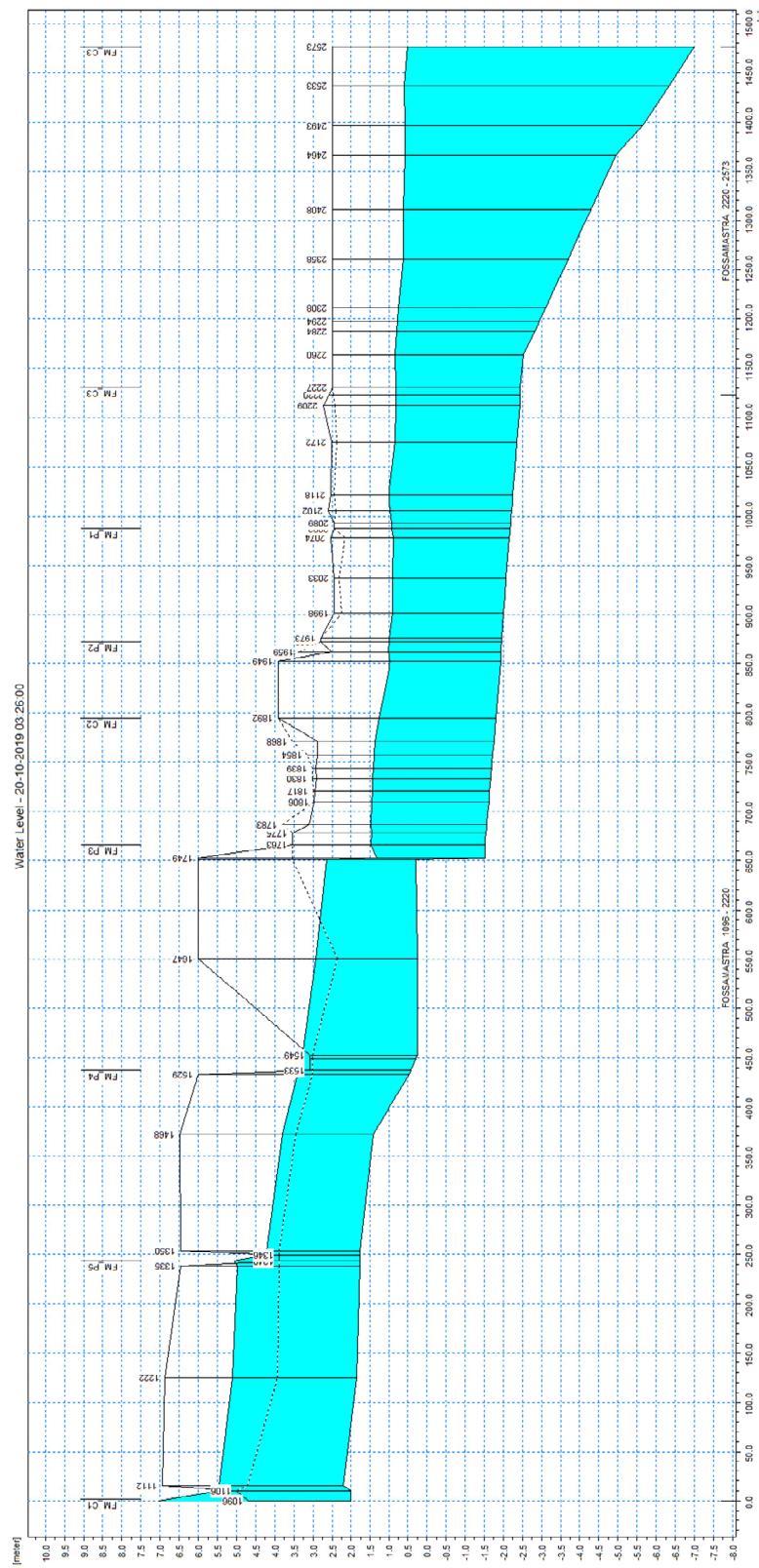


Figura 40 – Profilo longitudinale di corrente TR200 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 1 a cielo aperto e la sezione 14 in cui termina lo scatolare FM-C1.



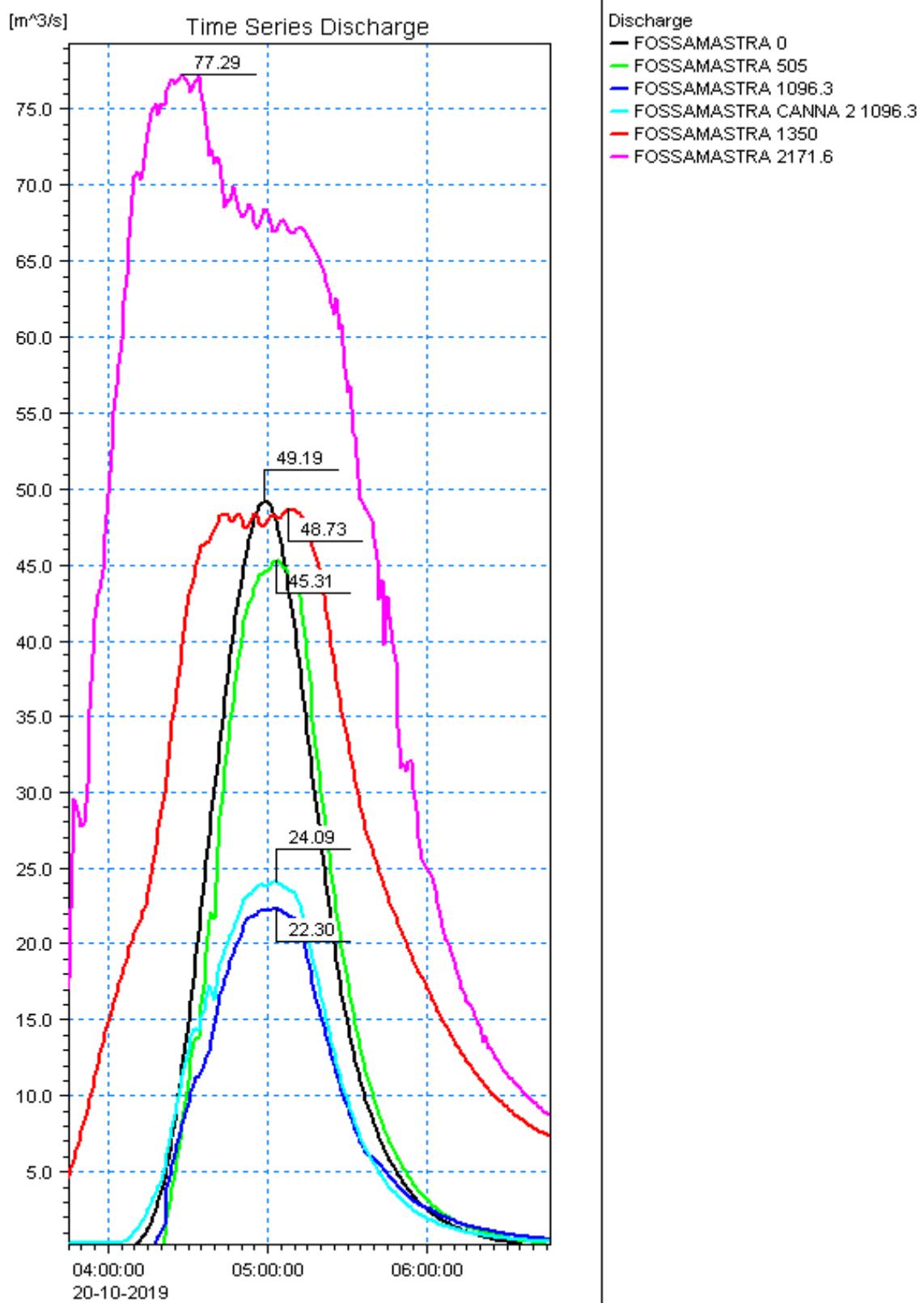


Figura 42 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul canale Fossamastra.

In Figura 43 sono rappresentati gli idrogrammi di portata osservati nel corso della simulazione presso alcune sezioni significative del Calcinara; la portata massima recapitata al Fossamastra risulta pari a circa  $31 \text{ m}^3/\text{s}$ , non molto superiore al valore osservato per lo scenario TR50 in quanto limitato dal tratto tombato in pressione a monte della confluenza.

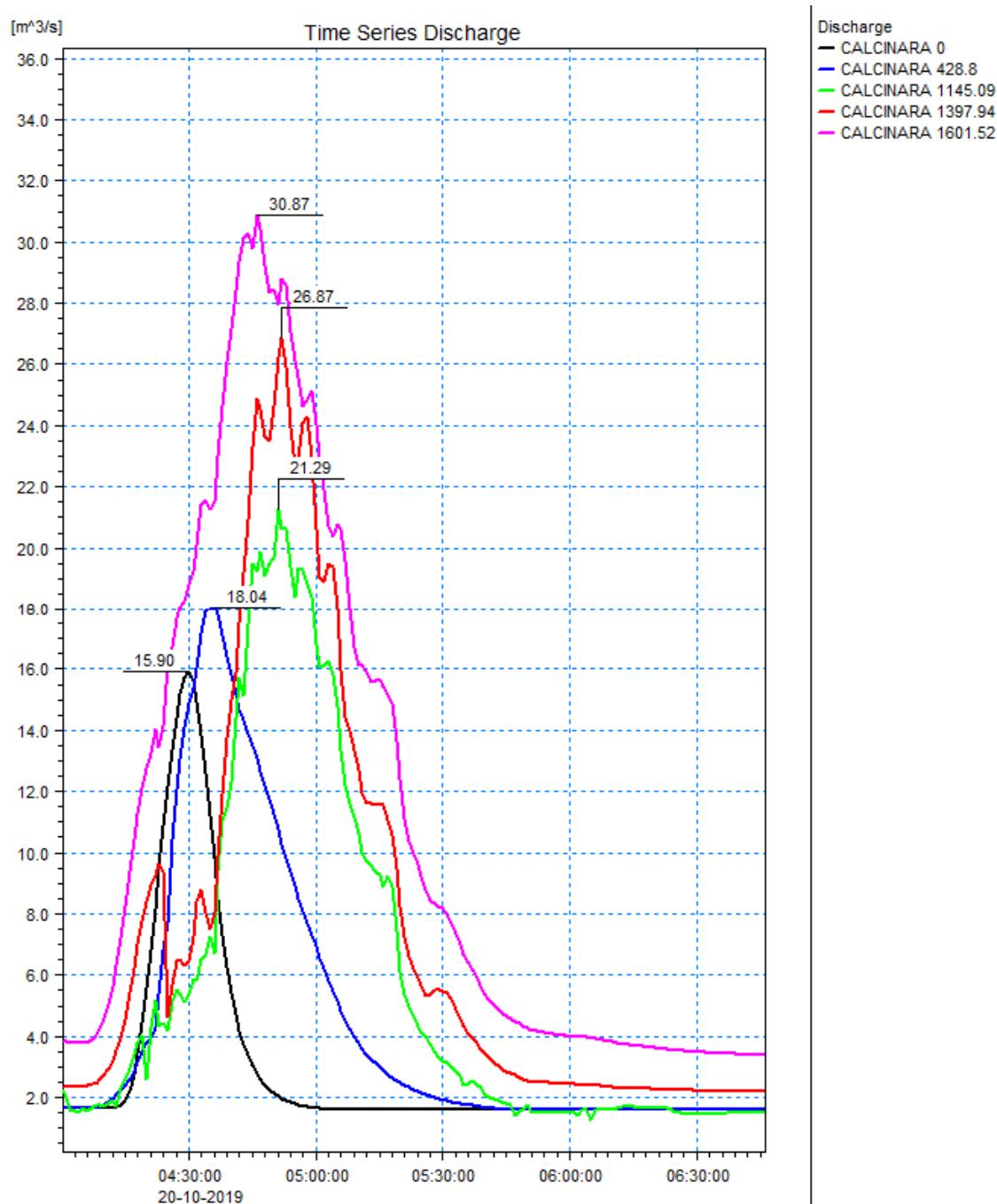


Figura 43 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul fosso Calcinara.

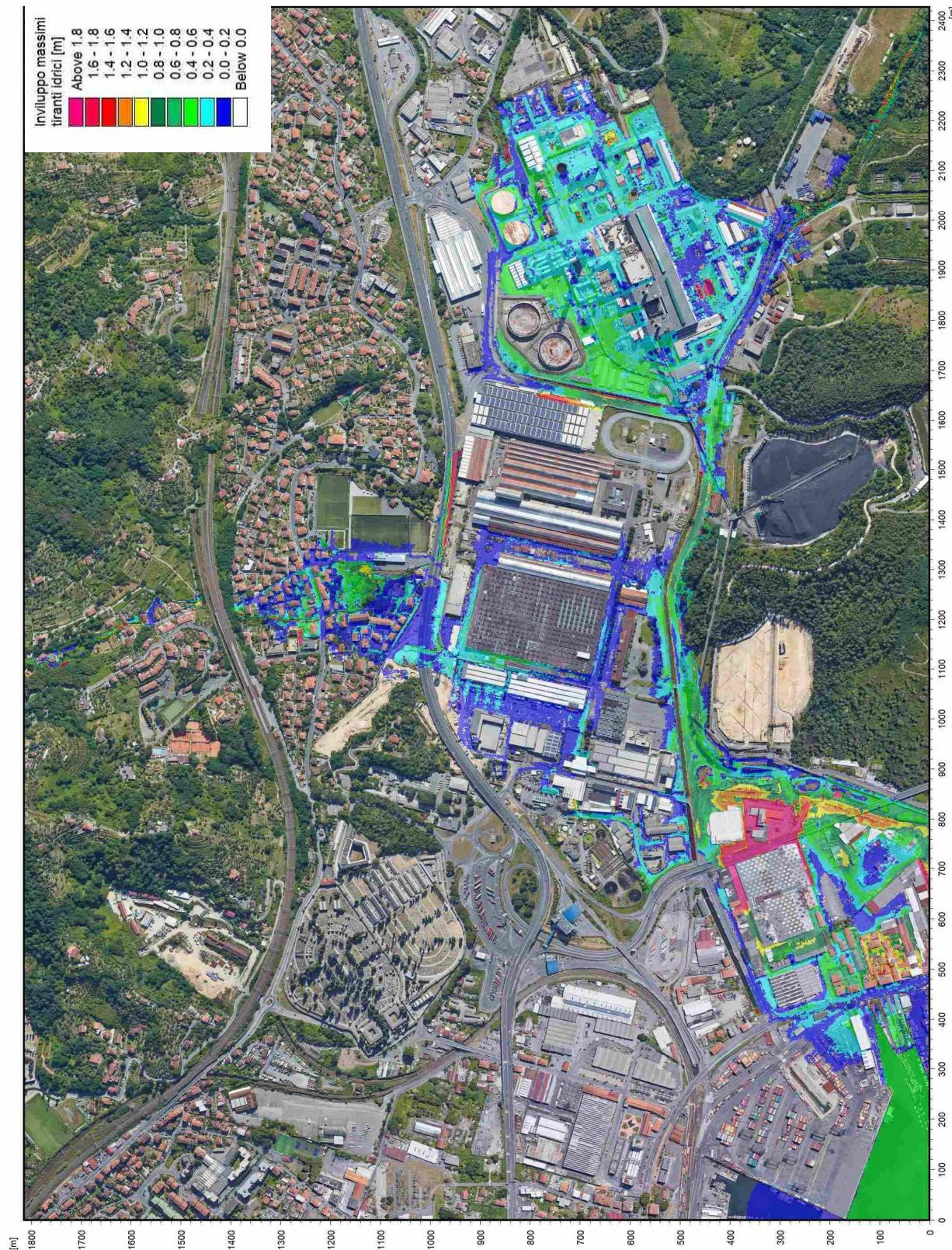
In Figura 44 e Figura 45 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno duecentennale.

In Figura 44 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 45 la colorazione blu indica le velocità minori mentre quella rossa le maggiori.

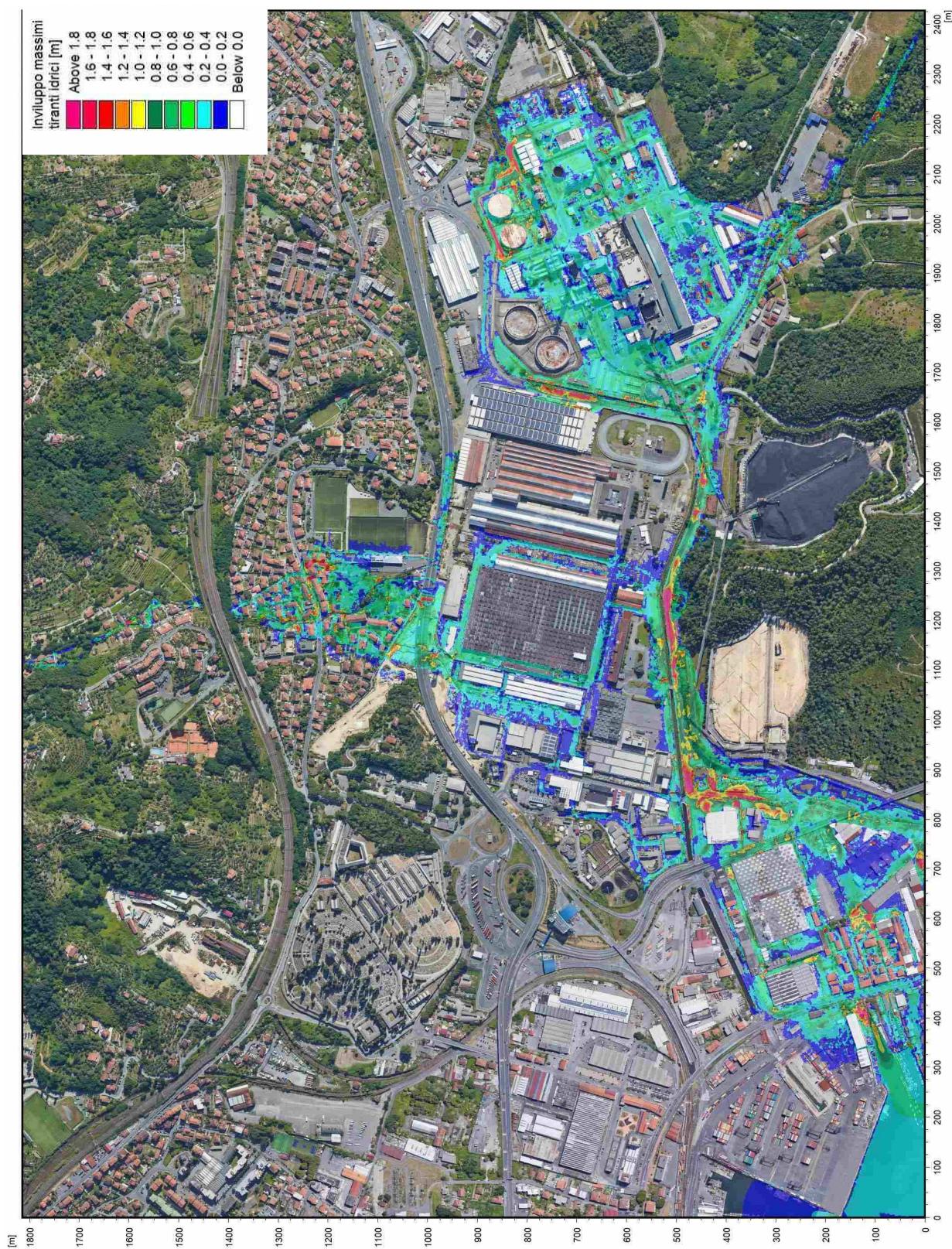
Le aree interne all'alveo inciso non sono rappresentate perché, come già detto, il loro contributo al deflusso viene considerato nell'ambito del modello MIKE11.

Valgono le medesime considerazioni già esposte per lo scenario TR50; l'estensione superficiale delle esondazioni provocate dal passaggio dell'onda di piena duecentennale risultano non molto più ampie rispetto alla piena cinquantennale, sebbene caratterizzata da maggiori valori di altezze d'acqua e velocità.

In analogia a quanto rappresentato per lo scenario TR50, nei successivi capitoli 5.1.2.1 e 5.1.2.2 è descritta la dinamica di evoluzione dell'evento con riferimento alla distribuzione delle altezze d'acqua sul piano campagna per alcuni istanti cronologici della simulazione condotta.



**Figura 44 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=200 anni.**



**Figura 45 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità per TR=200 anni.**

### 5.1.2.1 Dinamiche di allagamento dell'area della centrale ENEL nel corso dell'evento TR200

Nelle figure che seguono sono rappresentati (in termini di distribuzione delle altezze d'acqua sul piano campagna, o tiranti idrici) alcuni istanti della simulazione dell'evento di piena duecentennale per quanto riguarda l'area Est del dominio di calcolo, su cui insiste la centrale termoelettrica ENEL.

Le dinamiche di origine e propagazione delle esondazioni sono analoghe a quelle già descritte per l'evento TR50; si evidenzia la presenza di esondazioni dal tratto scoperto del Calcinara a monte della confluenza in Fossamastra, oltre che dal tratto più a monte di quest'ultimo corso d'acqua lungo via Valdilocchi.

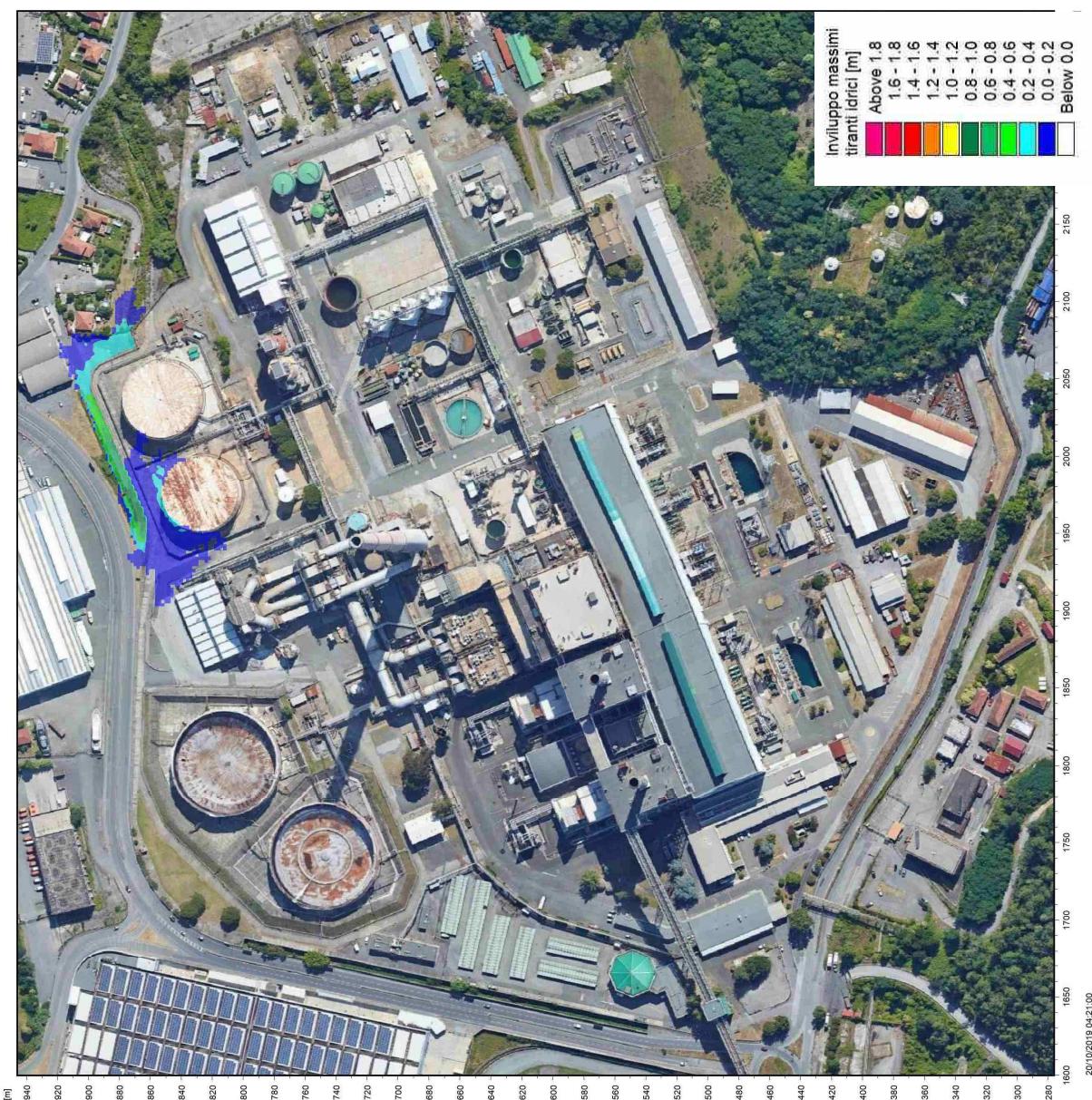


Figura 46 – Dinamiche di esondazione nell'area della centrale ENEL, TR200 – istante 1

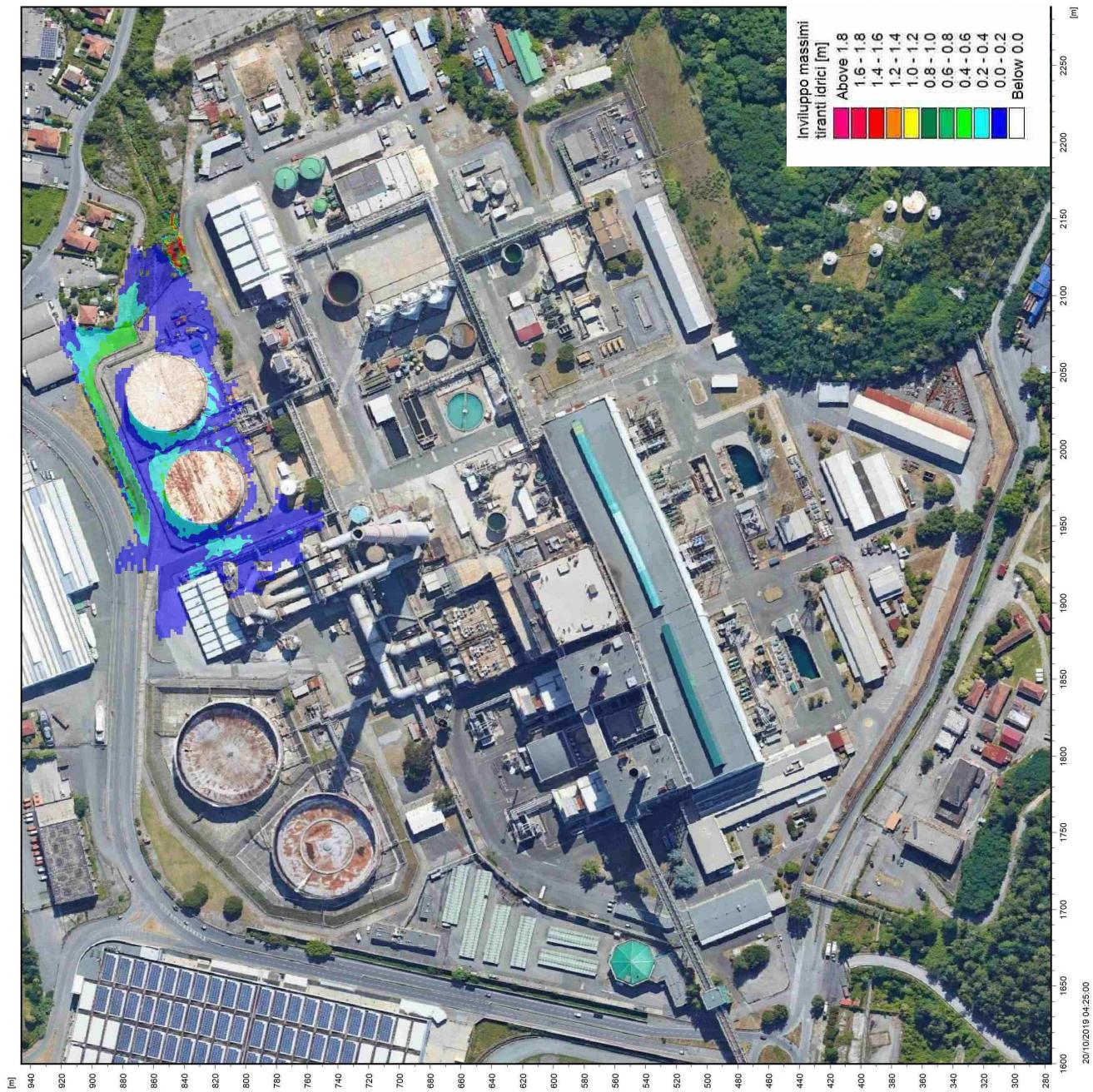


Figura 47 – Dinamiche di esondazione nell’area della centrale ENEL, TR200 – istante 2

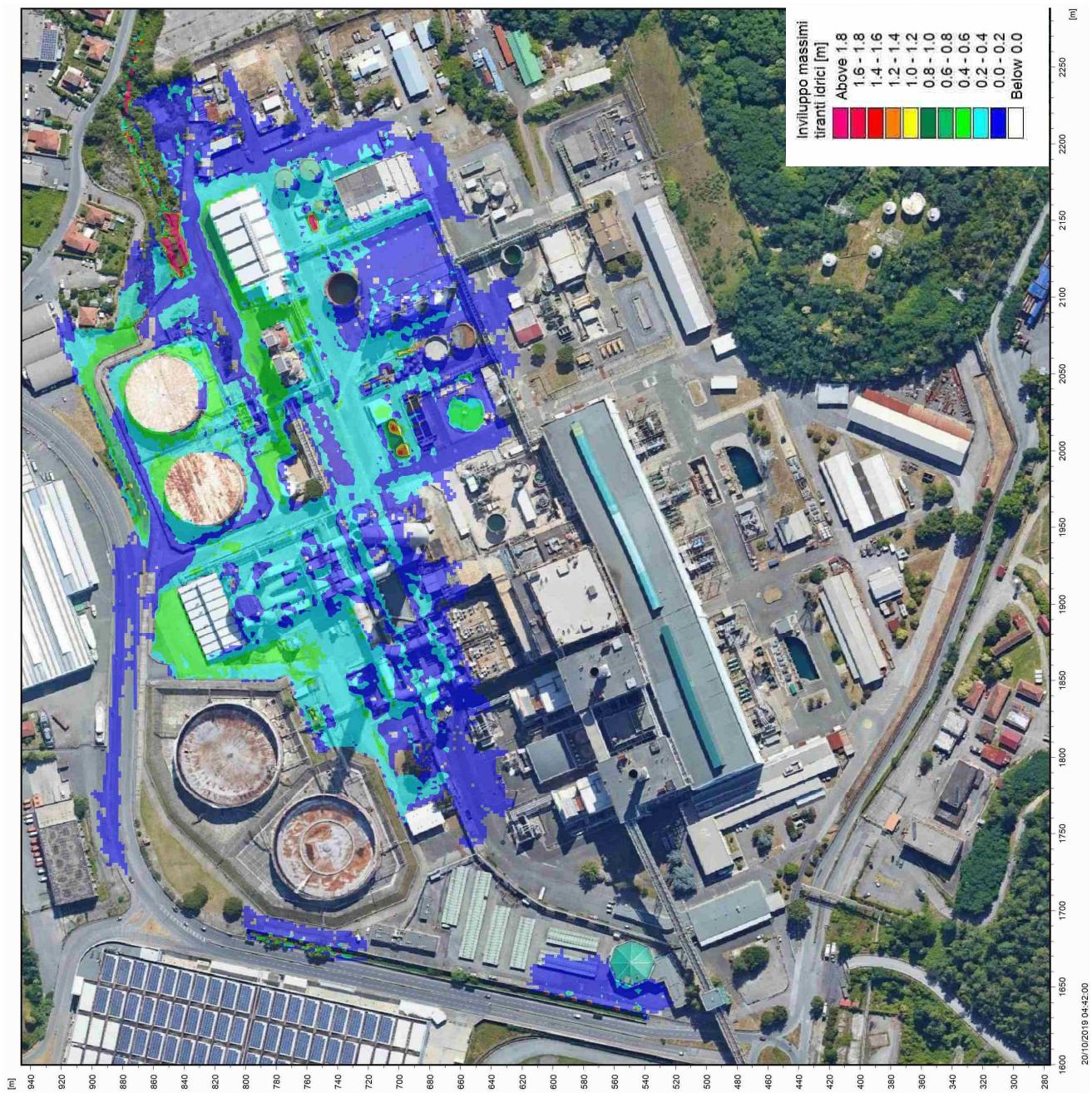


Figura 48 – Dinamiche di esondazione nell’area della centrale ENEL, TR200 – istante 3

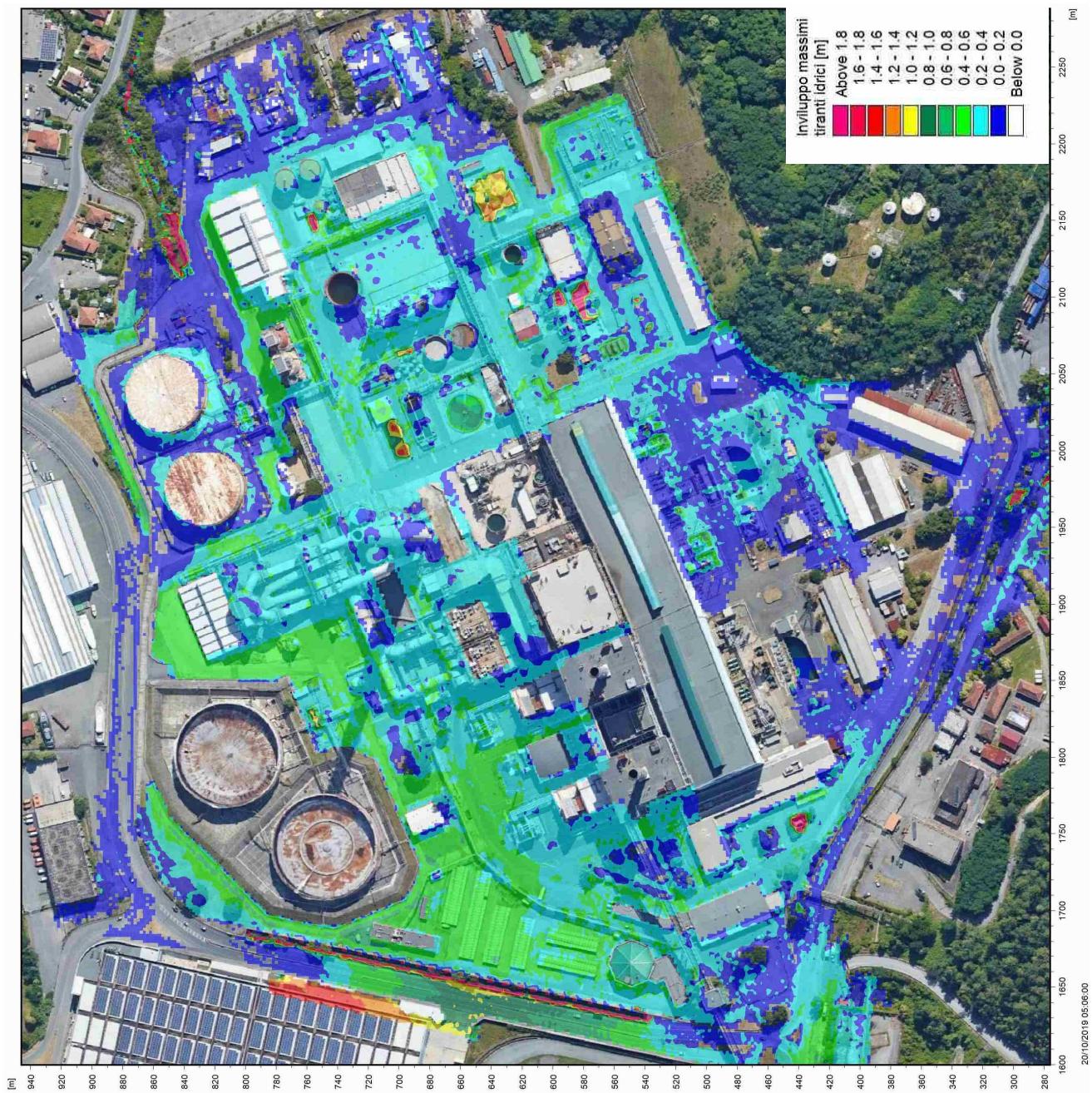
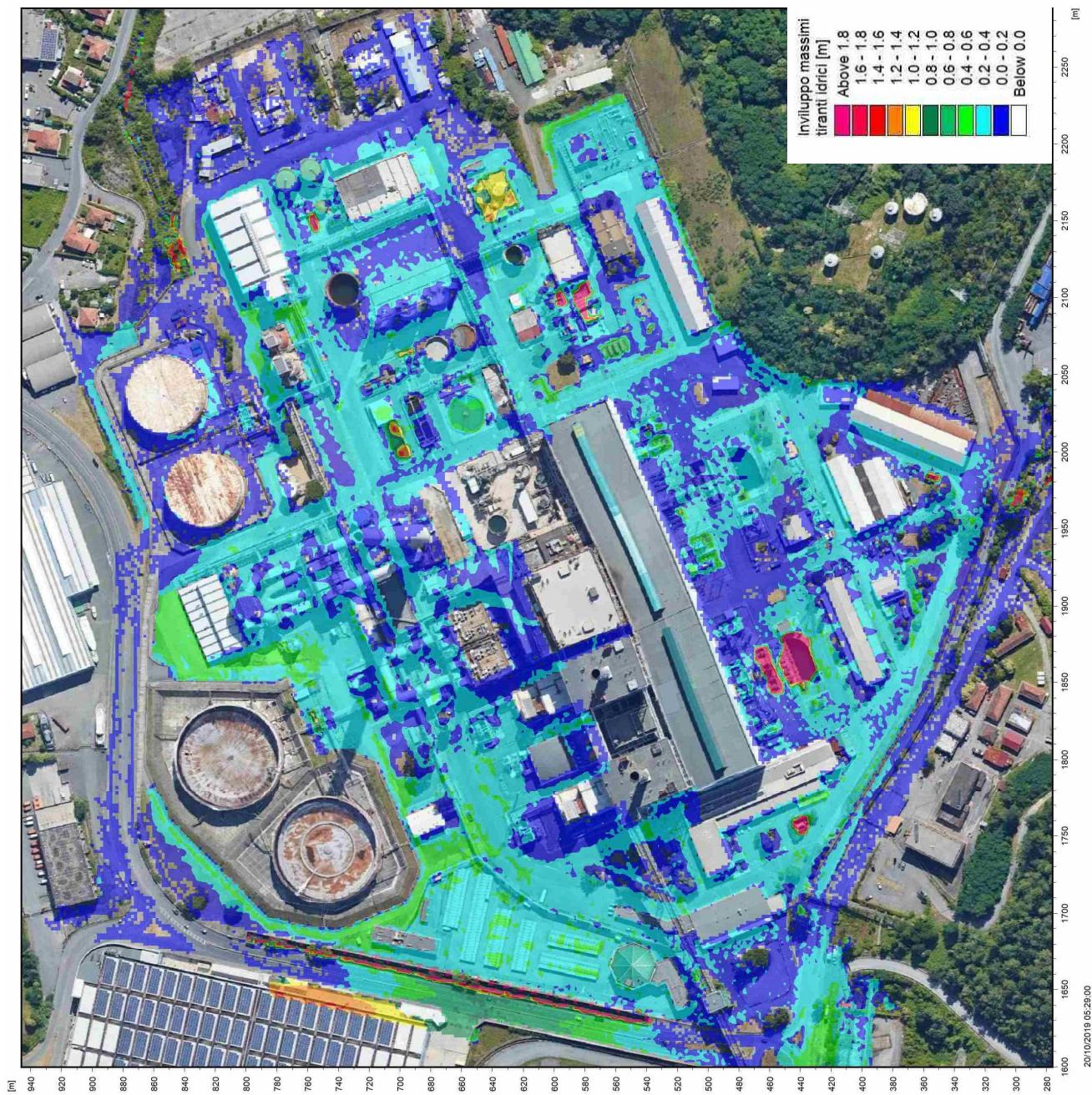
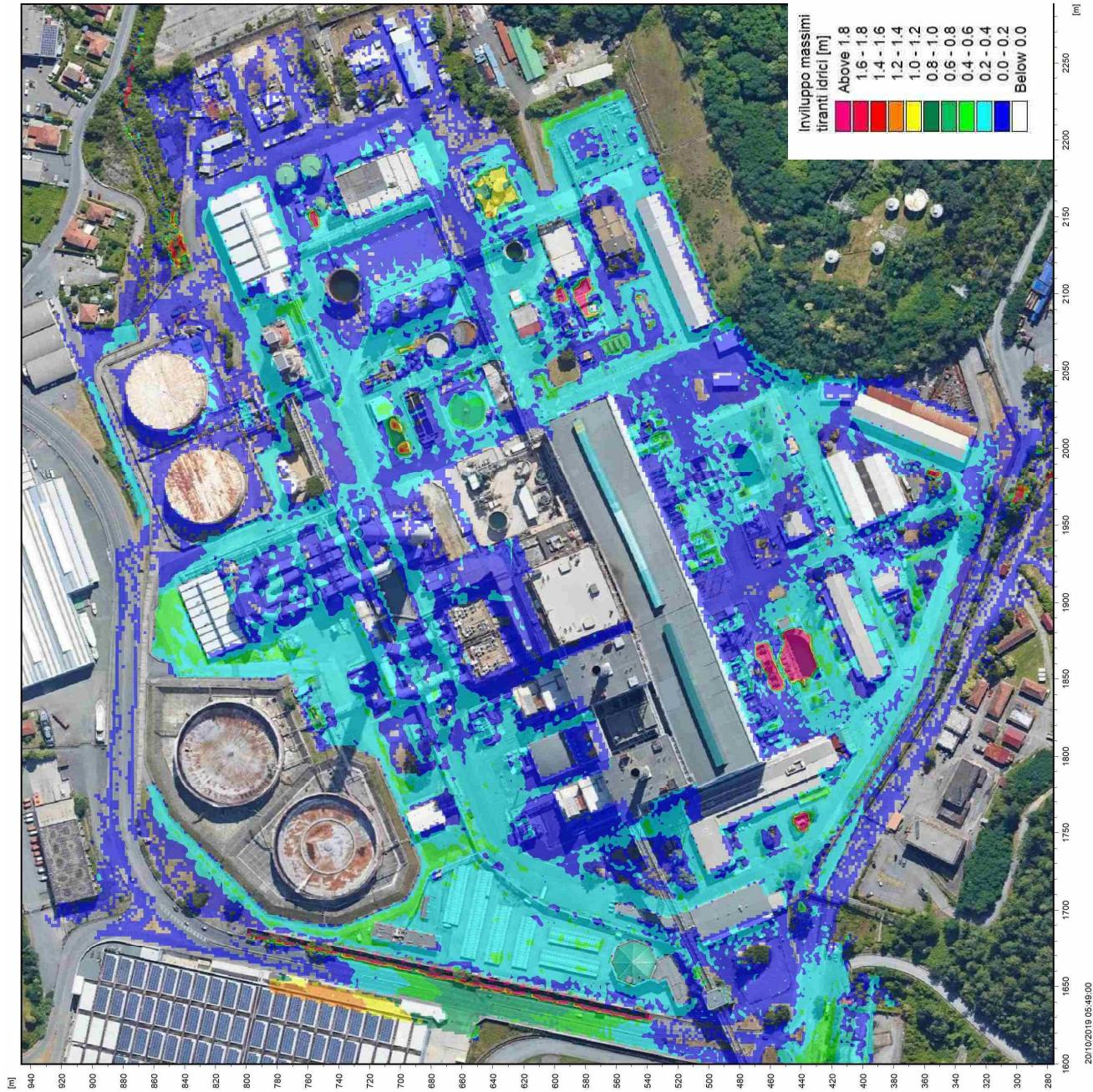


Figura 49 – Dinamiche di esondazione nell’area della centrale ENEL, TR200 – istante 4



**Figura 50 – Dinamiche di esondazione nell’area della centrale ENEL, TR200 – istante 5**



**Figura 51 – Dinamiche di esondazione nell’area della centrale ENEL, TR200 – istante 6**

#### 5.1.2.2 *Dinamiche di allagamento dell’area industriale Ovest per l’evento TR200*

Nelle figure che seguono sono rappresentati (in termini di distribuzione delle altezze d’acqua sul piano campagna, o tiranti idrici) alcuni istanti della simulazione dell’evento di piena duecentennale per quanto riguarda l’area industriale Ovest, estesa indicativamente tra via Melara, via Valdilocchi e via privata OTO.

Anche in questo caso le dinamiche sono del tutto analoghe a quelle già descritte per l’evento TR50, a meno di maggiori valori di tiranti idrici e velocità. Si evidenzia una maggiore estensione degli allagamenti nell’area

artigianale limitrofa a Ovest, giungendo a interessare l'alveo del Fosso Melara nel tratto a cielo aperto a monte della tominatura che passa al di sotto dell'area del depuratore.



**Figura 52 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest, TR200 – istante 1**

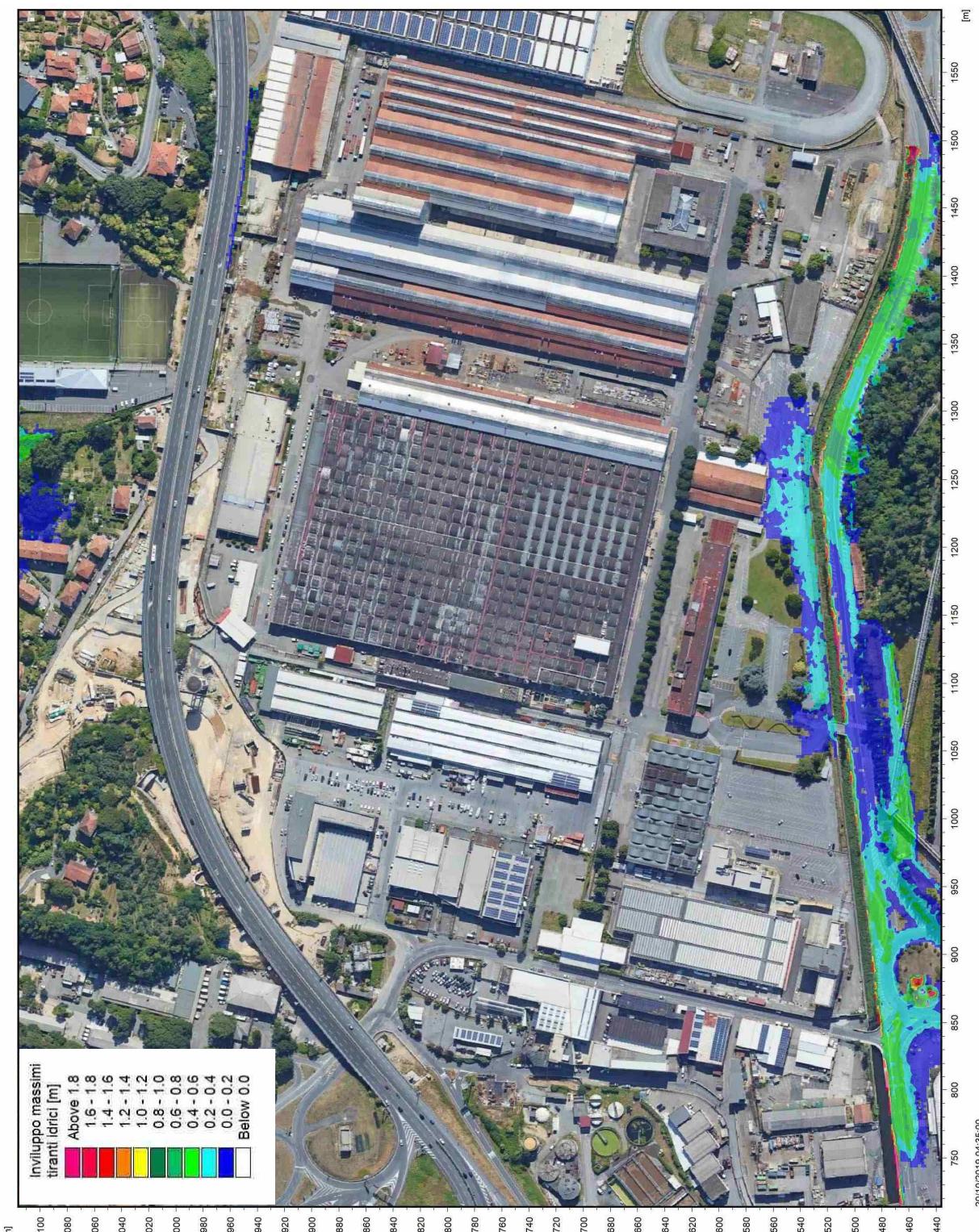


Figura 53 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest, TR200 – istante 2

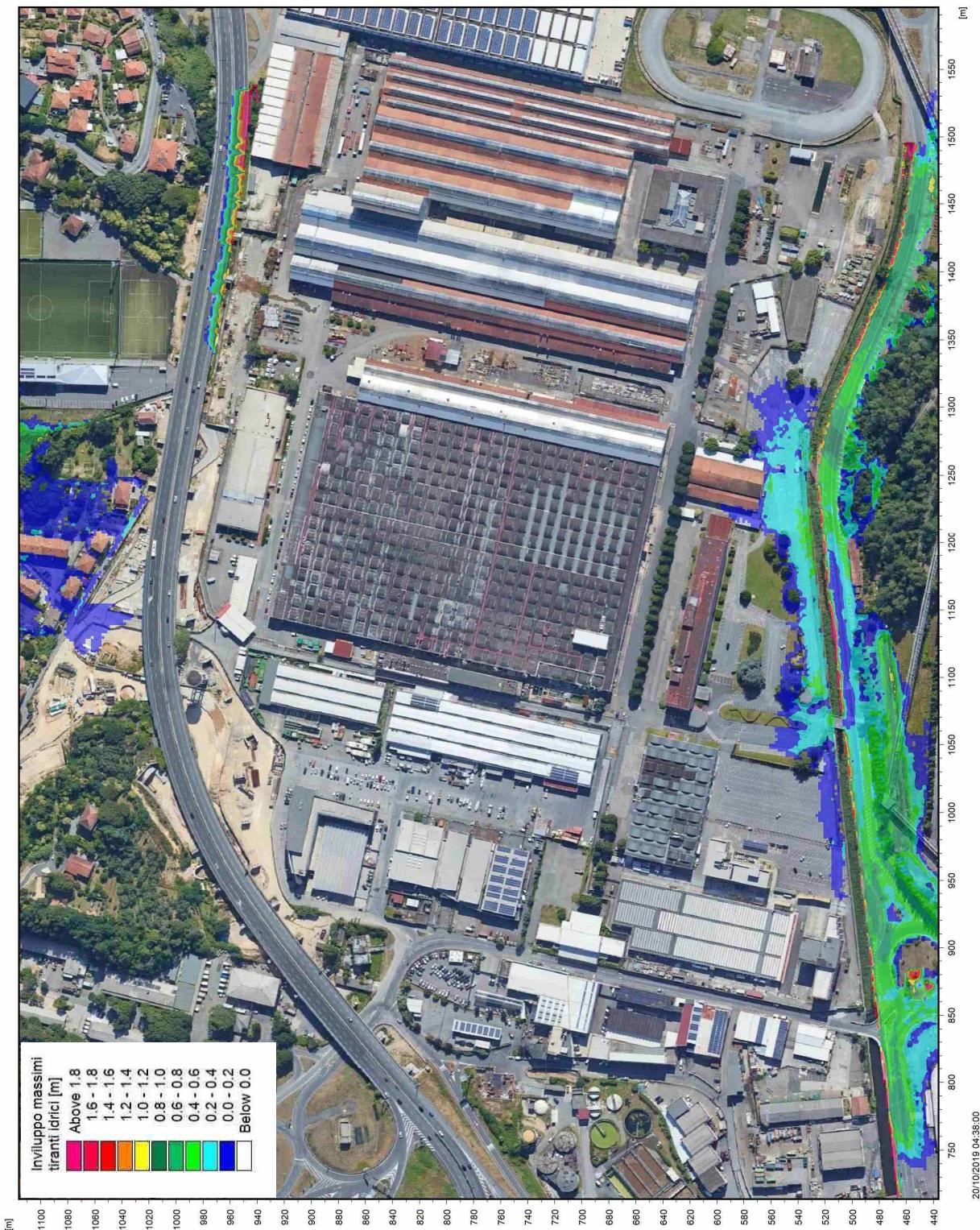


Figura 54 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest, TR200 – istante 3

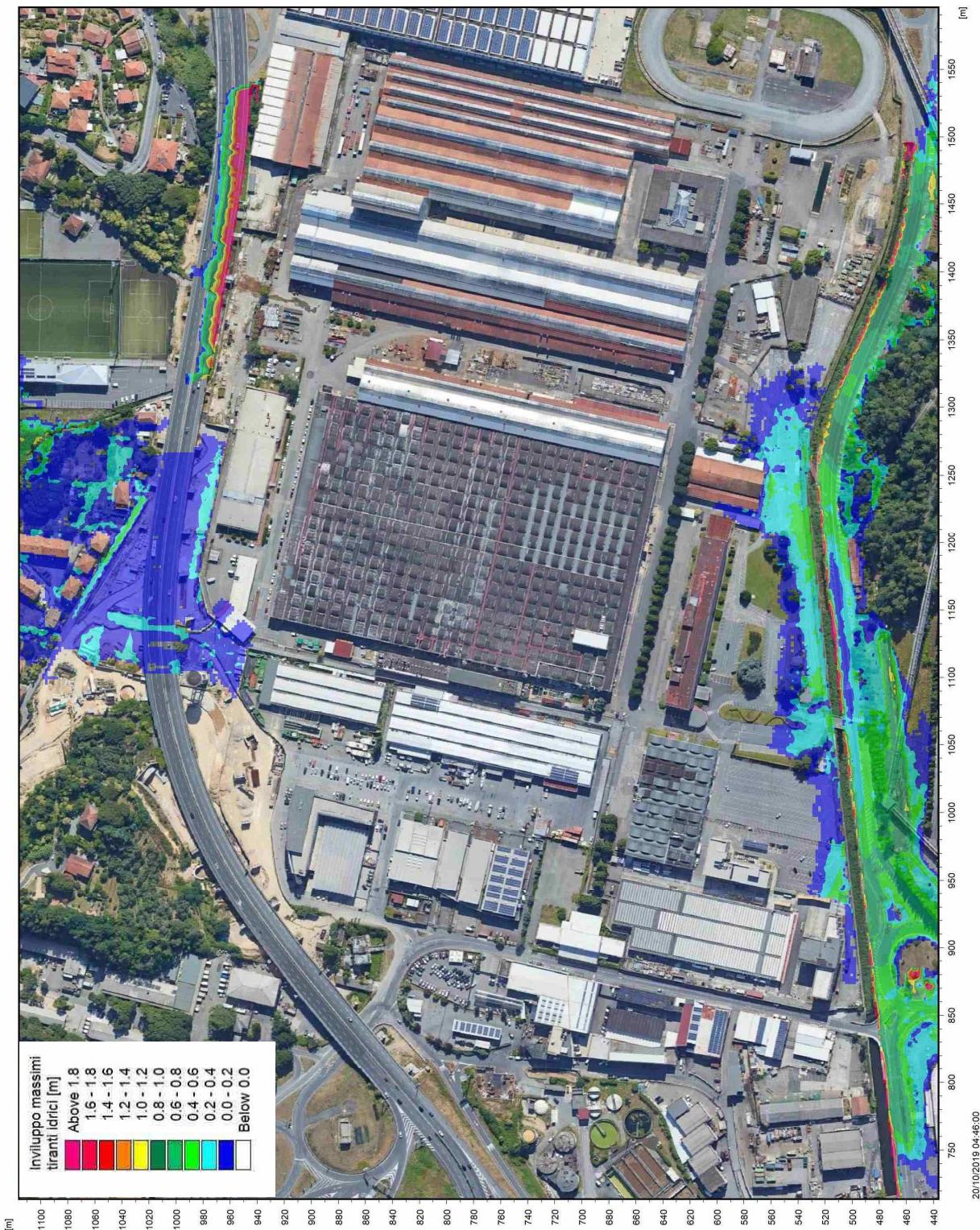


Figura 55 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest, TR200 – istante 4

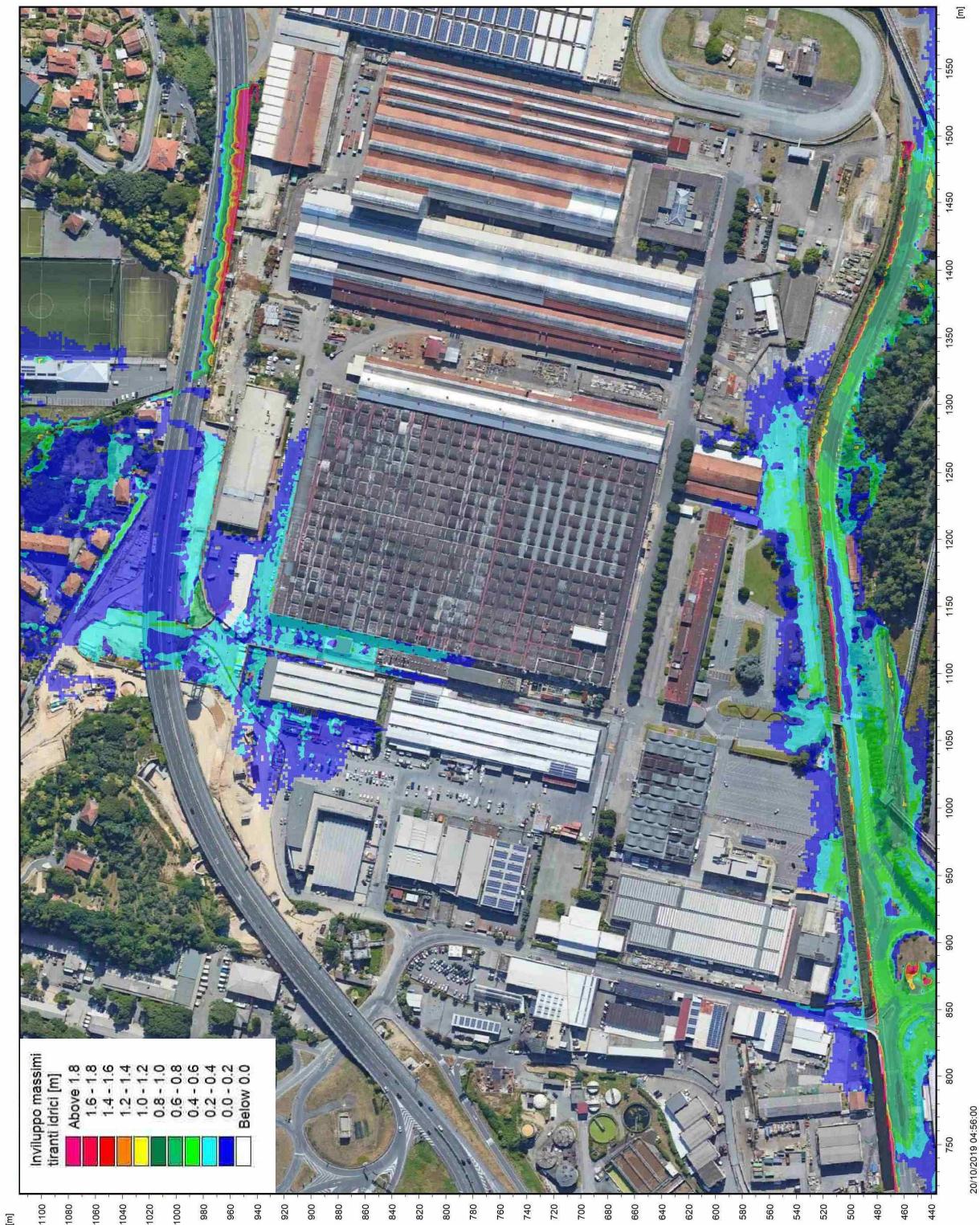


Figura 56 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest, TR200 – istante 5

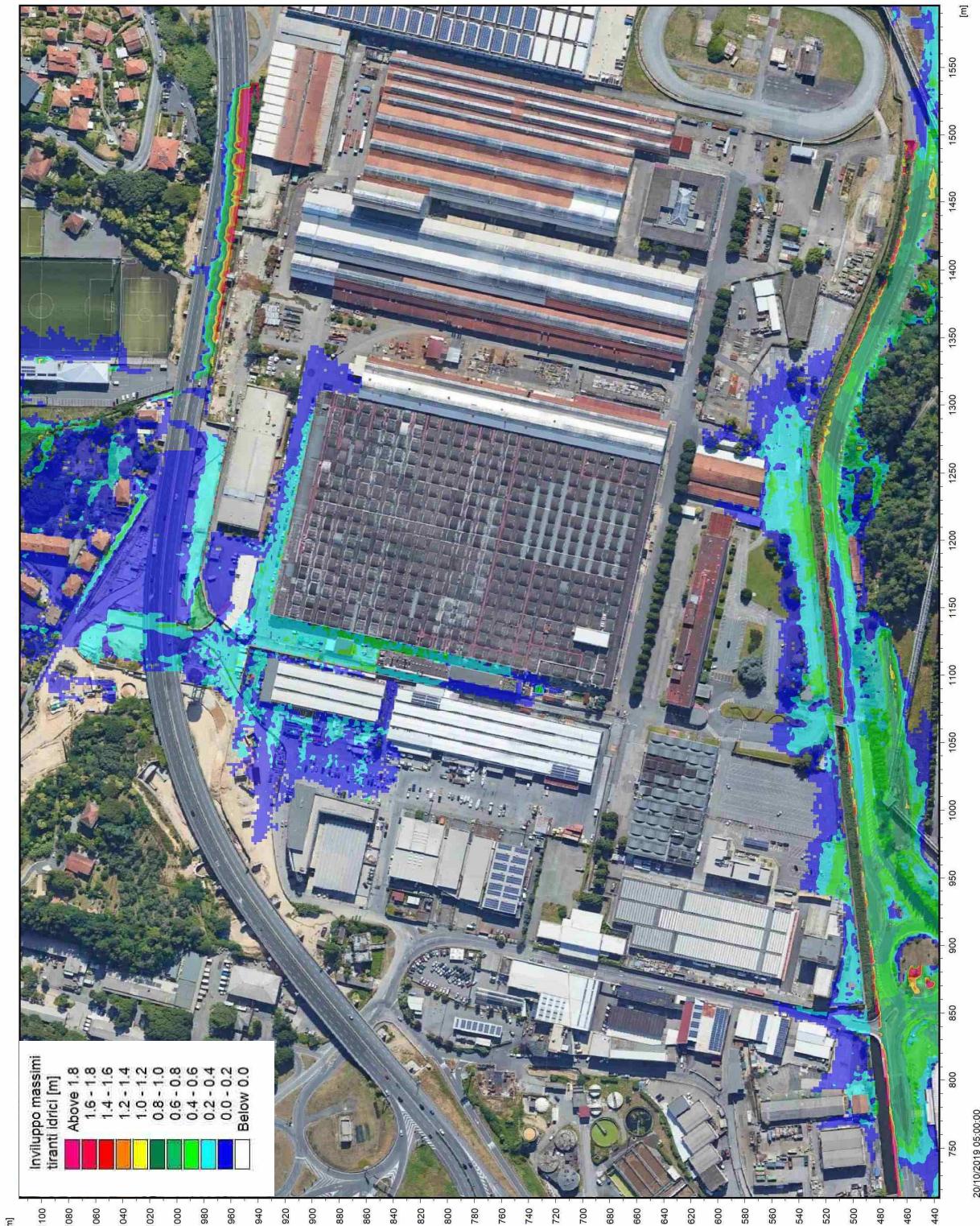


Figura 57 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest, TR200 – istante 6

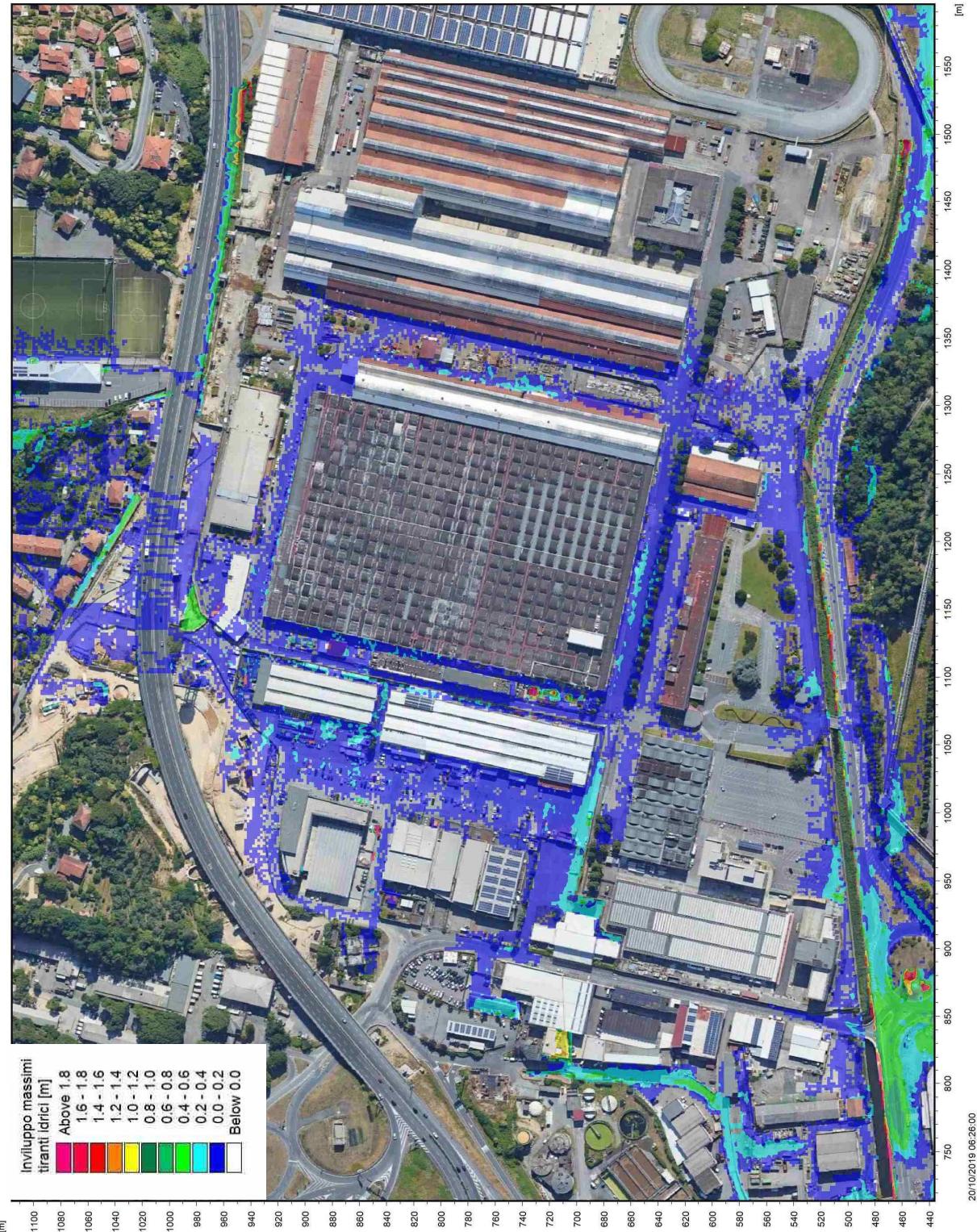


Figura 58 – Dinamiche di allagamento dell'area industriale Ovest, TR200 – istante 7

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

Nella Tabella 6 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico del bacino del Canale Fossamastra (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

Nelle immagini da Figura 59 a Figura 64 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,	m3/s	m/s	-
Fossamastra		1	0,00	12,81	2,30	15,11	15,81	54,96	3,71	0,78
Fossamastra		2	50,00	13,57	1,03	14,60	15,46	54,95	4,11	1,29
Fossamastra		3	100,00	10,86	2,96	13,82	14,16	54,96	2,58	0,48
Fossamastra		4	150,00	11,87	1,77	13,64	14,14	54,96	3,14	0,75
Fossamastra		5	200,00	11,49	1,68	13,17	14,10	53,06	4,28	1,05
Fossamastra		6	250,00	10,26	1,92	12,18	12,34	50,56	1,75	0,40
Fossamastra		7	300,00	9,48	2,58	12,06	12,32	52,42	2,25	0,45
Fossamastra		8	350,00	8,99	2,56	11,55	12,32	54,79	3,88	0,77
Fossamastra		9	400,00	8,99	2,01	11,00	11,80	54,04	3,95	0,89
Fossamastra		10	450,00	7,59	3,01	10,60	10,98	53,58	2,74	0,50
Fossamastra		10.5	497,00	7,00	3,61	10,61	10,98	73,99	2,71	0,46
Fossamastra	vasca	11	500,00	7,00	3,68	10,68	10,90	73,98	2,10	0,35
Fossamastra	FM_C1 - imbocco culvert	12	505,00	7,00	3,60	10,60	10,63	69,05	0,74	0,13
Fossamastra	sbocco culvert inizio pennelli	14	1096,30	2,00	5,05	7,05	7,21	23,08	1,76	0,25
Fossamastra	fine pennelli	15	1105,96	2,02	3,56	5,58	6,95	73,76	5,18	0,88
Fossamastra		16	1111,79	2,20	3,36	5,55	6,08	75,36	3,23	0,56
Fossamastra		17	1221,75	1,83	3,38	5,21	6,01	74,50	3,95	0,69
		17.1	1334,73	1,76	3,30	5,06	5,46	62,51	2,82	0,50
Fossamastra	monte FM_P5	18	1339,51	1,76	3,39	5,15	5,45	56,72	2,43	0,42
Fossamastra	valle FM_P5	19	1345,51	1,76	2,56	4,32	4,81	50,05	3,09	0,62
		19.1	1350,00	1,76	2,53	4,29	4,80	51,62	3,15	0,63
Fossamastra		20	1468,39	1,18	2,70	3,88	4,68	70,18	3,97	0,77
		20.1	1529,00	0,45	3,02	3,47	4,14	69,03	3,63	0,67
Fossamastra	monte FM_P4	21	1533,13	0,41	3,05	3,46	4,12	68,41	3,61	0,66
Fossamastra	valle FM_P4	22	1545,35	0,28	3,09	3,37	4,06	68,11	3,67	0,67
		22.1	1548,90	0,24	3,10	3,34	4,03	69,46	3,69	0,67
Fossamastra		23	1647,31	0,24	3,00	3,00	3,63	68,62	3,51	0,65
Fossamastra		24	1747,18	0,29	2,44	2,73	3,55	63,39	4,00	0,82
		24.1	1749,18	-1,52	2,99	1,47	2,08	63,56	3,46	0,64
Fossamastra	monte	25	1763,18	-1,52	3,17	1,65	1,89	63,87	2,17	0,39

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	-
	FM_P3									
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	3,18	1,63	1,87	64,12	2,17	0,39
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	3,20	1,63	1,84	64,49	2,04	0,36
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	3,24	1,61	1,82	64,89	2,03	0,36
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	3,24	1,60	1,81	65,17	2,04	0,36
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	3,25	1,58	1,79	65,43	2,04	0,36
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	3,25	1,56	1,77	65,71	2,05	0,36
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	3,26	1,54	1,76	66,28	2,06	0,36
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	3,28	1,52	1,74	67,27	2,08	0,37
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	3,21	1,40	1,72	69,75	2,52	0,45
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	2,99	1,06	1,49	71,91	2,91	0,54
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	3,06	1,13	1,41	72,37	2,36	0,43
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	3,07	1,12	1,37	72,26	2,23	0,41
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	3,04	1,08	1,35	73,18	2,30	0,42
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	3,01	1,00	1,29	75,38	2,38	0,44
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	3,00	0,92	1,23	77,84	2,47	0,46
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	3,04	0,88	1,20	79,51	2,49	0,46
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	3,10	0,92	1,18	82,28	2,28	0,41
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	3,11	0,91	1,18	83,36	2,30	0,42
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	3,13	0,91	1,15	81,06	2,18	0,39
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	3,16	0,91	1,15	83,44	2,17	0,39
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	3,18	0,83	1,14	86,56	2,46	0,44
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,23	0,80	1,14	87,92	2,59	0,46
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,26	0,81	1,09	87,96	2,33	0,41
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,36	0,83	1,08	87,90	2,22	0,39
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,64	0,81	0,93	87,96	1,51	0,25
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,74	0,79	0,90	87,98	1,47	0,24
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,87	0,75	0,85	88,01	1,42	0,23
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,31	0,61	0,69	88,13	1,28	0,20
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,90	0,60	0,66	88,56	1,13	0,16
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,54	0,58	0,63	88,76	1,00	0,14
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,22	0,57	0,61	88,82	0,89	0,11
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,92	0,57	0,60	88,88	0,80	0,10
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,53	88,90	0,74	0,09
Tombone		57	0,00	9,30	2,13	11,43	12,58	29,30	4,74	1,04
Tombone		58	94,12	7,55	2,17	9,72	10,81	29,15	4,63	1,00
Tombone		59	110,10	7,24	2,22	9,46	10,50	29,14	4,52	0,97
Tombone		60	176,32	5,95	2,51	8,46	9,28	29,28	4,01	0,81
Tombone		61	195,66	5,57	2,73	8,30	9,01	29,74	3,74	0,72
Tombone	FM_P12	61,1	211,66	5,26	3,14	8,40	8,94	29,27	3,11	0,56
Tombone	FM_P12	61,1	217,66	5,22	2,79	8,01	8,91	35,02	4,19	0,80
Tombone		61,2	220,00	5,10	2,86	7,96	8,85	36,60	4,17	0,79
Tombone		62	283,39	3,87	3,50	7,37	7,74	27,91	2,71	0,46

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Note</b>	<b>Sezione</b>	<b>Progressiva</b>	<b>Fondo alveo</b>	<b>Tirante</b>	<b>Livello idrico</b>	<b>Carico Totale</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità</b>	<b>Froude</b>
-	-	-	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m3/s</b>	<b>m/s</b>	-
Tombone		62,5	328,72	3,68	3,91	7,59	7,65	16,20	0,84	0,14
Tombone	imbocco FM_C5	63	331,72	3,67	3,86	7,53	7,65	14,97	1,69	0,27
Tombone	FM_C5	64	346,94	3,59	3,92	7,51	7,65	14,96	1,68	0,27
Tombone	FM_C5	65	360,33	3,53	3,99	7,52	7,65	14,96	1,68	0,27
Tombone	FM_C5	66	375,49	3,45	4,09	7,54	7,65	14,96	1,68	0,27
Tombone	FM_C5	67	561,79	3,29	4,28	7,57	7,64	14,66	1,65	0,25
Tombone	FM_C5	68	596,41	3,26	4,30	7,56	7,63	14,54	1,64	0,25
Tombone	FM_C5	69	649,23	3,21	4,33	7,54	7,61	14,34	1,61	0,25
Tombone	FM_C5	70	678,60	3,18	4,33	7,51	7,58	14,34	1,61	0,25
Tombone	sbocco FM_C5	71	829,38	3,05	4,24	7,29	7,42	14,34	1,61	0,25
Calcinara		109	0,00	23,28	1,41	24,69	25,49	17,51	3,97	1,07
Calcinara		108	21,90	22,68	1,42	24,10	24,52	17,31	2,89	0,77
Calcinara		107	36,63	22,79	1,15	23,94	24,43	16,88	3,11	0,93
Calcinara		106	66,90	22,66	1,01	23,67	24,40	16,09	3,77	1,20
Calcinara		105	105,08	21,37	1,25	22,62	23,69	16,80	4,58	1,31
Calcinara		104	141,40	19,40	1,61	21,01	21,54	17,72	3,22	0,81
Calcinara		103	205,63	18,26	2,14	20,40	20,99	17,47	3,41	0,74
Calcinara	monte FM_P11	102	233,90	17,75	2,35	20,10	20,23	13,44	1,57	0,33
Calcinara	valle FM_P11	101	240,22	17,75	2,05	19,80	19,93	11,68	1,59	0,36
Calcinara	monte FM_P10	100	246,35	17,71	2,08	19,79	19,93	11,34	1,63	0,36
Calcinara	valle FM_P10	99	252,87	17,68	1,62	19,30	19,60	12,33	2,41	0,61
Calcinara	monte FM_P9	98	271,63	17,61	1,74	19,35	19,41	11,43	1,08	0,26
Calcinara	valle FM_P9	97	277,90	17,60	0,98	18,58	18,85	11,20	2,28	0,74
Calcinara		96	306,41	16,83	1,50	18,33	18,84	15,78	3,15	0,82
Calcinara		95	329,80	16,58	1,23	17,81	18,81	18,60	4,43	1,27
Calcinara		94	355,94	15,61	1,48	17,09	17,53	18,97	2,95	0,77
Calcinara		93	380,74	15,14	1,65	16,79	17,45	19,44	3,60	0,89
Calcinara		92	410,60	14,60	1,64	16,24	16,78	19,69	3,26	0,81
Calcinara	monte FM_C8	91	428,80	13,63	2,35	15,98	16,29	20,31	2,47	0,52
Calcinara	valle FM_C8	90	516,30	13,00	1,46	14,46	15,62	20,80	4,77	1,26
Calcinara	monte briglia	89	520,79	12,94	1,45	14,39	14,82	17,08	2,89	0,77
Calcinara	valle briglia	88.3	522,79	12,34	1,75	14,09	14,38	15,77	2,39	0,58
Calcinara		88.2	555,31	12,05	1,85	13,90	14,29	18,31	2,76	0,65
Calcinara		88.1	595,11	11,61	1,83	13,44	13,88	19,00	2,95	0,70
Calcinara		88	626,75	11,43	1,75	13,18	13,59	16,84	2,84	0,69
Calcinara	monte FM_C9	87.2	643,27	11,30	1,83	13,13	13,31	15,23	1,86	0,44
Calcinara	valle FM_C9	87.1	678,72	10,80	2,10	12,90	13,01	13,41	1,48	0,33
Calcinara	monte FM_P8	87	686,30	10,25	2,62	12,87	12,99	13,44	1,51	0,30
Calcinara	valle FM_P8	86	698,74	10,24	1,72	11,96	12,23	13,50	2,30	0,56
Calcinara		85.3	715,35	10,02	1,57	11,59	12,22	14,10	3,50	0,89
Calcinara		85.2	737,60	9,73	1,59	11,32	12,15	12,56	4,03	1,02

<b>Corso d'acqua</b>	<b>Note</b>	<b>Sezione</b>	<b>Progressiva</b>	<b>Fondo alveo</b>	<b>Tirante</b>	<b>Livello idrico</b>	<b>Carico Totale</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità</b>	<b>Froude</b>
-	-	-	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m s,m,</b>	<b>m3/s</b>	<b>m/s</b>	-
Calcinara		85.1	754,43	9,51	1,60	11,11	11,57	10,48	3,00	0,76
Calcinara		85	770,17	9,31	1,76	11,07	11,41	10,05	2,56	0,62
Calcinara		84.3	781,39	9,26	1,71	10,97	11,36	10,35	2,78	0,68
Calcinara		84.2	806,66	9,15	1,50	10,65	11,03	10,19	2,73	0,71
Calcinara		84.15	833,10	8,68	1,66	10,34	10,77	10,15	2,89	0,72
Calcinara		84.1	860,63	8,20	1,88	10,08	10,49	12,70	2,83	0,66
Calcinara		84.05	898,11	7,74	1,60	9,34	10,36	17,37	4,47	1,13
Calcinara		84	922,87	7,44	1,32	8,76	9,15	18,15	2,75	0,76
Calcinara	monte briglia	83	943,09	7,37	1,27	8,64	9,07	18,42	2,89	0,82
Calcinara	valle briglia	82.1	944,09	6,37	1,90	8,27	8,46	18,51	1,95	0,45
Calcinara	monte FM_P7	82	949,69	6,30	2,00	8,30	8,46	19,14	1,79	0,40
Calcinara	valle FM_P7	81	959,69	6,20	2,05	8,25	8,42	20,05	1,84	0,41
Calcinara		80	989,94	5,80	2,41	8,21	8,36	21,39	1,70	0,35
Calcinara	monte FM_P6	79	1145,09	4,67	3,49	8,16	8,22	21,40	1,11	0,19
Calcinara	valle FM_P6	78.2	1151,09	4,66	3,49	8,15	8,22	21,92	1,21	0,21
Calcinara		78.1	1194,39	4,60	3,53	8,13	8,22	23,17	1,34	0,23
Calcinara		78.05	1198,39	4,50	3,64	8,14	8,22	23,19	1,25	0,21
Calcinara	monte FM_C7	78	1200,39	4,50	3,60	8,10	8,22	26,69	1,55	0,26
Calcinara	confluenza scatolare	77.1	1397,94	3,42	4,56	7,98	8,22	28,77	2,19	0,33
Calcinara	valle FM_C7	77	1460,85	3,08	4,34	7,42	8,02	37,78	3,43	0,52
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,34	7,41	7,57	37,95	1,79	0,27
Calcinara	conf. Tombone	75	1601,52	2,77	4,51	7,28	7,39	32,00	1,46	0,22
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,66	7,18	7,32	38,45	1,67	0,25
Calcinara		73.5	1725,79	2,50	4,72	7,22	7,32	38,35	1,38	0,20
Calcinara	monte FM_C4	73	1727,79	2,49	4,71	7,20	7,32	38,34	1,53	0,23
Calcinara	valle FM_C4	72	1902,35	2,20	4,85	7,05	7,18	37,43	1,59	0,23
Colombiera		110	0,00	6,00	2,43	8,43	9,45	16,89	4,48	0,92
Colombiera		111	2,80	5,98	2,42	8,40	8,67	8,70	2,32	0,48
Colombiera	imbocco FM_C6	112	3,80	5,97	2,44	8,41	8,65	5,46	2,16	0,44
Colombiera	FM_C6	113	23,30	5,84	2,52	8,36	8,60	5,46	2,16	0,43
Colombiera	FM_C6	114	141,30	5,02	3,21	8,23	8,47	5,46	2,16	0,39
Colombiera	FM_C6	115	212,18	4,53	3,69	8,22	8,46	5,46	2,16	0,36
Colombiera	FM_C6	116	233,10	4,39	3,83	8,22	8,46	5,46	2,16	0,35
Colombiera	FM_C6	117	267,40	4,15	4,09	8,24	8,31	7,27	1,15	0,18
Colombiera	sbocco FM_C6	118	288,00	4,01	3,97	7,98	8,25	18,75	2,29	0,37

Tabella 6 – Risultati di sintesi per lo scenario TR500.

Dall'analisi dei risultati ottenuti con il modello monodimensionale si riscontra come i tratti in cui avvengono le esondazioni lungo le aste del sistema idrografico in esame siano i medesimi già individuati per lo scenario TR200.

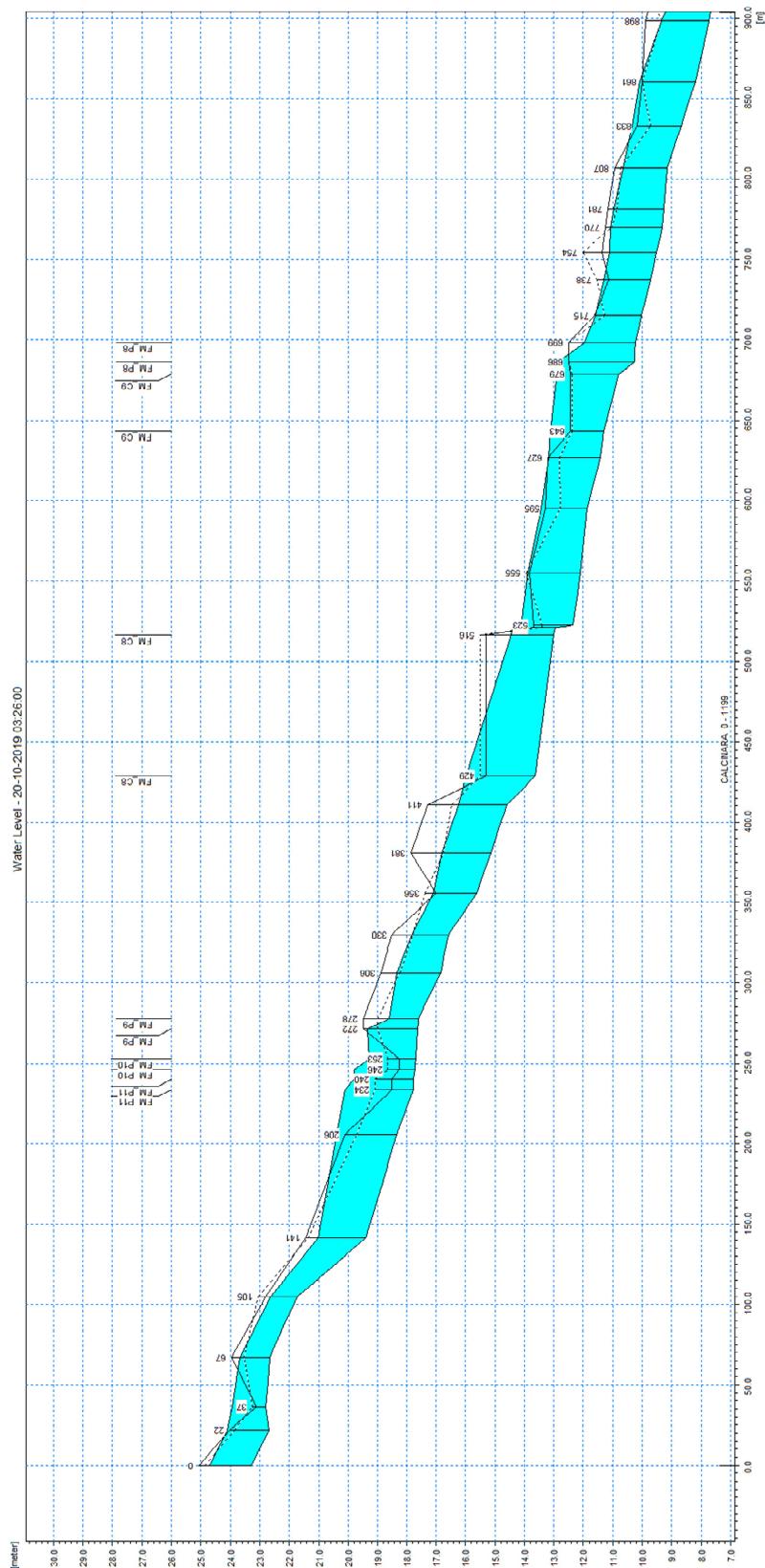


Figura 59 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Calcinara per TR500, tratto di monte.

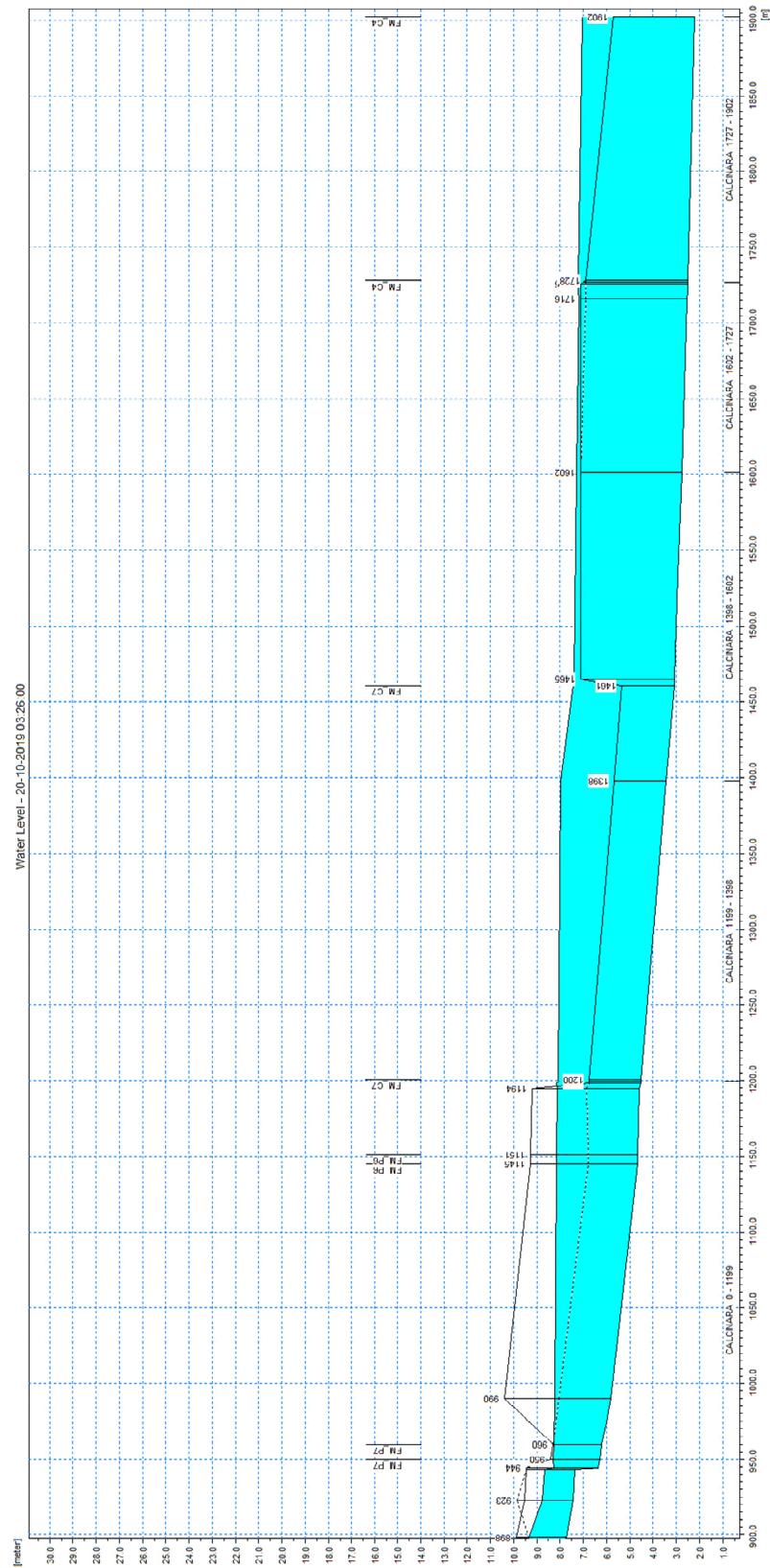
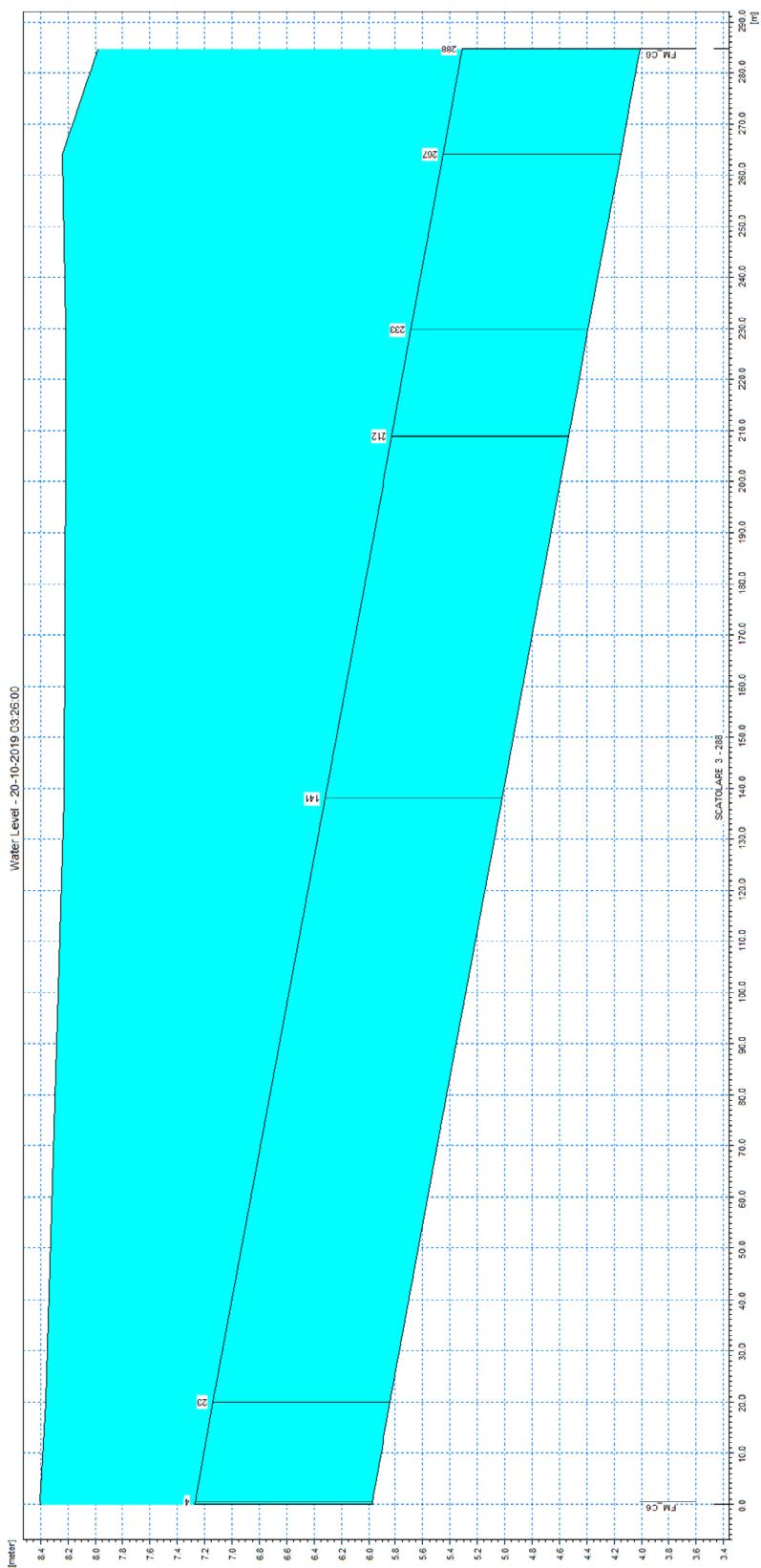
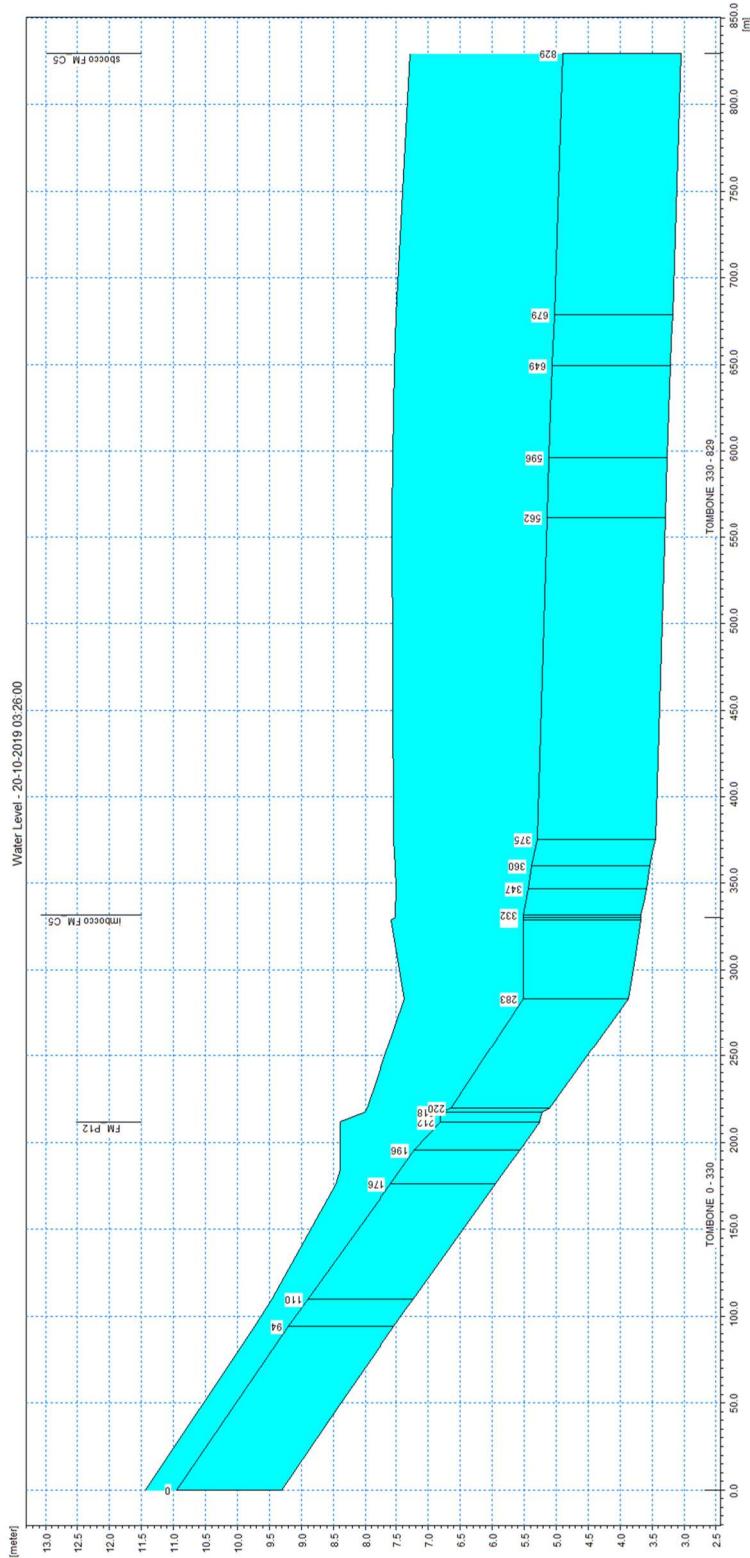


Figura 60 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Calcinara per TR500, tratto di valle.



**Figura 61 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Colombiera, TR500.**



**Figura 62 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone, TR500.**

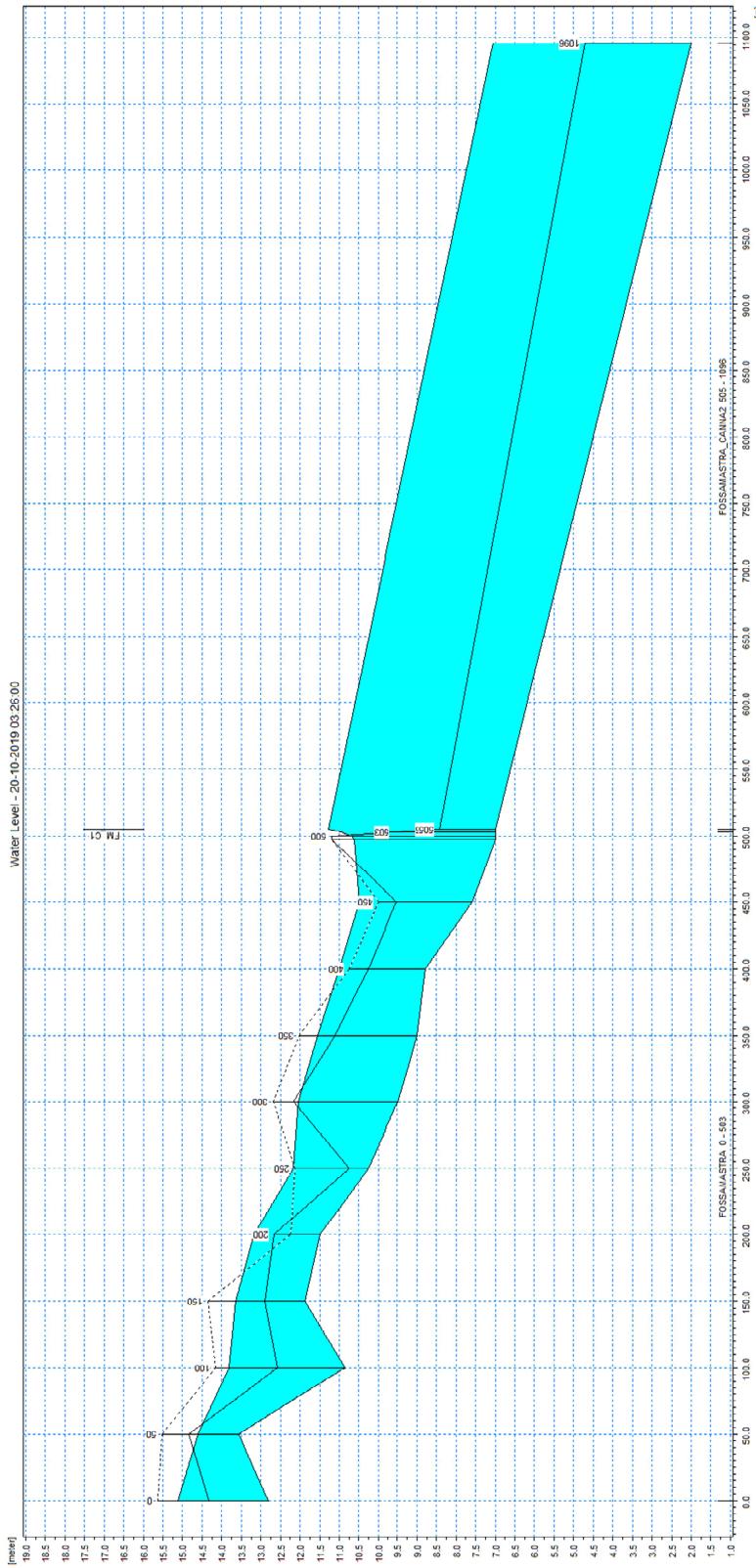
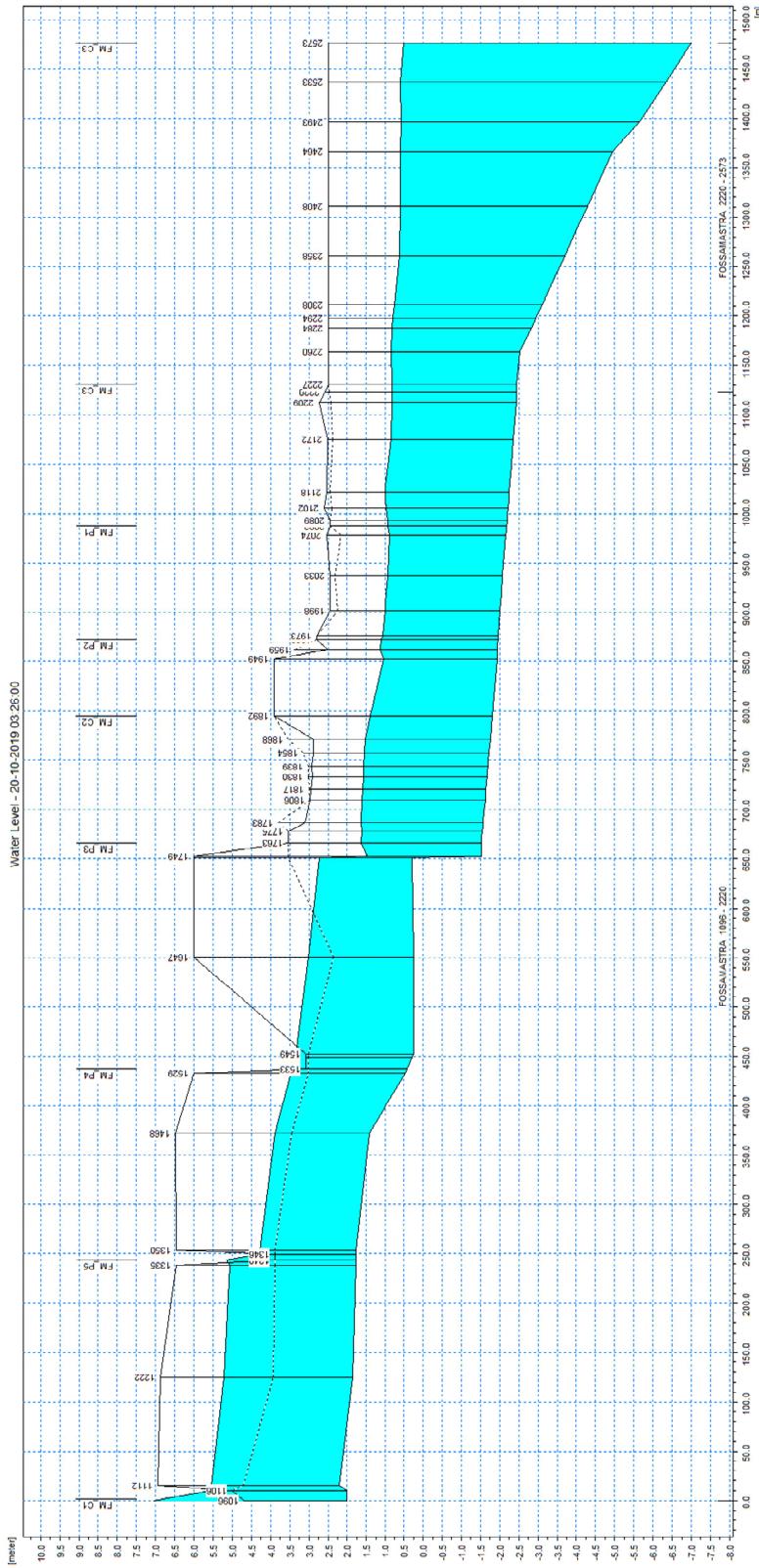


Figura 63 – Profilo longitudinale di corrente TR500 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 1 a cielo aperto e la sezione 14 in cui termina lo scatolare FM-C1.



**Figura 64 – Profilo longitudinale di corrente TR500 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 14 in cui termina lo scatolare FM-C1 e la sezione 56 di sbocco a mare.**

Nelle Figura 65 e Figura 66 sono rappresentati gli idrogrammi di portata osservati nel corso dell'evento in alcune sezioni significative del modello monodimensionale sulle aste del Calcinara e del Fossamastra. Per entrambe valgono i medesimi commenti già esposti nei capitoli precedenti.

La portata massima recapitata dal Calcinara al Fossamastra risulta pari a circa  $32 \text{ m}^3/\text{s}$ , poco superiore al valore osservato per lo scenario TR200 in quanto limitato dal tratto tombato in pressione a monte della confluenza.

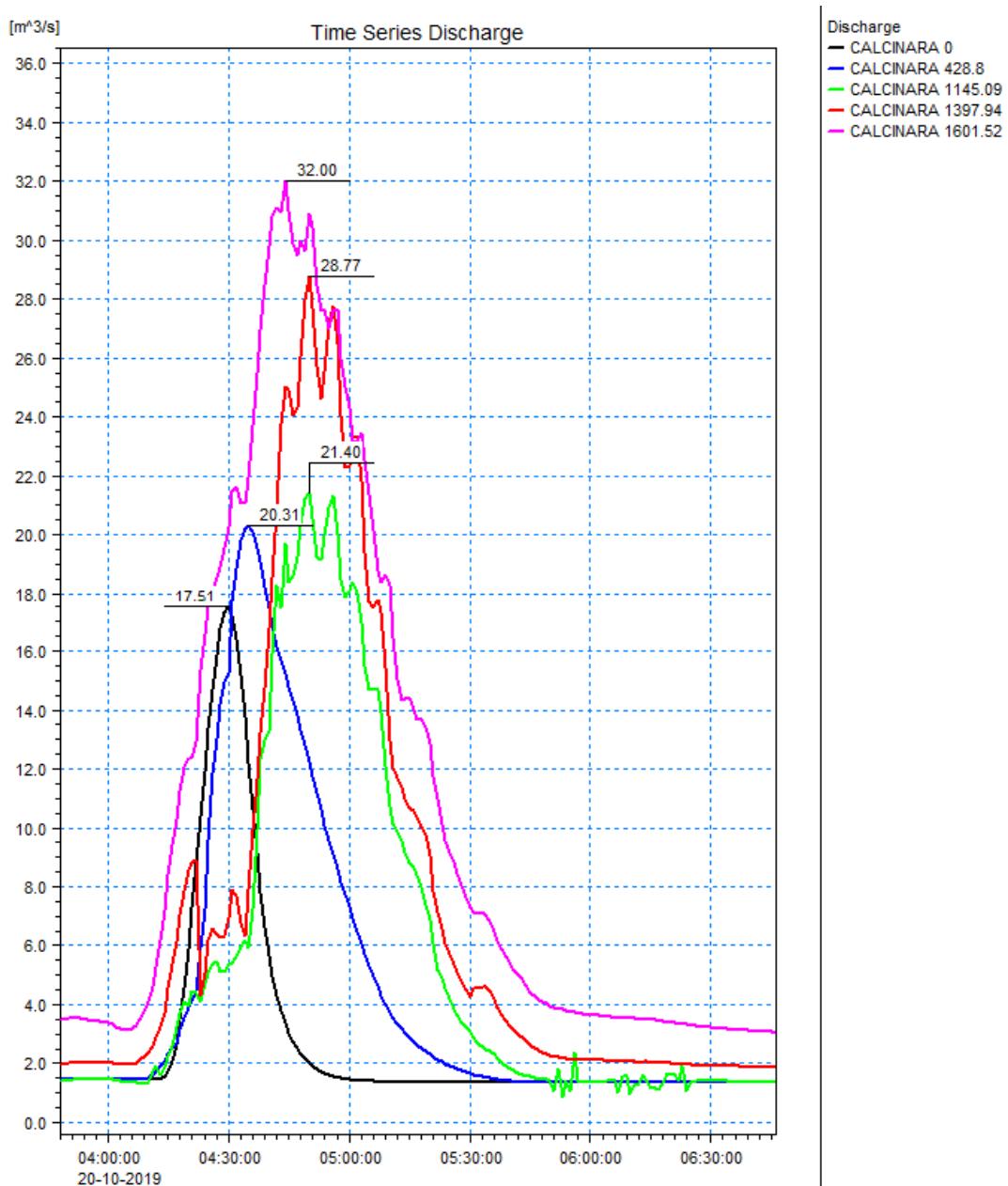


Figura 65 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul fosso Calcinara.

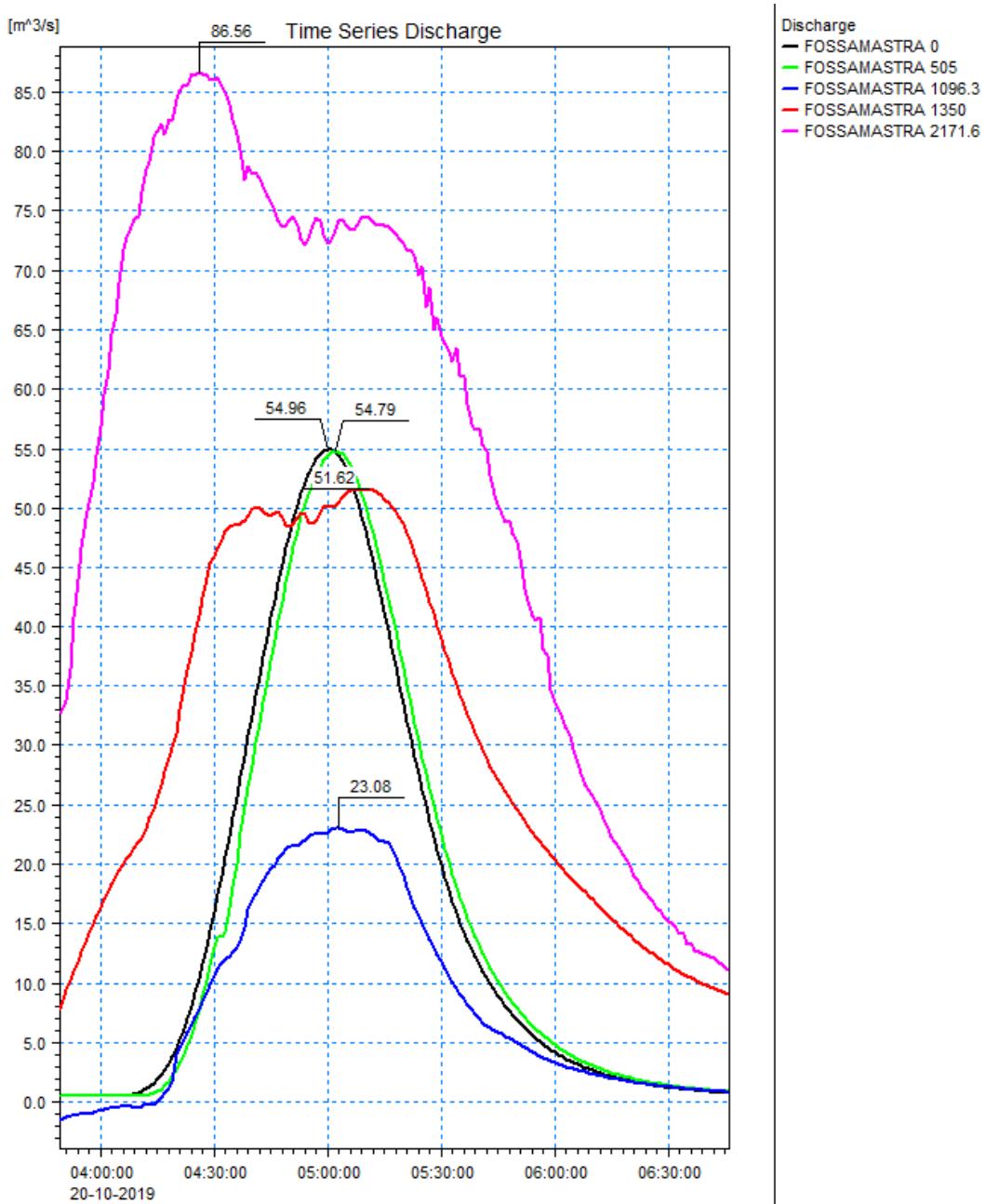


Figura 66 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul canale Fossamastra.

Nel tratto di monte del Fossamastra si confermano sostanzialmente i valori di capacità di portata dell'alveo già riscontrati per gli scenari TR50 e TR200, con una ulteriore maggiorazione dovuta ai maggiori carichi idraulici (che comportano anche più pronunciate esondazioni). A valle del ponte ferroviario la portata massima in alveo è poco inferiore a 52 m<sup>3</sup>/s, mentre in corrispondenza di viale San Bartolomeo la portata massima veicolata verso la foce è pari a circa 87 m<sup>3</sup>/s a fronte di un colmo di piena teorico, determinato nell'analisi idrologica, pari a circa 159 m<sup>3</sup>/s.

In Figura 67 e Figura 68 sono riportate le distribuzioni 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 cinquecentennale.

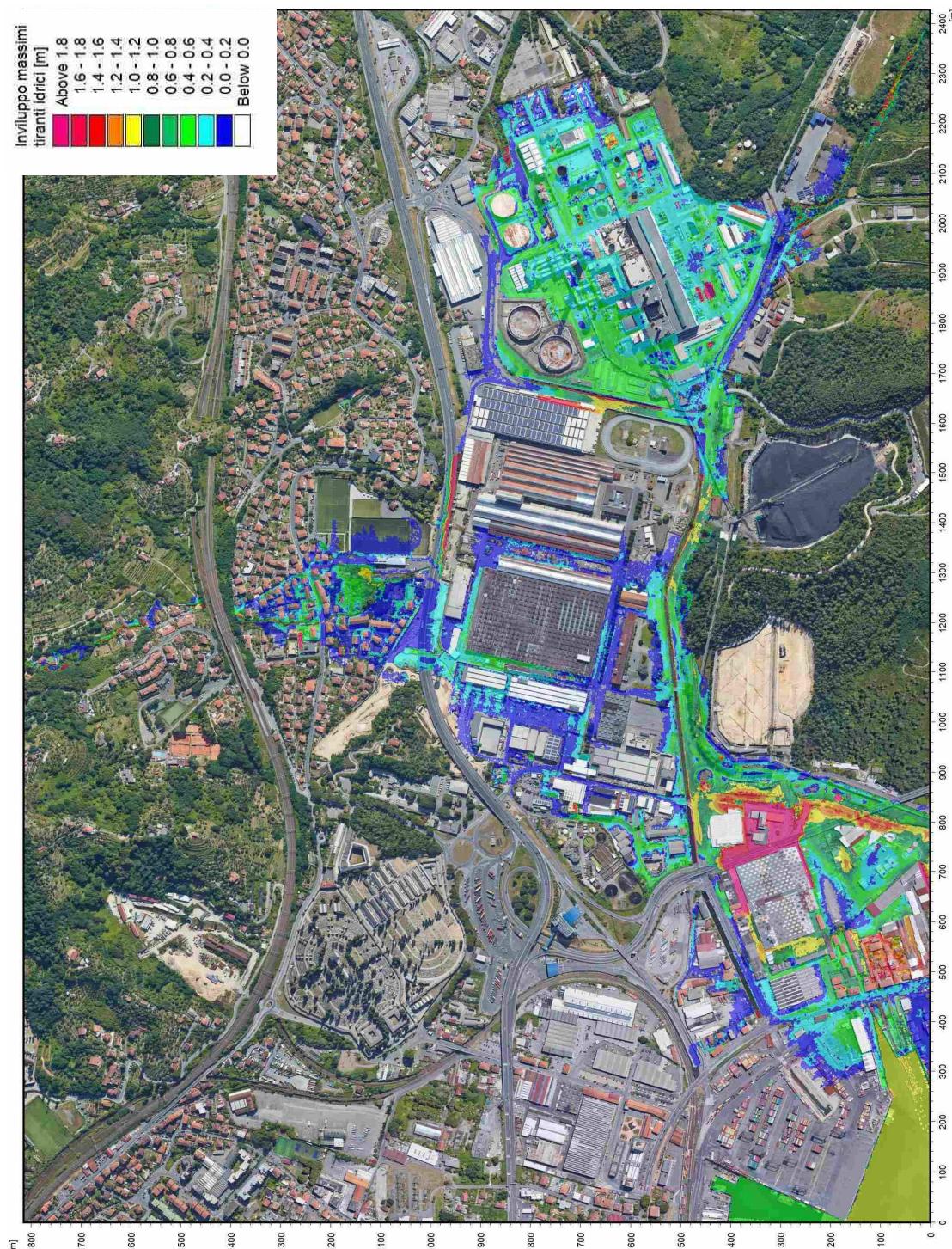


Figura 67 – Distribuzione inviluppo dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna per TR=500 anni.

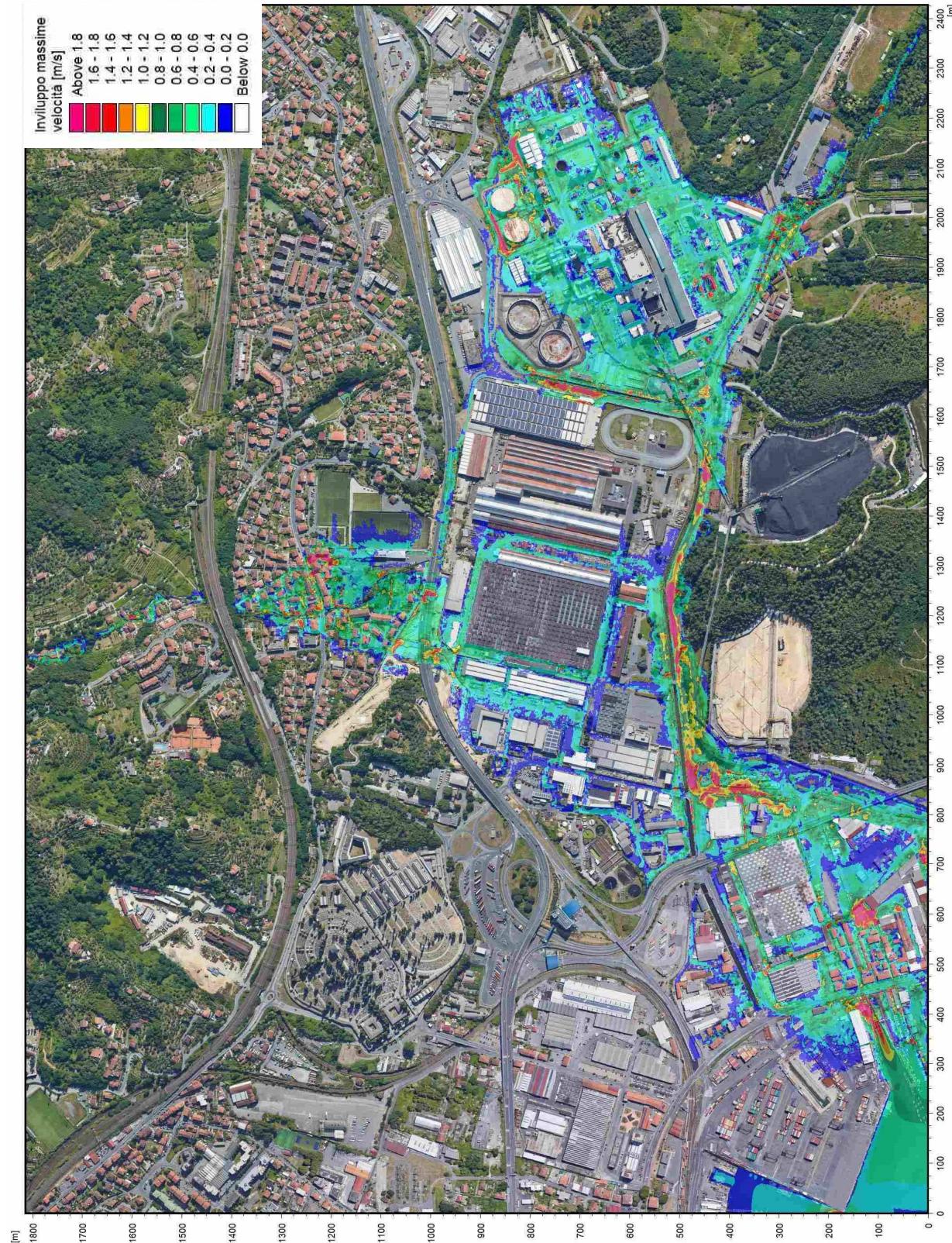


Figura 68 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità per TR=500 anni.

Anche la simulazione dell'evento cinquecentennale mostra una sostanziale sovrapponibilità con i risultati delle simulazioni precedenti ad eccezione della maggiore entità in termini di valori dei tiranti idrici e dell'aumento relativamente contenuto delle aree bagnate.

Anche per questo scenario, come per i precedenti, si riscontra un flusso di esondazione cospicuo in uscita dal modello in direzione Sud lungo via privata OTO. La propagazione di tale flusso è descritta nel capitolo 5.3 con riferimento agli scenari descritti nel capitolo 5.2, che risultano maggiormente gravosi.

#### 5.1.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 7 sono riassunti i franchi minimi di sicurezza rispetto alle quote di intradosso di attraversamenti e tombinature, 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	Intradosso canna 2	Franco idraulico sicurezza TR50	Franco idraulico sicurezza TR200	Franco idraulico sicurezza TR500
-	-	-	m s.m.	m s.m.	m	m	m
Fossamastra	FM_C1	FOFOCP03	8,50	8,42	-1,12	-1,77	-2,18
Fossamastra	FM_C1	FOFOCP03	4,70	4,70	-2,28	-2,34	-2,35
Fossamastra	FM_P5	FOFOPT05	3,30		-1,68	-1,76	-1,85
Fossamastra	FM_P4	FOFOPT04	2,60		-0,73	-0,80	-0,86
Fossamastra	FM_P3	FOFOPT03	2,90		1,60	1,40	1,25
Fossamastra	FM_C2	FOFOCP02	2,75		1,74	1,47	1,35
Fossamastra	FM_P2	FOFOPT02	2,88		1,89	1,88	1,76
Fossamastra	FM_P1	FOFOPT01	2,57		1,70	1,66	1,65
Fossamastra	FM_C3	FOFOCP01	1,30		0,49	0,49	0,49
Tombone	FM_P12		6,81		-1,18	-1,46	-1,59
Tombone	FM_C5		5,52		-1,92	-1,98	-2,01
Calcinara	FM_P11	FOCLPT06	18,55		-1,34	-1,46	-1,55
Calcinara	FM_P10	FOCLPT05	18,23		-1,38	-1,48	-1,56
Calcinara	FM_P9	FOCLPT04	19,01		-0,25	-0,30	-0,34
Calcinara	FM_C8	FOCLCP03	15,13		-0,54	-0,72	-0,85
Calcinara	FM_C9	FOCLCP02	12,30		-0,71	-0,78	-0,83
Calcinara	FM_P8	FOCLPT03	12,30		-0,44	-0,53	-0,57
Calcinara	FM_P7	FOCLPT02	8,40		0,46	0,24	0,10
Calcinara	FM_P6	FOCLPT01	6,77		-1,02	-1,26	-1,39
Calcinara	FM_C7	FOCLCP01	6,75		-0,98	-1,21	-1,35
Calcinara	FM_C4		6,90		-0,13	-0,27	-0,30
Colombiera	FM_C6		7,27		-0,94	-1,06	-1,14

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 Fossamastra.

Il vigente Piano di Bacino definisce le caratteristiche idrauliche che le opere di ritenuta e gli attraversamenti puntuali o i tratti tobinati 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 tobinature sul Canale Fossamastra e nella porzione terminale del Calcinara non 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 superiore a 50 m<sup>3</sup>/s.

Franco idraulico: valore maggiore tra (a) e (b)			
	Reticolo principale e secondario	Reticolo minore	
(a)	$U^2/2g$ ,	$0,5 U^2/2g$ ,	
(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 tobinature (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.

- I corsi d'acqua di primo livello o principali sono le aste fluviali con bacino sotteso > 1 km<sup>2</sup>;
- 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>;
- 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 Canale Fossamastra e i fossi Calcinara e Tombone presentano un bacino sotteso di estensione maggiore di 1 km<sup>2</sup> e quindi, secondo il PdB, ricadono nell'ambito del reticolo principale. 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.

Quasi tutti gli attraversamenti riportati in Tabella 7 denunciano un funzionamento in pressione e sono pertanto inadeguati idraulicamente. Fanno eccezione gli attraversamenti/tombinature localizzati sul tratto di valle oggetto di recenti sistemazioni idrauliche; in particolare:

- gli attraversamenti FM\_P3, FM\_P2, FM\_P1 mostrano un franco idraulico superiore al metro, condizione in questo caso più severa rispetto a quella del carico totale; sono quindi verificati idraulicamente rispetto ai criteri del Piano di bacino. Invece con riferimento alle NTC2018 risultano verificati soltanto gli attraversamenti FM\_P1 e FM\_P2 che possiedono un franco superiore a 1,50 m;
- la tombinatura FM\_C2 ha franco idraulico di sicurezza pari a 1,47 m, sostanzialmente adeguata secondo entrambi i criteri.

Si precisa tuttavia come le portate defluenti nel tratto terminale del Fossamastra siano ridotte rispetto al valore teorico, per cui l'effettiva verifica dei franchi di sicurezza è da condurre con riferimento a diversi scenari di simulazione (rif. capitolo 5.4).

## 5.2 Simulazioni sul Canale Fossamastra in assenza di laminazioni a monte

Per la corretta analisi dell'assetto idraulico del tratto fluviale di valle del Canale Fossamastra sono stati ripetuti gli scenari TR50, TR200 e TR500 senza considerare le aste fluviali di monte, ovvero inserendo allo sbocco della tombinatura l'intero idrogramma idrologico teorico, come meglio descritto nel capitolo 4.2. In questo modo si trascurano gli effetti di laminazione dei colmi dovuti alla scarsa capacità di portata dei tratti fluviali a monte.

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

Nella Tabella 9 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'asta del Fossamastra nel tratto terminale a valle del Calcinara (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 69 è rappresentato graficamente il profilo 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.	m3/s	m/s	-
Fossamastra	sbocco culvert inizio pennelli	14	1096,30	2,00	3,65	5,65	6,41	91,50	3,86	0,65
Fossamastra	fine pennelli	15	1105,96	2,02	3,61	5,63	6,37	91,50	3,82	0,64
Fossamastra		16	1111,79	2,20	3,39	5,58	6,34	91,35	3,87	0,67
Fossamastra		17	1221,75	1,83	3,43	5,26	6,21	82,91	4,32	0,74
		17.1	1334,73	1,76	3,32	5,08	5,49	63,62	2,85	0,50
Fossamastra	monte FM_P5	18	1339,51	1,76	3,41	5,17	5,48	57,47	2,45	0,42
Fossamastra	valle FM_P5	19	1345,51	1,76	2,52	4,28	4,80	50,47	3,18	0,64
		19.1	1350,00	1,76	2,50	4,26	4,78	50,52	3,18	0,64
Fossamastra		20	1468,39	1,18	2,66	3,84	4,63	68,67	3,95	0,77
		20.1	1529,00	0,45	2,98	3,43	4,12	69,04	3,69	0,68
Fossamastra	monte FM_P4	21	1533,13	0,41	3,01	3,42	4,11	68,46	3,68	0,68

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	-
Fossamastra	valle FM_P4	22	1545,35	0,28	3,03	3,31	4,04	68,38	3,79	0,69
		22.1	1548,90	0,24	3,05	3,29	4,02	68,44	3,79	0,69
Fossamastra		23	1647,31	0,24	2,94	2,94	3,56	66,13	3,50	0,65
Fossamastra		24	1747,18	0,29	2,35	2,64	3,42	59,78	3,91	0,81
		24.1	1749,18	-1,52	2,74	1,22	1,87	59,73	3,57	0,69
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	2,91	1,39	1,64	60,36	2,23	0,42
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	2,80	1,25	1,52	60,24	2,32	0,44
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	2,83	1,26	1,50	60,31	2,16	0,41
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	2,88	1,25	1,48	60,63	2,14	0,40
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	2,87	1,23	1,46	60,68	2,15	0,40
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	2,88	1,21	1,44	60,70	2,14	0,40
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	2,90	1,21	1,44	60,69	2,13	0,40
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	2,91	1,19	1,42	60,74	2,12	0,40
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	2,94	1,18	1,40	60,69	2,09	0,39
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	2,91	1,10	1,40	61,08	2,43	0,45
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	2,86	0,93	1,28	61,66	2,63	0,50
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	2,91	0,98	1,20	60,60	2,08	0,39
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	2,93	0,98	1,16	58,42	1,90	0,35
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	2,94	0,98	1,16	58,09	1,88	0,35
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	2,85	0,84	1,05	60,91	2,03	0,38
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	2,93	0,85	1,05	60,27	1,96	0,37
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	2,99	0,83	1,04	60,63	2,03	0,37
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	3,04	0,86	1,04	60,18	1,87	0,34
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	3,06	0,86	1,03	60,06	1,85	0,34
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	3,08	0,86	1,03	60,46	1,83	0,33
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	3,11	0,86	1,02	60,38	1,78	0,32
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	3,15	0,80	0,97	60,48	1,83	0,33
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,24	0,81	0,97	60,58	1,78	0,32
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,27	0,82	0,95	60,68	1,60	0,28
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,35	0,82	0,94	60,56	1,56	0,27
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,60	0,77	0,83	60,38	1,05	0,18
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,69	0,74	0,79	60,46	1,02	0,17
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,82	0,70	0,75	60,49	0,99	0,16
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,32	0,62	0,66	60,23	0,87	0,13
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,93	0,63	0,66	60,57	0,77	0,11
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,54	0,58	0,60	61,38	0,69	0,09
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,22	0,57	0,59	61,61	0,62	0,08
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,92	0,57	0,59	61,79	0,56	0,07
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,51	61,84	0,52	0,06

Tabella 9 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

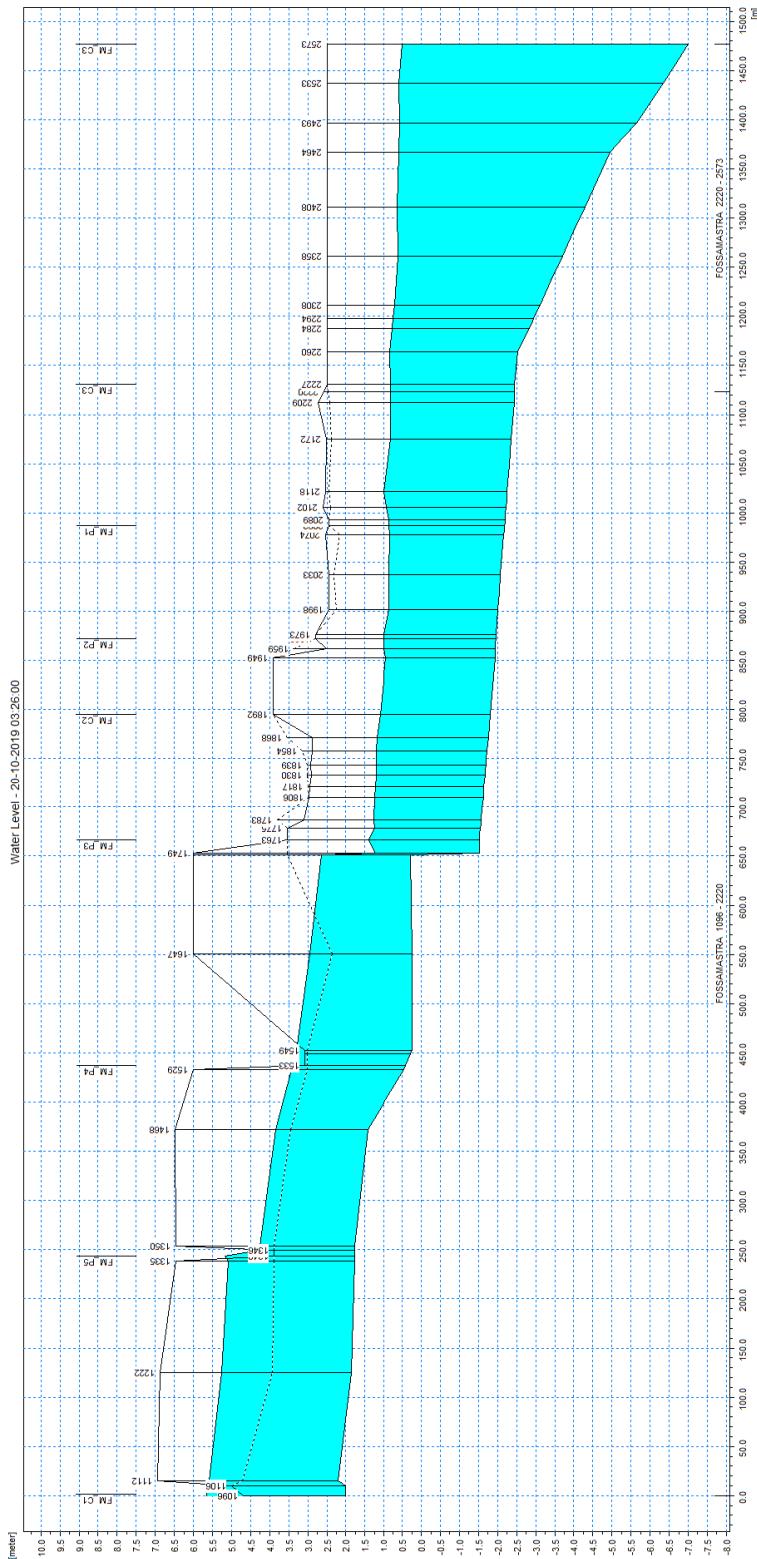


Figura 69 – Profilo longitudinale di corrente TR50 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 14 in cui termina lo scatolare FM-C1 e la sezione 56 di sbocco a mare.

Dall'analisi dei risultati ottenuti con il modello monodimensionale si conferma l'inadeguatezza idraulica del tratto tra le sezioni 14 (sbocco del manufatto FM-C1) e 24 (inizio della sistemazione d'alveo recentemente eseguita); in particolare la piena cinquantennale sormonta in modo diffuso la sponda sinistra mentre in destra i livelli vengono contenuti dal muro perimetrale continuo dello stabilimento industriale. Soltanto in corrispondenza degli accessi allo stabilimento, rappresentati come varchi nel muro, si registrano esondazioni nelle aree interne al sito.

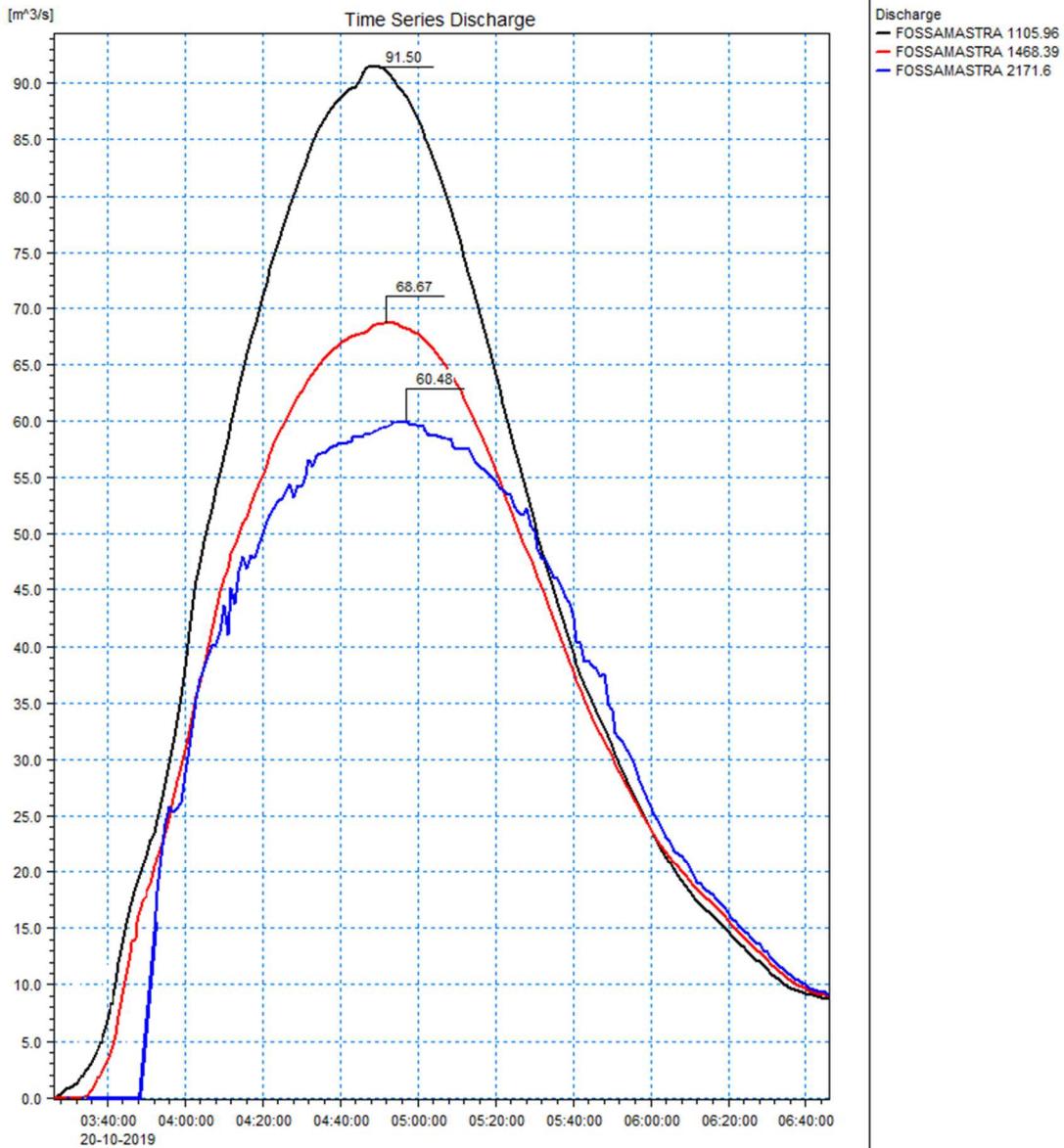
Nel tratto si segnala in particolare il manufatto FM-P5 (ponte in ferro a 2 campate localizzato in corrispondenza del primo accesso allo stabilimento) che risulta fortemente inadeguato idraulicamente. Il tratto sistemato compreso tra le sezioni 24 e 56 risulta invece idraulicamente adeguato.

Anche in questo caso tuttavia le rilevanti esondazioni che si verificano nella metà di monte del tratto indagato fanno sì che le portate massime defluenti nel tratto sistemato risultino laminate rispetto ai valori teorici idrologici. Come esemplificato dagli idrogrammi di portata di Figura 70 (in alcune sezioni significative del modello), a monte dell'imboccato della tombinatura preso viale S. Bartolomeo il colmo di piena risulta infatti pari a circa  $61 \text{ m}^3/\text{s}$  a fronte di quello teorico determinato nell'analisi idrologica pari a  $91,50 \text{ m}^3/\text{s}$ , confermando il valore di massima capacità di portata già riscontrato nelle simulazioni precedenti.

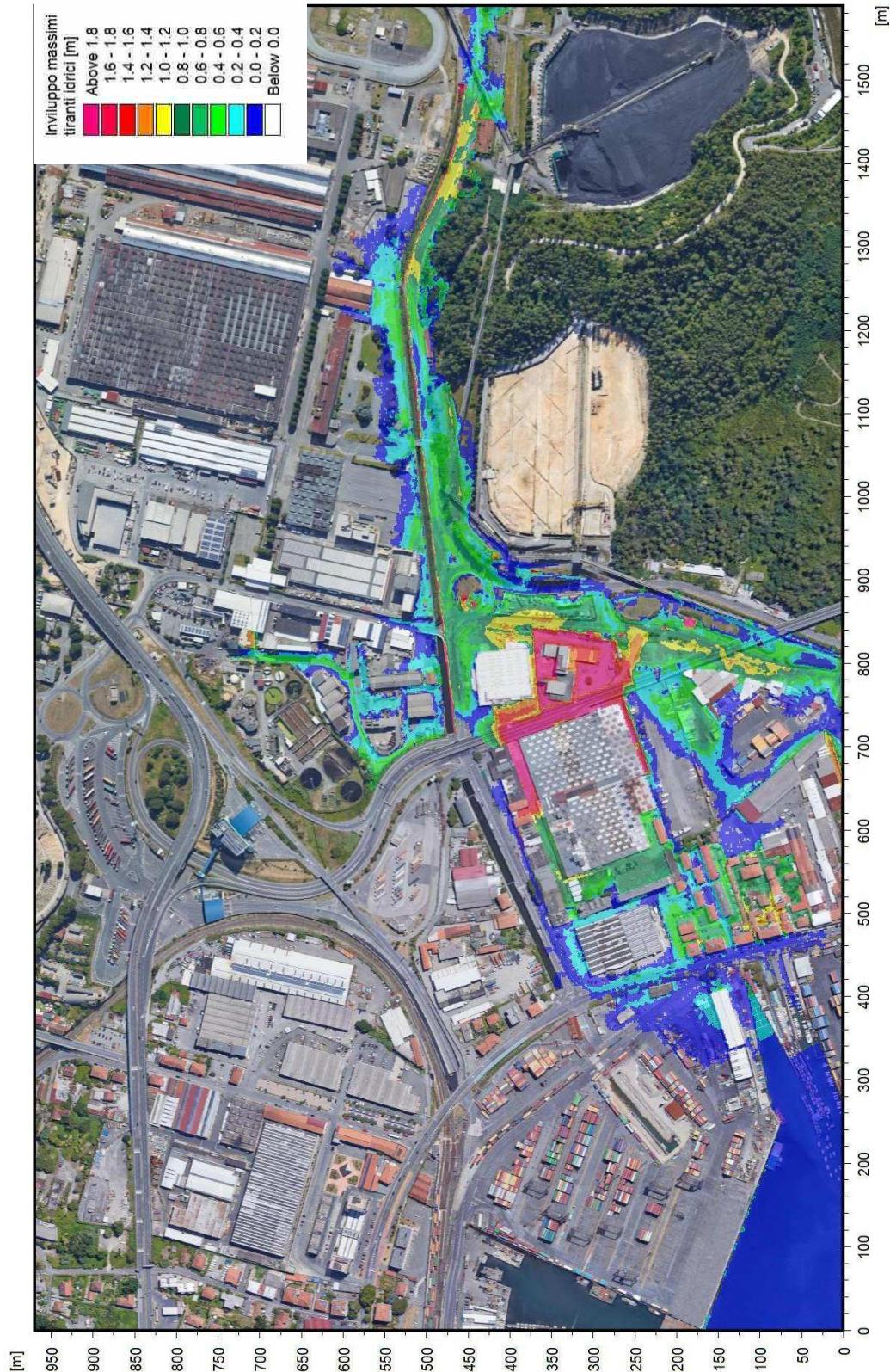
In Figura 71 e Figura 72 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno cinquantennale.

In Figura 71 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 72 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 70 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul canale Fossamastra.**



**Figura 71 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=50 anni.**

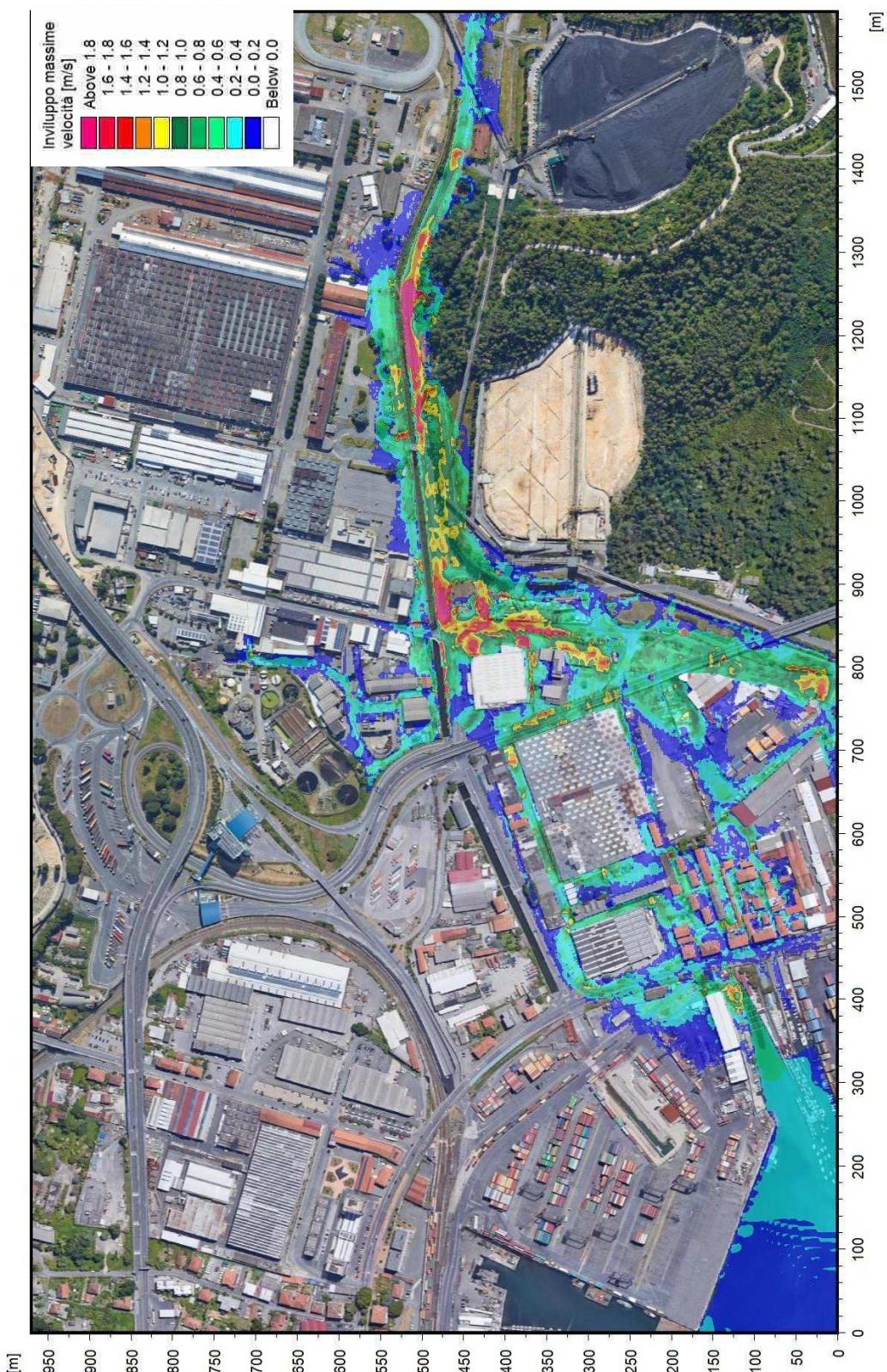


Figura 72 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di flusso per TR=50 anni.

Le mappe di output del modello bidimensionale mostrano che le aree di valle vengono interessate da esondazioni assai estese, che coinvolgono in destra un'area relativamente limitata dello stabilimento industriale e più a valle dell'area arginale limitrofa, fino all'alveo del Fosso Melara, e in sinistra ampie porzioni di territorio fino al recapito in mare.

In particolare l'ingente flusso di esondazione che scorre lungo via Valdilocchi tende in parte (prevalente) a imboccare via privata OTO verso Sud-Ovest, e in parte proseguire verso Ovest nelle viabilità tra i capannoni industriali esistenti, dopo aver allagato l'area della ex caserma dei Vigili del Fuoco, che risulta depressa rispetto ai piani circostanti.

Il recapito a mare di flussi che si propagano in direzione Ovest avviene prevalentemente nella baia all'altezza di via Lerici, mentre la propagazione delle esondazioni verso Sud è rappresentata compiutamente dal modello 2D esterno al dominio di calcolo di quello in esame, descritto nel capitolo 5.3.

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

Nella Tabella 10 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'asta del Fossamastra nel tratto terminale a valle del Calcinara (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 73 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

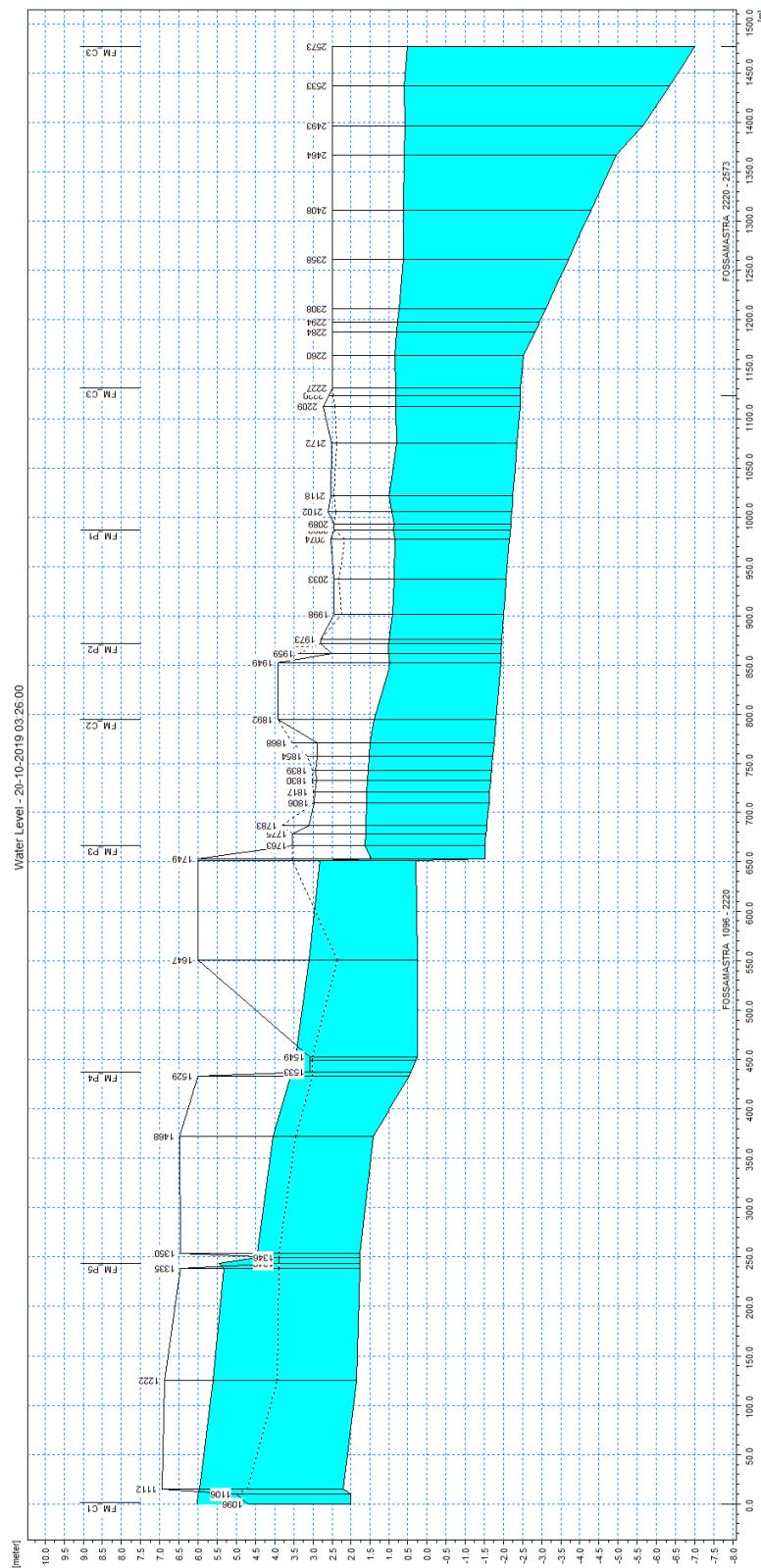
Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
-	-	-	m	m s,m,	m	m s,m,	m s,m,	m3/s	m/s	-
Fossamastra	sбocco culvert inizio pennelli	14	1096,30	2,00	4,02	6,02	7,05	120,13	4,50	0,72
Fossamastra	fine pennelli	15	1105,96	2,02	3,98	6,00	7,01	120,13	4,46	0,71
Fossamastra		16	1111,79	2,20	3,76	5,95	6,99	119,88	4,51	0,74
Fossamastra		17	1221,75	1,83	3,78	5,61	6,84	106,27	4,91	0,81
		17.1	1334,73	1,76	3,57	5,33	5,83	75,74	3,12	0,53
Fossamastra	monte FM_P5	18	1339,51	1,76	3,69	5,45	5,80	67,31	2,62	0,44
Fossamastra	valle FM_P5	19	1345,51	1,76	2,70	4,46	5,03	57,89	3,36	0,65
		19.1	1350,00	1,76	2,69	4,45	5,02	57,91	3,34	0,65
Fossamastra		20	1468,39	1,18	2,87	4,05	5,00	82,08	4,33	0,82
		20.1	1529,00	0,45	3,13	3,58	4,36	78,22	3,91	0,71
Fossamastra	monte FM_P4	21	1533,13	0,41	3,17	3,58	4,34	76,76	3,86	0,69
Fossamastra	valle FM_P4	22	1545,35	0,28	3,18	3,46	4,24	75,66	3,92	0,70
		22.1	1548,90	0,24	3,21	3,45	4,23	75,73	3,92	0,70
Fossamastra		23	1647,31	0,24	3,11	3,11	3,77	74,06	3,61	0,65
Fossamastra		24	1747,18	0,29	2,53	2,82	3,68	67,55	4,10	0,82
		24.1	1749,18	-1,52	2,99	1,47	2,16	67,50	3,68	0,68
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	3,16	1,64	1,91	67,92	2,31	0,42
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	3,16	1,61	1,89	68,59	2,33	0,42
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	3,18	1,61	1,86	69,25	2,21	0,40
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	3,23	1,60	1,85	70,14	2,21	0,39
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	3,23	1,59	1,84	70,37	2,21	0,39
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	3,24	1,57	1,82	71,22	2,23	0,40

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	-
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	3,24	1,55	1,81	72,09	2,26	0,40
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	3,25	1,53	1,79	72,84	2,28	0,40
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	3,27	1,51	1,77	73,19	2,27	0,40
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	3,20	1,39	1,72	72,14	2,56	0,46
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	2,90	0,97	1,47	74,28	3,13	0,59
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	2,96	1,03	1,36	75,49	2,55	0,47
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	2,97	1,02	1,34	77,64	2,49	0,46
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	2,95	0,99	1,32	79,02	2,55	0,47
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	2,91	0,90	1,22	76,50	2,50	0,47
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	2,92	0,84	1,16	77,43	2,52	0,47
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	2,99	0,83	1,14	77,61	2,47	0,46
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	3,05	0,87	1,14	78,81	2,32	0,42
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	3,06	0,86	1,14	79,40	2,35	0,43
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	3,08	0,86	1,14	78,16	2,34	0,43
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	3,11	0,86	1,14	79,31	2,34	0,42
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	3,15	0,80	1,10	80,01	2,42	0,44
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,23	0,80	1,09	80,80	2,38	0,42
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,26	0,81	1,04	81,10	2,14	0,38
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,36	0,83	1,04	80,86	2,04	0,36
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,61	0,78	0,88	80,18	1,39	0,23
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,71	0,76	0,85	80,13	1,35	0,22
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,83	0,71	0,80	80,00	1,31	0,21
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,31	0,61	0,68	80,30	1,16	0,18
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,92	0,62	0,68	81,78	1,04	0,15
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,54	0,58	0,62	82,10	0,93	0,13
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,22	0,57	0,60	81,98	0,82	0,11
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,92	0,57	0,60	82,97	0,75	0,09
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,52	83,35	0,69	0,08

Tabella 10 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.

Per lo scenario TR200 valgono i medesimi commenti già esposti per lo scenario TR50.

In Figura 74 sono rappresentati gli idrogrammi di propagazione di portata di alcune sezioni significative del modello monodimensionale sull'asta del Fossamastra. Si osserva come già nel primo tratto si abbia la fuoriuscita di conspicui valori di portata, mentre più a valle il colmo si mantenga circa costante per effetto combinato delle esondazioni e degli apporti distribuiti. All'imbocco della tombinatura presso viale S. Bartolomeo la portata massima risulta pari a circa 80 m<sup>3</sup>/s a fronte del valore al colmo teorico di circa 132 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 73 – Profilo longitudinale di corrente TR200 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 14 in cui termina lo scatolare FM-C1 e la sezione 56 di sbocco a mare.**

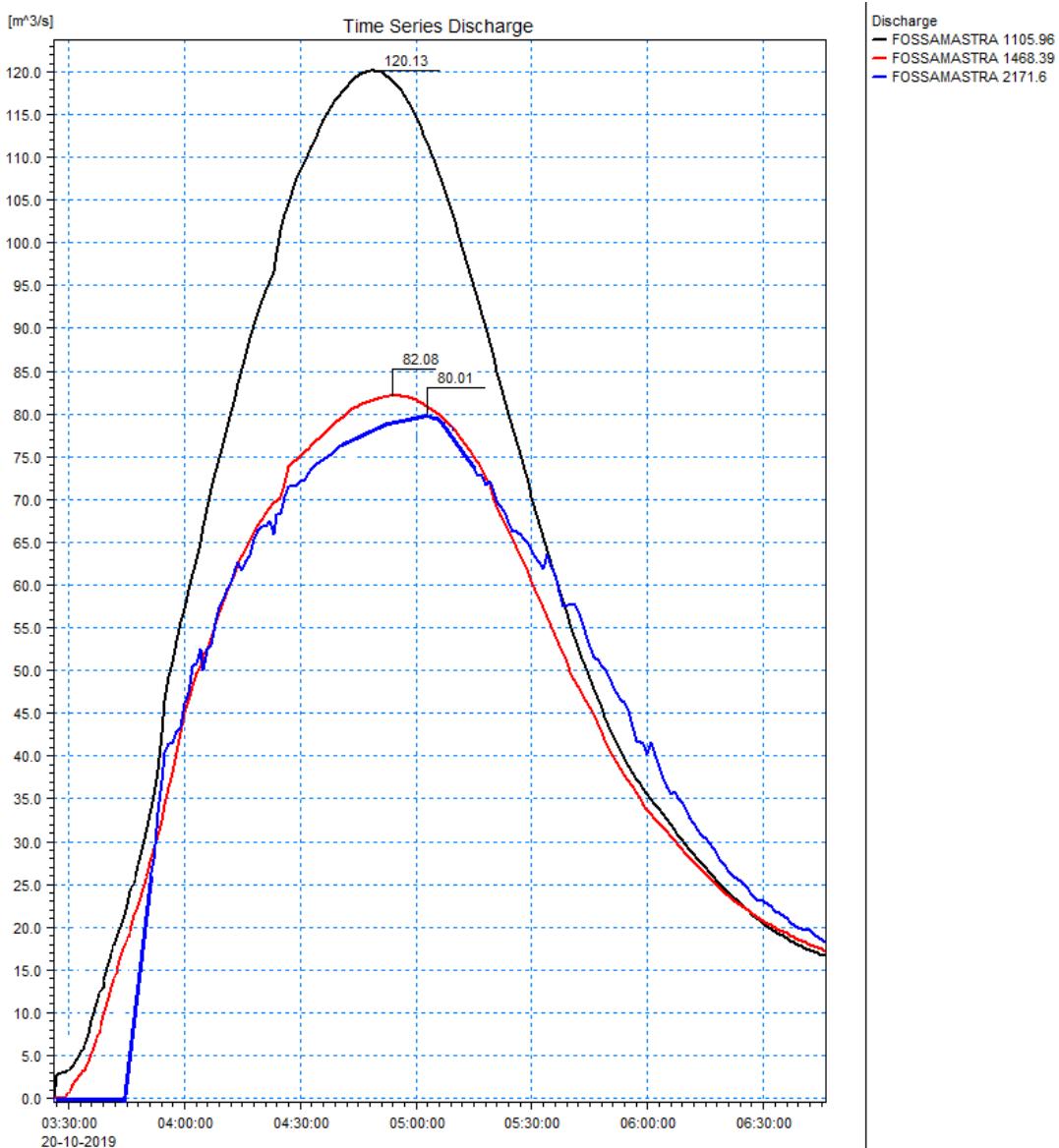
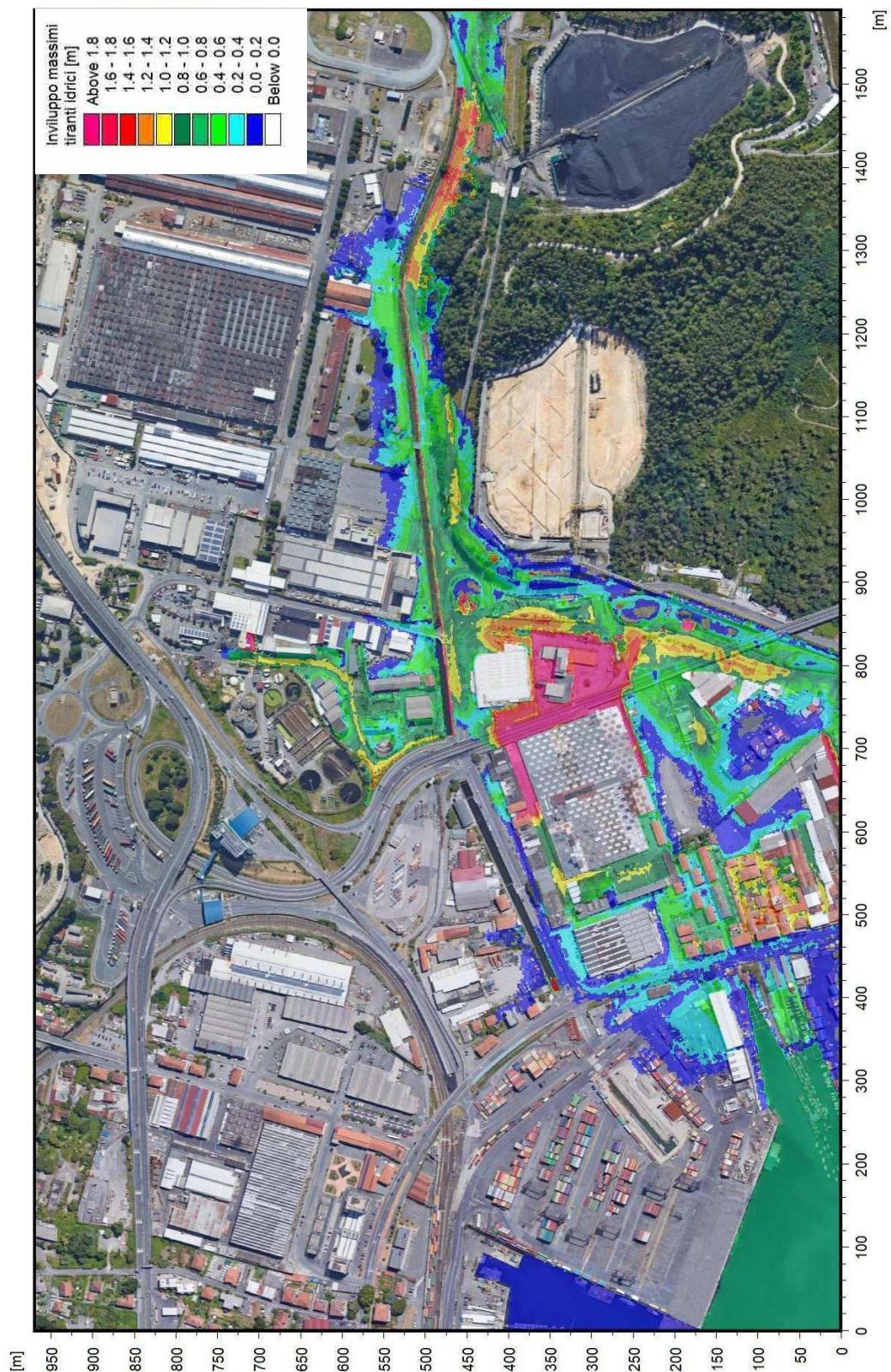


Figura 74 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul canale Fossamastra.

In Figura 75 e Figura 76 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 75 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 76 la colorazione blu indica le velocità minori mentre quella rossa le maggiori.

Anche in questo caso valgono i medesimi commenti già esposti in precedenza.



**Figura 75 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=200 anni.**

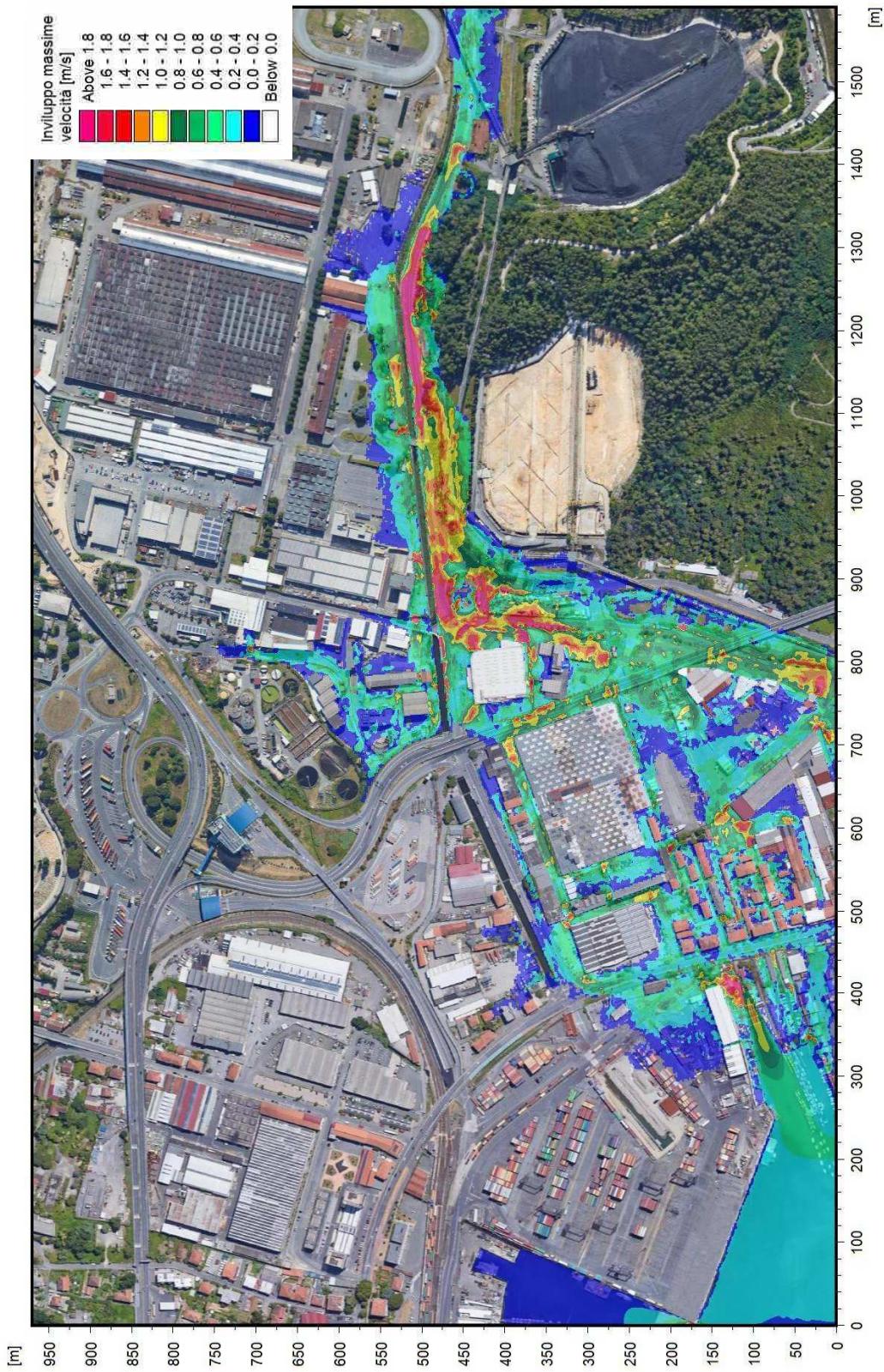


Figura 76 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità per TR=200 anni.

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

Nella Tabella 11 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'asta del Fossamastra nel tratto terminale a valle del Calcinara (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 77 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

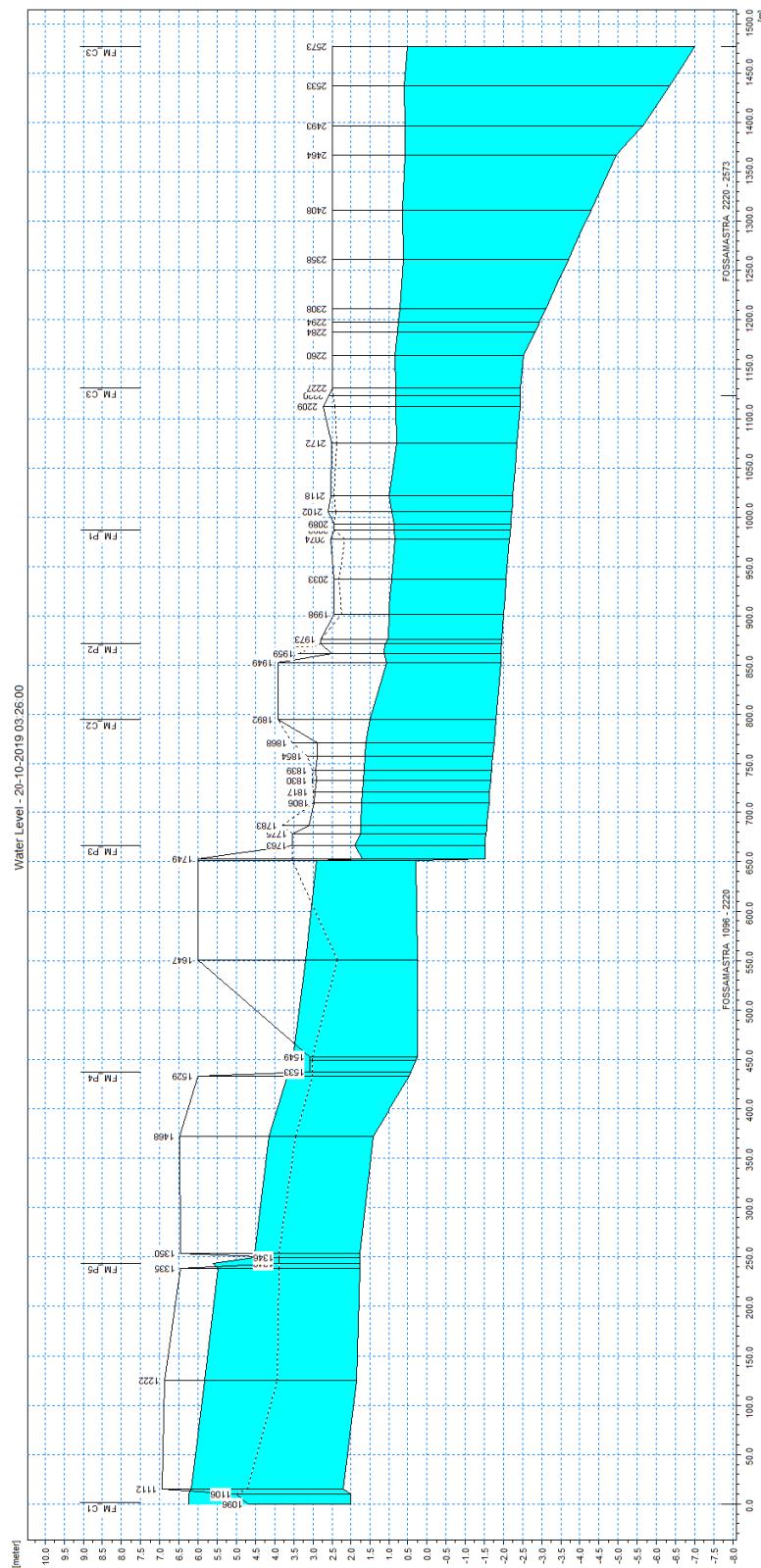
Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico Totale	Portata	Velocità	Froude
-	-	-	m	m s,m,	m	m s,m,	m s,m,	m3/s	m/s	-
Fossamastra	sbocco culvert inizio pennelli	14	1096,30	2,00	4,24	6,24	7,48	140,77	4,94	0,77
Fossamastra	fine pennelli	15	1105,96	2,02	4,21	6,23	7,45	140,77	4,89	0,76
Fossamastra		16	1111,79	2,20	3,98	6,17	7,41	140,40	4,94	0,79
Fossamastra		17	1221,75	1,83	3,99	5,82	7,21	120,76	5,23	0,84
		17.1	1334,73	1,76	3,71	5,47	5,98	80,40	3,17	0,53
Fossamastra	monte FM_P5	18	1339,51	1,76	3,85	5,61	5,96	70,40	2,61	0,43
Fossamastra	valle FM_P5	19	1345,51	1,76	2,77	4,53	5,10	59,32	3,34	0,64
		19.1	1350,00	1,76	2,76	4,52	5,08	59,33	3,32	0,64
Fossamastra		20	1468,39	1,18	2,97	4,15	5,08	87,95	4,28	0,79
		20.1	1529,00	0,45	3,21	3,66	4,47	82,39	3,99	0,71
Fossamastra	monte FM_P4	21	1533,13	0,41	3,25	3,66	4,44	80,50	3,92	0,69
Fossamastra	valle FM_P4	22	1545,35	0,28	3,25	3,53	4,34	78,96	3,98	0,70
		22.1	1548,90	0,24	3,28	3,52	4,33	79,03	3,98	0,70
Fossamastra		23	1647,31	0,24	3,19	3,19	3,87	77,80	3,66	0,65
Fossamastra		24	1747,18	0,29	2,61	2,90	3,79	71,03	4,17	0,82
		24.1	1749,18	-1,52	3,22	1,70	2,35	70,96	3,57	0,64
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	3,41	1,89	2,15	71,62	2,26	0,39
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	3,31	1,76	2,04	72,48	2,36	0,41
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	3,32	1,75	2,01	73,31	2,24	0,39
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	3,35	1,72	1,98	73,97	2,24	0,39
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	3,34	1,70	1,96	74,30	2,26	0,39
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	3,35	1,68	1,94	75,02	2,28	0,40
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	3,35	1,66	1,93	75,64	2,29	0,40
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	3,35	1,63	1,90	76,17	2,31	0,40
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	3,37	1,61	1,88	76,66	2,31	0,40
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	3,32	1,51	1,87	78,01	2,65	0,47
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	2,99	1,06	1,58	79,15	3,20	0,59
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	3,06	1,13	1,48	80,41	2,63	0,48
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	3,07	1,12	1,47	84,21	2,62	0,48
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	2,99	1,03	1,41	85,85	2,73	0,50
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	3,01	1,00	1,35	82,37	2,61	0,48
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	2,99	0,91	1,27	83,40	2,65	0,49
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	2,99	0,83	1,20	84,32	2,69	0,50
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	3,04	0,86	1,20	87,75	2,58	0,47
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	3,06	0,86	1,20	88,62	2,60	0,47

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	-
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	3,08	0,86	1,20	85,89	2,58	0,47
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	3,11	0,86	1,19	86,98	2,56	0,46
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	3,15	0,80	1,17	89,07	2,70	0,48
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,24	0,81	1,17	90,09	2,65	0,47
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,27	0,82	1,11	89,93	2,37	0,42
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,35	0,82	1,08	89,69	2,26	0,39
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,60	0,77	0,89	89,64	1,56	0,26
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,70	0,75	0,87	89,63	1,52	0,25
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,82	0,70	0,81	89,60	1,47	0,24
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,32	0,62	0,71	89,33	1,29	0,20
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,93	0,63	0,70	89,56	1,14	0,16
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,54	0,58	0,63	89,50	1,01	0,14
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,22	0,57	0,61	89,78	0,90	0,12
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,92	0,57	0,60	90,12	0,81	0,10
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,53	90,24	0,75	0,09

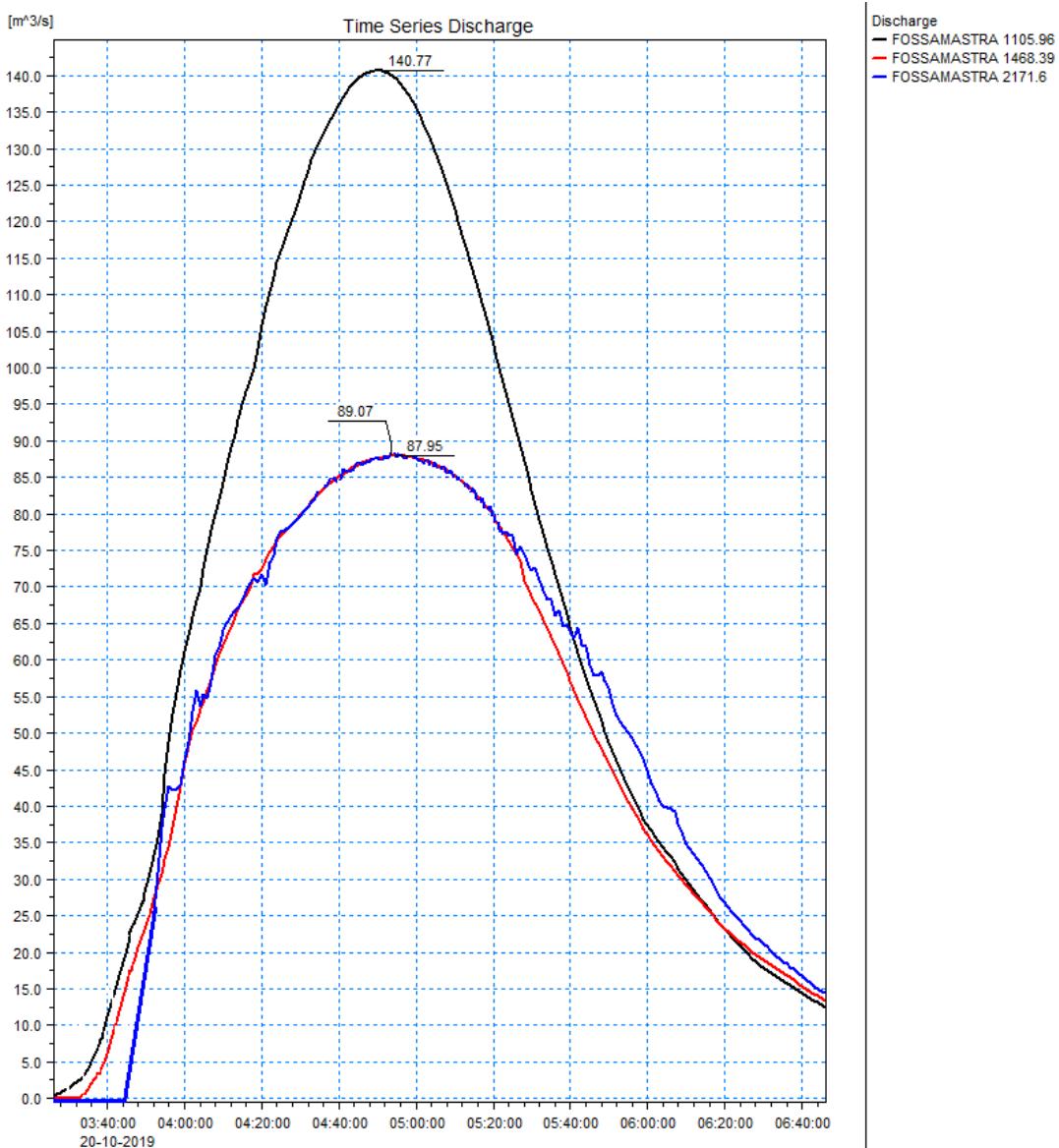
Tabella 11 – Risultati di sintesi per lo scenario TR500.

Per lo scenario TR500 valgono i medesimi commenti già esposti per lo scenario TR50.

In Figura 78 sono rappresentati gli idrogrammi di propagazione di portata di alcune sezioni significative del modello monodimensionale sull'asta del Fossamastra. Si osserva come già nel primo tratto si abbia la fuoriuscita di conspicui valori di portata, mentre più a valle il colmo si mantenga circa costante per effetto combinato delle esondazioni e degli apporti distribuiti. All'imbocco della tombinatura presso viale S.Bartolomeo la portata massima risulta pari a circa 90 m<sup>3</sup>/s a fronte del valore al colmo teorico di circa 159 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 77 – Profilo longitudinale di corrente TR500 del canale Fossamastra - tratto tra sezione 14 in cui termina lo scatolare FM-C1 e la sezione 56 di sbocco a mare.**



**Figura 78 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale sul canale Fossamastra.**

In Figura 79 e Figura 80 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 cinquecentennale.

Anche in questo caso valgono i medesimi commenti già esposti in precedenza.

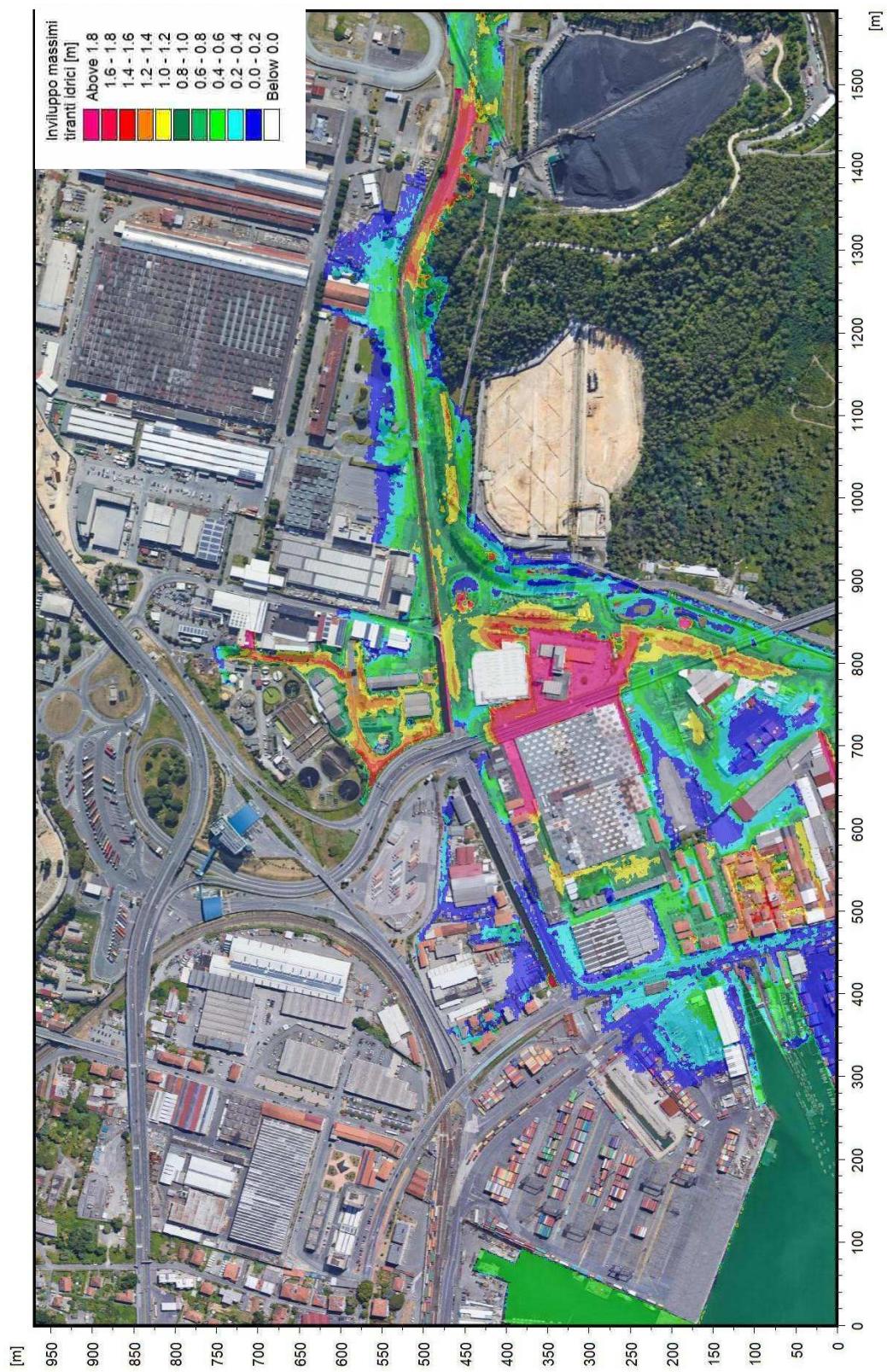


Figura 79 – Distribuzione inviluppo dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna per TR=500 anni.

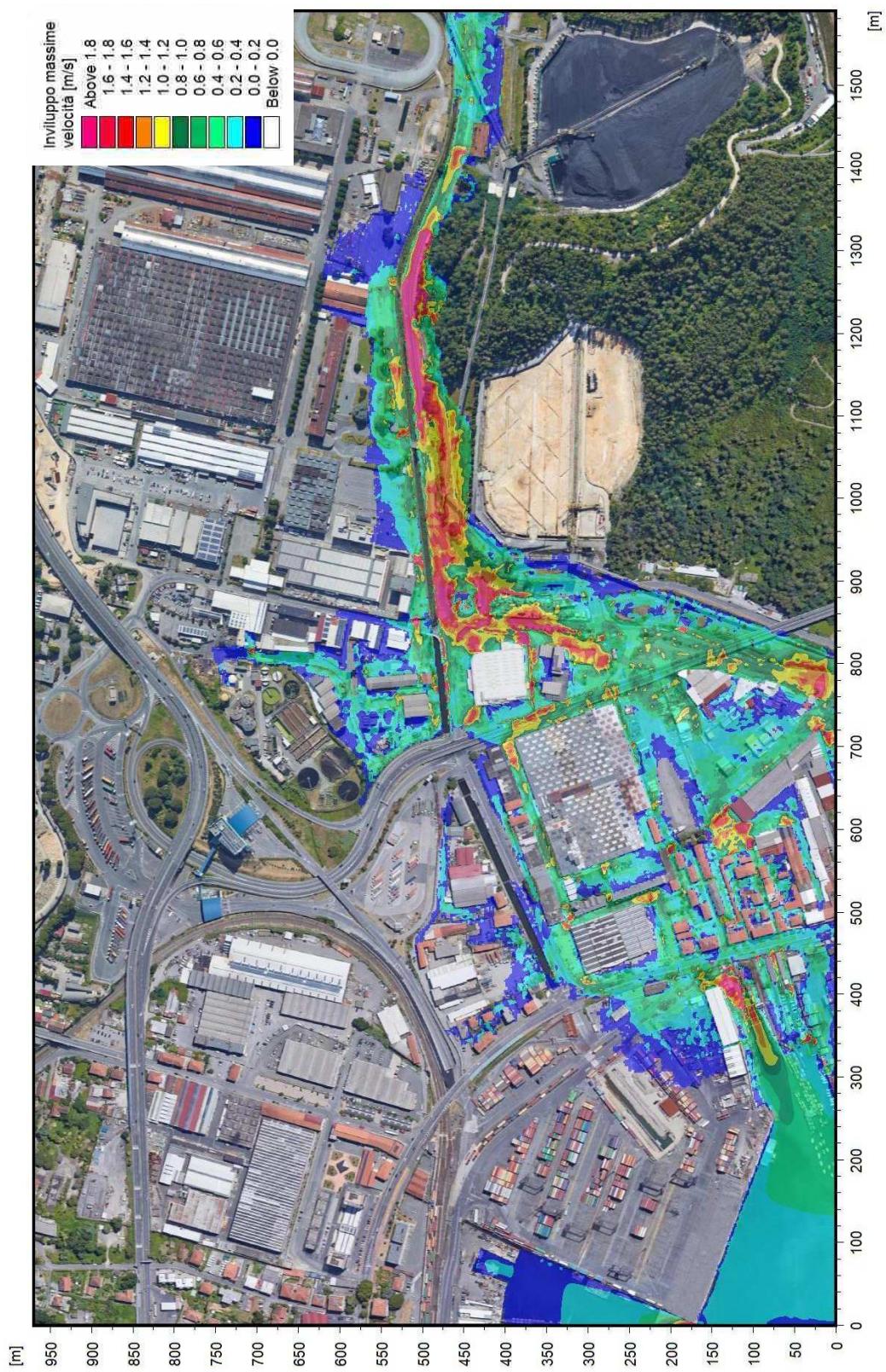


Figura 80 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità per TR=500 anni.

#### 5.2.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 12 sono sintetizzati i franchi minimi di sicurezza rispetto alle quote di intradosso degli attraversamenti, estratti dai risultati dei tre scenari simulati.

Come già descritto, 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	Intradosso canna 2	Franco idraulico sicurezza TR50	Franco idraulico sicurezza TR200	Franco idraulico sicurezza TR500
-	-	-	m s.m.	m s.m.	m	m	m
Fossamastra	FM_C1		4,7	4,7	-0,95	-1,32	-1,54
Fossamastra	FM_P5	FOFOPT05	3,3		-1,87	-2,15	-2,31
Fossamastra	FM_P4	FOFOPT04	2,6		-0,82	-0,98	-1,06
Fossamastra	FM_P3	FOFOPT03	2,9		1,51	1,26	1,01
Fossamastra	FM_C2	FOFOCP02	2,75		1,65	1,36	1,24
Fossamastra	FM_P2	FOFOPT02	2,88		1,90	1,86	1,76
Fossamastra	FM_P1	FOFOPT01	2,57		1,71	1,70	1,70
Fossamastra	FM_C3	FOFOCP01	1,30		0,48	0,48	0,48

Tabella 12 – Franco disponibile dalla quota del pelo libero simulato (per gli scenari TR50, TR200 e TR500) alla quota di intradosso degli attraversamenti viari e ferroviari sull'asta del Fossamastra nel tratto a valle della confluenza del Calcinara.

Si conferma come gli attraversamenti del tratto di monte dell'asta simulata, risultino inadeguati in quanto funzionanti in pressione.

Per il tratto oggetto di recente sistemazione (a valle dell'attraversamento di via privata OTO) i franchi sono rilevanti ma nuovamente le portate defluenti risultano assai inferiori ai valori idrologici di riferimento.

Per verificare l'assetto idraulico di questo tratto è risultato pertanto necessaria l'esecuzione di una simulazione in moto permanente che trascurasse tutti i fenomeni di esondazione dei tratti di monte (v. capitolo 5.4).

#### 5.3 Propagazione delle esondazioni nell'area a Sud del Fossamastra (Darsena Pagliari)

Poiché nelle simulazioni precedentemente descritte risultava presente un cospicuo flusso di portata (rif. capitolo 4.3 per i valori degli idrogrammi) lungo via privata OTO verso l'area Sud (area di via delle Casermette/Darsena Pagliari) è stata necessaria un'estensione della modellistica bidimensionale per descrivere la propagazione delle esondazioni al di fuori del dominio di calcolo del modello originariamente allestito (cfr. capitolo 3.2.2).

Tale modello, allestito con il codice MIKE21, presenta schema puramente bidimensionale. Le simulazioni condotte sono relative alla sola configurazione più gravosa tra quelle analizzate in precedenza, ovvero gli scenari che trascurano gli effetti di laminazione dovuti alla limitata capacità di portata dei rami di monte, imponendo l'idrogramma idrologico di riferimento allo sbocco della tombinatura del Canale Fossamastra (rif. capitolo 5.2).

Nel seguito sono forniti i risultati ottenuti in termini di mappe di distribuzione delle massime altezze d'acqua e velocità sul piano campagna per i tre tempi di ritorno indagati.

Lo scenario TR50 (mappe di Figura 81 e Figura 82) riceve come input l'idrogramma avente valore al colmo di circa 18 m<sup>3</sup>/s (rappresentato in colore nero in Figura 7). Il deflusso proveniente da via privata OTO / via delle Casermette si propaga verso Ovest lungo via privata ENEL, allagando anche l'area più a Nord di deposito container e interessando le aree di via Levanto e via Brugnato. Le acque di esondazione oltrepassano quindi viale S.Bartolomeo e invadono l'area portuale (pur con tiranti modesti, inferiori a 0,25 m e prevalentemente dell'ordine di 0,1 m) fino a recapitare in mare in modo diffuso. Più a Sud anche l'area della darsena Pagliari viene completamente interessata dagli allagamenti, che si mantengono comunque all'interno delle banchine senza interessare la soprastante via delle Casermette.

Lo scenario TR200 (mappe di Figura 83 e Figura 84) riceve come input l'idrogramma avente valore al colmo di circa 31 m<sup>3</sup>/s (rappresentato in colore blu in Figura 7). Le esondazioni si propagano in modo analogo a quanto descritto per lo scenario TR50, interessando più diffusamente l'area portuale e con sormonto di viale S.Bartolomeo anche in sinistra al nuovo ponte sulla bocca di accesso alla darsena. Via delle Casermette risulta ancora esterna agli allagamenti.

Anche per l'evento TR500 (mappe di Figura 85 e Figura 86), che riceve come input l'idrogramma avente valore al colmo di circa 37 m<sup>3</sup>/s (rappresentato in colore rosso in Figura 7), si riscontrano dinamiche di propagazione delle esondazioni del tutto analoghe, caratterizzate da maggiore intensità (in termini di altezze d'acqua e velocità), con estensione più ampia degli allagamenti anche a Sud della bocca di accesso alla darsena (dove comunque le altezze idriche sono piuttosto modeste). Via delle Casermette risulta anche interessata da limitati allagamenti.

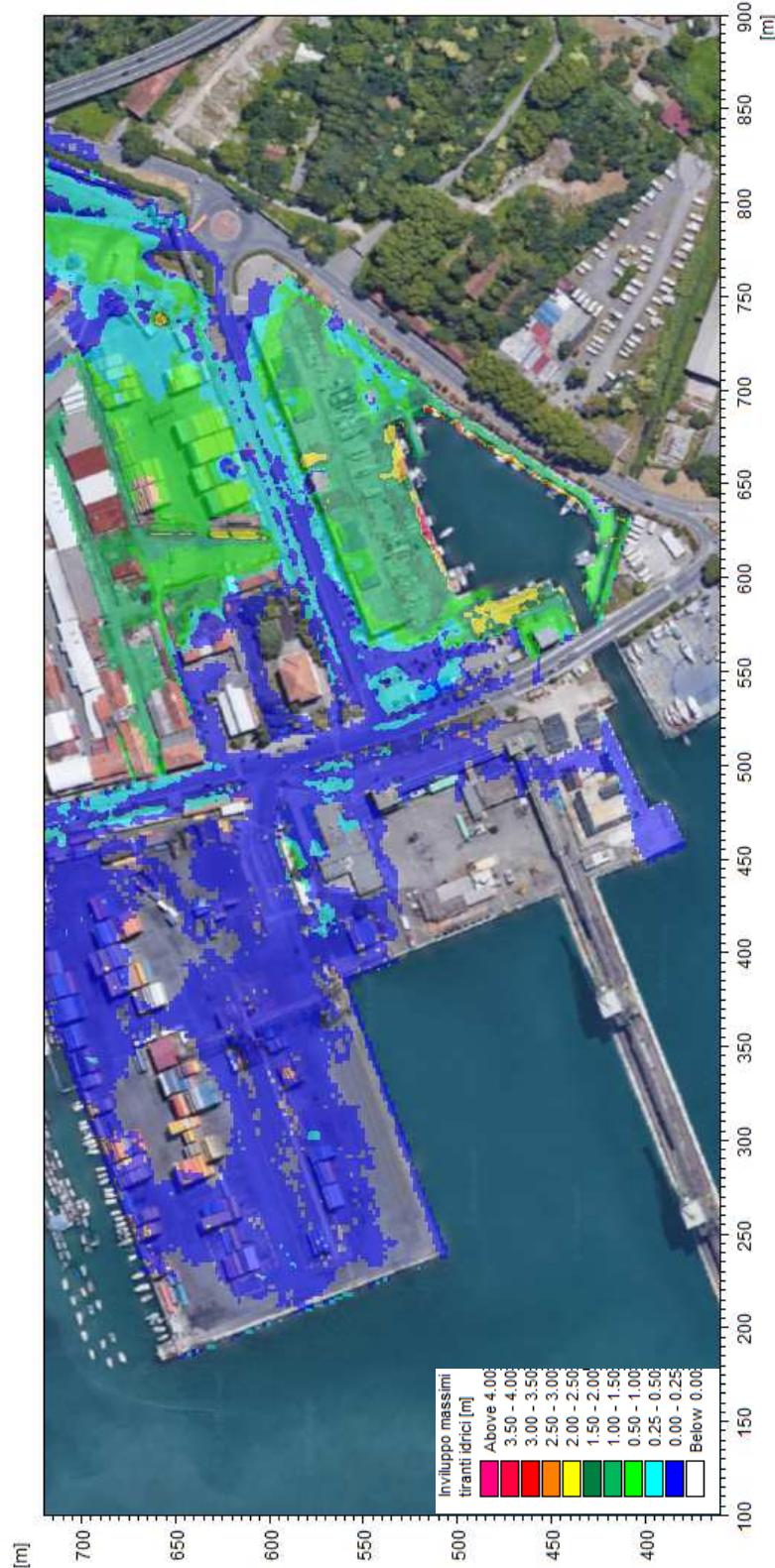


Figura 81 – Distribuzione inviluppo dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna per TR=50 anni.

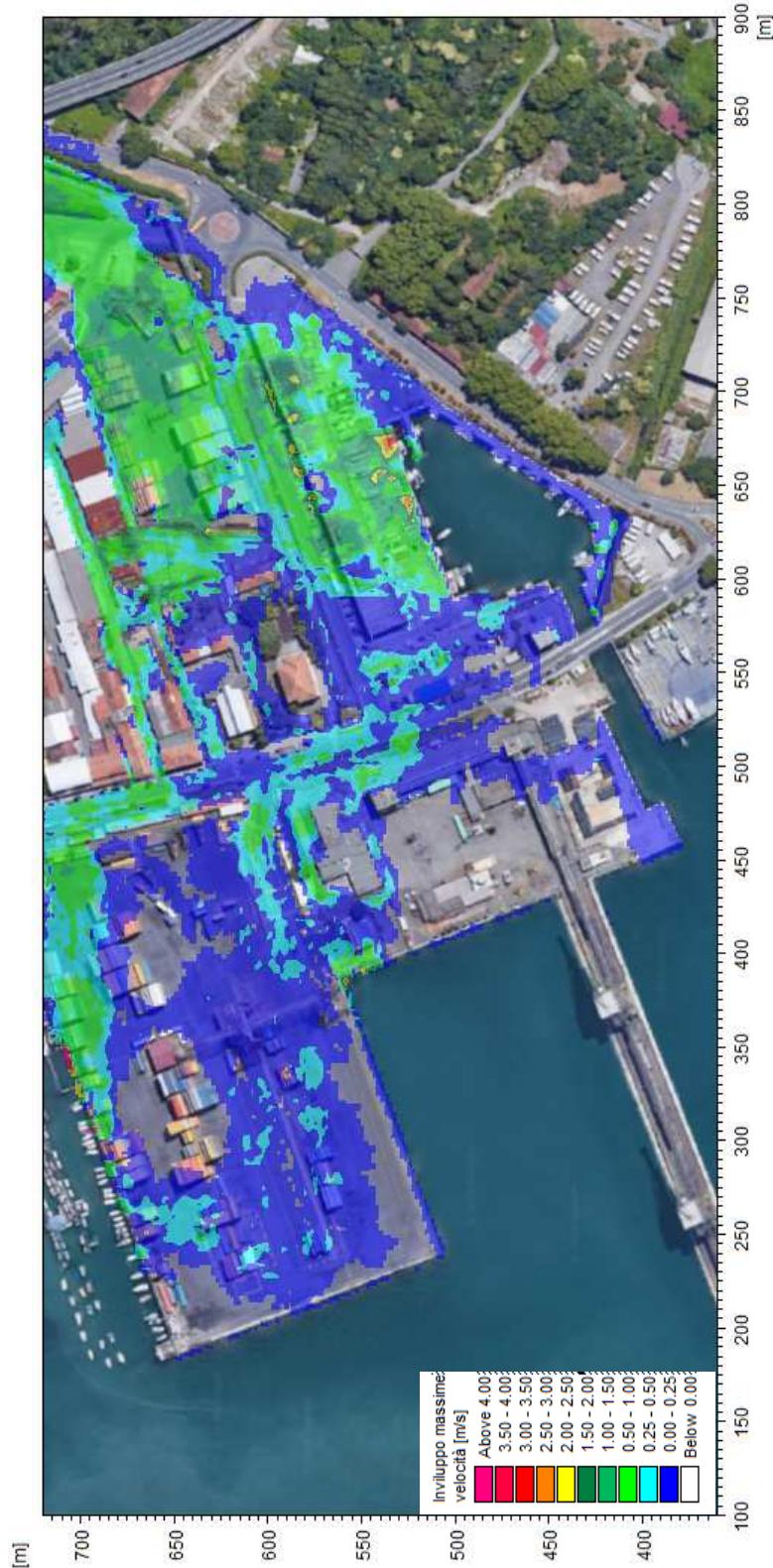


Figura 82 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità per TR=50 anni.

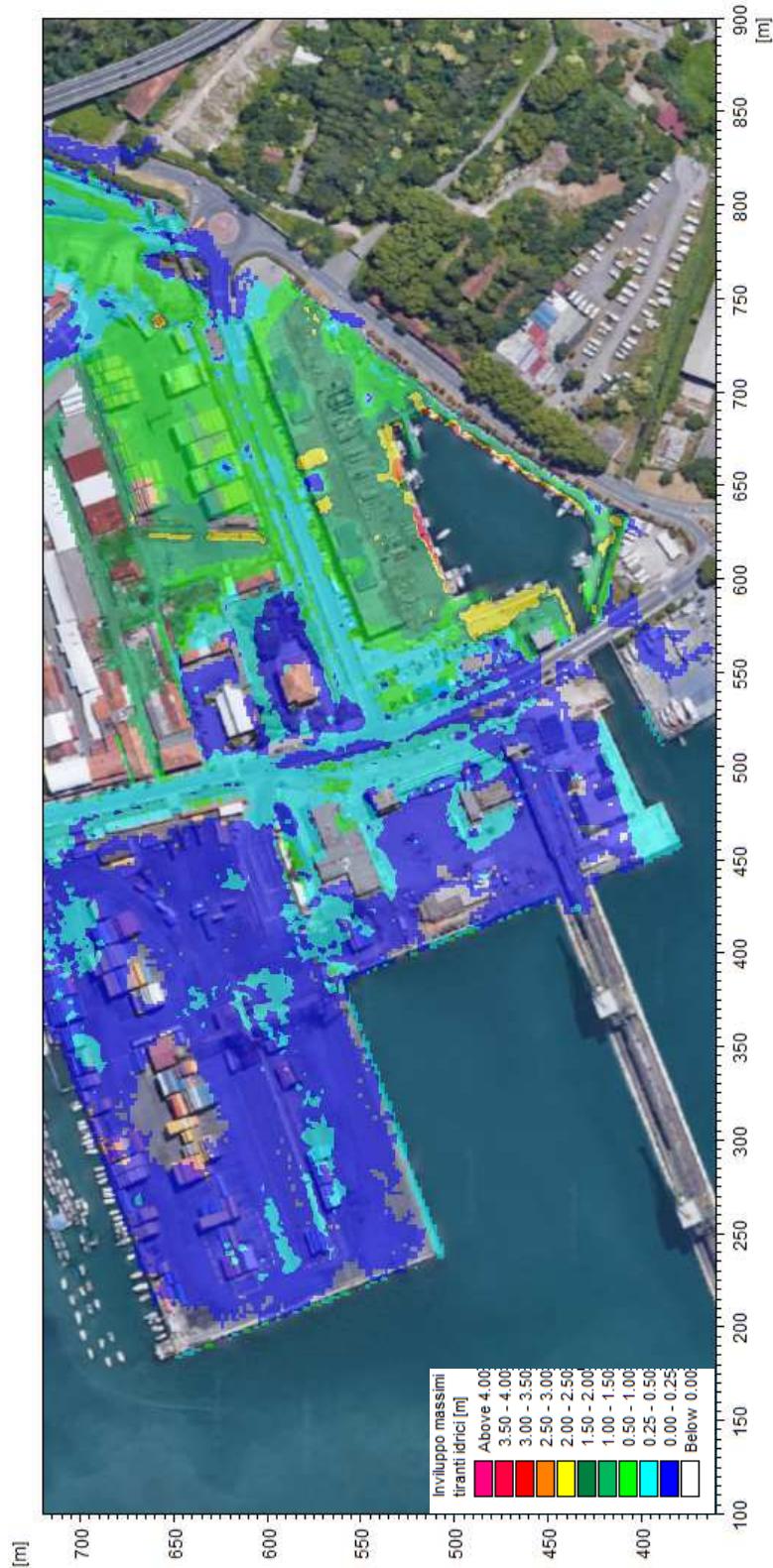


Figura 83 – Distribuzione inviluppo dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna per TR=200 anni.

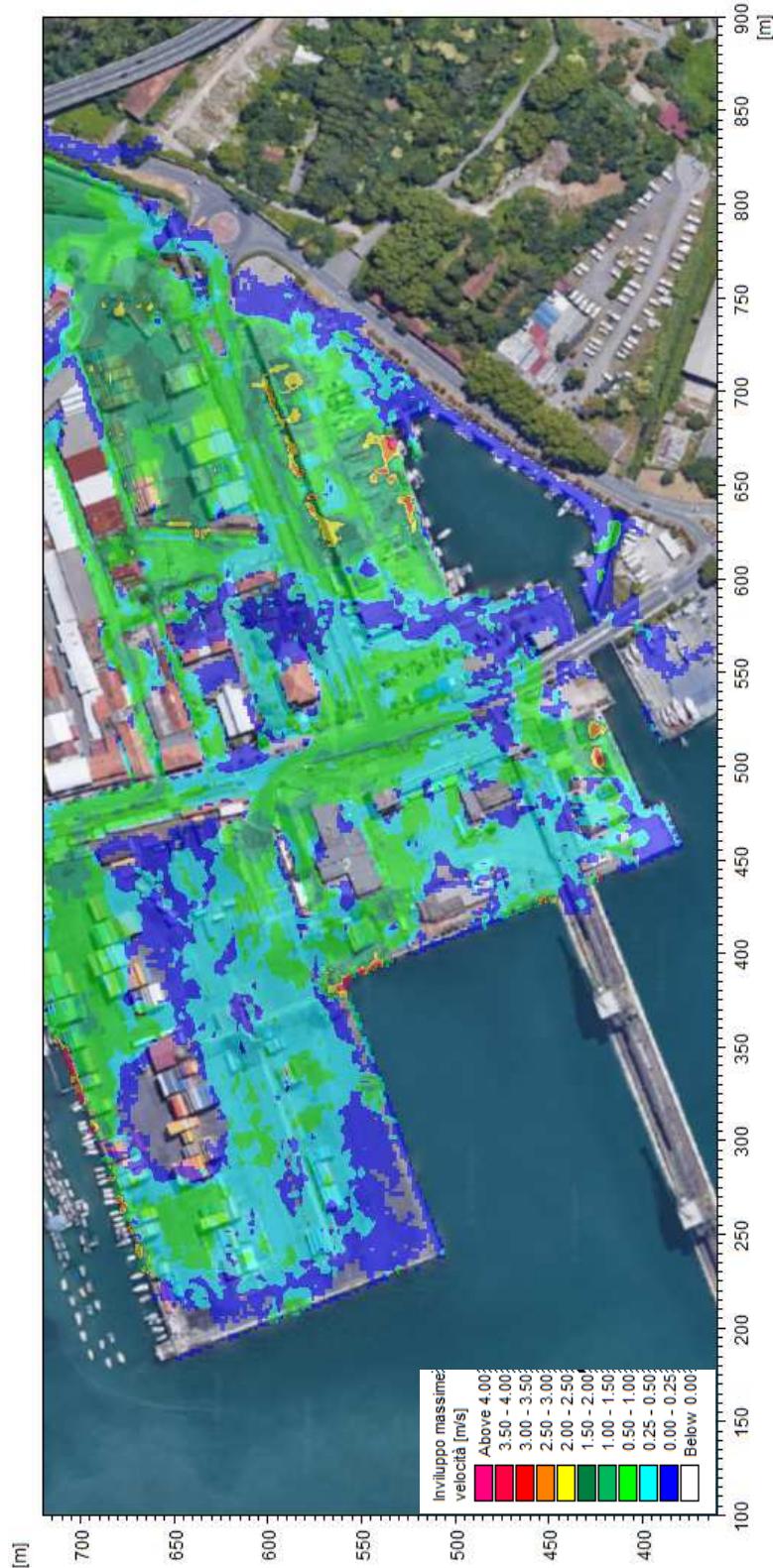


Figura 84 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità per TR=200 anni.

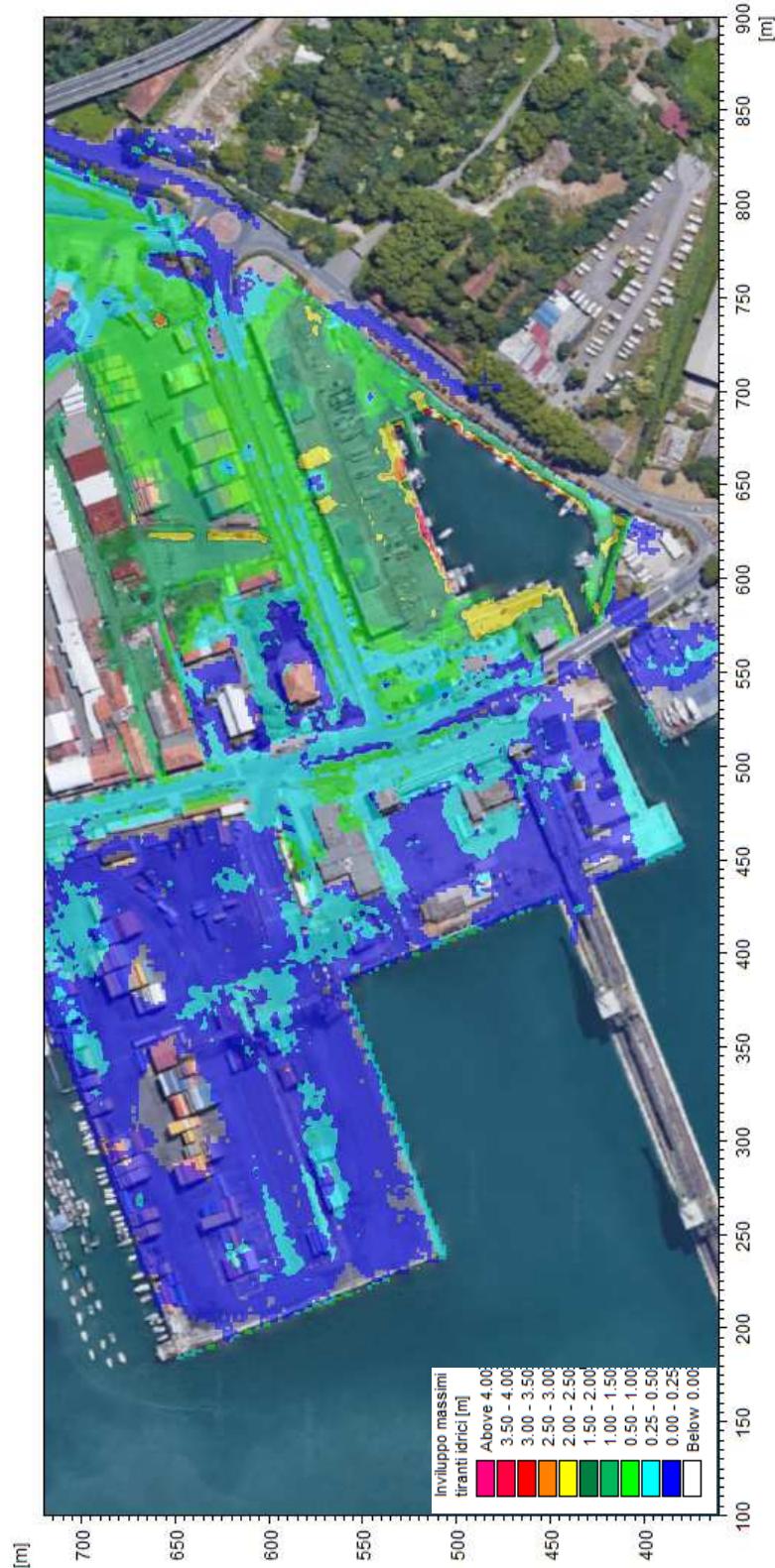


Figura 85 – Distribuzione inviluppo dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna per TR=500 anni.

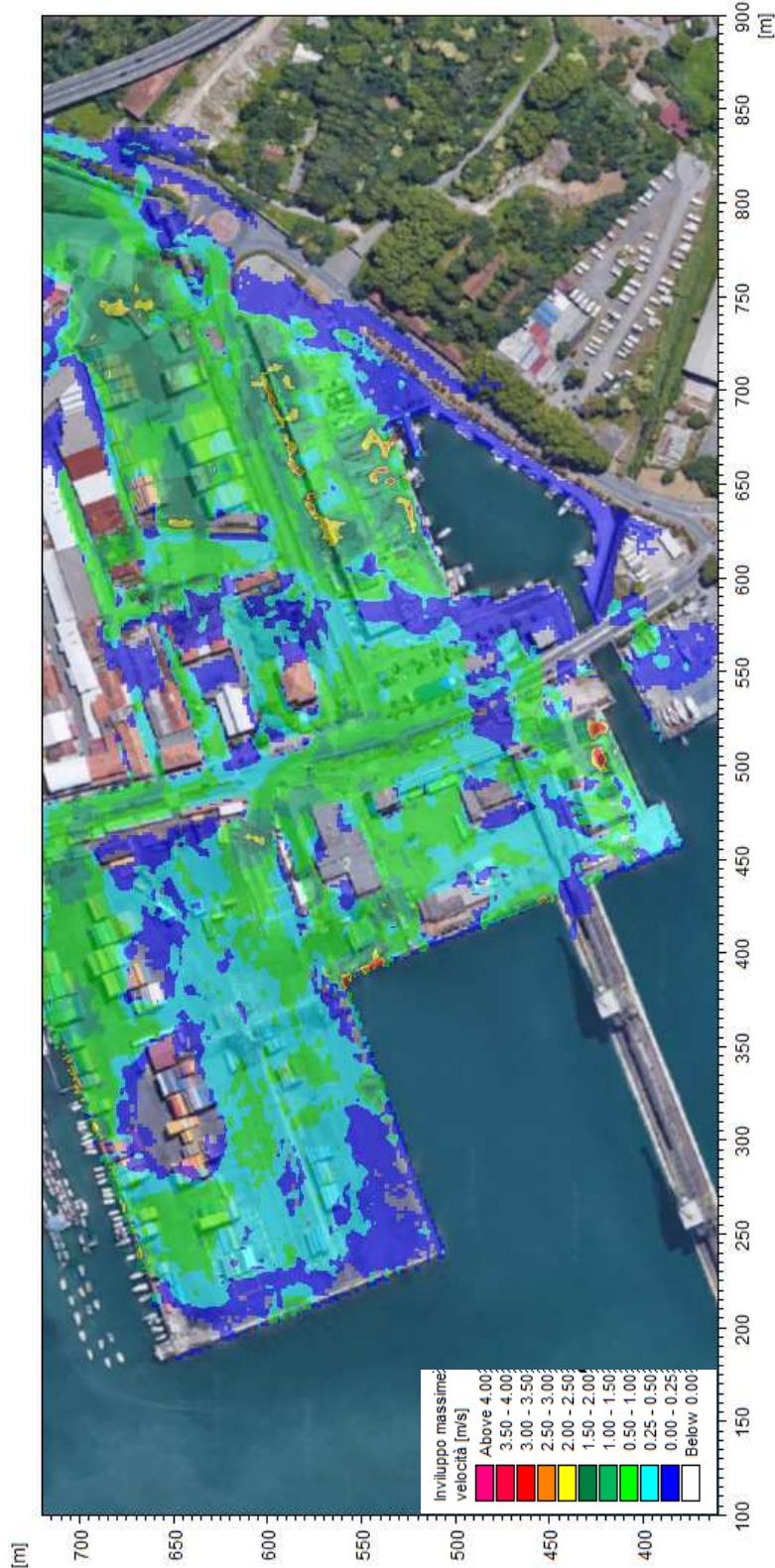


Figura 86 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità per TR=500 anni.

## 5.4 Simulazioni in moto permanente per il tratto terminale del Canale Fossamastra

Al fine di verificare l'assetto idraulico del tratto di valle del Canale Fossamastra oggetto di recenti interventi di sistemazione (ad opera del Comune e dell'Autorità Portuale) con riferimento alle effettive portate di progetto, tralasciando quindi i rilevanti effetti di laminazione dei colmi prodotti dall'inadeguatezza idraulica dei tratti a monte, che causa diffuse esondazioni, sono state eseguite due ulteriori simulazioni con schema di moto permanente, considerando il deflusso della portata al colmo definita per i tempi di ritorno di 50 e 200 anni (rispettivamente 91,50 m<sup>3</sup>/s e 132,30 m<sup>3</sup>/s).

Entrambe le portate transitano completamente contenute in alveo (nel tratto a valle dell'attraversamento con via privata OTO) senza generare condizioni di criticità idraulica per gli attraversamenti e le tominature presenti.

Di seguito si allegano i risultati delle simulazioni sia in termini tabulari che grafici (profili di corrente).

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	-
Fossamastra		24	1747,18	0,29	3,09	3,38	4,42	91,50	4,51	0,82
		24.1	1749,18	-1,52	3,03	1,51	2,75	91,50	4,92	0,90
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	3,08	1,56	2,08	91,50	3,19	0,58
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	3,05	1,50	2,03	91,50	3,22	0,59
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	3,09	1,52	1,98	91,50	3,01	0,55
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	3,11	1,48	1,93	91,50	2,98	0,54
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	3,09	1,45	1,91	91,50	3,00	0,55
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	3,09	1,42	1,88	91,50	3,00	0,55
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	3,09	1,40	1,86	91,50	3,01	0,55
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	3,08	1,36	1,82	91,50	3,01	0,55
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	3,09	1,33	1,79	91,50	3,00	0,55
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	3,02	1,21	1,76	91,50	3,29	0,61
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	2,97	1,04	1,75	91,50	3,73	0,69
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	3,01	1,08	1,51	91,50	2,90	0,53
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	3,01	1,06	1,49	91,50	2,90	0,53
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	2,97	1,01	1,45	91,50	2,94	0,54
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	2,96	0,95	1,39	91,50	2,94	0,55
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	2,95	0,87	1,31	91,50	2,95	0,55
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	2,93	0,77	1,22	91,50	2,97	0,55
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	2,93	0,75	1,20	91,50	2,97	0,55
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	2,90	0,70	1,16	91,50	3,00	0,56

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	-
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	2,90	0,68	1,14	91,50	3,01	0,56
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	2,91	0,66	1,12	91,50	2,99	0,56
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	2,96	0,61	1,05	91,50	2,94	0,55
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,04	0,61	1,03	91,50	2,87	0,53
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,05	0,60	0,94	91,50	2,59	0,47
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,12	0,59	0,92	91,50	2,53	0,46
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,42	0,59	0,73	91,50	1,67	0,29
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,53	0,58	0,71	91,50	1,62	0,27
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,70	0,58	0,70	91,50	1,55	0,26
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,25	0,55	0,64	91,50	1,35	0,21
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,83	0,53	0,60	91,50	1,18	0,17
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,49	0,53	0,59	91,50	1,04	0,14
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,17	0,52	0,56	91,50	0,93	0,12
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,86	0,51	0,55	91,50	0,83	0,10
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,53	91,50	0,76	0,09

Tabella 13 - Risultati della simulazione con tempo di ritorno 50 anni

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	-
Fossamastra		24	1747,18	0,29	3,90	4,19	5,53	132,30	5,12	0,83
		24.1	1749,18	-1,52	3,76	2,24	3,87	132,30	5,66	0,93
Fossamastra	monte FM_P3	25	1763,18	-1,52	3,80	2,28	3,00	132,30	3,75	0,61
Fossamastra	valle FM_P3	26	1774,71	-1,55	3,74	2,19	2,93	132,30	3,80	0,63
Fossamastra		27	1783,34	-1,57	3,77	2,20	2,85	132,30	3,57	0,59
Fossamastra		28	1806,14	-1,63	3,79	2,16	2,80	132,30	3,55	0,58
Fossamastra		29	1816,64	-1,64	3,77	2,13	2,78	132,30	3,57	0,59
Fossamastra		30	1829,79	-1,67	3,76	2,09	2,74	132,30	3,58	0,59
Fossamastra		31	1839,44	-1,69	3,75	2,06	2,72	132,30	3,59	0,59
Fossamastra		32	1854,29	-1,72	3,73	2,01	2,67	132,30	3,60	0,60
Fossamastra		33	1867,54	-1,76	3,73	1,97	2,63	132,30	3,60	0,60
Fossamastra	monte FM_C2	34	1891,54	-1,81	3,66	1,85	2,59	132,30	3,82	0,64
Fossamastra	valle FM_C2	35	1948,55	-1,93	3,53	1,60	2,59	132,30	4,41	0,75

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	-
Fossamastra		36	1958,50	-1,93	3,53	1,60	2,25	132,30	3,57	0,61
Fossamastra	monte FM_P2	37	1968,00	-1,95	3,53	1,58	2,23	132,30	3,57	0,61
Fossamastra	valle FM_P2	37.1	1973,00	-1,96	3,46	1,50	2,18	132,30	3,64	0,63
Fossamastra		38	1998,21	-2,01	3,44	1,43	2,11	132,30	3,66	0,63
Fossamastra		39	2033,21	-2,08	3,39	1,31	2,01	132,30	3,71	0,64
Fossamastra		40	2074,01	-2,16	3,33	1,17	1,90	132,30	3,78	0,66
Fossamastra	monte FM_P1	41	2083,01	-2,18	3,32	1,14	1,87	132,30	3,80	0,67
Fossamastra	valle FM_P1	41.1	2089,01	-2,20	3,26	1,06	1,82	132,30	3,87	0,68
Fossamastra		42	2101,66	-2,22	3,24	1,02	1,79	132,30	3,89	0,69
Fossamastra		43	2118,29	-2,25	3,20	0,95	1,74	132,30	3,94	0,70
Fossamastra		44	2171,60	-2,35	3,08	0,73	1,58	132,30	4,08	0,74
Fossamastra		45	2208,50	-2,43	3,13	0,70	1,53	132,30	4,03	0,73
Fossamastra	imbocco FM_C3	46	2227,03	-2,45	3,14	0,69	1,37	132,30	3,65	0,66
Fossamastra	FM_C3	47	2259,99	-2,53	3,22	0,69	1,33	132,30	3,55	0,63
Fossamastra	FM_C3	48	2284,20	-2,83	3,54	0,71	0,99	132,30	2,34	0,40
Fossamastra	FM_C3	49	2294,20	-2,95	3,66	0,71	0,97	132,30	2,26	0,38
Fossamastra	FM_C3	50	2307,60	-3,12	3,83	0,71	0,95	132,30	2,16	0,35
Fossamastra	FM_C3	51	2357,60	-3,70	4,36	0,66	0,84	132,30	1,90	0,29
Fossamastra	FM_C3	52	2407,60	-4,30	4,87	0,57	0,72	132,30	1,70	0,25
Fossamastra	FM_C3	53	2463,58	-4,96	5,46	0,50	0,62	132,30	1,51	0,21
Fossamastra	FM_C3	54	2493,08	-5,65	6,15	0,50	0,59	132,30	1,34	0,17
Fossamastra	FM_C3	55	2533,08	-6,35	6,85	0,50	0,57	132,30	1,21	0,15
Fossamastra	sbocco FM_C3	56	2573,08	-7,00	7,50	0,50	0,56	132,30	1,10	0,13

Tabella 14 - Risultati della simulazione con tempo di ritorno 200 anni

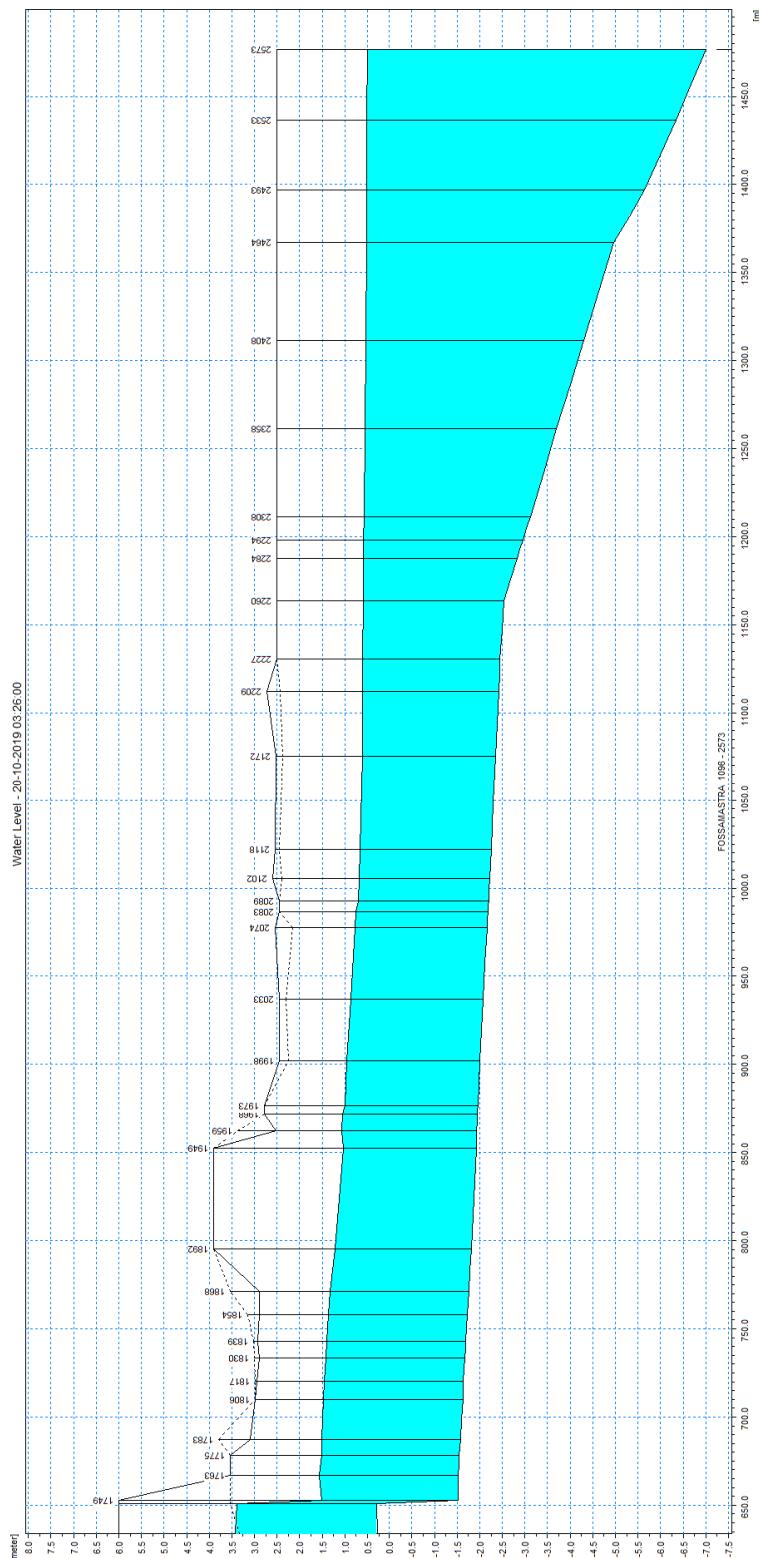
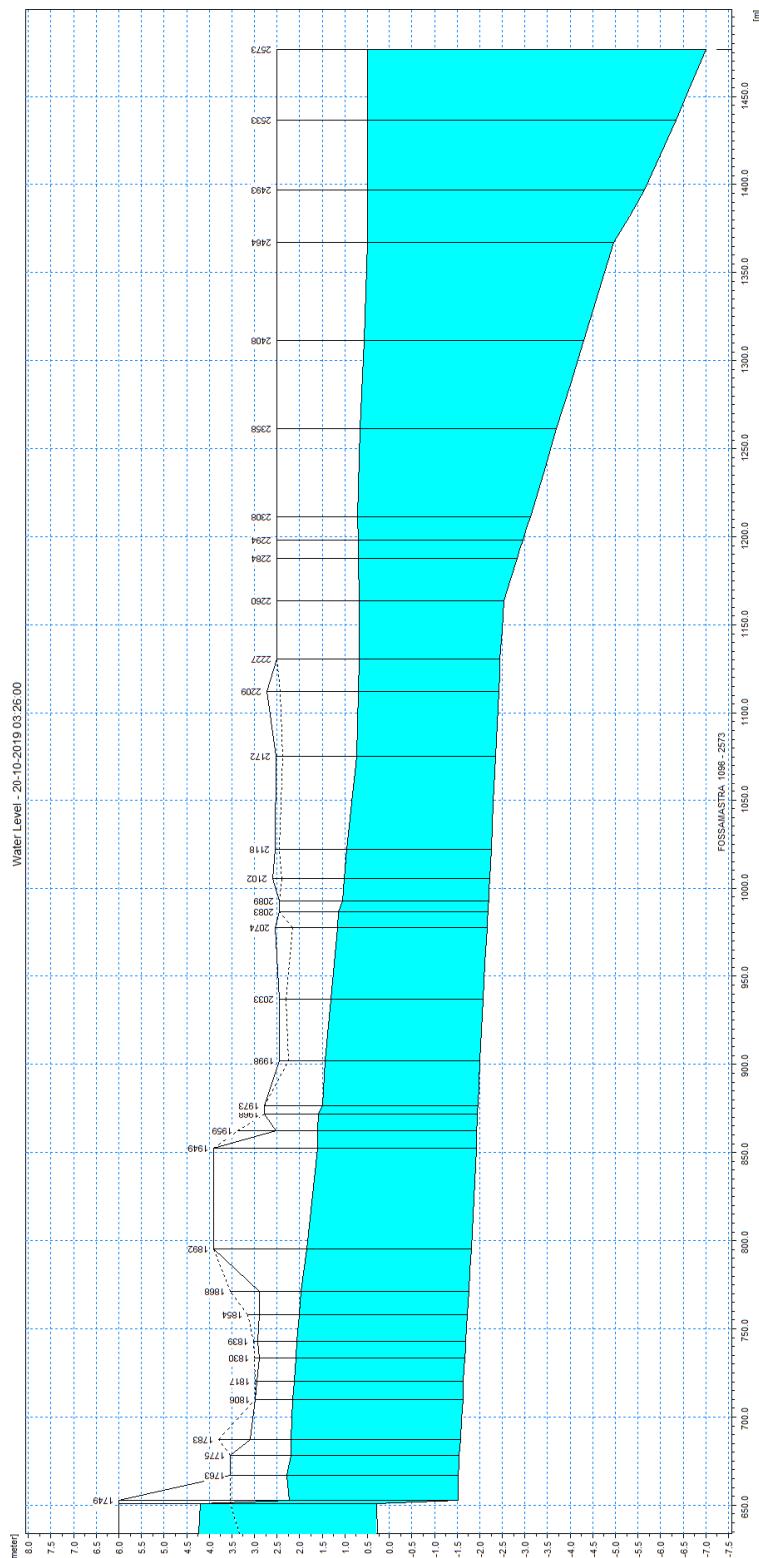


Figura 87 – Profilo di corrente per tempo di ritorno 50 anni



#### 5.4.1 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 15 sono sintetizzati i franchi minimi di sicurezza rispetto alle quote di intradosso degli attraversamenti, estratti dai risultati degli scenari simulati. Tali valori sono stati confrontati con quelli determinati nell'ambito dei progetti predisposti dal Comune di La Spezia e dall'Autorità Portuale (rif. elaborato 3636-02-00100 per maggiori dettagli).

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	Risultati da modello		Dati di confronto dai progetti degli interventi di sistemazione			
				Franco TR 50	Franco TR200	livelli TR50	livelli TR200	Franco TR50	Franco TR200
-	-	-	m s.m.	m	m	m s.m.	m s.m.	m	m
Fossamastra	monte FM_P3	FOFOPT03	2,90	1,34	0,62				
Fossamastra	valle FM_P3		3,05			1,71	2,45	1,34	0,60
Fossamastra	monte FM_C2	FOFOCP02	2,75	1,54	0,90	1,21	1,86	1,54	0,89
Fossamastra	monte FM_P2	FOFOPT02	2,88	1,82	1,30	1,18	1,82	1,70	1,06
Fossamastra	monte FM_P1	FOFOPT01	2,57	1,82	1,43	0,85	1,38	1,72	1,19
Fossamastra	imbocco FM_C3	FOFOCP01	1,30	0,70	0,61		0,23		1,07

**Tabella 15 - Franco disponibile dalla quota del pelo libero simulato (per gli scenari TR50 e TR200) alla quota di intradosso degli attraversamenti viari e ferroviari sul tratto d'asta sistemato del Fossamastra**

La tabella mostra una sostanziale congruenza tra i risultati ottenuti; gli scostamenti appaiono prevalentemente imputabili alla diversa modalità di schematizzazione (e risoluzione numerica delle equazioni) dei "culvert" (ponti e tombinature) da parte dei diversi modelli utilizzati per l'analisi idrodinamica.

Nel presente studio i franchi idraulici risultano generalmente superiori, pur di poco, a quelli di progetto, tranne che per la tombinatura terminale. Si riscontra però in questo caso un valore anomalo indicato nel progetto per il livello idrico considerato per il calcolo del franco: esso è infatti pari a 0,23 m s.m., a fronte di un livello di valle (di mare) assunto pari a 0,50 m s.m.; nel presente studio invece i valori ottenuti per il profilo idrico entro la tombinatura variano da circa 0,70 m s.m. all'imbocco a 0,50 m s.m. alla foce.

## **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 dei corsi d'acqua esaminati, considerando una pluralità di scenari per la verifica delle condizioni di riferimento più gravose per ciascun tratto fluviale considerato.

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) e moderata (fascia B) soltanto nel tratto terminale dell'asta del Fossamastra a valle della confluenza del Calcinara (cfr. Figura 1). Per le aree più a monte, nel PdB sono state eseguite soltanto (con analisi in moto uniforme delle condizioni di deflusso nella sezione) verifiche di adeguatezza idraulica di una serie di attraversamenti, prevalentemente sul Fosso Calcinara, che risultano pressoché tutti inadeguati al deflusso della piena cinquantennale.

Nel presente studio è stata invece condotta un'analisi idrodinamica di dettaglio su un'ampia porzione del reticolo idrografico del bacino del Canale Fossamastra, includendo anche i principali affluenti (Fosso Calcinara, Fosso Tombone, rio Colombiera). Particolarmente nei tratti tombati, tali corsi d'acqua risultano idraulicamente inadeguati al deflusso dell'evento di piena cinquantennale e sono responsabili di diffuse esondazioni nella porzione Nord dell'area di studio che si propagano poi sul piano campagna verso il fondovalle del Fossamastra.

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 con riferimento alla condizione più gravosa tra i vari scenari simulati.

Per la sola fascia A sono state generalmente escluse dalla perimetrazione aree di esondazione periferiche caratterizzate con continuità da altezze d'acqua non superiori a 10 cm, identificandole come rivoli di propagazione terminale dei volumi fuoriusciti, caratterizzate da minima pericolosità (condizioni affini ai ruscellamenti dovuti a temporali intensi) e rientranti nei limiti di affidabilità del modello (considerando le variazioni al flusso che potrebbero essere indotte da elementi non rappresentabili quali marciapiedi, dossi, o l'intercettazione da parte delle ordinarie caditoie stradali).

I risultati ottenuti sono rappresentati in Figura 89 e negli elaborati grafici annessi (codice 3636-04-01100). Nella figura in particolare sono perimetrati, per facilità di confronto, le sole aree conseguenti alle dinamiche di esondazione descritte nel presente documento. In Figura 90 sono invece rappresentate le omologhe aree derivanti dallo studio idraulico specifico del solo Fosso Tombone (Fi.l.s.e., 2020 – elaborato 3636-01-00100 annesso), pur condotto tenendo conto -in termini di condizioni imposte a valle- dell'effetto prodotto dalle condizioni idrodinamiche di piena riscontrabili nel corpo idrico recettore (Fosso di Calcinara) derivate dalle analisi descritte nel presente studio.

Si precisa come le fasce fluviali rappresentate negli elaborati grafici annessi corrispondano all'inviluppo di quelle derivanti dai due studi sopra richiamati.

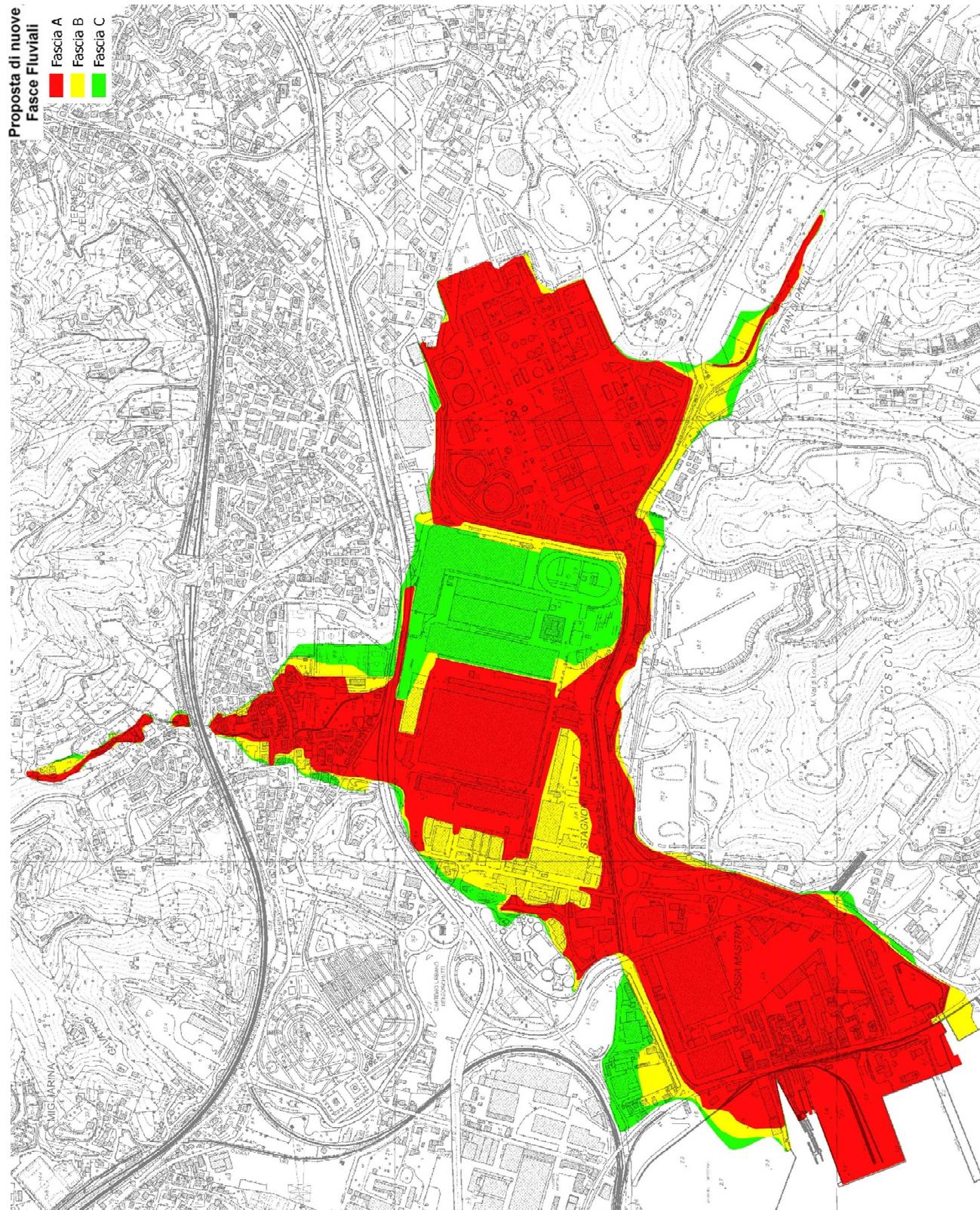


Figura 89 – Estensione delle fasce A, B e C proposte per il sistema idrodinamico del Fossamastra.

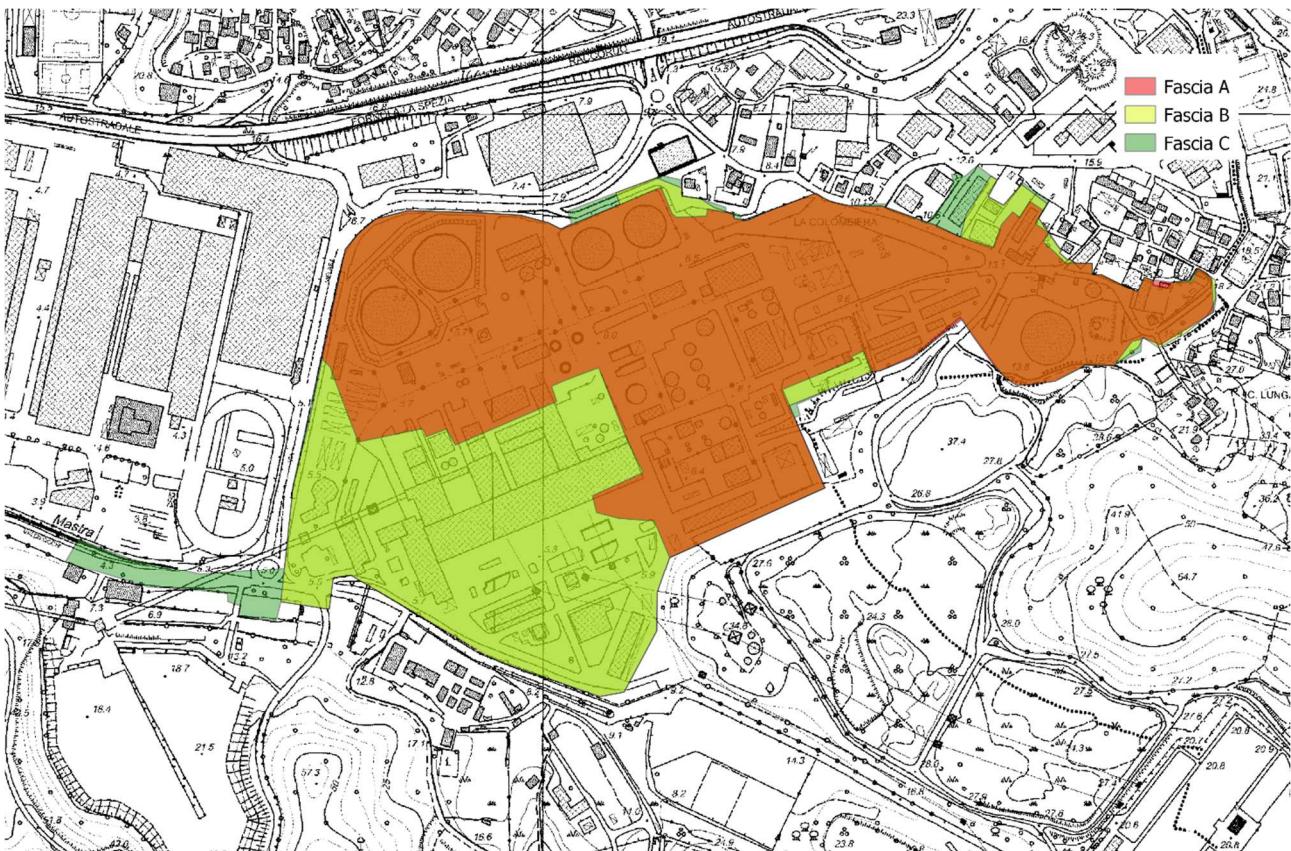


Figura 90 – Estensione delle fasce A, B e C proposte per il solo Fosso Tombone (da studio Fi.I.s.e. 2020).

Per quanto già esposto tali fasce risultano nettamente più estese rispetto al vigente PdB, considerando anche le esondazioni relative ai tratti non precedentemente studiati.

Si evidenziano in particolare due ambiti di particolare rilevanza, ovvero l'area della centrale termoelettrica ENEL e l'area industriale Ovest in cui ha sede lo stabilimento Leonardo.

Il sito della centrale è interessato da allagamenti diffusi già per l'evento cinquantennale, che derivano dalle esondazioni del rio Colombiera e del Fosso Tombone.

È opportuno precisare come per entrambi i corsi d'acqua -come previsto dalla normativa vigente- si sia fatto riferimento a una valutazione idrologica che considera l'intera portata producibile dal bacino afferente, nonostante si riscontrò nella realtà l'impossibilità tecnica per tali significative portate al colmo di poter essere veicolate alle sezioni di monte dei tratti simulati, per presenza di tratti tombati a monte di minore capacità di deflusso (per cui si verificheranno allagamenti già nelle porzioni di reticolo più a monte). Relativamente al rio Colombiera si rappresenta come delle esondazioni siano comunque attese, in caso di evento gravoso, nel nodo di confluenza dei due tratti tombati di monte, presso il lato Nord del sito della centrale, in ragione della geometria dei collettori: la sezione di valle presenta una capacità di deflusso a bordi pieni inferiore rispetto alla somma dei due di monte.

La capacità di smaltimento di questi due corpi idrici inoltre è condizionata dalle elevate altezze d'acqua che si instaurano nel Fosso Calcinara nel tratto di confluenza, già esse prossime o superiori al piano campagna

(franchi minimi rispetto ai muri spondali). Anche qualora tali corsi d'acqua fossero adeguati a smaltire i deflussi in arrivo, la maggior portata nel Fosso di Calcinara non sarebbe contenuta dalle sponde, provocando esondazioni laterali (innanzitutto verso la centrale, essendo il muro a quota più bassa in sinistra).

Per quanto riguarda l'area industriale, gli allagamenti sono provocati da esondazioni dirette dal Canale Fossamastra, da Sud, e dalla propagazione di acque di esondazione del Calcinara che provengono da Nord. Queste ultime sono relative al tratto compreso tra la via Aurelia e via Melara, in cui la geometria delle sezioni è stata verificata con specifica attività di rilievo, tenendo in conto anche gli elementi di ritenuta esistenti (muri spondali presenti a tratti). I flussi di esondazione sono contenuti dal muro di cinta del sito industriale, ma possono entrare nel perimetro attraverso il varco di accesso carrabile presso il vertice Nord-Ovest. Vista la presenza di esondazioni da più lati, l'intero sito è stato incluso in una perimetrazione di fascia C, mentre i limiti di fascia A e B sono stati mantenuti aderenti all'inviluppo delle aree di esondazione.

Nel tratto di Canale Fossamastra a valle dello sbocco della tominatura la portata che risulta smaltibile senza esondazioni è inferiore a 60 m<sup>3</sup>/s (ovvero inferiore ai 2/3 della portata al colmo cinquantennale); considerando la presenza di livelli che inducono esondazioni e rientri di portata esonda in alveo si giunge per gli scenari più gravosi a valori massimi recapitati nel tratto di valle di circa 80 m<sup>3</sup>/s.

Si producono pertanto ingenti flussi di esondazione lungo via Valdilocchi, che si propagano ampiamente verso valle fino a trovare recapito in mare, sia in direzione Ovest che Sud, andando a interessare anche l'area della darsena Pagliari.

Nonostante gli interventi di sistemazione eseguiti nel tratto terminale pertanto la vigente perimetrazione di pericolosità di quest'area è confermata, anzi estesa, a causa delle portate esondate più a monte. Poiché queste ultime si propagano in prevalenza lungo via Valdilocchi, risultano però fortemente ridotte le esondazioni che interessano la sponda destra (che derivano unicamente dalla propagazione di una porzione delle acque che scorrono in sponda sinistra verso Nord lungo viale S. Bartolomeo: non potendo rientrare in alveo a causa della presenza di un muretto arginale, attraversano il Canale e si invasano nell'area a minor quota in sponda destra).

Nel tratto terminale oggetto di sistemazione sono sostanzialmente confermati i franchi idraulici di progetto: le opere realizzate risultano funzionali dal punto di vista idraulico.

Per immediato riscontro delle variazioni introdotte rispetto alle perimetrazioni del vigente PdB, si riporta in Figura 91 una sovrapposizione di queste ultime con gli ambiti di pericolosità definiti dal presente studio (rappresentati in colore nero), esclusa nuovamente l'analisi specifica del solo Fosso Tombone.

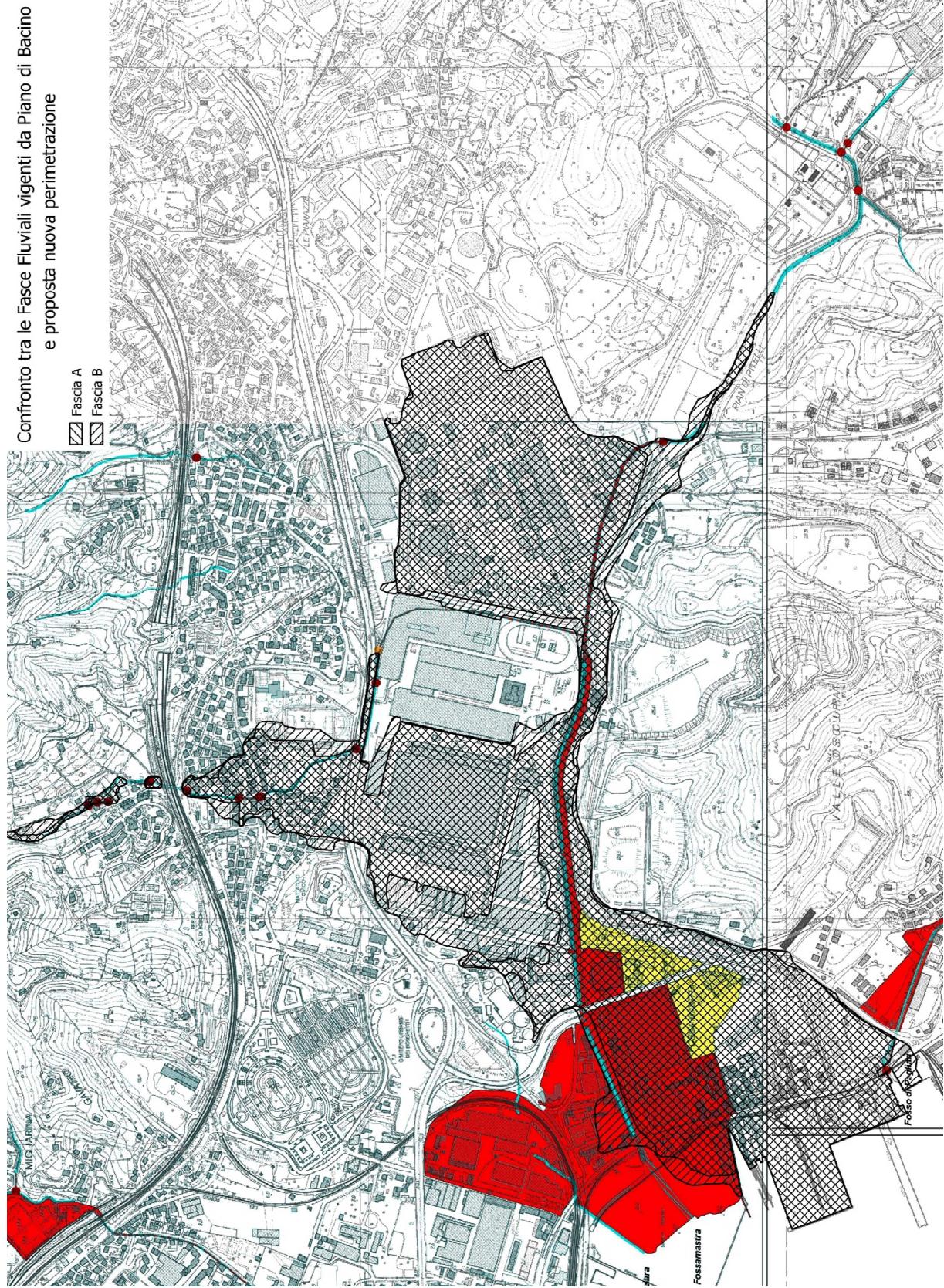


Figura 91 - Fasce A e B proposte dal presente studio a confronto con quelle vigenti da Piano di Bacino.

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 92.

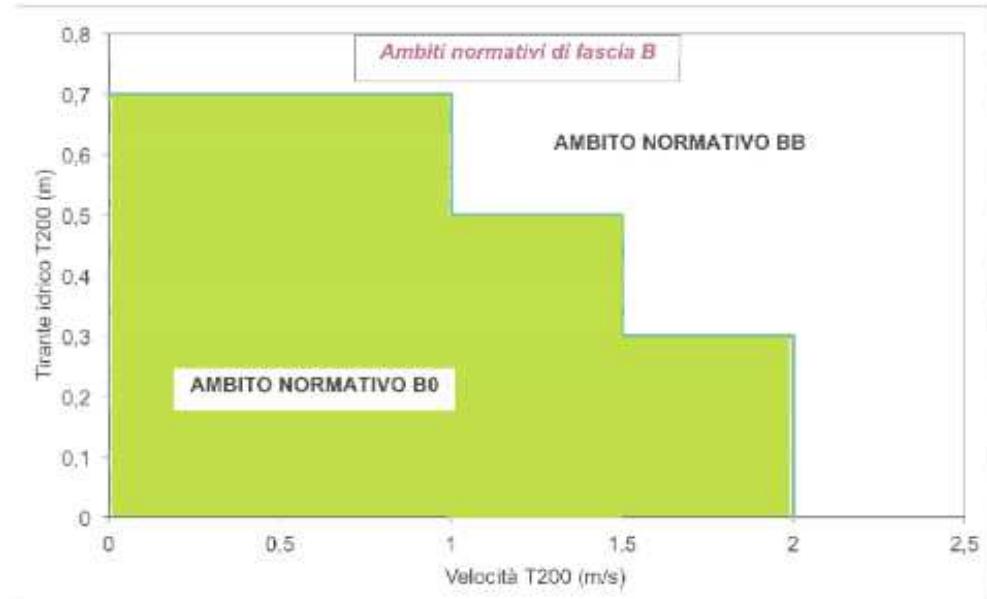


Figura 92 – Definizione delle fasce fluviali BB e B0 ai sensi della DGR 91/2013.

Gli ambiti "B0" e "BB" per l'area di studio del Canale Fossamastra sono rappresentati in Figura 93; le aree perimetrati in fascia B risultano prevalentemente associabili a un ambito B0 all'interno delle zone di propagazione indiretta (siti della centrale ENEL e dello stabilimento Leonardo), mentre sono associabili a un ambito BB lungo via Valdilocchi e nelle aree di espansione a monte di viale S.Bartolomeo.

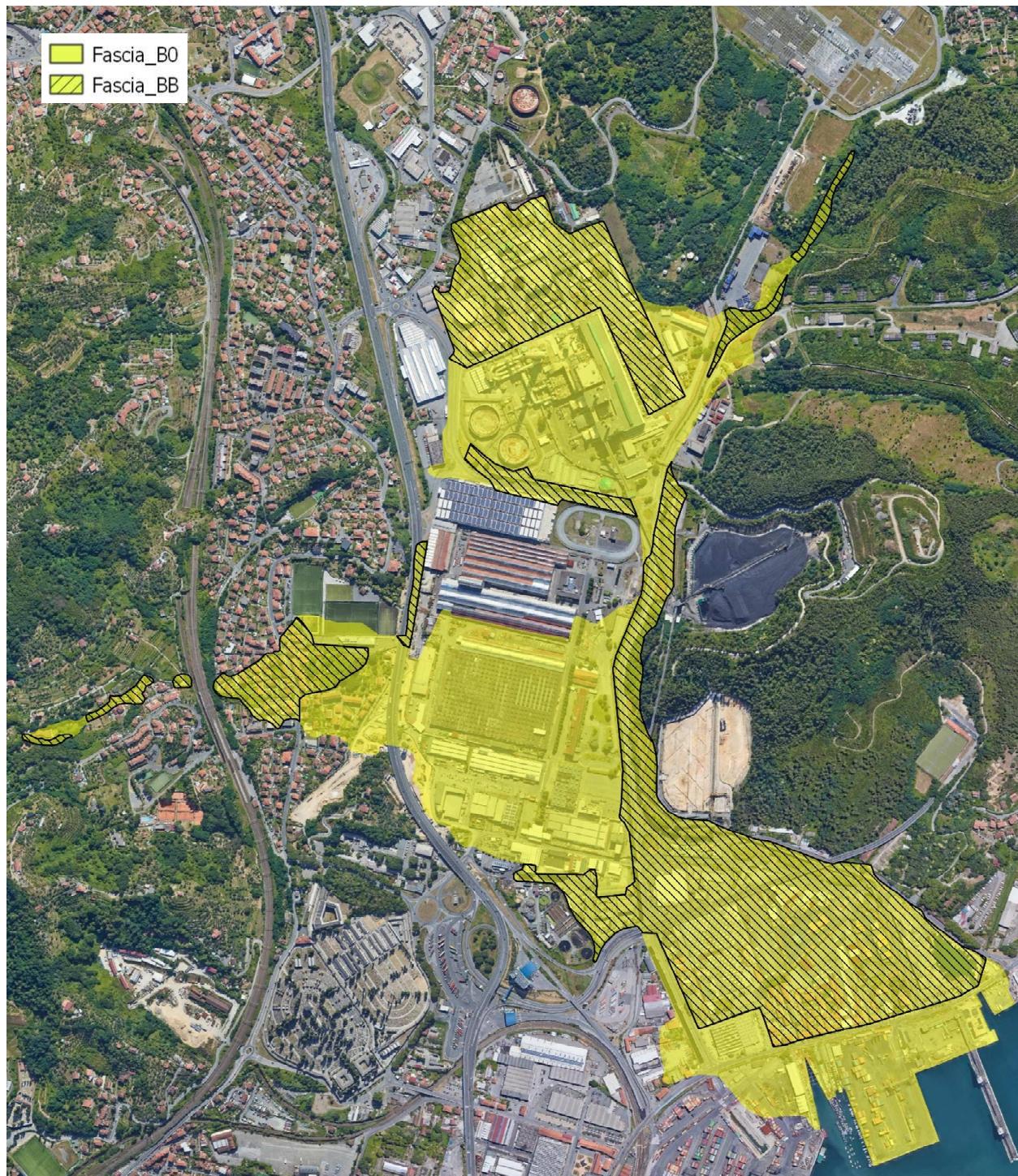


Figura 93 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B per il Canale Fossamastra.

Gli ambiti "B0" e "BB" derivanti dallo studio specifico del solo Fosso Tombone sono rappresentati in Figura 93; le aree perimetrate in fascia B risultano prevalentemente associabili a un ambito B0, in quanto gli allagamenti sono dovuti alla propagazione su un'ampia area dei volumi di esondazione, generalmente con tiranti idrici e velocità modeste. Solo nel tratto di monte si riscontra un'area associabile ad un ambito BB in relazione alle velocità più elevate lungo la strada e la rampa di accesso all'area ex ENEL, e alle altezze d'acqua rilevanti nell'area di espansione a Sud di via delle Pianazze.

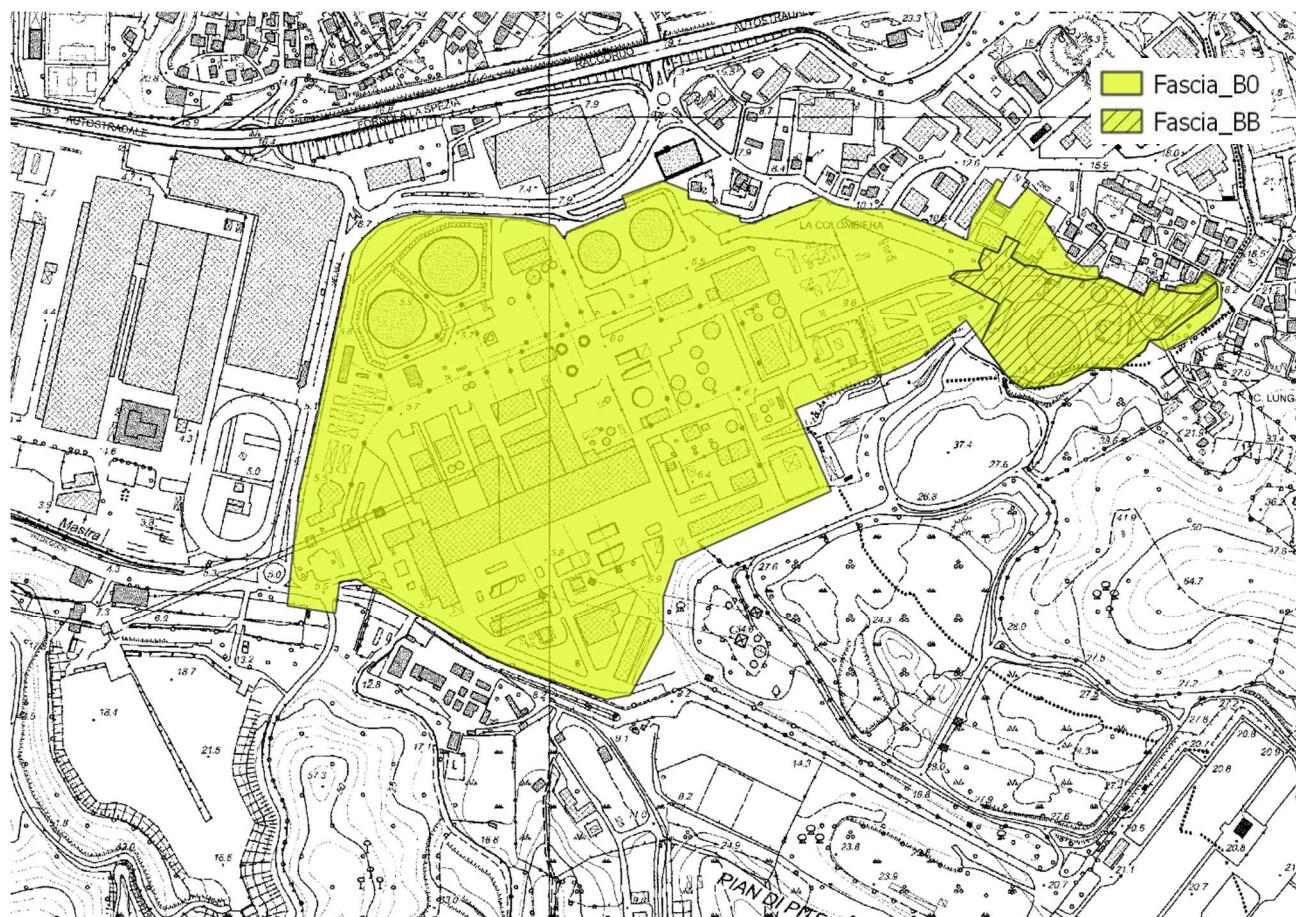


Figura 94 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B derivanti dallo studio del solo Fosso Tombone.

**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 (biforazioni 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 ( $m^2$ );

C = coefficiente di attrito di Chezy ( $m^{1/2}s^{-1}$ );

g = accelerazione di gravità ( $m s^{-2}$ );

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

Q = portata ( $m^3/s$ );

R = raggio idraulico (m);

$\alpha$  = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta ( $m^2/s$ ).

#### 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. APPROXIMAZIONE 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 contempi 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 $Q = A(Z_{j1} - Z_{j2})$

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 implicate 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 sovraccitati 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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

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;
- $V,Vx,Vy(x,y,t)$  = 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.

Le condizioni iniziale è rappresentata da una situazione di "quieta", 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**



