

Direzione Pianificazione generale e di bacino

# APPROFONDIMENTO IDRAULICO DEI PIANI DI BACINO DEI TORRENTI BISAGNO E CHIARAVAGNA



# Torrente Bisagno e Rio Fereggiano – Analisi idrologica e idraulica





2	2	8	0	0	5	0	3	-	0	1	-	0	0	2	0	2	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--

02	APRILE 2014	M.LOMAZZI	D.PERSI	D.PERSI	M.LOMAZZI
01	MARZO 2014	M.LOMAZZI	D.PERSI	D.PERSI	M.LOMAZZI
00	DICEMBRE 2013	M. LOMAZZI	D.PERSI	D.PERSI	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE





This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by DNV to comply with ISO 9001 (Quality Management)







## INDICE

1	Premessa	1
2	Schema degli assetti geometrici e rilievi integrativi	1
2.1	Schema degli assetti geometrici	
2.2	Rilievo 2013 - Sezioni e relazione fotografica	8
2.2.1	Torrente Bisagno e Rio Fereggiano – Planimetrie	9
2.2.2	Torrente Bisagno e Rio Fereggiano – Sezioni	11
3	Analisi idrologica	23
3.1	Premessa	23
3.2	Ricostruzione idrologica dell'evento del 4 novembre 2011	24
3.2.1	Ambito idrografico di riferimento	
3.2.2	Pluviometria: evento del 4 novembre 2011	25
3.2.3	Caratteristiche fisiografiche dei bacini	30
3.2.4	Tempi di corrivazione	31
3.2.5	Valutazione delle portate di piena	
3.2.6	Ricostruzione dell'evento del 4 novembre 2011	35
3.3	Idrogrammi per assegnato tempo di ritorno	39
3.3.1	Valutazione delle portate di piena	
3.3.2	Determinazione degli idrogrammi di assegnato tempo di ritorno	40
4	Analisi idraulica	42
4.1	Premessa	42
4.2	Analisi idraulica: approccio modellistico generale	
4.3	Ricostruzione idrodinamica dell'evento del 4 novembre 2011	44
4.3.1	Approccio modellistico	45
4.3.2	Dati e informazioni pregresse	46
4.3.3	Schematizzazione dell'alveo	
4.3.4	Messa a punto del setup bidimensionale	
4.3.5	Accoppiamento modelli 1D e 2D	
4.3.6	Risultati	
4.3.7	Analisi conclusiva	
4.4	Analisi dello stato attuale: verifiche idrauliche sul Torrente Bisagno e sul Rio Fereggiano	
4.4.1	Fonti informative aggiuntive rispetto al setup di calibrazione	
4.4.2	Variazioni di setup modellistico rispetto al modello di calibrazione	
4.4.3	Risultati	120
5	Comparazione con studi precedenti	146
5.1	Verifica idraulica Ponte Carrega (progr. 1355)	
5.2	Portate critiche	
5.2.1	Tratto Ponte Feritore – Ponte Monteverde	
5.2.2	Tratto Ponte Serra - Copertura di Brignole	149
6	Conclusioni	151





### **ALLEGATI**

### ALLEGATO A-Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo

#### **ALLEGATO B-MIKE 11 RR UHM**

Descrizione tecnica

#### **ALLEGATO C-MIKE 11 HD**

Descrizione tecnica

#### **ALLEGATO D-MIKE 21 HD**

Descrizione tecnica





#### 1 Premessa

Il presente elaborato descrive le attività, relative ai corsi d'acqua del T. Bisagno e del R. Fereggiano, necessarie a valutare l'adeguatezza dei contenuti del Piano di Bacino con specifico riguardo all'assetto del territorio in relazione all'evento alluvionale verificatosi il 4 novembre 2011.

La prima parte dell'elaborato riassume gli schemi geometrici adottati nel corso delle varie verifiche idrauliche e i rilievi topografici integrativi predisposti nel corso delle attività di studio.

Il Cap. 2 descrive le informazioni di base utilizzate per la costruzione dei modelli numerici mentre il Cap. 3 e il Cap. 4 descrivono, entrambi sia per l'evento 2011 sia per i differenti tempi di ritorno considerati (TR50, 200 e 500 anni), rispettivamente le analisi idrologiche svolte per il calcolo delle portate al colmo di piena e la determinazione degli idrogrammi di portata, e le attività relative alla simulazione idrodinamica della propagazione delle acque di piena in alveo e la loro successiva esondazione sul territorio urbano.

Sono infine presenti il Cap. 5 dedicato alle analisi conclusive e alcuni allegati con le risultanze delle simulazioni idrodinamiche, in termini di tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo, delle valutazioni in merito ai franchi idraulici in corrispondenza di attraversamenti e coperture oltre alla descrizione tecnica dei codici di calcolo utilizzati.

Il presente elaborato recepisce le richieste di integrazioni relative alla FASE 02 definita dal capitolato di affidamento.

### 2 Schema degli assetti geometrici e rilievi integrativi

### 2.1 Schema degli assetti geometrici

Il presente paragrafo è finalizzato alla descrizione delle informazioni di base utilizzate per la costruzione dei modelli numerici.

I dati geometrici di base derivano infatti da diverse fonti (rilievi a terra, LIDAR, etc) ed è stato necessario verificare l'uniformità e la congruenza delle singole informazioni.

Inoltre, l'indagine complessiva ha riguardato differenti scenari, sia idrologici, sia temporali (scenario evento e scenario attuale). In particolare, le seguenti tabelle riportano:

- le differenti geometrie adottate per ogni singolo scenario analizzato, in riferimento al Torrente Bisagno e al Rio Fereggiano: evento 2011 e scenario attuale (2013).
- l'origine del dato topografico (sezioni e geometrie delle strutture) inserito nel modello di simulazione numerica appositamente realizzato;
- le ipotesi assunte in caso di dati discordanti e gli aggiornamenti o modifiche apportate alle geometrie inserite.

1









TORRENTE BIS	SAGNO	SCENARIO EVENTO NOVEMBRE 2011				
Riferimento tratto	Riferimento codice sezioni	Descrizione origine dato o ipotesi di schematizzazione				
Aspetti generali		I dati di input per la definizione delle sezioni nel modello MIKE 11 del T.Bisagno provengono principalmente dalle seguenti tipologie di fonti:  modelli HEC-RAS consegnati dalla Provincia di Genova, ed in particolare, quello con Project "PdBBisagno" e Plan "Rev04.1" (geometria "04.1_giu_10_qdm") assunto come rappresentativo per l'evento 2011 (nel seguito tale modello è indicato con la dicitura "HEC Bisagno") e quello con Project "T.Bisagno - Verifiche-giu-2008" e Plan "Unione-m-v-att", relativo alla copertura di Brignole (nel seguito tale modello è indicato con la dicitura "HEC Copertura Brignole"). Il modello HEC Bisagno presenta moltissime sezioni interpolate, così da avere una distanza media tra le sezioni molto bassa (pochi m, di solito): tranne poche eccezioni, si sono mantenute solo le sezioni originali ed eliminato quelle interpolate. Ad eccezione dei primi 1.6 km circa del tratto in esame, le sezioni del modello HEC Bisagno non riportano la sommità dei muretti di sponda (presenti quasi con continuità in sinistra, saltuariamente anche in destra): si è deciso, previo agganciamento di tutte le sezioni al Lidar ministeriale, di aggiungere il top spondale nelle sezioni del modello. Tali sezioni saranno utilizzate come riferimento per la quota di sfioro delle connessioni 1D-2D.  Studio idraulico effettuato da HYDRODATA nell'ambito del progetto "Recupero funzionale della copertura nel tratto terminale del Torrente Bisagno, con miglioramento delle condizioni di deflusso e del riordino urbanistico e viabilistico di aree limitrofe da via Canevari al mare – 2° Lotto 2° Stralcio – Progetto definitivo" del 2011. Tale modello riporta la geometria aggiornata del 1° Lotto del rifacimento della copertura terminale, l'unico completato alla data odierna. Nel seguito tale modello è indicato con la dicitura "HYD Copertura Brignole".  Rilievo altimetrico Lidar ministeriale, fornito dalla Provincia di Genova (sistema di riferimento Gauss-Boaga, cell-size=1 m). In accordo con il committente, si sono considerati i valori altime				
Da inizio modello (poche decine di m a monte di P.Feritore) sino a circa 400 m a monte di P.Monteverde	Branch: Bisagno sezioni: 82-54	immagini satellitari, fotografie, video e informazioni varie dalla rete).  Sezioni HEC Bisagno coerenti con rilievo Lidar ministeriale. Già presenti le sommità dei muretti spondali.				
Da circa 400 m a monte P.Monteverde a circa 150 m a valle	Branch: Bisagno sezioni: 54-41	Innalzamento della quasi totalità delle sezioni HEC Bisagno di 0.2 m. Aggiunte sommità spondali in sinistra (0.9 m rispetto al piano strada).				
Da circa 100 m a monte della copertura di Staglieno all'imbocco copertura Marassi	Branch: Bisagno sezioni: 40-25	Innalzamento della quasi totalità delle sezioni HEC Bisagno di 1-1.2 m. Aggiunte sommità spondali discontinue in sinistra (0.6-0.9 m rispetto al piano strada) e destra (0-6-1.2 m).				
Da sbocco copertura Marassi a P.Serra	Branch: Bisagno sezioni: 24-19.1	Alcune correzioni di ridotta entità delle quote delle sezioni HEC Bisagno (-0.1 m). Aggiunte sommità spondali in sinistra (1 m rispetto al piano strada).				
Da P.Serra all'imbocco copertura Brignole	Branch: Bisagno sezioni: 19-0.98	Per la ricostruzione geometrica dell'alveo si sono utilizzate, oltre alle sezioni del modello HEC Bisagno e del Lidar, anche i dati rilevati nel "Rilievo 2013". Aggiunte sommità spondali in sinistra e destra, con eccezione del distributore IP, con altezza variabile tra 1 m e 1.5 m rispetto al piano strada. La documentazione fotografica ha consentito di discriminare nel dettaglio i tratti con presenza di muretti spondali e non, all'epoca dell'evento. Si è modellato il collasso del muretto in sponda destra tra i due distributori ERG e ENI a monte della copertura.				
Dall'imbocco copertura Brignole all'inizio del 1° Lotto (circa 950 m a valle)	Branch: Bisagno sezioni: 0.98-0.68	Utilizzate le sezioni del modello HEC Copertura Brignole.				
1°Lotto copertura Bisagno e sbocco a mare	Branch: Bisagno sezioni: Inizio 1°Lotto-11 foce	Utilizzate le sezioni del modello HYD Copertura Brignole.				
20 m terminali a monte della copertura Brignole in sponda sinistra	Branch: Bisagno sezioni: 1-0.9	Integrate nella batimetria le strutture interferenti col deflusso associate alla rampa che da Corso Galilei conduce alla sommità della copertura ferroviaria, ovvero: base di appoggio di inizio della rampa e due piloni di sostegno.				
Copertura ferroviaria (Batimetria 2D)	Branch: Bisagno sezioni: 0.9-0.97	Inseriti i varchi di via Canevari e Passaggio Borgo Incrociati in destra, via Archimede in sinistra. Corretta l'altimetria della copertura in corrispondenza del varco di Corso Sardegna: il sottopasso risultava, in corrispondenza dell'incrocio con via Tolemaide, allargarsi in maniera non corretta.				
Quote altimetriche via Barabino-via Pisacane e dintorni (Batimetria 2D)		Valori altimetrici corretti a seguito di analisi di dettaglio: sopralluogo, documentazione fotografica, etc.				









RIO FEREGGIAN	10	SCENARIO EVENTO NOVEMBRE 2011					
Riferimento tratto	Riferimento codice sezioni	Descrizione origine dato o ipotesi di schematizzazione					
Aspetti generali		I dati di input per la definizione delle sezioni nel modello MIKE 11 del Rio Fereggiano provengono principalmente dalle seguenti fonti:  - modelli HEC-RAS consegnati dalla Provincia di Genova e, in particolare, quello con Project "Fereggiano" e Plan "Plan 01" (geometria "Feregg Georif"), nel seguito indicato con la dicitura "HEC Fereggiano".  - Rilievo realizzato dal Raggruppamento nel 2013, indicato nel seguito come "Rilievo 2013": il rilievo integrativo, effettuato nell'ambito del presente incarico, è stato utilizzato come verifica di alcuni elementi geometrici.  - Progetto preliminare relativo al "Progetto di messa in sicurezza idraulica e di viabilità del Torrente Fereggiano compreso tra il civ.40 di via Fereggiano e via Ginestrato" redatto nel 2007 da ASTER. Tale fonte informativa contiene sia dati di rilievo sia di progetto. Nel seguito tale modello è indicato con la dicitura "ASTER".  - Rilievo altimetrico Lidar ministeriale, fornito dalla Provincia di Genova (sistema di riferimento Gauss-Boaga, cell-size=1 m).  Pur attingendo principalmente a queste fonti, sono comunque state prese in considerazioni altre fonti di dati per la comprensione e definizione della configurazione del torrente alla data dell'evento del Novembre 2011 e della dinamica dello stesso (ad esempio la relazione dei consulenti per la Procura della Repubblica, immagini satellitari, fotografie, video e informazioni varie dalla rete).					
Da inizio modello (circa 500 m a monte Viadotto Marassi) sino alla copertura di Largo Merlo	Branch: Fereggiano sezioni: 799.01-380	Sezioni HEC Fereggiano verificate con ulteriori dati ricavati nell'ambito dell'incarico attuale. Questo tratto è stato considerato solo al fine di una migliore modellazione dei tempi di traslazione dei volumi in alveo: dunque non sono stati inseriti elementi di dettaglio (quali attraversamenti, soglie di fondo, etc) ma si è schematizzata la sola geometria di alveo.					
Copertura Largo Merlo	Branch: Fereggiano sezioni: 380- 250	Geometria copertura da modelli ASTER e HEC Fereggiano.					
Tratto a pelo libero tra la copertura di Largo Merlo e quella terminale	Branch: Fereggiano sezioni: 250- 140	Geometria sezioni da modello HEC Fereggiano verificata con ulteriori dati ricavati dal "Rilievo 2013". Aggiunte, dove presenti alla data dell'evento, sommità spondali in sinistra (1 m rispetto al piano strada). Tenuto in conto, nel modello, del collasso dei muretti spondali in corso d'evento, tramite la definizione di strutture laterali a geometria variabile nel tempo. In particolare si sono schematizzati i cedimenti nei seguenti tratti:  - tra lo sbocco della copertura di Largo Merlo e la fermata dell'autobus Fereggiano 3/Moro (progressive 1588.91-1712.70);  - da pochi m a monte di B.C. Serramenti a circa 20 m a valle dello stesso (progressive 1771-1825.70);  - tratto di circa 15 m, con termine in corrispondenza della piccola costruzione in sponda sinistra (progressive 1903-1918.81)  Si evidenzia inoltre come il primo dei 3 ponti a valle di B.C. Serramenti non sia stato inserito nel set-up modellistico: da sopralluogo e da ulteriori dati fotografici reperiti sul web risulta che tale ponte non sia più presente almeno da maggio 2012. Si è dunque assunto che la struttura sia collassata nel corso dell'evento, per cui si è considerato di non inserirla nella schematizzazione del tratto.  Ad esclusione degli ultimi 100 m circa, si è posta scabrezza molto bassa in modo da tenere conto delle perdite di carico distribuite lungo il tratto non facilmente replicabili dalla sola geometria: ostruzioni in alveo (massi, pietre di grosse dimensioni, etc) e bruschi cambi di geometria.					
Copertura Terminale	Branch: Fereggiano sezioni: 130-0	Geometria copertura da HEC Fereggiano verificata con dati ulteriori ricavati per l'incarico attuale.					
A monte della copertura terminale (scabrezza 2D)	Brach: Fereggiano sezioni: 380- 120	La scabrezza nel tratto a cielo aperto del Fereggiano è stata posta a un valore basso per tenere in conto la ripidità dell'orografia e supplire alla mancanza di conservazione della quantità di moto tra 1D e 2D.					









TORRENTE BIS	SAGNO	SCENARIO STATO ATTUALE
Riferimento tratto	Riferimento codice sezioni	Descrizione origine dato o ipotesi di schematizzazione
Aspetti generali		Fonti informative aggiuntive rispetto alla schematizzazione dell'evento 2011:  - Rilievo realizzato dal Raggruppamento nel settembre 2013 per la commessa in oggetto, relativo a specifiche sezioni del corso d'acqua, nel seguito definito "Rilievo 2013";  - Rilievo a terra commissionato da ARPAL nel 2013 relativo all'alveo del Torrente Bisagno nel tratto da circa 1 km a monte della località Doria sino alla foce, ad esclusione della copertura terminale (nel seguito definito "Rilievo ARPAL"). Relativamente a tale rilievo, è stata effettuata un'analisi preventiva per verificarne la congruità col rilievo Lidar assunto come fonte più attendibile per la schematizzazione dell'altimetria per l'evento e le risultanze hanno condotto alla decisione, presa in accordo col Committente, di non integrare il rilievo all'interno del modello, ad esclusione di alcune sezioni che presentavano una buona consistenza col rilievo Lidar relativamente alle quote spondali. In particolare, si è verificata una discordanza delle quote spondali del rilievo con quelle del DTM, con scarti anche superiori a 1 m (sia in positivo sia in negativo). Si è deciso di ritenere più affidabile il grigliato Lidar per due ragioni principali:  o l'analogia delle quote di sponda destra e sinistra per la grande maggioranza delle sezioni trasversali del rilievo a terra, circostanza in contrasto con i valori del DTM Lidar e del rilievo utilizzato per lo studio dell'evento del novembre 2011; o in alcuni casi, variazioni repentine di quota spondale senza riscontro né nel DTM né nella realtà.
Tratti a pelo libero	Branch: Bisagno sezioni: 82-11 foce Branch: Fereggiano sezioni: 240-140	da mantenere un approccio conservativo della definizione delle aree allagabili: si è infatti assunto che i muretti non costituiscano una effettiva protezione in caso
Circa 130 m a monte di Ponte Carrega	Branch: Bisagno sezione: RiIARPAL_63	Inserita sezione n° 63 da "Rilievo ARPAL", a valle della verifica di sufficiente consistenza delle quote spondali con i valori del DTM Lidar.
Pochi metri a valle di Ponte Monteverde	Branch: Bisagno sezione: RiIARPAL_82	Inserita sezione n° 82 da "Rilievo ARPAL", a valle della verifica di sufficiente consistenza delle quote spondali con i valori del DTM Lidar.
Pochi metri a monte di Ponte Campanella	Branch: Bisagno sezione: RilARPAL_86	Inserita sezione n° 86 da "Rilievo ARPAL", a valle della verifica di sufficiente consistenza delle quote spondali con i valori del DTM Lidar.
Circa 35 m a valle di Ponte Campanella	Branch: Bisagno sezione: RilARPAL_88	Inserita sezione n° 88 da "Rilievo ARPAL", a valle della verifica di sufficiente consistenza delle quote spondali con i valori del DTM Lidar.
Imbocco copertura Marassi	Branch: Bisagno sezione: 25	Inserita sezione da "Rilievo 2013", con minimo processamento del dato.
Ponte S.Agata	Branch: Bisagno sezione: 4	Geometria del Ponte S.Agata, danneggiato, verificata con i dati del "Rilievo 2013".
Viale Brigate Partigiane a valle del palazzo della Questura (batimetria 2D)		Quote del rilievo Lidar verificate e corrette tramite sopralluogo e documentazione fotografica.
Ampiezza condizione di valle (modello 2D)		Ampliato verso ovest il tratto interessato dalla condizione al contorno di livello marino, a causa della maggiore estensione dell'area interessata dalle acque di esondazione rispetto all'evento 2011.

RIO FEREGG	IANO	SCENARIO STATO ATTUALE			
Riferimento tratto	Riferimento codice sezioni	Descrizione origine dato o ipotesi di schematizzazione			
Aspetti generali		Fonti informative aggiuntive rispetto alla schematizzazione dell'evento 2011:  - Rilievo realizzato dal Raggruppamento nel settembre 2013 per la commessa in oggetto, relativo a specifiche sezioni del corso d'acqua, nel seguito definito "Rilievo 2013".			
Primo ponte tra le due coperture del Rio Fereggiano	Branch: Fereggiano sezione: 190	Non inserito il primo dei tre attraversamenti in sequenza, in quanto assente dall'evento del novembre 2011.			
Alcune sezioni del tratto a pelo libero tra le due coperture	Branch: Fereggiano szioni: 250-150	Aggiornate le geometrie con il "Rilievo 2013"			





#### 2.2 Rilievo 2013 - Sezioni e relazione fotografica

Nei paragrafi seguenti sono riportati i prospetti delle sezioni topografiche rilevate appositamente per il presente studio. Il rilievo effettuato ha avuto come obiettivo principale l'integrazione del dato topografico dove l'informazione a disposizione non fosse stata ritenuta adeguata al dettaglio di rappresentazione necessario o dove la realizzazione di opere, la variazione di strutture esistenti o altri interventi progettuali hanno modificato le geometrie dell'alveo.

Le sezioni sono accompagnate da una documentazione fotografica raccolta durante le fasi di rilievo. Ogni singola sezione è numerata con il codice identificativo presente nel Piano di Bacino ed una sintetica descrizione caratterizzante l'ubicazione della stessa.

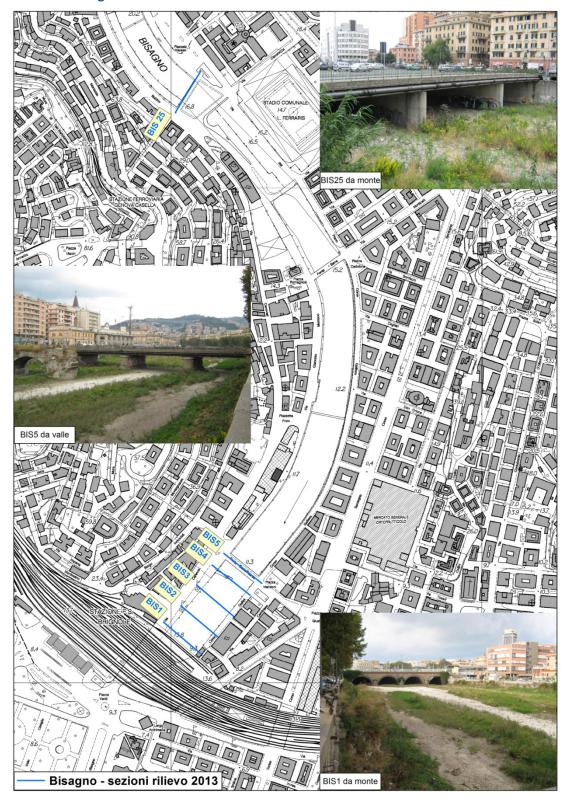
L'ubicazione delle sezioni è individuata tramite specifiche tavolette planimetriche.





### 2.2.1 Torrente Bisagno e Rio Fereggiano – Planimetrie

### 2.2.1.1 Torrente Bisagno

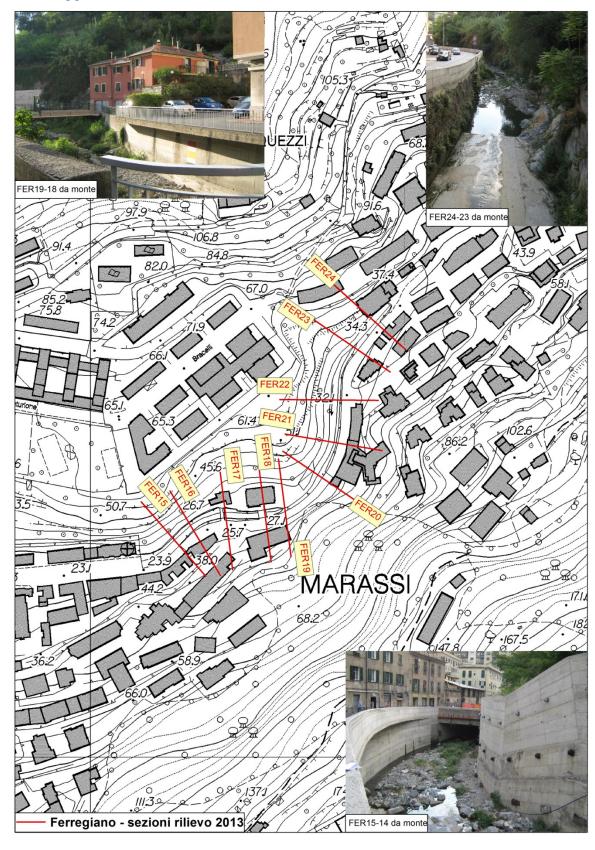


Planimetria da sezione BIS25 a sezione BIS1.





### 2.2.1.2 Rio Fereggiano



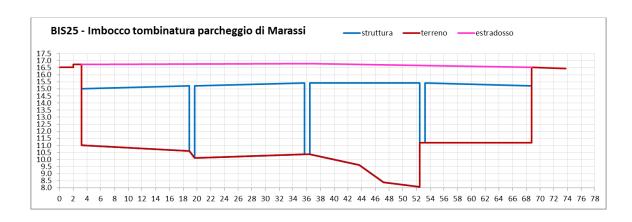
Planimetria da sezione FER24 a sezione FER15.





### 2.2.2 Torrente Bisagno e Rio Fereggiano – Sezioni

### 2.2.2.1 Torrente Bisagno

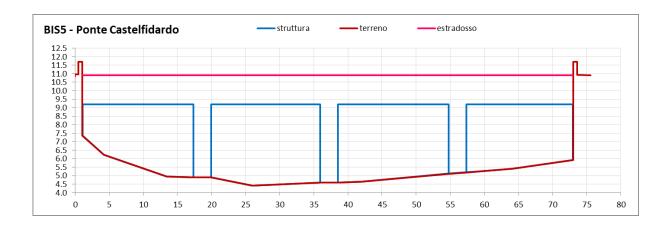




Sezione BIS25 – Imbocco tombinatura parcheggio di Marassi, vista da monte.









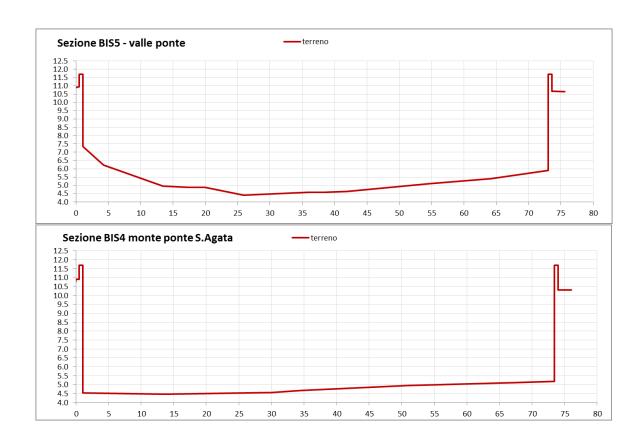
Sezione BIS5 - Ponte Castelfidardo vista da monte.





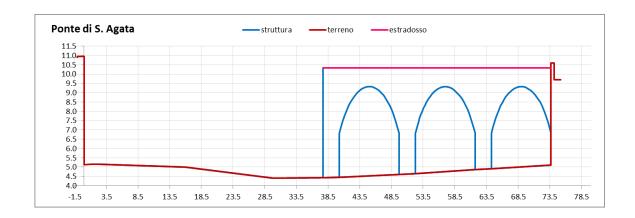


Sezione BIS5 - Ponte Castelfidardo vista da valle.



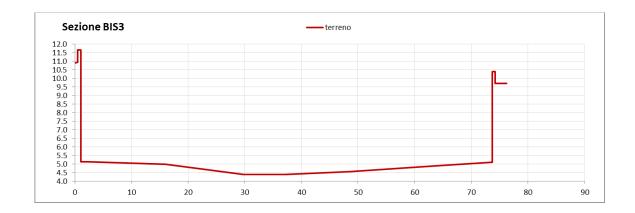






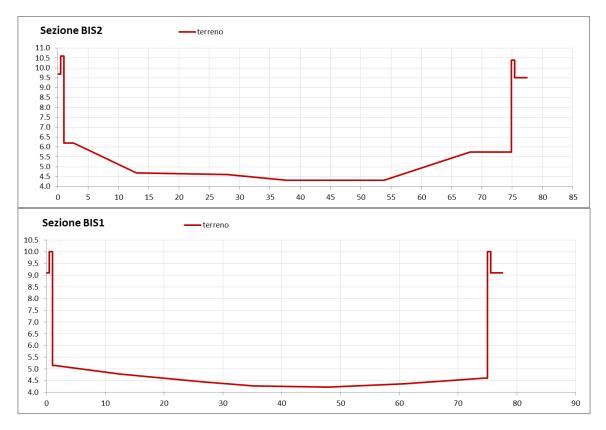


Sezione BIS4 - Ponte S. Agata vista dalla sponda sinistra.











Tra sezione BIS3 e BIS1 – vista della sponda destra.







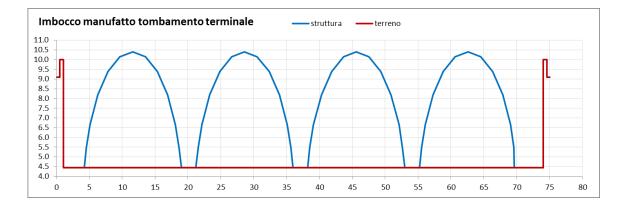
Vista del Bisagno nel tratto dal ponte Castelfidardo all'imbocco tombinatura di attraversamento area Brignole (tra Sez. BIS5 e BIS1).



Tratto terminale della sponda sinistra del Bisagno a monte tombinatura di attraversamento area Brignole.



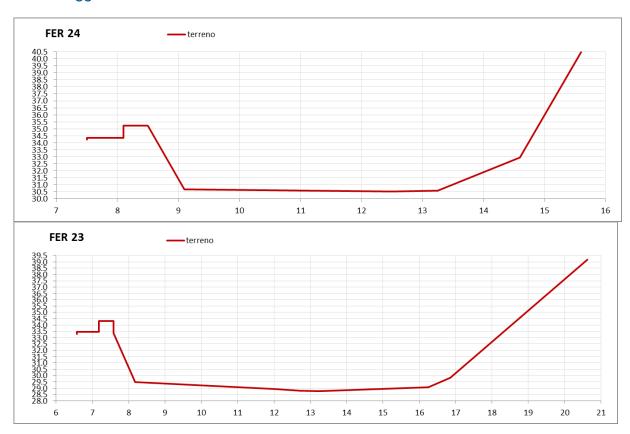








### 2.2.2.2 Rio Fereggiano

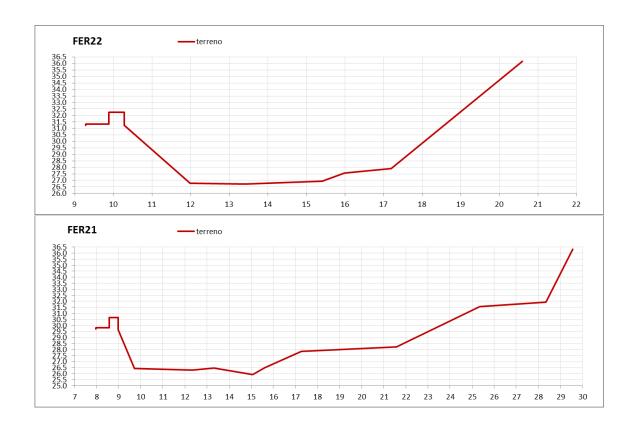




Ferregiano tratto a valle di largo Merlo tra le sezioni FER25 e 23, vista da monte.

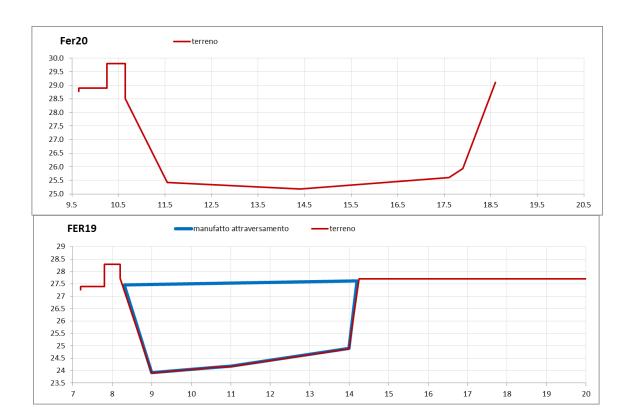










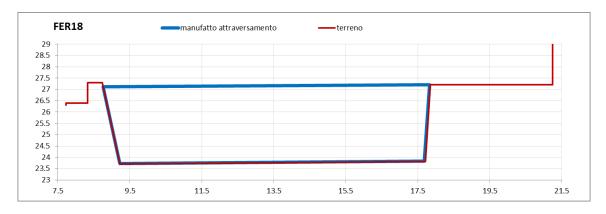




Ferregiano sezione FER19 vista da monte.





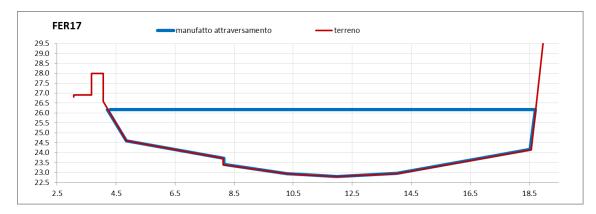


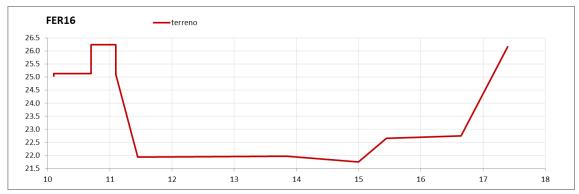


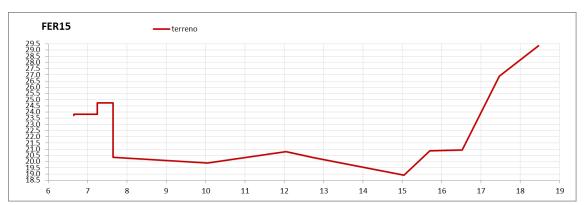
Ferregiano tratto tra i ponti FER19 e FER18 vista da monte.

















Ferregiano imbocco tombinatura terminale (sezioni FER15-14) prima della confluenza in Bisagno, vista da monte.

### 3 Analisi idrologica

#### 3.1 Premessa

Nel presente Cap. 3 sono riportate le analisi svolte per il calcolo delle portate al colmo di piena e la determinazione degli idrogrammi di portata, attività propedeutiche alla simulazione idrodinamica della propagazione delle acque di piena in alveo e la loro successiva esondazione sul territorio urbano (attività descritte nel Cap. 4).

Lo studio è stato basato sulla realizzazione di modelli numerici integrati, in grado di simulare sia la trasformazione afflussi-deflussi a partire dai dati di pioggia osservati sia la propagazione delle acque di piena nel contesto urbano.

Nei successivi paragrafi del presente capitolo sono descritte, con particolare riferimento ai dati di input utilizzati, alle ipotesi assunte ed ai risultati ottenuti, le seguenti attività:

- il Par. 3.2 descrive la ricostruzione dal punto di vista idrologico dell'evento di piena, accaduto sul bacino del Bisagno-Fereggiano il 4 novembre 2011, a partire dai dati di pioggia osservati dalla rete pluviometrica disponibile; l'analisi ha permesso di ricostruire il fenomeno in termini di durata, portata al colmo e volume complessivo;
- il Par. 3.3 riporta invece la ricostruzione degli idrogrammi di piena per differente tempo di ritorno (TR50, 200 e 500 anni) sul T. Bisagno e R. Fereggiano: l'analisi ha come scopo la sola ricostruzione degli idrogrammi di piena, mentre il valore di portata al colmo è assunto così come definito nell'attuale Piano di Bacino; non sono infatti oggetto dell'incarico elaborazioni dei dati pluviometrici e aggiornamento delle portata di progetto;





In particolare l'obiettivo della ricostruzione dell'evento osservato è principalmente legato alla calibrazione dei modelli numerici, al fine di poter utilizzare gli stessi nelle successive analisi dello stato attuale, nell'ambito dell'approfondimento e verifica del Piano di Bacino del T. Bisagno. Infatti le attività svolte in relazione all'evento pluviometrico avvenuto nel novembre 2011 hanno permesso di realizzare e calibrare un modello numerico utilizzato successivamente a supporto delle analisi idrologiche svolte per la determinazione degli idrogrammi di piena per differente tempo di ritorno (TR50, 200 e 500 anni).

#### 3.2 Ricostruzione idrologica dell'evento del 4 novembre 2011

La piena del 4.11.2011 è stato un evento di caratteristiche simili ad altri episodi alluvionali pregressi (1953, 1970, 1992, 1993) che hanno tratto comune origine da un assetto meteorologico ricorrente in Liguria, generato da un'area depressionaria di provenienza atlantica che subisce, nella sua traslazione verso est, un blocco anticiclonico. La contemporanea presenza sul Mediterraneo di correnti calde e umide innesca intense precipitazioni a contatto con i primi sollevamenti orografici dell'entroterra. I nuclei di precipitazione intensa presentano estensione limitata ed in particolare durante l'evento del 2011 è stato colpito il settore del Fereggiano e del tratto terminale del Bisagno.

Per l'analisi idrologica si è fatto riferimento a tutti i dati di osservazione disponibili, sia appartenenti alla rete ufficiale della Regione Liguria (OMIRL) sia a reti secondarie quali la rete LIMET (Associazione Ligure di Meteorologia) di cui in particolare fa parte il pluviometro di Quezzi, ubicato in posizione baricentrica rispetto al bacino del R.Fereggiano.

A partire da un'analisi pluviometrica classica delle precipitazioni eccezionali accadute nel novembre 2011, è stato messo a punto e tarato un modello idrologico basato sul codice di calcolo MIKE 11 UHM del DHI che ha consentito di ricostruire gli idrogrammi di piena degli eventi alluvionali in esame, utilizzati successivamente come input ai modelli idrodinamici applicati per la simulazione delle esondazioni ed allagamenti verificatisi.

Con lo stesso modello idrologico sono stati inoltre determinati gli idrogrammi con tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni impiegati per le verifiche idrauliche relative alle condizioni attuali degli alvei dei corsi d'acqua in esame.

Sono stati infine messi a punto ed applicati i modelli monodimensionali degli alvei nelle condizioni esistenti all'epoca dell'evento di piena del 2011 ai fini di una taratura preliminare degli idrogrammi di piena storici, propedeutica alla successiva simulazione e ricostruzione dell'evento stesso con modelli idrodinamici di tipo bidimensionale.

#### 3.2.1 Ambito idrografico di riferimento

Con riferimento alla corografia dei bacini in Figura 3.1, l'analisi idrologica ha riguardato i seguenti corsi d'acqua:

- rio Fereggiano, suddiviso in 3 sezioni idrografiche in chiusura del bacino di testata, del bacino sotteso dalla sezione di imbocco della tombinatura terminale e del bacino totale comprensivo del bacino urbano residuo in corrispondenza del tratto terminale tombato;
- fiume Bisagno, suddiviso in 4 sezioni idrografiche in chiusura del bacino sotteso dal ponte Feritore, dei bacini immediatamente a monte e a valle della confluenza con il rio Fereggiano e del bacino alla foce in mare;
- torrente Chiaravagna, oggetto anch'esso di indagine all'interno del presente incarico ma trattato separatamente.





#### 3.2.2 Pluviometria: evento del 4 novembre 2011

Dell'evento in esame sono stati reperiti i dati di misura delle stazioni della Regione Liguria ubicate all'interno o in prossimità del bacino idrografico del fiume Bisagno a passo orario (da sito web) relativi ai giorni 3, 4 e 5 novembre 2011 e inoltre anche alcune serie a passo 5 minuti.

Da entrambe le serie di misura sono state elaborate le altezze di precipitazione massima di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore nel corso dell'evento in esame che sono elencate nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1 Altezze massime di precipitazione nel corso dell'evento del 4 novembre 2011 (i valori evidenziati di Genova Gavette sono sottostimati in quanto presentano circa un'ora di dati mancanti).

Stazione	h 1 ora	h 3 ore	h 6 ore	h 12 ore	h 24 ore
misura	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
BARGAGLI (serie oraria)	27.6	57.2	89.6	127.0	138.0
BARGAGLI (serie 5 minuti)	32.0	62.6	92.2	128.0	139.4
GENOVA - CASTELLACCIO (RIGHI) (serie 1h)	34.0	49.0	74.6	113.4	147.2
GENOVA - CASTELLACCIO (RIGHI) (serie 5')	34.2	51.8	74.6	113.4	149.2
LA PRESA (serie oraria)	59.8	121.8	157.4	202.0	226.0
LA PRESA (serie 5 minuti)	59.8	134.4	158.4	205.0	229.4
CRETO (serie oraria)	64.2	162.2	240.6	267.0	322.8
CRETO (serie 5 minuti)	71.8	182.2	240.6	271.8	323.8
GENOVA - GAVETTE (serie oraria)	120.6	222.4	245.6	287.4	331.4
GENOVA - GAVETTE (serie 5 minuti)	124.2	230.4	277.6	305.4	366.4
DAVAGNA (serie oraria)	26.6	67.6	104.4	148.8	189.2
DAVAGNA (serie 5 minuti)	30.0	71.0	106.6	150.6	190.2
GENOVA - CENTRO FUNZIONALE (serie oraria)	55.4	105.0	134.6	163.6	213.0
GENOVA - CENTRO FUNZIONALE (serie 5')	55.8	106.0	134.8	167.8	217.8
GENOVA - PONTEDECIMO (serie oraria)	36.2	41.6	83.2	89.4	139.4
PREMANICO (serie oraria)	67.1	183.6	213.6	269.0	291.4
PREMANICO (serie 5 minuti)	88.6	195.8	214.6	269.8	294.6
VICOMORASSO (serie oraria)	168.8	329.4	385.4	409.8	466.0
VICOMORASSO (serie 5 minuti)	181.0	336.6	385.6	411.4	469.4
FONTANA FRESCA (serie oraria)	6.6	12.4	21.8	25.6	26.8
GENOVA - BOLZANETO (serie oraria)	21.2	31.0	54.2	66.8	111.2
QUEZZI (Rete LIMET)	166.2	353.8	464.4	503.6	>564.8
MARASSI (Rete LIMET)	128.0	304.2	412.8	445.8	>513.4
QUEZZI (Rete Comune Genova)	141.8	307.8	405.4	438.4	>503.0





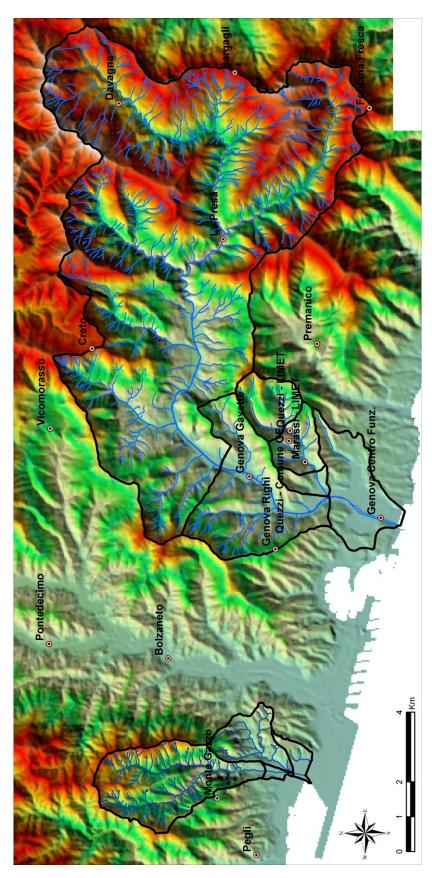


Figura 3.1 Corografia dei bacini idrografici di interesse con ubicazione delle stazioni pluviometriche considerate nello studio (pallini rosa).





Nella stessa tabella sono state inserite anche le altezze massime di precipitazione relative ai pluviometri di Quezzi e Marassi della rete LIMET (Associazione Ligure di Meteorologia) e al pluviometro di Quezzi della rete del Comune di Genova che non fanno parte della rete di monitoraggio ufficiale della Regione Liguria. I dati relativi a questi ultimi tre pluviometri sono stati tratti, a passo temporale 15 minuti, da un recente studio pregresso<sup>1</sup> che li ha pubblicati in seguito ad una validazione degli stessi condotta dall'Università di Genova.

Ai fini di un confronto, nella Tabella 3.2 sono riportate anche le altezze massime di precipitazione di durata 1÷24 ore registrate nel corso dell'anno 2011 estratte direttamente dal sito WEB della Regione Liguria.

Tabella 3.2 Altezze massime di precipitazione estratte dal sito WEB della Regione Liguria per il 2011.

Stazione misura	h 1 ora (mm)	h 3 ore (mm)	h 6 ore (mm)	h 12 ore (mm)	h 24 ore (mm)
BARGAGLI	56.6	92.4	110.2	128.0	156.0
GENOVA - CASTELLACCIO (RIGHI)	41.0	75.4	110.0	117.6	149.2
LA PRESA	75.6	134.4	158.4	205.0	229.4
CRETO	71.8	182.2	240.6	271.8	323.8
GENOVA - GAVETTE	124.2	230.4	277.6	305.4	366.4
DAVAGNA	50.8	75.2	106.6	150.6	190.2
GENOVA - CENTRO FUNZIONALE	55.8	106.0	134.8	167.8	217.8
GENOVA - PONTEDECIMO	39.2	66.8	104.0	106.2	145.4
VICOMORASSO	181.0	336.6	385.6	411.4	469.4
GENOVA - BOLZANETO	45.4	66.4	78.4	91.6	114.2
PREMANICO	88.6	195.8	214.6	269.8	294.6
FONTANA FRESCA	24.2	32.4	33.0	47.2	76.4

L'evento di precipitazione è stato confrontato con le curve di possibilità pluviometrica ottenute in base al Progetto VAPI<sup>2</sup>.

L'altezza di pioggia cumulata con periodo di ritorno T viene valutata in tale studio come:

$$h_{\scriptscriptstyle T} = m[h(d)] \cdot K_{\scriptscriptstyle T}$$

dove

è la media del massimo annuale dell'altezza di pioggia caduta di "d" ore consecutive:

$$m[h(d)] = a_1 \cdot d^n$$

e KT è il coefficiente di crescita della distribuzione generalizzata del valore estremo (GEV) pari a:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Procura della Repubblica presso il Tribunale di Genova: "Procedimento penale 38335/2011/44 - Relazione di consulenza tecnica" – A.Bellini, M.Masetti, A.Siviglia, M.Tubino – luglio 2012.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> CNR – Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche – Progetto VAPI Valutazione delle piene in Italia: "Rapporto sulla valutazione dell piene – Italia Nord Occidentale" – Estratto dal Rapporto Nazionale VAPI con aggiornamenti. A cura di Carlo De Michele e Renzo Rosso. Unità operativa 1.8 – Milano 2001.





$$K_{T} = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left( 1 - e^{-ky_{T}} \right)$$

dove Y<sub>T</sub> indica la variabile ridotta di Gumbel, pari a:

$$y_T = -ln \left( ln \frac{T}{T-1} \right)$$

e i valori dei parametri di forma k, di scala  $\,^{\alpha}$  e di posizione  $\,^{\epsilon}$ , nonché i parametri a1 e n sono quelli riportati nella tabella seguente per i siti dove sono localizzate le stazioni pluviometriche più rappresentative per lo studio in esame.

Tabella 3.3 Parametri della formula VAPI.

STAZIONE	BACINO	3	α	k	a <sub>1</sub>	n
Madonna della Guardia	Polcevera	0.767	0.301	-0.167	48.7	0.399
Crocetta D'orero	Polcevera	0.804	0.313	-0.049	40.3	0.387
Genova Castellaccio	Polcevera-Bisagno	0.781	0.356	-0.036	47.6	0.341
Genova Università	Polcevera-Bisagno	0.756	0.315	-0.170	49.5	0.340
Viganego	Bisagno	0.832	0.253	-0.082	43.5	0.401
S.Eusebio	Bisagno	0.775	0.286	-0.178	36.7	0.398
Pontecarrega	Bisagno	0.752	0.334	-0.145	47.1	0.379
Genova S.I.	Bisagno	0.802	0.269	-0.138	46.4	0.335

Nella Figura 3.2 è riportato il confronto tra le curve di possibilità pluviometrica del Progetto VAPI (che non include i dati degli eventi pluviometrici degli anni più recenti) ottenute con i parametri relativi alla stazione di Genova Università (le più critiche per durate di precipitazione di 1-3 ore) e le altezze massime di precipitazione di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore registrate alle stazioni di Quezzi, Vicomorasso e Genova Gavette nel corso dell'evento alluvionale del 4 novembre 2011.

In base a tale confronto è possibile effettuare una prima valutazione della gravosità dell'evento in esame che presenterebbe tempi medi di ritorno compresi tra 100 e 1000 anni, differenziati in funzione della zona e della durata continuativa di precipitazione considerate.

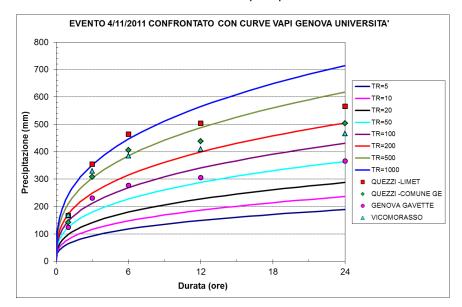


Figura 3.2 Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica del Progetto VAPI e le altezze massime di precipitazione di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore registrate alle stazioni di Quezzi, Vicomorasso e Genova Gavette nel corso dell'evento alluvionale del 4 novembre 2011.





Un ulteriore confronto deriva dalle analisi condotte nell'ambito del "Progetto Europeo RESMAR" in cui i parametri a1 e n del progetto VAPI sono stati ricalcolati sui dati di precipitazione recenti, raccolti negli anni compresi tra il 2001 e il 2011 (vedi Tabella 3.4).

Tabella 3.4 Parametri a1 e n della formula VAPI determinati sul periodo 2001-2011.

STAZIONE	BACINO	a <sub>1</sub>	n
Crocetta D'orero	Polcevera	46.0	0.433
Genova Castellaccio	Polcevera-Bisagno	51.5	0.259
Genova Università	Polcevera-Bisagno	48.6	0.248
Viganego	Bisagno	50.1	0.387

Nella Figura 3.3 è riportato il confronto tra le curve recenti di possibilità pluviometrica del Progetto VAPI (anni 2001-2011) ottenute con i parametri relativi alla stazione di Genova Università come in precedenza e le altezze massime di precipitazione registrate alle stazioni di Quezzi, Vicomorasso e Genova Gavette.

In base a tale confronto, che conferma sostanzialmente il precedente ma che è penalizzato dal fatto di essere relativo ad un periodo storico assai più breve di quello del primo studio VAPI, l'evento in esame presenterebbe tempi medi di ritorno maggiori di 200 anni per durate di precipitazione pari e superiori alle 3 ore.

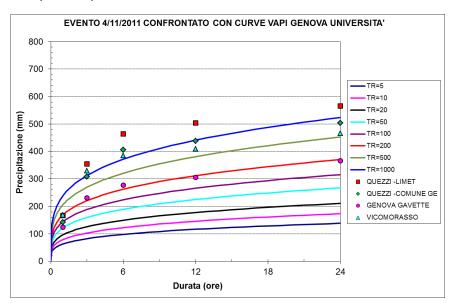


Figura 3.3 Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica del Progetto VAPI (periodo 2001-2011) e le altezze massime di precipitazione di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore registrate alle stazioni di Quezzi, Vicomorasso e Genova Gavette nel corso dell'evento alluvionale del 4 novembre 2011.

Politecnico di Milano – Contratto di ricerca tra Regione Liguria e Politecnico di Milano, DIIAR-CIMI in tema di Caratterizzazione pluviometrica e metodologie di valutazione delle portate di piena per bacini idrografici minori liguri, nell'ambito delle metodologie di regionalizzazione, ivi compresi indirizzi tecnici per la corretta strumentazione pluvio-idrometrica di bacini di piccola estensione - Relazione finale – Milano 2012.





#### 3.2.3 Caratteristiche fisiografiche dei bacini

Lo studio delle principali caratteristiche morfologiche e fisiografiche dei bacini in esame è stato effettuato sulle cartografie in scala 1:10.000 disponibili e sul DTM regionale a maglia 40 m. I parametri morfologici ricercati sono: la superficie del bacino (S); la lunghezza (L) e la pendenza (i) dell'asta principale; la quota massima (Hmax), minima (Hmin) e media (Hmed) del bacino; la pendenza dei versanti (y).

La tipologia dei bacini in termini di copertura vegetale e di tipo ed uso del suolo, è stata definita attraverso l'analisi delle carte tecniche regionali in scala 1:10.000 sopra citate nonché mediante osservazioni dirette nel corso dei sopralluoghi effettuati.

Nella Figura 3.1 è riportata una corografia di tutti i bacini idrografici considerati nello studio con ubicazione delle stazioni pluviometriche utilizzate; nella Figura 3.4 sono invece rappresentati in maggiore dettaglio i bacini relativi al rio Fereggiano.

Nella Tabella 3.5 sono indicati i valori delle principali caratteristiche morfologiche e fisiografiche dei bacini in esame.

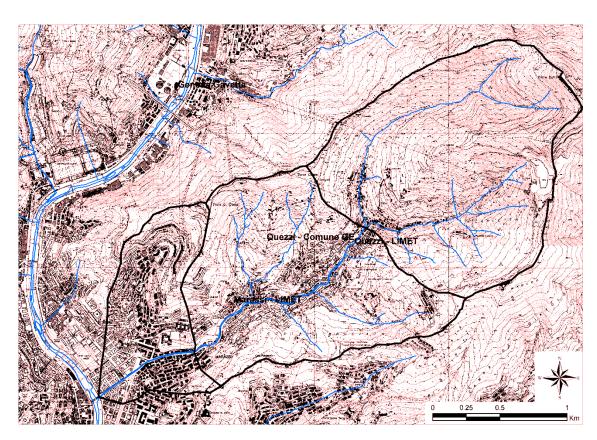


Figura 3.4 Corografia dei bacini idrografici del rio Fereggiano con ubicazione delle stazioni pluviometriche considerate nello studio.





Tabella 3.5 Caratteristiche fisiografiche dei corsi d'acqua in esame alle sezioni di interesse.

DACINO	s	Hmax	Hmed	Hmin	L	i	у
BACINO	(km²)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(km)	(%)	(%)
Fereggiano-1	2,487	565	292	82	2,408	13,7	48
Fereggiano-2	4,484	565	231	22	4,180	6,7	43
Fereggiano-3	5,337	565	209	12	4,984	4,6	41
Bisagno-ponte Feritore	74,620	1033	449	37	17,960	2,0	46
<b>B</b> isagno-monte Fereggiano	84,360	1033	417	8	21,800	1,8	45
<b>ß</b> isagno-valle Fereggiano	89,700	1033	404	8	21,800	1,8	45
<b>⊮</b> isagno-foce	94,800	1033	385	0	24,000	1,6	43

е

dove:

S superficie del bacino in km<sup>2</sup>;

Hmax quota massima del bacino;

Hmed quota media del bacino;

Hmin quota minima del bacino;

L lunghezza d'asta in km;

pendenza percentuale dell'asta fluviale;

y pendenza percentuale dei versanti.

#### 3.2.4 Tempi di corrivazione

La determinazione del valore del tempo di corrivazione per i bacini in esame è stata effettuata avvalendosi delle seguenti formule: Giandotti, Pezzoli, Ventura, Pasini e S.C.S.. Questi metodi necessitano, come dati di input, dei valori delle caratteristiche morfologiche, fisiografiche ed altimetriche dei bacini sopra definite. Vengono di seguito esposte le formule di calcolo del tempo di corrivazione espresso in ore, per ognuno dei metodi adottati.

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_{med} - H_{min}}}$$

Formula di Giandotti:

$$t_c = 0.055 \cdot \frac{L}{\sqrt{i}}$$

Formula di Pezzoli:

$$t_c = 0.1272 \cdot \sqrt{\frac{S}{i}}$$

Formula di Ventura:

$$t_c = 0.108 \cdot \frac{\sqrt[3]{S \cdot L}}{\sqrt{i}}$$

Formula di Pasini:





Formula S.C.S.:

$$t_c = 0.57 \cdot \frac{L^{0.8} \cdot (S' + 1)^{0.7}}{\sqrt{y}}$$

dove il parametro  $S^{'}$  rappresenta la massima ritenzione del bacino, funzione del tipo e del grado di saturazione del terreno e dell'uso del suolo, la cui espressione risulta:

$$S' = \frac{1000}{CN} - 10$$

CN è il "Runoff Curve Number", coefficiente sperimentale che tiene conto delle caratteristiche del bacino classificate secondo i criteri stabiliti dal U.S. Soil Conservation Service (Department of Agricolture).

Il valore di CN si ricava con riferimento ai dati riportati nelle Tabella 3.6 e Tabella 3.7 assegnando le seguenti condizioni: classe di appartenenza del suolo, tipo di copertura, destinazione d'uso del suolo e condizioni idrologiche.

Le classi di appartenenza del suolo nel metodo S.C.S. sono:

- A. Suoli ad alta permeabilità, costituiti da sabbie grossolane, silt calcarei non consolidati ed omogenei.
- B. Suoli a moderata permeabilità, costituiti da sabbie limose ed argillose.
- C. Suoli a medio-bassa permeabilità, costituiti da argille e limi, con contenuti organici.
- D. Suoli a bassa permeabilità, costituiti da argille plastiche, con livello piezometrico permanentemente alto.

La classificazione del tipo di copertura del complesso è condotta attraverso la stima di 3 fattori: la destinazione d'uso del suolo, il tipo di utilizzo e la condizione idrologica del suolo. Essi sono riassunti nella Tabella 3.6. Il contenuto d'acqua del suolo in condizioni naturali ha un effetto significativo sia sul volume d'acqua in gioco sia sul deflusso superficiale. Sono distinte tre condizioni:

- · Condizione I : suoli asciutti.
- · Condizione II : suoli in condizioni medie.
- Condizione III: suoli saturi.

I valori di CN ottenuti dalla Tabella 3.6 sono relativi a suoli in condizione II. Se si considerano differenti condizioni si può far riferimento alla Tabella 3.7. Nel caso in esame, sono stati assunti valori medi di CN pari a 80 per tutti i bacini.

Nella Tabella 3.8 vengono riportati i valori dei tempi di corrivazione ricavati in funzione dei parametri caratteristici delle grandezze morfologiche considerate e quelli assunti nelle successive valutazioni, ottenuti mediando i valori forniti dai vari metodi che si ritengono maggiormente affidabili nei vari casi in esame.





Tabella 3.6 Valori del coefficiente CN (Rif. Mc Cuen - S.C.S. Method).

# Runoff Curve Numbers for Hydrologic Soil-Cover Complexes (Antecedent Moisture Condition II, and I<sub>a</sub> \* 0.2 S)

Land Use Des	scription/Treatment/		ndition	~	ologic (	Soil Gr	<u>oup</u>
Residential:				<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>
Average lot	t size	Average	Impervious				
1/8 acre or	less 65			77	85	90	92
1/4 acre	38			61	75	83	87
1/3 acre	30			57	72	81	86
1/2 acre	25			54	70	80	85
1 acre	20			51	68	79	84
Paved parking	g lots, roofs, drivewa	avs, etc.		98	98	98	98
Streets and ro		•					
paved with	curbs and storm se	wers		98	98	98	98
gravel				76	85	89	91
dirt				72	82	87	89
	and business area (8	35% impervious	;)	89	92	94	94
	ricts (72% imperviou		·)	81	88	91	93
	, lawns, parks, golf		teries etc	01	00	0.	00
	n: grass cover on 75			39	61	74	80
-	grass cover on 50%			49	69	7 <del>9</del>	84
Fallow	Straight row	0 10 70 70 01 1110		77	86	91	94
Row crops	Straight row	Poor	72	81	88	91	J-T
Now Crops	Straight row	Good	12	67	78	85	89
	Contoured	Poor	70	79	84	88	09
	Contoured	Good	65	75 75	82	86	
				75 66			00
	Contoured & tel		Poor		74 71	80 70	82
0	Contoured & te		Good	62	71	78	81
Small grain	Straight row	Poor	65	76 75	84	88	
	Good	5	63	75 74	83	87	
	Contoured	Poor	63	74	82	85	
	Good	61	75	81	84		
	Contoured & ter	rraced	Poor	61	72	79	82
	Good	_	59	70	78	81	
	ed Straight row	Poor	66	77	85	89	
_	Straight row	Good	58	72	81	85	
or	Contoured		Poor	64	75	83	85
rotation	Contoured		Good	55	69	78	83
meadow	Contoured & terra		Poor	63	73	80	83
	Contoured & te	rraced	Good	51	67	76	80
Pasture		Poor	68	79	86	89	
or range		Fair	49	69	79	84	
		Good		39	61	74	80
	Contoured		Poor	47	67	81	88
	Contoured		Fair	6	35	70	79
Meadow		Good	30	58	71	78	
Woods or		Poor	45	66	77	83	
Forest land		Fair	36	60	73	79	
		Good	25	55	70	77	
Farmsteads			59	74	82	86	





Tabella 3.7 Confronto fra i valori di CN nelle diverse condizioni idrologiche (Mc Cuen - SCS Method).

CN FOR	CORRESPONDING (	CN FOR CONDITION
CONDITION II	1	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Tabella 3.8 Tempi di corrivazione secondo le diverse formulazioni (espressi in ore).

DENOMINAZIONE	GIANDOTTI	S.C.S.	VENTURA	PEZZOLI	PASINI	t <sub>C</sub> assunto
Fereggiano-1	0,86	0,58	0,54	0,36	0,53	0,70
Fereggiano-2	1,27	0,88	1,04	0,89	1,11	1,00
Fereggiano-3	1,49	0,95	1,37	1,28	1,50	1,20
Bisagno-ponte Feritore	3,79	2,79	7,77	6,98	8,42	3,50
Bisagno-monte Fereggiano	4,29	3,38	8,71	8,94	9,86	4,00
Bisagno-valle Fereggiano	4,43	3,30	8,98	8,94	10,07	4,00
Bisagno-foce	4,77	3,45	9,79	10,44	11,23	4,30

# 3.2.5 Valutazione delle portate di piena

Per supportare la stima del tempo di ritorno degli eventi in esame, utilizzando le curve di possibilità pluviometrica del VAPI precedentemente definite per la stazione di Genova Università assunta come riferimento ed i valori stimati dei tempi di corrivazione, sono state valutate, in funzione di assegnati tempi di ritorno, le portata di piena potenziali.

A tale scopo è stato utilizzato il noto metodo idrologico dell'espressione razionale. Tale metodo di correlazione afflussi-deflussi, per il calcolo della portata di piena, utilizza la formula di Turazza:

$$Q = \frac{c \cdot h \cdot S}{3.6 \cdot t_c} \qquad (m^3/s)$$

dove:





- S = superficie del bacino (km<sup>2</sup>);
- c = coefficiente di deflusso del bacino;
- h = altezza massima di precipitazione per una durata pari al tempo di corrivazione (mm), determinata mediante curva di possibilità climatica;
- $t_C$  = tempo di corrivazione del bacino (ore).

Nella Tabella 3.9 sono riassunti i risultati ottenuti con l'applicazione di tale metodo, adottando un coefficiente medio di deflusso pari a 0,75 per tutti i bacini. Nella stessa tabella, ai fini di confronto, sono riportati inoltre i contributi specifici della curva maggiorante del Cati e le corrispondenti portate di piena risultanti dalla loro applicazione e infine anche le portate con tempo di ritorno 200 anni desunte dal rispettivo Piano di Bacino della Provincia di Genova.

Tabella 3.9 Risultati del metodo razionale confrontati con i valori della curva maggiorante del Cati (Q-Cati) e le portate con TR=200 anni dei Piani di Bacino della Provincia (Q200-P.b.).

DENOMINAZIONE	QTR10	QTR20	QTR50	QTR100	QTR200	QTR500	q-Cati	Q-Cati	Q200-P.b.
BACINO	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/skm²)	(m³/s)	(m³/s)
Fereggiano-1	52,6	64,0	81,1	95,9	112,4	137,3	36	89,5	67
Fereggiano-2	74,9	91,2	115,6	136,6	160,1	195,7	34	152,5	
Fereggiano-3	79,0	96,3	122,0	144,1	168,9	206,5	32	170,8	139
Bisagno-ponte Feritore	545,2	664,2	841,6	994,2	1165,3	1424,4			1104
Bisagno-monte	564,3	687,5	871,2	1029,1	1206,3	1474,5			1213
Fereggiano									
Bisagno-valle	600,1	731,1	926,3	1094.3	1282.6	1567,9			1289
Fereggiano	220, .	, .	120,0	, .	3_,0	, .			.=00
Bisagno-foce	604,6	736,6	933,3	1102,6	1292,4	1579,8			1301

#### 3.2.6 Ricostruzione dell'evento del 4 novembre 2011

Per la determinazione degli idrogrammi di piena dell'evento del 4 novembre 2011 per il Fereggiano/Bisagno, da utilizzare come condizioni al contorno in ingresso ai modelli idrodinamici, è stato messo a punto un modello idrologico afflussi-deflussi che implementa il metodo dell'idrogramma unitario, mediante il codice di calcolo MIKE 11 – UHM del DHI (di cui è disponibile una descrizione tecnica nell'Allegato B).

Le ipotesi base per la messa a punto del modello, basato sul metodo dell'idrogramma unitario adimensionale del metodo SCS, sono riassunte nel seguito (vedi Tabella 3.10):

- · è stata ipotizzata una portata iniziale di base costante;
- le perdite idrologiche iniziali sono state calcolate con il metodo SCS a partire dai valori di CN
  e AMC indicati; in particolare i valori di CN sono stati inizialmente calcolati come media dei
  valori areali desunti analiticamente dalla carta di uso del suolo Corine (vedi Figura 3.5) e
  successivamente modificati nella fase di taratura del modello mentre i valori di AMC sono
  stati assunti pari a 2 per il Bisagno e pari a 1 per il Fereggiano;
- il "lag time" è stato calcolato inizialmente con il metodo SCS in funzione di CN, della lunghezza dell'asta e della pendenza dei versanti e successivamente è stato opportunamente tarato in funzione dei tempi di arrivo dei colmi osservati nel corso dell'evento; i valori assunti per i parametri AMC e Lag time derivano da un processo mirato di taratura che ha avuto lo scopo di riprodurre in maniera accurata idrogrammi di piena, impiegati in input nel modello 2D, in grado di fornire risultati in termini di tiranti idrici,





esondazioni e timing dell'evento considerato del tutto corrispondenti a quelli osservati in campo.

 la precipitazione è stata assegnata a passo 15 minuti sul Fereggiano e a passo orario per il Bisagno, distribuita sul territorio con il metodo dei topoieti relativi alle stazioni indicate nella Tabella 3.1, opportunamente corretti in base alla presenza degli spartiacque principali; in particolare per i bacini del Fereggiano sono stati utilizzati i dati di misura dei pluviometri di Quezzi LIMET, Quezzi Comune di Genova e Marassi LIMET (vedi Figura 3.6).

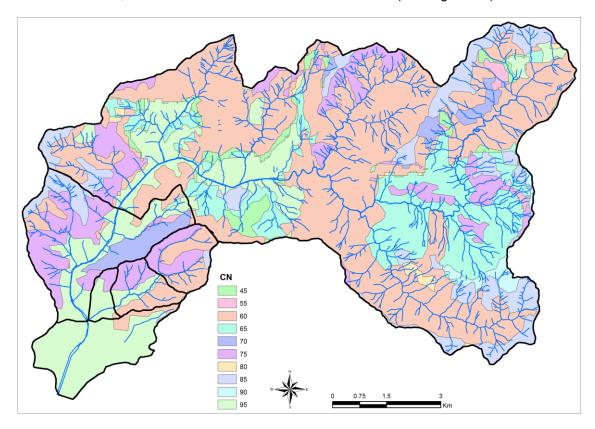


Figura 3.5 Mappatura dei valori CN desunta dalla carta di uso del suolo.





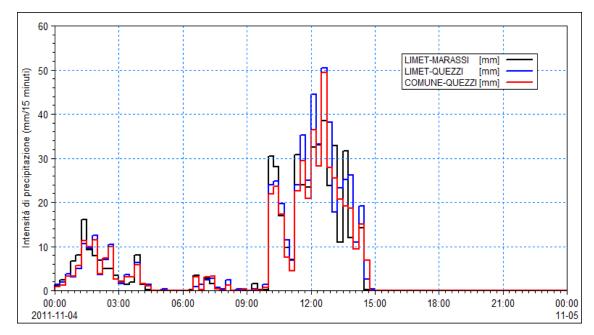


Figura 3.6 letogrammi delle precipitazioni osservate ai pluviometri di Quezzi-LIMET, Quezzi Comune e Marassi-LIMET.

Nella Tabella 3.10, oltre ai parametri di input del modello, sono riportati anche i valori delle portate al colmo calcolate.

Tabella 3.10 Parametri del modello idrologico e portata massima al colmo calcolata.

DENOMINAZIONE BACINO	S (km²)	Qiniz (m³/s)	CN	AMC	Lag time (ore)	QMAX (m³/s)
Fereggiano-1	2,487	1,0	67	1	0,30	80
Fereggiano-2	4,484	1,0	70	1	0,40	144
Fereggiano-3	5,340	1,0	73	1	0,50	171
Bisagno-ponte Feritore	74,62	10,0	79	2	1,25	618
Bisagno-monte Fereggiano	84,25	10,0	79	2	1,70	708

Nella Figura 3.7 sono rappresentati graficamente gli idrogrammi di portata relativi al rio Fereggiano calcolati con il modello idrologico in funzione delle precipitazioni registrate ai due pluviometri di Quezzi e a quello di Marassi; la stessa figura riporta inoltre la pioggia netta inserita in input al modello idrologico, determinata a partire dai dati dei pluviometri sopra citati. Nella Figura 3.8 sono invece riprodotti gli idrogrammi di portata calcolati per il Bisagno al ponte Feritore e in corrispondenza della sezione a monte della confluenza con il Fereggiano.





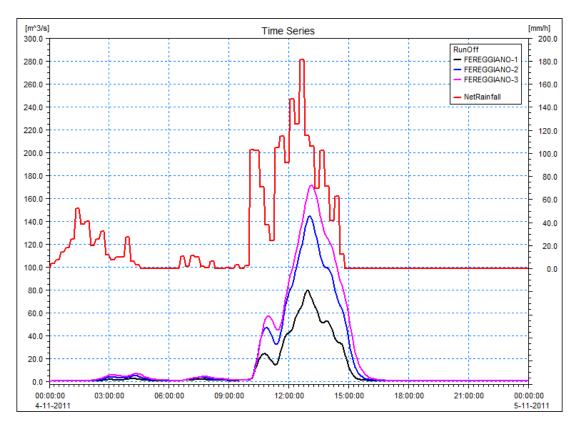


Figura 3.7 Idrogrammi di portata relativi al rio Fereggiano calcolati con il modello idrologico in funzione delle precipitazioni a passo 15 minuti osservate ai pluviometri di Quezzi e Marassi.

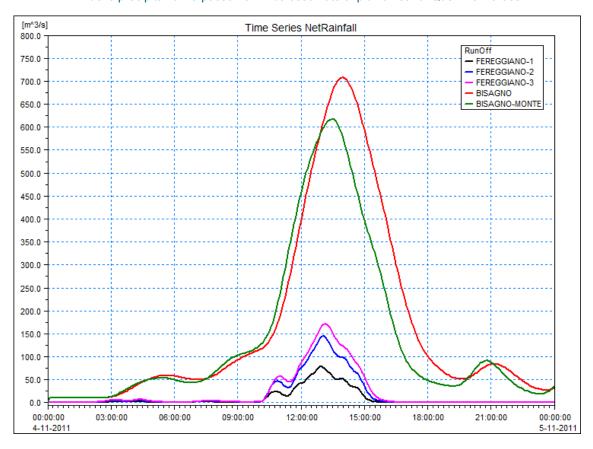


Figura 3.8 Idrogrammi di portata relativi al fiume Bisagno confrontati con quelli relativi al rio Fereggiano calcolati con il modello idrologico.





Nella Tabella 3.11 è riportato il confronto tra i valori delle portate al colmo degli idrogrammi di piena dell'evento del 4 novembre 2011, calcolati con il modello idrologico nel presente studio e quelli corrispondenti definiti nella relazione della Procura della Repubblica<sup>4</sup>, oltre la stima del tempo di ritorno di tale evento in base al confronto con le portate al colmo di progetto pubblicati sul Piano di Bacino: le portate al colmo del presente studio risultano del tutto congruenti con quelle della relazione della Procura, confermando che sul Fereggiano il tempo di ritorno dell'evento è stato compreso tra i 200 e i 500 anni mentre per il Bisagno è risultato di gran lunga inferiore, compreso tra 20 e 50 anni.

Tabella 3.11 Portate massime al colmo dell'evento di piena del novembre 2011.

DENOMINAZIONE BACINO	S (km²)	Qmax-2011 (m³/s)	TR (anni)	Q-PROCURA-2011 (m³/s)
Fereggiano-1	2,487	79,9	200÷500	119
Fereggiano-2	4,484	144,4	200÷500	138
Fereggiano-3	5,337	171,4	200÷500	176
Bisagno-ponte Feritore	74,62	617.8	20÷50	=
Bisagno-monte Fereggiano	84,36	708,1	20÷50	700

# 3.3 Idrogrammi per assegnato tempo di ritorno

Nel seguito si illustrano gli idrogrammi sintetici per tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni. Tali idrogrammi costituiscono l'input di portata delle verifiche idrauliche relative sia alle condizioni attuali che alle condizioni di progetto degli alvei dei corsi d'acqua in esame: Fereggiano e Bisagno.

L'analisi idrologica ha fornito le serie temporali di portata associate a diversi porzioni per ognuno dei bacini considerati, nello specifico:

- Rio Fereggiano, suddiviso in 3 sezioni idrografiche in chiusura del bacino di testata, del bacino sotteso dalla sezione di imbocco della tombinatura terminale e del bacino totale comprensivo del bacino urbano residuo in corrispondenza del tratto terminale tombato;
- Torrente Bisagno, suddiviso in 4 sezioni idrografiche in chiusura del bacino sotteso dal ponte Feritore, dei bacini immediatamente a monte e a valle della confluenza con il rio Fereggiano e del bacino alla foce in mare;

Per la corografia di dettaglio e la descrizione delle caratteristiche fisiografiche dei bacini in esame si rimanda al precedente Par. 3.2.

# 3.3.1 Valutazione delle portate di piena

La prima operazione per la definizione degli idrogrammi ha riguardato la stima delle portata di piena potenziali per assegnato tempo di ritorno, utilizzando le curve di possibilità pluviometrica del VAPI precedentemente definite per la stazione di Genova Università assunta come riferimento ed i valori stimati dei tempi di corrivazione (vd. Par. 3.2.5).

A tale scopo è stato utilizzato il noto metodo idrologico dell'espressione razionale. Tale metodo di correlazione afflussi-deflussi, per il calcolo della portata di piena, utilizza la formula di Turazza:

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Procura della Repubblica presso il Tribunale di Genova: "Procedimento penale 38335/2011/44 - Relazione di consulenza tecnica" – A.Bellini, M.Masetti, A.Siviglia, M.Tubino – luglio 2012.





$$Q = \frac{c \cdot h \cdot S}{3.6 \cdot t_c} \qquad (m^3/s)$$

dove:

S = superficie del bacino (km<sup>2</sup>);

c = coefficiente medio di deflusso del bacino;

h = altezza massima di precipitazione per una durata pari al tempo di corrivazione (mm), determinata mediante curva di possibilità climatica;

t<sub>C</sub> = tempo di corrivazione del bacino (ore).

Nella Tabella 3.12 sono riassunti i risultati ottenuti con l'applicazione di tale metodo, adottando un coefficiente medio di deflusso pari a 0,75 per tutti i bacini. Nella stessa tabella, ai fini di confronto, sono riportati inoltre i contributi specifici della curva maggiorante del Cati e le corrispondenti portate di piena risultanti dalla loro applicazione e infine anche le portate con tempo di ritorno 200 anni desunte dal rispettivo Piano di Bacino della Provincia di Genova.

Tabella 3.12 Risultati del metodo razionale confrontati con i valori della curva maggiorante del Cati (Q-Cati) e le portate con TR=200 anni dei Piani di Bacino della Provincia (Q200-P.b.).

DENOMINAZIONE BACINO	QTR10 (m³/s)	QTR20 (m³/s)	QTR50 (m <sup>3</sup> /s)	QTR100 (m³/s)	QTR200 (m³/s)	QTR500 (m <sup>3</sup> /s)	q-Cati (m³/skm²)	Q-Cati (m³/s)	Q200-P.b. (m <sup>3</sup> /s)
Fereggiano-1	52,6	64,0	81,1	95,9	112,4	137,3	36	89,5	67
Fereggiano-2	74,9	91,2	115,6	136,6	160,1	195,7	34	152,5	
Fereggiano-3	79,0	96,3	122,0	144,1	168,9	206,5	32	170,8	139
Bisagno-ponte Feritore	545,2	664,2	841,6	994,2	1165,3	1424,4			1104
Bisagno-monte Fereggiano	564,3	687,5	871,2	1029,1	1206,3	1474,5			1213
Bisagno-valle Fereggiano	600,1	731,1	926,3	1094,3	1282,6	1567,9			1289
Bisagno-foce	604,6	736,6	933,3	1102,6	1292,4	1579,8			1301

#### 3.3.2 Determinazione degli idrogrammi di assegnato tempo di ritorno

Per la determinazione degli idrogrammi con tempo di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni è stato applicato il modello idrologico afflussi-deflussi già impiegato per la ricostruzione dell'evento di piena del novembre 2011 sul Fereggiano/Bisagno (vd. Par. 3.2.6).

Mantenuti validi i valori <u>ufficiali</u> delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno definiti nel rispettivo Piano di Bacino della Provincia di Genova e i valori dei parametri fisiografici dei bacini precedentemente definiti, per successive approssimazioni sono stati individuati i volumi di pioggia necessari ad ottenere, con il modello, idrogrammi di piena sintetici caratterizzati dai noti valori al colmo. Per ogni tempo di ritorno e per ogni bacino è stato pertanto definito un evento di precipitazione di durata pari al suo tempo di corrivazione ed intensità costante nel tempo.

Nella Tabella 3.13 oltre ai parametri di input del modello, sono riportati anche i valori delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno calcolate. Nella Figura 3.9 sono rappresentati graficamente gli idrogrammi di portata di assegnato tempo di ritorno TR relativi al rio Fereggiano calcolati con il modello idrologico, mentre nella Figura 3.10 sono riportati quelli analoghi determinati per il torrente Bisagno.





Tabella 3.13 Parametri del modello idrologico, altezze di precipitazione in input e portate massime al colmo di assegnato tempo di ritorno calcolate.

DENOMINAZIONE	S	Qiniz	CN	AMC	Tc	h-TR50	h-TR200	h-TR500	Q-TR50	Q-TR200	Q-TR500
BACINO	(km²)	$(m^3/s)$			(ore)	(mm)	(mm)	(mm)	$(m^3/s)$	(m³/s)	(m³/s)
Fereggiano-1	2,487	1,0	67	3	0,70	84,5	118,8	150,3	41	67	92
Fereggiano-2	4,484	1,0	70	3	1,00	98,6	143,5	185,2	72	118	162
Fereggiano-3	5,337	1,0	73	3	1,20	107,6	161,5	212,4	84	139	191
Bisagno-ponte Feritore	74,62	10,0	69	3	3,50	165,4	251,5	333,1	671	1104	1515
Bisagno-monte Fereggiano	84,36	10,0	68	3	4,00	180,0	275,9	365,7	737	1213	1664
Bisagno-valle Fereggiano	89,70	10,0	69	3	4,00	180,0	275,9	365,7	783	1289	1768
Bisagno-foce	94,80	10,0	71	3	4,30	185,8	288,2	385,2	790	1301	1785

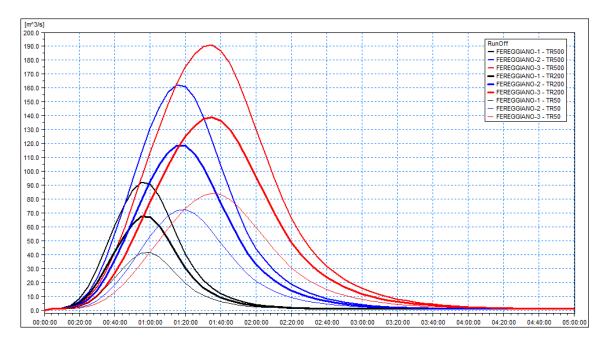


Figura 3.9 Idrogrammi di assegnato tempo di ritorno TR relativi al torrente Fereggiano calcolati con il modello idrologico.





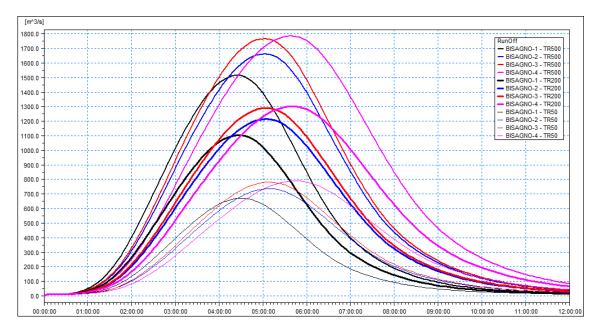


Figura 3.10 Idrogrammi di assegnato tempo di ritorno TR relativi al fiume Bisagno calcolati con il modello idrologico.

# 4 Analisi idraulica

# 4.1 Premessa

A seguito delle attività svolte per il calcolo delle portate al colmo di piena e la determinazione degli idrogrammi di portata, descritte nel precedente Cap. 3, nel presente capitolo sono descritte le attività relative alla simulazione idrodinamica della propagazione delle acque di piena in alveo e la loro successiva esondazione sul territorio urbano.

Lo studio è stato basato sulla realizzazione di modelli numerici integrati, in grado di simulare la trasformazione afflussi-deflussi a partire dai dati di pioggia osservati e la propagazione delle acque di piena nel contesto urbano, con uno schema di calcolo bidimensionale di elevato dettaglio.

Il Par. 4.3 descrive le attività svolte per la ricostruzione idrodinamica dell'evento di piena accaduto sul bacino del Bisagno-Fereggiano il 4 novembre 2011, analisi finalizzata al corretto benchmarking del modello numerico.

Le analisi hanno utilizzato, quali informazioni di base, i dati raccolti nella fase iniziale del lavoro in relazione alle geometrie del territorio (alveo e aree urbane) così come presenti al tempo dell'evento oggetto di studio. Tali informazioni sono reperibili nel Cap. 2 del presente elaborato che riporta la descrizione degli assetti geometrici di studio (differenti per ogni singolo scenario) e i rilievi appositamente effettuati nell'ambito dell'incarico. A tal riguardo è opportuno indicare che durante la fase di lavoro è emersa la disponibilità di un nuovo rilievo eseguito da ARPA Liguria sull'intero tratto di Bisagno oggetto di studio: si è pertanto proceduto ad una verifica puntuale di tale rilievo ed ad un confronto con le informazioni topografiche disponibili, al fine di utilizzare, anche solo parzialmente, il nuovo rilievo come fonte integrativa delle geometrie d'alveo, ove necessario.





All'interno del Par. 4.3 è descritta, con particolare riferimento ai dati di input utilizzati, alle ipotesi assunte ed ai risultati ottenuti, l'analisi idraulica dell'evento del 4 novembre 2011 in cui, attraverso la realizzazione di un modello numerico di simulazione e utilizzando gli idrogrammi di portata ricostruiti nell'analisi idrologica, è stato possibile ricostruire l'impatto dell'evento sull'area del Fereggiano e sul tratto terminale del Bisagno, ricostruendo l'estensione degli allagamenti effettivamente registrati.

L'obiettivo della ricostruzione dell'evento osservato è principalmente legato alla calibrazione dei modelli numerici, al fine di poter utilizzare gli stessi nelle successive analisi dello stato attuale, nell'ambito dell'approfondimento e verifica del Piano di Bacino del T. Bisagno.

Il successivo Par. 4.4 descrive le attività svolte con la finalità di aggiornamento delle aree allagabili per differente tempo di ritorno definite nel vigente Piano di Bacino per il torrente Bisagno ed il rio Fereggiano.

Prendendo quindi spunto dai risultati ottenuti nella fase di calibrazione, a partire dagli idrogrammi di portata per differente tempo di ritorno (TR50, 200 e 500 anni) determinati nell'analisi idrologica, sono stati utilizzati i modelli numerici calibrati per la simulazione, sui corsi d'acqua oggetto di studio, degli eventi di progetto. L'obiettivo finale di questa attività è la determinazione delle aree allagabili nelle condizioni attuali, quale aggiornamento delle informazioni riportate nel Piano di Bacino a seguito di una serie di interventi progettuali su Bisagno e Fereggiano.

Ad integrazione del quadro conoscitivo ricostruito sul torrente Bisagno e di quanto previsto dall'incarico, si è infine proceduto all'applicazione della Normativa di Ambito al fine di ricostruire la cartografia di classificazione della pericolosità idraulica basata sui valori massimi di tirante e velocità, sfruttando in questo modo i risultati di dettaglio forniti dalla modellazione bidimensionale utilizzata.

Nei vari paragrafi sono descritte in dettaglio le attività completate, con particolare riferimento ai dati di input utilizzati, alle ipotesi assunte ed ai risultati ottenuti.

Completano il presente capitolo i seguenti elaborati cartografici che, per il bacino del Bisagno-Fereggiano, riportano:

- 22800503-01-00400 (tavole da 5 a 8):
  - o carta dei sottobacini e del reticolo idrografico;
  - o carta delle aree inondate osservate e degli allagamenti simulati per l'evento 2011;
  - o carta dei tiranti simulati;
  - o carta delle velocità simulate.
- 22800503-01-00600 (tavole da 9 a 24): carta delle aree allagabili nelle condizioni attuali per il torrente Bisagno e rio Fereggiano;
- 22800503-01-00800: carta degli ambiti normativi del torrente Bisagno.

Le risultanze dello studio in termini di tabelle numeriche e shape file, nonché i file dei modelli numerici sono archiviati in specifici elaborati, rispettivamente il 22800503-01-00900 e il 22800503-01-00500.

# 4.2 Analisi idraulica: approccio modellistico generale

Sui tratti studiati è stato messo a punto un modello idrodinamico basato sul codice di calcolo MIKE FLOOD del Danish Hydraulic Institute. Tale modello combina dinamicamente l'approccio





monodimensionale e quello bidimensionale. Gli alvei dei corsi d'acqua sono stati modellati con approccio monodimensionale attraverso l'inserimento delle sezioni trasversali disponibili, comprensive delle geometrie dei ponti interferenti con il deflusso di piena.

Gli alvei sono stati poi collegati dinamicamente alle aree laterali inondabili, sia in sponda destra che in sponda sinistra, mediante speciali funzioni di MIKE FLOOD, nel rispetto delle reali quote di sponda. La modellazione accurata della dinamica di piena, effettuata con approccio bidimensionale, è stata estesa all'intera zona in esame, sia in sponda destra che in sponda sinistra, rappresentata mediante un modello del terreno a celle quadrate, contenente gli edifici e tutte le strutture in grado di avere effetto nella propagazione della piena stessa sul territorio.

Per quanto concerne le modellazioni in alveo, i risultati delle simulazioni condotte sono forniti sotto forma di profili longitudinali di livello e tabelle contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione. Relativamente alle aree inondate, invece, i risultati ottenuti sono forniti sotto forma di mappe di tiranti idrici e velocità di scorrimento riferite ai loro valori massimi e a diversi momenti della piena.

Il codice di calcolo MIKE FLOOD è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE 11 e quello bidimensionale MIKE 21 (per una descrizione sintetica dei quali si rimanda agli allegati C e D).

Il modulo consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE 11 e di MIKE 21, 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: MIKE 11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi non coperti da un DTM (modello digitale del terreno) e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo ecc., MIKE 21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso coperte da un DTM.

MIKE FLOOD presenta le seguenti caratteristiche principali:

- MIKE 11 e MIKE 21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto, nell'interfaccia grafica e nell'input-output;
- una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci di MIKE 11 e MIKE 21 per gli scambi di flusso e la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

#### 4.3 Ricostruzione idrodinamica dell'evento del 4 novembre 2011

L'evento del 4 novembre 2011 ha interessato un'ampia parte della città di Genova, in particolare le zone del Centro, Val Bisagno e Levante. I danno sono stati causati da differenti tipologie di dinamiche, schematizzabili in esondazioni vere e proprie (es. Bisagno, Fereggiano, Sturla), fuoriuscite da corsi d'acqua prevalentemente tombinati o per cedimento della struttura (es. Rovare) o per entrata in pressione della stessa (es. Noce, Puggia), allagamenti dovuti all'insufficienza della rete di drenaggio e non collegabili al reticolo idrografico.

Una delle zone più colpite dall'evento è risultata essere l'asta terminale del Bisagno e l'area al di sopra della copertura di Brignole, con esondazioni localizzate in particolare subito a monte della copertura ferroviaria sia in sponda destra sia in sinistra. Il Rio Fereggiano, contribuente in sinistra orografica del Torrente Bisagno, è risultato particolarmente colpito dall'evento, con tempi di ritorno della forzante precipitativa stimati superiori a 200 anni.

Il presente Capitolo descrive l'attività di modellazione idraulica bidimensionale relativa ai tratti del Torrente Bisagno e Rio Fereggiano colpite dall'evento. Lo studio modellistico è finalizzato all'analisi delle caratteristiche esondative dei due corsi d'acqua durante l'evento del novembre 2011 con conseguente confronto con le evidenze e le testimonianze disponibili: tale attività è effettuata allo scopo di calibrare il setup modellistico, ovvero tarare i vari parametri idraulici e verificare le scelte modellistiche, in modo da ottenere un modello affidabile per seguenti simulazioni con forzanti a diversa frequenza (tempo di ritorno pari a 50, 200, 500 anni).





Come accennato, si sono considerati in un unico modello i tratti del Torrente Bisagno e del Rio Fereggiano: tale scelta è conseguenza del fatto che l'evento ha interessato entrambi i bacini e gli effetti al suolo sono stati determinati dalla reciproca influenza del deflusso nei due corsi d'acqua.

I limiti spaziali di studio, come illustrato nel dettaglio in seguito, includono, per il Torrente Bisagno, il tratto a valle di Ponte Feritore e per il Rio Fereggiano il tratto a valle della tombinatura di Largo Merlo. La scelta del dominio di analisi è frutto di diverse considerazioni. Innanzitutto si sono considerate le zone che sono state caratterizzate da allagamento, o per sormonto spondale o per traslazione delle acque esondate a monte. Si è inoltre valutata la finalità dello studio anche dal punto di vista dell'aggiornamento del Piano di Bacino, soprattutto per quanto riguarda il Torrente Bisagno: si è dunque ritenuto di includere un'area piuttosto vasta, comprendente l'intera zona urbanizzata a valle della località Molassana, e iniziare il tratto in sezioni che non risultassero critiche per il tempo di ritorno duecentennale secondo il Piano di Bacino vigente.

Si è inoltre scelto di schematizzare le aree esterne all'alveo tramite un modello digitale del terreno (DTM) con dimensione di cella pari a 3x3 m. Originariamente la proposta per tale studio prevedeva una dimensione maggiore, pari a 5x5 m, ma si è optato per una rappresentazione più fine dell'altimetria in modo da modellare con maggior dettaglio le dinamiche dell'evento e tenere più compiutamente in conto le caratteristiche topografiche dell'area in esame.

Di seguito si illustra la schematizzazione e le assunzioni effettuate per la generazione del setup modellistico.

# 4.3.1 Approccio modellistico

Nel caso in esame è stato messo a punto un modello MIKE FLOOD, esteso sull'intera area associata ai tratti modella sulla quale è stato ricostruito un DTM di dettaglio, nel modo seguente:

- modello MIKE 11 monodimensionale per la rappresentazione dell'alveo inciso del Torrente Bisagno e del Rio Fereggiano con rappresentazione di tutti i ponti presenti, con geometria definita mediante le sezioni trasversali di rilievo disponibili;
- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree vallive allagabili; il
  modello ha utilizzato una geometria di input costituita da celle quadrate di lato 3 m derivata
  da un DTM realizzato nell'area in esame in modo che siano ben rappresentati in quota e con
  continuità gli elementi "sovramontanti" che controllano le condizioni di deflusso (argini, muri,
  abitazioni ecc.);
- connessione dinamica laterale (lungo entrambe le sponde dell'alveo inciso) dei modelli MIKE 11 e MIKE 21.

Come condizione al contorno di monte per entrambi i corsi d'acqua in esame sono stati utilizzati gli ietogrammi ricostruiti sulla base dei dati misurati e delle seguenti analisi sugli stessi, per ricostruire gli idrogrammi di portata di testata e distribuiti lungo il tratto. I valori sono stati verificati con le osservazioni disponibili. La condizione al contorno di valle, imposta esclusivamente sullo sbocco a mare del Torrente Bisagno, è stata tratta dai risultati di un apposito studio sulla dinamica marina durante il periodo dell'evento, basato sui dati mareografici disponibili: si è così fornito al modello un livello del pelo libero marino tempovariante.

Per riprodurre al maggior livello di dettaglio possibile le dinamiche di sormonto e i volumi esondati si sono simulate i collassi dei muretti spondali verificatisi lungo entrambi i corsi d'acqua. Le fonti informative disponibili hanno permesso di stimare, con un buon grado di approssimazione, sia lo sviluppo longitudinale sia la tempistica dei cedimenti. In particolare, si sono schematizzate tre rotte nel tratto a pelo libero tra le due coperture del Rio Fereggiano e una in sponda destra del Torrente Bisagno subito a monte della copertura di Brignole.





### 4.3.2 Dati e informazioni pregresse

I dati di input per la definizione delle sezioni nel modello MIKE 11 del T.Bisagno provengono principalmente tipologie di fonti di seguito elencate.

Modelli idrodinamici monodimensionali sviluppati nell'ambito del Piano di Bacino Stralcio del Torrente Bisagno, con codice HEC-RAS, forniti dalla Provincia di Genova agli scriventi. In particolare, si sono considerati il modello con Project "PdBBisagno" e Plan "Rev04.1" (geometria "04.1\_giu\_10\_qdm"), assunto come rappresentativo per l'evento 2011 (nel seguito tale modello è indicato con la dicitura "HEC Bisagno") e quello con Project "T.Bisagno – Verifiche-giu-2008" e Plan "Unione-m-v-att", relativo alla copertura di Brignole (nel seguito tale modello è indicato con la dicitura "HEC Copertura Brignole"). Il modello HEC Bisagno presenta moltissime sezioni interpolate, così da avere una distanza media tra le sezioni molto bassa (pochi m, di solito): tranne poche eccezioni, si sono mantenute solo le sezioni originali ed eliminato quelle interpolate. Ad eccezione dei primi 1.6 km circa del tratto in esame, le sezioni del modello HEC Bisagno non riportano la sommità dei muretti di sponda (presenti quasi con continuità in sx, saltuariamente anche in dx): si è deciso, previo agganciamento di tutte le sezioni al Lidar ministeriale, di aggiungere il top spondale nelle sezioni del modello con la finalità di riprodurre le effettive condizioni geometriche preseti alla data dell'evento. Tali sezioni saranno utilizzate come riferimento per la quota di sfioro delle connessioni 1D-2D.

Studio idraulico effettuato da HYDRODATA nell'ambito del progetto "Recupero funzionale della copertura nel tratto terminale del Torrente Bisagno, con miglioramento delle condizioni di deflusso e del riordino urbanistico e viabilistico di aree limitrofe da via Canevari al mare – 2° Lotto 2° Stralcio – Progetto definitivo" del 2011. Tale modello riporta la geometria aggiornata del 1° Lotto del rifacimento della copertura terminale, l'unico completato alla data odierna. Nel seguito tale modello è indicato con la dicitura "HYD Copertura Brignole".

Rilievo altimetrico Lidar ministeriale, fornito dalla Provincia di Genova (sistema di riferimento Gauss-Boaga, cell-size=1 m). In accordo con il committente, si sono considerati i valori altimetrici del rilievo Lidar come maggiormente attendibili rispetto a quelli riportati nelle geometrie dei modelli HEC Bisagno e HEC Copertura Brignole: di conseguenza, in caso di incoerenza tra le due fonti di dati si sono adeguate le sezioni dei modelli HEC-RAS al dato Lidar.

Pur attingendo principalmente a queste fonti sono comunque state prese in considerazioni altre fonti di dati per la comprensione e definizione della configurazione del torrente alla data dell'evento del Novembre 2011 e della dinamica dello stesso. In particolare, le informazioni utilizzate per verifica degli output del modello sono state tratte dalla Relazione di consulenza Tecnica richiesta dalla Procura della Repubblica presso il Tribunale di Genova relativamente al Procedimento Penale 38335/2011/44, redatta nel luglio 2012 e di seguito denominata "Relazione della Procura". Inoltre si è fatto uso, quando disponibile, di materiale supplementare quale immagini satellitari, fotografie, video e informazioni varie tratte dalla rete Internet.

#### 4.3.3 Schematizzazione dell'alveo

Di seguito si illustra in dettaglio la schematizzazione monodimensionale dei tratti di alveo del Torrente Bisagno e del Rio Fereggiano. In aggiunta alla descrizione del setup modellistico, si specificano le scelte e le assunzioni che hanno portato a definire alcune caratteristiche specifiche del modello, oltre alle fonti da cui sono state tratte le informazioni associate ai vari aspetti dello stesso.

In Figura 4.1 si riporta la localizzazione dei due tratti considerati nel presente studio, analizzati nel dettaglio nei paragrafi seguenti.







Figura 4.1 Tratti del Torrente Bisagno e Rio Fereggiano modellati tramite approccio 1D.

L'ambito modellato presenta un alto numero di attraversamenti e tombinature, con varie tipologie costruttive. La schematizzazione di ponti e passerelle all'interno del modello è stata effettuata attraverso strutture tipo "culvert" di forma geometrica variabile secondo una relazione quota-larghezza che tiene conto della luce di deflusso al netto delle pile. Tale assunzione risulta valida in quanto il comportamento della corrente è regolato principalmente dal restringimento della sezione in presenza del ponte e dalle perdite di carico concentrate dovute allo stesso, più che da quelle distribuite lungo la struttura. L'aumento del contorno bagnato dovuto alla presenza delle pile incide solo sull'entità delle perdite di carico distribuite, generalmente trascurabile. Per i ponti sormontabili dai livelli di piena si è inoltre introdotta una struttura tipo "broadcrested weir", o stramazzo in parete larga, con geometria pari alla lunghezza del ponte e quote di sfioro corrispondenti a quelle di estradosso o del parapetto, in base alla singola tipologia e struttura dei ponti stessi. Tale approccio è stato adottato anche per la schematizzazione delle tombinature, in caso la geometria delle sezioni lungo lo sviluppo longitudinale della struttura non presenti variazioni.

In caso di tombinature con sezione variabile per le quali si ritenevano preponderanti le perdite di carico dovute alle successive variazioni di sezione, si è invece optato per una schematizzazione sulla base di sezioni chiuse, ovvero con limite superiore non sormontabile: in questo modo è stato possibile modellare nel dettaglio le variazioni geometriche al di sotto dell'impalcato della copertura.





#### 4.3.3.1 Geometria delle sezioni trasversali

#### Torrente Bisagno

Il tratto del Torrente Bisagno schematizzato tramite approccio monodimensionale è costituito dagli ultimi 6.5 km circa del corso d'acqua. Il tratto modellato ha inizio circa 200 m a monte di Ponte Feritore e termina con lo sbocco a mare del torrente, al termine della copertura di Brignole presso la Fiera di Genova. In Figura 4.2 si riporta l'estensione del tratto analizzato nel presente studio.



Figura 4.2 Tratto del Torrente Bisagno schematizzato con approccio 1D.

Il tratto oggetto di indagine risulta caratterizzato da numerosi attraversamenti (13) e 2 tombinature, in aggiunta a quella terminale di Brignole.

La schematizzazione della geometria dell'alveo del Torrente Bisagno è stata effettuata attraverso l'utilizzo e l'analisi di varie fonti informative. Ogni sezione trasversale recuperata da un modello precedente è stata comparata con i valori di altimetria del DTM Lidar fornito dalla Provincia di Genova: in accordo con il Committente, infatti, il dato da rilievo Lidar è stato considerato come il più affidabile, per cui eventuali incongruenze con le sezioni trasversali dei modelli sono state risolte a favore del primo. Le sezioni trasversali del tratto del Torrente





Bisagno sono 157, al netto di quelle interpolate: infatti, in segmenti particolarmente critici o associati a dinamiche esondative complesse le sezioni sono state infittite tramite interpolazione, in modo da aumentare il dettaglio di rappresentazione del modello. In Tabella 4.1 sono riportate, per ogni sezione, la progressiva, il nome della sezione nel modello attuale e in quello del Piano di Bacino, eventuali note.

Tabella 4.1 Sezioni trasversali per la schematizzazione del Torrente Bisagno.

			BIS	SAGNO			
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE
472	82	82		3588	32.2	32.2	sezione a monte della passerella pedonale
533	81	81		3592	32.1	32.1	sezione a valle della passerella pedonale
608	80	80		3595	32	32	
630	79	79		3640	31.5		
655	78.4	78.4		3646	31	31	
656	78.3	78.3	sezione a monte di P.Feritore	3726	30	30	
669	78.2	78.2	sezione a valle di P.Feritore	3841	29	29	
672	78.1	78.1		3891	28	28	
717	77	77		3892	27	27	Connessione alla prima sezione del branch "Bisagno :Parcheggio pensile"
762	76	76		3927	26.8	26.8	
830	75	75		3932	26.3	26.3	
924	74	74		4112	26	26	
973	73.4	73.4		4113	25	25	imbocco copertura Marassi
974	73.3	73.3	sezione a monte di P.Guglielminetti	4383	24	24	sbocco copertura Marassi
983	73.2	73.2	sezione a valle di P.Guglielminetti	4384	23	23	Connessione all'ultima sezione del branch "Bisagno :Parcheggio pensile"
987	73.1	73.1		4438	22	22	
1028	72	72		4497	21	21	
1086	71	71		4515	20.5	20.5	
1131	70	70		4530	20.25		
1219	69	69		4538	20	20	
1328	68	68		4547	19.3	19.3	





			BIS	AGNO			
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE
1351	67.4	67.4		4549	19.2	19.2	sezione a monte di P.Serra
1353	67.3	67.3	sezione a monte di P.Carrega	4563	19.1	19.1	sezione a valle di P.Serra
1357	67.2	67.2	sezione a valle di P.Carrega	4573	19. monte salto	19. monte salto	
1359	67.11	67.11		4599	18	18	
1359	67.1	67.1		4662	17	17	
1398	66	66		4721	16	16	
1460	65	65		4771	15	15	
1527	64	64		4791	14.66	14.66	
1576	63.4	63.4		4793	14.33	14.33	
1578	63.3	63.3	sezione a monte di P.Veronelli	4819	14	14	
1581	63.2	63.2	sezione a valle di P.Veronelli	4858	13.2 monte ponte	13.2 monte ponte	sezione a monte di passerella Firpo
1588	63.1	63.1		4862	13.1 valle ponte	13.1 valle ponte	sezione a valle di passerella Firpo
1643	62	62		4891	12	12	
1723	61	61		4938	11	11	
1812	60	60		5027	10	10	
1936	59	59		5078	9	9	
1975	58.4	58.4		5118	8	8	
1976	58.3	58.3	sezione a monte di P.Bezzecca	5156	7	7	
1983	58.2	58.2	sezione a valle di P.Bezzecca	5201	6	6	
1987	58.1	58.1		5207	5.2	5.2	sezione a monte di P.Castelfidardo
2025	57	57		5225	5.1	5.1	sezione a valle di P.Castelfidardo
2089	56	56		5230	5	5	
2131	55.4	55.4		5244	4.5	4.5	
2131	55.3	55.3	sezione a monte della passerella	5246	4	4	
2134	55.2	55.2	sezione a valle della passerella	5248	3.5	3.5	





			BIS	SAGNO			
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE
2135	55.1	55.1		5298	3	3	
2247	54	54		5351	2	2	
2347	53	53		5398	1	1	
2381	52	52		5410	0.9	0.9	
2435	51	51		5411	imbocco copertura Brignole		imbocco copertura terminal
2487	50	50		5537	0.97		
2538	49.1	49.1		5538	0.961		
2540	49	49		5550	0.96		
2540	48.9	48.9		5578	0.95		
2589	48	48		5598	0.94		
2639	47	47		5617	0.93		
2650	46	46		5635	0.92		
2666	45.1	45.1	sezione a monte di P.Monteverde	5654	0.91		
2684	44.9	44.9	sezione a valle di P.Monteverde	5672	0.9		
2687	44.75			5691	0.89		
2748	44	44		5710	0.88		
2784	43	43		5730	0.87		
2791	42.1	42.1		5790	0.869		
2793	42	42		5850	0.74		
2793	41.9	41.9		5950	0.73		
2804	41	41		6050	0.72		
2830	40	40		6119	0.71		
2936	38	38	imbocco copertura Staglieno	6243	0.69		
3246	37	37	sbocco copertura Staglieno	6698	7 copertura		
3250	36	36		6698	7bis copertura		
3320	35.35			6798	8		
3373	35.3	35.3		6798	8bis		
3374	35.2	35.2	sezione a monte di P.Campanella	6898	9 copertura		





	BISAGNO														
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE		PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE							
3390	35.1	35.1	sezione a valle di P.Campanella		6898	9bis foce		sbocco copertura terminale							
3394	35	35			6986	10 foce									
3442	34	34			7088	11 foce									
3547	33	33													
3587	32.3	32.3													

Si ricorda in questa sede che, come indicato nello specifico elaborato relativo agli schemi geometrici, lo stato di avanzamento dei lavori di rifacimento della copertura del Biasagno nel tratto a valle di Brignole era, al momento dell'evento, ferma al completamento del primo lotto previsto in progetto.

Oltre alla consistenza con i valori del DTM, si è anche verificata la presenza nelle sezioni delle sommità dei muretti arginali. In caso di assenza, le altezze del top spondale rispetto al piano strada sono state stimate e successivamente integrate nel modello: le fonti principali per l'identificazione delle quote dei muretti sono costituite da immagini fotografiche e dalla comparazioni con altri tratti per i quali si ha disponibilità di tale informazione.

Di seguito in riferimento a singoli tratti dell'alveo, sono descritte le principali attività di processamento e integrazione delle sezioni all'interno dello schema modellistico adottato.

#### Tratto da progressiva 472 a progressiva 2247

In questo tratto, cha si sviluppa dall'inizio dell'area modellata sino a circa 400 m a monte di Ponte Monteverde, si è utilizzato il solo modello disponibile, ovvero HEC Bisagno (vd. par. 4.3.2). Le sezioni sono risultate coerenti con i valori del rilievo Lidar, per cui non si è reso necessario alcun aggiustamento prima del loro inserimento nel modello idrodinamico.

In questo tratto i muretti spondali erano già presenti nella fonte di dati, per cui anche da questo punto di vista non sono stati effettuati pre-processamenti del dato.







Figura 4.3 T.Bisagno: tratto da inizio del modello 1D sino a circa 400 m a monte di Ponte Monteverde (progr. 472-2247).

#### Tratto da progressiva 2247 a progressiva 2793

Tale tratto si estende da 400 m a monte di Ponte Monteverde sino a circa 150 m a valle dello stesso. Si sono utilizzate ancora le sezioni del modello HEC Bisagno: in questo caso, però, la quasi totalità delle sezioni è stata traslata verticalmente di 0.2 m per renderla congruente con le quote del Lidar.

Poiché assenti nel dato originale, le quote delle sommità di sponda sinistra sono state incrementate per schematizzare i muretti spondali. In sponda destra, invece, il muretto è sostituito, come nel tratto precedente, da una ringhiera che non si è ritenuto di inserire nel modello, in quanto la sua presenza non rappresenta un elemento fisico di contenimento delle acque di piena.





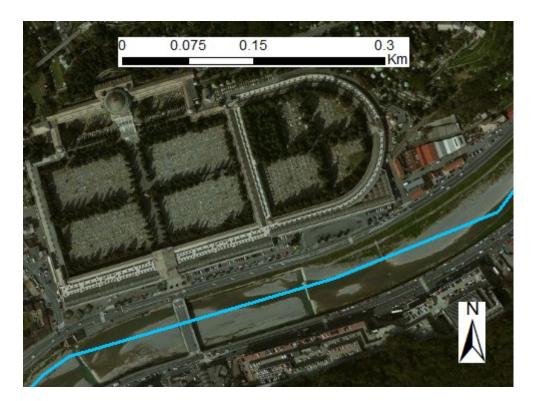


Figura 4.4 T.Bisagno: tratto da circa 400 m a monte di Ponte Monteverde a circa 150 m a valle dello stesso (progr. 2247-2793).

# Tratto da progressiva 2793 a progressiva 4113

Il tratto che si estende da circa 100 m a monte della copertura di Staglieno sino all'imbocco della copertura di Marassi, per una lunghezza di 1.3 km, è stato schematizzato con le sezioni del modello HEC Bisagno. Come segnalato dal Committente, nonché reso evidente da un controllo incrociato delle quote di fondo e di sponda, il rilievo utilizzato in questo tratto è diverso da quello precedente. Questo è il motivo per cui la traslazione verticale applicata alle sezioni presenta valori differenti (superiori) rispetto ai tratti di monte: in particolare, per adeguare le sezioni al DTM Lidar, le quote sono state aumentate di un valore variabile tra 1.0 e 1.2 m.

Per quanto riguarda i muretti spondali, il tratto è caratterizzato dalla loro presenza in maniera discontinua sia in sponda destra sia sinistra. Le sezioni originali non contengono tali quote, per cui, come per il tratto a monte, sono state inserite in fase di messa a punto del modello. Di seguito si dettaglia l'integrazione di tali elementi:

#### Sponda sinistra:

- sino all'imbocco della copertura di Staglieno (progr. 2793-2936): 0.6 m;
- da sbocco copertura di Staglieno sino a 30 m a valle della passerella pedonale in corrispondenza dell'istituto scolastico di via Bobbio (progr. 3246-3640): 0.9 m.

#### Sponda destra:

- da sbocco copertura di Staglieno sino a Ponte Campanella (progr.3246-3373): 0.6 m;
- dalla passerella pedonale in corrispondenza dell'istituto scolastico di via Bobbio sino all'inizio del parcheggio pensile (progr.3595-3891): 1.2 m.

Circa 200 m a monte dell'imbocco della copertura di Marassi (progr. 3892) comincia in sponda destra un fornice unico il cui estradosso è destinato a parcheggio di autoveicoli: tale struttura prosegue lungo tutto lo sviluppo della copertura, costituendone di fatto la quarta canna. Per





tenere debitamente in conto di tale struttura si è inserito un canale parallelo al corso principale, denominato "Bisagno: Parcheggio pensile", che si ricollega a quest'ultimo al termine della tombinatura di Marassi. Le sezioni all'interno di tale fornice sono state schematizzate con geometria chiusa. Circa 40 m a valle dell'inizio del fornice unico in sponda destra, è localizzata una passerella pedonale: a causa del suo basso impatto sul deflusso si è optato per il non inserimento all'interno dello schema idrodinamico, in modo da assicurare massima stabilità al modello.



Figura 4.5 T. Bisagno: tratto da circa 100 m a monte della copertura di Staglieno sino alla copertura di Marassi (progr. 2793-4113).

#### Tratto da progressiva 4383 a progressiva 4563

Il tratto è quello compreso tra lo sbocco della copertura di Marassi sino al Ponte Serra, a valle del quale è localizzata la confluenza del Rio Fereggiano (tombinato) nel Bisagno. In tale tratto le sezioni del modello "HEC Bisagno" risultano a un buon livello di consistenza con i valori altimetrici del rilievo Lidar.

Relativamente all'integrazione dei muri spondali all'interno delle sezioni, in sponda sinistra sono stati aggiunti per un'altezza pari a 1 m a partire dallo sbocco della copertura sino a 25 m a monte del Ponte Serra: nell'ultimo segmento infatti la ringhiera prende il posto del muretto. In sponda destra invece è presente un guard-rail, non inserito nelle sezioni trasversali.







Figura 4.6 T. Bisagno: tratto dallo sbocco della copertura di Marassi a Ponte Serra (progr. 4383-4563).

#### Tratto da progressiva 4563 a progressiva 5411

L'ultimo tratto a cielo aperto del Torrente Bisagno è quello che si estende dal Ponte Serra sino all'imbocco della copertura di Brignole. Questo tratto include la passerella Firpo e il Ponte Castelfidardo, pochi metri a valle del quale sono presenti in alveo i resti del Ponte S.Agata, ormai diroccato.

Come fonte di dati per le geometria dell'alveo si è considerato, oltre al modello HEC Bisagno come per i tratti precedenti, anche le rilevazioni effettuate nell'ambito del presente incarico: anche per questo tratto, ovviamente, si sono agganciate le quote ai valori altimetrici del rilievo Lidar.

Relativamente alle quote del top dei muretti spondali, di seguito si dettagliano le integrazioni effettuate.

In sponda sinistra si sono inseriti muretti spondali di altezza pari a 1 m, con le seguenti eccezioni:

- ultimi 45 m a monte di Ponte Castelfidardo (progr. 5163-5207): 1.5 m;
- 4 m di ringhiera in corrispondenza di Ponte S.Agata (5244-5248):
- ultimi 35 m a monte della copertura di Brignole: assenza di muretto spondale.

In sponda destra si sono inseriti muretti spondali di altezza pari a 1 m, con le seguenti eccezioni:

• distributore IP a monte di passerella Firpo (progr. 4791-4834): muretto spondale sostituito da ringhiera;





tratto tra i due distributori ERG e ENI a monte della copertura di Brignole (progr. 5315-5336): collasso del muretto modellato tramite inserimento di una geometria tempovariante (vd. par.4.3.5). Dalle fonti informative disponibili, infatti, risulta che si sia verificato un collasso spondale per un'estensione longitudinale di circa 20 m: vista la localizzazione, altamente critica, della rotta si è ritenuto necessario inserirla nella schematizzazione in modo da riprodurre al meglio quanto avvenuto durante l'evento di piena.



Figura 4.7 T. Bisagno: tratto da Ponte Serra all'imbocco della copertura di Brignole (progr. 4563-5411).

#### Tratto da progressiva 5411 a progressiva 6243

Il tratto in esame è relativo alla copertura di Brignole dall'imbocco sino all'inizio del 1° lotto del rifacimento, l'unico sinora completato tra quelli in progetto. Il primo segmento di tale tratto passa al di sotto della copertura ferroviaria di Brignole, per poi svilupparsi al di sotto di viale Brigate Bisagno e terminare in corrispondenza di via Maddaloni, nei pressi del Palazzo della Questura.

La geometria della tombinatura è stata desunta dal modello "HEC Copertura Brignole", previa verifica della congruenza delle informazioni con le altre fonti informative disponibili.







Figura 4.8 T. Bisagno: tratto dall'imbocco copertura di Brignole all'inizio del 1°lotto di rifacimento della copertura (progr. 5411-6243).

# Tratto da progressiva 6243 a progressiva 7088 (sbocco a mare)

L'ultimo tratto del Torrente Bisagno è relativo al 1° lotto della copertura terminale, l'unico segmento portato a compimento del progetto di rifacimento globale della copertura di Brignole. Il tratto termina con lo sbocco a mare presso la zona Fiera di Genova.

Le sezioni per tale segmento della tombinatura sono state desunte dal modello "HYD Copertura Brignole", già disponibile in formato DHI MIKE dal precedente studio idraulico effettuato da HYDRODATA nell'ambito del progetto "Recupero funzionale della copertura nel tratto terminale del Torrente Bisagno, con miglioramento delle condizioni di deflusso e del riordino urbanistico e viabilistico di aree limitrofe da via Canevari al mare – 2° Lotto 2° Stralcio – Progetto definitivo" del 2011. Tale modello riporta la geometria aggiornata del 1° Lotto del rifacimento della copertura terminale, l'unico completato alla data odierna.





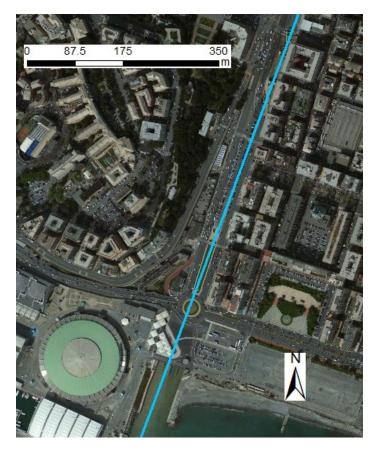


Figura 4.9 T. Bisagno: tratto terminale, dall'inizio del 1°lotto di rifacimento della copertura sino allo sbocco a mare (progr. 6243-7088).

# Rio Fereggiano

Il modello monodimensionale del Rio Fereggiano si estende da circa 500 m a monte del viadotto autostradale "Marassi", presso l'abitato di Quezzi, sino alla confluenza nel Torrente Bisagno pochi m a valle del Ponte Serra, per una lunghezza circa pari a 2.8 km (Figura 4.10). L'ultimo chilometro del tratto è interamente tombinato ed è presente una copertura, recentemente adeguata, circa 500 m a monte dell'imbocco di quella terminale. Il segmento di monte sino alla copertura terminale presenta forte acclività, con conseguenti valori elevati di velocità in caso di evento di piena.







Figura 4.10 Tratto del Rio Fereggiano schematizzato con approccio 1D.

In Tabella 4.2 si riportano le sezioni trasversali del Rio Fereggiano, ad esclusione (come già per il Torrente Bisagno) di quelle inserite tramite interpolazione per migliorare la descrizione all'interno dello schema modellistico di segmenti particolarmente critici del tratto.

Tabella 4.2 Sezioni trasversali per la schematizzazione del Rio Fereggiano.

FEREGGIANO								
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE			
129	670		1713	220				
384	Sezione chiusa		1760	210				
498	580		1795	200				
636	546		1826	190 monte ponte	sezione a monte del primo ponte			
760	500		1832	183 valle ponte	sezione a valle del primo ponte			
875	460		1849	180 monte ponte	sezione a monte del secondo ponte			
1014	425		1858	173 valle ponte	sezione a valle del secondo ponte			
1110	403 valle ponte		1859	173bis valle ponte				
1138	400		1892	170 monte ponte	sezione a monte del terzo ponte			
1169	390		1895	163 valle ponte	sezione a valle del terzo ponte			
1189	380 monte ponte	imbocco copertura di Largo Merlo	1943	160				





FEREGGIANO								
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE			
1192	passerella 38 - 41		1961	150				
1204	40.4		1992	140	imbocco copertura terminale			
1244	38		2074	130				
1287	35		2167	120				
1331	31		2257	110				
1356	330		2336	100				
1396	320		2389	90				
1421	310		2410	80				
1499	300		2428	70				
1545	290		2429	60				
1562	280		2496	50				
1575	270		2592	40				
1584	260		2725	30				
1589	250	sbocco copertura di Largo Merlo	2744	20				
1606	240		2789	10				
1649	230		2795	0	sbocco copertura terminale			

#### Tratto da progressiva 129 a progressiva 1189

Il segmento da inizio tratto sino all'imbocco della copertura di Largo Merlo è stato schematizzato sulla base del modello "HEC Fereggiano". Le quote del modello originale risultano coerenti con i dati del rilievo Lidar, per cui non si è reso necessario post-processare le sezioni trasversali.

Questo tratto non risulta accoppiato con il modello bidimensionale, ma viene utilizzato esclusivamente per simulare in modo più corretto la traslazione dei volumi di piena: di conseguenza, non si sono inseriti elementi di dettaglio quali strutture, etc, ma si è schematizzato solo tramite la geometria delle sezioni.





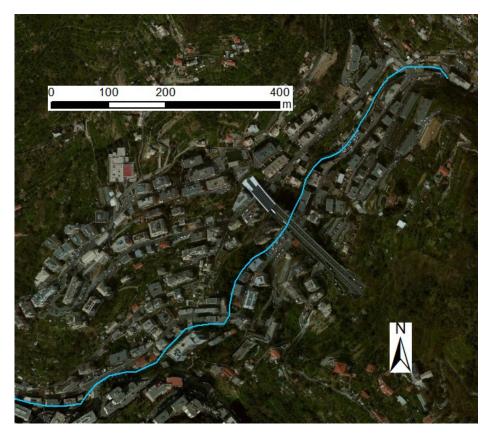


Figura 4.11 R. Fereggiano: primo tratto, da circa 550 m a mote del viadotto "Marassi" all'imbocco della copertura di Largo Merlo (progr. 129-1189).

#### Tratto da progressiva 1189 a progressiva 1589

Il tratto è relativo alla tombinatura al di sotto di Largo Merlo. Tale copertura è stata adeguata alla portata associata a tempo di ritorno duecentennale, pari a 115 m³/s; l'intervento è stato portato a termine poco prima che l'evento del 2011 avesse luogo.

Le geometria delle sezioni è stata schematizzata utilizzando come fonti informative il modello "HEC Fereggiano" e, in maniera preponderante, la fonte "ASTER", ovvero il progetto presentato dalla ditta vincitrice dell'appalto di progettazione (Azienda Servizi Territoriali Genova spa).





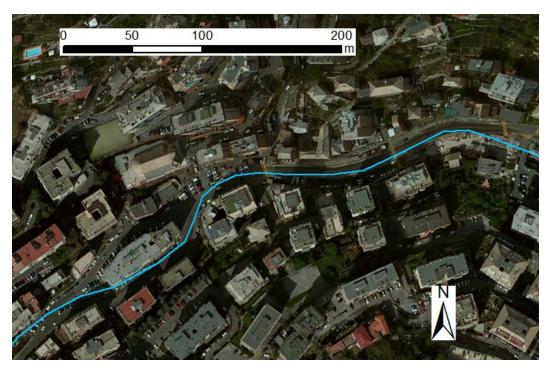


Figura 4.12 R. Fereggiano: tratto relativo alla copertura di Largo Merlo (progr. 1189-1589).

#### Tratto da progressiva 1589 a progressiva 1992

Il tratto si estende tra lo sbocco della copertura di Largo Merlo e l'imbocco di quella terminale. Lungo questo segmento si sono avute le esondazioni che hanno causato i maggiori danni, anche in termini di vite umane, legati all'evento in esame.

Il modello "HEC Fereggiano", utilizzato per definire la geometria del tratto, conteneva già le sommità dei muri spondali, alti circa 1 m rispetto al piano strada. Per tenere in conto dei collassi arginali occorsi durante l'evento in sponda sinistra, si sono inserite geometrie tempo-varianti per i muretti di 3 segmenti del tratto a pelo libero, ovvero:

- dallo sbocco della copertura di Largo Merlo sino a pochi metri a monte della fermata dell'autobus Fereggiano 3/Moro (progr. 1588-1713);
- da pochi metri a monte di B.C. Serramenti sino a circa 20 m a valle dello stesso (progr. 1772-1826);
- tratto di circa 15 m con termine in corrispondenza della piccola costruzione a valle dell'ultimo attraversamento privato prima della copertura terminale (progr. 1903-1919).





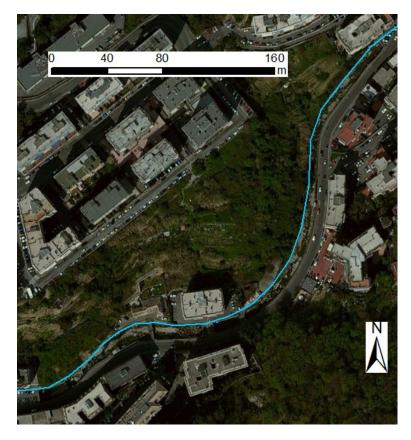


Figura 4.13 R. Fereggiano: tratto a cielo aperto tra la copertura di Largo Merlo e quella terminale (progr. 1589-1992).

# Tratto da progressiva 1992 a progressiva 2795

L'ultimo tratto è interamente tombinato e termina in corrispondenza della confluenza del Rio Fereggiano nel Torrente Bisagno, pochi metri a valle del Ponte Serra. La pendenza del tratto, sviluppandosi nella zona valliva del corso d'acqua, risulta meno ripida rispetto ai segmenti di monte, e la geometria della copertura è stata ricavata dal modello "HEC Fereggiano".



Figura 4.14 R. Fereggiano: copertura terminale (progr. 1992-2795).





#### 4.3.3.2 Scabrezza idraulica

Di seguito si riportano i coefficienti di scabrezza idraulica utilizzati nel setup 1D. Per la stima del parametro si è fatto riferimento in maniera primaria, ma non esclusiva, alle seguenti fonti informative:

- Piano di Bacino Stralcio del Torrente Bisagno, approvato con DCP n.64 del 4-12-2001, modificato con DGP n.550 del 20-12-2005.
- sopralluogo in situ e documentazione fotografica.

I valori di scabrezza desunti dalle fonti sopracitate sono stati poi calibrati sulla base delle risultanze della simulazione, così da ottenere valori che consentono di riprodurre effettivamente le dinamiche caratteristiche del corso d'acqua.

#### Torrente Bisagno

L'analisi della documentazione fotografica e i sopralluoghi effettuati hanno consentito di stimare il coefficiente di scabrezza più adatto a schematizzare la resistenza offerta al deflusso alveato.

Sulla base delle condizioni di manutenzione dell'alveo e sulla tipologia di fondo caratteristica del tratto, si è valutato come parametro di scabrezza più adatto un valore di Gaukler-Strickler pari a 30 m<sup>1/3</sup>/s per l'intero tratto del Bisagno analizzato.

Tale valore è stato desunto dalla considerazione dei valori previsti nel PdB Regione Liguria e del Manuale dell'Ingegnere, e risulta in linea (in certi casi conservativamente) rispetto ai modelli pregressi oltreché con le indicazioni fornite all'interno degli studi citati al Par. 4.3.2.

## Rio Fereggiano

Il Rio Fereggiano sino alla copertura terminale è caratterizzato da forte acclività dell'alveo, unita a una significativa irregolarità del fondo. In aggiunta, il tracciato del rio presenta numerosi cambi di direzione a forte curvatura.

In conseguenza di tali caratteristiche, si è ritenuto ragionevole diminuire i valori previsti dal Piano di Bacino. Si pone in evidenza, infatti, come una modellazione monodimensionale non sia in grado di tenere compiutamente conto delle perdite di carico legate a curvature significative, di cui, quando presenti, è ragionevole tenere conto schematizzando una maggiore resistenza al deflusso.

Di conseguenza, i valori di scabrezza considerati sono i seguenti:

- 25 m<sup>1/3</sup>/s dall'inizio tratto sino allo sbocco della copertura di Largo Merlo;
- 12 m<sup>1/3</sup>/s nei primi 100 m circa a valle dello sbocco della copertura di Largo Merlo. Tale valore è stato definito in base al rapido susseguirsi di cambi di direzione e, in particolare, alle informazioni reperite in merito ai punti di esondazione: di conseguenza, il valore in tale tratto è stato definito tramite calibrazione;
- 15 m<sup>1/3</sup>/s nel tratto dal Centro Serramenti B.C. sino al terzo attraversamento: per tale tratto valgono le considerazioni effettuate per il segmento precedente;
- 25 m<sup>1/3</sup>/s nel tratto a valle dell'ultimo attraversamento e l'imbocco della copertura terminale;
- 26 m<sup>1/3</sup>/s al di sotto della copertura terminale.

Come accennato, tali valori di scabrezza, in particolare per quanto riguarda il tratto a pelo libero tra le due coperture, sono stati definiti anche in base ai risultati della calibrazione del modello rispetto all'evento in esame, in funzione sia dell'estensione delle aree allagate sia dei valori di velocità, dove stimabili.





#### 4.3.3.3 Condizioni al contorno

Un modello idraulico ha necessità che siano specificate le condizioni al contorno per la definizione della forzante (tipicamente portata liquida) e comportamento del deflusso al termine del tratto in esame.

La forzante deve essere obbligatoriamente fornita in corrispondenza della prima sezione del tratto (condizione di monte), e opzionalmente lungo segmenti longitudinali (condizione distribuita). La condizione di valle, invece, è costituita generalmente da un livello di pelo libero (costante o tempo-variante) o da una tabella di corrispondenza livello-portata (scala di deflusso).

Di seguito si riportano le condizioni al contorno per i due corsi d'acqua analizzati. Per un maggior dettaglio sulla ricostruzione degli idrogrammi di portata usati come condizione al contorno si rimanda allo specifico paragrafo descrittivo dell'analisi idrologica dell'evento 2011 (vd. Par.3.2).

#### Condizione di monte

#### Torrente Bisagno

In Figura 4.15 si riporta l'idrogramma posto in testata al tratto del Torrente Bisagno, che integra tutti i contributi a monte della prima sezione considerata dal modello idraulico.

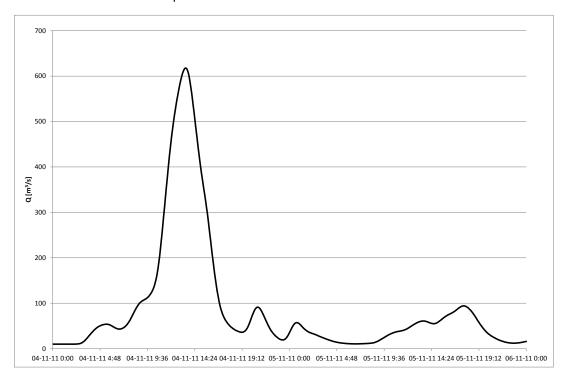


Figura 4.15 T. Bisagno, condizione di monte (progr. 472).

In aggiunta all'idrogramma di testata, si è reso necessario tenere in conto del contributo della porzione di bacino a valle della sezione iniziale del tratto modellato, ad esclusione del bacino del Rio Fereggiano. Si è così inserito un idrogramma relativo a tale area contribuente, distribuito lungo la longitudinale a partire da pochi metri a valle della sezione iniziale (progr. 500) sino alla confluenza del Rio Fereggiano (progr. 4529). In Figura 4.16 si riporta l'idrogramma distribuito: si nota come i valori risultino decisamente inferiori rispetto alla condizione di monte, conseguenza della notevole differenza di area contribuente.





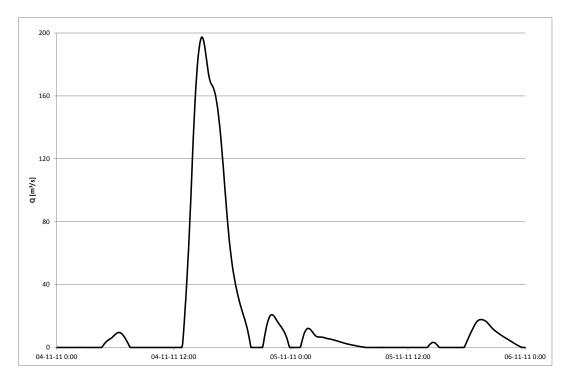


Figura 4.16 T. Bisagno, condizione distribuita (progr. 500-4529).

#### Rio Fereggiano

Come per il Torrente Bisagno, anche per il Rio Fereggiano sono stati considerati due input di portata: uno concentrato alla sezione di monte e il secondo distribuito sino all'imbocco della copertura terminale.

A differenza del Bisagno, i due idrogrammi del Rio Fereggiano riguardano volumi liquidi comparabili: ciò a causa dell'area contribuente, che presenta estensioni simili. In Figura 4.17 e Figura 4.18 si riportano i due idrogrammi: si nota come l'andamento temporale della portata sia similare nei due casi, così come i valori al picco (80 m³/s per il concentrato e 69 m³/s per il distribuito).





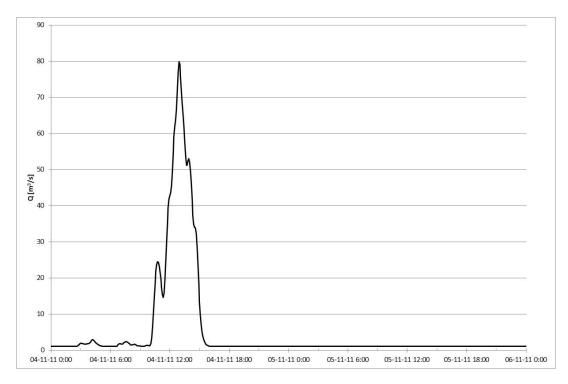


Figura 4.17 R. Fereggiano, condizione di monte (progr. 129).

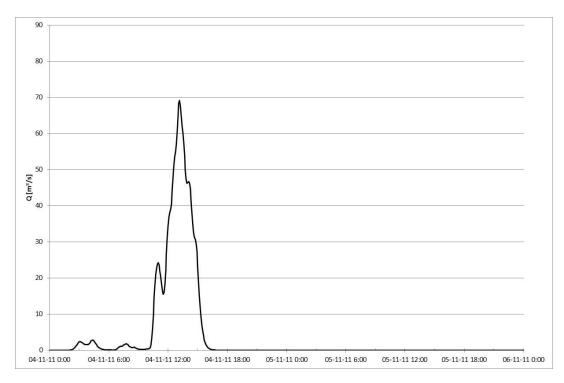


Figura 4.18 R. Fereggiano, condizione distribuita (progr. 129-1961).

Relativamente al contributo del bacino a valle dell'imbocco della copertura terminale, si è ritenuto di non considerarlo all'interno del modello. La frazione di precipitazione non dispersa per infiltrazione o intercettamento (a causa della vegetazione, etc) non ha infatti raggiunto l'alveo del Rio Fereggiano, se non in minima parte, a causa della copertura: di conseguenza non sarebbe stato corretto considerarlo come contributo alla portata defluente al di sotto della stessa. La valutazione di tale contributo ha condotto alla decisione di non tenerne conto





neanche come deflusso superficiale nel modello bidimensionale, in quanto la poca significatività del volume liquido associato non avrebbe comportato variazioni nell'output.

#### Condizione di valle

La condizione di valle consente di modellare il deflusso in corrispondenza dell'ultima sezione del modello idrodinamico. Nel caso attuale il solo Torrente Bisagno ha necessità della condizione di valle, nello specifico relativa allo sbocco a mare: il Rio Fereggiano, infatti, confluisce nel Bisagno pochi metri a valle di Ponte Serra, per cui l'interazione tra il livello del corso d'acqua recettore e il moto al di sotto della copertura costituisce la condizione di valle del tributario. Tale condizione, per l'evento del novembre 2011, viene automaticamente calcolata dal modello in quanto lo schema di calcolo del codice in caso di confluenza calcola, per ogni time-step di integrazione numerica, le condizioni di valle del tributario sulla base della natura del moto di quest'ultimo e del tirante idrico del recettore.

La condizione di valle del Torrente Bisagno è dunque relativa al livello del mare occorso durante l'evento in esame. Di seguito si illustra il procedimento seguito per la stima del sovralzo marino durante il periodo dell'evento.

### Approccio metodologico

L'effetto di sovralzo del livello medio mare all'occorrere di un evento meteomarino intenso è generalmente dato dalla somma dei 3 seguenti fenomeni:

- la marea astronomica;
- la variazione del livello di medio mare dovuto alle condizioni di tempesta (storm surge), suddivisa 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 setup). Il wave set-up è la variazione del livello medio mare dovuta al frangimento delle onde. Tale effetto risulta funzione della pendenza del fondale e/o delle possibili strutture presenti lungo la linea di costa (pennelli, barriere soffolte, etc...).

Nel caso in esame, considerata la forte complessità batimetrica e geometrica dell'area oggetto di studio, e quindi la difficoltà nella determinazione della componente dovuta al frangimento, è stato ritenuto opportuno predisporre un modello numerico bidimensionale combinato ondecorrenti in grado di tener conto di tutti i fenomeni precedentemente descritti.

Il modello è stato implementato su un'area sufficientemente estesa per le finalità oggetto di studio. In particolare comprende parte del canale di accesso di levante del porto di Genova e si estende ad Est fino alla foce del torrente Sturla.





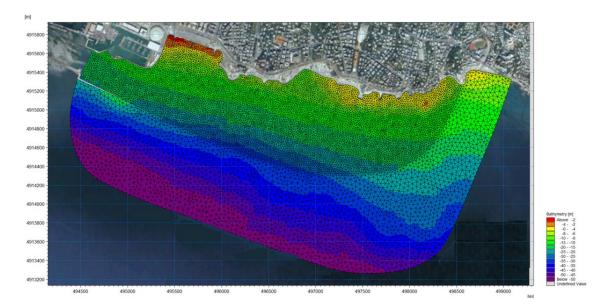


Figura 4.19 Mesh di calcolo e batimetria.

Lo studio è stato affrontato utilizzando in modalità combinata diversi codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati dal DHI. In particolare:

- MIKE 21 SW, modulo per la simulazione del moto ondoso e dei relative fenomeni di trasformazione;
- MIKE 21 HD FM, modulo idrodinamico, per la rappresentazione bidimensionale di flussi e correnti.

Il modulo SW è stato utilizzato per analizzare con elevato livello di dettaglio le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso la costa. Durante la propagazione verso la costa l'onda subisce diverse trasformazioni; una delle trasformazioni più rilevanti nello studio delle dinamiche costiere è il processo di rifrazione: la rotazione del fronte d'onda che tende a disporsi parallelo alle isobate ed alla linea di costa è in grado di determinare l'insorgenza di sforzi di taglio al fondo (radiation stress). I gradienti dei radiation stress, massimi in corrispondenza del frangimento, sono i responsabili della generazione delle correnti litoranee e del wave setup.

Per studiare in dettaglio il sovralzo del livello medio mare indotto dal moto ondoso, la marea astronomica e lo storm surge, è stato utilizzato il modulo HD (Hydrodynamics) del codice di calcolo MIKE 21 di DHI. Il modello è stato pertanto forzato dai campi di radiation stress, forniti in input da SW e dalle oscillazioni di livello registrate al mareografo di Genova, già comprensive della componente di marea astronomica e di storm surge.

I risultati, in termini di sovralzo rispetto al medio mare, estratti alla foce del torrente Bisagno hanno consentito di definire la condizione al contorno di valle del modello fluviale.

#### Evento del 4 novembre 2011

Al fine di valutare il sovralzo rispetto al medio mare in corrispondenza dell'evento alluvionale del 4 Novembre 2011, il modello numerico, descritto al paragrafo precedente, è stato predisposto per una simulazione, non stazionaria, avente come data di inizio il 2/11/2011 alle ore 00.00 e come data di fine l' 11/11/2011 alle ore 00.00.

Le condizioni al contorno in termini di moto ondoso sono state ricavate in funzione dei dati ondametrici registrati, nel periodo di tempo in oggetto, alla boa di La Spezia. Tali dati, in termini di altezza d'onda, sono stati trasferiti al largo di Genova, mediante il metodo della trasposizione geografica basata sulla similitudine dei *fetch* efficaci (De Girolamo - Contini, metodo





diffusamente utilizzato negli studi meteomarini). La serie temporale di altezza d'onda significativa al largo di Genova è illustrata in Figura 4.20.

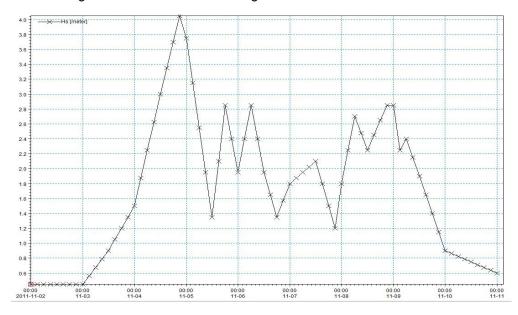


Figura 4.20 Serie temporale dell'altezza d'onda significativa al largo di Genova.

Il periodo d'onda è stato ricavato a partire dall'altezza d'onda, in funzione di una relazione empirica, riportata di seguito, ricavata in un precedente studio condotto da DHI Italia per conto dell'Autorità Portuale di Genova<sup>5</sup>.

$$Tp = 5.88 \cdot H_s^{0.32}$$

La direzione media di provenienza dell'onda, sulla base delle registrazioni alla boa di La Spezia, è stata assunta pari a 140°N (scirocco) per l'intera durata della mareggiata.

Le condizioni al contorno al modulo idrodinamico sono state impostate in termini di oscillazioni del livello medio mare e definite sulla base delle registrazioni del mareografo di Genova, localizzato all'interno del porto. Tale mareografo, proprio per effetto della sua posizione, consente di registrare sia le variazioni dovute alla marea astronomica sia quelle dovuta allo storm surge ma non quelle dovute al wave setup, dal momento che non risulta esposto all'effetto del moto ondoso.

In Figura 4.21 sono riportate le oscillazioni di livello registrate al mareografo di Genova durante il periodo oggetto di studio.

22800503-01-00202.docx 71

\_

<sup>&</sup>quot;Studio meteomarino a supporto della progettazione esecutiva del ripristino della mantellata esterna alla diga foranea e al molo Duca di Galliera", DHI Italia per conto di Autorità Portuale di Genova, 2010





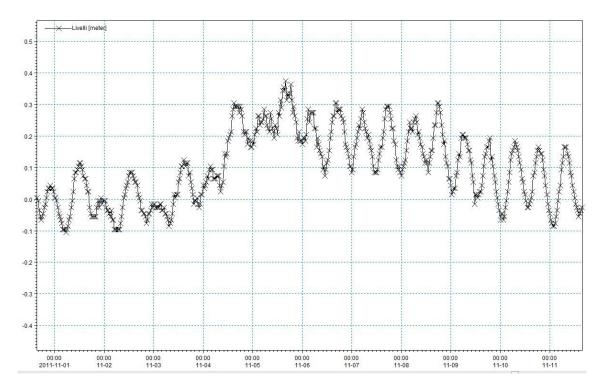


Figura 4.21 Oscillazione di livello registrate al mareografo di Genova nel periodo del 1-11 Novembre 2011.

In Figura 4.22 e Figura 4.23 sono presentate rispettivamente le mappe di velocità di corrente e di livelli superficiali in corrispondenza del momento di massimo sovralzo del livello medio mare. Dalle immagini si evince che le forzanti al modello, oscillazioni di marea e moto ondoso, sono responsabili della creazione di un campo di corrente diretto verso ponente e di un incremento del livelli a costa massimi di 0.40-0.45m.

In Figura 4.24 sono illustrate le serie temporali di livello in corrispondenza di diversi punti alla foce del torrente ed in corrispondenza del mareografo di Genova. La posizione dei punti di estrazione è illustrata in Figura 4.25. Dal grafico appare chiaro che i punti più vicini alla foce risultano essere caratterizzati da sovralzi maggiori. E' interessante notare, inoltre, come l'effetto del wave setup, valutabile come la differenza tra le serie dei livelli ai punti P1-P7 e la serie registrata al mareografo di Genova, risulta praticamente nullo fino a quando l'altezza d'onda rimane al di sotto di una determinata soglia (Hs circa pari a 2 m), mentre risulta essere massimo nell'intorno del picco della mareggiata.

Di conseguenza, per mantenere una condizione a favore di sicurezza si è considerato il sovralzo massimo come condizione allo sbocco della copertura: si è dunque optato per I serie di livello P1.





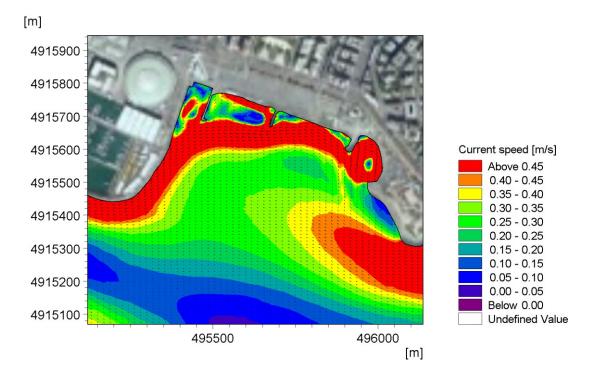


Figura 4.22 Distribuzione dei campi di corrente alla foce del torrente Bisagno in corrispondenza dell'istante di massimo sovralzo del livello medio mare.

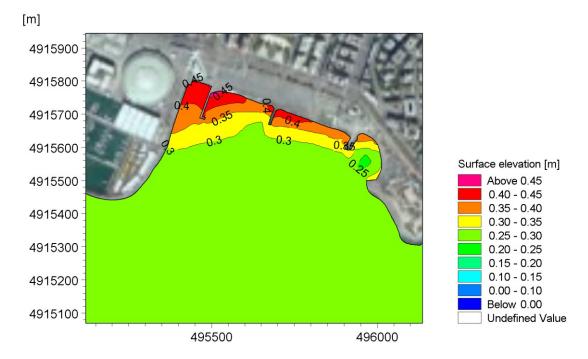


Figura 4.23 Distribuzione dei livelli alla foce del torrente Bisagno in corrispondenza del massimo sovralzo del livello medio mare.





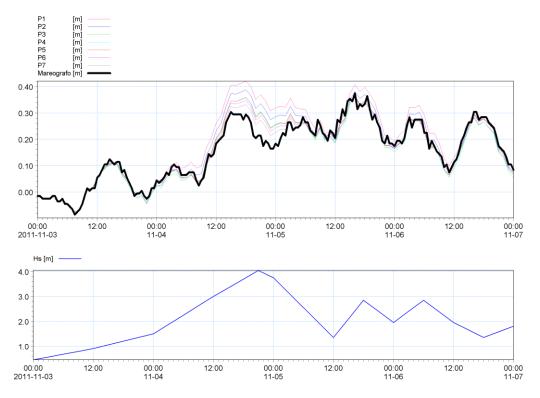


Figura 4.24 Serie temporali dei livelli in diverse posizioni in prossimità della foce del torrente Bisagno ed in corrispondenza del mareografo di Genova (grafico sopra). Il grafico sotto riporta la serie temporale di altezza d'onda al largo di Genova.

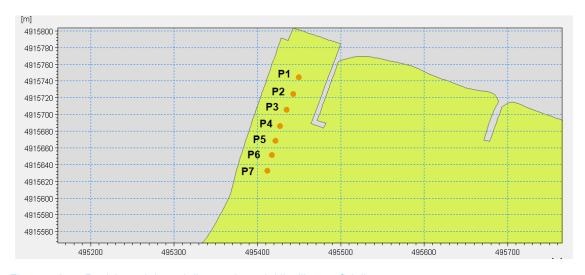


Figura 4.25 Posizione dei punti di estrazione dei livelli superficiali.

# 4.3.4 Messa a punto del setup bidimensionale

Per la messa a punto del modello MIKE FLOOD, dopo aver realizzato il modello monodimensionale dell'alveo inciso con il codice MIKE 11 HD, si è proceduto alla costruzione del modello bidimensionale delle aree vallive allagabili in sponda destra e in sponda sinistra utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 HD del DHI descritto nell'allegato D.





Successivamente, utilizzando il codice MIKE FLOOD, si è proceduto all'accoppiamento dei due modelli (monodimensionale e bidimensionale) mediante collegamenti laterali distribuiti lungo le sponde incise del torrente.

Nei paragrafi successivi vengono descritte le caratteristiche principali del modello.

# 4.3.4.1 Costruzione della griglia di calcolo

In un modello bidimensionale alle differenze finite, come MIKE 21, la descrizione geometrica del terreno è eseguita definendo la quota media in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato, a partire dai dati rilevati, mediante tecniche di interpolazione. Nel caso attuale, invece, il DTM è stato fornito direttamente dal Committente.

Il modello del terreno fornito è costituito dal rilevo Lidar predisposto dal Ministero dell'Ambiente, disponibile sull'intero territorio nazionale per una fascia di alcuni km dal litorale. Il DTM fornitoci ha dimensione di cella pari a 1x1 m, e sistema di riferimento Gauss-Boaga.

Sono state rese disponibili dal Committente due gruppi di tavolette DTM, uno per la parte costiera e la seconda per la zona più interna. In particolare, le tavolette associate a ciascun gruppo sono le seguenti (il nome contiene le coordinate in gradi sessadecimali del vertice in basso a sinistra):

Tabella 4.3 Tavolette del DTM del Ministero dell'Ambiente sull'area di studio fornite dal Committente.

Tavolette DTM	
Costa	Zona interna
44390893_0101	44420894_0101
44390894_0101	44420895_0101
44390895_0101	44420896_0101
44390896_0101	44420897_0101
44390897_0101	44430893_0101
44400893_0101	44430894_0101
44400894_0101	44430895_0101
44400895_0101	44430896_0101
44400896_0101	44430897_0101
44400897_0101	44440894_0101
44410893_0101	44440895_0101
44410894_0101	44440896_0101
44410895_0101	44440897_0101
44420893_0101	44450895_0101
	44450896_0101
	44450897_0101

Essendo la zona in esame estesa su entrambe le aree dei due gruppi di DTM, si è resa necessaria l'unione delle tavolette della zona costiera e di quella interna. In Figura 4.26 è riportata l'estensione dei due gruppi di DTM, unitamente al reticolo del modello monodimensionale: la linea di confine tra i due atraversa l'alveo del Torrente Biagno all'altezza della passerella Firpo, mentre non interessa il bacino del Fereggiano.





Si è verificato come, in corrispondenza della linea di adiacenza dei due gruppi di DTM, vi fossero differenze di quote altimetriche generalmente inferiori a 0.2 m, ma in alcuni casi anche superiori a 0.5 m. Di conseguenza, per evitare punti di discontinuità per quanto di piccola entità, si è effettuata un'operazione di "smoothing" in corrispondenza della linea di suddivisione tra i due gruppi. Nello specifico, si è proceduto a un'interpolazione delle quote su una fascia di pochi metri a cavallo della linea, seguito dalla verifica che non fossero rimasti punti con gradienti eccessivi di quota.

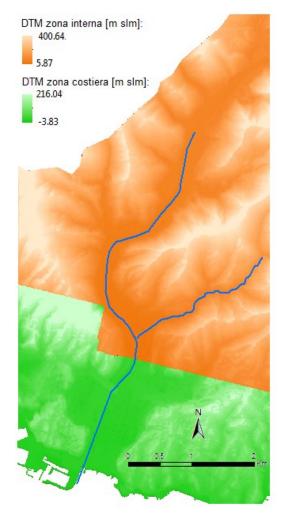


Figura 4.26 Estensione dei gruppi di DTM relativi alla zona costiera (verde) e alla zona più interna (arancione). La linea blu indica la planimetria del modello 1D.

A valle della costruzione e correzione del DTM, si è provveduto a ricampionare la griglia di calcolo, in modo da mantenere una buona performance del modello in termini di tempi di calcolo senza perdere dettaglio nella schematizzazione degli elementi che concorrono a direzionare le acque di esondazione.

Si è così creata una griglia con dimensione di cella pari a 3x3 m: tale dimensione è infatti sufficiente a mantenere la geometria anche degli elementi di dimensione inferiore interferenti col deflusso (ad es., strade) ma consente di ridurre notevolmente il numero di celle di calcolo che il codice numerico deve considerare. Il ricampionamento da 1 m a 3 m è stato effettuato associando alla nuova cella il valor medio delle 9 celle costituenti.

Gli unici elementi di dimensione inferiore a 3 m sono i muretti spondali presenti lungo il Torrente Bisagno e nel tratto tra le due coperture del Rio Fereggiano. La loro dimensione trasversale, in realtà, è inferiore al metro, per cui anche il DTM originale (cellsize=1 m) non ne tiene compiutamente in conto, ma tende a limarne le quote alla sommità. Per mantenere comunque la





quota massima definita dal DTM originale, e dunque non perdere informazione relativamente a questi elementi longitudinali, si è provveduto a effettuare un post processamento del DTM che consentisse di mantenere tale dato.

Si è così provveduto a identificare i tratti dove sono presenti, in sponda destra o sinistra, i muretti spondali: la Figura 4.27 riporta la localizzazione di detti muretti. Sulle celle così identificate si è proceduto, sul DTM originale a 1 m, a effettuare un ricampionamento a 3 m con un differente metodo di calcolo della quota della nuova cella: invece di associarle il valor medio delle quote delle celle originali, si è posta pari al loro valore massimo. In tal modo ci si è assicurato di mantenere la massima quota presente nel rilievo Lidar fornito.

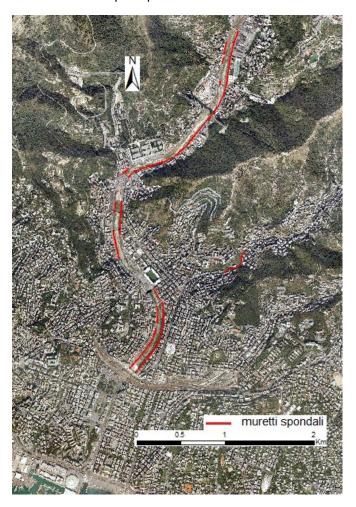


Figura 4.27 Presenza di muretti spondali lungo le aste del Torrente Bisagno e Rio Fereggiano, tenuti in conto nella costruzione della batimetria di calcolo.

A valle della costruzione e affinamento della griglia di calcolo a 3x3 m di dimensione di cella è stato necessario aggiungere l'ingombro degli edifici. Infatti il DTM originale contiene l'informazione della quota del suolo, non degli elementi presenti al di sopra di esso quali edifici, vegetazione, etc. Nell'ambito di una modellazione bidimensionale (e analogamente in un caso accoppiato 1D+2D, come quello attuale) la considerazione degli edifici, e in generale di tutti quegli elementi che non possono venire scalzati dalle acque, risulta di fondamentale importanza per una corretta simulazione del deflusso in ambito urbano.

L'aggiunta dell'impronta delle strutture antropiche nella griglia di calcolo è stata effettuata utilizzando le CTR in formato vettoriale (dwg), fornite dal Committente.





Oltre alla CTR, si è effettuata un'analisi comparativa con foto satellitari recenti e sopralluoghi per identificare eventuali strutture non presenti nella CTR o variazioni rispetto a quest'ultima. Si sono così aggiunte alcune strutture e si sono affinati alcuni punti della griglia.

Un esempio è la modifica della griglia con l'inserimento al di sotto del piano ferroviario dei varchi di via Canevari, Borgo Incrociati (in destra idrografica) e di via Archimede (sinistra orografica), assenti nel DTM Lidar originale. Inoltre, sempre in sponda sinistra in corrispondenza della copertura ferroviaria si sono corretti i valori di altimetria del varco di Corso Sardegna: il sottopasso risultava, in corrispondenza dell'incrocio con via Tolemaide, allargarsi in maniera non rispondente alla realtà (Figura 4.28).



Figura 4.28 Esempio di correzione della griglia di calcolo: inserimento dei varchi di via Canevari, Borgo Incrociati, via Archimede e Corso Sardegna al di sotto della copertura ferroviaria di Brignole. Immagine superiore: DTM Originale; immagine inferiore: griglia corretta con l'inserimento dei varchi (oltre all'integrazione degli edifici e mascheramento dell'alveo attivo).

In vista dell'utilizzo della batimetria di calcolo in un modello accoppiato 1D+2D (MIKE FLOOD), si è dovuto procedere a un ulteriore processamento dI grigliato: si è "mascherato" l'alveo attivo associando valori di "land values" (nel caso attuale pari a 230 m s.l.m.), ovvero un valore che il modello associa alle celle inattive. Tale operazione è legata alla necessità di evitare che il volume di invaso associato all'alveo sia tenuto in conto due volte, una volta dal modello 1D e la seconda dal bidimensionale: eliminando dalla batimetria le celle di alveo ci si assicura che queste ultime siano considerate solo nella simulazione monodimensionale.





Infine si è sagomata la griglia di calcolo mantenendo i valori effettivi solo nelle zone a cavallo dei tratti d'alveo in esame, in una fascia di ampiezza ragionevolmente estesa per contenere le acque di esondazione. Il resto delle celle sono state poste a "land value" e dunque eliminate dal calcolo. In Figura 4.29 si riporta l'immagine della griglia di calcolo definitiva: in rosso le celle di calcolo poste a "land value", relative dunque sostanzialmente a edifici, alveo e zone non raggiungibili dall'esondazione.

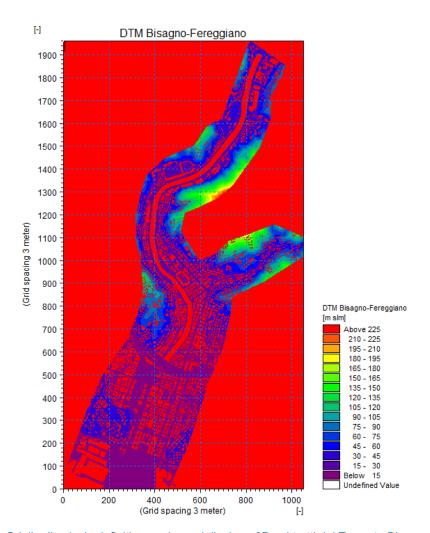


Figura 4.29 Griglia di calcolo definitiva per la modellazione 2D sui tratti del Torrente Bisagno e Rio Fereggiano, con dimensione di cella pari a 3x3 m.

Relativamente al Rio Fereggiano, la griglia di calcolo include il tratto dalla confluenza col Bisagno sino a poche decine di meti a monte dell'imbocco della copertura di Largo Merlo. Dunque i primi 900 m circa del modello monodimensionale non ricadono nell'area coperta dalla batimetria: tale scelta non ha influenze sull'output della modellazione in quanto l'esondazione si è verificata nel tratto a pelo libero tra le due coperture, ma consente di simulare in maniera più aderente alla realtà la traslazione del volume liquido sino al tratto dove ha luogo il sormonto.

#### 4.3.4.2 Scabrezza idraulica

Il modello MIKE21 consente di inserire il parametro di scabrezza sia come valore unitario su tutto il dominio, sia attraverso una mappa di valori distribuiti. La zona modellata in bidimensionale è interamente in ambito urbano, per cui si è adottato un valore basso di scabrezza (alto valore del coefficiente di Gauckler-Strickler), così da tenere in conto la scarsa resistenza al deflusso offerta da cemento e asfalto.





Nel caso in esame si è scelto dunque di associare un valore di Gauckler-Strickler pari a 60 m<sup>1/3</sup>/s sull'intera area (ad esclusione delle celle inattive), con alcune eccezioni. Si è infatti posto un valore inferiore (pari a 40 m<sup>1/3</sup>/s) in corrispondenza dei sottopassi che attraversano la copertura ferroviaria e della zona verde di fronte alla stazione Brignole: in tal modo si è tenuto in conto della presenza di ostacoli o ostruzioni che si possano essere stati presenti nei tunnel sotto la copertura ferroviaria, e della resistenza al moto offerta dalla diversa tipologia di uso suolo (alberi, arbusti, prato) presso i Giardini di Brignole.

## 4.3.4.3 Condizioni al contorno

Come per il modello monodimensionale, anche il bidimensionale ha necessità di impostare delle condizioni al contorno del dominio di calcolo. In aggiunta a eventuali boundary interne specificate dall'utente, il modello in automatico richiede la specificazione delle condizioni sulle celle di contorno che hanno un valore inferiore al "land value" (230 m s.l.m. nel presente modello). Sulle celle inattive poste a bordo griglia, invece, il modello associa una condizione di flusso nullo attraverso la cella: in pratica, considera le celle inattive come non sormontabili.

Nel modello dell'evento del novembre 2011, la forzante deriva esclusivamente dalle portate non contenute nell'alveo dei due corsi d'acqua: ovvero, il volume liquido schematizzato dal modello bidimensionale deriva solo dalle acque uscenti per sormonto arginale dal modello 1D. Di conseguenza non sono state inserite condizioni di monte nel modello 2D.

Relativamente alle condizioni di valle, per l'evento in esame le acque di esondazione non hanno raggiunto il mare, per cui non sarebbe stata necessaria una modellazione della boundary di valle. Per rendere il modello più generale, però si è comunque scelto di inserire una condizione di livello marino di fronte allo sbocco del Torrente Bisagno: si è così specificata la stessa condizione tempo-variante utilizzata allo sbocco del Bisagno nel modello monodimensionale, descritta in dettaglio al par.4.3.3.3.

Si è dunque schematizzata una porzione di mare sino a circa 400 m al largo dello sbocco del Torrente Bisagno, per una larghezza pari a circa 200 m. Il resto della superficie occupata dalle acque marine è stata posta a "land value", in quanto non influente sulla modellazione. La Figura 4.30 illustra lo specchio di mare (colore blu) dove si è posta la boundary di livello.



Figura 4.30 Zona di mare di fonte alla foce del Torrente Bisagno dove è stata posta la condizione di livello tempo-variante (blu). In grigio sono indicate le celle inattive.





#### 4.3.4.4 Viscosità turbolenta

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di "eddy viscosity". Tale parametro varia da 0 a 1 e il codice consente di specificare un valore costante sull'intero dominio di calcolo, oppure di differenziarlo nello spazio tramite una griglia di dimensioni e cellsize analoghe alla batimetria. Inoltre, è possibile selezionare il tipo di espressione che tiene in conto della viscosità: "flux based" o "velocity based".

Valori bassi (tendenti a 0) di tale parametro consentono una migliore considerazione delle dinamiche turbolente, dunque a piccola-piccolissima scala, mentre valori tendenti a 1 comportano maggiore stabilità del modello a scapito di una minor dettaglio dei risultati alle scale turbolente.

Nel presente modello si è scelto un coefficiente di eddy viscosity pari a 0.2 m²/s, associato alla formulazione "velocity based". Si è scelto un valore basso del parametro, unito all'espressione di maggior dettaglio, in modo da simulare al meglio anche i processi legati alle situazioni di maggiore pendenza e alle dinamiche più vorticose: un esempio è l'esondazione del tratto a pelo libero tra le due coperture del Fereggiano.

# 4.3.4.5 Timestep di simulazione

Il passo di integrazione del modello definisce l'intervallo tra una soluzione delle equazioni del moto e la successiva. In un modello di simulazione è opportuno impostare un intervallo di integrazione sufficientemente basso in modo da ottenere risultati il più possibile dettagliati e affidabili e evitare l'instaurarsi di instabilità numeriche.

Un indice della bontà dell'intervallo scelto è dato dal numero di Courant, che esprime il numero di celle di griglia interessate dall'informazione (di tirante idrico e flusso) in un timestep di simulazione. Come regola generale, tale fattore dovrebbe essere non superiore a 2.

Vista la dimensione di cellsize piuttosto ridotta (3x3 m) e le velocità in gioco in un caso di esondazione come quello in esame, si è scelto un intervallo di integrazione pari a 0.5 s, in modo da minimizzare l'instaurarsi di instabilità e fornire output ad alto grado di dettaglio.

# 4.3.5 Accoppiamento modelli 1D e 2D

Come accennato in precedenza, i due modelli mono e bidimensionale, costruiti originariamente in modo indipendente, sono stati accoppiati all'interno dell'interfaccia MIKE FLOOD.

L'accoppiamento richiede la scelta di punti o tratti dove i due modelli si interfaccino, consentendo il trasferimento di volume liquido. Il codice prevede diverse tipologie di interfacciamento, a seconda delle caratteristiche specifiche del collegamento.

Nella presente schematizzazione si sono inseriti dei collegamenti longitudinali (lateral link) lungo tutto il tratto del Torrente Bisagno, con l'ovvia eccezione dei tratti tombinati, sia in sponda destra sia in sinistra. Tali collegamenti sono stati posizionati in corrispondenza delle sponde del corso d'acqua, in modo che l'intero alveo attivo, schematizzato all'interno del modello monodimensionale, fosse compreso al loro interno. Per quanto riguardo il Rio Fereggiano, si sono predisposti i lateral link lungo le due sponde del tratto a pelo libero tra la tombinatura di Largo Merlo e quella terminale.

Relativamente al dato altimetrico considerato come quota di sormonto arginale, si è posto pari alle quote specificate nel modello 1D: quest'ultimo infatti, come illustrato al par.4.3.3.1, contiene le quote della sommità dei muretti spondali, non presente invece nella batimetria di calcolo.

Per i tratti nei quali si sono verificate rotture dei muretti spondali in corso d'evento, l'interfaccia tra modello 1D e 2D è stata schematizzata in modo da tenere in conto di tale dinamica. Nel





dettaglio, la quota di sormonto per tali tratti è stata fatta variare nel tempo (a time-step di 5 minuti) in modo da riprodurre il collasso del muretto secondo le tempistiche riportate nelle fonti informative disponibili.

Relativamente al Torrente Bisagno, si è inserita la rotta arginale (Figura 4.31) di estensione pari a circa 20 m tra i due distributori ERG e ENI a monte della copertura di Brignole (progr. 5315-5336): in assenza di informazioni sul timing della rotta, si è assunto che il collasso abbia avuto luogo circa 10 minuti prima del passaggio dell'onda di piena, ovvero intorno alle 13:50.



Figura 4.31 Localizzazione planimetrica (sopra) e fotografia (sotto) del muretto arginale collassato in sponda destra a monte dell'imbocco della copertura di Brignole.

I muretti spondali lungo il tratto del Rio Fereggiano compreso tra le due tombinature hanno subito collassi in vari punti. Tramite informazioni tratte da varie fonti, in particolar modo dalla relazione della Procura, si sono schematizzate le rotte nei seguenti segmenti (Figura 4.32):

- rotta 1: tra lo sbocco della copertura di Largo Merlo e la fermata dell'autobus Fereggiano 3/Moro (progressive 1588.91-1712.70), istante temporale di collasso ore 12:50;
- rotta 2: da pochi metri a monte di B.C. Serramenti a circa 20 m a valle dello stesso (progressive 1771-1825.70), istante temporale di collasso ore 12:30;





• rotta 3: tratto di circa 15 m, con termine in corrispondenza della piccola costruzione in sponda sx (progressive 1903-1918.81), istante temporale di collasso (stimato) ore 12:50.

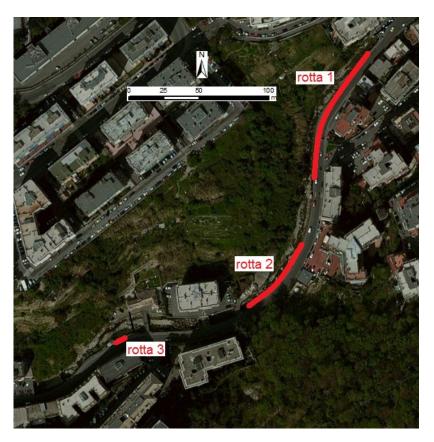


Figura 4.32 Localizzazione planimetrica dei 3 tratti dove i muretti spondali sono collassati nel segmento compreso tra le coperture di Largo Merlo e terminale.

#### 4.3.6 Risultati

Di seguito si illustrano i risultati della calibrazione per l'evento del novembre 2011. Le finalità della fase di calibrazione sono plurime. In primo luogo, riguardano la ricostruzione della geometria delle sezioni trasversali e delle strutture che insistono sull'alveo dei corsi d'acqua considerati (modello 1D). In aggiunta alla caratterizzazione dell'alveo attivo, si rende necessario dotarsi dell'informazione di livello del terreno su tutta l'area interessata dall'evento (modello 2D), attività che consente una validazione e verifica del dato altimetrico utilizzato per l'alveo attivo. L'attività di calibrazione, inoltre, prevede la descrizione delle ipotesi assunte in caso di assenza di informazione o di dati discordanti, unita all'elenco degli aggiornamenti o modifiche apportate alle geometrie inserite nel modello. L'attività ha previsto una stretta sinergia tra la taratura della componente idrologica, intesa come trasformazione afflussi-deflussi, e la componente idrodinamica.

L'attività di calibrazione consente dunque di tarare i principali fattori modellistici che influiscono sulla dinamica dell'evento, così che sia possibile utilizzare il medesimo schema modellistico, ad esclusione ovviamente delle forzanti e delle condizioni di valle, per la simulazione di eventi sintetici quali, a titolo esemplificativo, quelli associati a specifici tempi di ritorno o a scenari di particolare interesse.

Relativamente agli elementi oggetto di taratura, il codice MIKE FLOOD restituisce in output, a richiesta dell'utente, diverse variabili idrodinamiche: per ognuna di esse fornisce i valori sulla





griglia di calcolo per ogni timestep di salvataggio, tipicamente diverso (maggiore) rispetto al timestep di simulazione.

Nel modello oggetto di questo studio gli output idrodinamici sono stati salvati con intervalli di 5 minuti, in modo da avere la possibilità di analizzare la dinamica di propagazione delle acque esondate con elevato dettaglio temporale, oltreché spaziale (3x3 m).

Avendo a disposizione tale tipo di informazioni, la taratura è stata effettuata sulla base di vari elementi, in particolare:

- i livelli del pelo libero in alveo;
- estensione delle aree allagate;
- tiranti idrici in area urbana;
- velocità di deflusso in area urbana;
- timing dell'evento.

Tali parametri forniscono informazioni dettagliate sulla propagazione e interazione delle acque di piena, consentendo anche la comparazione delle risultanze modellistiche con le osservazioni e le testimonianze dirette della dinamica dell'evento.

#### 4.3.6.1 Dinamica dell'evento simulato e confronto con le evidenze

La simulazione accoppiata 1D+2D ha riguardato l'intera durata dell'evento, ovvero tutto l'arco della giornata del 4 novembre 2011. Di seguito si illustra la dinamica dell'evento di piena come restituita dal modello di simulazione. Tutti i riferimenti temporali riportati nel seguito, a meno di indicazioni contrarie, sono espressi in ora locale (ora UTC+1).

La prima esondazione si verifica sul Fereggiano intorno alle 12:20 in corrispondenza dei primi due ponti nel tratto a cielo aperto tra le due coperture (Figura 4.33). Tale accadimento trova riscontro nella relazione della Procura, dove con documentazione fotografica si mostra come poco prima delle 12:22 il sormonto della seconda passerella dia luogo a esondazione in sponda sinistra, lungo via Fereggiano (Figura 4.34).

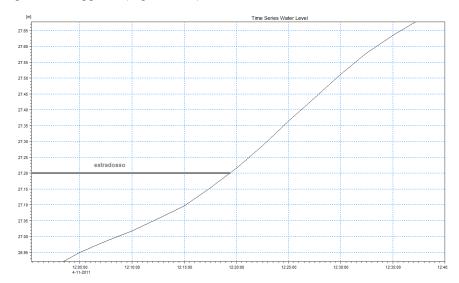


Figura 4.33 Livello del pelo libero subito a monte della seconda passerella nel tratto del Rio Fereggiano tra le due tombinature (in grigio il livello dell'estradosso): si nota come il sormonto della struttura abbia luogo intorno alle 12:20.







Figura 4.34 Immagine fotografica tratta dalla relazione della Procura (fig. 9.2.4) dove si mostra come il sormonto della 2°passerella nel tratto del Rio Fereggiano tra le due tombinature abbia luogo poco prima delle 12:22.

Il secondo punto di esondazione, sempre sul Rio Fereggiano, è localizzato in corrispondenza del Centro Serramenti, ed è legato al collasso del muretto in sinistra, avvenuto intorno alle 12:30, come specificato nella relazione della Procura. Come descritto in precedenza (par.4.3.5), tale rottura arginale è stata schematizzata tramite una quota spondale tempo-variante, così come le altre due rotte registratesi nel tratto intorno alle 12:50.

Secondo le testimonianze video-fotografiche la copertura terminale del Rio Fereggiano entra in pressione intorno alle 12:45 (Figura 4.36). Nel modello il funzionamento in pressione della tombinatura risulta avvenire un po' in anticipo rispetto a tale orario, con il livello del pelo libero che raggiunge l'intradosso della struttura pochi minuti prima delle 12:30 (Figura 4.35). Il sormonto della copertura viene dunque simulato, nel modello, circa 15 minuti prima di quanto risulti dalle testimonianze.

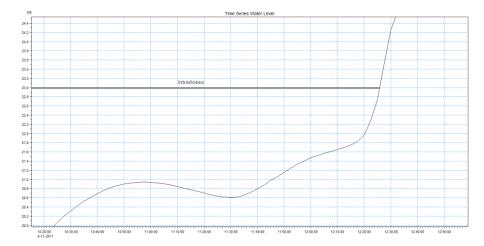


Figura 4.35 Livello del pelo libero alla sezione di imbocco della copertura terminale del Rio Fereggiano (in grigio il livello dell'intradosso): si nota come in funzionamento in pressione della struttura inizi poco prima delle 12:30.







Figura 4.36 Immagine fotografica tratta dalla relazione della Procura (fig. 9.2.8) dove si mostra l'entrata in pressione della copertura terminale del Rio Fereggiano, avvenuta intorno alle 12:45.

Il passaggio del colmo di piena in corrispondenza dell'imbocco della copertura terminale risulta verificarsi intorno alle 13:00, mentre il modello lo simula alle 13:08.

Non sono disponibili valori misurati di velocità delle acque di piena, in nessuna zona interessata dall'evento in esame. Al fine di effettuare una sorta di taratura anche su tale parametro idrodinamico, si sono analizzati i filmati disponibili, in modo da tentare una stima della velocità di deflusso in maniera indiretta: nello specifico si sono considerati i tempi di spostamento di oggetti flottanti di dimensioni sufficienti (automobili, cassonetti, etc) su tratti di lunghezza nota.

In particolare, per il Rio Fereggiano è stato possibile utilizzare un filmato relativo al tratto degli attraversamenti tra le due coperture, dove si osservano transitare diverse automobili in un tratto che ha una lunghezza pari a  $8\,$  m (misurato dagli scriventi durante un sopralluogo). Di conseguenza, è stato possibile stimare in circa  $3.0-4.5\,$  m/s la velocità delle acque in tale tratto. Come illustrato in Figura 4.37, le velocità del deflusso stimate dal modello nel medesimo tratto risultano in buona concordanza con tale stima.







Figura 4.37 Stima della velocità di deflusso delle acque di piena in corrispondenza degli attraversamenti nel tratto del Rio Fereggiano tra le due tombinature, tramite analisi dei filmati (immagine inferiore). Sulla base di tale stima si è effettuata la taratura delle velocità simulate sia in alveo sia sul piano strada (immagine superiore).

In particolare, si osserva una differenza tra i valori di velocità in alveo e quelli extra-alveo, nel caso specifico lungo via Fereggiano: i primi sono significativamente più alti dei secondi, e superiori alla stima della velocità osservata. In alveo, infatti, si simulano velocità massime superiori a 4 m/s, mentre lungo via Fereggiano i valori massimi sono inferiori a 3 m/s. Tali differenze rispecchiano dinamiche che effettivamente si realizzano in caso di esondazioni. Le velocità delle acque di sormonto tendono a risultare inferiori rispetto a quelle in alveo per due ragioni principali: il processo di sormonto spondale implica comunque perdite di carico che comportano una diminuzione dell'energia associata al volume esondato e a ciò si aggiungono di solito (e il caso in esame fa parte di questa casistica) tiranti relativamente bassi che dunque risentono maggiormente dell'effetto di scabrezza del fondo.

I valori simulati lungo via Fereggiano risultano inferiori rispetto a quelli osservati-stimati indicativamente di un 30%: tale scarto è in accordo con i valori usuali nella pratica modellistica e deriva da come il modello calcola la velocità per ogni cella e dal dettaglio della batimetria. Relativamente al primo aspetto, un codice bidimensionale quale il MIKE FLOOD non discrimina i valori delle grandezze idrodinamiche lungo la verticale (a differenza di un modello 3D), ma effettua una media lungo tale dimensione: conseguentemente i valori di velocità tendono a risultare inferiori rispetto a quelli osservati in corrispondenza degli strati superiori della corrente





(tale aspetto assume tanto più rilievo quanto più sono significativi i tiranti idrici nelle aree di esondazione). La definizione della batimetria, invece, ha effetto nel definire le velocità di deflusso per una ragione simile a quella appena menzionata, ma relativamente alla dimensione piana: il valore di velocità per ogni cella è relativo, infatti, al valore medio della velocità sull'intera cella di calcolo, oltreché lungo la verticale. Ciò comporta che, in caso di deflussi con variazione di velocità su lunghezze dello stesso ordine della dimensione di cella, il valore risulti inferiore rispetto al massimo valore realizzatosi all'interno della cella.

In seguito alle esondazioni nel tratto non tombinato le acque del Fereggiano si propagano verso valle, lungo via Fereggiano, per poi raggiungere la zona in sponda sinistra del Torrente Bisagno. Qui una frazione del volume liquido si disperde nel tessuto urbano, mentre la maggior parte prosegue lungo la direttrice di Corso Sardegna verso la copertura ferroviaria di Brignole (Figura 4.38).

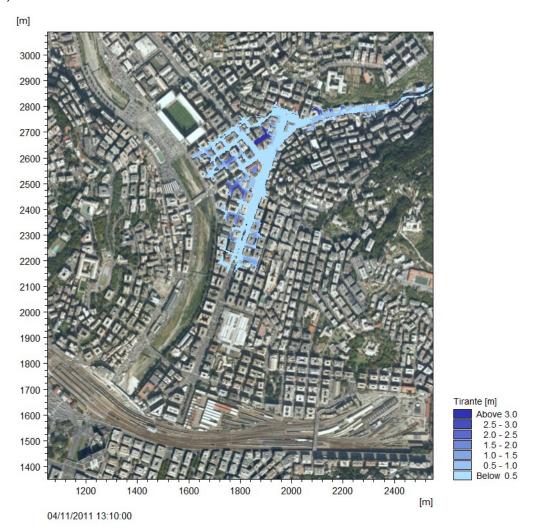


Figura 4.38 Propagazione del deflusso: intorno alle 13:10 le acque esondate del Fereggiano interessano un ampio tratto della sponda sinistra del Torrente Bisagno.

Nell'intervallo tra le 13:20 e 13:30 il Torrente Bisagno esonda sia in destra sia in sinistra subito a monte della copertura di Brignole, timing coerente con quanto riportato sulla relazione della Procura.

Alle 14:00 le acque risultano interessare completamente l'area di Piazza Verdi (Figura 4.39), antistante la stazione di Brignole, oltre a propagarsi a valle di via Tolemaide. L'allagamento di Piazza Verdi risulta confermato da un'immagine fotografica delle 13:59, riportata nella relazione della Procura (Figura 4.40).





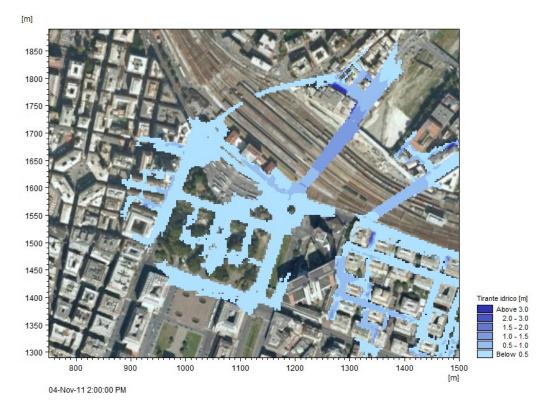


Figura 4.39 Propagazione del deflusso: intorno alle 14:00 la zona di Piazza Verdi antistante la stazione Brignole risulta allagata, così come via Tolemaide e le parallele più a valle.



Figura 4.40 Immagine fotografica tratta dalla relazione della Procura (fig. 9.3.8) scattata alle 13:59: Piazza Verdi risulta completamente allagata.

Inoltre, circa allo stesso momento sulla passerella Firpo, localizzata circa 550 m a monte della copertura di Brignole, si è registrato il massimo livello di pelo libero. In Figura 4.41 si riporta il confronto tra i livelli in corrispondenza della passerella misurati dall'idrometro (ora UTC) e restituiti dal modello (ora locale, ovvero UTC+1): si nota come sia il valore al picco (11.06 m s.l.m. misurati contro 11.09 m s.l.m.) e tempo al picco (intorno alle 13:00 ora UTC, ovvero 14:00 ora locale, per il misurato e 14:10 per il modellato) presentino un buon grado di consistenza.





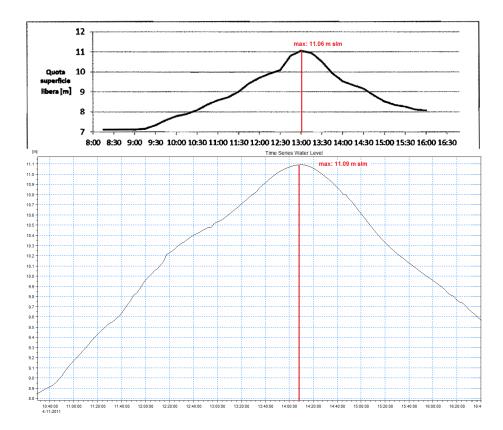


Figura 4.41 Confronto tra livello del pelo libero in corrispondenza della passerella Firpo misurato dall'idrometro (immagine superiore, in ora UTC) e restituito dal modello (immagine inferiore, in ora locale).



Figura 4.42 Propagazione del deflusso: per le 14:30 risulta allagata, a sinistra della stazione Brignole, l'intera zona da via Tolemaide a via Barabino (in corrispondenza della Questura) e, a destra della stazione, l'area sino a via Cesarea e Piazza Colombo.





Per le 14:30 le acque interessano l'intera area da via Tolemaide sino a via Barabino e, nella zona a destra della stazione Brignole, raggiugono via Cesarea e Piazza Colombo (Figura 4.42).

A partire dalle 15:00 circa i tiranti idrici a valle della copertura ferroviaria cominciano a diminuire, ad eccezione dell'area di XX Settembre dove invece il ritiro delle acque procede meno celermente che nel resto della zona (Figura 4.43).



Figura 4.43 Propagazione del deflusso: per le 16:00 le acque tendono a ritirarsi e i tiranti si abbassano sensibilmente anche nella zona a valle della copertura ferroviaria di Brignole.

# 4.3.6.2 Confronto simulato - osservato

# Estensione aree allagate

In Figura 4.44 si riporta la mappa dei tiranti massimi come restituiti dalla simulazione, e l'estensione delle aree interessate dalle acque di piena perimetrata dal Comitato Tecnico di Bacino (CTB).





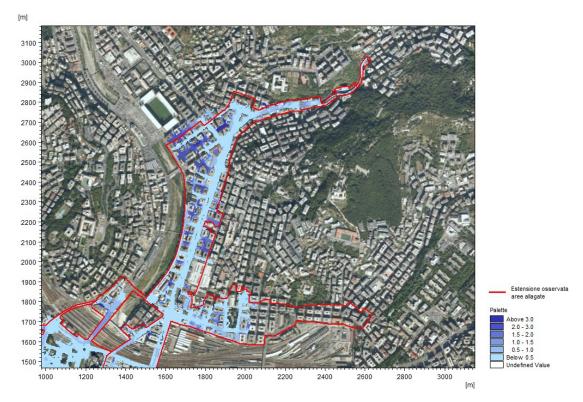


Figura 4.44 Zona a monte della copertura ferroviaria di Brignole: inviluppo dei tiranti massimi da simulazione e perimetrazione delle aree allagate effettuata dal Comitato Tecnico di Bacino (contorno rosso).

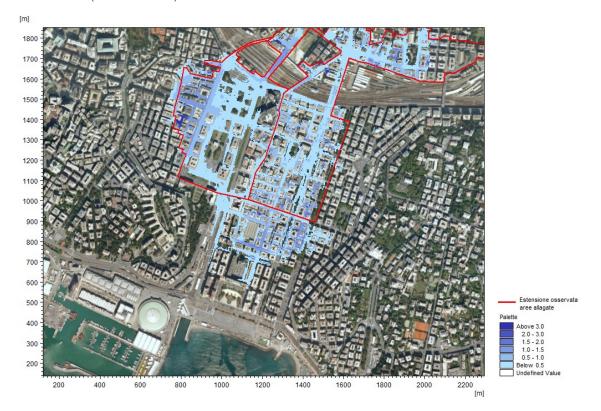


Figura 4.45 Zona a valle della copertura ferroviaria di Brignole: inviluppo dei tiranti massimi da simulazione e perimetrazione delle aree allagate effettuata dal Comitato Tecnico di Bacino (contorno rosso).





La consistenza tra la perimetrazione e l'output del modello è generalmente buona. Nella porzione a monte della copertura terminale (Figura 4.44) vi è una corrispondenza quasi perfetta con la sola differenza significativa localizzata in sponda sinistra nella zona a ridosso del rilevato ferroviario: la simulazione prevede presenza di acqua sino a circa 500 m dalla sponda del Torrente Bisagno, mentre la perimetrazione risulta estendersi per un'ulteriore area all'incirca di pari lunghezza. In realtà tale area aggiuntiva è dovuta alle acque derivanti dal quartiere di S.Fruttuoso, per cui l'incoerenza è solo apparente.

Nell'area a valle della stazione di Brignole rimane un'alta corrispondenza tra perimetrazione e output del modello, con la sola eccezione dell'area a valle di via Barabino. Infatti il deflusso simulato risulta proseguire oltre tale via per circa 250 m, sino a raggiungere via Antonio Cecchi, mentre la perimetrazione del Comitato Tecnico di Bacino non prevede allagamenti a valle di via Barabino.

Volendo escludere un'eventuale incorrettezza della perimetrazione, tale incongruenza può essere legata a più fattori non mutuamente esclusivi: tra gli altri, quote del DTM non corrette a monte della zona a sinistra di via Brigata Bisagno, che comportano un volume liquido eccessivo in questa zona; oppure errori nelle quote del DTM nella zona stessa, che determinano un errata distribuzione dei volumi, ad esempio sottostimando il deflusso laterale verso sinistra in direzione di via Nizza; oppure, è possibile che il modello sovrastimi le portate esondate che attraversano i fornici sottostanti la copertura ferroviaria; infine, può essere leggermente sovrastimato il volume liquido determinato dall'analisi idrologica rispetto a quello effettivamente realizzatosi e che ha alimentato i due corsi d'acqua in esame.

#### Tiranti massimi

In Figura 4.46 si riporta il confronto, relativo alla zona a valle della stazione di Brignole, tra i tiranti massimi simulati dal modello 1D+2D e quelli riportati nella perimetrazione effettuata dal Comitato Tecnico di Bacino (CTB). Si può osservare come l'andamento dei valori osservati sia riprodotto con un buon grado di corrispondenza dal modello, fornendo un'informazione coerente con le osservazioni delle aree maggiormente colpite dall'evento in esame, in termini di battenti idrici.



Figura 4.46 Zona a valle della copertura ferroviaria di Brignole: confronto tra tiranti idrici massimi da modellazione (gradazioni di blu) e da perimetrazione CTB (giallo).





#### Velocità

Gli strumenti di analisi degli output dei codici DHI consentono la visualizzazione, tra l'altro, dei vettori di velocità in ogni istante della simulazione. La perimetrazione del CTB non fornisce tale informazione di dettaglio, ma riporta le direzioni del flusso in diversi punti dell'area interessata dall'evento.

La Figura 4.47 riporta, per la zona a monte della copertura di Brignole, i vettori di velocità simulati per l'istante delle 13:20, in aggiunta alle direzioni del flusso riportate dal CTB. In Figura 4.48 è riportato invece l'inviluppo dei valori massimi di velocità nel medesimo tratto. Il modello accoppiato 1D+2D simula le velocità maggiori lungo via Fereggiano (> 3 m/s con punte intorno a 5 m/s) e, più a valle, Corso Sardegna: in particolare, la velocità di deflusso lungo quest'ultima direttrice risulta superiore a 2 m/s sino a circa 100 m a valle di Ponte Serra, generalmente superiore a 1.5 m/s sino a circa 100 m a monte di Ponte Castelfidardo per poi scendere al di sotto di tale valore a valle di quest'ultimo. L'area compresa tra Corso Sardegna e la sponda sinistra del Torrente Bisagno è interessata da valori significativamente inferiori rispetto alla direttrice principale, con valori di velocità superiori a 1.5 m/s solo nel tratto di Corso Galliera compreso tra la passerella Firpo e Ponte Castelfidardo.

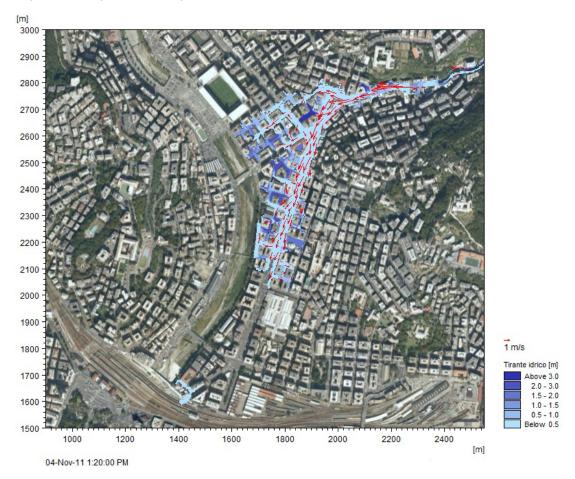


Figura 4.47 Zona a monte della copertura ferroviaria di Brignole: confronto direzioni di deflusso tra simulato (frecce rosse) e perimetrazione CTB (frecce nere), istante 13:30.





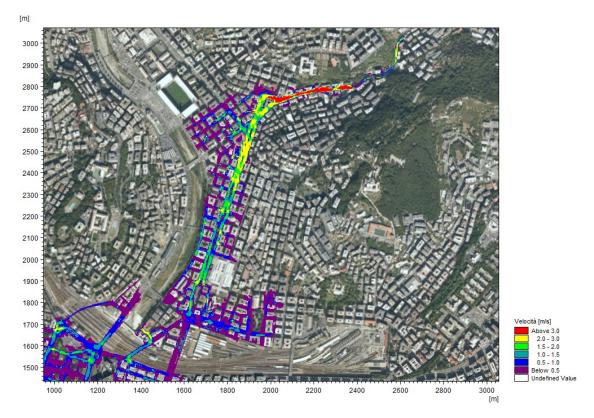


Figura 4.48 Zona a monte della copertura ferroviaria di Brignole: velocità simulate massime di deflusso.

Anche per la zona a valle della copertura ferroviaria di Brignole vi è una buona consistenza tra direzioni di deflusso riportate dal CTB e i vettori di velocità simulati dal modello idrodinamico (Figura 4.49). Viene infatti simulata in maniera corretta la propagazione a destra dello sbocco del sottopasso di via Canevari e la successiva traslazione lungo via Fiume e Via Emanuele Filiberto, sino all'incanalamento lungo via XX Settembre e le parallele sino a Piazza Colombo e via Cesarea. Nell'area a sinistra della stazione Brignole il modello simula, coerentemente con i rilievi del CTB, il deflusso lungo via Tolemaide in direzione dell'inizio di Corso Torino e da qui verso valle, oltre alla propagazione dallo sbocco del sottopasso di via Archimede verso Corso Buenos Aires. Come si osserva in Figura 4.50, le velocità sono generalmente molto basse (inferiori a 0.5 m/s), con picchi però agli sbocchi dei sottopassi e in determinate zone circoscritte (ad es., via Cadorna e l'incrocio tra Corso Torino e Corso Buenos Aires) dove i valori raggiungono e in qualche cosa superano i 2 m/s.







Figura 4.49 Zona a valle della copertura ferroviaria di Brignole: confronto direzioni di deflusso tra simulato (frecce rosse) e perimetrazione CTB (frecce nere), istante 14:15.



Figura 4.50 Zona a valle della copertura ferroviaria di Brignole: velocità simulate massime di deflusso.





#### 4.3.7 Analisi conclusiva

Nel presente capitolo si descrive riassuntivamente il lavoro svolto, comprensivo delle varie ipotesi e scelte modellistiche effettuate, e i risultati ottenuti. Si riportano in conclusione alcune considerazioni sulla taratura effettuata.

# 4.3.7.1 Finalità dello studio

Il presente studio ha riguardato la modellazione idrodinamica dell'evento del 4 novembre 2011 sui tratti terminali dei bacini idrografici del Rio Fereggiano e del Torrente Bisagno, quest'ultimo sfociante a mare in corrispondenza dell'area Fiera di Genova.

Tale evento ha colpito quasi tutta l'area urbana della città di Genova, causando danni generalizzati ma concentrati soprattutto nella zona oggetto del presente studio. Sull'area in oggetto si sono registrate esondazioni sul Torrente Bisagno nel tratto tra Ponte Castelfidardo e l'imbocco della copertura di Brignole e sul Rio Fereggiano nel tratto a cielo aperto compreso tra la tombinatura di Largo Merlo e quella terminale.

Scopo del presente studio è stata la calibrazione di un modello idrodinamico accoppiato 1D+2D, sviluppato col codice MIKE FLOOD del DHI, basata sull'evento del novembre 2011. Tale attività è finalizzata alla generazione di un setup che possa essere utilizzato con buona affidabilità per la simulazione degli effetti di eventi sintetici di interesse per la valutazione del rischio idraulico nell'area in esame.

Per la geometria delle sezioni traversali nei tratti di indagine, comprese le strutture di attraversamento, si è potuto far riferimento a setup modellistici e rilievi precedenti, messi a disposizione dal Committente.

#### 4.3.7.2 Creazione modello 1D

Il setup modellistico monodimensionale è relativo alla simulazione del deflusso alveato dei due corsi d'acqua oggetti di studio. In particolare, il Torrente Bisagno è stato modellato a partire da circa 200 m a monte di Ponte Feritore sino alo sbocco a mare al termine della tombinatura di Brignole, circa 6.5 km più a valle. Il tratto del Rio Fereggiano invece si sviluppa da circa 500 m a monte del viadotto autostradale "Marassi", presso l'abitato di Quezzi, sino alla confluenza nel Torrente Bisagno pochi m a valle del Ponte Serra, per una lunghezza circa pari a 2.8 km.

Come accennato in precedenza, le sezioni del modello sono state ricavate da precedenti modelli e rilievi. Le sezioni disponibili per il Torrente Bisagno non riportavano la quota di sommità dei muretti spondali, presenti in maniera discontinua lungo entrambe le sponde del corso d'acqua. Per mantenere la massima aderenza alla realtà, si sono aggiunti tali muretti.

Relativamente al parametro di scabrezza idraulica, la sua stima è stata effettuata sulla base della documentazione fotografica e dei sopralluoghi effettuati, dei valori riportati in letteratura (Piano di Bacino, Manuale dell'Ingegnere, etc) e, soprattutto, sulla concordanza dei valori idrodinamici (in particolare il tirante idrico) con le osservazioni.

Per il Torrente Bisagno si è così assunto un parametro di Gauckler-Strickler pari a 30 m<sup>1/3</sup>/s per l'intero tratto.

Il Rio Fereggiano presenta una situazione notevolmente differente rispetto a quella del Torrente Bisagno, in particolare per la significativamente maggiore tortuosità del tracciato e irregolarità del fondo. Come conseguenza anche di tali considerazioni i valori di Gauckler-Strickler sono risultati inferiori (maggiore resistenza al deflusso) rispetto al corpo idrico recettore e in particolare:

• 25 m<sup>1/3</sup>/s dall'inizio tratto sino allo sbocco della copertura di Largo Merlo;





- 12 m<sup>1/3</sup>/s nei primi 100 m circa a valle dello sbocco della copertura di Largo Merlo;
- 15 m<sup>1/3</sup>/s nel tratto dal Centro Serramenti B.C. sino al terzo attraversamento;
- 25 m<sup>1/3</sup>/s nel tratto a valle dell'ultimo attraversamento e l'imbocco della copertura terminale;
- 30 m<sup>1/3</sup>/s al di sotto della copertura terminale.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno applicate, nell'ambito del presente studio si sono stimati, a partire dai dati pluviometrici disponibili, gli idrogrammi di portata per i due bacini del Torrente Bisagno e del Rio Fereggiano per l'evento in esame. Tale stima è stata effettuata tramite analisi della risposta idrologica dei due bacini attraverso il modello afflussi-deflussi UHM, implementato nel codice di calcolo MIKE11RR del DHI. Si sono così calcolati gli idrogrammi di portata forniti come input al modello 1D.

Per il Torrente Bisagno si è posto in testata l'idrogramma calcolato alla chiusura di Ponte Feritore, oltre all'idrogramma della porzione di bacino compresa da Ponte Feritore sino a Ponte Serra, inserito come contributo distribuito.

Analogamente, per il Rio Fereggiano si è inserito l'idrogramma in testata e quello distribuito sino all'imbocco della tombinatura terminale.

La condizione di valle è stata associata alla sola foce del Torrente Bisagno in quanto le caratteristiche del moto al termine del Rio Fereggiano, ovvero alla confluenza col Torrente Bisagno, sono calcolate in automatico del codice sulla base dell'interazione tra il corpo idrico tributario e il recettore. Come condizione si è considerata la time-series di livello marino alla foce del Torrente Bisagno durante l'evento del novembre 2011, costituita dalle seguenti componenti: la marea astronomica; la variazione del livello di medio mare dovuto alle condizioni di tempesta (storm surge), suddivisa tra la componente attribuibile al vento (wind set-up) e quella relativa alle variazioni di pressione atmosferica (barometro inverso); il sovralzo dovuto al frangimento delle onde (wave setup). Il calcolo delle tre componenti è stato effettuato tramite i codici MIKE 21 SW, MIKE 21 HD FM e MIKE 3 del DHI sulla base dei dati forniti dal mareografo di Genova e dalla boa di La Spezia.

#### 4.3.7.3 Creazione modello 2D

Il modello bidimensionale simula la propagazione del volume liquido esondato nel tessuto urbano. Il dato altimetrico è costituito da una griglia a maglia regolare con un valore di altimetria per ogni cella. La costruzione di tale grigliato, o batimetria, si è basata sul DTM a maglia 1x1 m predisposto dal Ministero dell'Ambiente e fornito dal Committente sotto forma di tavolette di medesima dimensione suddivise in zona costiera e interna.

Per rendere la batimetria adatta all'integrazione nel modello 2D è stato necessario effettuare diversi processamenti del dato. In primo luogo si è verificata la congruenza dei DTM delle due zone (costiera e interna) lungo la linea di contatto: le differenze, generalmente ridotte, tra i due dati sono state risolte effettuando un'interpolazione tra i valori a cavallo della linea di contatto.

Come seconda operazione, si sono ricampionate le celle alla dimensione 3x3 m, ritenuta una dimensione sufficiente a mantenere la geometria anche degli elementi di dimensione inferiore interferenti col deflusso (ad es., strade) consentendo al tempo stesso di ridurre notevolmente il numero di celle di calcolo. Tale procedimento è stato effettuato ponendo attenzione a non alterare le quote spondali dei due corsi d'acqua: la definizione della maglia originale (1x1 m) non è sufficientemente fine per mantenere le quote di sommità di tali muretti, ma si è comunque proceduto in modo da non perdere ulteriormente dettaglio.

Si sono poi aggiunti tutti gli elementi antropici non presenti nel dato originale, in particolare l'impronta degli edifici e dei fabbricati in genere. Infatti tali strutture concorrono in modo primario a direzionare il deflusso extra-alveo, per cui la loro corretta schematizzazione riveste





fondamentale importanza nella modellistica bidimensionale, soprattutto in caso di ambiente urbano. L'integrazione di tali elementi all'interno della batimetria è stata effettuata attraverso l'analisi delle CTR in formato vettoriale (fornite dal Committente) e di immagini satellitari più recenti.

Si è inoltre verificata e, dove necessario, corretta la geometria di elementi chiave quali sottopassi, restringimenti, etc. Si è così riscontrata l'assenza al di sotto del piano ferroviario di Brignole dei varchi di via Canevari, Borgo Incrociati e di via Archimede: si sono aggiunti nella batimetria ricavando la loro geometria dalla CTR. La stessa fonte informativa è stata utilizzata per correggere le quote in corrispondenza del quarto e ultimo sottopasso, ovvero quello di Corso Sardegna, che presentava dimensione trasversale eccessiva in corrispondenza dell'incrocio con via Tolemaide.

Come ultimo processamento del dato grigliato si sono "mascherate" le aree che si intendeva escludere dal calcolo, ovvero alle relative celle è stato associato un valore ("land value") che il codice assume come NoData. Le zone mascherate sono le seguenti:

- l'alveo attivo dei due corsi d'acqua in esame;
- le aree ragionevolmente non interessate dalle acque di esondazione:
- le celle associate al mare non localizzate di fronte allo sbocco del Torrente Bisagno.

Terminata l'attività di processamento della batimetria, si sono stimati i parametri idraulici di base, in particolare la scabrezza.

Il valore di scabrezza è stato stimato, come già per il modello monodimensionale, sulla base sia della letteratura sia della riproduzione delle grandezze idrodinamiche osservate durante l'evento (tirante idrico, velocità). Si è così assunto un valore di Gauckler-Strickler pari a 60 m<sup>1/3</sup>/s sull'intera batimetria, ad esclusione dei varchi sotto il piano ferroviario e l'area dei Giardini di Brignole dove si è posto un valore di 40 m<sup>1/3</sup>/s. La scelta di un valore significativamente basso di resistenza al moto è legato alla schematizzazione del deflusso in ambito urbano, con fondi tipicamente in asfalto e cemento caratterizzati tipicamente da irregolarità molto ridotte. La scelta di abbassare il parametro di Gauckler-Strickler nei sottopassi è legato alla possibile parziale ostruzione di tali passaggi dovuti all'accumulo di materiale, mentre per la zone verde di fronte alla stazione Brignole si è considerato la maggiore resistenza al deflusso offerta dal relativo uso suolo (alberi, arbusti, prato).

L'ultima operazione legata al modello bidimensionale è relativa all'inserimento delle condizioni al contorno. Essendo quello in esame un modello accoppiato 1D+2D, gli input di portata sono costituiti, per la parte 2D, dal volume liquido non contenuto in alveo: di conseguenza, la forzante per il modello 2D deriva dalla simulazione monodimensionale. Ciò comporta che non siano stati inserite condizioni di monte o distribuite all'interno del modello bidimensionale, ma solo la condizione di valle, localizzata, come nel caso 1D, alla foce del Torrente Bisagno. Anche in tal caso si è considerata la serie temporale di sovralzo del livello marino rispetto al valore medio durante l'evento, calcolata sulla base dei dati mareografici e ondametrici già menzionati.

# 4.3.7.4 Interfacciamento 1D+2D

L'interfacciamento tra i due modelli è stato predisposto lungo l'intera estensione longitudinale delle sponde dei due corsi d'acqua in esame, con l'esclusione dei tratti tombinati. Tali collegamenti ("lateral link") consentono un feedback dinamico tra le simulazioni di alveo attivo (1D) e le zone di propagazione dell'esondazione (2D), consentendo un bilancio dei volumi ad elevato dettaglio.

Come quota di sormonto spondale si è considerata quella presente nelle sezioni trasversali del modello monodimensionale in quanto, a differenza della batimetria, esse riportano le quote di sommità dei muretti spondali.





Si sono inoltre tenuti in conto i collassi di tali muretti verificatisi durante l'evento, inserendo una quota di sormonto tempo-variante in accordo con la tempistica osservata. In particolare si è inserita la rotta spondale (Figura 4.31) di estensione pari a circa 20 m tra i due distributori ERG e ENI subito a monte della copertura di Brignole.

Nel tratto del Rio Fereggiano compreso tra le due tombinature si sono inserite 3 rotte, in particolare: tra lo sbocco della copertura di Largo Merlo e la fermata dell'autobus Fereggiano 3/Moro, da pochi metri a monte di B.C. Serramenti a circa 20 m a valle dello stesso e il tratto di circa 15 m pochi con termine in corrispondenza della piccola costruzione in sponda sx a valle dell'ultimo attraversamento

## 4.3.7.5 Risultati

Come prima analisi, si è verificata la corrispondenza della tempistica dell'evento simulato rispetto alle osservazioni, così come riportate negli studi pregressi citati al Par. 4.3.2. In particolare, per il Rio Fereggiano si sono verificati i tempi dei sormonti spondali nel tratto compreso tra le due coperture, l'entrata in pressione della copertura terminale e il passaggio del colmo di piena all'imbocco di quest'ultima: il massimo scostamento temporale risulta essere associato al funzionamento in pressione della copertura, che il modello anticipa di circa 15 minuti rispetto alle osservazioni (circa 12:30 invece di 12:45). A causa della mancanza di misurazioni di velocità della corrente durante l'evento, si è provveduto a stimare la velocità del deflusso extra-alveo in corrispondenza dell'ultimo attraversamento a monte della copertura terminale tramite analisi di un filmato amatoriale: si è così confermata la buona coerenza del valore simulato dal modello con quello stimato.

Sul Torrente Bisagno si è analizzato il timing dell'evento, con particolare riferimento a:

- istante di inizio esondazione in sponda destra e sinistra subito a monte dell'imbocco della copertura terminale;
- allagamento di Piazza Verdi (antistante la stazione di Brignole);
- passaggio dell'onda di piena (e relativo livello di pelo libero) in corrispondenza della passerella Firpo, posizionata circa 550 m a monte dell'imbocco della copertura terminale.

Lo scostamento temporale maggiore è circa pari a 10 minuti e relativo all'istante di passaggio del colmo di piena alla passerella Firpo, verificatosi intorno alle 14:00 (ora solare) e simulato alle 14:10. Alla stessa sezione il valore di pelo libero al colmo presenta una quasi perfetta coincidenza tra osservato (11.06 m s.l.m.) e simulato (11.09 m s.l.m.).

Come seconda analisi, si è confrontata l'estensione delle acque esondate perimetrata dal Comitato Tecnico di Bacino e quella restituita dal modello. Come riportato in Figura 4.44 e Figura 4.45, l'estensione dell'evento simulato presente una corrispondenza molto buona con le osservazioni sia per il Torrente Bisagno sia per il Rio Fereggiano. Il solo punto dove tale consistenza risulta meno soddisfacente è costituito dalla zona a valle di Via Barabino: infatti il deflusso simulato risulta proseguire oltre tale via per circa 250 m, sino a raggiungere via Antonio Cecchi, mentre la perimetrazione del Comitato Tecnico di Bacino non prevede allagamenti in tale area.

Si sono infine confrontati i valori di tirante massimo osservato, tratti dalla perimetratura effettuata dal Comitato Tecnico di Bacino, e simulato. Sia a monte sia a valle della stazione di Brignole si è riscontrato un buon accordo tra i valori: la grande maggioranza dei valori comparati presenta scarti inferiori a 0.2 m.





#### 4.3.7.6 Restituzioni

La presente relazione è integrata da un corollario di tabelle ed elaborazioni cartografiche che forniscono un quadro di dettaglio sui risultati della simulazione modellistica effettuata per l'evento del 4 novembre 2011 e sul confronto degli output con le grandezze osservate.

Nello specifico, sono state predisposte le seguenti risultanze:

- tabelle relativa ai valori idrodinamici in alveo per tutti i tratti considerati, riportate nell'allegato A. Le tabelle riportano, per ogni tratto modellato, le seguenti informazioni:
  - o progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
  - ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
  - o quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.l.m.] delle quote d'alveo;
  - Y: tirante idrico in [m];
  - o PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
  - V: velocità della corrente in [m/s];
  - Fr: numero di Froude;
  - o H: valore del carico totale in [m s.l.m.].
- Estensione delle aree allagate da simulazione e da osservazione, con indicazione dei tiranti massimi simulati e osservati, per l'evento del 4 novembre 2011 sull'area oggetto di studio, riportata nell'elaborato 22800503-01-00400, Tavola 6;
- Griglia di valori massimi di tirante idrico simulati per l'evento del 4 novembre 2011 sull'area oggetto di studio, riportata nell'elaborato cartografico 22800503-01-00400, tavola 8;
- Griglia di valori massimi di velocità simulati per l'evento del 4 novembre 2011 sull'area oggetto di studio, riportata nell'elaborato cartografico 22800503-01-00400, tavola 7.

# 4.4 Analisi dello stato attuale: verifiche idrauliche sul Torrente Bisagno e sul Rio Fereggiano

Nel presente capitolo si illustra la schematizzazione dei modelli idraulici relativi alle verifiche idrauliche sul Rio Fereggiano e Torrente Bisagno per i tre tempi di ritorno considerati, ovvero 50, 200 e 500 anni. Come precedentemente accennato, i modelli idraulici sono basati sul setup calibrato sull'evento del 4 novembre 2011 e illustrato nel dettaglio nel Par. 4.3, al quale si rimanda.

A differenza del setup relativo all'evento del novembre 2011, nel caso delle verifiche idrauliche si è realizzato un modello esclusivo per ognuno dei due corsi d'acqua considerati. La ragione alla base di questa scelta è legata alla filosofia dello studio: si è inteso infatti identificare l'estensione delle aree allagate separatamente per i due tratti in modo da fornire un maggior livello di analisi della pericolosità idraulica.

I modelli idrodinamici, sia per la parte monodimensionale sia per quella bidimensionale, si sono dunque mantenuti pressoché analoghi al setup di calibrazione con due significative differenze: le condizioni al contorno, ovvero le forzanti e i livelli di valle, e l'aggiornamento delle geometrie in caso di variazioni rispetto all'assetto del 2011.





Di seguito si illustrano le fonti informative aggiuntive rispetto alla schematizzazione del novembre 2011 e le conseguenti modifiche al setup.

# 4.4.1 Fonti informative aggiuntive rispetto al setup di calibrazione

Per le fonti informative considerate per definire la geometria delle sezioni trasversali dell'alveo dei due corsi d'acqua in esame si rimanda al Par. 4.3.2. Di seguito si riportano le fonti aggiuntive considerate per la schematizzazione dello stato attuale.

Rilievo realizzato dal raggruppamento nel settembre 2013 per la commessa in oggetto, relativo a specifiche sezioni del Rio Fereggiano e del Torrente Bisagno, nel seguito definito "Rilievo 2013". I diagrammi delle sezioni rilevate e la loro localizzazione planimetrica sono riportati nel Cap.2.

Rilievo a terra commissionato da ARPAL nel 2013 relativo all'alveo del Torrente Bisagno nel tratto da circa 1 km a monte della località Doria sino alla foce, ad esclusione della copertura terminale (nel seguito definito "Rilievo ARPAL"). Relativamente a tale rilievo, è stata effettuata un'analisi preventiva per verificarne la congruità col rilievo Lidar assunto come fonte più attendibile per la schematizzazione dell'altimetria per l'evento: le risultanze hanno condotto alla decisione, presa in accordo col Committente, di non integrare il rilievo all'interno del modello, ad esclusione di alcune sezioni che presentavano una buona consistenza col rilievo Lidar relativamente alle quote spondali (vd. par.4.4.2.1).

Da un'analisi di dettaglio dei dati altimetrici, si è verificata una discordanza delle quote spondali del rilievo con quelle del DTM, con scarti anche superiori a 1 m (sia in positivo sia in negativo). In particolare, dalla sez.56 (Ponte Feritore) sino alla sez.77 (subito a valle della passerella pedonale a monte di Staglieno) i valori del DTM risultano generalmente superiori rispetto alle sezioni traversali di rilievo, con scarto medio in sponda sx pari a circa 0.8 m e differenze massime intorno a 1.5 m in corrispondenza della sponda sx delle sezioni 67-68-70, localizzate in un intorno del Ponte Veronelli. A valle della sez.77, invece, le quote spondali delle sezioni risultano sempre superiori rispetto al dato grigliato, con scarto medio intorno al metro per entrambe le sponde e scostamenti massimi superiori a 2 m in corrispondenza della sez.93 (circa 300 m a monte della copertura di Marassi) e sez.103 (subito a monte della passerella Firpo).

Verificata la discrepanza tra il rilievo Lidar e quello a terra, si è valutato quale delle due informazioni altimetriche fosse da ritenere come più affidabile e dunque considerata nello schema modellistico. Si è deciso di ritenere più affidabile il grigliato Lidar per due ragioni principali:

- l'analogia delle quote di sponda dx e sx per la grande maggioranza delle sezioni trasversali del rilievo a terra, circostanza in contrasto con i valori del DTM Lidar e del rilievo utilizzato per lo studio dell'evento del novembre 2011;
- alcuni casi di variazioni repentine di quota spondale senza riscontro né nel DTM né nella realtà (es, circa 100 m a monte di Ponte Monteverde e in corrispondenza della passerella Firpo).

# 4.4.2 Variazioni di setup modellistico rispetto al modello di calibrazione

Nel caso in esame è stato ripreso il modello MIKE FLOOD già calibrato per l'evento del novembre 2011, esteso sull'intera area associata ai tratti modellati e costituito dai seguenti moduli:

 modello MIKE 11 monodimensionale per la rappresentazione dell'alveo inciso del Torrente Bisagno e del Rio Fereggiano con rappresentazione di tutti i ponti presenti, con geometria definita mediante le sezioni trasversali di rilievo disponibili;





- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree vallive allagabili; il
  modello ha utilizzato una geometria di input costituita da celle quadrate di lato 3 m derivata
  da un DTM realizzato nell'area in esame in modo che siano ben rappresentati in quota e con
  continuità gli elementi "sovramontanti" che controllano le condizioni di deflusso (argini, muri,
  abitazioni ecc.);
- connessione dinamica laterale (lungo entrambe le sponde dell'alveo inciso) dei modelli MIKE 11 e MIKE 21.

A differenza del setup relativo all'evento del novembre 2011, si sono modellati i due corsi d'acqua separatamente: si è dunque considerato un modello per il solo Torrente Bisagno, dove l'input relativo al Rio Fereggiano è costituto dall'idrogramma del relativo bacino chiuso alla confluenza, e uno per il solo Rio Fereggiano.

Come condizione al contorno di monte e come condizione distribuita lungo lo sviluppo longitudinale del tratto per entrambi i corsi d'acqua in esame sono stati utilizzati gli idrogrammi per assegnato tempo di ritorno illustrati nel presente documento al Par. 3.3. La condizione al contorno di valle per il Torrente Bisagno è stata posta pari al livello marino associato al tempo di ritorno decennale: tale valore è stato ricostruito, così come quello relativo all'evento del 2011, tramite apposito studio effettuato dagli scriventi sulla dinamica del tratto di mare in esame. Relativamente al Rio Fereggiano, la condizione di valle è stata posta pari al livello del Torrente Bisagno superiore alla quota di intradosso dello sbocco della copertura del Rio Fereggiano.

Nei paragrafi seguenti si illustrano nel dettaglio le differenze di schema geometrico e modellistico tra il setup associato all'evento 2011 e quelli associati allo stato attuale.

# 4.4.2.1 Torrente Bisagno

## Schemi geometrici e altimetrici

#### Modello 1D

Lungo l'intero tratto del Torrente Bisagno si è provveduto a porre le quote spondali delle sezioni trasversali integrate nel modello monodimensionale pari all'altimetria del piano stradale, a differenza del setup di calibrazione dove si erano mantenuti i muretti ad esclusione di quelli collassati durante l'evento. Tale modifica è stata apportata in accordo col Committente in modo da mantenere un approccio conservativo della definizione delle aree allagabili: si è infatti assunto che i muretti non costituiscano una effettiva protezione in caso di livello in alveo superiore al piano strada. Tale ipotesi è supportata dal fatto che tali strutture non sono effettivi muri spondali, ovvero non risultano progettate e costruite per un reale contenimento del deflusso, ma sono generalmente assimilabili a semplici parapetti.

Relativamente al "Rilievo ARPAL", nel Par. 4.4.1 si riportano le considerazioni che hanno condotto a non integrare le sezioni di tale rilievo all'interno dello schema modellistico dello stato attuale. Nonostante ciò, alcune sezioni caratterizzate da ridotte differenze di quote spondali rispetto al grigliato Lidar sono state incluse nella schematizzazione dell'alveo, a valle di un'analisi di consistenza con le sezioni già integrate nel modello immediatamente a monte e a valle, al fine di integrare le geometrie d'alveo disponibili.

In particolare, si sono utilizzate per la schematizzazione dell'alveo attivo del Torrente Bisagno le seguenti sezioni del "Rilievo ARPAL":

- sez. 63: circa 10 m a monte di Ponte Carrega (progressiva 1221, nome sezione RilARPAL\_63);
- sez. 82: pochi metri a valle di Ponte Monteverde (progressiva 2691, nome sezione RilARPAL 82);





- sez. 86: pochi metri a monte di Ponte Campanella (progressiva 3366, nome sezione RilARPAL\_86);
- sez. 88: circa 35 m a valle di Ponte Campanella (progressiva 3415, nome sezione RilARPAL\_88).

Nelle figure seguenti si illustra la localizzazione e la geometria delle sezioni trasversali tratte dal "Rilievo ARPAL" e integrate all'interno del modello del Torrente Bisagno.

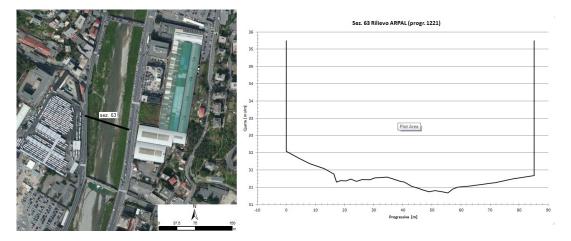


Figura 4.51 Localizzazione (sx) e geometria (dx) della sezione 63 del Rilievo ARPAL, inserita nel setup del Torrente Bisagno alla progressiva 1221.

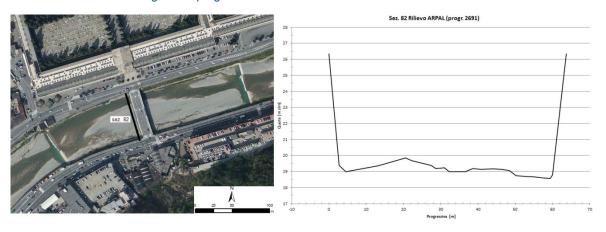


Figura 4.52 Localizzazione (sx) e geometria (dx) della sezione 82 del Rilievo ARPAL, inserita nel setup del Torrente Bisagno alla progressiva 2691.





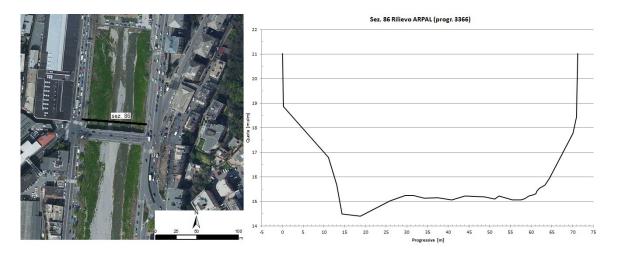


Figura 4.53 Localizzazione (sx) e geometria (dx) della sezione 86 del Rilievo ARPAL, inserita nel setup del Torrente Bisagno alla progressiva 3366.

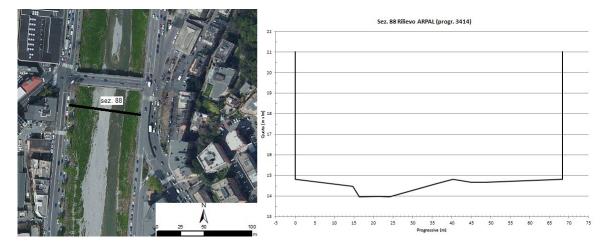


Figura 4.54 Localizzazione (sx) e geometria (dx) della sezione 88 del Rilievo ARPAL, inserita nel setup del Torrente Bisagno alla progressiva 3414.

In aggiunta a tali sezioni, si è aggiornata la sezione di imbocco della copertura di Marassi (progressiva 4113) con dati derivanti dal "Rilievo 2013", previa verifica di consistenza delle quote spondali con i valori altimetrici del DTM. In Tabella 4.4 si riportano le sezioni trasversali utilizzate per la schematizzazione dell'alveo del Torrente Bisagno: per ogni sezione si riporta la progressiva, il nome della sezione nel modello e in quello del Piano di Bacino, eventuali note.

Tabella 4.4 Sezioni trasversali per la schematizzazione del Torrente Bisagno.

	BISAGNO							
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE		PROGRESSIVA [m]	ID Sezio ne	ID Sezione PdB	NOTE
472	82	82			3588	32.2	32.2	a monte della pass. pedonale
533	81	81			3592	32.1	32.1	a valle della pass. pedonale
608	80	80			3595	32	32	
630	79	79			3640	31.5		
655	78.4	78.4			3646	31	31	





			BISAG	eno			
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezio ne	ID Sezione PdB	NOTE
656	78.3	78.3	a monte di P.Feritore	3726	30	30	
669	78.2	78.2	a valle di P.Feritore	3841	29	29	
672	78.1	78.1		3891	28	28	
717	77	77		3892	27	27	Connessione prima sezione di "Bisagno :Parcheggio pensile"
762	76	76		3927	26.8	26.8	
830	75	75		3932	26.3	26.3	
924	74	74		4113	25	25	imbocco copertura Marassi
973	73.4	73.4		4383	24	24	sbocco copertura Marassi
974	73.3	73.3	a monte di P.Guglielminetti	4384	23	23	Connessione ultima sezione di "Bisagno :Parcheggio pensile"
983	73.2	73.2	a valle di P.Guglielminetti	4438	22	22	
987	73.1	73.1		4497	21	21	
1028	72	72		4515	20.5	20.5	
1086	71	71		4530	20.25		
1131	70	70		4538	20	20	
1221	RiIARPAL _63	69		4547	19.3	19.3	
1328	68	68		4549	19.2	19.2	a monte di P.Serra
1351	67.4	67.4		4563	19.1	19.1	a valle di P.Serra
1353	67.3	67.3	a monte di P.Carrega	4573	19. monte salto	19. monte salto	
1357	67.2	67.2	a valle di P.Carrega	4599	18	18	
1398	66	66		4662	17	17	
1460	65	65		4721	16	16	
1527	64	64		4771	15	15	
1576	63.4	63.4		4791	14.66	14.66	
1578	63.3	63.3	a monte di P.Veronelli	4793	14.33	14.33	
1581	63.2	63.2	a valle di P.Veronelli	4819	14	14	
1588	63.1	63.1		4858	13.2 monte ponte	13.2 monte ponte	a monte di pass. Firpo
1643	62	62		4862	13.1 valle ponte	13.1 valle ponte	a valle di pass. Firpo
1723	61	61		4891	12	12	





BISAGNO							
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezio ne	ID Sezione PdB	NOTE
1812	60	60		4938	11	11	
1936	59	59		5027	10	10	
1975	58.4	58.4		5078	9	9	
1976	58.3	58.3	a monte di P.Bezzecca	5118	8	8	
1983	58.2	58.2	a valle di P.Bezzecca	5156	7	7	
1987	58.1	58.1		5201	6	6	
2025	57	57		5207	5.2	5.2	a monte di P.Castelfidaro
2089	56	56		5225	5.1	5.1	a valle di P.Castelfidaro
2131	55.4	55.4	a monte della passerella	5230	5	5	
2134	55.2	55.2	a valle della passerella	5244	4.5	4.5	
2135	55.1	55.1		5246	4	4	
2247	54	54		5248	3.5	3.5	
2347	53	53		5298	3	3	
2381	52	52		5351	2	2	
2435	51	51		5398	1	1	
2487	50	50		5410	0.9	0.9	
2538	49.1	49.1		5411	Cop. Brigno le		imbocco copertura terminale
2540	48.9	48.9		5537	0.97		
2589	48	48		5538	0.961		
2639	47	47		5550	0.96		
2650	46	46		5578	0.95		
2666	45.1	45.1	a monte di P.Monteverde	5598	0.94		
2684	44.9	44.9	a valle di P.Monteverde	5617	0.93		
2687	44.75			5635	0.92		
2691	RilARPAL _82			5654	0.91		
2748	44	44		5672	0.9		
2784	43	43		5691	0.89		
2791	42.1	42.1		5710	0.88		
2793	42	42		5730	0.87		
2804	41	41		5790	0.869		
2830	40	40		5850	0.74		
2936	38	38	imbocco copertura Staglieno	5950	0.73		





	BISAGNO							
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	ID Sezione PdB	NOTE		PROGRESSIVA [m]	ID Sezio ne	ID Sezione PdB	NOTE
3246	37	37	sbocco copertura Staglieno		6050	0.72		
3250	36	36			6119	0.71		
3320	35.35				6120	0.70		
3366	RiIARPAL _86				6243	0.69		
3373	35.3	35.3			6698	7 copert ura		
3374	35.2	35.2	a monte di P.Campanella		6698	7bis copert ura		
3390	35.1	35.1	a valle di P.Campanella		6798	8		
3394	35	35			6798	8bis		
3415	RiIARPAL _88				6898	9 copert ura		
3442	34	34			6898	9bis foce		sbocco copertura terminale
3547	33	33			6986	10 foce		
3587	32.3	32.3			7088	11 foce		

## Modello 2D

Il modello bidimensionale relativo al Torrente Bisagno non ha subito variazioni in relazione ai parametri idraulici (scabrezze, etc) o di configurazione rispetto al modello dell'evento del novembre 2011. La sola eccezione riguarda l'estensione della condizione di valle che, a seguito di un'analisi preliminare delle zone interessate dalle acque per gli eventi duecentennali e cinquecentennali, è stata estesa anche alla zona della Fiera di Genova. In Figura 4.55 si riporta l'area di mare dove si è impostata la condizione di sovralzo marino per il modello bidimensionale.







Figura 4.55 Specchio marino considerato per la condizione di valle di sovralzo marino.

Si è inoltre effettuata una verifica della batimetria relativamente alle quote altimetriche riportate nella zona non interessata dalle acque di esondazione dell'evento del novembre 2011. In particolare, si è analizzata l'area a valle della questura sino al litorale. Si sono così corrette alcune inesattezze del DTM, quali ad esempio celle con quote erroneamente molto basse lungo il tratto terminale di Viale Brigate Partigiane.

### Accoppiamento 1D e 2D

Non si sono eseguite modifiche della tipologia di interfacciamento tra i modelli monodimensionale e bidimensionale. Anche nel caso dello stato attuale si è considerato come quota di sormonto spondale il valore altimetrico riportato nelle sezioni del modello monodimensionale dalle quali, come già descritto, sono stati eliminati i muretti/parapetti sia in sinistra sia in destra. Come precisato nel Par. 4.3 relativamente alla schematizzazione dell'alveo, i collassi dei muretti avvenuti durante l'evento del novembre 2011 (uno dei quali verificatosi lungo il Torrente Bisagno) sono stati modellati tramite collegamento tempo-variante. Il modello dello stato attuale, non considerando muretti spondali e dunque nemmeno eventuali collassi, prevede quote di sormonto fisse.

### Condizioni al contorno

#### Forzanti

Come per il setup relativo all'evento del novembre 2011, anche per il modello dello stato attuale gli input di portata sono stati forniti al solo alveo, dal quale il volume liquido si trasferisce al modello 2D e da qui si propaga in ambito urbano a seguito di sormonto spondale. Di conseguenza, le condizioni al contorno di portata sono inserite nel solo modello monodimensionale.

Come accennato in precedenza, l'input di portata è costituito dagli idrogrammi per assegnato tempo di ritorno. I tempi di ritorno considerati sono pari a 50, 200 e 500 anni e per ognuno di essi si sono costruiti l'idrogramma di testata e quelli relativi alle porzioni di bacino a valle. Nel caso del Torrente Bisagno, le sezioni di chiusura del bacino, e per i quali è stato dunque calcolato il relativo idrogramma sono le seguenti:

1. in corrispondenza di Ponte Feritore (idrogramma di testata);





- 2. da Ponte Feritore sino alla confluenza col Rio Fereggiano;
- 3. sezione di chiusura del Rio Fereggiano (tiene in conto il contributo del tributario);
- 4. dalla confluenza col Rio Fereggiano sino allo sbocco a mare.

Gli idrogrammi 1) e 3) sono inseriti nel modello 1D come contributi puntuali, rispettivamente alle progressive 472 (sezione iniziale del modello) e 4574. Gli idrogrammi 2) e 4) invece costituiscono forzanti distribuite lungo lo sviluppo longitudinale del Torrente Bisagno.

In Figura 4.56 si riportano gli idrogrammi per i tre tempi di ritorno considerati alla sezione di Ponte Feritore. I valori di picco risultano pari a 671  $\,\mathrm{m}^3$ /s per Tr=50 anni, 1104  $\,\mathrm{m}^3$ /s per Tr=200 anni e 1515  $\,\mathrm{m}^3$ /s per Tr=500 anni.

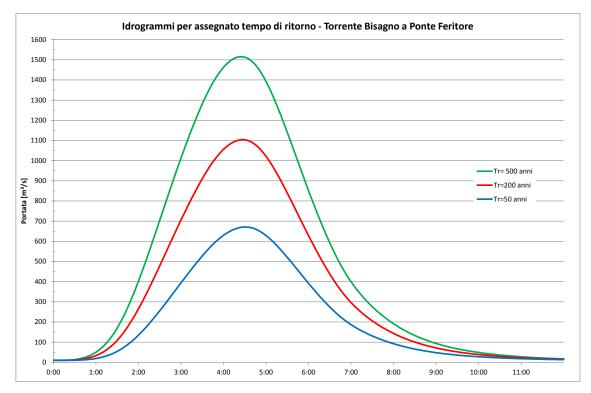


Figura 4.56 Idrogrammi per Tr 50, 200 e 500 anni per il Torrente Bisagno alla sezione di Ponte Feritore (sezione di testata, progr. 472).

In Figura 4.57 si riportano gli idrogrammi per la porzione di bacino compresa tra Ponte Feritore e la confluenza col Rio Fereggiano, localizzata pochi metri a valle di Ponte Serra. I valori di picco risultano pari a 247 m³/s per Tr=50 anni, 406 m³/s per Tr=200 anni e 552 m³/s per Tr=500 anni.





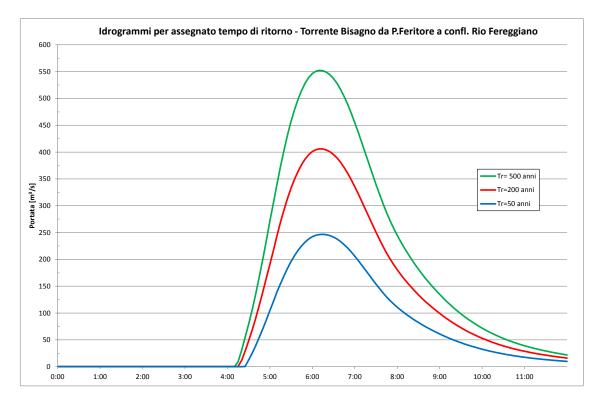


Figura 4.57 Idrogrammi per Tr 50, 200 e 500 anni per il Torrente Bisagno per la porzione di bacino da Ponte Feritore (progr. 472) a confluenza Rio Fereggiano (progr. 4574).

In Figura 4.58 si riportano gli idrogrammi associati al contributo del bacino del Rio Fereggiano chiuso alla confluenza col Torrente Bisagno. Tale forzante è dunque integrata nel modello monodimensionale come contributo puntuale alla progressiva 4574, e i valori di picco risultano pari a 46 m³/s, 76 m³/s, 105 m³/s per i tempi di ritorno rispettivamente di 50, 200, 500 anni.

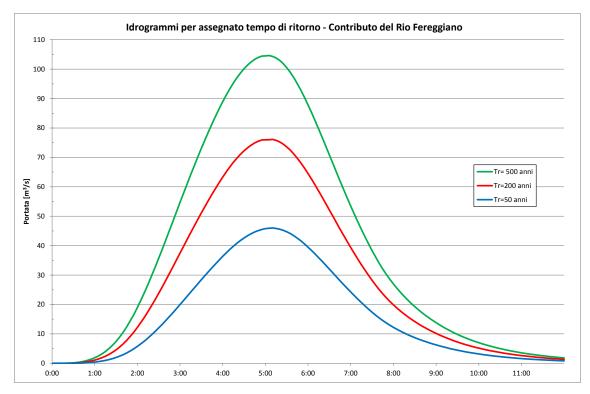


Figura 4.58 Idrogrammi per Tr 50, 200 e 500 anni del Rio Fereggiano alla confluenza col Bisagno (progr. 4574 del Torrente Bisagno).





In Figura 4.59 si illustrano gli idrogrammi per la porzione del bacino del Torrente Bisagno dalla confluenza col Rio Fereggiano sino allo sbocco a mare. Il corso d'acqua in tale tratto risulta scorrere al di sotto della copertura terminale, ad esclusione dei primi 850 m circa. I picchi di portata per i tre tempi di ritorno considerati corrispondono a 206 m³/s, 338 m³/s e 464 m³/s.

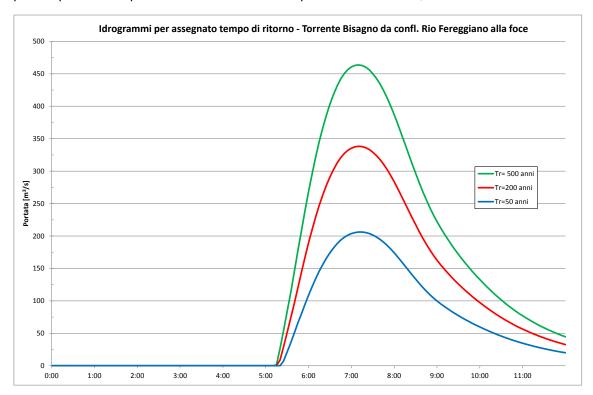


Figura 4.59 Idrogrammi per Tr 50, 200 e 500 anni per il Torrente Bisagno dalla confluenza col Rio Fereggiano (progr. 4574) allo sbocco a mare (progr. 7088).

#### Condizione di valle

La condizione di valle per il modello del Torrente Bisagno, così come per il setup di calibrazione, è stata definita tramite apposito studio del sovralzo del livello medio mare alla foce del corso d'acqua. Si è scelta un'area oggetto di studio sufficientemente estesa per le finalità oggetto di studio: in particolare comprende parte del canale di accesso di levante del porto di Genova e si estende ad Est fino alla foce del torrente Sturla. Nel par. 4.3.3.3 si descrive nel dettaglio l'approccio metodologico considerato per lo studio in esame.

Relativamente alla definizione del livello marino per simulare lo stato attuale del Torrente Bisagno, si sono calcolati i sovralzi associati a tempi di ritorno pari a 5 e 10 anni. A differenza dell'analisi per l'evento del novembre 2011, le condizioni al contorno per il modello marino sono state ottenute a valle di analisi statistiche degli eventi estremi.

In particolare, per quanto riguarda l'analisi statistica dei livelli superficiali si è fatto riferimento alla serie temporale registrata al mareografo di Genova. I dati del mareografo consentono di registrare le variazioni dovute alla marea astronomica e quelle dovute allo storm surge ma non quelle dovute al wave setup, dal momento che la strumentazione non risulta esposta all'effetto del moto ondoso.

L'analisi è stata condotta mediante il metodo dei massimi annuali. La distribuzione teorica che meglio ha approssimato i dati empirici è stata quella di Gumbel. I risultati dell'analisi sono presentati in Tabella 4.5.





Tabella 4.5 Valori di livello associati ai periodi di ritorno di 5 e 10 anni.

Т	Liv
anni	[m]
5	0.50
10	0.55

Per quanto riguarda il moto ondoso si è fatto riferimento ad uno studio pregresso, effettuato da DHI Italia per conto di Autorità Portuale di Genova<sup>6</sup>, nell'ambito del quale è stata condotta un'analisi direzionale degli eventi estremi associati a determinati periodi di ritorno. In particolare, come atteso per la costa ligure centrale, è risultato che le onde più alte sono quelle provenienti da Libeccio. I valori delle altezze d'onda associate ai peridi di ritorno di 5 e 10 anni sono riportati in Tabella 4.6.

Tabella 4.6 Valori di altezza d'onda significativa associata ai periodi di ritorno di 5 e 10 anni.

Т	Hs
anni	[m]
5	5.2
10	5.6

Al fine di determinare il sovralzo del livello medio mare alla foce del torrente, comprensivo dei fenomeni di marea astronomica, storm surge e wave setup si è resa necessaria l'applicazione del modello numerico descritto nel par. 4.3.3.3. In ogni simulazione, oltre alla condizione ondosa, è stato considerato nelle condizioni al contorno l'incremento del livello medio mare dovuto ai fenomeni di storm surge e barometro inverso, in funzione del periodo di ritorno, ed in relazione ad i valori illustrati in Tabella 4.5.

In Figura 4.60 e Figura 4.61 sono presentate le mappe dei livelli superficiali associate ai periodi di ritorno di 5 e 10 anni, mentre in Tabella 4.7 sono illustrati i livelli superficiali estratti nei punti illustrati in Figura 4.62.

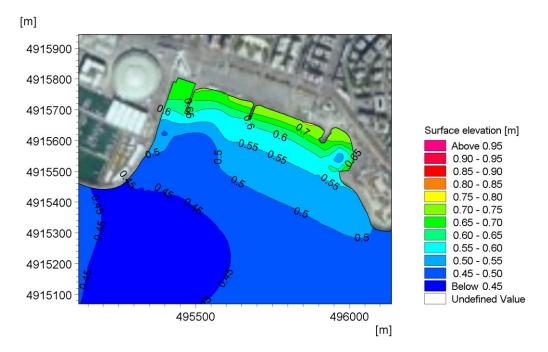


Figura 4.60 Mappa dei livelli superficiali alla foce del torrente Bisagno associati ad un periodo di ritorno di 5 anni.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> "Studio meteomarino a supporto della progettazione esecutiva del ripristino della mantellata esterna alla diga foranea e al molo Duca di Galliera", DHI Italia per conto di Autorità Portuale di Genova, 2010





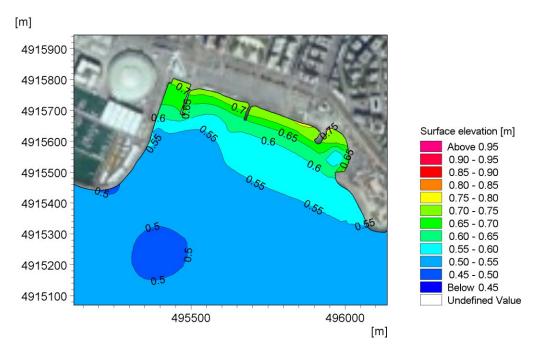


Figura 4.61 Mappa dei livelli superficiali alla foce del torrente Bisagno associati ad un periodo di ritorno di 10 anni.

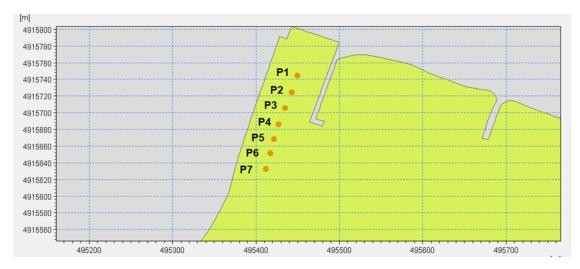


Figura 4.62 Posizione dei punti di estrazione dei livelli superficiali.

Tabella 4.7 Livelli superficiali estratti in alcuni punti alla foce del torrente Bisagno associati ai periodi di ritorno di 5 e 10 anni.

	Livelli [m]				
	T=5 anni	T=10 anni			
P1	0.66	0.68			
P2	0.64	0.66			
Р3	0.61	0.64			
P4	0.59	0.62			
P5	0.56	0.60			
P6	0.53	0.58			
P7	0.51	0.55			





Come condizione di valle si è scelto il livello di sovralzo massimo associato a un evento meteomarino con tempo di ritorno decennale: dunque allo sbocco a mare del Torrente Bisagno si è posto un livello marino pari a 0.68 m s.l.m.. Tale valore è stato considerato sia nel modello monodimensionale sia in quello bidimensionale.

# 4.4.2.2 Rio Fereggiano

# Schemi geometrici e altimetrici

#### Modello 1D

Come per il Torrente Bisagno, anche per il Rio Fereggiano la quota spondale è stata posta pari al valore altimetrico del piano strada: non sono stati considerati dunque i muretti presenti lungo pressoché l'intera lunghezza del tratto a pelo libero compreso tra la copertura di Largo Merlo e la copertura terminale.

Tale scelta risulta in linea con quanto si è registrato durante l'evento di novembre 2011, in occasione del quale ampia parte dei muretti spondali in tale tratto non ha retto alla pressione esercitata dalle acque di piena defluenti in alveo e sono collassati, come dettagliatamente descritto nel Par. 4.3. Sempre relativamente al tratto tra le due tombinature, si sono considerati i dati geometrici forniti dal "Rilievo 2013" effettuato in settembre.

Riferendosi alla modellazione del solo Rio Fereggiano e considerata la condizione di valle in accordo con quanto richiesto dalle norme di Piano, e illustrata in seguito nel presente paragrafo in riferimento alle condizioni al contorno, il modello monodimensionale relativo all'alveo del Torrente Bisagno non è stato incluso nel presente modello. In Tabella 4.8 si riportano le sezioni trasversali utilizzate per la schematizzazione dell'alveo del Rio Fereggiano: per ogni sezione si riporta la progressiva, il nome della sezione nel modello e in quello del Piano di Bacino, eventuali note.

Tabella 4.8 Sezioni trasversali per la schematizzazione del Rio Fereggiano.

	FEREGGIANO							
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE	PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE			
129	670		1713	220				
384	Sezione chiusa		1760	210				
498	580		1795	200				
636	546		1826	190 monte ponte	sezione a monte del primo ponte			
760	500		1832	183 valle ponte	sezione a valle del primo ponte			
875	460		1849	180 monte ponte	sezione a monte del secondo ponte			
1014	425		1858	173 valle ponte	sezione a valle del secondo ponte			
1110	403 valle ponte		1892	170 monte ponte	sezione a monte del terzo ponte			
1138	400		1895	163 valle ponte	sezione a valle del terzo ponte			
1169	390		1943	160				





	FEREGGIANO						
PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE		PROGRESSIVA [m]	ID Sezione	NOTE	
1189	380 monte ponte	imbocco copertura di Largo Merlo		1961	150		
1192	passerella 38 - 41			1992	140	imbocco copertura terminale	
1204	40.4			2074	130		
1244	38			2167	120		
1287	35			2257	110		
1331	31			2336	100		
1356	330			2389	90		
1396	320			2410	80		
1421	310			2428	70		
1499	300			2429	60		
1545	290			2496	50		
1562	280			2592	40		
1575	270			2725	30		
1584	260			2744	20		
1589	250	sbocco copertura di Largo Merlo		2789	10		
1606	240			2795	0	sbocco copertura terminale	
1649	230						

#### Modello 2D

Le caratteristiche del modello bidimensionale sono rimaste inalterate rispetto alla configurazione relativa al Torrente Bisagno descritta al par. 4.4.2.1 del presente elaborato.

#### Accoppiamento 1D+2D

Rispetto al modello dell'evento del novembre 2011, la sola variazione nella modalità di interfacciamento riguarda l'assenza del modello d'alveo del Torrente Bisagno: conseguentemente, i collegamenti relativi a quest'ultimo sono stati eliminati dal setup.

Come per il Torrente Bisagno, anche per il Rio Fereggiano i collegamenti tra i modelli monodimensionale e bidimensionale prevedono solo quote fisse di sormonto, in quanto non si schematizzano collassi dei muretti spondali come nel caso dell'evento del novembre 2011.

### Condizioni al contorno

#### Forzanti

Anche per il modello relativo al Rio Fereggiano gli idrogrammi di portata sono stati forniti in input al solo modello monodimensionale di schematizzazione dell'alveo. Si sono considerati gli idrogrammi sintetici associati agli eventi con tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni, la cui metodologia di stima è descritta al Par. 3.3 del presente elaborato.

Come implementato nel modello dell'evento del novembre 2011, gli idrogrammi di portata sono stati inseriti sia nella sezione di testata sia lungo lo sviluppo longitudinale del corso d'acqua.





Nella sezione iniziale del modello, associata alla progressiva 129, si è inserito l'idrogramma relativo al bacino chiuso circa 500 m a monte del viadotto autostradale "Marassi" (Figura 4.63). I valori di picco sono pari a 41 m³/s, 67 m³/s, 92 m³/s per i tre tempi di ritorno considerati.

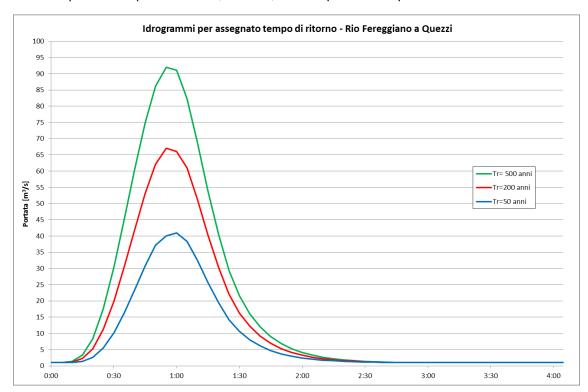


Figura 4.63 Idrogrammi per Tr 50, 200 e 500 anni del Rio Fereggiano a Quezzi (sezione di testata, progr. 129).

La Figura 4.64 riporta gli idrogrammi associati alla porzione di bacino da Quezzi sino all'imbocco della copertura terminale, inserita nel modello monodimensionale come input distribuito lungo la longitudinale. I valori massimi per i tempi di ritorno di 50 200, 500 anni risultano pari rispettivamente a 55  $\,$ m $^3/s$ , 91  $\,$ m $^3/s$ , 124  $\,$ m $^3/s$ .





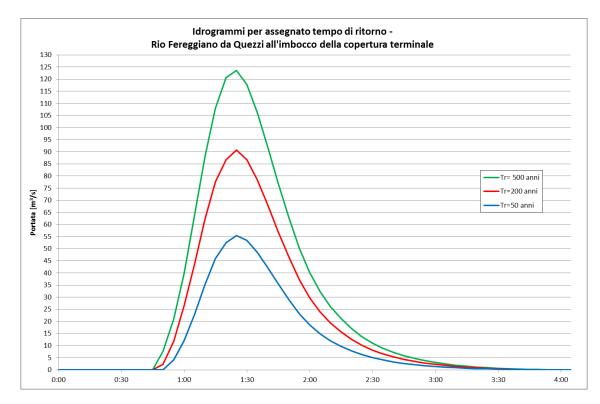


Figura 4.64 Idrogrammi per Tr 50, 200 e 500 anni del Rio Fereggiano da Quezzi (progr. 129) all'imbocco della copertura terminale (progr. 1992).

Il terzo ed ultimo input di portata per il Rio Fereggiano è relativo al contributo della porzione di bacino compresa tra l'imbocco della copertura terminale sino alla confluenza nel Torrente Bisagno. In Figura 4.65 si riportano gli idrogrammi per tale porzione di bacino, i cui valori di picco sono pari a 41 m³/s, 68 m³/s e 94 m³/s.

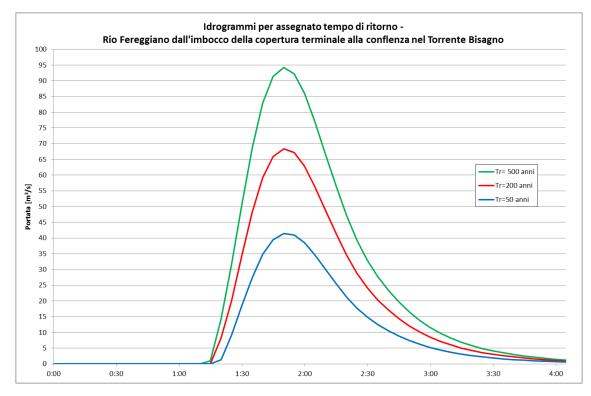


Figura 4.65 Idrogrammi per Tr 50, 200 e 500 anni del Rio Fereggiano dall'imbocco ella copertura terminale (progr. 1992) alla confluenza nel Torrente Bisagno (progr. 2795).





#### Condizione di valle

Come condizione di valle, terminando il tratto alla confluenza col Torrente Bisagno, si è posto un livello del pelo libero in corrispondenza del termine della copertura terminale, posizionata pochi metri a valle di Ponte Serra.

Al fine di determinare una corretta condizione al contorno di valle, cercando di non sottostimare gli effetti di una contemporanea piena sul Bisagno, tramite una serie di simulazioni si è proceduto all'analisi dell'influenza del livello del ricettore sulle quote di deflusso in ingresso alla tombinatura terminale del Fereggiano e guindi sulla sua capacità di portata,

A seguito di simulazioni si è verificato come la condizione di livello allo sbocco della tombinatura influisca sui livelli all'imbocco della tombinatura. In particolare, in Tabella 4.9 si riportano i valori di livello del pelo libero all'imboccatura della copertura terminale in funzione dei livelli allo sbocco, considerando l'evento con tempo di ritorno cinquantennale (portata massima all'imbocco pari a 75 m³/s). Con l'intradosso della sezione terminale posto a 14.45 m s.l.m., si osserva come più il livello allo sbocco si avvicina alla quota di intradosso più l'influenza sul livello del pelo libero a monte è significativo. Infatti, aumentando il livello alla sezione di sbocco da 14.00 a 14.60 m s.l.m. (quest'ultimo dunque di poco superiore alla quota di intradosso) il livello all'imbocco della copertura aumenta di circa 0.5 m, quasi pari all'aumento di livello a valle.

Tabella 4.9 Livelli del pelo libero all'imbocco (colonna di destra) della tombinatura terminale del Rio Fereggiano in funzione dei livelli allo sbocco della stessa (colonna di sinistra). Le simulazioni sono state effettuate considerando l'evento con Tr=50 anni (portata massima all'imbocco della copertura pari a 75 m³/s).

Livello sbocco copertura	Livello imbocco copertura
[m sm]	[m sm]
14.60	24.29
14.00	23.78
13.00	23.04
12.00	22.49

Come approccio conservativo si è scelto di assumere la condizione più gravosa in corrispondenza della confluenza, ovvero un livello sul Torrente Bisagno superiore all'intradosso della sezione di sbocco della copertura. Si è dunque posto un livello di valle pari a 14.6 m s.l.m., essendo la guota di intradosso pari a 14.45 m s.l.m..







Figura 4.66 Livello del pelo libero alla sezione di sbocco della copertura del Rio Fereggiano, utilizzato come condizione di valle per il modello idrodinamico del Rio stesso.

# 4.4.3 Risultati

Sula base delle geometrie e delle condizioni al contorno illustrati nei capitoli precedenti, si sono dunque simulati gli effetti degli eventi associati ai tre tempi di ritorno considerati, ovvero 50, 200 e 500 anni, per i tratti del Torrente Bisagno e Rio Fereggiano oggetto di studio.

Di seguito si analizzano i risultati delle simulazioni, con particolare riferimento all'estensione delle aree allagate e ai parametri idrodinamici di velocità e tirante idrico. Si riportano anche considerazioni relative alla tempistica della propagazione delle acque in ambito urbano, in modo da fornire un'informazione di maggior dettaglio sulla dinamica di allagamento.

# 4.4.3.1 Torrente Bisagno

A causa della notevole estensione longitudinale del tratto del Torrente Bisagno in esame, circa pari a 7 km, per rendere più agevole l'analisi delle risultanze delle simulazioni si è suddiviso l'intero tratto in 3 sottotratti (Figura 4.67), di seguito elencati:

- sottotratto 1: da Ponte Feritore all'imbocco della copertura di Staglieno (da progressiva 472 a progressiva 2936 metri);
- sottotratto 2: dall'imbocco della copertura di Staglieno alla passerella Firpo (da progressiva 3590 a progressiva 4860 metri);
- sottotratto 3: dalla passerella Firpo allo sbocco a mare (da progressiva 4860 a progressiva 7088 metri).







Figura 4.67 Sottotratti del Torrente Bisagno, per ognuno dei quali si analizzano separatamente i risultati delle simulazioni.

#### Evento con tempo di ritorno 50 anni

L'evento associato al tempo di ritorno cinquantennale non presenta esondazioni nei sottotratti 1 e 2. Tale risultanza è in linea con le verifiche idrauliche del Piano di Bacino: l'unico punto a monte della passerella Firpo che risulta interessato dalle acque per evento cinquantennale è localizzato in sponda sinistra in corrispondenza di Ponte Carrega, ma è dovuto all'esondazione del tratto terminale del Rio Mermi.

I franchi idraulici evidenziano però una situazione di criticità localizzate, in particolare subito a monte di alcuni attraversamenti. Le strutture caratterizzate dai franchi minori risultano essere il ponte Guglielminetti (progr. 979), con franco inferiore a 1 m, e il ponte Carrega (progr. 1355), con franco inferiore a 0.5 m, e soprattutto il Ponte Campanella (progr. 3382, poco a valle della copertura di Staglieno), il cui intradosso (ma non l'estradosso) risulta sormontato dalle acque d'alveo, comportando così un funzionamento in pressione della struttura.

### Sottotratto 3

La Figura 4.68 riporta i valori massimi di tiranti associati all'evento cinquantennale per il sottotratto 3. L'esondazione risulta verificarsi sia in sponda destra sia in sponda sinistra nel tratto terminale del corso d'acqua, a valle di Ponte Castelfidardo. L'estensione dell'area allagata è coerente con quella risultante dagli studi effettuati per il Piano di Bacino, ad esclusione dell'estremità orientale dell'area allagata che, con l'eccezione della zona subito a valle di via Barabino, risulta inferiore rispetto a quella del Piano di Bacino di circa 100-150 m. Si ritiene di rilevante importanza fare osservare come, anche in assenza di sormonto della struttura, il tratto relativo agli ultimi 90 m circa a monte della passerella Firpo (progr. 4860) presenti franchi idraulici inferiori a 0.5 m (vd. Allegato A).





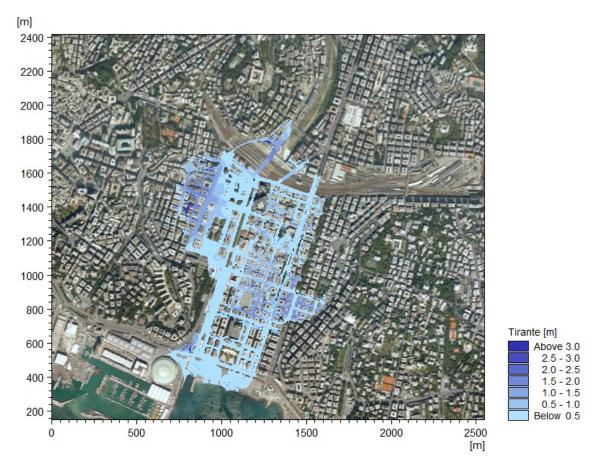


Figura 4.68 Torrente Bisagno sottotratto 3: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=50 anni.

Le acque di esondazione attraversano i varchi di Borgo Incrociati, via Canevari, via Archimede e Corso Sardegna e giungono a valle del piano ferroviario di Brignole. Da qui si estendono trasversalmente da via Cesarea, a ovest, sino a via Casaregis, a est, e longitudinalmente sino allo sbocco a mare del Torrente Bisagno.

Le aree con tiranti medi maggiori sono indicativamente quelle a ovest di via Fiume sino a via G.Macaggi e, a sinistra di Viale Brigate Partigiane, nell'area compresa tra Via Pisacane e via Cecchi. La prima zona è caratterizzata da tiranti generalmente superiori a 1 m, con valori massimi superiori a 1.5 m. Nella seconda zona i tiranti massimi risultano tendenzialmente superiori a 0.5 m, con valore medio intorno a 1 m. Il rettifilo di viale Brigate Partigiane risulta per l'intera lunghezza interessato dalle acque di esondazione con tiranti inferiori a 0.5 m.





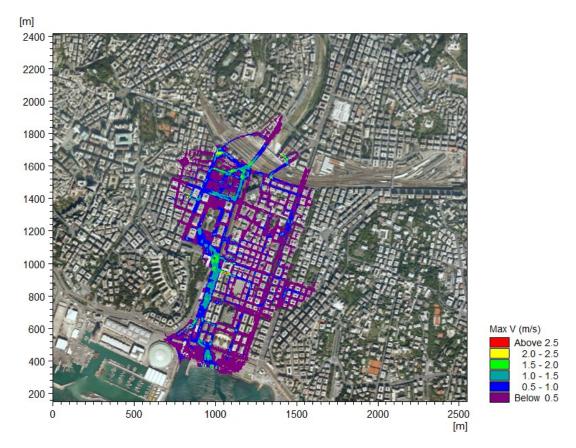


Figura 4.69 Torrente Bisagno sottotratto 3: velocità massime per l'evento con Tr=50 anni.

In Figura 4.69 si riportano le velocità massime per l'evento cinquantennale. I valori risultano generalmente non superiori a 0.5 m/s, con significative eccezioni. In particolare, il tratto di viale Brigate Partigiane a valle della Questura presenta valori generalmente superiori a 1 m/s, così come l'area di fronte alla stazione di Brignole e il quadrilatero di vie intorno ai Giardini di Brignole. Tali zone presentano un valore medio di velocità intorno a 1 m/s, con picchi pari o superiori a 2 m/s.

## Evento con tempo di ritorno 200 anni

L'evento associato al tempo di ritorno duecentennale, a differenza di quello con Tr=50 anni, presenta esondazioni in tutti i tre sottotratti in cui si è suddiviso il Torrente Bisagno





### Sottotratto 1

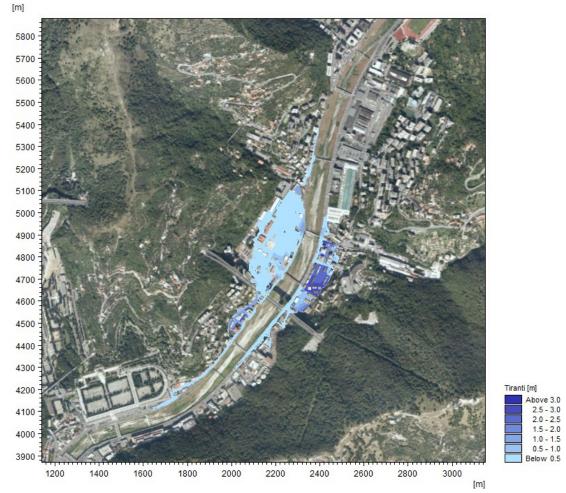


Figura 4.70 Torrente Bisagno sottotratto 1: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=200 anni.

Nel sottotratto 1 le acque di esondazione si propagano soprattutto nell'area compresa da pochi metri a monte di Ponte Carrega, che risulta non verificato per l'evento duecentennale, e la strettoia orografica in corrispondenza del viadotto autostradale. In tale tratto l'area allagata si estende per circa 200 m in destra orografica e circa 100 m in sinistra orografica, coerentemente con la mappatura riportata nel Piano di Bacino. In destra i tiranti massimi risultano generalmente inferiori a 0.5 m, mentre in sinistra risultano tendenzialmente superiori, con valori massimi superiori a 1.5 m. In sponda destra le acque di piena interessano una sottile striscia sino al Cimitero di Staglieno.





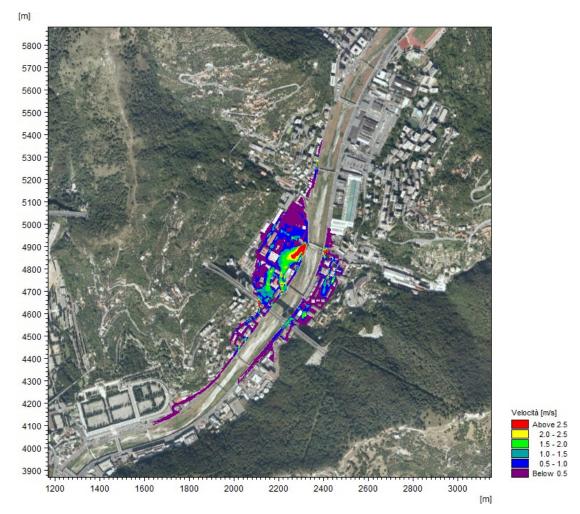


Figura 4.71 Torrente Bisagno sottotratto 1: velocità massime per l'evento con Tr=200 anni.

Le velocità nel sottotratto 1, come illustrato in Figura 4.71, risultano massime subito a valle di Ponte Carrega, con valori superiori a 3 m/s. In sponda destra, per un'estensione trasversale di circa 100 m, le velocità massime risultano superiori a 1 m/s, con un'ampia porzione caratterizzata da valori superiori a 1.5 m/s, mentre in sponda sinistra sono presenti zone con velocità superiori a 1 m/s. A valle del viadotto autostradale, invece, le velocità risultano generalmente inferiori a 0.5 m.

## Sottotratto 2

Nel sottotratto 2, relativo al segmento dalla copertura di Staglieno sino alla passerella Firpo, le esondazioni risultano di ridotta ampiezza trasversale. Per l'intera lunghezza del tratto il lungo Bisagno in sponda destra è interessato dalle acque di piena, con tiranti generalmente inferiori a 0.5 m. In sponda sinistra, invece, la sola zona allagata risulta quella compresa tra il Ponte Campanella e la passerella di via Bobbio, dovuta al rigurgito determinato dalla prima delle due strutture di attraversamento.

L'area interessata dall'esondazione in sponda destra risulta in accordo con la mappatura del Piano di Bacino, con estensione trasversale di circa 100 m. In sponda sinistra invece non si rilevano esondazioni, a differenza di quanto previsto nel Piano di Bacino. In relazione a tale incoerenza, si evidenzia come lungo tutto il tratto compreso tra il Ponte Campanella e l'imbocco della copertura di Marassi i franchi idraulici risultino tendenzialmente inferiori a 1 m.





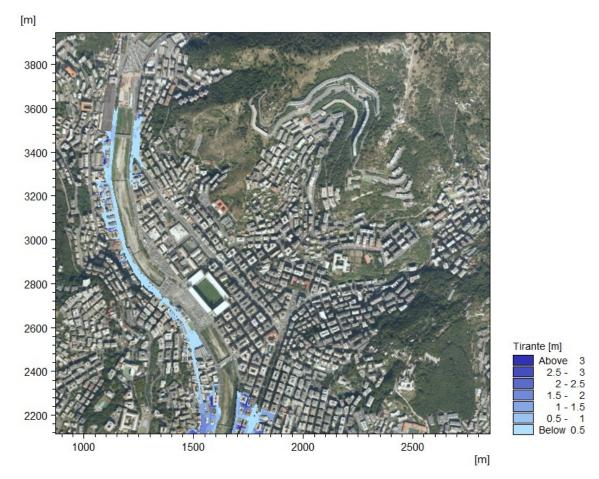


Figura 4.72 Torrente Bisagno sottotratto 2: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=200 anni.

I valori massimi di velocità, rappresentati in Figura 4.73, sono massimi subito a valle di Ponte Campanella, con picchi superiori a 2 m/s. In sponda destra, lungo l'intera lunghezza di via Bobbio e il tratto iniziale di via Canevari i valori risultano variare intorno a 1 m/s, con picchi superiori a 1.5 m/s localizzati nel tratto di via Canevari compreso tra lo sbocco della copertura di Marassi e Ponte Serra.





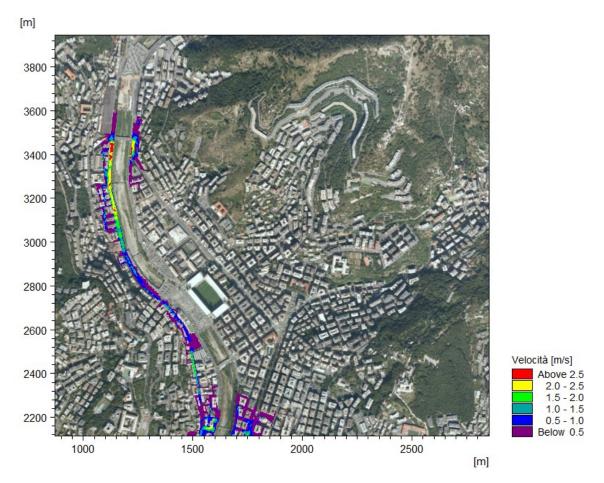


Figura 4.73 Torrente Bisagno sottotratto 2: velocità massime per l'evento con Tr=200 anni.

#### Sottotratto 3

Il sottotratto 3 presenta esondazioni, a monte della copertura di Brignole, sia in sponda destra sia in sinistra. In destra l'area allagata si estende trasversalmente per circa 100 m, interessando via Canevari e le parallele verso via Gradisca. In sinistra le acque di esondazione si propagano per una distanza dall'alveo maggiore rispetto alla sponda destra, in particolare all'altezza di Ponte Castelfidardo: in tale zona le acque esondate si estendono per circa 600 m, raggiungendo Piazza Terralba.

Lungo via Canevari i tiranti idrici raggiungono valori massimi intorno a 1.5 m subito a valle della passerella Firpo, per poi aumentare sino a circa 3 m a monte della copertura ferroviaria. In sinistra si rilevano tiranti idrici inferiori a 1 m a valle della passerella Firpo lungo Corso Sardegna e Corso Galliera per poi salire a valori superiori a 1.5 m nell'area di via Giacometti.

A valle del piano ferroviario le acque interessano un'area di estensione poco dissimile da quelle dell'evento cinquantennale, ad esclusione dell'estremità sinistra, più ampia di circa 200 m, e la zona Fiera a destra dello sbocco a mare del corso d'acqua, che risulta lambita dalle acque dell'evento duecentennale e non dell'evento a frequenza maggiore.

Gli incrementi maggiori di tirante rispetto all'evento cinquantennale (differenza superiore a 1.5 m) si registrano nell'area a sinistra di Viale Brigate Partigiane a valle di via Buenos Aires: in tale area si realizzano valori massimi di tirante idrico anche superiori a 2.5 m.

Nell'area a destra di Viale Brigate Partigiane i tiranti idrici più alti risultano verificarsi nell'area compresa tra le direttrici via Cesarea-via Galata e via Fiume-via Brigata Liguria: in tale zona si registrano tiranti massimi superiori a 2 m.

Infine, nell'area fronte mare i tiranti scendono a valori generalmente inferiori a 0.5 m.





L'estensione delle aree allagate è in forte accordo con la mappatura del Piano di Bacino, ad esclusione della ridotta area allagata nella zona Fiera, non prevista dal Piano di Bacino. Si evidenzia inoltre la zona del Parco Ferroviario di Terralba, inclusa nella mappatura del Piano di Bacino come fascia A\*, definite come "aree individuate come a rischio di inondazione sulla base di considerazioni geomorfologiche o di altra evidenze di criticità, in corrispondenza delle quali non siano state effettuate nell'ambito del Piano le adeguate verifiche idrauliche finalizzate all'individuazione delle fasce di inondabilità." La simulazione idrodinamica effettuata nel presente studio identifica tale zona come inondabile con tiranti compresi tra 0.5 a 1 m.

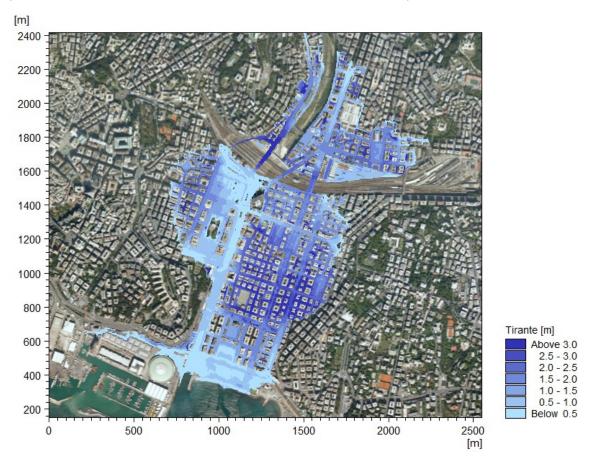


Figura 4.74 Torrente Bisagno sottotratto 3: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=200 anni.

In Figura 4.75 si riportano le velocità massime. Si osserva come il rettifilo Corso Sardegna-Corso Torino presenti valori superiori a 2 m/s lungo quasi l'intero suo sviluppo a partire dalla passerella Firpo sino al mare, con picchi superiori a 3 m/s.

Un'altra zona con velocità particolarmente elevate risulta essere Piazza Verdi, allo sbocco del varco di via Canevari, dove i valori risultano superiori a 3 m/s. Il tratto di Viale Brigate Partigiane a valle della Questura costituisce un altro punto critico per i valori di velocità, che risultano superiori a 2 m/s, con punte superiori a 3 m/s nel tratto terminale.





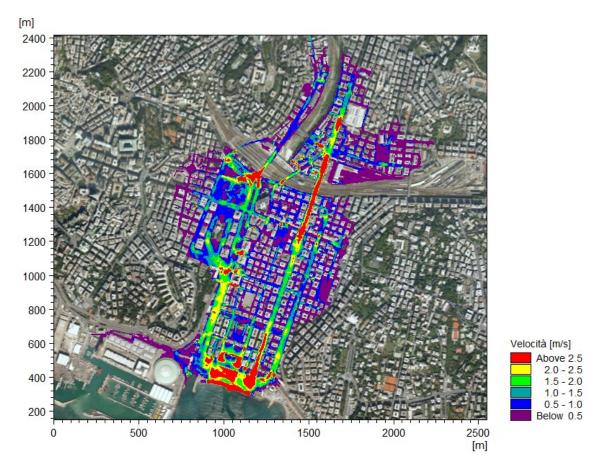


Figura 4.75 Torrente Bisagno sottotratto 3: velocità massime per l'evento con Tr=200 anni.

# Evento con tempo di ritorno 500 anni

#### Sottotratto 1

In sponda destra l'estensione dell'area allagata risulta pressoché analoga a quella associata all'evento duecentennale, con tiranti però sensibilmente maggiori. I valori massimi restituiti dalle simulazioni sono infatti superiori a 0.5 m con picchi, in corrispondenza di Ponte Carrega, superiori a 2 m. Le acque di piena occupano comunque il lungo fiume (via Piacenza) a partire da Ponte Feritore sino alla zona di espansione con tiranti inferiori a 1 m, ad esclusione di un breve tratto a circa 70 m a monte di Ponte Guglielmetti dove i tiranti massimi salgono a circa 2 m.

In sponda sinistra i tiranti massimi risultano superiori tendenzialmente di qualche decina di centimetri rispetto a quelli determinati dall'evento duecentennale. Si registra, però, una maggiore estensione dell'area allagata a monte del Ponte Carrega: in particolare risulta interessato dalle acque di esondazione l'intero tratto compreso tra Ponte Guglielmentti e Ponte Carrega.

A valle del viadotto autostradale, in sponda destra l'estensione delle aree allagate risulta molto simile a quella per l'evento con tempo di ritorno duecentennale. In sponda sinistra, invece, le acque esondate si spingono più a valle in LungoBisagno Dalmazia rispetto all'evento a maggior frequenza e raggiungono il Cimitero di Staglieno, allineandosi con le acque di sponda destra.

Rispetto alla mappatura del Piano di Bacino l'area esondata restituita dal presente studio presenta un'estensione trasversale inferiore di circa 50-100 m nel tratto compreso tra il Ponte Bezzecca e la passerella pedonale circa 150 m più a valle. Nel tratto in sponda sinistra e destra compresa tra il cimitero di Staglieno e la copertura la simulazione idrodinamica non prevede esondazioni, a differenza delle fasce di inondabilità del Piano di Bacino.





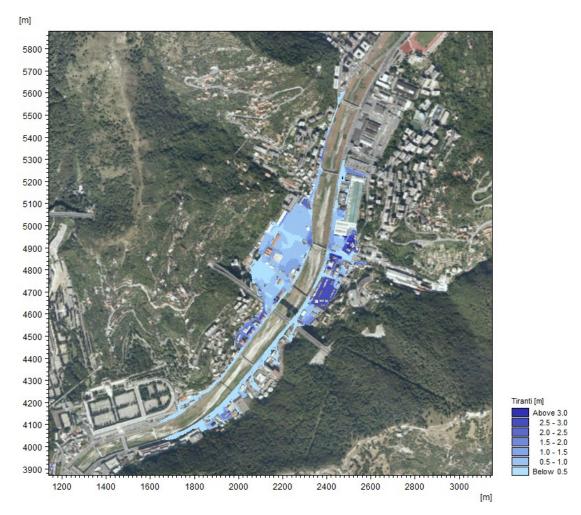


Figura 4.76 Torrente Bisagno sottotratto 1: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=500 anni.

Relativamente alle velocità massime, l'area di maggiore espansione in destra presenta valori quasi ovunque superiori a 1 m/s con diversi punti caratterizzati da valori superiori a 3 m/s. Anche in sponda sinistra l'ampiezza delle zone con velocità superiori a 1 m/s aumentano significativamente rispetto all'evento duecentennale, e risultano presenti anche nell'area a monte di Ponte Carrega.





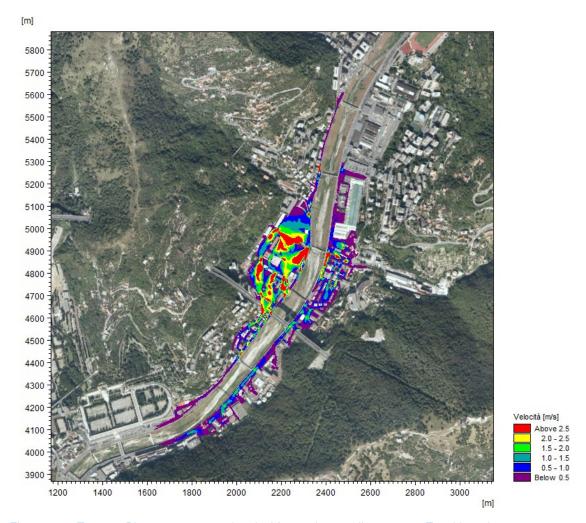


Figura 4.77 Torrente Bisagno sottotratto 1: velocità massime per l'evento con Tr=500 anni

#### Sottotratto 2

L'evento con tempo di ritorno cinquecentennale determina per il sottotratto 2 un'estensione di area allagata in sponda sinistra notevolmente superiore rispetto all'evento duecentennale, a fronte di un'estensione in destra pressoché inalterata (Figura 4.78). In particolare, in sponda sinistra le acque risultano occupare l'area compresa trasversalmente sino a via De Stefani e longitudinalmente sino al tracciato del Rio Fereggiano, corrispondente a via Fereggiano e via Monticelli. A valle della confluenza del Rio Fereggiano, sia in destra sia in sinistra si realizzano tiranti superiori a 1.5 m.

La zona allagata risulta in forte accordo con la mappatura del Piano di Bacino, sia in sponda destra sia in sinistra.





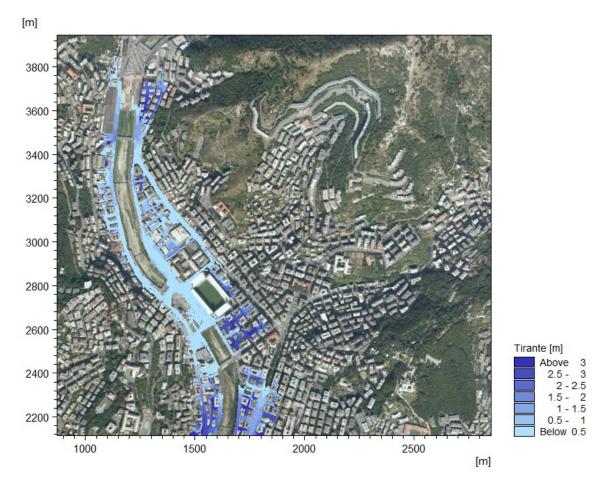


Figura 4.78 Torrente Bisagno sottotratto 2: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=500 anni.

Relativamente alle velocità massime, l'intera zona a monte della confluenza del Rio Fereggiano presenta valori inferiori a 0.5 m/s ad eccezione dei due viali adiacenti al corso d'acqua, dove in alcuni punti la velocità supera i 2 m/s. Il picco si rileva a valle di Ponte Campanella dove i valori oltrepassano i 3 m/s.





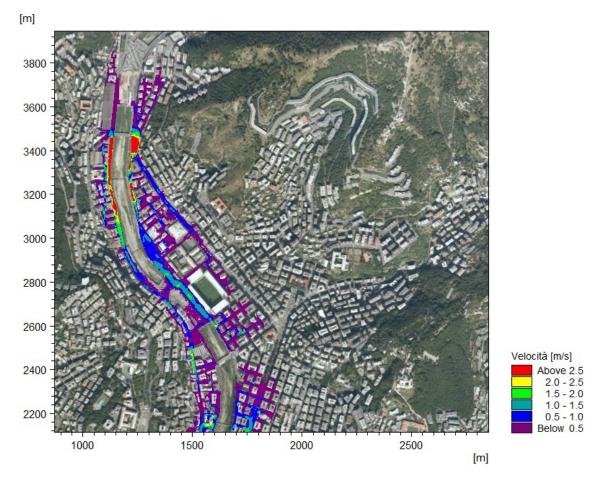


Figura 4.79 Torrente Bisagno sottotratto 2: velocità massime per l'evento con Tr=500 anni.

#### Sottotratto 3

L'estensione dell'area interessata dalle acque di esondazione per l'evento cinquecentennale (Figura 4.80) risulta molto simile a quella per l'evento associato a tempo di ritorno duecentennale. Relativamente ai tiranti, gli aumenti più significativi (superiori a 1 m) si rilevano su entrambe le sponde subito a monte dell'imbocco della copertura di Brignole e nell'area a sinistra di Viale Brigate Partigiane dal piano ferroviario sino a via Cecchi.

L'intera area in sponda sinistra a valle della passerella Firpo risulta caratterizzata da tiranti massimi superiori a 1.5 m, mentre la zona di maggiore espansione trasversale in corrispondenza di Ponte Castelfidardo presenta tiranti superiori a 2.5 m. In destra, i tiranti idrici in via Canevari nel tratto dalla passerella Firpo sino all'imbocco del varco al di sotto della copertura aumentano da circa 2.5 m sino a più di 4 m.

A valle del piano ferroviario, l'area a sinistra di Viale Brigate Partigiane presenta valori massimi di tiranti superiori a 3 m a valle di via Buenos Aires, mentre a monte risultano generalmente superiori a 2 m. A destra di Viale Brigate Partigiane, i valori aumentano progressivamente all'avvicinarsi a via XX Settembre, passando da valori pari o poco inferiori a 1 m sino a raggiungere i 2.5 m.

Come per il tempo di ritorno duecentennale, la sola area dove vi è una discrepanza con la mappatura del Piano di Bacino è costituita dalla zona Fiera, che risulta interessata, seppur con tiranti modesti (inferiori a 0.5 m) dalle acque di esondazione. Relativamente al parco ferroviario di Terralba, incluso nella mappatura del Piano di Bacino come fascia A\*, le risultanze delle simulazioni prevedono tiranti massimi superiori a 2 m.





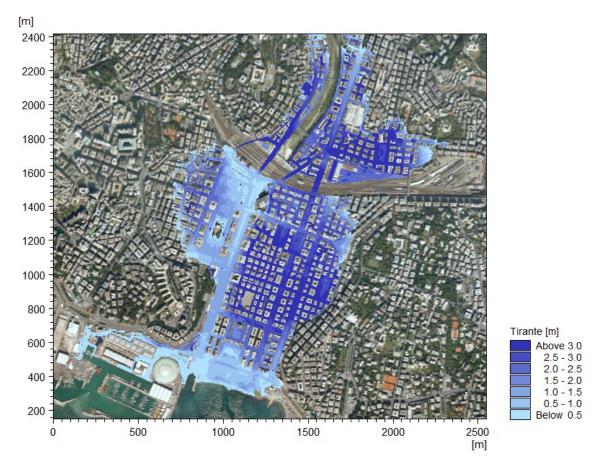


Figura 4.80 Torrente Bisagno sottotratto 3: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=500 anni.

Il pattern dei valori massimi di velocità della corrente, rappresentati in Figura 4.81, presenta forti similitudini con quello associato all'evento duecentennale. Anche in tal caso, infatti, i valori più elevati si riscontrano lungo Corso Sardegna-Corso Torino, nella zona di Piazza Verdi a valle dello sbocco del varco di via Canevari e nel tratto terminale di Viale Brigate Partigiane. I valori di picco risultano superare i 3.5 m/s.





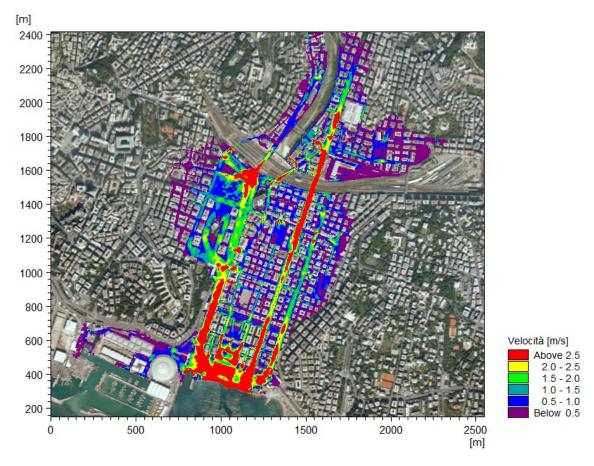


Figura 4.81 Torrente Bisagno sottotratto 3: velocità massime per l'evento con Tr=500 anni.

#### Copertura terminale

Come confermato dalle risultanze dei modelli descritte nei paragrafi precedenti, la copertura terminale costituisce il punto a maggiore criticità del Torrente Bisagno, comportando un rigurgito delle acque di piena con effetti sempre più significativi al crescere del tempo di ritorno dell'evento.

La rappresentazione geometrica della copertura terminale del Torrente Bisagno, con imbocco subito a monte del piano ferroviario della stazione di Brignole e termine in corrispondenza dello sbocco a mare del corso d'acqua, è stata descritta nel dettaglio nel Par. 4.3. La tombinatura presenta un primo tratto non oggetto di adeguamento recente e un tratto ampliato prima dell'evento del novembre 2011 (1° lotto del rifacimento, l'unico sinora completato tra quelli in progetto).

Il primo tratto ha inizio all'imbocco della copertura (progr. 5411) per poi svilupparsi al di sotto di viale Brigate Bisagno e terminare in corrispondenza di via Maddaloni, nei pressi del Palazzo della Questura, alla progressiva 6243: la geometria di tale tratto è stata desunta dal modello "HEC Copertura Brignole" fornito dal Committente (vd. Par. 4.3), previa verifica della congruenza con le altre fonti informative disponibili.

Il secondo e ultimo tratto della copertura è relativo all'unico segmento portato a compimento del progetto di rifacimento globale della copertura di Brignole (1° lotto). Il tratto termina con lo sbocco a mare presso la zona Fiera di Genova e dunque si sviluppa dalla progressiva 6243 alla progressiva 6898. Le sezioni per tale segmento della tombinatura sono state desunte dal modello "HYD Copertura Brignole" fornito dal Committente, già disponibile in formato DHI Mike11 (vd. Par. 4.3).





Relativamente alle portate smaltibili dalla copertura, è opportuno evidenziare come la sezione critica della struttura, ovvero quella che presenta intradosso più basso e che dunque va considerata per la verifica idraulica, non è quella di imbocco (progr. 5411) ma quella subito a valle del piano ferroviario (progr. 5550). L'imbocco della copertura, infatti, è costituito da una sezione a 4 archi con quota del colmo pari a 10.4 m s.l.m., valore che rimane all'incirca invariato sin al termine del piano ferroviario circa 126 m a valle. La prima sezione a valle del piano ferroviario (progr. 5538 metri) presenta una geometria a 4 scatolari con intradosso a 8.79 m s.l.m., seguita 12.5 m a valle da un abbassamento dell'intradosso a 7.62 m s.l.m.. Quest'ultima sezione risulta dunque la prima a essere caratterizzata da funzionamento in pressione in caso di evento di piena. Tale sezione, e dunque l'intera struttura, risulta andare in pressione per portata pari a circa 590 m³/s, valore coerente con quanto riportato nella Relazione della Procura che stima una capacità di smaltimento della copertura vicina a 600 m³/s.

Nelle tre figure seguenti si riporta il livello del pelo libero al momento dell'entrata in pressione della copertura, ovvero al momento in cui il livello del pelo libero nella sezione critica (progr. 5550) raggiunge l'intradosso (7.62 m s.l.m.). In Figura 4.82 si illustra la sezione di imbocco della copertura, in Figura 4.83 la prima sezione a valle del piano ferroviario (progr. 5538) e in Figura 4.84 la sezione critica (progr. 5550) dove il livello è dunque pari all'intradosso.

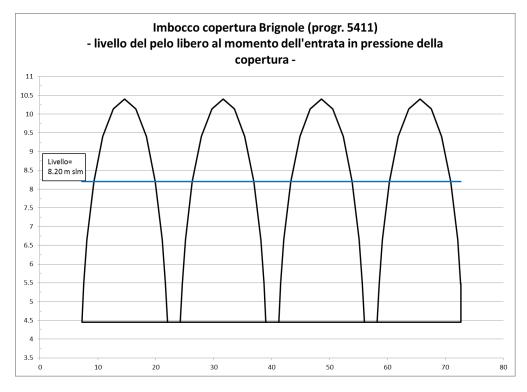


Figura 4.82 Imbocco copertura di Brignole (progr. 5411): livello del pelo libero al momento dell'entrata in pressione della struttura (sezione critica progr. 5550).





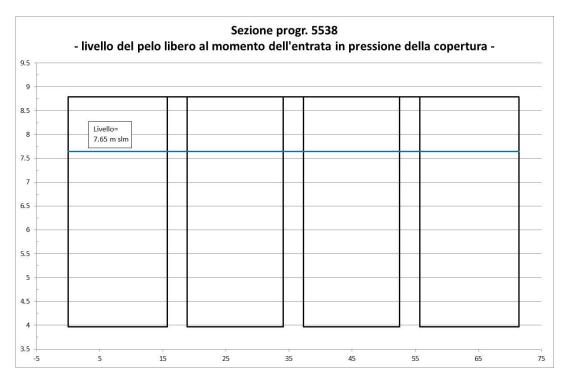


Figura 4.83 Sezione al termine del piano ferroviario di Brignole (progr. 5538): livello del pelo libero al momento dell'entrata in pressione della struttura (sezione critica progr. 5550).

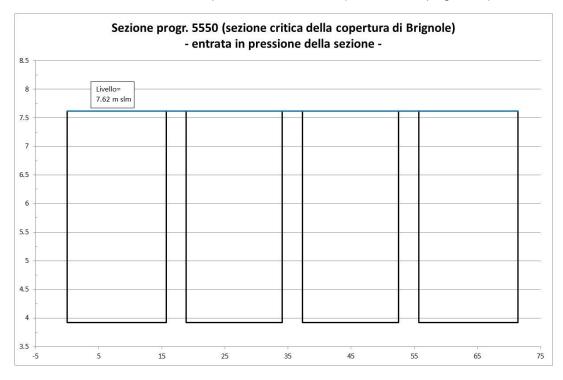


Figura 4.84 Sezione critica della copertura di Brignole (progr. 5550): funzionamento in pressione della sezione.

Relativamente alle sezioni alle progressive 5411 (imbocco tombinatura) e 5538, i valori di portata che comportano un loro funzionamento in pressione risultano essere rispettivamente circa pari a 830  $\text{m}^3/\text{s}$  e 720  $\text{m}^3/\text{s}$ .

In Figura 4.85 si riportano i livelli del pelo libero in corrispondenza dell'imbocco della copertura per i tempi di ritorno considerati (50, 200 e 500 anni) i cui valori si trovano, insieme a quelli di





tutte le sezioni del modello, nell'Allegato A del presente elaborato. Si osserva come per il solo tempo di ritorno cinquantennale il colmo degli archi della sezione non risulti raggiunto, realizzandosi un livello massimo delle acque di 9.90 m s.l.m.. Per i tempi di ritorno duecentennale e cinquecentennale, invece, il colmo viene ampiamente superato, a causa dei livelli pari rispettivamente a 11.99 m s.l.m. e 13.24 m s.l.m.. Quest'ultima quota, in particolare, risulta di poco inferiore a quella dei muretti laterali al piano ferroviario.

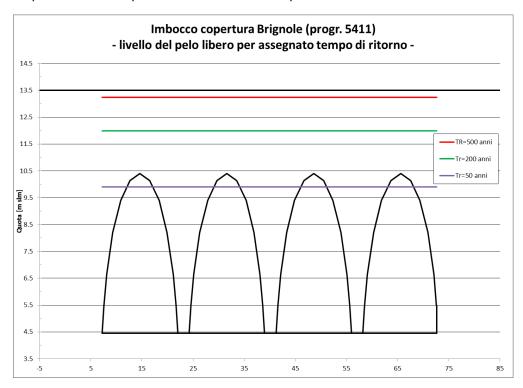


Figura 4.85 Livelli del pelo libero all'imbocco della copertura di Brignole (progr. 5411) per tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni.

# 4.4.3.2 Rio Fereggiano

I risultati relativi al Rio Fereggiano, a differenza del Torrente Bisagno, non sono presentati per sottotratti ma in visuale unica, vista la più ridotta estensione dell'area soggetta ad allagamento.

# Evento con tempo di ritorno 50 anni

L'evento cinquantennale risulta causare esondazioni molto limitate sul Rio Fereggiano. Il punto di esondazione è localizzato in corrispondenza dell'imbocco della copertura terminale (progr. 1992), che rappresenta un restringimento di luce significativo e comporta un innalzamento del tirante.

Un altro segmento che risulta critico è quello compreso tra B.C. Serramenti (progr. 1795) e l'ultimo attraversamento a monte dell'imbocco della copertura terminale (progr. 1892). Tale tratto non risulta sormontato lateralmente, ma i franchi idraulici molto ridotti (generalmente inferiori a 0.5 m) definiscono comunque una situazione di non trascurabile pericolosità idraulica.

Le acque esondate si propagano lungo via Fereggiano per circa 300 m, fermandosi circa 100 m a monte dell'incrocio con Corso Sardegna. I tiranti risultano inferiori a 0.5 m (Figura 4.86) e le velocità di deflusso generalmente inferiori a 0.5 m/s (Figura 4.87).

L'estensione della aree allagate risulta significativamente più ridotta rispetto alla mappatura del Piano di Bacino, legata a un minor volume di esondazione nel tratto a monte della copertura terminale. In particolare, il Piano di Bacino, a differenza delle risultanze del presente studio, prevede esondazione in corrispondenza degli attraversamenti circa 100 m a monte dell'imbocco





della tombinatura: secondo quanto riportato nella Relazione della Procura, la massima portata che può transitare senza produrre esondazioni nel tratto tra la copertura di Largo Merlo e quella terminale è pari a 65 m³/s, mentre la massima portata transitante nel tratto degli attraversamenti è pari a 72 m³/s per l'evento cinquantennale. La prossimità dei due valori tende dunque a confermare un'esondazione nulla o molto limitata in quel segmento: la situazione di potenziale criticità idraulica è comunque confermata dai franchi ridottissimi che caratterizzano tale segmento.

Relativamente all'esondazione in corrispondenza dell'imbocco della copertura terminale, si evidenzia come la massima portata transitante a monte dell'imbocco della tombinatura risulti circa pari a 75 m³/s, che equivale, secondo quanto riportato nella Relazione della Procura, alla massima portata smaltibile dalla copertura in assenza di interferenza prodotta dai livelli di massima piena nel Torrente Bisagno. Il modello del Rio Fereggiano sviluppato nell'ambito del presente studio conferma che tale valore di portata è quello associato all'entrata in pressione della tombinatura in condizioni indisturbate. Considerando che allo sbocco è stato posto un livello di bocca piena, è coerente il realizzarsi di un'esondazione in corrispondenza dell'imbocco, per quanto di non notevole entità.

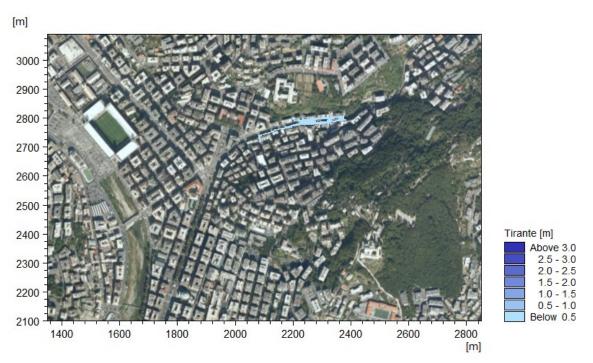


Figura 4.86 Rio Fereggiano: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=50 anni.





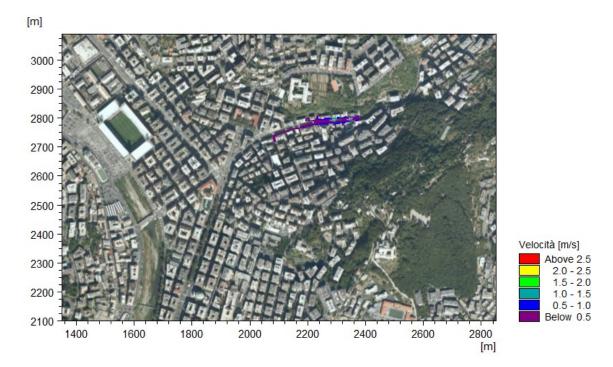


Figura 4.87 Rio Fereggiano: velocità massime per l'evento con Tr=50 anni.

## Evento con tempo di ritorno 200 anni

L'evento associato al tempo di ritorno duecentennale comporta esondazioni significativamente più diffuse e di maggior volume rispetto all'evento cinquantennale. Il Rio Fereggiano viene infatti sormontato lateralmente (sponda sinistra) da pochi metri a monte di B.C. Serramenti sino alla tombinatura terminale: da qui poi le acque si propagano sino a valle del piano ferroviario di Brignole.

I tiranti massimi, rappresentati in Figura 4.88, risultano generalmente non superiori a 0.5 m lungo Corso Sardegna, nell'area in sinistra di Ponte Castelfidardo e a valle del piano ferroviario. Tiranti superiori si realizzano invece subito a valle dell'imbocco della copertura terminale del Rio Fereggiano e nella zona compresa tra la sponda sinistra del Torrente Bisagno e Corso Sardegna

L'estensione delle aree allagate risulta in buona coerenza con le mappe di inondabilità del Piano di Bacino.





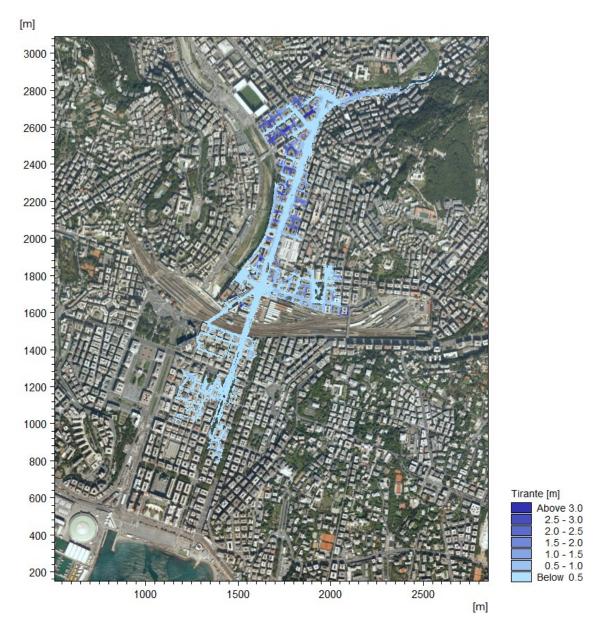


Figura 4.88 Rio Fereggiano: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=200 anni.

Le velocità di deflusso (Figura 4.89) risultano generalmente inferiori a 0.5 m/s, con le significative eccezioni di via Fereggiano e Corso Sardegna. Lungo la prima, i valori massimi di velocità tendono a superare i 3 m/s, sino a raggiungere Corso Sardegna dove il flusso perde velocità mantenendosi comunque superiore a 2 m/s quasi sino in corrispondenza della passerella Firpo.







Figura 4.89 Rio Fereggiano: velocità massime per l'evento con Tr=200 anni.

#### Evento con tempo di ritorno 500 anni

L'area allagata dall'evento con tempo di ritorno cinquecentennale presenta estensione molto simile a quella associata all'evento duecentennale a monte del piano ferroviario di Brignole, ad esclusione di una presenza di acqua anche in sponda destra al Torrente Bisagno, dovuta al passaggio delle acque al di sopra della copertura di piazzale Marassi. A valle della stazione ferroviaria le acque dell'evento a frequenza minore si propagano maggiormente sia trasversalmente sia longitudinalmente, arrivando sino a mare in corrispondenza dei Giardini M.L. King.

In sponda destra al Torrente Bisagno le acque si propagano dalla copertura di Marassi lungo via Canevari sino a poche decine di metri a valle della piazzetta A.Firpo, in corrispondenza della passerella omonima. I tiranti risultano generalmente inferiori a 0.5 m.

I tiranti massimi a valle della stazione di Brignole risultano realizzarsi a sinistra di Viale Brigate Partigiane nella zona compresa tra via Pisacane e via Cecchi con valori superiori a 1.5 m. La mappatura del Piano di Bacino è in forte accordo con le aree allagate restituite dalla simulazione idrodinamica.





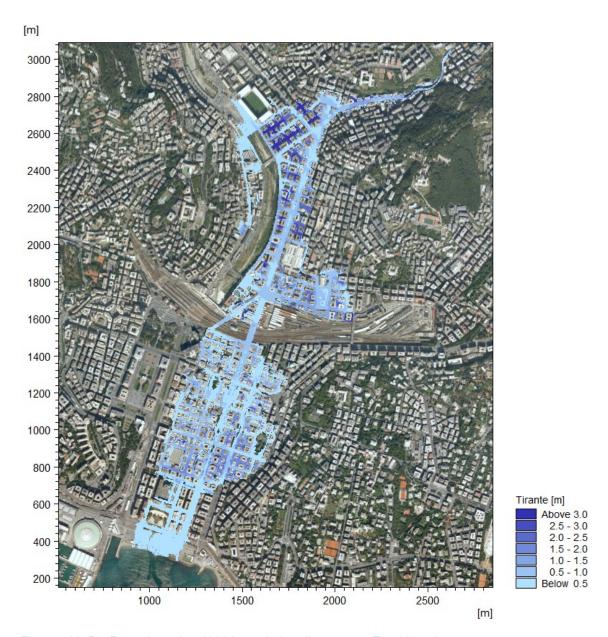


Figura 4.90 Rio Fereggiano: tiranti idrici massimi per l'evento con Tr=500 anni.

Per quanto riguarda le velocità di deflusso (Figura 4.91), similmente all'evento duecentennale i valori maggiori si riscontrano lungo via Fereggiano e Corso Sardegna. Lungo tali due arterie si realizzano velocità superiori a 3 m/s sino a via Cagliari, ortogonale di Corso Sardegna. Da quel punto sino al varco sotto il piano ferroviario le velocità risultano sempre superiori a 2 m/s, con punte nuovamente superiori a 3 m/s.





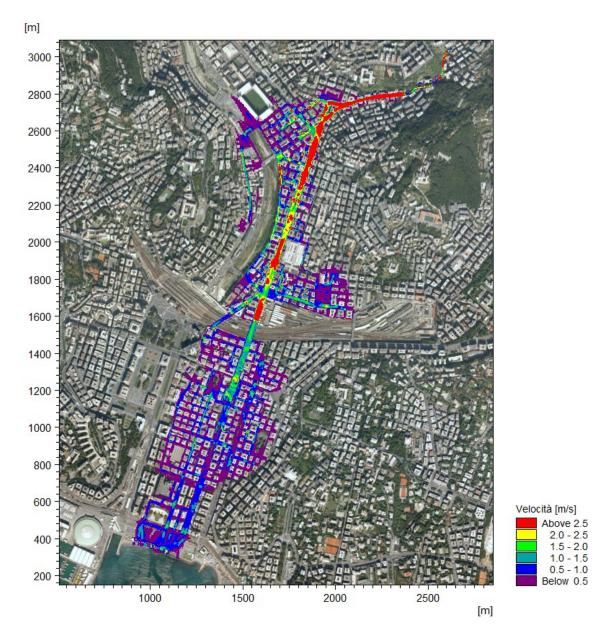


Figura 4.91 Rio Fereggiano: velocità massime per l'evento con Tr=500 anni.

### 4.4.3.3 Restituzioni

La presente relazione è integrata da un corollario di tabelle ed elaborazioni cartografiche che forniscono un quadro di dettaglio sui risultati della simulazione modellistica effettuata per assegnato tempo di ritorno.

Nello specifico, sono state predisposte le seguenti risultanze:

- tabelle relativa ai valori idrodinamici in alveo per tutti i tratti considerati, riportate nell'allegato A. Le tabelle riportano, per ogni tratto modellato, le seguenti informazioni:
  - o progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
  - o ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
  - o quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.l.m.] delle quote d'alveo;





- Y: tirante idrico in [m];
- o PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- Fr: numero di Froude;
- H: valore del carico totale in [m s.l.m.].
- Estensione delle aree inondabili e delle aree storicamente inondate sull'area oggetto di studio, riportata nell'elaborato 22800503-01-00600, Tavola 9 e Tavola 17;
- Griglia di valori massimi di velocità simulati per assegnato tempo di ritorno sull'area oggetto di studio, riportata nell'elaborato cartografico 22800503-01-00600, Tavole 10 e 18 (Tr=50 anni), Tavole 11 e 19 (Tr=200 anni), Tavole 12 e 20 (Tr=500 anni);
- Griglia di valori massimi di tiranti idrici simulati per assegnato tempo di ritorno sull'area oggetto di studio, riportata nell'elaborato cartografico 22800503-01-00600, Tavole 13 e 21 (Tr=50 anni), Tavole 14 e 22 (Tr=200 anni), Tavole 15 e 23 (Tr=500 anni);
- Estensione delle fasce di inondabilità sull'area oggetto di studio, riportata nell'elaborato 22800503-01-00600, Tavole 16 e 24;
- Cartografia relativa alla rappresentazione degli ambiti normativi relativi a Torrente Bisagno e Rio Fereggiano, riportata nell'elaborato 22800503-01-00800.

Relativamente all'ultimo punto dell'elenco, ovvero l'elaborato di rappresentazione degli ambiti normativi, di seguito si riporta una descrizione della metodologia per la loro definizione. Tale differenziazione viene effettuata nelle sole aree di fascia B, ovvero interessate da allagamento per un tempo di ritorno pari a 200 anni, che possono venire ulteriormente suddivise in ambiti BB e B0, come previsto dai criteri ex DGR 250/2005.

La discriminazione tra diversi ambiti di fascia avviene in base ai valori massimi di tirante idrico e velocità, come illustrato in Figura 4.92.

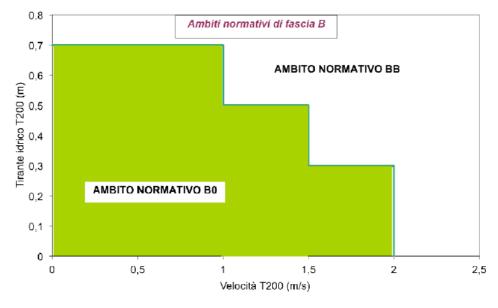


Figura 4.92 Soglie di pericolosità relativa in termini di tirante idrico locale h<sub>200</sub> condizionato alla velocità locale della corrente v<sub>200</sub> ai fini della definizione degli ambiti normativi in fascia B.





# 5 Comparazione con studi precedenti

Di seguito si riporta il confronto dei risultati su specifici tratti del Torrente Bisagno in relazione a un precedente studio di ITEC Engineering srl, su committenza di Infrastrutture Liguria. Tale studio, redatto nel 2012, ha riguardato la messa in sicurezza del tratto tra Ponte Feritore e Ponte Monteverde finalizzato anche alla realizzazione della nuova sede viaria per un servizio di TPL in sede propria.

Si riporta inoltre anche un'analisi di dettaglio sui tiranti della zona limitrofa allo Stadio Marassi.

## 5.1 Verifica idraulica Ponte Carrega (progr. 1355)

Nell'aprile del 2012 è stato redatto da ITEC Engineering srl il progetto preliminare relativo alla sistemazione idraulica del tratto del torrente Bisagno nel tratto compreso tra Ponte Feritore (progr.661) e Ponte Monteverde (progr. 2675), in corrispondenza del Cimitero di Staglieno<sup>7</sup>. Tale studio fa riferimento a un precedente studio di dettaglio del 2009 condotto sempre da ITEC Engineering srl relativo alla messa in sicurezza dello stesso tratto in relazione alla portata con tempo di ritorno duecentennale.

Il manufatto di attraversamento di Ponte Carrega (Figura 5.1) viene indicato come punto di alta criticità del tratto, a causa della sensibile riduzione della luce libera di deflusso dovuta alla sua geometria, caratterizzata da sei pile in alveo. Lo studio evidenzia come tale struttura, nello stato attuale, comporti un rigurgito e un conseguente sovralzo rispetto alla quota spondale di 1.7 m per la portata duecentennale.



Figura 5.1 Localizzazione di Ponte Carrega sul Torrente Bisagno.

<sup>&</sup>quot;Messa in sicurezza del T. Bisagno tra ponte Monteverde e ponte Feritore finalizzata anche alla realizzazione della nuova sede viaria per un servizio di TPL in sede propria" – Relazione idraulica e relazione idraulica integrativa, 2012 - ITEC Engineering S.r.l. nell'ambito della convenzione tra Regione Liguria e Infrastrutture Liguria s.r.l.





Pur in mancanza del modello HEC-RAS di riferimento dello studio ITEC, le geometrie di Ponte Carrega e dell'alveo sono state confrontate con quelle schematizzate nell'ambito del presente studio, traendo i dati dal report del 2012 associato al progetto preliminare. In esso infatti si riportano le sezioni trasversali per le strutture di attraversamento e di stramazzo presenti nel tratto, oltre al profilo longitudinale delle quote di fondo alveo. Si è così potuto verificare come la geometria di Ponte Carrega e il profilo di fondo alveo siano del tutto coerenti con quelli utilizzati nello studio attuale, per quanto tale analisi sia necessariamente limitata alle sole quote di fondo alveo e non alla geometria trasversale delle sezioni nel suo complesso.

Anche nel presente studio Ponte Carrega viene indicato come principale punto di criticità idraulica del tratto, causando esondazione sia in destra sia in sinistra. La simulazione effettuata presenta valori di pelo libero, a monte di Ponte Carrega, circa 0.4 m inferiori rispetto a quelli risultanti dallo studio ITEC.

Tale differenza è prioritariamente da imputare a 2 aspetti degli approcci di simulazione. Una differenza primaria tra i due studi è relativa alla tipologia modellistica adottata. Lo studio del 2009, ripreso per la progettazione preliminare del 2012, è stato condotto attraverso un codice di calcolo monodimensionale, HEC-RAS sviluppato dal Hydraulic Engineering Center del US ARMY Corps of Engineers. L'approccio monodimensionale prevede che la modellazione della traslazione del volume liquido in alveo venga effettuata sotto l'assunzione di sponde infinitamente alte: di conseguenza, non sono tenute in conto le eventuali esondazioni e la conseguente laminazione delle portate alveate.

L'approccio bidimensionale adottato nel presente studio consente invece di modellare anche le dinamiche trasversali e la propagazione del volume liquido non contenuto in alveo. In presenza di esondazione, il livello del pelo libero restituito da un modello bidimensionale risulterà inferiore rispetto a quello calcolato da un modello monodimensionale a causa dell'assenza dell'ipotesi di argini infintamente alti.

Una seconda ragione che ha determinato i valori inferiori di pelo libero nelle simulazioni effettuate dagli scriventi risiede nella modellazione degli input di portata in ingresso al modello. Lo studio ITEC ha considerato come condizione di testata (localizzata circa 50 m a monte di Ponte Feritore) il valore di picco per il tempo di ritorno duecentennale per il bacino del Torrente Bisagno chiuso in corrispondenza di Ponte Monteverde (nei pressi di Staglieno), pari a 1150 m³/s . Nella simulazione effettuata nell'ambito del presente studio invece si è posto come input di monte l'idrogramma associato al bacino chiuso poco a monte di Ponte Feritore, pari a 1104 m³/s, mentre la parte residua del bacino è stata tenuta in conto fornendo al modello il contributo distribuito lungo lo sviluppo del tratto. Tale schematizzazione consente di simulare nella maniera più rispondente alla realtà l'effettivo incremento di portata al crescere dell'area contribuente.

Come verifica dell'effettiva influenza delle due componenti sopra menzionate nel determinare la differenza tra le risultanze dei due modelli, si è effettuata una simulazione del setup bidimensionale applicando l'approccio seguito dal modello ITEC. Si è quindi sconnesso il modulo 2D (MIKE 21), in modo da considerare sponde infinitamente alte, e si è inserita a monte di Ponte Feritore una portata costante pari a 1150 m³/s: i valori di livello del pelo libero restituiti dal modello così modificato sono risultati molto simili (con differenze generalmente dell'ordine del cm) a quelli del modello ITEC, confermando così le ipotesi sull'origine delle differenze tra gli output dei due modelli.

### 5.2 Portate critiche

Il progetto preliminare redatto da ITEC Engineering srl include un'integrazione relativa, tra l'altro, all'analisi delle criticità dei tratti iniziale e terminale del tratto di studio del Torrente Bisagno: il tratto di monte si sviluppa da Ponte Feritore (progr.661) a ponte Monteverde (progr. 2675) e il secondo copre da Ponte Serra (progr. 4556) all'imbocco della copertura di Brignole (progr. 5411).





Tale studio, basato su un approccio idrodinamico di moto permanente gradualmente variato, riporta per entrambi i tratti di studio i valori di portata di esondazione in sponda destra e sinistra per portate di input crescenti a partire da 650 m³/s ad intervalli di 50 m³/s. Si è dunque effettuata una comparazione tra le portate critiche, ovvero quelle che comportano esondazione, definite dallo studio integrativo e quelle stimate nell'ambito del presente incarico.

### 5.2.1 Tratto Ponte Feritore – Ponte Monteverde

Il tratto da Ponte feritore a ponte Monteverde presenta un'estensione longitudinale di circa 2 km (Figura 5.2).



Figura 5.2 Localizzazione di Ponte Feritore e Ponte Monteverde lungo il Torrente Bisagno.

Lo studio di ITEC Engineering identifica la portata che dà origine ad esondazione, inizialmente solo in sponda destra, pari a un valore compreso tra 750 m³/s e 800 m³/s (Tabella 5.1).





Tabella 5.1 Portate di esondazione per portate crescenti in alveo per il tratto Ponte Feritore – Ponte Monteverde secondo lo studio Integrativo di ITEC Engineering srl.

	Tratto Feritore-Monteverde											
Q <sub>tot</sub>	Qtot 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100 1150											
Q <sub>es</sub> Ds	0	0	1	6	15	36	60	88	118	151	186	
Q <sub>es</sub> Sn	0	0	0	0	1	3	6	11	16	23	29	
Qres	650	700	749	794	834	861	884	901	916	926	935	

Relativamente allo studio attuale, il primo timestep che fa registrare esondazione è alle 2:45, con sormonto localizzato in sponda destra in corrispondenza di Ponte Carrega (progr. 1355). Il timestep di salvataggio precedente a quello delle 2:45 è relativo alle 2:40: i valori di portata presso Ponte Carrega per tali timesteps risultano rispettivamente pari a 820 m³/s e 770 m³/s. Di conseguenza, le risultanze per il tratto Ponte Feritore – Ponte Monteverde concordano con lo studio di ITEC sia come valore di portata critica, compreso tra 750 m³/s e 800 m³/s, sia per la sponda interessata per prima dal fenomeno esondativo, la destra.

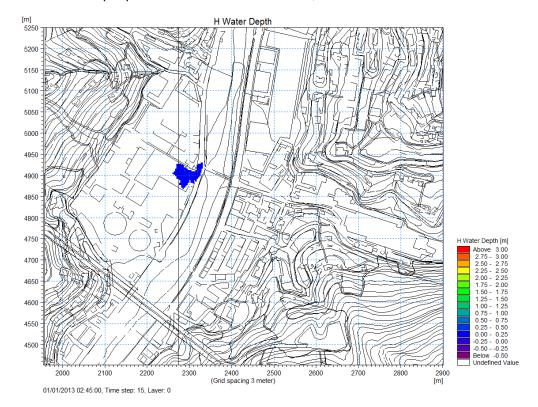


Figura 5.3 Localizzazione del punto di iniziale esondazione nel tratto Ponte Feritore – Ponte Monteverde, in corrispondenza di Ponte Carrega in sponda destra.

### 5.2.2 Tratto Ponte Serra - Copertura di Brignole

Il segmento compreso tra Ponte Serra (progr. 4556) e l'imbocco della copertura di Brignole (progr. 5411) si sviluppa per circa 850 m (Figura 5.4).







Figura 5.4 Localizzazione di Ponte Serra e l'imbocco della copertura di Brignole sul Torrente Bisagno.

Lo studio di ITEC Engineering prevede l'inizio dell'esondazione per portate comprese tra 650 m³/s e 700 m³/s, con valori di portata esondata paritari in sponda destra e sinistra per una forzante pari a 700 m³/s. Tabella 5.2 riporta i valori dello studio ITEC.

Tabella 5.2 Portate di esondazione per portate crescenti in alveo per il tratto Ponte Serra – Copertura di Brignole secondo lo studio Integrativo di ITEC Engineering srl.

	Tratto ponte Serra-Brignole												
Q <sub>tot</sub>	Qtot 650 700 800 900 950 1000 1018 1100 1126 1200 1300												
$Q_{es}Ds$	0	3	42	74	88	103	109	139	147	177	216		
$Q_{es}Sn$	0	3	48	107	137	169	180	229	241	283	335		
Qres													

La Figura 5.5 illustra il primo timestep per il quale si ha esondazione nel tratto di indagine, ovvero le 2:40. Si nota come il punto di sormonto sia localizzato presso Borgo Incrociati, in destra all'imbocco della copertura di Brignole. I valori di portata tra le 2:35 e le 2:40 presso il punto di sormonto passano da 612 m³/s a 660 m³/s: lo studio oggetto del presente report risulta dunque piuttosto concorde coi risultati di ITEC, per quanto la portata critica risulti leggermente inferiore nello modello bidimensionale. Tale circostanza può essere legata al fatto che il presente studio è stato effettuato considerando l'assenza dei muretti spondali lungo il Torrente





Bisagno, come da richiesta del Committente, mentre la relazione di ITEC non specifica tale dettaglio.

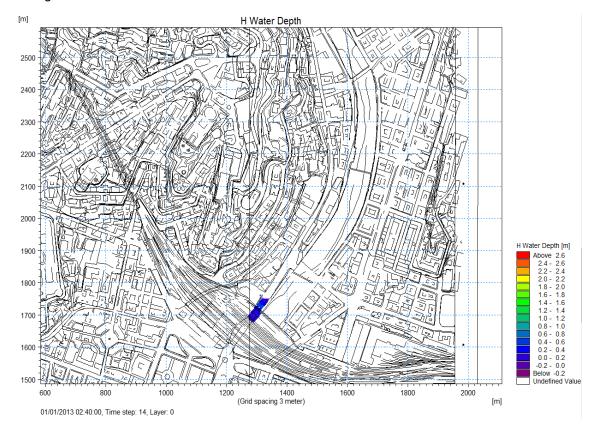


Figura 5.5 Localizzazione del punto di iniziale esondazione nel tratto Ponte Serra – Copertura di Brignole, in corrispondenza dell'imbocco della copertura in sponda destra.

# 6 Conclusioni

Le analisi idrauliche condotte hanno consentito di definire un quadro molto preciso dell'assetto idraulico dei corsi d'acqua indagati e delle relative condizioni di pericolosità idraulica che interessano le aree edificate circostanti. In linea generale emerge la conferma che le condizioni di criticità derivano, per una parte assolutamente preponderante, dalle interferenze con il deflusso di piena determinate dalle infrastrutture di attraversamento e di tombinatura dell'alveo (nel migliori dei casi con franchi inadeguati e con condizioni di deflusso che difficilmente possono sopportate fenomeni di parziale ostruzione che sono molto frequenti in caso di piena); ulteriore elemento generale è naturalmente rappresentato dai severi condizionamenti imposti sulle dimensioni e sul tracciato degli alvei dal processo di intensa urbanizzazione e infrastrutturazione del territorio.

In maggior dettaglio, le condizioni di assetto idraulico e di pericolosità del torrente Bisagno e del rio Fereggiano possono essere di seguito sintetizzate con riferimento soprattutto ai tempi di ritorno di 50 e 200 anni, che costituiscono i riferimenti rispetto ai quali può essere valutata la compatibilità del rischio idraulico correlato, mentre il tempo di ritorno di 500 anni rappresenta sostanzialmente condizioni di rischio residuale rispetto alla quali è opportuno intervenire con le misure tipicamente non strutturali proprie della gestione delle piene in corso di evento.

<u>Torrente Bisagno</u>. Le analisi idrauliche condotte mostrano che per il tempo di ritorno di 50 anni i fenomeni di esondazione sono sostanzialmente limitati all'ultimo tratto, tra ponte Castelfidardo e la foce, e interessano con altezze idriche discrete le aree edificate circostanti.





Per il tempo di ritorno di 200 anni si manifestano inondazioni di estensione complessivamente limitata nei due tratti di monte che vanno dal ponte Feritore alla passerella Firpo, per una lunghezza di circa 4500 m rispetto ai complessivi 7000 circa dell'intero tronco indagato. Esse interessano sostanzialmente le aree in destra e sinistra tra ponte Carrega (idraulicamente non verificato) e il viadotto autostradale e, nel tratto successivo, dalla copertura di Staglieno alla passerella Firpo (per circa 1300 m di lunghezza) in destra per l'intera estensione e in sinistra per la sola zona compresa tra ponte Campanella e la passerella di via Bobbio.

L'ultimo tratto, a valle della passerella Firpo, è interessato da inondazioni che si localizzano a monte della copertura di Brignole e a valle del piano ferroviario dove vengono coinvolte aree di estensione complessiva significativamente maggiore rispetto a quelle interessate dal tempo di ritorno di 50 anni.

Come ulteriore elemento di analisi si riportano in Tabella 6.1 i valori di franco idraulico per i tre tempi di ritorno considerati nel presente studio associati a tutte le strutture di attraversamento presenti nel tratto del Torrente Bisagno.

Tabella 6.1 Livello di intradosso, estradosso, pelo libero e franco idraulico degli attraversamenti lungo il tratto del Torrente Bisagno per i tre tempi di ritorno considerati.

			BISA	AGNO				,	,	
Struttura						Stato att	uale			
	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	Estradosso	TR	50	TR	200	TR:	500
Nome Sezione	PROGR.	SEZIONE	iiitiauosso	EStrauosso	P.L.	Franco	P.L.	Franco	P.L.	Franco
	[m]	ID	[m]	[m]	[m sm]	[m]	[m sm]	[m]	[m sm]	[m]
Ponte Feritore - monte	656	78.3	38.94	40.25	37.34	1.60	38.72	0.22	39.85	-0.91
Ponte Guglielmetti - monte	974	73.3	36.06	37.43	35.41	0.65	37.14	-1.08	38.36	-2.30
Ponte Carrega - monte	1353	67.3	35.02	37.04	34.07	0.95	35.72	-0.70	36.70	-1.68
Ponte Veronelli - monte	1578	63.3	33.81	34.01	29.99	3.82	30.98	2.83	31.59	2.22
Ponte Bezzecca - monte	1976	58.3	28.36	29.45	27.67	0.69	28.94	-0.58	30.22	-1.86
Passerella pedonale - monte	2131	55.4	29.65	30.87	26.53	3.12	27.39	2.26	28.45	1.20
Ponte Monteverde - monte	2666	45.1	24.85	26.35	22.00	2.85	23.09	1.76	24.10	0.75
Copertura Staglieno - monte	2936	38	24.35	25.45	20.49	3.86	22.06	2.29	22.88	1.47
Ponte Campanella - monte	3374	35.2	20	21	20.30	-0.30	21.77	-1.77	22.70	-2.70
Passerella pedonale - monte	3588	32.2	20.5	21.7	17.82	2.68	18.89	1.61	19.75	0.75
Passerella pedonale - monte	3927	26.8	18.7	19.9	14.72	3.98	15.83	2.87	16.83	1.87
Copertura Marassi - monte	4113	25	15.42	16.52	13.63	1.79	14.89	0.53	15.95	-0.53
Ponte Serra - monte	4549	19.2	14	15.2	12.68	1.32	14.16	-0.16	15.18	-1.18
Passerella Firpo - monte	4858	13.2	11.9	13.1	10.98	0.92	12.41	-0.51	13.60	-1.70
Ponte Castelfidardo - monte	5207	5.2	8.9	10.5	10.17	-1.27	12.10	-3.20	13.17	-4.27
Copertura Brignole (imbocco)	5410	0.9	10.4	13.5	9.90	0.50	11.99	-1.59	13.24	-2.84
Copertura Brignole (sezione critica)	5550	0.96	7.62	-	7.62	0.00	7.62	0.00	7.62	0.00
Copertura Brignole (inizio 1° lotto)	6243	0.69	5.8	-	4.58	1.22	5.14	0.66	5.46	0.34

Dai valori riportati in tabella si può osservare come due strutture, Ponte Campanella e Ponte Castelfidardo, e la copertura di Brignole risultino andare in pressione già per un evento cinquantennale. Altri quattro attraversamenti risultano invece caratterizzati da franchi inferiori a 1 m, ovvero Ponte Guglielmetti, Ponte Carrega, Ponte Bezzecca e la passerella Firpo. Relativamente a un evento duecentennale, la maggior parte delle strutture risultano associate a franchi inferiori a 1 m.

<u>Rio Fereggiano</u>. Per il tempo di ritorno di 50 anni le aree inondate sono di estensione molto limitata, con un punto localizzato in corrispondenza dell'imbocco della copertura terminale (progr. 1992), che costituisce un restringimento di sezione significativo, e un ulteriore punto compreso tra la progressiva 1795 m e l'ultimo attraversamento a monte dell'imbocco della copertura terminale (progr. 1892 m), dove il franco è molto ridotto.

Per i 200 anni si ha una maggiore estensione delle inondazioni che si manifestano in sponda sinistra dalla progr. 1795 alla tombinatura terminale, da dove si propagano sino a valle del piano ferroviario di Brignole.

Come per il Torrente Bisagno, anche per il Rio Fereggiano si riportano i franchi idraulici per le strutture di attraversamento del tratto (Tabella 6.2). I valori descrivono una situazione di forte





criticità della tombinatura terminale, che risulta andare in pressione già per l'evento cinquantennale. Gli attraversamenti a monte di essa presentano franchi ridotti o ridottissimi (ponte sez.18) per la portata cinquantennale e risultano funzionare in pressione per l'evento duecentennale. L'imbocco della copertura di Largo Merlo invece risulta ampiamente verificata anche per l'evento a frequenza minore.

Tabella 6.2 Livello di intradosso, estradosso, pelo libero e franco idraulico degli attraversamenti lungo il tratto del Rio Fereggiano per i tre tempi di ritorno considerati.

			FERE	GIANO						
Struttura Stato attuale										
	ppocp	CEZIONE	1t	Fatural and	TR	50	TR	200	TR	500
Nome Sezione	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	Estradosso	P.L. Franco		P.L.	Franco	P.L.	Franco
	[m]	ID	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
Imbocco copertura Largo Merlo	1189	38	52.77	54	46.78	5.99	47.20	5.57	47.56	5.21
Ponte sez.18 - monte	1849	18	26.95	27.2	26.85	0.10	27.82	-0.87	28.30	-1.35
Ponte sez.17 - monte	1892	17	26.35	27.1	25.69	0.66	26.62	-0.27	27.45	-1.10
Imbocco copertura terminale	1986	14	22.9	24	24.30	-1.40	25.85	-2.95	26.79	-3.89

A fronte dei risultati sopra sinteticamente esposti le linee generali di intervento che possono essere delineate sono distinguibili sostanzialmente in due gruppi.

Il primo riguarda piccoli interventi locali destinati a risolvere situazioni di inadeguatezza puntale delle opere di contenimento o dei manufatti di attraversamento non incidenti sul quadro generale delle opere che determinano l'assetto idraulico che i corsi d'acqua devono conseguire per assicurare condizioni di rischio compatibili. Rientrano in questa tipologia di intervento anche quelli di manutenzione, ordinaria e straordinaria, che svolge notoriamente un ruolo essenziale, vista in particolare la tipologia dei torrenti in studio, e che andrebbe concentrata prioritariamente sui punti più critici delle aste torrentizie studiate.

Il secondo gruppo riguarda gli interventi di carattere strutturale il cui ruolo è quello di completare l'assetto attuale e che sono in sostanziale coerenza con quanto recentemente realizzato.

Con riferimento a quest'ultima categoria di interventi, la maggiore criticità attuale è ancora rappresentata dalla copertura terminale di Brignole; il completamento degli interventi di adeguamento realizzati con il 1° lotto costituiscono sicuramente un tema prioritario rispetto al quale risulta che sia stato avviato, principalmente attraverso l'inizio delle attività di progettazione, il percorso necessario per giungere alla realizzazione delle opere.

L'altro tema è quello dello scolmatore sia del Bisagno che del Fereggiano, anche questo già abbondantemente discusso e noto come problema. Le criticità evidenziate già nel Piano di Bacino vigente, confermate nel presente studio, sono tali e talmente diffuse che la soluzione può essere garantita solamente dalla realizzazione di queste opere e con la relativa deviazione della quota parte di portata che i tratti terminali dei due corsi d'acqua non sono in grado di smaltire.









# ALLEGATO A Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo









Di seguito si riportano le tabelle relative ai valori idrodinamici in alveo per tutti i tratti considerati. Le tabelle riportano le seguenti informazioni:

- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.l.m.] delle quote d'alveo;
- Y: tirante idrico in [m];
- o PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- Fr: numero di Froude;
- H: valore del carico totale in [m s.l.m.].

Nel caso di sezioni chiuse in cui la corrente raggiunge la quota di intradosso dell'impalcato, nella colonna "P.L." è riportata la quota di quest'ultimo, evidenziata dal simbolo (\*); conseguentemente rispetto alla quota di intradosso è determinata l'altezza d'acqua sul fondo della colonna "Y".

### **Evento 04 Novembre 2011**

BISAGNO										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]			
472	82	34.00	3.83	37.83	3.16	0.52	38.33			
533	81	33.64	3.95	37.59	3.30	0.53	38.15			
608	80	33.49	3.76	37.25	3.50	0.58	37.87			
630	79	33.55	3.62	37.17	3.31	0.55	37.72			
655	78.4	32.88	4.29	37.17	2.77	0.43	37.56			
656	78.3	32.88	4.28	37.16	2.78	0.43	37.55			
669	78.2	32.75	3.72	36.47	3.49	0.58	37.09			
672	78.1	32.75	3.70	36.45	3.52	0.58	37.08			
717	77	32.27	3.97	36.24	3.50	0.56	36.86			
762	76	32.09	3.93	36.02	3.47	0.56	36.63			
830	75	31.99	3.73	35.72	3.39	0.56	36.30			
924	74	31.80	3.59	35.39	3.11	0.52	35.88			
973	73.4	31.56	3.70	35.26	3.01	0.50	35.72			
974	73.3	31.56	3.70	35.26	3.01	0.50	35.72			
983	73.2	31.46	3.30	34.76	3.47	0.61	35.38			
987	73.1	31.43	3.32	34.75	3.44	0.60	35.36			
1028	72	31.60	2.96	34.56	3.58	0.66	35.21			





BISAGNO										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]			
1086	71	31.48	2.85	34.33	3.32	0.63	34.90			
1131	70	30.91	3.33	34.24	2.89	0.51	34.66			
1219	69	29.93	4.14	34.07	2.63	0.41	34.42			
1328	68	30.04	3.76	33.80	2.97	0.49	34.25			
1351	67.4	29.69	4.17	33.86	2.33	0.36	34.14			
1353	67.3	29.69	4.17	33.86	2.34	0.37	34.14			
1357	67.2	29.64	1.38	31.02	7.82	2.13	34.13			
1359	67.1	27.06	3.77	30.83	3.17	0.52	31.34			
1398	66	27.39	3.22	30.61	3.65	0.65	31.28			
1460	65	26.95	3.36	30.31	3.72	0.65	31.02			
1527	64	26.63	3.38	30.01	3.61	0.63	30.67			
1576	63.4	25.60	4.27	29.87	3.08	0.48	30.35			
1578	63.3	25.58	4.29	29.87	3.06	0.47	30.35			
1581	63.2	25.56	3.90	29.46	3.59	0.58	30.12			
1588	63.1	25.48	3.96	29.44	3.51	0.56	30.06			
1643	62	25.80	3.36	29.16	3.57	0.62	29.81			
1723	61	25.31	3.38	28.69	4.02	0.70	29.52			
1812	60	25.45	2.79	28.24	4.16	0.80	29.12			
1936	59	23.81	3.83	27.64	3.62	0.59	28.31			
1975	58.4	23.38	4.16	27.54	3.29	0.51	28.09			
1976	58.3	23.36	4.18	27.54	3.26	0.51	28.08			
1983	58.2	23.20	3.78	26.98	3.75	0.62	27.69			
1987	58.1	23.12	3.86	26.98	3.65	0.59	27.65			
2025	57	21.94	5.11	27.05	3.35	0.47	27.62			
2089	56	22.34	4.61	26.95	3.60	0.53	27.61			
2131	55.4	21.80	4.72	26.52	3.63	0.53	27.19			
2134	55.2	21.77	4.61	26.38	3.38	0.50	26.96			
2135	55.1	21.75	4.63	26.38	3.38	0.50	26.96			
2247	54	22.59	3.32	25.91	4.00	0.70	26.72			
2347	53	21.77	3.39	25.16	4.41	0.76	26.15			
2381	52	21.87	3.02	24.89	4.86	0.89	26.10			
2435	51	22.10	2.24	24.34	4.72	1.01	25.47			
2487	50	22.09	1.77	23.86	5.46	1.31	25.38			
2538	49.1	21.89	1.44	23.33	5.86	1.56	25.08			
2540	48.9	19.26	3.01	22.27	3.82	0.70	23.01			
2589	48	19.12	2.90	22.02	4.02	0.75	22.85			
2639	47	18.97	2.78	21.75	4.19	0.80	22.65			
2650	46	18.93	2.75	21.68	4.25	0.82	22.60			
2666	45.1	18.67	3.02	21.69	3.36	0.62	22.26			





BISAGNO										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]			
2684	44.9	18.66	3.01	21.67	3.37	0.62	22.24			
2687	44.75	18.85	2.75	21.60	3.54	0.68	22.23			
2748	44	18.65	2.62	21.27	4.23	0.83	22.18			
2784	43	18.54	2.51	21.05	4.21	0.85	21.95			
2791	42.1	18.51	2.48	20.99	4.28	0.87	21.93			
2793	42	18.51	2.47	20.98	4.09	0.83	21.83			
2804	41	17.30	3.63	20.93	4.11	0.69	21.79			
2830	40	17.44	3.37	20.81	4.03	0.70	21.64			
2936	38	17.14	3.26	20.40	3.43	0.61	21.00			
3246	37	16.00	4.30	20.30	2.39	0.37	20.59			
3250	36	16.00	4.32	20.32	2.25	0.34	20.58			
3320	35.35	15.53	4.71	20.24	2.33	0.34	20.51			
3373	35.3	15.18	5.00	20.18	2.32	0.33	20.46			
3374	35.2	15.18	5.00	20.18	2.32	0.33	20.46			
3390	35.1	15.13	3.27	18.40	3.96	0.70	19.19			
3394	35	15.18	3.18	18.36	4.02	0.72	19.18			
3442	34	13.82	4.38	18.20	2.95	0.45	18.64			
3547	33	13.77	4.17	17.94	3.11	0.49	18.44			
3587	32.3	14.29	3.46	17.75	3.56	0.61	18.39			
3588	32.2	14.29	3.45	17.74	3.57	0.61	18.39			
3592	32.1	14.24	2.59	16.83	5.16	1.02	18.19			
3595	32	14.24	2.56	16.80	5.21	1.04	18.18			
3640	31.5	12.93	3.27	16.20	4.39	0.77	17.18			
3646	31	12.75	3.42	16.17	4.20	0.73	17.07			
3726	30	12.60	3.11	15.71	3.92	0.71	16.49			
3841	29	12.25	2.92	15.17	3.87	0.72	15.93			
3891	28	12.30	2.64	14.94	4.10	0.81	15.79			
3892	27	12.30	2.54	14.84	4.21	0.84	15.75			
3927	26.8	12.15	2.46	14.61	4.36	0.89	15.58			
3932	26.3	12.10	2.47	14.57	4.36	0.88	15.54			
4112	26	10.22	3.21	13.43	3.56	0.63	14.09			
4113	25	10.22	3.21	13.43	3.61	0.64	14.09			
4383	24	9.52	3.28	12.80	4.51	0.79	13.84			
4384	23	9.51	3.46	12.97	3.35	0.58	13.54			
4438	22	9.32	3.42	12.74	3.42	0.59	13.33			
4497	21	9.15	3.43	12.58	3.36	0.58	13.15			
4515	20.5	8.99	3.57	12.56	3.22	0.54	13.09			
4530	20.25	8.62	3.97	12.59	2.91	0.47	13.02			
4538	20	8.43	4.18	12.61	2.77	0.43	13.00			





BISAGNO										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]			
4547	19.3	8.43	4.16	12.59	2.78	0.44	12.98			
4549	19.2	8.43	4.19	12.62	2.63	0.41	12.97			
4563	19.1	8.41	3.97	12.38	2.79	0.45	12.77			
4573	19. monte salto	8.80	3.47	12.27	3.10	0.53	12.76			
4599	18	8.63	3.49	12.12	3.51	0.60	12.75			
4662	17	8.23	3.55	11.78	4.34	0.74	12.74			
4721	16	7.74	3.78	11.52	4.09	0.67	12.37			
4771	15	7.83	3.47	11.30	4.05	0.69	12.14			
4791	14.66	7.76	3.49	11.24	3.87	0.66	12.01			
4793	14.33	7.75	3.49	11.24	3.85	0.66	12.00			
4819	14	7.66	3.55	11.21	3.57	0.61	11.86			
4858	13.2 monte ponte	7.43	3.68	11.09	3.50	0.58	11.71			
4862	13.1 valle ponte	7.43	3.61	11.04	3.59	0.60	11.69			
4891	12	7.<57	3.36	10.93	3.73	0.65	11.64			
4938	11	7.08	3.72	10.80	3.67	0.61	11.48			
5027	10	6.37	4.23	10.60	3.55	0.55	11.25			
5078	9	6.22	4.29	10.51	3.60	0.55	11.17			
5118	8	5.98	4.45	10.43	3.77	0.57	11.15			
5156	7	5.98	4.40	10.38	3.87	0.59	11.14			
5201	6	5.54	4.85	10.39	3.34	0.48	10.95			
5207	5.2	4.81	5.63	10.44	2.65	0.36	10.80			
5225	5.1	4.81	5.41	10.22	2.68	0.37	10.58			
5230	5	4.81	5.40	10.21	2.69	0.37	10.58			
5244	4.5	4.82	5.41	10.23	2.53	0.35	10.56			
5246	4	4.82	5.31	10.13	2.84	0.39	10.54			
5248	3.5	4.82	5.39	10.21	2.39	0.33	10.50			
5298	3	4.80	5.35	10.15	2.48	0.34	10.46			
5351	2	4.79	5.30	10.09	2.57	0.36	10.42			
5398	1	4.22	5.94	10.16	2.06	0.27	10.38			
5410	0.9	4.16	6.00	10.16	2.01	0.26	10.37			
5411	imbocco copertura Brignole	4.45	5.58	10.03	2.53	0.34	10.36			
5537	0.97	4.00	5.40	9.40	2.98	0.41	9.85			
5538	0.961	3.97	4.82	8.79*	2.58	0.38	9.13			
5550	0.96	3.92	3.70	7.62*	3.36	0.56	8.20			
5578	0.95	3.82	3.70	7.52*	3.53	0.59	8.16			
5598	0.94	3.76	3.70	7.46*	3.66	0.61	8.14			





BISAGNO										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]			
5617	0.93	3.69	3.70	7.39*	3.75	0.62	8.11			
5635	0.92	3.63	3.70	7.33*	3.85	0.64	8.09			
5654	0.91	3.57	3.70	7.27*	3.98	0.66	8.08			
5672	0.9	3.50	3.70	7.2*	4.14	0.69	8.07			
5691	0.89	3.44	3.70	7.14*	4.22	0.70	8.05			
5710	0.88	3.38	3.70	7.08*	4.26	0.71	8.00			
5730	0.87	3.31	3.70	7.01*	4.33	0.72	7.97			
5790	0.869	3.10	3.70	6.8*	4.33	0.72	7.76			
5850	0.74	2.90	3.70	6.6*	4.33	0.72	7.56			
5950	0.73	2.56	3.70	6.26*	4.33	0.72	7.22			
6050	0.72	2.22	3.70	5.92*	4.33	0.72	6.88			
6119	0.71	1.90	3.53	5.43	4.54	0.77	6.48			
6243	0.69	0.03	4.43	4.46	5.85	0.89	6.20			
6698	7 copertura	-1.61	3.91	2.30	4.20	0.68	3.20			
6698	7bis copertura	-1.61	3.91	2.30	4.10	0.66	3.16			
6798	8	-1.97	3.65	1.68	4.41	0.74	2.67			
6798	8bis	-1.97	3.65	1.68	4.28	0.72	2.61			
6898	9 copertura	-2.18	3.19	1.01	4.90	0.88	2.23			
6898	9bis foce	-2.18	3.19	1.01	4.76	0.85	2.16			
6986	10 foce	-3.00	3.52	0.52	4.31	0.73	1.47			
7088	11 foce	-5.00	5.42	0.42	0.72	0.10	0.45			

BISAGNO: PARCHEGGIO PENSILE										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]			
3892	27	12.3	2.64	12.3	3.39	0.67	12.89			
3927	26.8	12.15	2.61	12.15	3.38	0.67	12.73			
3932	26.3	12.1	2.64	12.1	3.35	0.66	12.67			
4112	26	11.22	2.6	11.22	3.39	0.67	11.81			
4230	25	10.48	2.82	10.48	3.09	0.59	10.97			
4383	24	9.52	3.44	9.52	4.48	0.77	10.54			
4384	23	9.51	3.45	9.51	1.13	0.19	9.58			





FEREGGIANO										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]			
129	670	81.19	2.28	83.47	5.41	1.14	84.96			
384	Sezione chiusa	73.54	3.35	76.89	5.99	1.04	78.72			
498	580	70.60	1.88	72.48	7.64	1.78	75.45			
636	546	59.87	2.49	62.36	4.79	0.97	63.53			
760	500	57.18	2.31	59.49	5.40	1.13	60.97			
875	460	54.15	2.09	56.24	5.12	1.13	57.57			
1014	425	49.19	2.94	52.13	4.97	0.92	53.39			
1110	403 valle ponte	48.00	2.10	50.10	5.58	1.23	51.68			
1138	400	47.06	2.22	49.28	5.41	1.16	50.77			
1169	390	46.21	2.21	48.42	6.74	1.45	50.73			
1189	380 monte ponte	45.33	2.18	47.51	4.85	1.05	48.70			
1192	passerella 38 - 41	45.87	1.55	47.42	4.88	1.25	48.63			
1204	40.4	45.02	2.14	47.16	5.26	1.15	48.57			
1244	38	43.83	1.98	45.81	6.10	1.39	47.70			
1287	35	41.75	2.46	44.21	4.95	1.01	45.46			
1331	31	40.55	2.95	43.50	6.04	1.12	45.36			
1356	330	38.85	4.00	42.85*	5.83	0.93	44.58			
1396	320	37.10	4.10	41.2*	4.83	0.76	42.39			
1421	310	36.52	4.34	40.86*	4.77	0.73	42.02			
1499	300	34.64	5.10	39.74*	4.04	0.57	40.57			
1545	290	33.55	4.14	37.69*	5.48	0.86	39.22			
1562	280	33.19	3.44	36.63*	6.34	1.09	38.68			
1575	270	32.18	3.62	35.8*	5.42	0.91	37.30			
1584	260	31.45	4.25	35.7*	4.28	0.66	36.63			
1589	250	31.36	4.34	35.7*	3.60	0.55	36.36			
1606	240	30.52	5.21	35.73	3.48	0.49	36.34			
1649	230	28.75	4.49	33.24	3.39	0.51	33.82			
1713	220	26.73	4.87	31.60	4.32	0.63	32.55			
1760	210	25.91	4.46	30.37	3.08	0.47	30.86			
1795	200	25.18	4.47	29.65	4.36	0.66	30.62			
1826	190 monte ponte	23.92	4.76	28.68	5.56	0.81	30.25			
1832	183 valle ponte	23.90	4.65	28.55	5.78	0.86	30.24			
1849	180 monte ponte	23.71	4.31	28.02	3.56	0.55	28.67			
1858	173 valle ponte	23.69	4.05	27.74	3.91	0.62	28.52			





		F	EREGGIA	NO			
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]
1859	173bis valle ponte	23.69	4.02	27.71	3.97	0.63	28.51
1892	170 monte ponte	22.80	4.69	27.49	3.18	0.47	28.01
1895	163 valle ponte	22.78	4.65	27.43	3.22	0.48	27.96
1943	160	21.75	5.02	26.77	4.76	0.68	27.92
1961	150	18.90	8.04	26.94	4.17	0.47	27.82
1992	140	19.20	3.70	22.9*	4.05	0.67	23.73
2074	130	17.55	3.55	21.1*	3.67	0.62	21.79
2167	120	15.30	4.70	20*	4.06	0.60	20.84
2257	110	14.30	4.60	18.9*	3.74	0.56	19.61
2336	100	13.40	3.90	17.3*	4.25	0.69	18.22
2389	90	12.90	3.85	16.75*	4.44	0.72	17.75
2410	80	12.60	3.90	16.5*	4.33	0.70	17.46
2428	70	12.30	4.00	16.3*	4.28	0.68	17.23
2429	60	12.20	3.80	16*	4.49	0.74	17.03
2496	50	12.01	3.49	15.5*	4.80	0.82	16.67
2592	40	11.35	3.65	15*	5.25	0.88	16.41
2725	30	10.94	3.30	14.24	5.21	0.92	15.63
2744	20	10.70	3.01	13.71	5.43	1.00	15.21
2789	10	10.30	2.24	12.54	5.56	1.19	14.12
2795	0	8.80	3.47	12.27	0.50	0.09	12.28

# Torrente Bisagno

## Tr=50 anni

		BIS	AGNO Tr	=50 anni				
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
472	82.00	34.00	3.96	37.96	3.27	0.52	38.51	2.04
533	81.00	33.64	4.10	37.74	3.38	0.53	38.32	1.96
608	80.00	33.49	3.92	37.41	3.53	0.57	38.04	2.37
630	79.00	33.55	3.79	37.34	3.33	0.55	37.90	2.38
655	78.40	32.88	4.47	37.35	2.82	0.43	37.75	2.24
656	78.30	32.88	4.46	37.34	2.82	0.43	37.75	1.60
669	78.20	32.75	3.85	36.60	3.57	0.58	37.25	2.86
672	78.10	32.75	3.83	36.58	3.61	0.59	37.24	2.90
717	77.00	32.27	4.09	36.36	3.58	0.57	37.01	1.95





	1		AGNO Tr	-ou anni		Γ	1	
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	٧	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
762	76.00	32.09	4.06	36.15	3.55	0.56	36.79	1.75
830	75.00	31.99	3.87	35.86	3.45	0.56	36.46	1.27
924	74.00	31.80	3.75	35.55	3.15	0.52	36.05	0.60
973	73.40	31.56	3.86	35.42	3.08	0.50	35.90	1.14
974	73.30	31.56	3.85	35.41	3.09	0.50	35.90	0.65
983	73.20	31.46	3.43	34.89	3.56	0.61	35.54	1.57
987	73.10	31.43	3.45	34.88	3.53	0.61	35.52	1.55
1028	72.00	31.60	3.10	34.70	3.63	0.66	35.37	0.95
1086	71.00	31.48	3.02	34.50	3.33	0.61	35.06	1.60
1131	70.00	30.91	3.51	34.42	2.88	0.49	34.84	1.83
1221	RilARPAL_63	31.28	2.98	34.26	2.66	0.49	34.62	0.98
1328	68.00	30.04	3.96	34.00	3.14	0.50	34.50	0.65
1351	67.40	29.69	4.38	34.07	2.36	0.36	34.35	0.33
1353	67.30	29.69	4.38	34.07	2.38	0.36	34.35	0.95
1357	67.20	29.59	1.80	31.39	6.59	1.57	33.60	2.91
1398	66.00	27.39	3.30	30.69	3.91	0.69	31.47	2.70
1460	65.00	26.95	3.44	30.39	3.83	0.66	31.14	2.70
1527	64.00	26.63	3.45	30.08	3.73	0.64	30.79	2.33
1576	63.40	25.60	4.39	29.99	3.15	0.48	30.49	3.85
1578	63.30	25.58	4.41	29.99	3.13	0.48	30.48	3.82
1581	63.20	25.56	4.00	29.56	3.67	0.59	30.24	4.24
1588	63.10	25.48	4.06	29.54	3.58	0.57	30.19	2.58
1643	62.00	25.80	3.46	29.26	3.64	0.63	29.94	2.37
1723	61.00	25.31	3.48	28.79	4.11	0.70	29.65	2.12
1812	60.00	25.45	2.89	28.34	3.72	0.70	29.05	1.77
1936	59.00	23.81	3.96	27.77	3.66	0.59	28.45	1.23
1975	58.40	23.38	4.28	27.66	3.35	0.52	28.24	1.36
1976	58.30	23.36	4.31	27.67	3.33	0.51	28.23	0.69
1983	58.20	23.20	3.86	27.06	3.85	0.63	27.82	1.96
1987	58.10	23.12	3.94	27.06	3.75	0.60	27.78	1.96
2025	57.00	21.94	5.00	26.94	3.61	0.52	27.60	1.45
2089	56.00	22.34	4.30	26.64	3.84	0.59	27.40	1.36
2131	55.40	21.80	4.73	26.53	3.45	0.51	27.14	3.12
2134	55.20	21.77	4.68	26.45	3.50	0.52	27.08	2.06
2135	55.10	21.75	4.70	26.45	3.49	0.51	27.07	2.04
2247	54.00	22.59	3.39	25.98	4.41	0.76	26.97	1.34
2347	53.00	21.77	3.46	25.23	4.51	0.77	26.27	1.70
2381	52.00	21.87	3.09	24.96	4.97	0.90	26.22	1.87
2435	51.00	22.10	2.30	24.40	4.83	1.02	25.59	2.06





		BIS	AGNO Tr	=50 anni				
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
2487	50.00	22.09	1.83	23.92	5.63	1.33	25.54	2.42
2540	48.90	19.26	3.16	22.42	3.95	0.71	23.22	3.65
2589	48.00	19.12	3.07	22.19	3.96	0.72	22.99	3.87
2639	47.00	18.97	3.02	21.99	4.30	0.79	22.93	3.96
2666	45.10	18.67	3.33	22.00	3.52	0.62	22.63	2.85
2687	44.75	18.85	3.02	21.87	3.59	0.66	22.52	3.91
2691	RilARPAL_82	18.57	3.12	21.69	4.02	0.73	22.52	4.63
2748	44.00	18.65	2.71	21.36	4.48	0.87	22.38	4.22
2784	43.00	18.54	2.59	21.13	4.38	0.87	22.11	4.28
2791	42.10	18.51	2.57	21.08	4.48	0.89	22.10	4.48
2793	42.00	18.51	2.55	21.06	4.50	0.90	22.10	4.50
2804	41.00	17.30	3.72	21.02	4.18	0.69	21.91	4.47
2830	40.00	17.44	3.46	20.90	4.01	0.69	21.72	4.35
2936	38.00	17.14	3.35	20.49	4.44	0.77	21.49	3.86
3246	37.00	16.00	4.40	20.40	2.44	0.37	20.71	1.40
3250	36.00	16.00	4.43	20.43	2.30	0.35	20.70	1.37
3320	35.35	15.53	4.81	20.34	2.38	0.35	20.63	1.00
3366	RilARPAL_86	14.39	5.95	20.34	2.19	0.29	20.59	0.68
3373	35.30	15.18	5.12	20.30	2.36	0.33	20.59	0.70
3374	35.20	15.18	5.12	20.30	2.36	0.33	20.58	-0.30
3390	35.10	15.13	3.30	18.43	4.08	0.72	19.28	2.52
3394	35.00	15.18	3.22	18.40	4.16	0.74	19.28	2.60
3415	RilARPAL_88	13.97	4.43	18.40	2.72	0.41	18.77	2.63
3442	34.00	13.82	4.47	18.29	3.01	0.45	18.75	1.92
3547	33.00	13.77	4.26	18.03	3.18	0.49	18.54	1.29
3587	32.30	14.29	3.54	17.83	3.62	0.61	18.50	0.87
3588	32.20	14.29	3.53	17.82	3.63	0.62	18.49	2.68
3592	32.10	14.24	2.65	16.89	5.23	1.02	18.29	1.76
3595	32.00	14.24	2.62	16.86	5.29	1.04	18.28	1.79
3640	31.50	12.93	3.35	16.27	4.46	0.78	17.29	2.24
3646	31.00	12.75	3.49	16.24	4.27	0.73	17.17	2.25
3726	30.00	12.60	3.19	15.79	4.04	0.72	16.62	2.06
3841	29.00	12.25	3.00	15.25	3.95	0.73	16.04	1.75
3927	26.80	12.15	2.57	14.72	4.34	0.86	15.68	3.98
3932	26.30	12.10	2.59	14.69	4.34	0.86	15.64	2.03
4113	25.00	10.10	3.53	13.63	3.74	0.64	14.34	1.79
4383	24.00	9.52	3.33	12.85	4.52	0.79	13.89	1.45
4384	23.00	9.51	3.46	12.97	3.36	0.58	13.55	2.13





		BIS	AGNO Tr	=50 anni	1	T		
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
4438	22.00	9.32	3.46	12.78	3.49	0.60	13.40	2.42
4497	21.00	9.15	3.47	12.62	3.46	0.59	13.23	2.54
4515	20.50	8.99	3.63	12.62	3.33	0.56	13.18	2.44
4530	20.25	8.62	4.04	12.66	3.00	0.48	13.12	2.40
4538	20.00	8.43	4.25	12.68	2.85	0.44	13.10	2.37
4547	19.30	8.43	4.22	12.65	2.87	0.45	13.07	2.36
4549	19.20	8.43	4.25	12.68	2.71	0.42	13.06	1.32
4563	19.10	8.41	3.99	12.40	2.89	0.46	12.83	2.58
4573	19. monte salto	8.80	3.50	12.30	3.22	0.55	12.82	3.03
4599	18.00	8.63	3.45	12.08	3.73	0.64	12.79	2.87
4662	17.00	8.23	3.50	11.73	4.33	0.74	12.68	1.95
4721	16.00	7.74	3.71	11.45	4.12	0.68	12.31	0.95
4771	15.00	7.83	3.38	11.21	4.12	0.72	12.08	0.38
4791	14.66	7.76	3.38	11.14	3.95	0.69	11.94	0.36
4793	14.33	7.75	3.39	11.14	3.93	0.68	11.93	0.35
4819	14.00	7.66	3.43	11.09	3.66	0.63	11.77	0.28
4858	13.2 monte ponte	7.43	3.55	10.98	3.60	0.61	11.64	0.92
4862	13.1 valle ponte	7.43	3.47	10.90	3.69	0.63	11.60	0.42
4891	12.00	7.57	3.21	10.78	3.81	0.68	11.52	0.62
4938	11.00	7.08	3.55	10.63	3.73	0.63	11.34	0.75
5027	10.00	6.37	4.02	10.39	3.60	0.57	11.05	0.59
5078	9.00	6.22	4.05	10.27	3.63	0.58	10.94	0.37
5118	8.00	5.98	4.19	10.17	3.44	0.54	10.78	0.30
5156	7.00	5.98	4.13	10.11	3.51	0.55	10.73	0.50
5201	6.00	5.54	4.56	10.10	2.97	0.44	10.55	0.66
5207	5.20	4.81	5.36	10.17	2.38	0.33	10.46	-1.27
5225	5.10	4.81	5.16	9.97	2.71	0.38	10.34	0.83
5230	5.00	4.81	5.15	9.96	2.72	0.38	10.34	0.86
5244	4.50	4.82	5.16	9.98	2.42	0.34	10.28	0.80
5246	4.00	4.82	5.03	9.85	2.90	0.41	10.28	0.87
5248	3.50	4.82	5.15	9.97	2.43	0.34	10.27	0.43
5298	3.00	4.80	5.10	9.90	2.50	0.35	10.22	-0.85
5351	2.00	4.79	5.04	9.83	2.75	0.39	10.22	-1.03
5398	1.00	4.22	5.68	9.90	2.08	0.28	10.12	-1.39
5410	0.90	4.16	5.74	9.90	2.07	0.28	10.11	-0.90
5411	imbocco copertura Brignole	4.45	5.31	9.76	2.10	0.29	9.99	0.64
5537	0.97	4.00	5.23	9.23	3.06	0.43	9.70	1.18





		BIS	AGNO Tr	=50 anni				
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
5538	0.96	3.97	4.82	8.79*	2.60	0.38	9.13	0.00
5550	0.96	3.92	3.70	7.62*	3.12	0.52	8.12	0.00
5578	0.95	3.82	3.70	7.52*	3.38	0.56	8.10	0.00
5598	0.94	3.76	3.70	7.46*	3.51	0.58	8.09	0.00
5617	0.93	3.69	3.70	7.39*	3.68	0.61	8.08	0.00
5635	0.92	3.63	3.70	7.33*	3.80	0.63	8.06	0.00
5654	0.91	3.57	3.70	7.27*	3.94	0.65	8.06	0.00
5672	0.90	3.50	3.70	7.2*	4.10	0.68	8.06	0.00
5691	0.89	3.44	3.70	7.14*	4.21	0.70	8.04	0.00
5710	0.88	3.38	3.70	7.08*	4.25	0.70	8.00	0.00
5730	0.87	3.31	3.70	7.01*	4.32	0.72	7.96	0.00
5790	0.87	3.10	3.70	6.8*	4.33	0.72	7.75	0.00
5850	0.74	2.90	3.70	6.6*	4.34	0.72	7.56	0.00
5950	0.73	2.56	3.70	6.26*	4.35	0.72	7.22	0.00
6050	0.72	2.22	3.47	5.69	4.71	0.81	6.82	0.23
6119	0.71	1.90	3.21	5.11	5.70	1.02	6.77	0.49
6120	0.70	0.48	4.63	5.11	3.61	0.54	5.77	1.14
6243	0.69	0.03	4.55	4.58	3.70	0.55	5.28	1.22
6698	7 copertura	-1.61	4.07	2.46	4.19	0.66	3.35	1.70
6698	7bis copertura	-1.61	4.07	2.46	4.11	0.65	3.32	1.26
6798	8.00	-1.97	3.82	1.85	4.40	0.72	2.84	1.51
6798	8bis	-1.97	3.82	1.85	4.29	0.70	2.79	2.21
6898	9 copertura	-2.18	3.38	1.20	4.87	0.84	2.41	2.65
6898	9bis foce	-2.18	3.38	1.20	4.74	0.82	2.34	2.56
6986	10 foce	-3.00	3.81	0.81	4.26	0.70	1.73	2.19
7088	11 foce	-5.00	5.68	0.68	0.72	0.10	0.71	2.32

### Tr=200 anni

	BISAGNO Tr=200 anni										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	v	Fr	н	Franco			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]			
472	82.00	34.00	5.09	39.09	3.86	0.55	39.84	0.91			
533	81.00	33.64	5.28	38.92	3.81	0.53	39.66	0.78			
608	80.00	33.49	5.23	38.72	3.71	0.52	39.42	1.06			
630	79.00	33.55	5.14	38.69	3.54	0.50	39.33	1.03			
655	78.40	32.88	5.85	38.73	3.15	0.42	39.23	0.87			
656	78.30	32.88	5.84	38.72	3.15	0.42	39.23	0.22			





BISAGNO Tr=200 anni										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	٧	Fr	н	Franco		
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]		
669	78.20	32.75	5.02	37.77	3.93	0.56	38.56	1.69		
672	78.10	32.75	5.00	37.75	3.96	0.56	38.55	1.72		
717	77.00	32.27	5.36	37.63	3.87	0.53	38.39	0.68		
762	76.00	32.09	5.42	37.51	3.83	0.52	38.25	0.39		
830	75.00	31.99	5.39	37.38	3.66	0.50	38.06	-0.25		
924	74.00	31.80	5.46	37.26	3.33	0.45	37.82	-1.11		
973	73.40	31.56	5.59	37.15	3.41	0.46	37.74	-0.59		
974	73.30	31.56	5.58	37.14	3.38	0.46	37.72	-1.08		
983	73.20	31.46	4.63	36.09	4.09	0.61	36.94	0.38		
987	73.10	31.43	4.65	36.08	4.07	0.60	36.92	0.35		
1028	72.00	31.60	4.37	35.97	3.92	0.60	36.76	-0.32		
1086	71.00	31.48	4.43	35.91	3.40	0.52	36.50	0.19		
1131	70.00	30.91	5.00	35.91	3.00	0.43	36.37	0.34		
1221	RilARPAL_63	31.28	4.53	35.81	2.86	0.43	36.22	-0.57		
1328	68.00	30.04	5.58	35.62	3.14	0.42	36.12	-0.97		
1351	67.40	29.69	6.03	35.72	2.63	0.34	36.07	-1.32		
1353	67.30	29.69	6.03	35.72	2.62	0.34	36.07	-0.70		
1357	67.20	29.59	2.46	32.05	7.03	1.43	34.57	2.25		
1398	66.00	27.39	4.19	31.58	4.52	0.71	32.62	1.82		
1460	65.00	26.95	4.34	31.29	4.44	0.68	32.29	1.80		
1527	64.00	26.63	4.40	31.03	4.23	0.64	31.94	1.38		
1576	63.40	25.60	5.38	30.98	3.63	0.50	31.65	2.86		
1578	63.30	25.58	5.40	30.98	3.61	0.50	31.64	2.83		
1581	63.20	25.56	4.95	30.51	4.15	0.60	31.39	3.29		
1588	63.10	25.48	5.01	30.49	4.07	0.58	31.34	1.62		
1643	62.00	25.80	4.47	30.27	4.06	0.61	31.11	1.36		
1723	61.00	25.31	4.53	29.84	4.67	0.70	30.95	1.08		
1812	60.00	25.45	4.02	29.47	4.12	0.66	30.34	0.64		
1936	59.00	23.81	5.24	29.05	3.99	0.56	29.86	-0.06		
1975	58.40	23.38	5.55	28.93	3.96	0.54	29.73	0.09		
1976	58.30	23.36	5.58	28.94	3.94	0.53	29.73	-0.58		
1983	58.20	23.20	4.80	28.00	4.76	0.69	29.15	1.02		
1987	58.10	23.12	4.87	27.99	4.67	0.68	29.10	1.03		
2025	57.00	21.94	5.92	27.86	4.45	0.58	28.87	0.53		
2089	56.00	22.34	5.20	27.54	4.74	0.66	28.69	0.46		
2131	55.40	21.80	5.59	27.39	4.42	0.60	28.38	2.26		
2134	55.20	21.77	5.50	27.27	4.52	0.61	28.31	1.24		
2135	55.10	21.75	5.52	27.27	4.51	0.61	28.30	1.23		
2247	54.00	22.59	4.19	26.78	5.37	0.84	28.25	0.54		





		BISA	AGNO Tr=	:200 anni				
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
2347	53.00	21.77	4.25	26.02	5.54	0.86	27.58	0.91
2381	52.00	21.87	3.86	25.73	6.02	0.98	27.58	1.10
2435	51.00	22.10	3.07	25.17	5.94	1.08	26.97	1.29
2487	50.00	22.09	2.57	24.66	6.67	1.33	26.93	1.68
2540	48.90	19.26	4.33	23.59	4.58	0.70	24.66	2.48
2589	48.00	19.12	4.24	23.36	4.72	0.73	24.49	2.70
2639	47.00	18.97	4.14	23.11	4.84	0.76	24.30	2.84
2666	45.10	18.67	4.42	23.09	3.98	0.60	23.90	1.76
2687	44.75	18.85	4.11	22.96	4.24	0.67	23.88	2.82
2691	RilARPAL_82	18.57	4.27	22.84	4.51	0.70	23.87	3.48
2748	44.00	18.65	3.92	22.57	5.02	0.81	23.85	3.02
2784	43.00	18.54	3.90	22.44	4.62	0.75	23.53	2.97
2791	42.10	18.51	3.87	22.38	4.72	0.77	23.52	3.18
2793	42.00	18.51	3.86	22.37	4.74	0.77	23.51	3.19
2804	41.00	17.30	5.06	22.36	4.56	0.65	23.42	3.12
2830	40.00	17.44	4.85	22.29	4.37	0.63	23.26	2.96
2936	38.00	17.14	4.92	22.06	3.83	0.55	22.81	2.29
3246	37.00	16.00	5.85	21.85	2.99	0.39	22.31	-0.05
3250	36.00	16.00	5.88	21.88	2.86	0.38	22.30	-0.08
3320	35.35	15.53	6.25	21.78	2.94	0.38	22.22	-0.44
3366	RilARPAL_86	14.39	7.42	21.81	2.80	0.33	22.21	-0.79
3373	35.30	15.18	6.59	21.77	2.84	0.35	22.18	-0.77
3374	35.20	15.18	6.59	21.77	2.84	0.35	22.18	-1.77
3390	35.10	15.13	4.35	19.48	4.62	0.71	20.57	1.47
3394	35.00	15.18	4.26	19.44	4.69	0.73	20.56	1.56
3415	RilARPAL_88	13.97	5.55	19.52	3.39	0.46	20.10	1.50
3442	34.00	13.82	5.57	19.39	3.68	0.50	20.08	0.82
3547	33.00	13.77	5.32	19.09	3.90	0.54	19.86	0.22
3587	32.30	14.29	4.60	18.89	4.30	0.64	19.83	-0.19
3588	32.20	14.29	4.60	18.89	4.31	0.64	19.83	1.61
3592	32.10	14.24	3.52	17.76	5.94	1.01	19.56	0.89
3595	32.00	14.24	3.49	17.73	5.98	1.02	19.55	0.92
3640	31.50	12.93	4.33	17.26	5.12	0.79	18.60	1.25
3646	31.00	12.75	4.49	17.24	4.96	0.75	18.49	1.26
3726	30.00	12.60	4.23	16.83	4.80	0.74	18.01	1.01
3841	29.00	12.25	4.11	16.36	4.61	0.73	17.44	0.64
3927	26.80	12.15	3.68	15.83	5.01	0.83	17.11	2.87
3932	26.30	12.10	3.70	15.80	5.01	0.83	17.07	0.91





		BISA	AGNO Tr=	200 anni				
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
4113	25.00	10.10	4.79	14.89	4.43	0.65	15.89	0.53
4383	24.00	9.52	4.65	14.17	4.64	0.69	15.27	0.13
4384	23.00	9.51	4.93	14.44	3.81	0.55	15.18	0.66
4438	22.00	9.32	4.89	14.21	4.22	0.61	15.12	0.99
4497	21.00	9.15	4.94	14.09	4.12	0.59	14.95	1.08
4515	20.50	8.99	5.09	14.08	3.98	0.56	14.89	0.98
4530	20.25	8.62	5.51	14.13	3.65	0.50	14.81	0.93
4538	20.00	8.43	5.72	14.15	3.51	0.47	14.78	0.90
4547	19.30	8.43	5.70	14.13	3.53	0.47	14.77	0.88
4549	19.20	8.43	5.73	14.16	3.41	0.45	14.75	-0.16
4563	19.10	8.41	5.23	13.64	3.66	0.51	14.32	1.34
4573	19. monte salto	8.76	4.71	13.47	4.08	0.60	14.31	1.86
4599	18.00	8.60	4.63	13.22	4.63	0.69	14.31	1.73
4662	17.00	8.23	4.69	12.92	5.16	0.76	14.27	0.77
4721	16.00	7.74	4.92	12.66	4.88	0.70	13.87	-0.26
4771	15.00	7.83	4.63	12.46	4.79	0.71	13.63	-0.87
4791	14.66	7.76	4.66	12.42	4.59	0.68	13.49	-0.92
4793	14.33	7.75	4.67	12.42	4.56	0.67	13.48	-0.93
4819	14.00	7.66	4.75	12.41	4.24	0.62	13.32	-1.04
4858	13.2 monte ponte	7.43	4.98	12.41	3.94	0.56	13.20	-0.51
4862	13.1 valle ponte	7.43	4.83	12.26	4.05	0.59	13.10	-0.94
4891	12.00	7.57	4.62	12.19	4.04	0.60	13.02	-0.79
4938	11.00	7.08	5.05	12.13	3.83	0.54	12.88	-0.75
5027	10.00	6.37	5.70	12.07	3.67	0.49	12.75	-1.09
5078	9.00	6.22	5.81	12.03	3.68	0.49	12.72	-1.39
5118	8.00	5.98	6.01	11.99	3.21	0.42	12.51	-1.52
5156	7.00	5.98	5.99	11.97	3.09	0.40	12.46	-1.36
5201	6.00	5.54	6.50	12.04	2.70	0.34	12.41	-1.28
5207	5.20	4.81	7.29	12.10	2.41	0.28	12.40	-3.20
5225	5.10	4.81	7.08	11.89	2.73	0.33	12.27	-1.09
5230	5.00	4.81	7.08	11.89	2.68	0.32	12.25	-1.07
5244	4.50	4.82	7.09	11.91	2.45	0.29	12.22	-1.13
5246	4.00	4.82	6.96	11.78	2.93	0.35	12.22	-1.06
5248	3.50	4.82	7.09	11.91	2.46	0.30	12.22	-1.51
5298	3.00	4.80	7.08	11.88	2.52	0.30	12.21	-2.83
5351	2.00	4.79	7.07	11.86	2.59	0.31	12.20	-3.06
5398	1.00	4.22	7.75	11.97	2.11	0.24	12.19	-3.46
5410	0.90	4.16	7.83	11.99	1.98	0.23	12.19	-2.99





	BISAGNO Tr=200 anni											
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	V	Fr	Н	Franco				
[m]	.5 002.00	[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]				
5411	imbocco copertura Brignole	4.45	5.95	10.40	3.54	0.46	11.04	0.00				
5537	0.97	4.00	6.40	10.40	3.22	0.41	10.93	0.00				
5538	0.96	3.97	4.82	8.79*	3.07	0.45	9.27	0.00				
5550	0.96	3.92	3.70	7.62*	4.26	0.71	8.54	0.00				
5578	0.95	3.82	3.70	7.52*	4.38	0.73	8.50	0.00				
5598	0.94	3.76	3.70	7.46*	4.35	0.72	8.42	0.00				
5617	0.93	3.69	3.70	7.39*	4.47	0.74	8.41	0.00				
5635	0.92	3.63	3.70	7.33*	4.57	0.76	8.39	0.00				
5654	0.91	3.57	3.70	7.27*	4.65	0.77	8.37	0.00				
5672	0.90	3.50	3.70	7.2*	4.78	0.79	8.36	0.00				
5691	0.89	3.44	3.70	7.14*	4.86	0.81	8.34	0.00				
5710	0.88	3.38	3.70	7.08*	4.94	0.82	8.32	0.00				
5730	0.87	3.31	3.70	7.01*	5.01	0.83	8.29	0.00				
5790	0.87	3.10	3.70	6.8*	5.15	0.85	8.15	0.00				
5850	0.74	2.90	3.70	6.6*	5.15	0.85	7.95	0.00				
5950	0.73	2.56	3.70	6.26*	5.16	0.86	7.62	0.00				
6050	0.72	2.22	3.70	5.92*	5.19	0.86	7.29	0.00				
6119	0.71	1.90	3.70	5.6*	5.23	0.87	6.99	0.00				
6120	0.70	0.48	5.22	5.70	3.85	0.54	6.45	0.55				
6243	0.69	0.03	5.11	5.14	3.96	0.56	5.94	0.66				
6698	7 copertura	-1.61	4.53	2.92	4.60	0.69	3.99	1.24				
6698	7bis copertura	-1.61	4.53	2.92	4.52	0.68	3.96	0.80				
6798	8.00	-1.97	4.24	2.27	4.86	0.75	3.47	1.09				
6798	8bis	-1.97	4.23	2.26	4.77	0.74	3.42	1.80				
6898	9 copertura	-2.18	3.71	1.53	5.48	0.91	3.06	2.32				
6898	9bis foce	-2.18	3.70	1.52	5.36	0.89	2.98	2.24				
6986	10 foce	-3.00	3.96	0.96	5.03	0.81	2.25	2.04				
7088	11 foce	-5.00	5.68	0.68	0.90	0.12	0.72	2.32				

## Tr=500 anni

	BISAGNO Tr=500 anni										
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н	Franco			
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]			
472	82.00	34.00	6.08	40.08	4.23	0.55	41.00	-0.08			
533	81.00	33.64	6.32	39.96	4.09	0.52	40.81	-0.26			
608	80.00	33.49	6.33	39.82	3.90	0.50	40.60	-0.04			





		BIS	AGNO T	r=500 anni	<u> </u>			
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
630	79.00	33.55	6.26	39.81	3.75	0.48	40.53	-0.09
655	78.40	32.88	6.97	39.85	3.42	0.41	40.44	-0.26
656	78.30	32.88	6.97	39.85	3.42	0.41	40.44	-0.91
669	78.20	32.75	6.08	38.83	4.11	0.53	39.69	0.63
672	78.10	32.75	6.06	38.81	4.12	0.53	39.68	0.66
717	77.00	32.27	6.46	38.73	3.95	0.50	39.53	-0.42
762	76.00	32.09	6.55	38.64	3.88	0.48	39.41	-0.74
830	75.00	31.99	6.57	38.56	3.67	0.46	39.25	-1.43
924	74.00	31.80	6.68	38.48	3.37	0.42	39.05	-2.33
973	73.40	31.56	6.80	38.36	3.58	0.44	39.01	-1.80
974	73.30	31.56	6.80	38.36	3.58	0.44	39.01	-2.30
983	73.20	31.46	5.40	36.86	4.64	0.64	37.95	-0.40
987	73.10	31.43	5.42	36.85	4.63	0.63	37.94	-0.42
1028	72.00	31.60	5.14	36.74	4.44	0.62	37.74	-1.09
1086	71.00	31.48	5.22	36.70	3.84	0.54	37.45	-0.60
1131	70.00	30.91	5.79	36.70	3.46	0.46	37.30	-0.45
1221	RilARPAL_63	31.28	5.32	36.60	3.30	0.46	37.16	-1.36
1328	68.00	30.04	6.46	36.50	3.34	0.42	37.07	-1.85
1351	67.40	29.69	6.99	36.68	2.72	0.33	37.06	-2.28
1353	67.30	29.69	7.01	36.70	2.64	0.32	37.05	-1.68
1357	67.20	29.59	2.94	32.53	7.08	1.32	35.08	1.77
1398	66.00	27.39	4.81	32.20	4.71	0.69	33.33	1.19
1460	65.00	26.95	4.93	31.88	4.81	0.69	33.06	1.21
1527	64.00	26.63	4.99	31.62	4.61	0.66	32.70	0.79
1576	63.40	25.60	5.99	31.59	4.00	0.52	32.40	2.25
1578	63.30	25.58	6.01	31.59	3.98	0.52	32.39	2.22
1581	63.20	25.56	5.90	31.46	4.23	0.56	32.37	2.34
1588	63.10	25.48	5.98	31.46	4.15	0.54	32.33	0.65
1643	62.00	25.80	5.49	31.29	4.11	0.56	32.15	0.34
1723	61.00	25.31	5.61	30.92	4.74	0.64	32.07	-0.01
1812	60.00	25.45	5.21	30.66	4.19	0.59	31.56	-0.55
1936	59.00	23.81	6.54	30.35	4.10	0.51	31.21	-1.36
1975	58.40	23.38	6.84	30.22	4.17	0.51	31.11	-1.20
1976	58.30	23.36	6.86	30.22	4.16	0.51	31.10	-1.86
1983	58.20	23.20	5.75	28.95	5.23	0.70	30.34	0.07
1987	58.10	23.12	5.82	28.94	5.15	0.68	30.29	0.08
2025	57.00	21.94	6.90	28.84	4.87	0.59	30.05	-0.45
2089	56.00	22.34	6.21	28.55	5.18	0.66	29.92	-0.55
2131	55.40	21.80	6.65	28.45	4.88	0.60	29.66	1.20





BISAGNO Tr=500 anni								
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н	Franco
[m]	ID GEZIONE	[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
2134	55.20	21.77	6.21	27.98	5.20	0.67	29.35	0.53
2135	55.10	21.75	6.22	27.97	5.19	0.66	29.34	0.52
2247	54.00	22.59	4.86	27.45	6.05	0.88	29.31	-0.13
2347	53.00	21.77	4.92	26.69	6.24	0.90	28.67	0.25
2381	52.00	21.87	4.53	26.40	6.65	1.00	28.66	0.43
2435	51.00	22.10	3.76	25.86	6.64	1.09	28.10	0.60
2487	50.00	22.09	3.26	25.35	7.31	1.29	28.07	0.99
2540	48.90	19.26	5.26	24.52	5.12	0.71	25.85	1.55
2589	48.00	19.12	5.17	24.29	5.31	0.75	25.72	1.77
2639	47.00	18.97	5.08	24.05	5.45	0.77	25.56	1.90
2666	45.10	18.67	5.43	24.10	4.81	0.66	25.28	0.75
2687	44.75	18.85	4.96	23.81	5.23	0.75	25.20	1.97
2691	RilARPAL_82	18.57	5.18	23.75	5.28	0.74	25.17	2.57
2748	44.00	18.65	4.76	23.41	5.80	0.85	25.12	2.17
2784	43.00	18.54	4.72	23.26	5.30	0.78	24.70	2.15
2791	42.10	18.51	4.70	23.21	5.37	0.79	24.68	2.35
2793	42.00	18.51	4.68	23.19	5.38	0.79	24.67	2.37
2804	41.00	17.30	5.87	23.17	5.29	0.70	24.60	2.31
2830	40.00	17.44	5.66	23.10	5.13	0.69	24.44	2.15
2936	38.00	17.14	5.74	22.88	4.67	0.62	24.00	1.47
3246	37.00	16.00	6.73	22.73	3.70	0.46	23.43	-0.93
3250	36.00	16.00	6.78	22.78	3.55	0.43	23.42	-0.98
3320	35.35	15.53	7.11	22.64	3.60	0.43	23.30	-1.30
3366	RilARPAL_86	14.39	8.36	22.75	3.15	0.35	23.26	-1.73
3373	35.30	15.18	7.53	22.71	3.22	0.37	23.23	-1.71
3374	35.20	15.18	7.52	22.70	3.21	0.37	23.23	-2.70
3390	35.10	15.13	5.27	20.40	4.92	0.68	21.63	0.55
3394	35.00	15.18	5.18	20.36	4.96	0.70	21.61	0.64
3415	RilARPAL_88	13.97	6.50	20.47	3.86	0.48	21.23	0.55
3442	34.00	13.82	6.48	20.30	4.16	0.52	21.18	-0.09
3547	33.00	13.77	6.15	19.92	4.50	0.58	20.95	-0.61
3587	32.30	14.29	5.46	19.75	4.77	0.65	20.91	-1.05
3588	32.20	14.29	5.46	19.75	4.77	0.65	20.91	0.75
3592	32.10	14.24	4.30	18.54	6.35	0.98	20.60	0.11
3595	32.00	14.24	4.28	18.52	6.36	0.98	20.58	0.13
3640	31.50	12.93	5.18	18.11	5.62	0.79	19.72	0.40
3646	31.00	12.75	5.34	18.09	5.40	0.75	19.57	0.40
3726	30.00	12.60	5.10	17.70	5.62	0.80	19.31	0.15





BISAGNO Tr=500 anni								
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Y	PL	٧	Fr	Н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
3841	29.00	12.25	5.00	17.25	5.14	0.73	18.59	-0.25
3927	26.80	12.15	4.68	16.83	5.50	0.81	18.37	1.87
3932	26.30	12.10	4.66	16.76	5.51	0.81	18.31	-0.05
4113	25.00	10.10	5.85	15.95	4.93	0.65	17.19	-0.53
4383	24.00	9.52	5.58	15.10	4.94	0.67	16.35	-0.80
4384	23.00	9.51	5.85	15.36	3.93	0.52	16.14	-0.26
4438	22.00	9.32	5.88	15.20	4.22	0.56	16.11	0.00
4497	21.00	9.15	5.94	15.09	4.41	0.58	16.08	0.07
4515	20.50	8.99	6.09	15.08	4.30	0.56	16.02	-0.02
4530	20.25	8.62	6.52	15.14	3.98	0.50	15.95	-0.08
4538	20.00	8.43	6.74	15.17	3.83	0.47	15.92	-0.12
4547	19.30	8.43	6.72	15.15	3.84	0.47	15.91	-0.14
4549	19.20	8.43	6.75	15.18	3.75	0.46	15.90	-1.18
4563	19.10	8.41	6.09	14.50	4.37	0.57	15.47	0.48
4573	19. monte salto	8.76	5.62	14.38	4.61	0.62	15.46	0.95
4599	18.00	8.60	5.52	14.12	5.03	0.68	15.40	0.83
4662	17.00	8.23	5.55	13.78	5.46	0.74	15.30	-0.10
4721	16.00	7.74	5.84	13.58	5.39	0.71	15.05	-1.18
4771	15.00	7.83	5.63	13.46	5.19	0.70	14.83	-1.87
4791	14.66	7.76	5.68	13.44	4.97	0.67	14.70	-1.94
4793	14.33	7.75	5.69	13.44	4.94	0.66	14.69	-1.95
4819	14.00	7.66	5.79	13.45	4.65	0.62	14.55	-2.08
4858	13.2 monte ponte	7.43	6.17	13.60	4.30	0.55	14.54	-1.70
4862	13.1 valle ponte	7.43	5.77	13.20	4.49	0.60	14.23	-1.88
4891	12.00	7.57	5.57	13.14	4.35	0.59	14.11	-1.74
4938	11.00	7.08	6.02	13.10	4.13	0.54	13.96	-1.72
5027	10.00	6.37	6.70	13.07	3.71	0.46	13.77	-2.09
5078	9.00	6.22	6.84	13.06	3.71	0.45	13.76	-2.42
5118	8.00	5.98	7.03	13.01	3.79	0.46	13.75	-2.54
5156	7.00	5.98	7.04	13.02	3.69	0.44	13.71	-2.41
5201	6.00	5.54	7.56	13.10	3.38	0.39	13.68	-2.34
5207	5.20	4.81	8.36	13.17	2.72	0.30	13.54	-4.27
5225	5.10	4.81	8.20	13.01	2.75	0.31	13.40	-2.21
5230	5.00	4.81	8.20	13.01	2.70	0.30	13.38	-2.19
5244	4.50	4.82	8.23	13.05	2.48	0.28	13.36	-2.27
5246	4.00	4.82	8.11	12.93	2.91	0.33	13.36	-2.21
5248	3.50	4.82	8.22	13.04	2.49	0.28	13.36	-2.64
5298	3.00	4.80	8.24	13.04	2.48	0.28	13.36	-3.99





BISAGNO Tr=500 anni								
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
5351	2.00	4.79	8.24	13.03	2.43	0.27	13.33	-4.23
5398	1.00	4.22	8.97	13.19	1.59	0.17	13.32	-4.68
5410	0.90	4.16	9.08	13.24	1.21	0.13	13.32	-4.24
5411	imbocco copertura Brignole	4.45	5.95	10.40	4.31	0.56	11.35	0.00
5537	0.97	4.00	6.40	10.40	3.47	0.44	11.02	0.00
5538	0.96	3.97	4.82	8.79*	3.32	0.48	9.35	0.00
5550	0.96	3.92	3.70	7.62*	4.52	0.75	8.66	0.00
5578	0.95	3.82	3.70	7.52*	4.52	0.75	8.56	0.00
5598	0.94	3.76	3.70	7.46*	4.53	0.75	8.51	0.00
5617	0.93	3.69	3.70	7.39*	4.59	0.76	8.46	0.00
5635	0.92	3.63	3.70	7.33*	4.69	0.78	8.45	0.00
5654	0.91	3.57	3.70	7.27*	4.79	0.80	8.44	0.00
5672	0.90	3.50	3.70	7.2*	4.85	0.81	8.40	0.00
5691	0.89	3.44	3.70	7.14*	4.89	0.81	8.36	0.00
5710	0.88	3.38	3.70	7.08*	4.95	0.82	8.33	0.00
5730	0.87	3.31	3.70	7.01*	5.05	0.84	8.31	0.00
5790	0.87	3.10	3.70	6.8*	5.31	0.88	8.24	0.00
5850	0.74	2.90	3.70	6.6*	5.57	0.92	8.18	0.00
5950	0.73	2.56	3.70	6.26*	5.60	0.93	7.86	0.00
6050	0.72	2.22	3.70	5.92*	5.64	0.94	7.54	0.00
6119	0.71	1.90	3.70	5.6*	5.65	0.94	7.23	0.00
6120	0.70	0.48	5.57	6.05	3.97	0.54	6.85	0.20
6243	0.69	0.03	5.43	5.46	4.12	0.56	6.33	0.34
6698	7 copertura	-1.61	4.80	3.19	4.81	0.70	4.37	0.97
6698	7bis copertura	-1.61	4.80	3.19	4.74	0.69	4.34	0.53
6798	8.00	-1.97	4.49	2.52	5.12	0.77	3.85	0.85
6798	8bis	-1.97	4.48	2.51	5.03	0.76	3.80	1.55
6898	9 copertura	-2.18	3.91	1.73	5.81	0.94	3.45	2.12
6898	9bis foce	-2.18	3.90	1.72	5.69	0.92	3.37	2.04
6986	10 foce	-3.00	4.11	1.11	5.44	0.86	2.62	1.89
7088	11 foce	-5.00	5.68	0.68	1.01	0.13	0.73	2.32





### Rio Fereggiano

### Tr=50 anni

FEREGGIANO Tr=50 anni								
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	V	Fr	н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
129	670	81.19	1.41	82.60	4.51	1.21	83.63	8.10
384	Sezione chiusa	73.54	2.01	75.55	4.75	1.07	76.70	5.99
498	580	70.60	1.13	71.73	5.97	1.80	73.54	9.88
636	546	59.87	1.71	61.58	3.88	0.95	62.35	9.24
760	500	57.18	1.44	58.62	4.26	1.13	59.54	5.49
875	460	54.15	1.42	55.57	3.95	1.06	56.37	6.58
1014	425	49.19	1.99	51.18	3.92	0.89	51.96	1.21
1110	403 valle ponte	48.00	1.29	49.29	4.18	1.18	50.18	8.51
1138	400	47.06	1.48	48.54	4.09	1.07	49.39	5.70
1169	390	46.21	1.51	47.72	5.44	1.41	49.22	0.86
1189	380 monte ponte	45.33	1.45	46.78	3.70	0.98	47.47	6.82
1192	passerella 38 - 41	45.87	0.83	46.70	3.78	1.33	47.43	6.07
1204	40.4	45.02	1.40	46.42	4.38	1.18	47.40	5.60
1244	38	43.83	1.19	45.02	5.01	1.47	46.30	3.66
1287	35	41.75	1.20	42.95	4.17	1.21	43.84	3.36
1331	31	40.55	1.35	41.90	5.48	1.50	43.43	2.95
1356	330	38.85	1.81	40.66	5.32	1.26	42.10	2.19
1396	320	37.10	2.04	39.14	4.50	1.01	40.16	2.38
1421	310	36.52	2.02	38.54	4.43	0.99	39.54	2.32
1499	300	34.64	2.12	36.76	4.42	0.97	37.75	3.02
1545	290	33.55	2.12	35.67	4.96	1.09	36.93	2.03
1562	280	33.19	1.97	35.16	5.83	1.33	36.89	1.48
1575	270	32.18	2.23	34.41	3.71	0.79	35.11	1.39
1584	260	31.45	2.83	34.28	3.96	0.75	35.08	1.42
1589	250	31.36	2.84	34.20	2.79	0.53	34.59	1.50
1606	240	30.52	3.45	33.97	3.13	0.54	34.47	0.37
1649	230	28.75	3.05	31.80	2.71	0.50	32.17	1.57
1713	220	26.73	3.52	30.25	3.43	0.58	30.85	0.99
1760	210	25.91	3.34	29.25	2.53	0.44	29.57	0.56
1795	200	25.18	3.41	28.59	3.12	0.54	29.09	0.31
1826	190 monte ponte	24.41	3.57	27.98	4.07	0.69	28.83	-0.22
1832	183 valle ponte	24.40	3.34	27.74	4.47	0.78	28.75	0.03





		FERE	GGIANO	Tr=50 anı	ni			
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	٧	Fr	Н	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
1849	180 monte ponte	23.71	3.14	26.85	2.67	0.48	27.21	0.10
1858	173 valle ponte	23.69	2.62	26.31	3.30	0.65	26.86	0.99
1892	170 monte ponte	22.80	2.89	25.69	2.58	0.48	26.03	0.66
1895	163 valle ponte	22.78	2.69	25.47	2.84	0.55	25.88	1.07
1943	160	22.15	2.45	24.60	4.87	0.99	25.81	0.94
1961	150	19.90	4.32	24.22	5.17	0.79	25.58	0.61
1992	140	19.20	3.70	22.9*	3.78	0.63	23.63	0.00
2074	130	17.55	3.55	21.1*	3.47	0.59	21.71	0.00
2167	120	15.30	4.70	20*	3.31	0.49	20.56	0.00
2257	110	14.30	4.60	18.9*	2.88	0.43	19.32	0.00
2336	100	13.40	3.90	17.3*	3.31	0.54	17.86	0.00
2389	90	12.90	3.85	16.75*	3.49	0.57	17.37	0.00
2410	80	12.60	3.90	16.5*	3.42	0.55	17.10	0.00
2428	70	12.30	4.00	16.3*	3.39	0.54	16.89	0.00
2429	60	12.20	3.80	16*	3.80	0.62	16.73	0.00
2496	50	12.01	3.49	15.5*	3.94	0.67	16.29	0.00
2592	40	11.35	3.65	15*	4.52	0.75	16.04	0.00
2725	30	10.94	3.66	14.6*	4.55	0.76	15.65	0.00
2744	20	10.70	3.60	14.3*	4.46	0.75	15.31	0.00
2789	10	10.30	4.15	14.45*	3.71	0.58	15.15	0.00
2795	0	8.80	5.80	14.60	0.24	0.03	14.60	1.73

## Tr=200 anni

	FEREGGIANO Tr=200 anni										
PROGRESSIVA	ID Comingo	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	Н	Franco			
[m]	Sezione	[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]			
129	670	81.19	1.96	83.15	5.30	1.21	84.58	7.55			
384	Sezione chiusa	73.54	2.81	76.35	5.56	1.06	77.93	5.19			
498	580	70.6	1.56	72.16	7.07	1.81	74.71	9.44			
636	546	59.87	2.16	62.03	4.37	0.95	63.00	8.79			
760	500	57.18	1.99	59.17	4.86	1.10	60.37	4.94			
875	460	54.15	1.81	55.96	4.67	1.11	57.06	6.19			
1014	425	49.19	2.55	51.74	4.57	0.91	52.81	0.65			





		FER	EGGIANC	Tr=200 a	nni			
PROGRESSIVA	ID Sezione	Quota fondo	Υ	PL	V	Fr	н	Franco
[m]	Sezione	[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
1110	403 valle ponte	48	1.76	49.76	5.03	1.21	51.05	8.04
1138	400	47.06	1.91	48.97	4.90	1.13	50.19	5.27
1169	390	46.21	1.92	48.13	6.26	1.44	50.12	0.46
1189	380 monte ponte	45.33	1.87	47.20	4.43	1.03	48.20	6.40
1192	passerella 38 - 41	45.87	1.24	47.11	4.49	1.29	48.13	5.66
1204	40.4	45.02	1.82	46.84	5.01	1.19	48.12	5.18
1244	38	43.83	1.60	45.43	5.83	1.47	47.16	3.25
1287	35	41.75	1.76	43.51	4.88	1.17	44.72	2.80
1331	31	40.55	1.92	42.47	6.11	1.41	44.37	2.38
1356	330	38.85	2.57	41.42	5.96	1.19	43.23	1.43
1396	320	37.1	2.87	39.97	5.10	0.96	41.29	1.55
1421	310	36.52	2.88	39.40	5.03	0.95	40.69	1.46
1499	300	34.64	3.02	37.66	4.88	0.90	38.87	2.12
1545	290	33.55	3.17	36.72	5.30	0.95	38.15	0.98
1562	280	33.19	3.08	36.27	5.98	1.09	38.09	0.36
1575	270	32.18	3.42	35.60	4.41	0.76	36.59	0.20
1584	260	31.45	3.96	35.41	3.99	0.64	36.22	0.29
1589	250	31.36	3.99	35.35	3.13	0.50	35.84	0.36
1606	240	30.52	4.73	35.25	3.21	0.47	35.77	-0.91
1649	230	28.75	4.06	32.81	3.11	0.49	33.31	0.56
1713	220	26.73	4.51	31.24	4.01	0.60	32.05	0.01
1760	210	25.91	4.19	30.10	2.77	0.43	30.49	-0.29
1795	200	25.18	4.30	29.48	3.69	0.57	30.17	-0.58
1826	190 monte ponte	24.41	4.48	28.89	4.96	0.75	30.14	-1.13
1832	183 valle ponte	24.4	4.25	28.65	5.32	0.82	30.09	-0.89
1849	180 monte ponte	23.71	4.11	27.82	3.20	0.50	28.34	-0.87
1858	173 valle ponte	23.69	3.56	27.25	3.79	0.64	27.99	0.05
1892	170 monte ponte	22.8	3.82	26.62	2.70	0.44	26.99	-0.27
1895	163 valle ponte	22.78	3.78	26.56	2.82	0.46	26.97	-0.02
1943	160	22.15	3.70	25.85	4.36	0.72	26.81	-0.31
1961	150	19.9	5.78	25.68	3.80	0.50	26.41	-0.85
1992	140	19.2	3.70	22.9*	3.82	0.63	23.64	0.00





		FER	EGGIANO	Tr=200 a	nni			
PROGRESSIVA	ID Comingo	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н	Franco
[m]	Sezione	[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
2074	130	17.55	3.55	21.1*	3.50	0.59	21.72	0.00
2167	120	15.3	4.70	20*	3.53	0.52	20.63	0.00
2257	110	14.3	4.60	18.9*	3.25	0.48	19.44	0.00
2336	100	13.4	3.90	17.3*	3.69	0.60	17.99	0.00
2389	90	12.9	3.85	16.75*	3.85	0.63	17.51	0.00
2410	80	12.6	3.90	16.5*	3.76	0.61	17.22	0.00
2428	70	12.3	4.00	16.3*	3.72	0.59	17.00	0.00
2429	60	12.2	3.80	16*	4.13	0.68	16.87	0.00
2496	50	12.01	3.49	15.5*	4.30	0.73	16.44	0.00
2592	40	11.35	3.65	15*	5.12	0.85	16.33	0.00
2725	30	10.94	3.66	14.6*	5.32	0.89	16.04	0.00
2744	20	10.7	3.60	14.3*	5.27	0.89	15.72	0.00
2789	10	10.3	4.15	14.45*	4.41	0.69	15.44	0.00
2795	0	8.8	5.80	14.60	0.28	0.04	14.60	1.73

## Tr=500 anni

		FER	EGGIANO	) Tr=500 a	nni			
PROGRESSIVA	ID Comingo	Quota fondo	Y	PL	V	Fr	н	Franco
[m]	Sezione	[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
129	670	81.19	2.45	83.64	5.82	1.18	85.37	7.06
384	Sezione chiusa	73.54	3.53	77.07	6.15	1.04	78.99	4.47
498	580	70.6	1.96	72.56	7.78	1.77	75.64	9.04
636	546	59.87	2.54	62.41	4.87	0.98	63.62	8.41
760	500	57.18	2.35	59.53	5.47	1.14	61.05	4.58
875	460	54.15	2.13	56.28	5.16	1.13	57.64	5.87
1014	425	49.19	3.02	52.21	4.98	0.91	53.48	0.18
1110	403 valle ponte	48	2.15	50.15	5.65	1.23	51.77	7.65
1138	400	47.06	2.27	49.33	5.48	1.16	50.86	4.91
1169	390	46.21	2.26	48.47	6.75	1.43	50.79	0.11
1189	380 monte ponte	45.33	2.23	47.56	4.93	1.05	48.79	6.05
1192	passerella 38 - 41	45.87	1.60	47.47	4.97	1.25	48.72	5.30
1204	40.4	45.02	2.18	47.20	5.34	1.15	48.66	4.82
1244	38	43.83	2.01	45.84	6.25	1.41	47.83	2.84





1287	35	41.75	2.43	44.18	5.11	1.05	45.51	2.13
1331	31	40.55	2.82	43.37	6.23	1.19	45.34	1.48
1356	330	38.85	3.90	42.75	6.16	0.99	44.68	0.10
1396	320	37.1	4.24	41.34	5.25	0.81	42.74	0.18
1421	310	36.52	4.25	40.77	5.21	0.81	42.15	0.09
1499	300	34.64	4.25	38.89	4.94	0.77	40.13	0.89
1545	290	33.55	4.15	37.7*	5.96	0.93	39.51	0.00
1562	280	33.19	3.44	36.63*	7.34	1.26	39.37	0.00
1575	270	32.18	3.62	35.8*	5.92	0.99	37.58	0.00
1584	260	31.45	4.25	35.7*	4.68	0.72	36.82	0.00
1589	250	31.36	4.34	35.7*	3.94	0.60	36.49	0.00
1606	240	30.52	5.33	35.85	3.36	0.46	36.42	-1.51
1649	230	28.75	4.65	33.40	3.31	0.49	33.96	-0.03
1713	220	26.73	5.05	31.78	4.38	0.62	32.75	-0.54
1760	210	25.91	4.67	30.58	2.95	0.44	31.02	-0.77
1795	200	25.18	4.77	29.95	4.09	0.60	30.80	-1.05
1826	190 monte ponte	24.41	4.97	29.38	5.11	0.73	30.71	-1.62
1832	183 valle ponte	24.4	4.72	29.12	5.48	0.80	30.65	-1.36
1849	180 monte ponte	23.71	4.59	28.30	3.89	0.58	29.07	-1.35
1858	173 valle ponte	23.69	4.21	27.90	4.28	0.67	28.83	-0.60
1892	170 monte ponte	22.8	4.65	27.45	2.77	0.41	27.84	-1.11
1895	163 valle ponte	22.78	4.59	27.37	2.82	0.42	27.78	-0.83
1943	160	22.15	4.52	26.67	4.56	0.68	27.73	-1.13
1961	150	19.9	6.66	26.56	4.48	0.55	27.58	-1.73
1992	140	19.2	3.70	22.9*	4.36	0.72	23.87	0.00
2074	130	17.55	3.55	21.1*	3.53	0.60	21.73	0.00
2167	120	15.3	4.70	20*	3.67	0.54	20.69	0.00
2257	110	14.3	4.60	18.9*	3.38	0.50	19.48	0.00
2336	100	13.4	3.90	17.3*	3.84	0.62	18.05	0.00
2389	90	12.9	3.85	16.75*	4.02	0.65	17.57	0.00
2410	80	12.6	3.90	16.5*	3.92	0.63	17.28	0.00
2428	70	12.3	4.00	16.3*	3.88	0.62	17.06	0.00
2429	60	12.2	3.80	16*	4.29	0.70	16.94	0.00
2496	50	12.01	3.49	15.5*	4.51	0.77	16.53	0.00
2592	40	11.35	3.65	15*	5.32	0.89	16.44	0.00
2725	30	10.94	3.66	14.6*	5.85	0.97	16.34	0.00





2744	20	10.7	3.60	14.3*	5.83	0.98	16.03	0.00
2789	10	10.3	4.15	14.45*	4.90	0.77	15.67	0.00
2795	0	8.8	5.80	14.60	0.32	0.04	14.61	1.73

Di seguito si riportano le tabelle relative alla criticità idraulica di ogni struttura di attraversamento localizzata nel tratto di indagine del Torrente Bisagno e del Rio Fereggiano per i tre tempi di ritorno considerati. Le tabelle riportano le seguenti informazioni:

- o Nome sezione: denominazione della struttura di attraversamento;
- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
- o ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- o Intradosso: livello altimetrico [m s.l.m.] dell'intradosso della struttura;
- o Estradosso: livello altimetrico [m s.l.m.] dell'estradosso della struttura;
- o PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- o Franco: franco idraulico in [m] rispetto all'intradosso.

Il valori di livello del pelo libero e di franco idraulico sono riportati per ognuno dei tre tempi di ritorno considerati: 50, 200 e 500 anni.





			BISA	GNO							
Struttura				Stato attuale							
	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	Estradosso	TR	50	TR2	200	TR5	i00	
Nome Sezione	PROGR.		illiauosso	EStrauosso	P.L.	Franco	P.L.	Franco	P.L.	Franco	
	[m]	ID	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	
Ponte Feritore - monte	656	78.3	38.94	40.25	37.34	1.60	38.72	0.22	39.85	-0.91	
Ponte Guglielmetti - monte	974	73.3	36.06	37.43	35.41	0.65	37.14	-1.08	38.36	-2.30	
Ponte Carrega - monte	1353	67.3	35.02	37.04	34.07	0.95	35.72	-0.70	36.70	-1.68	
Ponte Veronelli - monte	1578	63.3	33.81	34.01	29.99	3.82	30.98	2.83	31.59	2.22	
Ponte Bezzecca - monte	1976	58.3	28.36	29.45	27.67	0.69	28.94	-0.58	30.22	-1.86	
Passerella pedonale - monte	2131	55.4	29.65	30.87	26.53	3.12	27.39	2.26	28.45	1.20	
Ponte Monteverde - monte	2666	45.1	24.85	26.35	22.00	2.85	23.09	1.76	24.10	0.75	
Copertura Staglieno - monte	2936	38	24.35	25.45	20.49	3.86	22.06	2.29	22.88	1.47	
Ponte Campanella - monte	3374	35.2	20	21	20.30	-0.30	21.77	-1.77	22.70	-2.70	
Passerella pedonale - monte	3588	32.2	20.5	21.7	17.82	2.68	18.89	1.61	19.75	0.75	
Passerella pedonale - monte	3927	26.8	18.7	19.9	14.72	3.98	15.83	2.87	16.83	1.87	
Copertura Marassi - monte	4113	25	15.42	16.52	13.63	1.79	14.89	0.53	15.95	-0.53	
Ponte Serra - monte	4549	19.2	14	15.2	12.68	1.32	14.16	-0.16	15.18	-1.18	
Passerella Firpo - monte	4858	13.2	11.9	13.1	10.98	0.92	12.41	-0.51	13.60	-1.70	
Ponte Castelfidardo - monte	5207	5.2	8.9	10.5	10.17	-1.27	12.10	-3.20	13.17	-4.27	
Copertura Brignole (imbocco)	5410	0.9	10.4	13.5	9.90	0.50	11.99	-1.59	13.24	-2.84	
Copertura Brignole (sezione critica)	5550	0.96	7.62	-	7.62	0.00	7.62	0.00	7.62	0.00	
Copertura Brignole (inizio 1° lotto)	6243	0.69	5.8	-	4.58	1.22	5.14	0.66	5.46	0.34	

A-26





	FEREGGIANO										
Struttura			Stato attuale								
	DDOCD	SEZIONE	Intradagaa	Fatradasas	TR50		TR200		TR500		
Nome Sezione	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	Estradosso	P.L.	Franco	P.L.	Franco	P.L.	Franco	
	[m]	ID	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	
Imbocco copertura Largo Merlo	1189	38	52.77	54	46.78	5.99	47.20	5.57	47.56	5.21	
Ponte sez.18 - monte	1849	18	26.95	27.2	26.85	0.10	27.82	-0.87	28.30	-1.35	
Ponte sez.17 - monte	1892	17	26.35	27.1	25.69	0.66	26.62	-0.27	27.45	-1.10	
Imbocco copertura terminale	1986	14	22.9	24	24.30	-1.40	25.85	-2.95	26.79	-3.89	





# ALLEGATO B MIKE 11 RR UHM

Descrizione Tecnica









## B MIKE 11 RR UHM – Descrizione tecnica

Il modulo UHM del codice di calcolo MIKE 11 del DHI (Danish Hydraulic Institute) simula il deflusso generato su un bacini idrografico da un singolo evento di pioggia attraverso l'utilizzo del metodo dell'idrogramma unitario.

La pioggia netta è calcolata assumendo che le perdite nel bacino per infiltrazione possano essere descritte con un valore iniziale fisso e costante, con un valore variabile proporzionale (di fatto come nel metodo razionale) o con il metodo CN del SCS (Soil Conservation Service, 1972).

La pioggia netta è quindi trasformata in deflusso nel corso d'acqua attraverso il metodo dell'idrogramma unitario. Il modulo UHM permette di utilizzare sia l'idrogramma adimensionale del SCS sia qualsiasi idrogramma definito dall'utente e memorizzato in un database, il quale gestisce anche le condizioni al contorno, ovvero le serie storiche dei dati registrati di precipitazione e di portata.

## B.1 Modello delle perdite nel bacino

Durante un evento di pioggia parte dell'acqua caduta si infiltra nel suolo. Una grossa parte di tale acqua evapora o raggiunge la rete superficiale come deflusso sotterraneo, quindi dopo un lungo lasso di tempo dalla fine dell'evento.

Quindi risulta ragionevole in questo tipo di modellazione idrologica descrivere la maggior parte dell'infiltrazione come perdita.

La quantità di pioggia che raggiunge il corso d'acqua durante un evento, cioè la precipitazione totale meno la perdita, è definita come pioggia netta.

Il modulo UHM include tre metodi differenti per il calcolo della pioggia netta e sono tutti modelli a parametri concentrati, ovvero che considerano ciascun bacino come un'unità e quindi i parametri utilizzati rappresentano valori medi sul bacino.

Tutti i metodi includono un fattore di aggiustamento areale che tiene conto dell'eventuale distribuzione non uniforme della precipitazione sul bacino.

## B.2 Perdita proporzionale (metodo razionale)

Le perdite sono assunte proporzionali al tasso di precipitazione; la pioggia netta viene espressa come:  $P_{netta} = a^*A_f^*P$ 

con

P<sub>netta</sub> = pioggia netta (mm/ora);

a = coefficiente di deflusso (fra 0 e 1);

 $A_f$  = fattore areale:

P = precipitazione totale (mm/ora).

## B.3 Perdita fissa iniziale e perdita costante

Il metodo prevede che non si produca pioggia netta fino a quando la perdita iniziale, definita a priori dall'utente, non sia stata raggiunta. Di conseguenza la pioggia netta è generata solo quando il tasso di precipitazione è superiore a uno specifico tasso costante di perdita.

$$0 \qquad ----> \qquad \text{per } P_{\text{somma}} < I_a + I_c * \text{dt}$$
 
$$P_{\text{netta}} = \{ A_f * P^* I_c \qquad \qquad ----> \qquad \qquad \text{per } P_{\text{somma}} > I_a * P^* I_c * P^* I$$





 $P_{netta}$  = pioggia netta (mm/ora);

P<sub>somma</sub> = pioggia cumulata dall'inizio dell'evento (mm);

I<sub>a</sub> = perdita iniziale definita dall'utente (mm);

I<sub>c</sub> = tasso costante di perdita definito dall'utente (mm/ora);

A<sub>f</sub> = fattore areale:

P = precipitazione totale (mm/ora);

dt = passo di tempo di calcolo (ore).

In questo modo il metodo tiene conto del fatto che le perdite sono maggiori all'inizio dell'evento di precipitazione.

## B.4 Perdita con metodo SCS

Il metodo del U.S. Soil Conservation Service (SCS) è stato sviluppato nel 1972 per il calcolo delle perdite durante un evento di pioggia.

Durante un evento di pioggia, l'altezza di pioggia netta (o deflusso diretto  $P_e$ ) è sempre minore o uguale all'altezza totale di pioggia P; perciò, quando inizia il deflusso superficiale, l'altezza d'acqua immagazzinata nel bacino,  $F_a$ , è minore o uguale alla massima ritenzione potenziale S.

Si individua una certa quantità di pioggia I<sub>a</sub> (perdita iniziale) per la quale non si produce alcun deflusso; in tal modo il deflusso potenziale è definito come P-I<sub>a</sub>.

L'ipotesi del metodo SCS è che il rapporto fra le quantità attuali e potenziali di perdita e precipitazione sia uguale e cioè:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Per il principio di continuità è:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando le precedenti equazioni si ottiene:

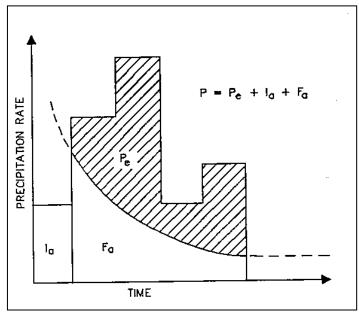
$$P_e = \frac{\left(P - I_a\right)^2}{P - I_a + S}$$

che è l'equazione base per il calcolo dell'altezza di pioggia netta o deflusso diretto del metodo SCS.

B-2 22800503-01-00202.docx







Variabili del metodo SCS

Sono stati utilizzati i risultati di numerosi piccoli bacini sperimentali per ottenere la relazione empirica:

$$I_a = 0.2 \cdot S$$

Ne deriva l'equazione base utilizzata nel modello UHM:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S}$$

Il fattore S, ritenzione massima potenziale del bacino, è calcolato attraverso il parametro adimensionale CN, utilizzando la seguente formula empirica derivata dall'analisi del fenomeno afflussi-deflussi su un gran numero di bacini:

$$S = ((1000CN) - 10) \cdot 25.4$$
 (mm)

Il valore del parametro CN (curve number) dipende dal tipo di suolo, dall'uso del suolo e dalle condizioni precedenti di imbibizione del suolo all'inizio dell'evento di pioggia (confronta tabella 1 allegata). Varia fra 0, cioè nessun deflusso, e 100, cioè pioggia netta pari alla pioggia totale. Per bacini naturali generalmente CN varia fra 50 e 100.

Le classi di appartenenza del suolo nel metodo SCS sono:

- A. Suoli ad alta permeabilità, costituiti da sabbie grossolane, silt calcarei non consolidati ed omogenei.
- B. Suoli a moderata permeabilità, costituiti da sabbie limose ed argillose.





- C. Suoli a medio-bassa permeabilità, costituiti da argille e limi, con contenuti organici.
- D. Suoli a bassa permeabilità, costituiti da argille plastiche, con livello piezometrico permanentemente alto.

Il modello opera considerando tre diverse condizioni precedenti di imbibizione:

AMC (I) : condizioni secche, vicine all'appassimento;

AMC (II): condizione medie, vicine alla capacità del suolo;

AMC (III): condizioni bagnate, vicine alla saturazione.

Per ciascun passo di calcolo la pioggia netta è calcolata come la differenza fra la pioggia netta cumulata fra l'inizio e la fine del passo di tempo.

Il metodo SCS è stato sviluppato sulla base di eventi di pioggia giornalieri e di conseguenza il programma considera l'inizio di un nuovo periodo di 24 ore come un nuovo evento, cioè:

- ogni 24 ore AMC è aggiornato di una classe ogni 16 mm di pioggia caduti durante il periodo di simulazione;
- CN e S sono ricalcolati in relazione al valore aggiornato di AMC, utilizzando la tabella 2 allegata;
- il quantitativo di pioggia netta P<sub>e</sub> e resettato a zero.

## B.5 Modello dell'idrogramma unitario

Il metodo dell'idrogramma unitario è un semplice modello lineare che può essere usato per derivare l'idrogrammma risultante da un qualsiasi quantitativo di pioggia netta.

L'idrogramma unitario rappresenta la funzione di risposta impulsiva unitaria di un sistema idrologico lineare, ovvero l'idrogramma diretto di portata risultante da un'unità di pioggia netta nella durata  $t_{\rm r}$ .

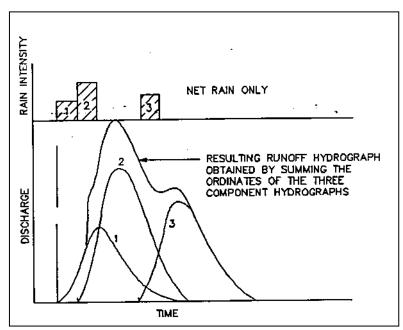
Le seguenti ipotesi sono la base del metodo:

- la pioggia netta ha intensità costante nella durata effettiva
- la pioggia netta è distribuita uniformemente sull'intero bacino idrografico
- il tempo di base dell'idrogramma di portata risultante da una pioggia netta di data durata è
  costante
- le ordinate di tutti gli idrogrammi di portata con una comune base di tempo sono direttamente proporzionali all'ammontare totale della pioggia netta rappresentata da ciascun idrogramma
- è applicato il principio di sovrapposizione degli idrogrammi risultanti da periodi in continuo o isolati di pioggia netta a intensità costante
- per un dato bacino, l'idrogramma risultante da una specifica pioggia netta riflette the condizioni invariabili del bacino.

B-4 22800503-01-00202.docx







Principio di sovrapposizione degli idrogrammi di portata.

In condizioni naturali le precedenti ipotesi non sono perfettamente soddisfatte. Tuttavia, in molti casi le condizioni idrologiche sono sufficientemente vicine alle ipotesi sopraddette in modo tale da generare risultati soddisfacenti.

In accordo con le sopraddette ipotesi, il modello ad ogni passo di tempo determina l'idrogramma corrispondente alla pioggia netta generata dal modello delle perdite nel bacino nello stesso passo di tempo, e aggiunge tale risposta al contributo di deflusso generato nel passo di tempo precedente.

## B.6 Tipi di idrogrammi unitari

Un idrogramma unitario è caratterizzato dalla durata della pioggia unitaria  $(t_r)$  e dal "lag time"  $(t_l)$  definito come la differenza di tempo fra il centro dell'evento unitario di pioggia e il picco di portata.

Il tempo di picco (T<sub>p</sub>), cioè il tempo dall'inizio dell'evento fino al momento in cui si verifica il picco di portata, può essere calcolato come:

$$T_p = t_r/2 + t_l$$

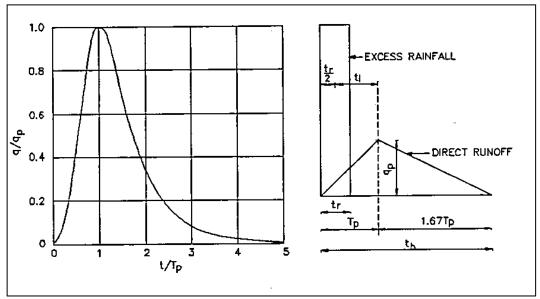
Il realtà l'idrogramma unitario per un dato bacino è unico. Tuttavia sono stati fatti molti sforzi per sviluppare un idrogramma unitario sintetico che potesse essere più e meno generalmente applicabile.

Nel presente modello sono specificati due tipi di idrogrammi unitari sintetici: l'SCS triangolare e l'SCS adimensionale.

L'utente può sceglierne uno dei due o decidere di utilizzare uno specifico idrogramma preso dal database.







Idrogrammi sintetici del Soil Conservation Service.

Il modello permette di inserire nel database tre tipi di idrogrammi unitari definiti dall'utente:

- un idrogramma adimensionale specificato come: portata diviso portata di picco (q/qp) funzione del tempo diviso tempo di picco (T/Tp)
- idrogrammi specifici per ciascun bacino, dimensionati e con le corrispondenti durate unitarie di pioggia tr
- idrogrammi unitari istantanei derivati dal metodo area-tempo.

Gli idrogrammi unitari istantanei sono automaticamente convertiti in idrogrammi, ovvero con una durata unitaria di precipitazione uguale al passo di calcolo dt, attraverso la formula:

$$q_{dt}(t) = (q(t) + q(t - dt)) / 2$$

dove:

q<sub>dt</sub>(t) è l'ordinata al tempo t dell'idrogramma convertito

q (t) è l'ordinata al tempo t dell'idrogramma istantaneo

- t è tempo di calcolo attuale
- dt è il passo di tempo di calcolo

L'utente deve specificare il "lag time" che deve essere utilizzato nei calcoli. Il programma mette quindi automaticamente nella giusta scala l'idrogramma applicato, facendo attenzione che l'area sotto la curva risulti unitaria.

Il "lag time" può anche essere calcolato dai dati caratteristici del bacino utilizzando la formula sperimentale del SCS:

B-6 22800503-01-00202.docx





$$t_{I} = \frac{\left(L \cdot 3,28 \cdot 10^{3}\right)^{0.8} \cdot \left(\frac{100\%_{CN}}{1900 \text{ Y}^{0.5}}\right)^{0.7}}{\left(1900 \text{ Y}^{0.5}\right)}$$

dove

t<sub>l</sub> = lag time (ore)

L = lunghezza del bacino (km)

CN = SCS curve number

Y = pendenza media del bacino (%)

Un idrogramma unitario derivato dalle curve area-tempo è considerato specifico del bacino. Di conseguenza non si può specificare un lag time arbitrario se si utilizza tale metodo. Il programma utilizza semplicemente il lag time implicitamente dato dalle curve area-tempo.

Il metodo area-tempo implementato nel modulo UHM descrive una pura traslazione dello ietogramma di pioggia netta attraverso la rete di drenaggio superficiale, descritta usando il tempo di percorrenza del canale di flusso. L'idrogramma in uscita ignora quindi gli effetti di immagazzinamento nel bacino.

## B.7 Passo di tempo di calcolo

Se si utilizza un idrogramma unitario definito dall'utente è l'utente stesso che deve verificare che il passo di tempo specificato corrisponda alla durata unitaria di pioggia dell'idrogramma unitario.

Se si utilizzano gli idrogrammi del SCS è suggerito un passo di tempo selezionato come il 22% del lag time ed in ogni caso non superiore al 27% del lag time.





B-8





ALLEGATO C MIKE 11 HD

Descrizione tecnica









## **PREMESSA**

MIKE 11 è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

La grande flessibilità del codice di calcolo permette di integrare, attraverso specifici moduli, le applicazioni idrodinamiche con fenomeni idrologici, trasporto solido, advezione-dispersione, qualità delle acque, ecologia, rendendo MIKE 11 uno strumento indispensabile per affrontare e risolvere molteplici problemi d'ingegneria fluviale quali, ad esempio:

- studi di idraulica fluviale e di propagazione dell'onda di piena;
- studi di idrologia e idrogeologia;
- supporto alla progettazione e gestione di opere idrauliche;
- · analisi della rottura dighe;
- analisi del trasposto solido e morfologia fluviale;
- modelli di previsione in tempo reale e di supporto decisionale:
- analisi dei fenomeni di intrusione del cuneo salino in fiumi ed estuari;
- studi di valutazione della qualità delle acque sia superficiali che sotterranee;
- analisi dello stato ecologico dei corsi d'acqua.

#### MIKE 11 è costituito dai seguenti moduli:

- HD (idrodinamico): simulazione del flusso in canali a pelo libero, costituisce la base per ulteriori moduli aggiuntivi;
- RR (afflussi-deflussi): modulo che consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc...), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc...) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo;
- AD (advezione-dispersione): simulazione del processo di advezione e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare;
- ECOLab (ecologico): simulazione di una serie di processi qualitativi, tra i quali il ciclo BOD-DO con nitrificazione-denitrificazione, il ciclo del fosforo, l'eutrofizzazione, il trasporto di metalli pesanti ecc.;





- ST (trasporto sedimenti): simulazione del trasporto solido di materiale non coesivo, in modalità disaccoppiata (senza variazione della geometria del fondo alveo) o accoppiata (calcolo delle trasformazioni morfologiche);
- FF/DA (previsioni in tempo reale): il modulo consente, assimilando i dati misurati in tempo reale su un bacino e/o corso d'acqua, di correggere la simulazione idrodinamica al fine di garantire una affidabilità massima sulla previsione di un evento di piena.

Particolarmente efficace risulta la possibilità di poter integrare il codice MIKE 11, con altri codici di calcolo della famiglia MIKE quali: MIKE 21 (MIKE FLOOD), per simulare in maniera combinata fenomeni 1D e 2D; MIKE SHE, per la modellazione di corpi idrici superficiali e sotterranei; WEST, per simulare in dettaglio i processi nell'impianto di trattamento ed il relativo impatto sul corso d'acqua recettore; MOUSE (MIKE URBAN FLOOD), simula le interferenze tra il corso d'acqua e la rete di drenaggio.

Di seguito si descrive il codice MIKE 11 HD.

#### MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE 11 ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

- · 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 quasi bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

L'adozione del programma di simulazione 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.

#### 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 e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.

C-2 22800503-01-00202.docx





 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 che reti idrauliche con maglie chiuse.

#### EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11, 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:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- 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:

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

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

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

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

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

dove:

A = area della sezione bagnata (m2);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m1/2 s-1);

g = accelerazione di gravità (m s-2);

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

Q = portata (m3/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m2 s-1).





## 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:

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

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.

#### APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

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

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

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

#### 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. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere 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: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla 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.

C-4 22800503-01-00202.docx





#### 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(Zj1). Zj2

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 conseque.

#### Tipo 7. Ponti

In MIKE 11 possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

#### 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:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{M^2AR^{4/3}}$$

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

#### CONDIZIONI INIZIALI

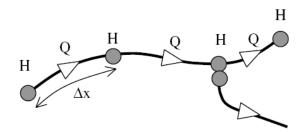
Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste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





#### METODO DI SOLUZIONE

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



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

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

#### 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. 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).

#### 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.

C-6





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.





C-8 22800503-01-00202.docx





ALLEGATO D MIKE 21 HD

Descrizione tecnica









#### **PREMESSA**

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

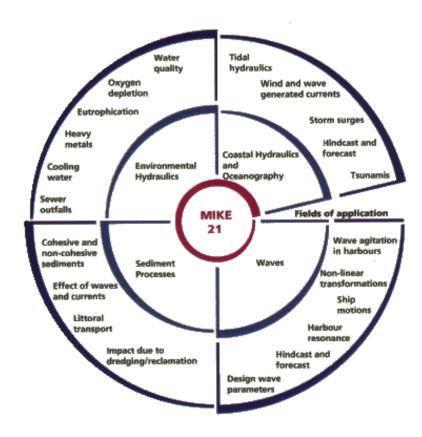
Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- · analisi impatto ambientale;
- · previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.







Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- CLASSIC GRID (Griglia classica singola):le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenza finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- MULTIPLE GRID (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- FLEXIBLE MESH (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la
  discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il
  dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non
  strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione
  di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare
  una risoluzione spaziale variabile;
- CURVILINEAR (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo fluviale MIKE 21 può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE 11, grazie al modulo MIKE FLOOD, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE URBAN CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

D-2 22800503-01-00202.docx





In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Di seguito si descrive il modulo MIKE 21 HD Classical Grid.

#### Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- · perdite di carico;
- attrito al fondo;
- · forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- · gradienti di pressione barometrica;
- · coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- · pozzi e sorgenti.

Come menzionato in precedenza, i risultati di una simulazione MIKE 21 HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo "Mud Transport";
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

Infine, per quanto riguarda le analisi dei fenomeni di esondazione, MIKE 21 può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia MIKE FLOOD al codice monodimensionale MIKE 11, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE URBAN, per la simulazione delle reti di drenaggio e collettamento urbano, schematizzando il dominio di calcolo in modo integrato 1D/2D.





Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 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 delle equazioni 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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

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;

pa (x,y,t) = pressione atmosferica;

ρw = densità dell'acqua;

x,y = coordinate spaziali;

t = tempo;





τxx, τxy, τyy = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità:

Sxx,Sxy,Syy = 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:

dipendente dal flusso locale:

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

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \Biggl( h E \!\!\!\! \frac{\partial u}{\partial x} \Biggr) \! + \! \frac{\partial}{\partial y} \! \Biggl( h E \!\!\!\! \frac{\partial u}{\partial y} \Biggr) \quad \text{(nella direzione x);}$$

Le 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 cs 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 (m3/s/m) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

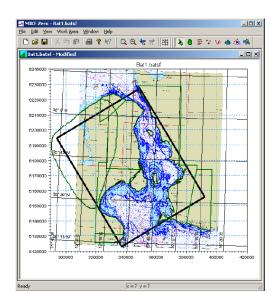


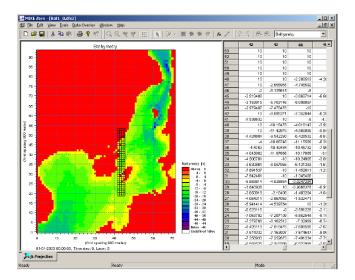


Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni plano-altimetriche della batimetria.

Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione "griglia multiplanested grid", che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto 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).





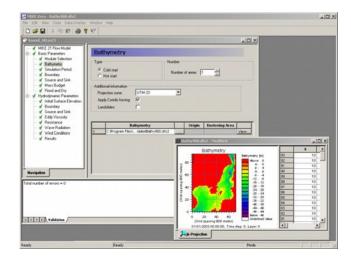
Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- · condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).

D-6 22800503-01-00202.docx







I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

